

**COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE**  
**SESSION DE 1980**

---



COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

---

COMITÉ CONSULTATIF

POUR

LA DÉFINITION DE LA SECONDE

---

9<sup>e</sup> SESSION — 1980  
(23-25 septembre)



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES, France

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



---

## NOTICE HISTORIQUE

---

### Les organes de la Convention du Mètre

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

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

Le Bureau International a son siège près de Paris, dans le domaine (43 520 m<sup>2</sup>) 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 qui interviennent dans les activités ci-dessus.

Le Bureau International fonctionne sous la surveillance exclusive du *Comité International des Poids et Mesures (CIPM)*, placé lui-même sous l'autorité de la *Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)*.

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

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

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

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

Une trentaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International ; ils font des recherches métrologiques ainsi que des mesures dont les résultats sont consignés dans des certificats portant sur des étalons des grandeurs ci-dessus. La dotation annuelle du Bureau International est de l'ordre de 7,500 000 francs-or (en 1980), soit environ 2 950 000 dollars U.S.

---

(1) Au 31 décembre 1980, quarante-cinq États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne (Rép. Fédérale d'), Allemande (Rép. Démocratique), Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Chine (Rép. Pop. de), Corée (Rép. de), Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Venezuela, Yougoslavie.

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

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

1. Le *Comité Consultatif d'Électricité* (CCE), créé en 1927.
2. Le *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie* (CCPR), nouveau nom donné en 1971 au *Comité Consultatif de Photométrie* (CCP) créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent (CCE) s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le *Comité Consultatif de Thermométrie* (CCT), créé en 1937.
4. Le *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre* (CCDM), créé en 1952.
5. Le *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde* (CCDS), créé en 1956.
6. Le *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants* (CCMRI), créé en 1958. En 1969, ce Comité Consultatif a institué quatre sections : Section I (Rayons X et  $\gamma$ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie  $\alpha$ ); cette dernière Section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II.
7. Le *Comité Consultatif des Unités* (CCU), créé en 1964 (ce Comité Consultatif a remplacé la « Commission du Système d'Unités » instituée par le CIPM en 1954).
8. Le *Comité Consultatif pour les Masses et les grandeurs apparentées* (CCM), créé en 1980.

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 hors commerce rassemble les articles publiés dans des revues et ouvrages scientifiques et techniques, ainsi que certains travaux publiés sous forme de rapports multicopiés).

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

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

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

---

**Comité International des Poids et Mesures**

*Secrétaire*  
J. DE BOER

*Vice-Présidents*  
P. HONTI, D. KIND

*Président*  
J. V. DUNWORTH

---

LISTE DES MEMBRES  
DU  
COMITÉ CONSULTATIF  
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

---

*Président*

B. GUINOT, membre du Comité International des Poids et Mesures,  
Directeur du Bureau International de l'Heure, Paris.

*Membres*

AMT FÜR STANDARDISIERUNG, MESSWESEN UND WARENPRÜFUNG [ASMW],  
Berlin.

BUREAU INTERNATIONAL DE L'HEURE [BIH], Paris.

BUREAU DES LONGITUDES, Paris.

COMITÉ CONSULTATIF INTERNATIONAL DES RADIOCOMMUNICATIONS [CCIR] de  
l'Union Internationale des Télécommunications, Genève.

COMMISSION NATIONALE DE L'HEURE [CNH], Paris.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [NRC], Ottawa.

INSTITUT DES MESURES PHYSICOTECHNIQUES ET RADIOTECHNIQUES DE  
L'U.R.S.S. [IMPR], Moscou.

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE GALILEO FERRARIS [IEN], Turin.

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

LABORATOIRE SUISSE DE RECHERCHES HORLOGÈRES [LSRH], Neuchâtel.  
NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [NBS], Boulder.  
NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [NPL], Teddington (Grande-Bretagne).  
NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [NRLM], Tsukuba (Japon).  
PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], Braunschweig.  
RADIO RESEARCH LABORATORIES [RRL], Tokyo.  
ROYAL GREENWICH OBSERVATORY [RGO], Hailsham.  
UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE [UAI].  
U.S. COAST GUARD [USCG], Washington.  
U.S. NAVAL OBSERVATORY [USNO], Washington.  
J. BONANOMI, Observatoire de Neuchâtel, Neuchâtel.  
A. ORTE, Instituto y Observatorio de Marina, San Fernando (Espagne).  
Le directeur du Bureau International des Poids et Mesures [BIPM],  
Sèvres.

---



ORDRE DU JOUR  
de la 9<sup>e</sup> Session

---

1. Progrès récents et attendus des étalons atomiques de fréquence et des horloges.
  2. Progrès récents et attendus des méthodes de comparaison de temps.
  3. Présentation du rapport du BIH sur l'établissement du TAI (Mr M. Granveaud).
  4. Présentation du rapport du Groupe de Travail du CCDS sur le pilotage du TAI (Mr H. M. Smith).
  5. Algorithmes de calcul des échelles de temps atomique.
  6. Discussion sur l'établissement du TAI (rôle des horloges de grande stabilité à long terme; rôle des étalons de fréquence).
  7. Définition du TAI dans les théories relativistes.
  8. Fonctionnement du système UTC.
  9. Questions diverses.
-

---

RAPPORT  
DU  
COMITÉ CONSULTATIF  
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

(9<sup>e</sup> Session – 1980)

AU  
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

par M. GRANVEAUD, Rapporteur

---

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS) a tenu sa 9<sup>e</sup> session au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres, au cours de six séances, les mardi 23, mercredi 24 et jeudi 25 septembre 1980.

Étaient présents :

B. GUINOT, membre du CIPM, président du CCDS.

Les délégués des laboratoires et organisations membres :

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung [ASMW],  
Berlin (M. KALAU).

Bureau International de l'Heure [BIH], Paris (M. GRANVEAUD).

Bureau des Longitudes, Paris (J. KOVALEVSKY).

Commission Nationale de l'Heure [CNH], Paris (J. RUTMAN).

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

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris [IEN], Torino  
(S. LESCHIUTTA).

Laboratoire de l'Horloge Atomique [LHA] du CNRS, Université de  
Paris-Sud, Orsay (C. AUDOIN).

Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères [LSRH], Neuchâtel  
(Ch. MENOUD).

National Bureau of Standards [NBS], Boulder (J. A. BARNES,  
D. W. ALLAN).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (J. McA. STEELE).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig  
(G. BECKER, K. DORENWENDT).

Radio Research Laboratories [RRL], Tokyo (M. KOBAYASHI).

Royal Greenwich Observatory [RGO], Hailsham (J. D. H. PILKINGTON).

Union Astronomique Internationale [UAI], (W. MARKOWITZ).

U.S. Naval Observatory [USNO], Washington (G. M. R. WINKLER).

L'un des membres nominativement désignés :

A. ORTE, Directeur de l'Instituto y Observatorio de Marina [OMSF]  
San Fernando, accompagné de J. BENAVENTE (OMSF).

Le Directeur du BIPM (P. GIACOMO).

Invités :

MA Feng-Ming, Institut National de Métrologie [NIM], Beijing.

R. KAARLS, Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft.

H. M. SMITH, Président du Comité de Direction du BIH.

Assistaient aussi à la session : J. TERRIEN, Directeur honoraire du BIPM ; T. J. QUINN, Sous-Directeur du BIPM ; J. AZOUBIB (BIPM, à la disposition du BIH) ; P. CARRÉ (BIPM).

Excusés :

Comité Consultatif International des Radiocommunications de l'Union Internationale des Télécommunications, Genève ; J. BONANOMI, membre nominativement désigné.

Absents :

Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques, Moscou ; National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba ; U.S. Coast Guard, Washington.

Après les souhaits de bienvenue de Mr Giacomo, Directeur du BIPM, et de Mr Guinot, Président du CCDS, la séance est ouverte.

Avec l'approbation du Comité Consultatif, le Président confie la tâche de rapporteur à Mr Granveaud.

### 1. Progrès récents et attendus des étalons atomiques de fréquence et des horloges

Mr *Audoin* résume les résultats obtenus depuis 1977 dans divers laboratoires français en ce qui concerne les étalons de fréquence.

Mr *Arditi*, à l'Institut d'Électronique Fondamentale, en collaboration avec J. L. Picqué du Laboratoire Aimé Cotton ont appliqué des méthodes de pompage optique à un appareil à jet de césium ; ils utilisent un laser à l'état solide pour créer une différence de population entre les niveaux de la transition hyperfine de l'état fondamental du césium 133. Le spectre de Ramsey des atomes de césium a été observé avec un excellent rapport signal/bruit. D'autre part, au même Institut on étudie des cavités supraconductrices présentant des coefficients de surtension de  $10^9$  à 1,6 K.

De son côté, le Laboratoire de Chronométrie et de Piézoélectricité de l'École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques a poursuivi l'étude des générateurs à quartz et a obtenu, en collaboration avec le NBS (Boulder), des résultats remarquables : une stabilité de fréquence de  $6 \times 10^{-14}$  sur 128 s a été mesurée.

Le Laboratoire de l'Horloge Atomique (LHA) a continué les études sur les masers à hydrogène, et notamment sur le déplacement de la fréquence de transition hyperfine associé aux collisions avec le revêtement de téflon du ballon de stockage. Une exactitude de  $6 \times 10^{-13}$  a été obtenue pour la fréquence de la transition hyperfine de l'atome d'hydrogène non perturbé ( $1\,420\,405\,751,773 \pm 0,001$  Hz). Des études ont été faites sur le bruit d'amplitude associé au bruit thermique du maser à hydrogène et les conditions permettant d'obtenir la meilleure stabilité de fréquence d'un tel oscillateur ont été établies. Mr *Audoin* précise que le maser à hydrogène du Centre National d'Études des Télécommunications est comparé à des horloges à césium et aux masers du LHA.

Des études sont faites au LHA sur un étalon de fréquence utilisant les ions de l'isotope 199 du mercure stockés dans une trappe radiofréquence cylindrique. Actuellement, une stabilité de fréquence  $\sigma(\tau) = 3,6 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$  a été obtenue pour  $\tau$  compris entre 10 et 3 500 s. D'autre part, le LHA étudie des étalons de fréquence optique. Il a montré l'intérêt d'utiliser la raie R 47 de l'iode pour stabiliser un laser à hélium-néon émettant à 612 nm ; une reproductibilité de  $2 \times 10^{-12}$  a été obtenue. Les résultats préliminaires sur les lasers à molécule diatomique sont intéressants.

Mr *Rutman* indique les résultats obtenus dans la mesure des fréquences de lasers au Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences (LPTF) ; la fréquence du laser à hélium-néon asservi sur l'absorption saturée du méthane a été mesurée à  $\pm 1,6 \times 10^{-10}$  près. Ce résultat est en accord avec ceux obtenus au National Bureau of Standards et au National Physical Laboratory. Des mesures de fréquence de lasers à  $\text{CO}_2$  asservis sur l'absorption saturée de  $\text{OsO}_4$  ont été entreprises pour réaliser de nouveaux étalons de fréquence dans la région de 30 THz.

Mr *Kalau* précise que la construction d'étalons de fréquence à jet de césium, utilisant des aimants hexapolaires, se poursuit dans son laboratoire (ASMW).

Mr *Kobayashi* rapporte les résultats obtenus au National Research Laboratory of Metrology (NRLM) et aux Radio Research Laboratories (RRL). A trois reprises, en 1977 et 1978, l'étalon primaire à césium NRLM-II a été évalué par comparaison avec deux étalons à césium Hewlett-Packard. L'incertitude totale d'un étalonnage réalisé avec cet appareil a été estimée à  $5 \times 10^{-13}$ . Il apparaît qu'une part importante de l'incertitude provient des étalons à césium commerciaux. Le calcul de la fréquence du TAI a été effectué en utilisant les résultats UTC–UTC(RRL) et

UTC - UTC(TAO) publiés dans les Rapports Annuels du BIH. L'intervalle unitaire du TAI a été trouvé trop long de  $2 \text{ à } 3 \times 10^{-13}$  en novembre 1977, février et juillet 1978.

L'effet Majorana dans les étalons atomiques de fréquence a été étudié en détail. Pour un étalon à jet de césium utilisant des aimants hexapolaires, Mr *Kobayashi* indique que l'effet peut être pratiquement annulé. D'autre part, l'effet Majorana a été utilisé dans les masers à hydrogène pour éliminer les atomes qui ne sont pas dans un état intéressant : environ 74 % de ceux-ci ont pu être éliminés. Cette méthode simple de sélection des atomes paraît tout à fait intéressante.

Mr *Becker* rappelle que l'étalon à césium CS1 de la PTB a été mis en service en 1969 et qu'il est resté pratiquement inchangé jusqu'en 1976. Des améliorations ont été apportées depuis à cet appareil : par exemple, la combinaison d'aimants hexapolaires et d'aimants quadripolaires. Quelques caractéristiques de CS1 sont soulignées : la vitesse des atomes de césium a une valeur moyenne de 92 m/s et sa dispersion est faible ; l'inhomogénéité du champ C longitudinal est très petite. Un avantage important est apporté par le petit diamètre (3 mm) du jet de césium. Des guides magnétiques permettent d'éviter les transitions de Majorana ; celles-ci pourraient conduire à des erreurs de fréquence de plusieurs  $10^{-13}$ . L'incertitude totale de CS1, obtenue comme la racine carrée de la somme des carrés des incertitudes (essentiellement de leurs limites supérieures), est de  $11 \times 10^{-15}$  ; la contribution la plus importante à cette valeur vient de l'incertitude du chemin suivi par le jet de césium. Mr *Becker* précise que, chaque semaine, le champ C et d'autres paramètres sont mesurés. Le renversement du jet est effectué toutes les six semaines.

De 1969 à juillet 1978, l'échelle TA(PTB) a été étalonnée environ 4 fois par an à l'aide de CS1. Mais il est apparu que TA(PTB), calculée à partir des données d'horloges commerciales, n'avait pas une stabilité suffisante pour garder en mémoire la fréquence de CS1. Par exemple, TA(PTB) présente des variations saisonnières qui proviennent des horloges commerciales. On peut se demander s'il est impossible que CS1 présente des variations saisonnières. A la connaissance de Mr *Becker*, la seule cause physique de telles variations pourrait être le changement de différence de phase du résonateur. Mais les renversements fréquents du jet de césium éliminent cette cause. La PTB a donc décidé d'utiliser CS1 en horloge ; depuis juillet 1978, CS1 est une horloge primaire comme celle du NRC.

Mr *Becker* termine sa présentation en posant la question du rôle des horloges primaires dans le calcul du TAI. Il lui paraît que celles-ci devraient jouer un rôle essentiel, du point de vue de l'exactitude et de la stabilité, ce qui n'est pas le cas actuellement car les horloges primaires reçoivent un poids maximal de 100 comme les horloges commerciales. Mr *Becker* signale que la PTB a une horloge primaire en construction ; environ 30 % du travail est fait.

Diverses questions sont posées à Mr *Becker* concernant les effets

possibles de l'environnement sur CS1. Mr *Winkler* remarque qu'un appareil aussi important peut être affecté par des gradients de température. Mr *Audoin* signale des décalages possibles de fréquence qui pourraient être dus à l'intégrateur. Enfin, le *Président* s'enquiert du contrôle de l'humidité qui pourrait avoir des effets importants sur l'électronique de CS1.

Mr *Barnes* présente les travaux du NBS. Le but de ces études est d'améliorer les connaissances fondamentales sur les étalons de fréquence et les horloges atomiques.

Les transitions de Majorana entre les niveaux de structure hyperfine et la distribution de phase dans la cavité sont étudiées dans les étalons à césium au moyen de la sélection optique d'états et de l'excitation hyperfréquence à deux fréquences et à deux cavités. Une étude importante pour les prochaines 5 à 10 années concerne les ions refroidis et stockés. Les premiers résultats obtenus au NBS indiquent que les ions peuvent être refroidis à moins de 1 K, ce qui réduit considérablement les effets Doppler du 1<sup>er</sup> et du 2<sup>e</sup> ordre. Des exactitudes de  $10^{-15}$  sont envisagées.

Des mesures récentes sur un maser à hydrogène passif ont fourni des résultats très prometteurs : une instabilité de  $1 \times 10^{-14}$  (bruit de scintillation) a été obtenue pour des durées d'échantillonnage de 1 à 27 jours. Plusieurs autres masers passifs vont être étudiés. Il est prévu de tenir compte des données de ces masers dans l'établissement de l'échelle UTC(NBS) et d'envoyer ces données au BIH.

Il apparaît important au NBS de développer une échelle de temps stable ; l'utilisation d'horloges très stables comme les masers à hydrogène passifs, de techniques nouvelles pour comparer les horloges et d'algorithmes de calcul fondés sur la théorie de Kalman devrait permettre d'atteindre le but recherché. Enfin, Mr *Barnes* indique que l'étalon primaire NBS-6 est évalué environ une fois par an. Une discussion s'ensuit concernant les étalons primaires de fréquence et les horloges primaires. Mr *Barnes* expose trois arguments contre l'utilisation en horloge d'un étalon primaire : 1) il y a incompatibilité entre les deux fonctionnements, l'évaluation d'un étalon amenant à interrompre la marche de l'appareil ; 2) les échelles fondées sur les horloges commerciales conviennent aux utilisateurs qui disposent eux-mêmes du même type d'horloge et un étalonnage par an du TAI satisfait la demande ; 3) enfin, point très important, l'utilisation d'un étalon primaire en horloge mobilise d'importantes ressources qui sont essentielles pour la recherche. On estime au NBS que les investissements dans la recherche (dans le domaine temps-fréquence) sont trop faibles, ce qui est dangereux à long terme. Mr *Costain* réplique que l'utilisation de l'étalon Cs V en horloge est extrêmement simple : cela représente 10 minutes de travail par jour, plus des mesures du champ C toutes les deux semaines et une évaluation complète une fois par an. Mr *Becker* ajoute qu'aucun coût additionnel n'est à prévoir lors de l'utilisation d'un étalon primaire en horloge.

Mr *Costain* indique qu'au NRC l'horloge Cs V continue à fonctionner de façon satisfaisante depuis 1975. Une évaluation complète de cette

horloge a eu lieu en septembre 1979 et aucun changement significatif de fréquence n'a été observé dans les limites d'incertitude de  $\pm 5 \times 10^{-14}$ . Une protection thermique a été disposée autour du tube en janvier 1980 mais elle ne semble pas avoir amélioré sa stabilité thermique. Les étalons CS1 de la PTB et Cs V du NRC montrent un accord remarquable depuis 3 ans (environ  $2 \times 10^{-14}$ ). Mr *Costain* pense que l'actuelle limitation des comparaisons de temps n'existera plus dans quelques années.

A la fin de 1979, les trois horloges primaires Cs VI A, B et C ont été évaluées et elles ont commencé à fonctionner en décembre 1979. La comparaison de ces appareils avec Cs V a permis de déceler certains défauts, notamment dans la partie électronique, qui affectent leur stabilité et leur exactitude. Il apparaît que les performances de ces trois horloges ne sont pas encore acceptables. Un travail important reste à accomplir pour qu'elles donnent satisfaction.

Mr *Steele* donne quelques indications sur la mise au point de l'étalon primaire NPL III. Un stagiaire chinois a activement travaillé à cette étude mais il existe toujours des problèmes de financement et de main-d'œuvre. D'autre part, des difficultés techniques, liées par exemple aux transitions de Majorana, subsistent. L'étalon a été redessiné selon un projet d'Holloway en utilisant des aimants hexapolaires.

Mr *Leschiutta* précise qu'aucun travail n'est fait dans son laboratoire (IEN) en ce qui concerne le césium. Par contre, on y poursuit des études sur des étalons à jet de magnésium et sur la synthèse de fréquence.

Mr *Menoud* signale le développement de masers à hydrogène passifs chez Oscilloquartz, Suisse.

Après ce tour de table, le *Président* demande à Mr *Winkler* de parler des étalons à césium commerciaux. Mr *Winkler* rappelle qu'actuellement, aux États-Unis, deux sociétés industrielles fabriquent des étalons à césium : Hewlett-Packard (HP) et Frequency and Time Systems (FTS). Les satellites du Global Positioning System (GPS) sont équipés d'étalons FTS. Il y a eu quelques problèmes liés au champ C, mais, en général, ces étalons donnent satisfaction. De son côté, HP a développé en 1960, en vue d'équiper les avions d'un système anticollision, un petit étalon à césium équipé d'un tube de 22 centimètres. Cet appareil a fait preuve d'une excellente stabilité à court terme ; par contre, on a constaté une mauvaise stabilité à long terme et une dérive de fréquence commune à plusieurs exemplaires. De manière générale, la fiabilité de ce petit étalon à césium ne paraît pas satisfaisante.

En ce qui concerne les masers à hydrogène, Mr *Winkler* précise que le Jet Propulsion Laboratory en fait fonctionner trois ; d'autre part, l'Applied Physics Laboratory construit des masers dessinés par la NASA. Mr *Costain* ajoute qu'en Australie le National Measurement Laboratory a un maser en marche depuis 10 ans avec une dérive de fréquence de  $4 \times 10^{-13}$ /an.

Un échange d'informations pratiques suit cet exposé ; elles concernent l'alimentation en courant des horloges (batterie ou secteur stabilisé),

l'environnement (il vaut mieux placer les horloges dans un local dont la température est naturellement stable plutôt que d'utiliser un conditionnement d'air), les dérives de fréquence des étalons à césium. Il apparaît nécessaire d'ajuster les paramètres d'un nouvel étalon commercial à césium — et notamment le champ C — après une ou deux semaines. La vérification régulière du champ C est importante mais elle demande une main-d'œuvre qualifiée. Diverses expériences effectuées à l'USNO ont montré : 1) que certaines horloges commerciales à césium ont un palier de scintillation de  $2 \text{ à } 4 \times 10^{-14}$ ; 2) que leur sensibilité thermique autour de la température ambiante peut varier de  $3 \text{ à } 15 \times 10^{-14}/^{\circ}\text{C}$  et qu'elle est positive ou négative; 3) que les gradients de température influencent de façon importante la fréquence de l'horloge. Mr *Rutman* relève que les étalons à césium de laboratoire se groupent en deux classes selon leur exactitude : d'une part trois appareils réalisant la seconde avec une inexactitude inférieure à  $10^{-13}$  et d'autre part plusieurs étalons dont l'inexactitude est nettement supérieure à  $10^{-13}$ . Une discussion s'ensuit sur les causes possibles de cet état de fait : un seul nombre ne suffit pas à qualifier un appareil ; d'autre part, l'incertitude attachée à un étalonnage ne tient compte que des perturbations connues et il existe encore certaines obscurités dans le fonctionnement des étalons à césium. Plusieurs participants soulignent l'importance d'avoir des étalons de plusieurs types, dans divers laboratoires, et de les comparer. Actuellement, l'accord entre les étalons à césium de laboratoire équipés d'aimants dipolaires (NBS, NRC) et ceux équipés d'aimants hexapolaires (PTB) donne confiance dans les résultats obtenus.

## 2. Progrès récents et attendus des méthodes de comparaison de temps

Un document très complet sur les comparaisons de temps par satellite a été préparé par Mr *Beehler* du NBS. Il commente les projets examinés par les membres du Groupe de travail 7/4 du CCIR. Par suite d'un malentendu, cette contribution a été distribuée tardivement et n'était pas disponible lors de la discussion du point 2. Elle a été examinée ultérieurement.

Le système LORAN-C reste actuellement très important pour les comparaisons de temps. Mr *Winkler* précise qu'en octobre 1979 et mars 1980, il y a eu restructuration des chaînes LORAN-C qui intéressent l'Amérique du Nord. Des transports d'horloge sont effectués pour contrôler la coordination des diverses chaînes. Néanmoins, les changements peuvent entraîner des discontinuités de  $0,5 \mu\text{s}$ . De façon générale, les garde-côtes américains qui ont la charge du LORAN-C procèdent par petits ajustements et ceux-ci sont notifiés au BIH. Mr *Winkler* pense que l'utilisation du LORAN-C restera encore durant quelque temps une méthode intéressante, notamment par sa simplicité d'utilisation, pour la comparaison des horloges. La réception par

plusieurs stations européennes d'une émission commune de LORAN-C conduit à des incertitudes de 50 à 80 ns ; la comparaison des échelles de temps du NRC et de la PTB par le LORAN-C est souvent excellente, l'incertitude étant inférieure à 100 ns. En cas de doute sur la qualité des liaisons par le LORAN-C, il serait intéressant d'utiliser les temps de réception des laboratoires qui reçoivent deux émissions (par exemple, le VSL reçoit la chaîne norvégienne et la chaîne atlantique nord). La possibilité d'étalonner les récepteurs de LORAN-C est évoquée ; elle nécessite l'achat d'un générateur étaloné de signaux. L'influence de la température est signalée par Mr Costain ; des perturbations de 0,6  $\mu$ s dans la réception de l'émission de Nantucket ont été observées au NRC. Enfin, Mr *Winkler* signale la sortie d'un nouveau récepteur de LORAN-C chez Austron ; ce récepteur peut être couplé avec un calculateur.

L'utilisation du Global Positioning System (GPS) pour les comparaisons de temps est discutée ensuite. Le *Président* rappelle qu'on peut utiliser le GPS soit en utilisation normale, soit en mode différentiel. Il demande à Mr *Winkler* de faire part des essais effectués à l'USNO. Un récepteur prototype de la Société Stanford a été utilisé pendant des durées variables allant jusqu'à 5 semaines. Avec les satellites équipés d'étalons à césium ou à rubidium, l'USNO a obtenu une précision de 10 ns (d'un jour à l'autre) en observant parfois une dérive. Pour l'inexactitude, il est difficile de se prononcer : elle est certainement inférieure à 100 ns. En conclusion, Mr *Winkler* trouve le récepteur satisfaisant, excepté son prix ; il pense qu'un prix de 25 000 dollars US, c'est-à-dire celui d'une horloge à césium, serait acceptable et qu'un tel prix pourrait être obtenu si une centaine d'unités étaient commandées. Une discussion sur le GPS s'ensuit. Il apparaît que les réceptions des émissions de plusieurs satellites GPS par un laboratoire devraient permettre une amélioration des performances. Mr *Allan* signale le développement par le NBS d'un récepteur GPS ; celui-ci est destiné à la comparaison d'horloges situées dans des laboratoires qui voient le même satellite. L'inexactitude attendue est de 10 ns. Le prix de base d'un récepteur — qui ne prend pas en compte les essais, la documentation et le bénéfice du fabricant — serait de l'ordre de 6 000 dollars US. Le *Président* indique que l'utilisation des pseudo-distances mesurées simultanément par des stations assez proches permet de calculer un arc d'orbite avec une précision suffisante pour obtenir une bonne exactitude des comparaisons d'horloges. Des simulations faites au BIH conduisent à des incertitudes de l'ordre de 10 ns pour des stations distantes de 1 000 km.

Mr *Costain* parle des résultats obtenus avec les satellites Hermès et Symphonie. Pendant un an, de juillet 1978 à juillet 1979, Hermès a permis de comparer les horloges du NRC, du NBS et de l'USNO avec une incertitude de 1,8 ns sur une durée de mesure de 15 minutes ; les fréquences des étalons du NRC et du NBS ont pu être comparées à  $2 \text{ à } 3 \times 10^{-14}$  près. Depuis juillet 1978, le NRC et l'Observatoire de Paris (LPTF) font des comparaisons de temps par le satellite Symphonie avec une précision de

l'ordre d'une nanoseconde pour une durée de mesure d'une dizaine de minutes. Depuis février 1980, la PTB s'est jointe à l'expérience. Les principales incertitudes dans les comparaisons des échelles de temps des laboratoires viennent des liaisons entre les stations de télécommunications spatiales et les laboratoires. L'expérience Symphonie est jugée utile et elle sera continuée en 1981. La participation des États-Unis ne semble guère possible car les dépenses correspondantes n'ont pas été prévues. Quelques précisions sont apportées par les autres participants à l'expérience Symphonie. Mr *Becker* indique que la somme des différences de temps entre les horloges des stations de télécommunication est voisine de 0 avec un écart-type de 10 ns; cette valeur de 10 ns lui semble caractéristique de l'instabilité des liaisons par Symphonie. Les mesures des retards des équipements sont parfois difficiles à effectuer; l'inexactitude des comparaisons de temps par Symphonie est estimée à environ 50 ns.

Diverses autres possibilités de comparaison de temps par satellite sont indiquées : OTS 2, satellite TV, satellite de télécommunication (station SATCOM), INTELSAT, COMSAT. Mr *Costain* présente un projet plus avancé qui utilise les satellites commerciaux Telesat dans la bande 4 à 6 GHz. Une expérience en cours utilise des stations ayant une puissance de 1 W et des antennes de 3 mètres de diamètre. Dans une première étape, il est prévu d'effectuer les liaisons NRC-NBS, NRC-USNO et de les rendre complètement automatiques. Puis des liaisons NRC-Europe seront envisagées. Le coût d'une station devrait être de l'ordre de 25 000 dollars US.

Mr *Leschiutta* présente les grandes lignes du projet LASSO (Laser Synchronization from Stationary Orbit). La caractéristique essentielle de ce projet est que les dates d'arrivée des impulsions laser qui portent l'information de temps seront enregistrées à bord du satellite. D'autre part, la présence de rétro réflecteurs sur le satellite permettra de connaître les temps de trajet des impulsions. Une inexactitude d'une nanoseconde est attendue. Le satellite SIRIO 2 sera utilisé en 1981 pour cette expérience. Mais il est prévu de constituer un équipement LASSO qui pourrait aisément être placé sur d'autres satellites. Les scientifiques américains proposent une expérience semblable à LASSO avec la navette spatiale; ils envisagent en outre de comparer les résultats de transferts de temps par des techniques laser et par des techniques hyperfréquence.

Une autre technique très prometteuse de comparaison de temps est constituée par l'interférométrie à très longue base. Mr *Kaerls* donne quelques précisions sur l'expérience prévue pour début octobre entre son laboratoire (VSL) et l'USNO.

Le *Président* conclut ce point de l'ordre du jour en indiquant que, lors de sa prochaine session, le CCDS aura sans doute à sa disposition les résultats des comparaisons par GPS et ceux de comparaisons très exactes.

### 3. Présentation du rapport du BIH sur l'établissement du TAI

Mr *Granveaud* présente le rapport du BIH. Il rappelle brièvement les changements intervenus dans le calcul du TAI. Depuis 1977, le TAI est une échelle de temps obtenue en trois étapes. En premier lieu, une échelle libre, l'EAL, est calculée à partir des données des horloges; elle est stable à moyen terme (2 mois à 1 an) grâce à l'utilisation de l'algorithme ALGOS. Ensuite, les étalons primaires à césium servent à calculer la meilleure estimation de la réalisation de la seconde. Cette estimation est comparée à l'intervalle unitaire de l'EAL; du résultat de la comparaison, on déduit une correction qui est appliquée à l'EAL, donnant ainsi le TAI.

Les résultats d'étalonnage de l'EAL par les étalons primaires CS1 de la PTB, Cs V du NRC et NBS-6 du NBS montrent un effet saisonnier important : la fréquence de l'EAL est maximale en hiver et minimale en été; l'amplitude totale de ces variations est environ  $1 \times 10^{-13}$ . La continuation de la dérive de l'EAL apparaît moins clairement. Afin de comprendre la cause des variations systématiques de l'EAL et du TAI, le BIH a enquêté sur l'environnement des horloges participant au calcul du TAI. Il apparaît que pour environ 70 % des horloges la température est régulée à  $\pm 1$  °C ou mieux; l'humidité n'est généralement pas régulée.

Le problème de la correction de fréquence de l'EAL a fait l'objet de la Recommandation S 1 (1977) du CCDS; il a été discuté au cours de trois réunions de travail en 1978 et 1979. En janvier 1977, une correction de  $- 10 \times 10^{-13}$  a été appliquée à la fréquence de l'EAL. Des ajustements de  $+ 0,2 \times 10^{-13}$  ont ensuite été apportés : 4 fois en 1977, 1 fois à la fin de 1978 et 3 fois en 1979 si bien que, au début de 1980, la correction appliquée à la fréquence de l'EAL est de  $- 8,4 \times 10^{-13}$ . Jusqu'en 1980, la fréquence du TAI était toujours inférieure à l'estimation de la fréquence du césium; au début de 1980, elle est devenue légèrement supérieure. De 1977 à 1980, la fréquence du TAI a été maintenue égale à l'estimation de la fréquence du césium à  $1 \times 10^{-13}$  près.

Mr *Granveaud* souligne que les valeurs UTC – UTC(i) publiées dans le Rapport Annuel pour 1979 ont été obtenues en tenant compte des résultats des comparaisons de temps entre NRC et OP par le satellite Symphonie. Les différences entre ces valeurs et celles publiées dans les circulaires D sont, généralement inférieures à 100 ns. Le BIH continue en 1980 à utiliser les résultats obtenus par Symphonie. La question est posée d'une révision des valeurs UTC – UTC(i) publiées par le BIH, en intégrant les ajustements d'origine faits le 2 janvier 1974 et le 1<sup>er</sup> janvier 1977. Au cours de la discussion, l'intérêt de ce calcul n'est pas apparu clairement.

La présentation du rapport du BIH donne lieu à des considérations générales : le nombre de laboratoires dont les UTC sont régulièrement publiés est actuellement de 28; environ 100 horloges, dont 5 horloges primaires, participent au calcul du TAI. Mais il existe toujours plusieurs

laboratoires importants (en Australie, Chine, Japon, Union Soviétique) dont les horloges ne peuvent pas participer au calcul du TAI faute de liaison horaire satisfaisante.

En conclusion à cette discussion, le CCDS se met d'accord sur la déclaration suivante relative au travail du Bureau International de l'Heure.

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

*considérant*

- que le BIH détermine l'Échelle Internationale de référence de temps, TAI, avec l'aide du Comité International des Poids et Mesures,
- que le TAI satisfait les besoins des utilisateurs des mesures de temps dans les applications qui requièrent la plus haute précision,
- que le BIH continue à étudier les moyens d'améliorer le TAI,
- que la qualité de ces études et des résultats publiés est du plus haut niveau scientifique et conforme aux possibilités actuelles de la technique,
- que l'on s'attend à ce que des applications nouvelles mettant en jeu des mesures de temps très précises se développent dans l'avenir,

*souhaite* exprimer sa reconnaissance et sa haute estime pour l'excellent travail du BIH et invite le Directeur du BIH à poursuivre ce travail en continuant à respecter les principes qui se sont montrés jusqu'ici remarquablement efficaces.

#### 4. Présentation du rapport du Groupe de travail du CCDS sur le pilotage du TAI

Mr *Smith*, Président du Groupe de travail sur le pilotage du TAI, expose les conclusions des trois réunions qui ont eu lieu, l'une à Genève (janvier 1978), l'autre à Helsinki (août 1978) et la troisième à Montréal (août 1979). Les modifications de  $+ 0,2 \times 10^{-13}$  apportées à la correction de fréquence de l'EAL sont satisfaisantes car elles sont du même ordre de grandeur que les changements de fréquence observés du TAI. Le premier ajustement de  $+ 0,2 \times 10^{-13}$  a eu lieu au début d'avril 1977; trois autres ont suivi en 1977, chacun étant séparé du précédent par un intervalle de deux mois. Il est apparu, dès 1978, que la décision de modifier la correction appliquée à l'EAL devait faire appel, pour une large part, au jugement du personnel du BIH qui est à même d'évaluer la situation. Les variations saisonnières de l'EAL posent un problème délicat. Faut-il les corriger ?

Les membres du Groupe de travail ont estimé qu'il fallait, en premier lieu, chercher l'explication de ces variations. L'intérêt des horloges primaires a été souligné; le problème de leur poids dans le calcul de l'EAL a été discuté. Serait-il raisonnable de calculer un TAI fondé uniquement sur

deux horloges primaires ? Il apparaît que chaque UTC d'un laboratoire est un point d'accès au TAI et que, de plus, la participation au calcul du TAI est extrêmement importante (diplomatiquement, scientifiquement, financièrement,...) pour de nombreux petits laboratoires. Le Groupe de travail recommande une sélection plus sévère des horloges et il insiste sur le besoin urgent de disposer d'étalons primaires de fréquence plus nombreux.

### 5. Algorithmes de calcul des échelles de temps atomique

Plusieurs études faites par l'équipe du BIH sont présentées. Tout d'abord, Mr *Granveaud* traite du rôle des introductions et des retraits d'horloges dans l'instabilité d'une échelle de temps. Des échelles de temps ont été calculées à partir des données simulées de 15 horloges. En utilisant la même prédiction que dans le calcul du TAI — c'est-à-dire en supposant que la fréquence d'une horloge par rapport à l'EAL est la même dans le calcul futur que dans le calcul passé — on voit qu'une échelle calculée avec les mêmes paramètres que l'EAL et le TAI — c'est-à-dire prédiction de 60 jours et durée de 60 jours pour l'intervalle d'estimation de la fréquence — a une stabilité généralement moins bonne (pour des durées d'échantillonnage jusqu'à deux ans) que celle qui serait obtenue avec une prédiction de 10 jours et une estimation sur 30 jours : l'algorithme apporte son propre bruit qui n'est pas négligeable ; le calcul d'une échelle de temps peut être optimisé ; cette amélioration est liée au choix de la prédiction et des paramètres qui entrent dans le calcul de l'échelle.

Les résultats obtenus sont liés à des hypothèses restrictives : petit nombre d'horloges, pas de dérive de fréquence des horloges,... Ils ne sont donc pas actuellement utilisables pour le calcul du TAI.

Mr *Azoubib* expose les résultats de deux études. En premier lieu, l'algorithme ALGOS qui calcule l'EAL a été modifié de façon que le poids maximal d'une horloge soit de 500 au lieu de 100 dans la version actuelle. On voit qu'environ 10 % des horloges atteignent le poids maximal contre 30 % présentement. Mais la fréquence de l'échelle calculée avec la modification ne diffère pas sensiblement de la fréquence de l'EAL, et les horloges primaires, après 1 an environ, ont des poids inférieurs à 500 : les horloges industrielles imposent leur fréquence moyenne.

Dans une seconde étude, les horloges option 4 de Hewlett-Packard ont constitué un sous-ensemble qui a servi à calculer une échelle, l'EAL 1, avec l'algorithme ALGOS, les autres horloges (HP normales et Oscilloquartz) donnant l'EAL 2. Les fréquences moyennes de ces deux échelles par rapport à CS1 et Cs V présentent toutes les deux la même dérive et des variations saisonnières ; toutefois, l'amplitude de la variation saisonnière de l'EAL 1 est plus forte. D'après Mr Becker, il serait intéressant de voir si la différence d'amplitude est significative et d'éliminer de l'EAL 2 les horloges

Oscilloquartz qui ont souvent de fortes dérives. Est-ce que toutes les horloges option 4 présentent de fortes dérives ? Il semble que de nombreuses causes peuvent provoquer des dérives positives ou négatives. En résumé, on ne peut pas attribuer l'origine des termes systématiques de l'EAL aux seules horloges HP option 4.

Certaines échelles atomiques locales présentent aussi des variations saisonnières. Mr *Granveaud* montre qu'à partir des données des horloges d'un même laboratoire, on peut obtenir des échelles de temps présentant des variations systématiques différentes, suivant l'algorithme utilisé. Une discussion s'ensuit sur les algorithmes de calcul des échelles de temps. Il apparaît intéressant d'avoir une échelle de temps améliorée obtenue avec retard. Plusieurs participants souhaitent que l'étude des algorithmes propres aux échelles de temps soit développée. Le *Président* propose qu'une Recommandation soit faite dans ce sens et demande qu'un texte soit rédigé.

D'autre part, le rythme actuel des publications du BIH est jugé satisfaisant par les membres du CCDS, à savoir que les UTC–UTC (laboratoire) et TAI–TA (laboratoire) du mois  $m$  sont publiés à la fin du mois  $m + 1$  dans les circulaires D. Les participants sont d'accord pour que le BIH diffère la publication de résultats qui lui paraissent douteux.

## 6. Discussion sur l'établissement du TAI

Le *Président* ouvre la discussion en rappelant les critères de qualité du TAI, stabilité à long terme et exactitude, et en soulignant l'importance de son accessibilité. Le problème du calcul du TAI se pose dans les termes extrêmes suivants : est-il préférable de continuer à utiliser les données d'une centaine d'horloges commerciales ou bien vaut-il mieux fonder le TAI sur deux (ou même une) superhorloges ? Les responsables des laboratoires expriment leur point de vue. On souligne qu'environ 200 horloges dans le monde suivent le système UTC et que le BIH a la responsabilité : 1) de calculer et de publier régulièrement le TAI (et UTC); 2) d'étudier les améliorations possibles du TAI. Plusieurs participants expriment l'avis que le moment n'est pas venu de changer radicalement le calcul du TAI. En premier lieu, les comparaisons de temps entre laboratoires doivent être améliorées ; ensuite, les fréquences des deux horloges primaires du NRC et de la PTB diffèrent parfois de plusieurs  $10^{-14}$  ; enfin il faut comprendre les causes des variations systématiques de l'EAL. Mais, d'un autre côté, la qualité des horloges primaires est reconnue et il est important de soutenir le développement de tels appareils ; si on les considère comme des étalons de fréquence, un seul étalonnage par an de la fréquence du TAI paraît suffisant ; mais, si on les considère comme des horloges stables, elles doivent recevoir un poids important dans le calcul de l'EAL. Un compromis s'établit sur les points suivants : 1) le nombre de laboratoires contribuant au calcul du TAI peut augmenter mais les horloges doivent être soigneusement sélectionnées pour

constituer un ensemble relativement homogène; 2) des essais doivent être entrepris en calculant de nouvelles échelles de temps de telle façon que le rôle des horloges primaires soit en rapport avec leurs qualités.

Pratiquement, les décisions suivantes ont été prises :

– Le CCDS donne au BIH le pouvoir de choisir les horloges dont les qualités de fonctionnement sont les meilleures.

– Suivant la proposition du Président, une Recommandation pour l'étude de nouveaux algorithmes d'échelles de temps est élaborée; son but est l'utilisation optimale des données des horloges et particulièrement des horloges primaires (*voir* Recommandation S 1 (1980), p. S 18).

– Une autre Recommandation est discutée pour soutenir le développement et la mise en œuvre de nouveaux étalons de fréquence (à césium ou autres). Depuis de nombreuses années, le nombre d'étalons primaires de fréquence – à savoir trois – n'a pas varié; d'autre part, le fonctionnement en horloge de deux de ces appareils a créé deux classes sans parler de la disparité entre les incertitudes annoncées des étalonnages. Il apparaît donc important aux participants à cette session du CCDS que de nouveaux étalons primaires soient développés et aussi que d'autres étalons soient étudiés (*voir* Recommandation S 2 (1980), p. S 18).

D'autre part, l'élargissement de la tâche du Groupe de travail créé par la Recommandation S 1 (1977) a été discuté; en effet, le pilotage du TAI est lié aux problèmes plus généraux de son élaboration : variations systématiques, stabilité, ... Il a été décidé de maintenir le Groupe de travail avec la définition actuelle de ses tâches, sans restreindre toutefois son rôle au problème strict du pilotage.

Enfin, il est admis par les participants que les résultats publiés dans les circulaires D mensuelles sont provisoires, ceux des Rapports Annuels étant définitifs. Les corrections apportées aux résultats des circulaires doivent être inférieures à 500 ns et ne pas introduire de terme systématique.

## 7. Définition du TAI

Dans la Recommandation S 2 (1970) de la 5<sup>e</sup> session du CCDS, la définition suivante du TAI est donnée :

« 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 ».

Il apparaît que le TAI peut être considéré de diverses façons. Le *Président* pose une série de questions : Est-ce que le TAI doit être un temps coordonné ? Dans quel système de référence ? Avec quelle théorie ?

Mr *Becker* rappelle qu'il a mentionné ce problème au Groupe d'études 7 du CCIR (Genève, juin 1980), lorsqu'il en était le Rapporteur principal.

Mr *Steele* indique que le Groupe d'études 7 du CCIR, dont il est actuellement le Rapporteur principal, n'a pas apporté de solution à ce problème. D'autres organismes scientifiques, tel l'UAI, ont besoin d'une définition du TAI. Il est clair pour tous les participants que c'est la tâche du CCDS de donner une définition. Mais faut-il préciser une théorie relativiste particulière ? Mr *Kovalevsky* indique que les difficultés commencent à  $10^{-16}$  ; mais, jusqu'à  $10^{-15}$ , les approximations du premier ordre, communes à toutes les théories relativistes, sont valables.

Une discussion s'engage entre les participants. Les uns pensent que l'actuelle définition du TAI est satisfaisante et qu'il suffit d'établir un formulaire utilisable pour les comparaisons de temps. Les autres affirment qu'il faut, en premier lieu, préciser le système de référence et ensuite donner un formulaire. Le *Président* charge un groupe composé de MM. Allan, Becker, Giacomo, Kovalesky et Winkler d'une double tâche : trouver une définition générale acceptable du TAI et rédiger un formulaire donnant les corrections relativistes à apporter aux résultats des comparaisons de temps. Le texte de la déclaration suivante, préparé par ce groupe, est discuté et adopté.

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

– que la 14<sup>e</sup> Conférence Générale des Poids et Mesures a décidé d'établir une échelle de référence internationale de temps, le TAI,

– que le CIPM, à sa 59<sup>e</sup> session, a adopté la définition correspondante,

– que le BIH est chargé de la détermination du TAI suivant les directives du CCDS (« Mise en pratique du Temps Atomique International », CCDS, 5<sup>e</sup> session, 1970, p. S 22),

– que l'utilisation du TAI nécessite l'application de transformations, généralement appelées corrections relativistes, pour la mesure des différences de temps entre des horloges éloignées,

– que ces corrections nécessitent l'adoption d'un modèle clairement défini,

*déclare*

que le TAI est une échelle de temps coordonnée définie dans un repère de référence géocentrique avec comme unité d'échelle la seconde du SI telle qu'elle est réalisée sur le géoïde en rotation et

que, par conséquent, il peut être étendu dans l'état actuel du savoir-faire et avec une exactitude suffisante à un point quelconque, fixe ou mobile, au voisinage du géoïde en appliquant les corrections du premier ordre de la relativité générale, c'est-à-dire les corrections pour les différences de potentiel de la pesanteur et les différences de vitesse ainsi que pour la rotation de la Terre (*voir* Note ci-après).

Note \*

Les formules suivantes permettent d'estimer les effets relativistes à prendre en compte lors de transfert de temps par transport d'horloge ou à l'aide de signaux électromagnétiques.

a) Quand on transfère le temps d'un point à un autre à l'aide d'un transport d'horloge, le temps coordonnée accumulé pendant le transport est :

$$\Delta t = \frac{2\omega}{c^2} A_E + \int_{\text{trajectoire}} \left[ 1 - \frac{\Delta U(\vec{r})}{c^2} + \frac{v^2}{2c^2} \right] ds$$

où  $\vec{r}$  est un vecteur dont l'origine est au centre de la Terre et l'extrémité est l'horloge,  $ds$  est l'élément de temps propre donné par l'horloge,  $\Delta U(\vec{r})$  est la différence de potentiel de la pesanteur entre le lieu où se trouve l'horloge et le géoïde (elle est positive au-dessus du géoïde),  $c$  est la vitesse de la lumière,  $v$  est la vitesse de l'horloge par rapport à la Terre,  $\omega$  est la vitesse angulaire de rotation de la Terre.  $A_E$  est la projection équatoriale de l'aire balayée par  $\vec{r}$  dans un système de coordonnées lié à la Terre ; lors de son calcul, l'élément d'aire sera considéré comme positif lorsque la projection de  $\vec{r}$  tourne vers l'Est ;

$$A_E = \frac{1}{2} \int_{\text{trajectoire}} r \cdot v_E \cdot \cos \varphi \cdot ds$$

$r$  étant le module de  $\vec{r}$ ,  $v_E$  la composante vers l'Est de  $v$  et  $\varphi$  la latitude géocentrique.

La formule précédente permet d'estimer les effets relativistes sur la marche de l'horloge pendant son transport avec une incertitude relative inférieure à  $1 \times 10^{-14}$ .

Si la hauteur de l'horloge au-dessus du sol ne dépasse pas 24 km, on pourra prendre  $\Delta U(\vec{r}) = g_n h$  où  $h$  est l'altitude de l'horloge au-dessus du géoïde et  $g_n$  est l'accélération due à la pesanteur normale.

b) Quand on transfère le temps d'un point T (émetteur) à un point R (récepteur) à l'aide d'un signal électromagnétique, le temps coordonnée qui s'est écoulé entre l'émission et la réception est :

$$\Delta t = \frac{2\omega}{c^2} A_E + \frac{1}{c} \int_{\text{trajet}} d\sigma$$

où  $d\sigma$  est l'élément de longueur propre pour le trajet suivi par le signal et les autres notations sont les mêmes que dans le premier cas, à l'exception

---

\* La mise au point définitive de cette Note a été poursuivie par correspondance, après la clôture de la session.

de  $A_E$  qui est, en pratique, la projection équatoriale du triangle dont les sommets sont le centre de la Terre, le point T et le point R. L'aire  $A_E$  est positive si la projection équatoriale de  $\overrightarrow{TR}$  a une composante dirigée vers l'Est.

Dans les expériences les plus précises, le terme provenant de  $d\sigma$  est ordinairement éliminé par une méthode d'aller et retour. Dans ces conditions, la formule précédente peut conduire à des incertitudes inférieures à 1 ns, même lors de liaisons au moyen d'un satellite artificiel.

#### Valeurs numériques

$$c = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$2\omega/c^2 = 1,623 \times 10^{-21} \text{ s/m}^2$$

$$g_n = 9,81 \text{ m/s}^2.$$

### 8. Fonctionnement du temps universel coordonné

Le *Président* rappelle que la différence UT1 – UTC doit rester inférieure à 0,9 s et que cette règle est respectée au moyen de l'introduction de secondes intercalaires, habituellement le 31 décembre. Mais, cette année, la vitesse de rotation de la Terre a augmenté et il apparaît risqué d'introduire une seconde intercalaire le 31 décembre 1980. La décision sera prise prochainement \*\*.

L'intérêt de la seconde intercalaire est discuté. Mr *Winkler* rappelle qu'il y a 40 000 utilisateurs des *Éphémérides Nautiques*, c'est-à-dire utilisateurs potentiels de UT1, et qu'on ne devrait pas changer le système actuel du UTC.

### 9. Questions diverses

Trois réunions inhabituelles concernant le temps et les fréquences sont signalées :

- le « Symposium on Time and Frequency » à New Delhi, en février 1981 ;
- le 3<sup>e</sup> « Frequency Standards and Metrology Symposium » à Aussois, en octobre 1981 ;
- le 2<sup>e</sup> « Algorithm Symposium » à Boulder, en juin 1982.

\*  
\* \*

Mr *Terrien* remercie le *Président* pour la très haute tenue de la réunion. Le *Président* remercie le BIPM et les participants à cette 9<sup>e</sup> session du

---

\*\* Une note du BIH du 2 octobre 1980 aux autorités responsables de la mesure et de la diffusion de l'heure indique qu'il n'y aura pas de seconde intercalaire à la fin de décembre 1980.

CCDS. Il adresse au nom des membres du CCDS ses plus vifs remerciements à Mr Beehler pour l'excellente contribution que celui-ci a envoyée.

Octobre 1980

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

Algorithmes pour le calcul des échelles de temps

RECOMMANDATION S 1 (1980)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

*considérant*

- que le TAI devrait être aussi stable et aussi exact que possible,
- que les nombreuses horloges et les étalons de fréquence dont on dispose sont de stabilité et d'exactitude diverses,
- que l'imprécision des comparaisons de temps usuelles peut limiter la qualité des échelles de temps calculées,
- qu'on dispose seulement d'un très petit nombre d'étalons primaires pour assurer la stabilité à long terme du TAI et sa conformité à la définition de la seconde du SI et
- que l'algorithme utilisé peut influencer de façon significative la qualité de l'échelle de temps qui en résulte,

*recommande* que l'on entreprenne activement l'étude et la mise au point d'algorithmes qui permettent l'utilisation optimale des données disponibles pour le calcul des échelles de temps.

Mise au point de nouveaux étalons de fréquence

RECOMMANDATION S 2 (1980)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

*rappelant* la Recommandation S 4 (1974) du CCDS, relative aux étalons primaires de fréquence à césium,

*prenant acte* de la Recommandation A-2 de l'URSI, août 1978, relative aux étalons primaires de fréquence à césium,

*considérant*

- qu'il y a un besoin croissant d'une meilleure stabilité du TAI et d'une meilleure exactitude de son intervalle unitaire,
- que les étalons primaires de fréquence à césium constituent le moyen d'assurer l'exactitude de l'intervalle unitaire du TAI,

— que, bien que de nombreux laboratoires contribuent à la formation du TAI, il n'existe encore aujourd'hui que trois laboratoires fournissant les données nécessaires pour assurer l'exactitude de l'intervalle unitaire du TAI,

— que les étalons primaires à césium utilisés comme horloges peuvent produire des échelles de temps stables et exactes,

— que des étalons de fréquence autres que l'étalon à jet de césium se révèlent prometteurs,

— que les recherches en cours dans le domaine des étalons primaires de fréquence sont insuffisantes,

*recommande*

— que davantage de laboratoires poursuivent le développement et la mise en œuvre d'étalons primaires de fréquence à césium, aussi bien de conception traditionnelle que de conception nouvelle,

— que des laboratoires entreprennent des recherches et des développements relatifs à de nouveaux étalons de fréquence.

---

## ANNEXE S 1

---

### Documents de travail présentés à la 9<sup>e</sup> session du CCDS

---

Ces documents de travail, qu'ils soient ou non publiés dans ce volume, peuvent être obtenus dans leur langue originale sur demande adressée au BIPM.

#### Document CCDS/

- 80-1 Rapport sur la réunion du Groupe de travail du CCDS pour le pilotage du TAI, Montréal, 21 août 1979, par G. Winkler, Rapporteur (9 pages) : traduction par le BIPM du Rapport original, en langue anglaise, également disponible.
- 80-2 Résolutions A.1 et A.2 de la 19<sup>e</sup> Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki, 28 juillet - 8 août 1978 (1 page).
- 80-3 BIH. — Rapport du Directeur du Bureau International de l'Heure pour la préparation de la 9<sup>e</sup> session du CCDS, par B. Guinot (3 pages), voir Annexe S 2.
- 80-4 BIH et BIPM. — Problems of the generation, quality and availability of the international atomic time scale, by B. Guinot and J. Azoubib (15 pages).
- 80-5 ASMW. — Rapport de l'ASMW pour la 9<sup>e</sup> session du CCDS (5 pages).  
Progrès obtenus dans le domaine des étalons primaires. Progrès dans les méthodes de comparaison chronométrique. Algorithme de calcul des échelles de temps atomiques. Le calcul de TAI. Efficacité du système UTC.
- 80-6 NRLM et RRL. — Report to the 9th CCDS meeting (7 pages).  
Works on atomic frequency standards. Works on time and frequency comparison. Atomic time scale. Establishment of world-wide clock comparison network by satellite.
- 80-7 BIH. — Contribution of the clock input/output procedure to the instability of atomic time scales, par M. Granveaud (8 pages).
- 80-8 RRL. — Majorana effect on atomic frequency standards, by A. Urabe, K. Nakagiri, T. Ohta, M. Kobayashi and Y. Saburi (6 pages).

Document  
CCDS/

- 80-9 NRLM. — Preliminary evaluations of NRLM-II, by Y. Koga, Y. Nakadan and J. Yoda (2 pages).
- 80-10 PTB. — Is TAI a coordinate time scale ?, by G. Becker (3 pages).
- 80-11 LPTF. — Rapport pour la 9<sup>e</sup> session du CCDS, par J. Rutman (8 pages).  
Méthodes de comparaison de temps et de fréquence. Mesure des fréquences lasers dans l'infrarouge.
- 80-12 LHA. — Progrès récents des étalons de fréquence et des horloges, par C. Audoin (6 pages).  
*En Annexe* : A cesium beam atomic clock using laser optical pumping; preliminary results, by M. Arditi and J. L. Picqué (10 pages), published in *Journal de Physique-Lettres*, **41**, (1980), pp. L-379, L-381.
- 80-13 PTB. — Problems of time standards and time scales, by G. Becker (21 pages).
- 80-14 BIH. — Definition of TAI, by B. Guinot (2 pages):
- 80-15 NRC. — Report to CCDS September 1980 (3 pages).  
Cs V primary time and frequency standard. Cs VI primary time and frequency standards. Two-way satellite time transfer via Symphonie and Hermes. Two-way satellite time transfer using low power CW tones. Are leap seconds really necessary ?
- 80-16 NBS. — Sub-microsecond international time transfer comparison (4 pages). Recent progress on atomic frequency standards and clocks at NBS (8 pages). Some comments on the statistics of international frequency comparisons (18 pages).  
*En Annexe* : Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite, by D. W. Allan and M. A. Weiss (30 pages).
- 80-17 Working party advisory to the BIH on the steering of international atomic time TAI. Report by H. M. Smith (3 pages), voir Annexe S 3.
- 80-18 VSL. — Report for the 9th meeting of the CCDS, by R. Kaarls (4 pages).  
Introduction. Comparison of different synchronisation techniques.
- 80-19 CCIR. — Some preliminary comments from CCIR Interim Working Party 7/4 on various alternatives for improved high-accuracy time comparisons using satellite techniques, by R. E. Beelher (9 pages).
-

## ANNEXE S 2

---

### Rapport du Directeur du Bureau International de l'Heure pour la préparation de la 9<sup>e</sup> session du CCDS

par B. GUINOT

(Document CCDS/80-3)

---

#### 1. — Travaux courants du BIH

Le travail courant du BIH pour établir le TAI a très peu changé depuis la 8<sup>e</sup> session du CCDS.

Le LORAN-C et la télévision publique, associés aux transports d'horloges, restent les principaux systèmes qui permettent d'utiliser effectivement les données des horloges, et la zone de couverture utile est toujours limitée à l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Afrique du Nord. A l'intérieur de cette zone, quelques laboratoires supplémentaires sont venus coopérer avec le BIH. Le tableau suivant résume les sources de données du BIH pour le TAI (janvier/février 1980)

nombre de laboratoires participants .....	24
nombre de laboratoires pour lesquels UTC-UTC(i) est publié mensuellement .....	27
horloges participantes	
horloges industrielles .....	103
horloges de laboratoire	
(NBS-4, NRC Cs V, NRC Cs VI A, B et C, PTB CS1) ..	6
étalons de fréquence (NBS-6, NRC Cs V, PTB CS1) .....	3

On rappelle que, en particulier, les liaisons horaires ne permettent pas encore d'utiliser les données de grands laboratoires de l'URSS et du Japon.

La gestion du système UTC n'a donné lieu à aucune difficulté. Une seconde intercalaire positive a été introduite à chaque fin d'année depuis la fin de 1972. Mais il se pourrait qu'il n'y en ait pas à la fin de 1980 car la durée du jour a déçu de 0,4 ms en octobre 1979.

#### 2. — Stabilité et exactitude du TAI

Le pilotage du TAI prévu par la Recommandation S 1 (1977) a été mis en œuvre dès avril 1977. Il a été poursuivi avec le concours du Groupe de travail du CCDS, créé selon cette Recommandation.

Le problème majeur que nous avons rencontré a été discuté par Guinot et Azoubib dans une communication présentée à la CPEM'80 (ci-après désignée par Doc-GA).

On rappelle seulement qu'il existe une fluctuation saisonnière de fréquence entre le TAI (et l'EAL) et les étalons de fréquence, avec une demi-amplitude de 0,5 à  $1 \times 10^{-13}$ . Les considérations statistiques, à elles seules, ne permettent guère de déterminer la source de ces fluctuations. On peut exclure, comme origine unique, les comparaisons de temps. Mais faut-il incriminer les horloges de laboratoire ou les instruments industriels ?

Pour élucider ce problème et éventuellement améliorer l'EAL, le BIH a écrit à tous les laboratoires participants afin d'être informé sur les conditions d'exploitation des horloges. Nous avons l'intention de calculer une échelle libre, à titre expérimental, en n'utilisant que les horloges les mieux protégées contre les perturbations extérieures. Notre intention est de sauvegarder, autant que faire se peut, le principe d'un calcul d'une échelle libre à l'aide d'un algorithme de stabilité, à partir des données d'horloges de tous types, et d'asservir à long terme cette échelle sur les données des étalons de fréquence. En d'autres termes, le BIH souhaite maintenir séparés les rôles d'horloge et d'étalon de fréquence. Mais il est possible que nous soyons conduits à donner *a priori* un poids nul aux horloges qui ne seraient pas utilisées avec les précautions qui garantissent une bonne stabilité à long terme.

Dans l'état actuel du calcul du TAI, l'existence des variations saisonnières, quelle qu'en soit la cause, et aussi la dérive de fréquence de l'EAL rendent difficile le pilotage du TAI, car on hésite encore à extrapoler ces effets systématiques. D'autre part, une pondération équitable des horloges est impossible. Un essai d'élévation des poids-limites (de 100 à 500) dans l'algorithme de stabilité ALGOS du BIH conduisait à diminuer l'influence des horloges de laboratoire et à augmenter la dérive de l'EAL.

### 3. — Algorithmes de stabilité

L'algorithme ALGOS du BIH n'a pas été modifié, à l'exception de quelques améliorations techniques.

Mr Granveaud a recherché sur des simulations l'influence des retraits et introductions d'horloges sur la stabilité d'une échelle de temps. Il a aussi déterminé, en fonction de la méthode de prédiction des marches, les valeurs du temps d'échantillonnage pour lesquelles la stabilité est la plus améliorée (document CCDS/80-7).

Dans les cas où il existe des variations de fréquence non aléatoires et non modélisées, l'influence de l'algorithme peut être importante (voir Doc-GA).

### 4. — Liaison horaire par Symphonie et problèmes connexes

La participation du BIH (Mr Azoubib) à la liaison horaire par Symphonie entre le Canada et la France a principalement consisté à faire le calcul final de UTC(NRC) — UTC(OP), à partir des résultats des liaisons intermédiaires fournis par le NRC et le LPTF, et à en discuter la précision et l'exactitude. Des études de la stabilité relative des échelles produites par les horloges NRC Cs V, PTB CS1 et de TA(USNO), TA(F), depuis juin 1978, ont montré que l'on obtenait des résultats meilleurs en utilisant la liaison transatlantique par Symphonie au lieu de celle du LORAN-C. Aussi avons-nous publié dans le Rapport Annuel du BIH pour 1979 des valeurs de TAI — TA(j) et de

UTC – UTC(*j*) basées sur Symphonie alors que celles des circulaires mensuelles D étaient basées sur le LORAN-C. Il en est résulté des écarts entre les deux séries de résultats de 0,20  $\mu$ s au maximum.

J'ai réexaminé, à cette occasion, le problème posé par les corrections ultérieures aux TAI – TA(*j*) et UTC – UTC(*j*) déjà publiés. Il me semble que ces corrections sont acceptables dans la mesure où elles permettent d'accéder plus exactement à TAI et UTC par chacun des TA(*j*) et UTC(*j*), sans pour cela altérer TAI et UTC. Cette dernière condition est mal définie, puisque TAI et UTC n'existent que par les valeurs publiées de TAI – TA(*j*) et UTC – UTC(*j*), mais, pratiquement, elle se traduit simplement par le fait que les corrections aux valeurs publiées (sauf dans le cas d'une erreur reconnue pour un laboratoire particulier) doivent rester à peu près nulles en moyenne.

Je souhaite l'avis du CCDS sur ces questions. Plus particulièrement, estime-t-on qu'une révision générale des TAI – TA(*j*) et UTC – UTC(*j*), depuis 1969, qui éliminerait les corrections par sauts effectuées en janvier 1974 et en janvier 1977, serait utile ?

Juin 1980

---

## ANNEXE S 3

---

### **Groupe de travail sur le pilotage du TAI**

par H. M. SMITH

(Traduction du Document CCDS/80-17)

---

Le Groupe de travail a été créé en conformité avec les paragraphes 5 et 6 de la Recommandation S 1 (1977) du CCDS au CIPM (8<sup>e</sup> session, avril 1977).

*Première réunion (officiuse), le 31 janvier 1978 à Genève*

La politique générale du pilotage préconisé par le CCDS consiste à appliquer une correction à l'intervalle unitaire du TAI lorsqu'il s'écarte de la seconde du SI au-delà d'une tolérance convenue. On a choisi comme valeur provisoire pour cette tolérance  $0,2 \times 10^{-13}$ , de façon que les corrections soient du même ordre de grandeur que les fluctuations naturelles observées du TAI. Des étalonnages effectués au début de 1977 à la PTB et au NRC concordent pour indiquer que la fréquence du TAI allait en décroissant : un nouvel étalonnage de la PTB a confirmé cette observation. Une correction de pilotage de  $0,2 \times 10^{-13}$  a été faite en avril 1977 ; des corrections identiques ont ensuite été faites tous les deux mois ; compte tenu des résultats disponibles, on a suggéré d'appliquer ces corrections pendant six mois encore.

On a indiqué que l'échelle de temps de la PTB n'est plus indépendante, mais qu'elle est pilotée pour la maintenir en accord avec l'étalon primaire de la PTB.

La liaison par LORAN-C entre le Canada et l'Europe entraînait des variations apparentes de marche, mais le lissage sur des intervalles de 60 jours a réduit cet effet à un niveau non significatif. On a constaté un effet annuel (saisonnier) allant jusqu'à environ 0,5 microseconde.

*Seconde réunion, le 1<sup>er</sup> août 1978 à Helsinki*

Le directeur du BIH a expliqué qu'il était nécessaire d'introduire une échelle de temps interne au BIH, l'EAL (Échelle Atomique Libre), établie à partir des données provenant de chaque horloge ; le TAI est ensuite dérivé de l'EAL en appliquant des corrections de fréquence que l'on déduit de mesures faites avec les étalons primaires. Les corrections pour passer de l'EAL au TAI sont faites selon la méthode précédente, en effectuant des sauts discrets de  $0,2 \times 10^{-13}$  à des intervalles qui ne sont pas inférieurs à deux mois.

On a proposé de ne faire aucune correction pour la variation annuelle jusqu'à ce que l'on dispose de résultats complémentaires.

On a suggéré qu'il fallait éliminer les horloges commerciales dont le fonctionnement est le moins bon et qu'il fallait tenir compte dans l'élaboration du TAI des étalons primaires qui fonctionnent de façon continue comme horloges.

Le Groupe de travail est arrivé à la conclusion qu'aucune méthode rigoureuse ne pouvait être fixée, compte tenu des nombreux facteurs variables qui entrent en jeu : il faut laisser un peu de place au jugement. Le Groupe de travail s'est déclaré satisfait du travail du BIH et il a confirmé que le directeur doit être libre de juger toute situation éventuelle et d'agir en conséquence. Afin de faciliter sa tâche, les renseignements émanant des laboratoires doivent être communiqués sans retard au BIH, sans attendre leur confirmation.

Le Groupe de travail a noté les conclusions suivantes :

- 1) aucun nouvel ajustement ne paraît nécessaire pour le moment ;
- 2) si de nouveaux ajustements devenaient nécessaires, il faudrait encore les effectuer au moyen de sauts de  $0,2 \times 10^{-13}$  à des intervalles d'au moins deux mois ;
- 3) il faut demander à l'URSI et au CCDS de recommander aux laboratoires d'accroître à la fois le nombre et la qualité de leurs étalons primaires de fréquence et de les utiliser comme horloges.

#### *Troisième réunion, le 21 août 1979 à Montréal*

Le directeur du BIH a indiqué que le très petit nombre d'étalons primaires continuait de limiter la valeur de toute méthode statistique de traitement des données.

La présence d'une variation annuelle a été confirmée; elle a été évaluée à  $1 \times 10^{-13}$ ; diverses causes pourraient contribuer à cette variation.

Des questions se sont posées au sujet des étalons primaires de fréquence utilisés comme horloges : quel poids faut-il leur attribuer ? Les mesures périodiques de fréquence sont-elles statistiquement indépendantes ? Une discussion s'en est suivie sur le mode d'utilisation des étalons dans les divers laboratoires. Le BIH a indiqué que la concordance des mesures du NRC et de la PTB était de l'ordre de  $1 \times 10^{-14}$ , mais que les mesures du NBS présentaient une différence systématique d'environ  $5 \times 10^{-14}$ . Des mesures récentes utilisant la liaison au moyen du satellite Symphonie ont donné un meilleur accord. Au cours des deux années écoulées, aucun écart n'a excédé  $1 \times 10^{-13}$ .

Les représentants de chacun des laboratoires nationaux ont donné des résumés des programmes en cours et des plans à court terme dans leur laboratoire.

Dans l'état actuel des choses on peut penser que l'on améliorerait l'échelle du TAI en ne tenant compte que des étalons primaires utilisés comme horloges et en éliminant les horloges commerciales. Cela présenterait un risque et il serait encore nécessaire de maintenir la liaison avec les horloges commerciales pour permettre de distribuer le TAI et le UTC.

Une discussion s'en est suivie sur les liaisons au moyen du LORAN-C, des satellites et des transports d'horloges.

On a proposé que le BIH essaie de maintenir le TAI au centre du domaine d'incertitude et n'attende pas, pour faire les ajustements, que l'écart s'approche des limites.

#### *Situation actuelle*

Le directeur du BIH a indiqué que les données les plus récentes en provenance du NRC et de la PTB font apparaître un écart de  $1 \times 10^{-13}$  et qu'en 1979 on n'a

disposé d'aucun résultat d'étalonnage en provenance d'autres laboratoires. Dans ces conditions, le domaine d'incertitude est large et mal défini : il n'a pas été possible de déterminer le centre du domaine d'incertitude sur lequel le TAI doit tenter de se régler. Il est urgent d'avoir d'autres étalons primaires de fréquence.

Une autre difficulté est apparue concernant la pondération des horloges. On a tenté d'augmenter le poids maximal, car on pensait que la limite courante pénalisait les horloges primaires. Mais, dans un essai où le poids maximal a été multiplié par cinq, le rapport des poids des horloges primaires et des autres horloges n'a pratiquement pas changé. Cela pourrait être dû au rôle prépondérant des dérives des horloges commerciales et à l'existence de variations saisonnières de l'un ou l'autre type d'horloge.

Compte tenu de l'exactitude temporelle croissante qu'exigent les nouveaux systèmes numériques de communication et compte tenu de la nécessité de maintenir le TAI à un niveau d'exactitude supérieur à celui des systèmes actuellement utilisables, il est crucial d'améliorer les liaisons entre le BIH et les laboratoires participants. Les programmes actuels de recherche du CCIR sur les liaisons horaires par satellite devraient être de la plus haute importance.

Remis en séance le 23 septembre 1980

---



---

## TABLE DES MATIÈRES

---

### COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

9<sup>e</sup> session (1980)

---

	Page
Notice historique sur les organes de la Convention du Mètre .....	v
Liste des membres .....	VII
Ordre du jour .....	X
<b>Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par M. Granveaud .....</b>	<b>S 1</b>
Introduction .....	S 1
Progrès récents et attendus des étalons atomiques de fréquence et des horloges : résultats obtenus depuis 1977 et travaux en cours dans les laboratoires (France, ASMW, NRLM et RRL, PTB, NBS, NRC, NPL, IEN, Suisse); étalons à césium commerciaux; échange d'informations pratiques .....	S 2
Progrès récents et attendus des méthodes de comparaison de temps : comparaisons de temps par le LORAN-C, par satellites (en particulier « Global Positioning System », projet LASSO) .....	S 7
Présentation du rapport du BIH sur l'établissement du TAI. Déclaration relative au travail du BIH .....	S 10
Présentation du rapport du Groupe de travail du CCDS sur le pilotage du TAI .....	S 11
Algorithmes de calcul des échelles de temps atomique .....	S 12
Discussion sur l'établissement du TAI. Adoption des Recommandations S 1 et S 2 .....	S 13
Définition du TAI : adoption d'une déclaration comportant une telle définition; formulaire donnant les corrections relativistes à prendre en compte lors des comparaisons de temps .....	S 14
Fonctionnement du Temps Universel Coordonné .....	S 17
Questions diverses (annonce de trois réunions concernant le temps et les fréquences) .....	S 17
Recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures : Recommandation S 1 (1980) (Algorithmes pour le calcul des échelles de temps) .....	S 18
Recommandation S 2 (1980) (Mise au point de nouveaux étalons de fréquence) .....	S 18
<b>Annexes</b>	
S 1. Documents de travail présentés à la 9 <sup>e</sup> session du CCDS .....	S 20
S 2. Rapport du Directeur du Bureau International de l'Heure pour la préparation de la 9 <sup>e</sup> session du CCDS, par B. Guinot .....	S 22
S 3. Groupe de travail sur le pilotage du TAI, par H. M. Smith .....	S 25

---

IMPRIMERIE DURAND

28600 LUISANT (FRANCE)

---

Dépôt légal, Imprimeur, 1981  
ISBN 92-822-2070-2

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 5 OCTOBRE 1981

Imprimé en France