

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

SESSION DE 1993

MEETING OF 1993

---





COMITÉ CONSULTATIF  
POUR  
LA DÉFINITION DE LA SECONDE

Rapport de la 12<sup>e</sup> session  
Report of the 12th Meeting

1993

ISSN 0588-6228  
ISBN 92-822-2129-6

---

LISTE DES SIGLES UTILISÉS DANS LE PRÉSENT VOLUME  
LIST OF ACRONYMS USED IN THE PRESENT VOLUME

---

**Sigles des laboratoires, commissions et conférences**  
**Acronyms for laboratories, committees and conferences**

BIPM	Bureau international des poids et mesures
BNM	Bureau national de métrologie, Paris (France)
CCDS	Comité consultatif pour la définition de la seconde
CCIR	Comité consultatif international des radiocommunications/ International Radio Consultative Committee
GGTTS	Groupe sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS/Group on GPS Time Transfer Standards
CGPM	Conférence générale des poids et mesures
CIPM	Comité international des poids et mesures
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
CRL	Communications Research Laboratory, Tokyo (Japon)
CSIRO	(ex NML) Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Division of Applied Physics, Lindfield (Australie)
EUREKA	European Research Coordination Agency
EUTELSAT	European Telecommunications Satellite Organization
FTZ	Fernmeldetechnisches Zentralamt, Darmstadt (Allemagne)
IAU	<i>voir</i> UAI
IEN	Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, Turin (Italie)
IERS	Service international de la rotation terrestre/International Earth Rotation Service
IMVP	Institut de métrologie du temps et de l'espace/Institute of Metrology for Time and Space
INPL	National Physical Laboratory of Israël, Jérusalem (Israël)
INTELSAT	International Telecommunications Satellite Organization
ITU	<i>voir</i> UIT
IUGG	<i>voir</i> UGGI

KRISS	(ex KSRI) Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon (Rép. de Corée)
LHA	Laboratoire de l'horloge atomique, Orsay (France)
LPTF	Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France)
*NBS	National Bureau of Standards, Gaithersburg (É.-U. d'Amérique), voir NIST
NIM	Institut national de métrologie/National Institute of Metrology, Beijing (Rép. pop. de Chine)
NIST	(ex NBS) National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg (É.-U. d'Amérique)
NPL	National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni)
NPLI	National Physical Laboratory of India, New Delhi (Inde)
NRC	Conseil national de recherches du Canada/National Research Council, Ottawa (Canada)
NRLM	National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba (Japon)
OCA	Observatoire de la Côte d'Azur, Grasse (France)
OFM/EAM	Office fédéral de métrologie/Eidgenössisches Amt für Messwesen, Wabern (Suisse)
ON	Observatoire cantonal, Neuchâtel (Suisse)
OP	Observatoire de Paris (France)
ORB	Observatoire royal de Belgique, Bruxelles (Belgique)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig (Allemagne)
ROA	Real Instituto y Observatorio de la Armada, San Fernando (Espagne)
TUG	Technical University, Graz (Autriche)
UAI/IAU	Union astronomique internationale/International Astronomical Union
UGGI/IUGG	Union géodésique et géophysique internationale/International Union of Geodesy and Geophysics
UIT/ITU	Union internationale des télécommunications/International Telecommunication Union
URSI	Union radioscientifique internationale/International Union of Radio Science
USNO	U.S. Naval Observatory, Washington (É.-U. d'Amérique)

---

\* Les laboratoires ou organisations marqués d'un astérisque soit n'existent plus, soit figurent sous un autre sigle.

\* Organizations marked with an asterisk either no longer exist or operate under a different acronym.

VNIIFTRI	Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques/All-Russian Research Institute for Physical, Technical and Radio-Technical Measurements, Moscou (Fédération de Russie)
VSL	Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas)

### **Sigles des termes scientifiques**

#### **Acronyms for scientific terms**

EAL	Échelle atomique libre/Free atomic time scale
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
LASSO	Laser Synchronization from Satellite Orbit
MITREX	Microwave Time and Ranging Experiment
SA	Accès sélectif/Selective availability
SI	Système international d'unités/International System of Units
TAI	Temps atomique international/International Atomic Time
TT	Temps terrestre/Terrestrial Time
UTC	Temps universel coordonné/Coordinated Universal Time
VLBI	Interférométrie à très longue base/Very Long Baseline Interferometry

---





---

## LE BIPM

### ET LA CONVENTION DU MÈTRE

---

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\*.

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), des rayonnements ionisants (1960) et aux échelles de temps (1988). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 ; de nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la section des rayonnements ionisants, en 1984 pour le travail sur les lasers et en 1988 a été inauguré un bâtiment pour la bibliothèque et des bureaux.

---

\* Au 31 décembre 1993, quarante-sept États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne, Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép. d'), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Chine (Rép. pop. de), Corée (Rép. de), Corée (Rép. pop. dém. de), Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Israël, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Russie (Féd. de), Slovaque (Rép.), Suède, Suisse, Tchéque (Rép.), Thaïlande, Turquie, Uruguay, Venezuela.

Une quarantaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau international. Ils y font principalement des recherches métrologiques, des comparaisons internationales des réalisations des unités et des vérifications d'étalons dans les domaines mentionnés ci-dessus. Ces travaux font l'objet d'un rapport annuel détaillé qui est publié avec les procès-verbaux des séances du Comité international.

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 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 (*BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1963, 31, 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 (CCEMRI), 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 la masse 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 aussi des monographies sur des sujets métrologiques particuliers et, sous le titre « *Le Système international d'unités (SI)* », une brochure remise à jour périodiquement qui rassemble toutes les décisions et recommandations concernant les unités.

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. KOVALEVSKY

*Président*

D. KIND

---

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

---

*Président*

J. KOVALEVSKY, secrétaire du Comité international des poids et mesures,  
Observatoire de la Côte d'Azur, Grasse (France).

*Membres*

BUREAU NATIONAL DE MÉTROLOGIE : Laboratoire primaire du temps et des  
fréquences [LPTF], Paris.

COMITÉ CONSULTATIF INTERNATIONAL DES RADIOCOMMUNICATIONS [CCIR] de  
l'Union internationale des télécommunications.

COMMUNICATIONS RESEARCH LABORATORY [CRL], Tokyo.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES DU CANADA [NRC], Ottawa.

CSIRO, DIVISION OF APPLIED PHYSICS [CSIRO], Lindfield.

INSTITUT DES MESURES PHYSICOTECHNIQUES ET RADIOTECHNIQUES  
[VNIIFTRI], Moscou.

INSTITUT NATIONAL DE MÉTROLOGIE [NIM], Beijing.

ISTITUTO ELETTRTECNICO NAZIONALE GALILEO FERRARIS [IEN], Turin.

KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE [KRISS], Taejon.

LABORATOIRE DE L'HORLOGE ATOMIQUE [LHA] du Centre national de la  
recherche scientifique [CNRS], Orsay.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY [NIST], Boulder.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [NPL], Teddington.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY OF INDIA [NPLI], New Delhi.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY OF ISRAEL [INPL], Jérusalem.

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [NRLM], Tsukuba.

OBSERVATOIRE ROYAL DE BELGIQUE [ORB], Bruxelles.

OFFICE FÉDÉRAL DE MÉTROLOGIE [OFM], Wabern/OBSERVATOIRE CANTONAL [ON], Neuchâtel.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], Braunschweig.

REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE LA ARMADA [ROA], San Fernando.

TECHNICAL UNIVERSITY [TUG], Graz.

UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE [UAI].

UNION GÉODÉSIQUE ET GÉOPHYSIQUE INTERNATIONALE [UGGI].

UNION RADIO-SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE [URSI].

U.S. NAVAL OBSERVATORY [USNO], Washington.

VAN SWINDEN LABORATORIUM [VSL], Delft.

B. GUINOT.

Le directeur du Bureau international des poids et mesures [BIPM],  
Sèvres.

---



ORDRE DU JOUR  
de la 12<sup>e</sup> session

---

1. Progrès des étalons atomiques de fréquence et des horloges.
  2. Rapport d'activité de la section du temps du BIPM.
  3. Compte rendu des réunions suivantes :
    - 21<sup>e</sup> Assemblée générale de l'Union astronomique internationale, Buenos-Aires,
    - Commission d'étude 7 du Comité consultatif international des radiocommunications, Genève,
    - Union radio-scientifique internationale,
    - Groupe de travail sur l'amélioration du TAI,
    - Groupe de travail sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS,
    - Groupe de travail *ad hoc* du BIPM sur les comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite.
  4. Synchronisation des horloges au moyen de satellites.
  5. Implications de la relativité générale dans la métrologie du temps.
  6. Temps des pulsars.
  7. Questions diverses.
  8. Recommandations.
-

---

RAPPORT DU COMITÉ CONSULTATIF  
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE  
(12<sup>e</sup> session - 1993)

AU  
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

par A. BAUCH, rapporteur

---

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) a tenu sa 12<sup>e</sup> session au Bureau international des poids et mesures (BIPM), à Sèvres, du mercredi 24 au vendredi 26 mars 1993.

Étaient présents :

J. KOVALEVSKY, secrétaire du CIPM, président du CCDS.

Les délégués des laboratoires et organisations membres :

Bureau national de métrologie : Laboratoire primaire du temps et des fréquences [LPTF], Paris (M. GRANVEAUD).

Comité consultatif international des radiocommunications [CCIR] de l'Union internationale des télécommunications (J. McA. STEELE).

Communications Research Laboratory [CRL], Tokyo (K. NAKAGIRI).  
Conseil national de recherches du Canada [NRC], Ottawa (R.J. DOUGLAS).

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield (P.T.H. FISK).

Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques [VNIIFTRI], Moscou (N.B. KOSHELYAEVSKY).

Institut national de métrologie [NIM], Beijing (MA FENGMING).  
Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris [IEN], Turin (A. GODONE).

Korea Research Institute of Standards and Science [KRISS], Taejeon (NAK SAM CHUNG).

Laboratoire de l'horloge atomique [LHA] du Centre national de la recherche scientifique, Orsay (C. AUDOIN).

National Institute of Standards and Technology [NIST], Boulder (D.B. SULLIVAN).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (S. POLLITT).  
National Physical Laboratory of Israel [INPL], Jérusalem  
(A. LEPEK).  
National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Tsukuba  
(Y. NAKADAN).  
Office fédéral de métrologie [OFM], Wabern/Observatoire cantonal  
[ON], Neuchâtel (P. THOMANN).  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig  
(K. DORENWENDT, A. BAUCH).  
Technical University [TUG], Graz (D. KIRCHNER).  
Union astronomique internationale [UAI] (G.M.R. WINKLER).  
Union radio-scientifique internationale [URSI] (J. McA. STEELE).  
U.S. Naval Observatory [USNO], Washington (G.M.R. WINKLER).  
Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (G. DE JONG).

Membre nominativement désigné :

B. GUINOT, Chartrettes (France).

Le directeur du BIPM (T.J. QUINN).

Invités :

D.W. ALLAN, Allan's TIME, Fountain Green, Utah (É.-U. d'Amérique).

A. de MARCHI, Politecnico di Torino (Italie).

Assistaient aussi à la session : P. GIACOMO, directeur honoraire du BIPM ;

C. THOMAS, J. AZOUBIB, W. LEWANDOWSKI, G. PETIT et P. WOLF (BIPM)

Excusés :

Union géodésique et géophysique internationale [UGGI] ; National Physical Laboratory of India [NPLI], New Delhi ; Observatoire royal de Belgique [ORB], Bruxelles.

M. FEISSEL, IERS, Paris ; J.H. Taylor, Princeton University.

Absent :

Real Instituto y Observatorio de la Armada [ROA], San Fernando.

Le président adresse ses souhaits de bienvenue aux membres du comité et leur demande de se présenter. Il propose ensuite de nommer M. Bauch (PTB) comme rapporteur, assisté, si besoin est, de M. Petit (BIPM); la proposition est adoptée à l'unanimité. M. Quinn, directeur du BIPM, prend ensuite la parole pour accueillir les délégués et présenter dans leurs grandes lignes les travaux effectués au BIPM. Le président rappelle enfin que le Comité international des poids et mesures (CIPM) a repris quatre des recommandations que le CCDS lui avait soumises



à la suite de sa dernière réunion. Ces recommandations ont fait l'objet d'une résolution formelle [Résolution1] adoptée par la 19<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures (CGPM) en 1991. Cette résolution concerne les moyens d'améliorer les étalons de temps et les comparaisons d'horloges: accroissement du nombre d'horloges primaires, études pour améliorer l'exactitude des horloges, études des conditions d'installation qui risquent d'influer sur le fonctionnement des horloges commerciales et établissement d'un réseau de comparaisons d'horloges au moyen du Global Positioning System (GPS), réseau fondé sur des coordonnées d'antennes bien connues et sur des équipements bien étalonnés. Il est à noter que certains de ces points figurent encore à l'ordre du jour de la présente réunion. Le président souligne également que, parmi les points particuliers à discuter, il y a l'apparition de nouveaux étalons de fréquence présentant une incertitude de l'ordre de  $10^{-16}$  en fréquence normée et les problèmes posés par le traitement des données de comparaisons d'horloges obtenues avec une incertitude meilleure que 1 ns.

Le président soumet à l'approbation du comité le projet d'ordre du jour, projet qui est adopté sans modification, puis demande aux délégués de présenter un bref rapport à propos du premier point.

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

M. Dorenwendt présente un bref rapport sur les progrès réalisés à la Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) (Doc. CCDS/93-2). Les deux horloges primaires à césium CS1 et CS2 fonctionnent sans interruption depuis 1986 ; leur différence moyenne de fréquence est de l'ordre de  $25 \times 10^{-15}$  et présente une instabilité correspondant à une valeur de l'écart-type d'Allan  $\sigma_y(\tau)$  de  $6 \times 10^{-15}$  pour des durées d'intégration,  $\tau$ , de 250 jours. Deux nouvelles horloges, CS3 et CS4, montées verticalement, ont été mises en service respectivement en 1992 et 1991, et l'on procède actuellement à l'évaluation de leurs résultats. On pense que des données obtenues avec l'horloge CS4 seront prochainement communiquées au BIPM. Comme les atomes qui contribuent à la transition de cette horloge sont plus lents que ceux des anciennes horloges, il devrait être possible de réduire certains effets systématiques.

Les recherches effectuées à la PTB portent aussi sur le décalage de fréquence dû aux transitions de Majorana dans le jet atomique, l'étude des configurations de la cavité qui réduisent les variations spatiales de phase (en collaboration avec M. de Marchi) et l'étude du pompage optique en collaboration avec le LPTF et avec l'appui de la Communauté européenne. En vue de réaliser un étalon de fréquence fondé sur le stockage d'ions, on a mesuré la fréquence de 12,6 GHz d'une transition de structure

hyperfine de l'ion  $^{171}\text{Yb}^+$  avec une incertitude (type B) de 9 mHz. On a obtenu un facteur de qualité  $Q$  de l'ordre de  $10^{12}$ . Des recherches sont également en cours sur les transitions de ce même ion dans l'infrarouge, dont les fréquences de résonance sont mesurables à l'aide de la chaîne de fréquences qui est en place à la PTB. Pour terminer, M. Dorenwendt souligne que l'échelle de temps UTC(PTB) n'a jamais été pilotée et qu'elle est fondée depuis l'automne 1991 sur les signaux obtenus avec l'horloge CS2. Le président félicite la PTB pour les résultats que ce laboratoire a obtenus, puis demande si les deux horloges primaires CS1 et CS2 peuvent être considérées comme parfaitement indépendantes. M. Dorenwendt indique que, habituellement, les corrélations apparentes dans les données proviennent d'une réaction commune à des changements de conditions d'environnement. Il considère cela très improbable pour CS1 et CS2 car la preuve a été faite que CS2 n'est pas influencée par les perturbations de l'environnement. Toutefois, M. Lepek affirme que la variation de l'écart-type d'Allan  $\sigma_y(\tau)$ , de CS2 comparée à CS1, observée pour des durées d'intégration  $\tau$  de l'ordre de 12 heures, laisse entrevoir l'existence de changements systématiques de fréquence.

M. Nakagiri présente un rapport sur les nombreuses activités du Communications Research Laboratory (CRL) (Doc. CCDS/93-3). L'horloge Cs1, qui a déjà quinze ans, a fait l'objet de plusieurs modifications et elle est maintenant soumise à des évaluations périodiques. Des résultats vont être communiqués au BIPM, comme cela a été fait à trois reprises au cours des quatre années écoulées. À ces occasions on a constaté que l'accord avec les horloges du NRC et de la PTB se faisait à chaque fois à  $1 \times 10^{-13}$  près. L'horloge a été équipée de nouveaux aimants, d'un tube protégeant le jet atomique des champs parasites de micro-ondes et d'un isolement thermique complet. Malgré cela la fréquence de l'horloge est encore affectée de façon sensible par des variations de la puissance en micro-onde, phénomène qui n'est pas complètement compris.

On a abandonné le travail sur Cs2, une horloge à jet à pompage optique, par manque de diodes laser suffisamment fiables. En revanche, on a entrepris des recherches sur une horloge à fontaine de césium et on a déjà détecté des atomes refroidis. On utilise un laser au saphir de titane comme source de lumière.

Au CRL, on travaille aussi sur un maser compact à hydrogène et sur des dispositifs à ions piégés, utilisant des pièges du type Paul et Penning ; on étudie les ions  $\text{Ca}^+$  et  $\text{Be}^+$ , et on a réalisé, en particulier, le refroidissement par laser d'ions  $\text{Ca}^+$  à moins de 0,1 K en utilisant des lasers solides.

On a contribué à améliorer les comparaisons horaires par le GPS en mettant au point un récepteur à deux fréquences qui ne décode pas les signaux (appelé TECmeter) et qui permet de mesurer le retard ionosphérique de propagation des signaux du GPS. Des comparaisons d'horloges par aller et retour ont été réalisées avec le KRISS en utilisant

un modem MITREX ainsi qu'un modem (I-Modem) récemment mis au point et compatible avec le MITREX. Ces mesures ont montré une médiocre stabilité à long terme de l'équipement. Le CRL travaille aussi sur le chronométrage des pulsars et sur des expériences en interférométrie à très longue base (VLBI).

Le président souligne que le CRL travaille dans tous les domaines qui intéressent la communauté du temps et des fréquences. Il demande ensuite à M. Douglas, Conseil national de recherches du Canada (NRC), de présenter son rapport (Doc. CCDS/93-4).

M. Douglas mentionne que trois des quatre horloges primaires à césium appartenant au NRC ont contribué à l'élaboration du TAI depuis la dernière session du CCDS, mais que tout récemment, les horloges CsV et CsVI A se sont trouvées à court de césium; ces deux horloges seront remises en service immédiatement après quelques modifications. On a utilisé la quatrième horloge primaire, CsVI B, pour des recherches expérimentales qui ont montré, entre autres, la possibilité de réaliser l'isolation électrique de la cavité micro-onde dans ce type d'horloge. On peut ainsi améliorer la stabilité à long terme et réduire la sensibilité à l'environnement de CsVI A lorsqu'on lui applique cette technique. Les travaux de recherche sont nettement centrés sur la mise au point d'une horloge à fontaine d'atomes de césium refroidis et sur un système électronique de conception nouvelle approprié à ce type d'appareil. On poursuit les recherches sur deux masers à hydrogène actifs.

M. Douglas attire ensuite l'attention du comité sur les travaux effectués dans la section des longueurs du NRC qui sont susceptibles d'avoir un impact dans le domaine des fréquences. En utilisant la chaîne de fréquences du NRC, on a mesuré la fréquence absolue d'une transition optique de structure fine dans un ion de baryum isolé dans un piège de Paul et refroidi par interaction avec le rayonnement d'un laser, avec une exactitude d'environ  $1 \times 10^{-10}$ ; c'est un résultat que l'on pense pouvoir améliorer. D'autres recherches portent sur un étalon de fréquence optique, fondé sur l'ion strontium, dans lequel on utilisera seulement des diodes laser.

On a régulièrement fait des comparaisons d'horloges par aller et retour avec le NIST et l'USNO en utilisant des satellites américains nationaux, mais on n'a fait aucune évaluation des résultats qui pourrait permettre d'indiquer l'exactitude obtenue.

En réponse à une question de M. Sullivan, M. Douglas confirme que l'on peut trouver la toute nouvelle théorie du fonctionnement en mode pulsé d'une fontaine dans les publications scientifiques courantes.

Le Président demande ensuite à M. Nak Sam Chung, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), de présenter son rapport (Doc. CCDS/93-9). Au KRISS on travaille depuis quatre ans sur un dispositif à jet de césium à pompage optique. On y utilise un système de lasers comparable à celui de NIST-7. On a obtenu des signaux de résonance

mais on n'a encore effectué aucune mesure de fréquence. On étudie aussi le piégeage d'ions dans un piège de Paul. Le laboratoire est équipé d'un maser à hydrogène actif et de plusieurs horloges commerciales à césium. Ils servent à réaliser TA(KRIS) et UTC(KRIS). En collaboration avec le CRL, on a activement étudié la technique de mesure du retard ionosphérique des signaux du GPS et les comparaisons horaires par aller et retour. Le président salue chaleureusement ce nouveau membre du CCDS et souhaite plein succès aux travaux futurs du KRISS.

Deux délégués français donnent un compte rendu des activités poursuivies dans leurs laboratoires (Doc.CCDS/93-6). Tout d'abord M. Granveaud décrit le travail effectué au Laboratoire primaire du temps et des fréquences (LPTF), à l'Observatoire de Paris (OP). Il souligne que ces travaux se situent dans la ligne des recommandations faites par le CCDS en 1989. L'échelle de temps UTC(OP) est conservée à  $\pm 1 \mu\text{s}$  près par rapport à UTC depuis 1989. Depuis quelques années, le LPTF travaille à mettre au point une horloge primaire utilisant la technique du pompage optique. L'appareil en est au stade opérationnel, mais aucune évaluation de son exactitude n'a encore été faite. On a obtenu des résultats très prometteurs quant à la stabilité de sa fréquence : pour des temps d'intégration  $\tau$  de 100 s à  $10^4$  s, l'écart-type d'Allan suit une loi de variation en  $\tau^{-1/2}$ , et est égal à  $6 \times 10^{-14}$  pour  $\tau$  égal à 100 s. D'autres recherches concernent l'installation d'une horloge à fontaine d'atomes de césium refroidis. On a étudié en détail les mécanismes de refroidissement et les propriétés du nuage d'atomes froids et on a observé les franges de Ramsey. On estime actuellement que les collisions entre les atomes refroidis imposeront une limite à l'exactitude du dispositif.

Le LPTF participe à l'établissement d'un complément européen au GPS; il a par ailleurs participé à une expérience de comparaison horaire combinée, entre l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), à Grasse, et l'Université technique de Graz (TUG), utilisant la synchronisation par laser visant un satellite (LASSO) et les comparaisons d'horloges par aller et retour.

En collaboration avec d'autres laboratoires français et le BIPM, on a mesuré la fréquence d'un laser à He-Ne asservi sur l'iode à 473 THz avec une exactitude de  $1 \times 10^{-11}$ , limitée par la reproductibilité du laser. L'une des valeurs recommandées par le CIPM pour la réalisation du mètre sera fondée sur ce résultat. À la demande de M. Douglas, M. Granveaud explique que l'exactitude de la fréquence de l'oscillateur de référence, un laser à  $\text{CO}_2$  asservi sur  $\text{OsO}_4$ , est de  $2 \times 10^{-12}$ .

M. Audoin rend compte des activités du Laboratoire de l'horloge atomique (LHA) du Centre national de la recherche scientifique. Il fait remarquer que ce laboratoire cherche tout d'abord à comprendre la physique de l'étalon de fréquence à jet de césium à pompage optique, en particulier l'interaction entre la lumière et les atomes. Dans ce but, les problèmes liés à l'utilisation de la raie  $D_1$  pour exciter les atomes,

à la création de cohérences de Zeeman et aux fluctuations de l'amplitude et de la fréquence du laser qui ont pour conséquence un bruit corrélé dans la détection de la transition d'horloge, ont été considérés. On a aussi étudié l'utilisation d'une cavité à micro-onde qui induit une différence de phase égale à  $\pi$  entre ses extrémités. Cela présente certains avantages mis à profit dans un tout petit appareil qui a été construit et pour lequel on procède actuellement à des essais de fonctionnement. Des études plus générales ont porté sur l'instabilité de la fréquence des étalons de fréquence passifs due à un effet d'intermodulation et sur certains systèmes d'accord automatique des cavités de masers à hydrogène.

Deux nouvelles études ont été commencées : l'une portant sur la mise au point d'une source continue d'atomes de césium refroidis et l'autre sur la faisabilité d'un étalon de fréquence optique fondé sur des ions calcium piégés et refroidis par interaction avec le rayonnement de lasers.

Le président souligne la contribution importante de ce laboratoire à la compréhension de la physique des horloges à césium. À la demande de M. Bauch, M. Audoin précise que l'on n'a pas encore fait de mesure de la fréquence de la transition d'horloge au LHA mais que cela sera fait à l'avenir.

Présentant l'état d'avancement des travaux du National Physical Laboratory (NPL), M. Pollitt souligne qu'il a été possible de conserver UTC(NPL) à  $\pm 100$  ns de l'UTC pendant toute l'année 1992. L'UTC(NPL) est fondé sur les signaux d'un maser à hydrogène actif depuis juin 1992 (Doc.CCDS/93-11). On a étudié les comparaisons horaires au moyen de signaux de télévision provenant de satellites à émission directe et le NPL sera très prochainement en mesure de prendre part aux expériences de comparaisons horaires par aller et retour sur satellite. Deux accords de recherche externe sont en cours, l'un avec l'Université de Leeds pour l'observation des satellites du GLONASS, en vue de la publication régulière par le BIPM des différences de temps entre le temps du GLONASS et l'UTC. Dans le cadre du second accord, on met actuellement au point, à l'Université d'Oxford, une horloge à fontaine d'atomes de césium refroidis. L'appareil est construit et des franges de Ramsey de largeur inférieure à 2 Hz ont été observées. Dans la section des longueurs du NPL, les recherches portent sur des étalons de fréquence optique fondés sur des ions ytterbium et strontium. Dans le programme de métrologie fondamentale du NPL, il est prévu de s'intéresser aux étalons de fréquence cryogéniques.

En présentant la contribution du NIST (Doc. CCDS/93-15), M. Sullivan souligne que l'horloge NIST-7 à pompage optique du césium, récemment construite, constitue maintenant l'étalon officiel de fréquence des États-Unis d'Amérique. On en attend une exactitude finale de  $1 \times 10^{-14}$  et la première évaluation dont on dispose actuellement confirme  $4 \times 10^{-14}$ . L'évaluation de cet étalon est en partie facilitée par l'excellente

stabilité à court terme qui permet de faire des expériences de durée suffisante pour une bonne estimation des erreurs systématiques. M. Sullivan signale la contribution d'autres laboratoires au succès de NIST-7 et, en particulier, le travail de M. de Marchi. Il mentionne aussi une nouvelle évaluation de l'ancien étalon NBS4. Des discussions antérieures entre délégués et avec d'autres spécialistes du temps et des fréquences l'incitent à souligner que, pour comparer utilement les résultats d'exactitude de différentes horloges primaires, il est indispensable de disposer d'une documentation complète, exposant de façon critique toutes les corrections qu'il est nécessaire d'appliquer.

Les travaux qui sont faits au NIST portent aussi sur l'obtention d'oscillateurs locaux ultra-stables qui sont nécessaires pour les étalons de fréquence passifs. On espère pouvoir prochainement faire fonctionner un étalon de fréquence à 40,5 GHz fondé sur des ions mercure refroidis dans un piège linéaire par interaction avec le rayonnement émis par un laser. On poursuit des recherches sur les étalons de fréquence optique et sur la physique quantique des ions refroidis. Ce dernier sujet fait l'objet d'un exposé plus détaillé, à la demande de M. Douglas. En réponse à M. Bauch, M. Sullivan fait remarquer que l'ensemble des ions refroidis par laser dans le piège ne paraît pas être l'objet d'un réchauffement significatif pendant une durée allant jusqu'à 100 secondes après l'arrêt des lasers. Le président rend hommage à la présentation concise de la très importante contribution faite par le NIST.

En ce qui concerne les activités du CSIRO (Doc. CCDS/93-16), M. Fisk parle de la mise au point d'un étalon de fréquence dans le domaine des micro-ondes, fondé sur le stockage d'ions ytterbium refroidis dans un piège linéaire de Paul. On a observé des franges de Ramsey et mis en évidence le refroidissement par rayonnement laser.

À propos des activités de l'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (IEN) (Doc. CCDS/93-17), M. Godone présente les résultats récents obtenus avec l'étalon de fréquence à jet de magnésium à 601 GHz. On a mesuré la transition d'horloge dans  $^{24}\text{Mg}$  avec une exactitude de  $1 \times 10^{-12}$  et on a trouvé une reproductibilité de  $3 \times 10^{-13}$ . L'IEN collabore étroitement avec d'autres laboratoires italiens dans le domaine des horloges à césium et du refroidissement par rayonnement laser des jets atomiques. Une liaison par aller et retour utilisant un satellite national a fonctionné expérimentalement pendant quelques mois. Mme Tavella est venue au BIPM à plusieurs reprises pour travailler sur les algorithmes des échelles de temps.

La contribution du National Research Laboratory of Metrology (NRLM) (Doc. CCDS/93-19) est présentée par M. Nakadan qui donne d'abord les résultats obtenus avec une horloge à césium à pompage optique. On a procédé à une analyse théorique et expérimentale du décalage par

effet Stark alternatif dû à l'interaction avec le rayonnement du laser et on a trouvé un bon accord. Cela permet d'évaluer ce décalage de fréquence potentiel dans les horloges à césium à pompage optique. On met au point une horloge à fontaine d'atomes de césium refroidis et comme première étape on a étudié le refroidissement et le piégeage des atomes. Un étalon de fréquence à ions piégés est aussi en cours d'élaboration et comme dans d'autres laboratoires, l'ion ytterbium qui présente des transitions de référence dans les domaines optique et micro-onde du spectre électromagnétique, est considéré comme un candidat de prédilection.

M. Koshelyaevsky donne des détails sur la façon d'obtenir les échelles de temps et les comparaisons horaires à l'Institut de métrologie du temps et de l'espace (IMVP-VNIIFTRI) (Doc. CCDS/93-20). L'échelle UTC(SU) est une échelle sans réalisation physique, fondée sur quatre masers à hydrogène actifs conservés avec soin (CH1-80 de IEM Quartz). C'est en fait une échelle de temps atomique libre dont l'unité d'échelle a été obtenue il y a plusieurs années à partir d'horloges à césium et qui est maintenant conservée sans pilotage par rapport à UTC. Dans le cadre de comparaisons internes à la Russie on avait constaté précédemment l'excellent fonctionnement des masers. Les liaisons récemment effectuées par le GLONASS avec l'Université de Leeds, ainsi que les liaisons par le GPS faites avec l'aide du BIPM l'ont confirmé. La stabilité de UTC(SU), comparé à UTC(PTB), est meilleure que  $1 \times 10^{-14}$  pour des durées moyennes allant de 10 à 100 jours. Le VNIIFTRI met actuellement au point un équipement pour les comparaisons horaires par le GLONASS en collaboration avec le Research Radiotechnical Institute de Saint-Petersbourg. Le président et plusieurs délégués expriment leur surprise quant à la remarquable performance des masers. À des questions posées par M. Thomann et M. Winkler, M. Koshelyaevsky précise que plus de dix masers sont en fonctionnement dans le laboratoire ; ils font l'objet d'une évaluation, qui dure habituellement 6 mois, au terme de laquelle on constate généralement qu'ils sont très stables. Ils fonctionnent avec un système spécifique d'accord automatique de la cavité et leur dérive résiduelle de fréquence, d'environ  $1 \times 10^{-16}$  par jour, est attribuée au vieillissement du revêtement de téflon. En réponse à une question de M. Allan, M. Koshelyaevsky dit que UTC(SU) est défini comme étant la moyenne simple des données de quatre masers. Le président demande ce qu'il en est des travaux sur les horloges primaires à césium au VNIIFTRI. M. Koshelyaevsky indique que deux des anciennes horloges ont été transportées dans un nouveau bâtiment du laboratoire et qu'elles seront prochainement remises en service. Une nouvelle horloge, de conception classique, est en cours de construction. Par la suite Mme Thomas fait remarquer que les résultats du BIPM laissent apparaître une instabilité plus grande dans les résultats de comparaison des échelles de temps UTC(SU) et UTC(PTB) que celle indiquée précédemment. Cette question reste ouverte pour le moment.

Le président demande ensuite à M. Thomann, représentant l'Office fédéral de métrologie (OFM) (Doc. CCDS/93-22), de présenter les grandes lignes des activités de l'Observatoire de Neuchâtel. M. Thomann signale que des masers à hydrogène actifs sont en cours de mise au point pour aider la recherche spatiale et les stations d'interférométrie à très longue base. Des oscillateurs à rubidium ultra-stables sont aussi en cours de construction pour utilisation dans l'espace dans le cadre d'un contrat avec l'Agence spatiale européenne et en vue d'applications générales dans un programme EUREKA. On a construit un piège magnéto-optique pour les atomes de césium, dans le but d'obtenir une source continue d'atomes refroidis.

Pour terminer, le président demande des informations sur les étalons de fréquence utilisés au United States Naval Observatory (USNO). M. Winkler souligne la remarquable performance à long terme des masers à hydrogène actifs dont on dispose maintenant. Il confirme qu'au moins certains appareils fabriqués par Sigma-Tau présentent une dérive de fréquence inférieure à  $1 \times 10^{-16}$  par jour, comparable aux résultats obtenus par le VNIIFTRI et la PTB. L'observation des premiers exemplaires des nouvelles horloges à césium HP 5071A, commercialisées par Hewlett-Packard, montre qu'elles ne sont pas sensibles aux variations des conditions d'environnement et que leur fonctionnement à long terme est bon, avec un niveau de bruit de scintillation d'environ  $6 \times 10^{-15}$  pour des durées d'intégration de 10 à 60 jours. Deux étalons à piège à ion mercure construits par Hewlett-Packard sont utilisés à l'USNO et l'on en a commandé un exemplaire d'un modèle nouveau mis au point par le Jet Propulsion Laboratory, qui promet d'avoir une stabilité de fréquence encore meilleure.

Le président invite ensuite M. de Marchi à s'exprimer sur le premier point de l'ordre du jour. M. de Marchi expose donc ses idées à propos de la nécessité de développer des étalons de fréquence de différentes configurations (Doc. CCDS/93-8). Selon lui, au cours des décennies qui viennent de s'écouler, l'exactitude des horloges primaires de conception classique s'est améliorée de plusieurs ordres de grandeur, cela ne s'étant évidemment pas fait de façon continue mais par étapes successives. Récemment il a été proposé plusieurs nouvelles configurations d'horloges. En quelque sorte, toutes sont des systèmes optimisés sur des points précis, l'optimisation globale n'étant pas vraiment connue. Cependant les investigations sur ces nouveaux types d'étalons, par exemple la fontaine ou l'approche à champ C fort (faite au Politecnico di Torino par M. de Marchi lui-même), ont fourni l'occasion unique d'étudier de manière plus approfondie certains effets systématiques et de se rendre compte que, dans le passé, on a négligé ou mal compris certains effets intervenant dans les systèmes de conception classique. Accroître simplement le nombre d'horloges primaires classiques n'est donc d'aucun



secours pour améliorer le niveau d'exactitude et la résolution de la CGPM, que le président a mentionnée au début de la réunion, doit être interprétée comme étant un mandat pour accroître la diversité des configurations faisant l'objet de recherches.

À la demande du président, M. de Marchi expose le principe du champ C fort dans lequel la transition d'horloge est la transition  $(-1,-1)$  de l'état fondamental du césium dans un champ d'environ 0,08 tesla. Comme il n'existe pratiquement pas d'autre transition au voisinage, les effets de décalage de Rabi, de Ramsey et des transitions de Majorana sont insignifiants. Une conception particulière de la cavité contribuera aussi à supprimer les effets liés à la différence de phase entre ses extrémités. De plus, il existe une relation simple entre la fréquence de la transition  $(-1,-1)$  et l'écart entre les niveaux hyperfins en champ nul dans  $^{133}\text{Cs}$ . Il se peut que des écarts par rapport à cette relation existent, mais cela peut être contrôlé de façon expérimentale.

Une intense discussion suit l'exposé de M. de Marchi. En particulier, M. Dorenwendt et M. Bauch font remarquer que l'utilisation de nouvelles configurations ne constitue pas en soi une garantie d'exactitude si on ne respecte pas les critères de conception bien établis que l'on sait être nécessaires pour obtenir une exactitude élevée. M. Sullivan, M. Winkler et M. Audoin appuient ce commentaire, mais soulignent la nécessité de s'y intéresser tout de même car cela peut encore révéler des effets insoupçonnés jusqu'ici.

La question est posée de savoir si on pourrait trouver une personnalité bien choisie pour visiter les laboratoires qui ont des horloges primaires et s'assurer que l'exactitude avancée pour ces horloges est digne de foi et fondée sur des bases physiques et statistiques communes. M. Quinn répond que cette proposition n'est pas réaliste ; dans la pratique, cela ne peut se faire qu'en ayant recours à l'examen critique des pairs appartenant à la communauté scientifique.

Un projet de recommandation portant sur l'exactitude des étalons primaires de fréquence fait ensuite l'objet d'une discussion et, après révision du texte par un petit groupe de travail, la version définitive de la Recommandation S 1 (1993) est adoptée à l'unanimité.

## **2. Rapport d'activité de la section du temps du BIPM**

Dans son rapport sur les activités de la section du temps du BIPM (Doc. CCDS/93-1), Mme Thomas commence par donner les grandes lignes du calcul de l'Échelle atomique libre (EAL), qui est fondée sur la combinaison des données d'environ 185 horloges réparties dans 60 laboratoires. On a montré que le système de pondération des horloges,

utilisé dans l'algorithme du BIPM, permet d'obtenir la stabilité optimale à long terme de l'échelle de temps. À titre d'exemple, la stabilité de la fréquence de l'EAL par comparaison avec l'étalon primaire CS2 de la PTB est de  $1 \times 10^{-14}$  pour des durées d'intégration de 100 jours. La relation entre l'EAL et le TAI est ajustée lorsque cela est nécessaire au moyen de sauts discrets de fréquence (pilottage de fréquence), de telle sorte que l'unité d'échelle du TAI soit en accord étroit avec la seconde du SI telle qu'elle est réalisée par les horloges primaires à césium sur le géoïde en rotation. Depuis 1989 on a opéré douze ajustements de ce genre.

On a effectué plusieurs études sur les algorithmes d'échelles de temps. Ces études ont porté sur des comparaisons d'algorithmes et de règles de pondération, le problème de l'entrée et de la sortie d'horloges, la corrélation d'une horloge et de l'ensemble et la corrélation entre les variations de fréquence des horloges qui contribuent au TAI. Ce dernier point avait été soulevé lors de la 11<sup>e</sup> session du CCDS en 1989. On a abordé le problème de l'introduction des masers à hydrogène actifs dans l'ensemble d'horloges. Plusieurs d'entre eux ont récemment atteint le poids maximal et, à la fin de l'année 1992, la contribution relative totale de ces masers à l'Échelle atomique libre était de 13,5 %. On sait que les masers à hydrogène présentent une dérive de fréquence et, à l'avenir, il risque de se révéler nécessaire d'introduire une estimation de cette dérive dans le mode de prédiction des fréquences des horloges, utilisé par l'algorithme.

La section du temps du BIPM a participé activement à l'amélioration de l'exactitude des comparaisons d'horloges par le GPS. Cette technique est utilisée dans 36 des 45 centres qui maintiennent une réalisation locale de l'UTC. Mme Thomas fait une présentation de l'organisation et des méthodes de calcul de ce réseau international. Afin de pallier la dégradation des qualités du système due à l'accès sélectif (SA), on utilise des observations en vue strictement simultanée et des éphémérides précises des satellites. L'exactitude des comparaisons faites au moyen du GPS est contrôlée en vérifiant la condition de fermeture tout autour du globe. En utilisant des éphémérides précises, qui sont disponibles avec un certain retard, et des mesures du retard ionosphérique des signaux, on est parvenu à une fermeture présentant un résidu moyen de l'ordre de quelques nanosecondes. Mme Thomas fait remarquer qu'il n'est pas possible d'attribuer ce niveau d'exactitude à chaque liaison individuelle car l'étalonnage et les variations à long terme du retard des signaux dans les installations réceptrices affectent les liaisons individuelles mais pas la condition de fermeture. Ces questions sont aussi abordées dans le rapport du Groupe de travail sur la normalisation des comparaisons d'horloges par le GPS, en même temps que le problème de normalisation des récepteurs.

La première comparaison en vue simultanée à l'aide du GLONASS entre le VNIIFTRI (Russie) et un laboratoire occidental a été réalisée

en 1992. Il semble que le GLONASS devrait permettre de faire des comparaisons horaires avec une précision comparable à celle obtenue avec le GPS. Ces travaux seront poursuivis dès que l'on disposera de récepteurs commerciaux, pilotés par ordinateur. Preuve a été faite que la comparaison d'horloges par aller et retour sur satellite en orbite géostationnaire, constitue une méthode de rechange pour des comparaisons horaires exactes. Le BIPM a pris une part active aux expériences concernant cette méthode de comparaison d'horloges et il a présidé le Groupe de travail *ad hoc* sur les comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite. Le BIPM est aussi impliqué dans des expériences de synchronisation réalisées par tir de lasers visant des satellites.

Pour conclure, Mme Thomas précise qu'il sera rendu compte des autres activités, en particulier de celles qui concernent la relativité générale et les pulsars, lorsque les points correspondants de l'ordre du jour seront abordés. Elle remercie tous les laboratoires et les sociétés qui ont apporté leur contribution aux travaux de la section du temps en prêtant des appareils.

Le président remercie Mme Thomas pour le caractère exhaustif et la qualité de sa présentation, ainsi que pour l'excellent travail effectué au sein de la section du temps du BIPM. Dans la suite des discussions, M. Winkler demande des renseignements sur l'étalonnage des équipements du GPS. M. Lewandowski indique que deux expériences successives du même étalonnage différentiel donnent des reproductibilités de 1 à 4 ns. Une autre question est celle de l'introduction des masers à hydrogène dans l'EAL. M. Bauch demande si les calculs de l'EAL ont été faits aussi sans inclure les résultats des masers. Mme Thomas répond que cela n'a pas encore été fait. M. Bauch donne quelques indications concernant les deux masers de la PTB, que l'on avait soupçonné de fournir des données corrélées. Il indique que, ayant été fabriqués à la même époque, leur vieillissement peut présenter des analogies. La corrélation pourrait alors être intrinsèque et ne pas résulter des conditions d'environnement ou d'une relation de fonctionnement entre les deux appareils. On peut aussi constater l'existence d'une corrélation dans les données quand les masers sont beaucoup plus stables que l'échelle de référence à laquelle ils sont comparés. M. Winkler explique qu'à l'USNO, un poids variable avec le temps est attribué aux masers dans l'algorithme qui sert à calculer l'échelle A1(MEAN), ce qui permet d'empêcher que la dérive des masers ne détériore la stabilité à long terme de l'échelle. M. Winkler demande ensuite si le BIPM pourrait publier l'UTC dans des délais plus brefs et s'il serait utile de soumettre davantage de données provenant des horloges, par exemple sur une base quotidienne. Mme Thomas explique qu'il faut s'en tenir au mode opératoire actuel tant que les données d'horloges des laboratoires qui ne sont pas reliés au moyen du GPS sont utilisées dans le calcul. Elle attire aussi l'attention sur le fait que les données des laboratoires sont fréquemment

transmises au BIPM en dehors des délais prévus et que, de plus, il est quelquefois apporté des corrections à des données utilisées par le BIPM plusieurs mois auparavant. Tout cela rend le calcul rapide et définitif de l'UTC d'autant plus difficile. Mme Thomas ajoute qu'il est prévu de calculer à l'avenir l'UTC mensuellement, probablement en attribuant le poids zéro aux horloges qui ne sont pas reliées au moyen du GPS. À la demande de MM. Lepek et Bauch, les valeurs de différences de fréquence entre le TAI et l'EAL seront dorénavant incluses dans la *Circulaire T* du BIPM.

Le président entame la discussion du document (Doc. CCDS/93-7) soumis par le Service international de la rotation terrestre (IERS) et il demande à M. Guinot d'en exposer le contenu. Le document de l'IERS soulève le problème de savoir s'il est encore nécessaire de maintenir la pratique actuelle des secondes intercalaires (ce qui conduit à avoir une seconde intercalaire presque chaque année) et si l'on peut toujours considérer cela comme un mode opératoire optimal. M. Winkler dit qu'après avoir procédé de cette façon depuis plus de vingt ans, le moment est probablement venu de ré-examiner la question. Il rappelle qu'il a déjà proposé dans le passé que les secondes intercalaires ne soient introduites que tous les quatre ans dans le jour intercalaire (si nécessaire) mais que sa proposition n'a pas été adoptée en 1970. On ne pourrait modifier maintenant ce système qu'après en avoir envisagé soigneusement toutes les conséquences, car cela risque de toucher la signification même du mot temps pour l'homme de la rue. Ce point de vue est partagé par la plupart des délégués. M. Guinot propose que le rapport de l'IERS soit porté à la connaissance d'autres organisations, en particulier à celle du Comité consultatif des radiocommunications (CCIR), qui fait maintenant partie du Bureau des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (UIT). C'est à cet organisme qu'incombe la responsabilité formelle d'une nouvelle décision, plutôt qu'au CCDS. Il est demandé au directeur du BIPM de préparer une lettre dans ce sens. (Un moment plus tard, le directeur du BIPM soumet un projet de lettre qui est approuvé par le Comité).

### **3. Comptes rendus d'autres réunions**

#### **3.1 Union astronomique internationale**

M. Winkler présente quelques sujets qui intéressent le CCDS et qui font l'objet de la Résolution A4 de la 21<sup>e</sup> Assemblée générale de l'Union astronomique internationale (Doc. CCDS/93-18). La Recommandation I introduit de façon explicite la théorie de la relativité générale comme cadre théorique pour la définition des systèmes de coordonnées de

l'espace-temps, puisqu'elle définit leur élément relativiste  $ds^2$ . De plus, pour toutes les mesures, les unités physiques de base sont le mètre du SI et la seconde du SI. Il faut prendre garde au fait que les unités d'échelle des coordonnées de temps établies en conformité avec la Résolution A4 de l'UAI diffèrent du mètre et de la seconde sur le géoïde en rotation. Elles présentent donc une divergence séculaire par rapport au TAI. M. Guinot rappelle que l'Union géodésique et géophysique internationale a adopté les mêmes règles que l'UAI pour définir, dans sa Résolution 2 (1991), le système de référence géocentrique. Pour des raisons pratiques, l'UAI a aussi défini le temps terrestre TT, qui ne suit pas la règle générale de définition des coordonnées de temps car son unité d'échelle est, par définition, égale à la seconde du SI sur le géoïde en rotation. TT est une forme idéale du TAI, à l'exception du décalage de 32,184 s entre les deux échelles. Le président souligne que cette Résolution est fondamentale pour les travaux futurs dans le domaine des références spatio-temporelles, et qu'elle contribuera à unifier le monde scientifique en introduisant les unités du SI comme base de toutes les mesures. M. Winkler souligne que l'UAI a fait, une fois de plus, part de l'intérêt extrême qu'elle porte à l'établissement et à la dissémination d'échelles de temps stables, car celles-ci sont nécessaires pour toutes les observations à long terme.

M. Allan mentionne que l'UAI va organiser un atelier pour étudier le temps des pulsars-milliseconde. Le président lui demande de s'assurer que des invitations à participer à cet atelier seront envoyées aux membres du CCDS.

### **3.2 Comité consultatif international des radiocommunications**

À la demande du président, M. Steele rend compte des activités du Comité consultatif international des radiocommunications (CCIR), qui fait partie maintenant du Bureau des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (UIT), susceptibles d'intéresser le CCDS. M. Steele signale que les anciens groupes d'étude 2 et 7 ont fusionné pour donner un nouveau groupe d'étude 7 intitulé 'Services scientifiques', qui s'occupe aussi de la recherche spatiale et de la radioastronomie. Les émissions de signaux horaires et de fréquences étalons sont étudiées par le Groupe de travail 7A présidé par M. Leschiutta. M. de Jong préside le Groupe d'action 7/2 chargé des fréquences étalons et des signaux horaires émis par les satellites.

Deux recommandations ont été adoptées en 1992 : la Recommandation 538-2 sur les mesures de l'instabilité de fréquence et de temps, et la Recommandation 767 sur l'utilisation du GPS et du GLONASS pour les comparaisons d'horloges de haute exactitude.

M. Lepek demande la révision de la Recommandation 458-2 du CCIR qui spécifie 'que des marqueurs de temps présentant un écart de temps négligeable par rapport à UTC(k) soient immédiatement accessibles' dans le laboratoire k. Selon lui, cela n'est pas utile. En réponse, Mme Thomas explique qu'il est absolument nécessaire au BIPM, pour qu'il puisse fournir le TAI en temps voulu, que le laboratoire k référence directement ses données d'horloges et de comparaisons horaires à l'UTC(k) sans aucune correction ultérieure. Ceci est largement facilité s'il en existe une réalisation physique en temps (presque) réel dans le laboratoire k. On propose à M. Lepek de poser cette question au CCIR par l'intermédiaire des représentants israéliens de l'UIT.

À la demande de M. Dorenwendt, M. Steele explique que le système de documentation utilisé par le CCIR va changer de façon significative : le CCIR continuera à faire des recommandations mais, au lieu de publier des rapports mis à jour de façon périodique, il s'efforcera de publier des manuels contenant toute l'information relative à des sujets précis.

### **3.3 Union radio-scientifique internationale**

M. Steele parle ensuite d'une résolution (Commission A, A.1. Comparaisons horaires exactes) prise par la dernière assemblée générale de l'Union radio-scientifique internationale (URSI), demandant aux agences responsables du fonctionnement de systèmes de navigation par satellites de s'abstenir de dégrader leur service, compte tenu de l'utilisation qui en est maintenant faite par les milieux scientifiques. De l'avis de M. Winkler, cette résolution n'a pas eu d'effet notable pour le moment, mais il est convaincu que l'accumulation de demandes allant dans ce sens devrait finir par convaincre les autorités compétentes.

### **3.4 Groupe de travail sur l'amélioration du TAI**

Le président invite M. Winkler à présenter les conclusions du Groupe de travail sur l'amélioration du TAI qui a organisé la deuxième réunion des représentants des laboratoires de temps au cours des jours précédant la session du CCDS. Trois sujets ont fait l'objet de discussions et il en est rendu compte dans l'ordre de leur importance :

— aspects scientifiques de la formation du TAI : algorithmes, rassemblement des données et traitement de celles-ci ;

— disponibilité de moyens de haute précision pour les comparaisons horaires, tels que le GPS, le GLONASS, les comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite, les synchronisations par laser visant un satellite (LASSO) et l'interférométrie à très longue base (VLBI) ;

— problèmes de financement et de personnel pour les laboratoires qui contribuent au TAI.

De l'avis de M. Winkler, différents sujets discutés pendant la réunion pourraient faire l'objet de recommandations éventuelles du CCDS. Le président remercie le groupe de travail pour son travail préparatoire et M. Winkler qui en a dirigé les débats. Il propose ensuite de discuter l'un de ces sujets concernant la nécessité d'améliorer la synchronisation mondiale avec l'UTC. Selon M. Allan, cela serait très utile pour la synchronisation des réseaux de télécommunication. Après discussion et nouvelle rédaction, la Recommandation S 5 (1993) est adoptée à l'unanimité. Les autres sujets abordés lors de la réunion organisée par le Groupe de travail sur l'amélioration du TAI seront discutés plus tard pendant la réunion du CCDS.

### **3.5 Groupe sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS**

À l'invitation du président, M. Allan fait un compte rendu du travail détaillé et complet effectué par le Groupe sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS (GGTTS) (Doc. CCDS/93-23), sous-groupe du Groupe de travail sur l'amélioration du TAI. Il remercie en particulier Mme Thomas, qui assure le secrétariat de ce groupe. Le groupe s'est réuni pour la deuxième fois en juin 1992 (Doc. CCDS/93-12). Dans les jours qui ont précédé la présente réunion du CCDS, ce groupe a préparé un projet de texte, qui contient en annexe une description technique détaillée de la méthode d'évaluation et de présentation des données. Ce projet a été soumis au CCDS pour étude. Passant en revue une liste des effets qui limitent l'exactitude des comparaisons d'horloges au moyen du GPS, M. Allan explique comment des règles de normalisation peuvent aider à tirer pleinement profit des possibilités qu'offre le GPS. Travaillant au sein du Civil GPS Service Interface Committee, il signale aussi qu'un accord entre les ministères de la Défense et des Transports des États-Unis prévoit que tous les renseignements utiles concernant le GPS seront mis à la disposition des utilisateurs civils.

Le président adresse ses remerciements au groupe et à son président. L'ensemble du CCDS demande que le groupe poursuive son action. Au cours de la discussion, Mme Thomas et M. Sullivan font remarquer que la mise en oeuvre de l'accès sélectif (SA) constituera dans tous les cas un obstacle à la pleine utilisation du GPS, même si on a conçu des moyens permettant de contourner dans une certaine mesure cet accès sélectif. M. Winkler mentionne alors qu'il est possible d'améliorer la qualité de restitution du temps du GPS en temps réel, même si l'accès sélectif est mis en oeuvre ; il suffit de faire la moyenne des mesures obtenues sur un grand nombre de satellites du block II observés simultanément. On a aussi discuté des problèmes posés par l'étalonnage absolu et relatif des appareils. Pour terminer, le CCDS décide de rédiger

la Recommandation S 6 (1993), qui souligne ces problèmes et recommande de mettre en oeuvre les directives techniques élaborées par le groupe. À la demande de M. Bauch, M. Allan confirme que trois fabricants sont prêts à modifier le programme de leurs récepteurs selon ces directives.

### 3.6 Comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite

Sur invitation du président, M. Lewandowski parle de l'activité du Groupe de travail *ad hoc* du BIPM sur les comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite et en particulier de la deuxième réunion de ce groupe (Doc. CCDS/93-13) qui a eu lieu en octobre 1992. Son travail est fondé sur la déclaration 1989/1 du CCDS. En fait, il n'y a pas eu vraiment beaucoup d'activité concernant les comparaisons d'horloges par aller et retour au cours des toutes dernières années pour des raisons techniques et administratives. Actuellement, quatre types de modems sont commercialisés ou en cours de développement : MITREX, SATRE, ATLANTIS et NIST, mais on a rencontré des problèmes de compatibilité entre eux. Cependant, quelques expériences ont été couronnées de succès. Une expérience de comparaison des horloges de l'OCA, France, et de la TUG, Autriche, par aller et retour, a été réalisée par l'intermédiaire du satellite EUTELSAT positionné à 7° Est, et à l'aide de modems MITREX. Chaque point d'observation est obtenu avec une précision inférieure à 1 ns et l'exactitude de la méthode est caractérisée par une incertitude estimée à 1,7 ns (écart-type). Récemment, des résultats de comparaisons horaires entre la PTB et le FTZ en Allemagne, utilisant le satellite DFS-Kopernikus 2, et entre la TUG et l'USNO, utilisant INTELSAT V-A(F13) à 307° Est, ont été aussi publiés. On a de bonnes raisons de penser que la méthode d'aller et retour sur satellite géostationnaire est très efficace pour les comparaisons horaires en temps réel, dès lors que les modems utilisés peuvent aussi assurer l'échange des données d'une station à l'autre. Il n'en demeure pas moins que, jusqu'à maintenant, il n'existe aucune norme pour le traitement et l'évaluation des résultats. Le CCDS est d'accord pour transformer ce groupe *ad hoc* en un groupe de travail permanent chargé de contribuer à l'organisation et à l'évaluation d'expériences régulières par aller et retour, et d'élaborer une norme de présentation pour l'échange des données. Mme Thomas est nommée présidente de ce groupe de travail.

### 4. Synchronisation des horloges au moyen de satellites

Le président ouvre le débat à propos des systèmes utilisant des satellites pour les comparaisons d'horloges. Il invite d'abord M. Koshelevsky à présenter le système du GLONASS (une partie du Doc. CCDS/93-20). Ce système est utilisable depuis 1990 sur le territoire



russe et des résultats de comparaisons entre les différents laboratoires horaires dans le pays sont donnés. L'information la plus importante est qu'actuellement 13 satellites sont utilisables, répartis en constellation sur deux plans. En 1995, la constellation complète comportera 24 satellites répartis sur trois plans. Les documents officiels traitant du GLONASS (Interface Control Document) indiquent qu'il ne sera apporté aucune détérioration volontaire aux paramètres de navigation des satellites du GLONASS. Un centre d'information\* sur le GLONASS fournira à l'avenir tous les renseignements courants concernant ce système.

La coordination des deux systèmes, GPS et GLONASS, fait l'objet d'une discussion et, en réponse à une question posée, M. Lewandowski explique qu'il est possible d'élaborer un programme d'observations en vue simultanée pour des comparaisons d'horloges au moyen du GLONASS. Pour terminer, le CCDS se met d'accord sur le texte de la Recommandation S 3 (1993), qui est adoptée à l'unanimité.

Le CCDS aborde ensuite la question de savoir s'il faut rédiger une recommandation demandant de protéger le GPS et le GLONASS de toute interférence nuisible due à d'autres services. M. Steele n'y est pas du tout favorable car le forum au sein duquel se fait l'attribution des fréquences au niveau international est l'Union internationale des télécommunications. Il fait remarquer que le GLONASS est en partie en conflit avec les règlements en vigueur. Le président conclut alors à l'abandon de ce projet de recommandation.

Le point suivant concerne l'utilisation de masers à hydrogène dans l'espace. M. Thomann parle, à titre d'exemple, des projets d'envoyer deux masers à hydrogène actifs et compacts, à bord d'un satellite russe METEOR III, qui sera lancé en 1996 dans le cadre d'un programme conjoint Russie-Agence spatiale européenne. Cela fait partie d'une étude sur la dissémination du temps au moyen de liaisons par micro-ondes qui devraient permettre de faire des comparaisons de temps et de fréquence de grande précision, sans avoir besoin de passer par des techniques de vue simultanée. On fera en même temps des essais pour confirmer la possibilité d'utiliser ces masers dans de futures applications en interférométrie spatiale à très longue base.

Le président demande ensuite à deux autres participants de présenter leurs contributions relatives aux comparaisons d'horloges par aller et retour. M. Kirchner donne un bref aperçu des activités passées et présentes dans ce domaine (Doc. CCDS/93-5). La TUG travaille très activement sur ce type d'expérience en collaboration avec l'USNO et

---

\* Bolshevo-1, Région de Moscou, 141090, Russie.

prend part aux expériences de synchronisation par laser (LASSO) quand le satellite réflecteur est visible de la station laser de Graz. Pour les détails, il renvoie aux rapports de Mme Thomas et de M. Lewandowski. M. de Jong explique que l'équipement du VSL est presque prêt pour utiliser INTELSAT pour des comparaisons par aller et retour. Il donne aussi des détails sur les travaux que le VSL a faits sur l'étalonnage des équipements d'expérience par aller et retour en utilisant un simulateur des signaux du satellite (Doc. CCDS/93-14). L'exactitude finale de l'étalonnage est estimée à 2 ns. M. Kirchner et M. Douglas précisent qu'on ne peut pas étalonner de façon individuelle tous les retards internes du modem en utilisant un simulateur de signaux du satellite. M. de Jong indique que les retards internes du modem sont aussi mesurés, mais que, pour cela, il est nécessaire d'ouvrir le modem et de procéder à une modification temporaire.

Le président rend compte de l'état d'avancement de l'expérience LASSO et communique les tout derniers résultats des comparaisons faites entre l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), France, et le Mc Donald Astronomical Observatory, Texas, É.-U. d'Amérique. Le traitement statistique des résultats donne une précision de l'ordre de 100 ps (écart-type) pour chaque point d'observation correspondant aux comparaisons des échelles de temps, mais la dispersion des points successifs est de  $\pm 0,5$  ns. En réponse à une question posée, M. Lewandowski présente les travaux préliminaires de comparaison de la liaison LASSO avec une liaison en vue simultanée par le GPS, étalonnée avec une exactitude de 10 ns. Les valeurs obtenues présentent un décalage systématique de 190 ns qui peut être dû à un défaut d'étalonnage de l'équipement de tir du laser. Afin d'encourager les agences spatiales à équiper les satellites de matériel LASSO, un projet de recommandation est proposé et soumis à discussion. Dans l'ensemble les participants sont d'accord pour dire que les activités dans ce domaine doivent être poursuivies. Le président propose de désigner toutes ces activités par le sigle LASSO qui est déjà très largement utilisé. Il suggère une signification légèrement différente pour ce sigle : 'Laser Synchronization from Satellite Orbit', au lieu de 'Stationary Orbit', afin de pouvoir l'utiliser même quand l'orbite du satellite n'est pas géostationnaire. La Recommandation S 4 (1993) est finalement adoptée par le CCDS avec une abstention.

## **5. Implications de la relativité générale dans la métrologie du temps**

En avril 1992, M. Guinot a proposé au CIPM de créer un Groupe de travail sur l'application de la relativité générale à la métrologie (Doc. CCDS/93-21). Le président explique que le CIPM a approuvé

l'établissement de ce groupe de travail et invite donc le CCDS à en considérer la création. Il demande à M. Guinot d'exposer dans leurs grandes lignes les raisons de sa suggestion. M. Guinot explique que les effets de la relativité générale sont loin d'être négligeables compte tenu de l'exactitude des horloges primaires ou des méthodes de comparaison d'horloges utilisant des satellites. Bien évidemment, on applique actuellement des corrections mais on a identifié quelques difficultés pratiques dues à des définitions ambiguës, à une documentation insuffisante et à la prolifération de conventions relatives aux signes et notations. Il propose qu'un rapport explicatif, fondé sur des bases bien établies, soit publié ; un tel rapport constituerait une aide pour les métrologistes et pour les autres utilisateurs dans les applications pratiques de la relativité générale.

Au cours des discussions, certains participants expriment l'opinion que le texte doit, au premier chef, viser les applications et permettre d'identifier les limites des règles en vigueur actuellement. Pour être adapté aux étalons de fréquence dont l'exactitude atteint des niveaux approchant  $1 \times 10^{-16}$ , le texte doit traiter aussi de la définition du géoïde et du potentiel gravitationnel sur les sites des laboratoires. M. Wolf rappelle au comité que le texte du rapport explicatif doit également aborder le problème de la distinction entre les grandeurs mesurables et les coordonnées. Pour résumer, le président reconnaît que la nécessité d'un texte explicatif est évidente et il nomme M. Guinot président de ce nouveau groupe de travail du CCDS. La discussion se poursuit pour aboutir au document ci-après, adopté à l'unanimité, qui définit la mission de ce groupe et qui doit être soumis au CIPM.

Le Groupe de travail sur l'application de la relativité générale à la métrologie est chargé des tâches suivantes :

1. Préparation d'un rapport sur l'interprétation et l'emploi des unités du SI dans le cadre de la théorie de la relativité générale.

Ce rapport devra être orienté vers les applications pratiques dans des champs gravitationnels faibles et à des vitesses basses (par rapport à la vitesse de la lumière). Dans cet esprit il devra indiquer, si possible au moyen d'exemples, quand il devient nécessaire d'apporter un traitement relativiste à des mesures.

En plus de l'interprétation des définitions existantes des unités, il devra donner une définition non ambiguë du Temps atomique international (TAI) et donner une description de la convention de synchronisation pour la métrologie mondiale du temps. Ce rapport devra donner les formules les plus utiles avec des indications sur leur domaine de validité. Il devra proposer un système unifié de notations et de conventions de signe pour les grandeurs qui sont utilisées dans les applications de la relativité.

2. Étude des conséquences de l'accroissement d'exactitude des réalisations des unités du SI.

Au fur et à mesure de l'accroissement de l'exactitude des réalisations des unités du SI, de nouveaux problèmes se posent, en particulier pour le temps et les longueurs. Le groupe de travail devra les aborder en vue de préparer les décisions qui devront être prises, afin de donner satisfaction dans toute la mesure du possible à tous les milieux intéressés.

## 6. Temps des pulsars

À la demande du président, M. Petit fait le point sur les observations des pulsars et les résultats de mesures de chronométrage des pulsars. Actuellement on dispose des résultats des observatoires situés à Arecibo (Porto Rico, É.-U. d'Amérique), Nançay (France) et Greenbank (Virginie, É.-U. d'Amérique). Il se peut que dans un proche avenir on ne dispose plus des résultats des deux premiers par suite de travaux d'amélioration. On espère que ces travaux apporteront un accroissement de la sensibilité et permettront de réduire le bruit des mesures. Les autres sites concernés se situent au Japon, en Australie et au Royaume-Uni.

L'un des problèmes qui se posent lors de l'évaluation des résultats est celui du retard de propagation des signaux dans le milieu interstellaire. Jusqu'à maintenant, les observations faites à plusieurs fréquences n'ont pas donné de résultats concluants. Actuellement, le traitement des données comporte l'ajustement d'un certain nombre de paramètres, qui peut aller jusqu'à neuf, même seize pour les pulsars doubles, comprenant la position et le mouvement propre du pulsar, la période et la dérivée de la période de sa rotation. Une échelle fondée sur le temps des pulsars ne peut donc être comparée de façon significative avec une échelle de temps atomique que pour des durées d'intégration allant de deux ans jusqu'à un tiers du temps total d'observation. Actuellement, on ne dispose de données à long terme que pour deux pulsars-milliseconde, PSR1937+21 et PSR1855+09, et l'instabilité des résultats de comparaison avec une échelle de temps atomique correspond, dans les deux cas, à un niveau de bruit de scintillation de quelques  $10^{-14}$ . M. Petit fait remarquer qu'on peut faire une moyenne de certaines contributions aléatoires et même systématiques en observant plusieurs pulsars. Il propose alors de constituer une échelle moyenne fondée sur les résultats de chronométrage d'un ensemble de pulsars, observés simultanément pendant plusieurs années, afin de mettre en évidence et de contrôler les instabilités à long terme du TAI. M. Allan souligne que l'on peut maintenant observer des pulsars dont les coordonnées spatiales sont orthogonales, ce qui rend les erreurs systématiques d'observation encore plus indépendantes les unes des autres.

En conclusion, il semble donc que l'on ait besoin de plus de données de chronométrage des pulsars et le président soumet pour discussion un projet de recommandation encourageant la chronométrie des pulsars-milliseconde. M. Winkler est très favorable à cette recommandation qui renforcera les relations entre le milieu concerné par la mesure du temps et les radioastronomes. Il suggère que le CCDS encourage aussi ceux qui travaillent sur les pulsars à rendre compte en détail au BIPM de leur méthode d'évaluation des données afin que celles-ci puissent être interprétées plus facilement. M. Douglas appuie fortement cette opinion. Après une discussion assez longue sur sa rédaction, la Recommandation S 2 (1993) est adoptée à l'unanimité par le CCDS.

## 7. Questions diverses

En réponse à une question de M. Granveaud, le directeur du BIPM expose la politique suivie par le BIPM à l'égard des États qui ne sont pas membres de la Convention du Mètre. Lorsque le temps et les ressources le permettent, les étalonnages sont exécutés pour ces États mais ils leur sont facturés. Il rappelle au comité que les étalonnages sont gratuits pour les États membres. Les ressources du BIPM étant très limitées, on ne peut offrir aux pays en voie de développement d'autres formes d'assistance, en particulier celles qui sont liées à la formation des métrologistes. Les demandes pour une assistance de ce type sont transmises aux grands laboratoires nationaux. En ce qui concerne la contribution au TAI des laboratoires d'États qui ne sont pas membres de la Convention du Mètre, le directeur indique qu'il n'y a actuellement qu'un seul État dans ce cas : Cuba. Compte tenu du coût marginal que représentent la prise en compte de ses données et l'établissement de la relation entre l'UTC et la représentation locale de l'UTC maintenue par Cuba, il considère comme correct de le faire sans facturation dans la mesure où il est souhaitable de favoriser la diffusion du TAI et de l'UTC aussi largement que possible. Si le nombre de cas semblables venait à s'accroître de façon significative, il conviendrait peut-être de revoir la politique en la matière. M. Winkler estime que les États intéressés qui ne sont pas membres de la Convention du Mètre pourraient être incités à le devenir si le BIPM avait une attitude plus restrictive à leur égard. Le directeur répond que, dans le cas de Cuba, des discussions ont eu lieu sur l'éventualité d'une adhésion de ce pays à la Convention mais que la charge financière s'avère être un obstacle pour Cuba.

En remerciant M. Winkler pour le prêt généreux d'une horloge à césium, et en mentionnant d'autres prêts effectués par le NIST et par certaines sociétés privées, le directeur rappelle au comité que la demande,

présentée à la 19<sup>e</sup> Conférence générale en octobre 1991, de fonds supplémentaires pour couvrir les frais de développement de la section du temps au BIPM, a été refusée. Il précise que, dans le climat général actuel de restrictions, une aide en nature de ce genre est très précieuse pour le BIPM et très appréciée. M. Winkler répond en exprimant tout son appui aux travaux que le BIPM effectue dans le domaine du temps.

Pour clore la session, le président remercie les participants au CCDS pour leur collaboration constructive et les membres de la section du temps du BIPM pour l'excellent travail fait depuis des années et au cours de la présente réunion. Il remercie tout particulièrement les présidents des groupes de travail, M. Allan et M. Winkler.

Juin 1993, révisé octobre 1993

**Recommandations  
du Comité consultatif pour la définition de la seconde  
présentées  
au Comité international des poids et mesures**

Exactitude des étalons primaires de fréquence

RECOMMANDATION S 1 (1993)

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde,

*considérant*

— que de nouvelles configurations ont été proposées pour réaliser des étalons primaires de fréquence, configurations qui semblent avoir des possibilités élevées en matière d'exactitude,

— que l'exactitude relative d'un nombre croissant d'étalons primaires de fréquence approche maintenant  $1 \times 10^{-14}$ ,

— qu'à ce niveau d'exactitude on doit tenir compte de corrections qui étaient jusqu'ici considérées comme non significatives ou comme insuffisamment connues, par exemple celles qui résultent de l'effet Stark alternatif dû au rayonnement du corps noir,

— que l'on ne connaît pas actuellement l'ordre de grandeur de certains écarts de fréquence tels que ceux qui sont dus aux collisions atomiques ou aux écarts possibles à la loi de Breit-Rabi,

— qu'il importe de tenir compte de tous les effets systématiques,

— que, jusqu'ici, l'évaluation de l'exactitude des étalons primaires de fréquence n'a pas toujours été complètement explicitée et publiée,

— qu'une étape essentielle pour établir avec confiance l'exactitude des étalons primaires est de pouvoir comparer entre eux des étalons indépendants de construction différente,

— que le pilotage du TAI est fondé sur l'exactitude estimée de ces étalons primaires,

*recommande*

— que différentes configurations d'étalons primaires de fréquence soient réalisées et étudiées en détail en même temps que les configurations traditionnelles,

— que toutes les corrections, y compris celles qui n'étaient pas jusqu'ici considérées comme significatives, soient étudiées en détail,

— que les rapports sur l'exactitude des étalons primaires de fréquence comprennent un bilan complet et détaillé des incertitudes, présenté de façon compatible avec le 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement',

— que les étalons primaires de fréquence soient comparés entre eux à l'aide des meilleures méthodes disponibles,

— que les résultats de ces comparaisons, comprenant les rapports ci-dessus, soient communiqués au BIPM.

## Chronométrie des pulsars-milliseconde

### RECOMMANDATION S 2 (1993)

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde,

*considérant*

— que la stabilité de la fréquence des pulsars-milliseconde, après correction de sa dérive, est comparable à celle des étalons atomiques de fréquence pour des durées d'intégration supérieures à un an,

— que l'indépendance des données fournies par des pulsars différents peut être mise à profit pour établir une référence encore plus stable en combinant ces données,

*recommande*

— que les observatoires de radioastronomie qui effectuent déjà des observations chronométriques de pulsars-milliseconde poursuivent ces observations de façon régulière et continuent à rechercher de nouveaux pulsars,

— que de nouveaux observatoires mettent en oeuvre des programmes d'observation chronométrique de pulsars-milliseconde, avec l'objectif d'un bruit de mesure inférieur à une microseconde,

— que les rapports sur les résultats des mesures chronométriques et les procédés de réduction de ces résultats soient transmis au Bureau international des poids et mesures (BIPM), étant entendu que la nature confidentielle des résultats peut être respectée si nécessaire.



Horaire international pour les comparaisons d'horloges à l'aide du système GLONASS en vue simultanée

RECOMMANDATION S 3 (1993)

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde,

*considérant*

— que l'on a besoin d'un système supplémentaire de comparaison d'horloges utilisable au plus haut niveau d'exactitude sur des distances intercontinentales,

— que le Système russe de navigation mondiale par satellite (GLONASS) s'est avéré capable de permettre, en vue simultanée, des comparaisons d'horloges avec des incertitudes inférieures à 25 ns,

— que le système GLONASS est comparable au système du Global Positioning System (GPS) et semble devoir rendre des services semblables en importance et en utilité,

— que l'expérience acquise au cours de plusieurs années d'utilisation étendue des satellites du GPS, en vue simultanée, pour les comparaisons d'horloges s'est révélé largement favorable,

— que des récepteurs de GLONASS entièrement automatiques pour les comparaisons d'horloges deviennent maintenant disponibles commercialement,

*recommande*

— que le Bureau international des poids et mesures (BIPM) publie régulièrement un horaire international de poursuite des satellites du GLONASS, en vue simultanée, pour permettre aux laboratoires horaires de mettre au point les méthodes de comparaison d'horloges utilisant le GLONASS,

— que le BIPM établisse une présentation normalisée pour les résultats des mesures utilisant le GLONASS afin de permettre aux laboratoires horaires de présenter leurs résultats de façon uniforme.

## Comparaison d'horloges à l'aide de techniques par laser visant des satellites

### RECOMMANDATION S 4 (1993)

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde  
*considérant*

— que l'on a besoin de comparaisons d'horloges distantes avec la meilleure exactitude possible,

— que des comparaisons d'horloges entre l'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord ont été réalisées avec succès et avec une précision de 100 ps, par l'expérience LASSO (Laser Synchronization from Satellite Orbit),

— que l'exactitude des techniques de comparaison d'horloges, telles que celles qui utilisent les systèmes GPS, GLONASS ou des satellites par des méthodes bidirectionnelles doit être confirmée par des méthodes indépendantes,

— que des solutions ont été proposées qui peuvent conduire à des comparaisons d'horloges à l'aide de techniques par laser visant des satellites à défilement,

*recommande* que les agences spatiales étudient l'installation sur leurs satellites d'équipements permettant d'effectuer des comparaisons d'horloges utilisant des techniques par laser.

## Nécessité d'améliorer la synchronisation mondiale avec l'UTC

### RECOMMANDATION S 5 (1993)

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde,

*considérant*

— que l'utilisation largement répandue de meilleurs étalons de fréquence a eu pour conséquence d'accroître les exigences relatives à la coordination avec l'UTC,

— que cela pourra entraîner des pressions pour obtenir une meilleure stabilité à court terme et une meilleure accessibilité de l'UTC, telles que celles qui émaneraient de systèmes de télécommunication nationaux cherchant à se synchroniser à moins de 100 ns près (écart-type) avec l'UTC sans s'exposer à des variations importantes de marche des horloges dans ces systèmes,

— que les problèmes techniques mis en jeu dans les synchronisations de haute exactitude sont complexes et non encore complètement élucidés,

*recommande*

— que le Bureau international des poids et mesures et les laboratoires qui contribuent au TAI prennent note de ces exigences croissantes,

— que les laboratoires horaires fournissent les informations nécessaires pour faciliter la synchronisation sur l'UTC, en temps réel, avec l'objectif de 100 ns d'écart-type, lorsque cela est possible,

— que les problèmes qu'implique cet objectif soient étudiés attentivement.

## Normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le Global Positioning System

### RECOMMANDATION S 6 (1993)

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde,

*considérant*

— que la technique des vues simultanées pour l'observation des satellites du Global Positioning System (GPS) est l'une des méthodes les plus précises et les plus exactes pour la comparaison d'horloges éloignées sur la surface de la Terre ou dans son voisinage immédiat,

— que l'on peut, par cette méthode, espérer atteindre une exactitude proche de 1 ns,

— qu'il faut s'affranchir des effets de l'accès sélectif (SA),

— que les dispositifs chronométriques de réception du GPS ne sont pas normalisés,

— qu'il est nécessaire d'étalonner de manière absolue aussi bien que relative les dispositifs chronométriques du GPS,

*recommande*

— que les constructeurs des récepteurs chronométriques du GPS s'efforcent de mettre en oeuvre les directives techniques établies par le Groupe sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS,

— que des méthodes d'étalonnage systématique et fréquent des dispositifs chronométriques de réception du GPS soient étudiées et mises en oeuvre.

---

## ANNEXE S 1

---

### Documents de travail présentés à la 12<sup>e</sup> session du CCDS

---

Ces documents de travail peuvent être obtenus dans leur langue originale sur demande adressée au BIPM.

Document  
CCDS/

- 93-1 BIPM.- The BIPM Time Section 1989-1993, by C. Thomas.
- 93-2 PTB (Allemagne).- Report on Activities to the 12th session of the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde.
- 93-3 CRL (Japon).- Report to the 12th Session of CCDS, by K. Yoshimura, A. Sugiura, K. Nakagiri, F. Takahashi, S. Urabe, J. Umezu and M. Imae.
- 93-4 NRC (Canada).- Report to CCDS from the National Research Council of Canada.
- 93-5 TUG (Autriche).- Report to the 12th Session of the CCDS, by D. Kirchner.
- 93-6 LPTF-LHA (France).- Contribution to the 12th CCDS (Progress of Atomic Frequency Standards), by M. Granveaud and C. Audoin.
- 93-7 IERS (France).- Report on the Implementation of UTC, 1988-1993, by M. Feissel.
- 93-8 A. de Marchi, Politecnico di Torino (Italie).- Contribution for the XII Session of the CCDS.
- 93-9 KRIS (Rép. de Corée).- Report to the 12th Session of CCDS.
- 93-10 ORB (Belgique).- Report to the 12th session of the CCDS, by P. Pâquet and F. Collin.
- 93-11 NPL (Royaume-Uni).- Report on Activities to the 12th Session of the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde.

- 93-12 BIPM.- Report of the 2nd Meeting of the CCDS Group on GPS time Transfer Standards, by C. Thomas.
  - 93-13 BIPM.- Report of the 2nd Meeting of the BIPM *ad-hoc* Working Group on Two-way Satellite Time Transfer.
  - 93-14 VSL (Pays-Bas).- Report 1989-1993 on activities at NMi Van Swinden Laboratorium Delft.
  - 93-15 NIST (É.-U. d'Amérique).- Report on Activities of the National Institute of Standards and Technology.
  - 93-16 CSIRO (Australie).- Report to the 12th session of CCDS - Progress towards a microwave frequency standard based on trapped, laser-cooled  $^{171}\text{Yb}^+$  ions, by P.T.H. Fisk, C. Coles and M.A. Lawn.
  - 93-17 IEN (Italie).- Report to the 12th Session of CCDS.
  - 93-18 UAI.- Recommendations I to IX of the XXIst General Assembly of the International Astronomical Union.
  - 93-19 NRLM (Japon).- Report to CCDS from NRLM (March 1993)
  - 93-20 VNIIFTRI (Russie) et Université de Leeds (Royaume-Uni).- Russian national time scale, long term stability estimation using GLONASS time link, by A. Al'shina, N. Koshelyaevsky, S. Pushkin and P. Daly.
  - 93-21 B. Guinot.- Suggestion pour former un Groupe de travail sur le thème : Application de la relativité générale à la métrologie (avril 1992).
  - 93-22 OFM et Observatoire de Neuchâtel (Suisse).- Report to the 12th session of the CCDS, by P. Thomann.
  - 93-23 BIPM.- Report to the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde of the CCDS Group on GPS Time Transfer Standards (CGGTTS), by C. Thomas.
-







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

**MEETING OF 1993**

---

**Note on the use of the English text**

To make its reports and those of its various Comités Consultatifs more widely accessible the Comité International des Poids et Mesures has decided to publish an English version of these reports. Readers should note that the official record is always that of the French text. This must be used when an authoritative reference is required or when there is doubt about the interpretation of the text.

**Note sur l'utilisation du texte anglais**

Afin de faciliter l'accès à ses rapports et à ceux des divers comités consultatifs, le Comité international des poids et mesures a décidé de publier une version en anglais de ces rapports. Le lecteur doit cependant noter que le rapport officiel est toujours celui qui est rédigé en français. C'est le texte français qui fait autorité si une référence est nécessaire ou s'il y a doute sur l'interprétation.



---

## THE BIPM AND THE CONVENTION DU MÈTRE

---

The Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) was set up by the Convention du Mètre signed in Paris on 20 May 1875 by seventeen States during the final session of the Diplomatic Conference of the Metre. This Convention was amended in 1921.

BIPM has its headquarters near Paris, in the grounds (43 520 m<sup>2</sup>) of the Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) placed at its disposal by the French Government ; its upkeep is financed jointly by the Member States of the Convention du Mètre \*.

The task of BIPM is to ensure world-wide unification of physical measurements ; it is responsible for :

- establishing the fundamental standards and scales for measurement of the principal physical quantities and maintaining the international prototypes ;
- carrying out comparisons of national and international standards ;
- ensuring the co-ordination of corresponding measuring techniques ;
- carrying out and co-ordinating determinations relating to the fundamental physical constants that are involved in the above-mentioned activities.

BIPM operates under the exclusive supervision of the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) which itself comes under the authority of the Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM).

The Conférence Générale consists of delegates from all the Member States of the Convention du Mètre and meets at present every four years. At each meeting it receives the Report of the Comité International on the work accomplished, and it is responsible for :

- discussing and instigating the arrangements required to ensure the propagation and improvement of the International System of Units (SI), which is the modern form of the metric system ;
- confirming the results of new fundamental metrological determinations and the various scientific resolutions of international scope ;
- adopting the important decisions concerning the organization and development of BIPM.

The Comité International consists of eighteen members each belonging to a different State ; it meets at present every year. The officers of this committee issue an Annual Report on the administrative and financial position of BIPM to the Governments of the Member States of the Convention du Mètre.

The activities of BIPM, which in the beginning were limited to the measurements of length and mass and to metrological studies in relation to these quantities, have been extended to standards of measurement for electricity (1927), photometry (1937), ionizing radiations (1960) and to time scales (1988). To this end the original laboratories, built in 1876-1878, were enlarged in 1929 ; new buildings were constructed in 1963-1964 for the ionizing radiation laboratories, in 1984 for the laser work and in 1988 a new building for a library and offices was opened.

---

\* As of 31 December 1993, forty-seven States were members of this Convention : Argentina (Rep. of), Australia, Austria, Belgium, Brazil, Bulgaria, Cameroon, Canada, Chile, China (People's Rep. of), Czech (Rep.), Denmark, Dominican Republic, Egypt, Finland, France, Germany, Hungary, India, Indonesia, Iran, Ireland, Israel, Italy, Japan, Korea (Dem. People's Rep. of), Korea (Rep. of), Mexico, Netherlands, New Zealand, Norway, Pakistan, Poland, Portugal, Romania, Russian Federation, Slovak (Rep.), Spain, South Africa, Sweden, Switzerland, Thailand, Turkey, United Kingdom, U.S.A., Uruguay, Venezuela.

Some forty physicists or technicians are working in the BIPM laboratories. They are mainly conducting metrological research, international comparisons of realizations of units and the checking of standards used in the above-mentioned areas. An annual report published in *Procès-Verbaux des séances du Comité International* gives the details of the work in progress.

In view of the extension of the work entrusted to BIPM, CIPM has set up since 1927, under the name of *Comités Consultatifs*, bodies designed to provide it with information on matters that it refers to them for study and advice. These *Comités Consultatifs*, which may form temporary or permanent Working Groups to study special subjects, are responsible for co-ordinating the international work carried out in their respective fields and proposing recommendations concerning units. In order to ensure world-wide uniformity in units of measurement, the *Comité International* accordingly acts directly or submits proposals for sanction by the *Conférence Générale*.

The *Comités Consultatifs* have common regulations (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1963, 31, 97). Each *Comité Consultatif*, the chairman of which is normally a member of CIPM, is composed of delegates from the major metrology laboratories and specialized institutes, a list of which is drawn up by CIPM, as well as individual members also appointed by CIPM and one representative of BIPM. These committees hold their meetings at irregular intervals; at present there are eight of them in existence:

1. The *Comité Consultatif d'Électricité (CCE)*, set up in 1927.
2. The *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR)*, new name given in 1971 to the *Comité Consultatif de Photométrie* set up in 1933 (between 1930 and 1933 the preceding committee (CCE) dealt with matters concerning Photometry).
3. The *Comité Consultatif de Thermométrie (CCT)*, set up in 1937.
4. The *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM)*, set up in 1952.
5. The *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS)*, set up in 1956.
6. The *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI)*, set up in 1958. In 1969 this committee established four sections: Section I (Measurement of X and  $\gamma$  rays, electrons); Section II (Measurement of radionuclides); Section III (Neutron measurements); Section IV ( $\alpha$ -energy standards). In 1975 this last section was dissolved and Section II made responsible for its field of activity.
7. The *Comité Consultatif des Unités (CCU)*, set up in 1964 (this committee replaced the "Commission for the System of Units" set up by the CIPM in 1954).
8. The *Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM)*, set up in 1980.

The proceedings of the *Conférence Générale*, the *Comité International*, the *Comités Consultatifs*, and the *Bureau International* are published under the auspices of the latter in the following series:

- *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* (this collection for private distribution brings together articles published in scientific and technical journals and books, as well as certain work published in the form of duplicated reports).

The *Bureau International* also publishes monographs on special metrological subjects and, under the title "Le Système International d'Unités (SI)", a booklet, periodically up-dated, in which all the decisions and recommendations concerning units are collected.

The collection of the *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 volumes published between 1881 and 1966) ceased in 1966 by a decision of CIPM.

Since 1965 the international journal *Metrologia*, edited under the auspices of CIPM, has published articles on the more important work on scientific metrology carried out throughout the world, on the improvement in measuring methods and standards, on units, etc., as well as reports concerning the activities, decisions, and recommendations of the various bodies created under the *Convention du Mètre*.

---

**Comité International des Poids et Mesures**

*Secretary*

J. KOVALEVSKY

*President*

D. KIND

---

**MEMBERS  
OF THE  
COMITÉ CONSULTATIF  
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE**

---

*President*

J. KOVALEVSKY, Secretary of the Comité International des Poids et Mesures, Observatoire de la Côte d'Azur, Grasse (France).

*Members*

ALL-RUSSIAN RESEARCH INSTITUTE FOR PHYSICAL, TECHNICAL AND RADIO-TECHNICAL MEASUREMENTS [VNIIFTRI], Moscow.

BUREAU NATIONAL DE MÉTROLOGIE : Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences [LPTF], Paris.

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

COMMUNICATIONS RESEARCH LABORATORY [CRL], Tokyo.

CSIRO, DIVISION OF APPLIED PHYSICS [CSIRO], Lindfield.

INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION [IAU].

INTERNATIONAL UNION OF GEODESY AND GEOPHYSICS [IUGG].

INTERNATIONAL UNION OF RADIO SCIENCE [URSI].

ISTITUTO ELETTRTECNICO NAZIONALE GALILEO FERRARIS [IEN], Turin.

KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE [KRISS], Taejon.

LABORATOIRE DE L'HORLOGE ATOMIQUE [LHA] du Centre National de la  
Recherche Scientifique [CNRS], Orsay.

NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY [NIM], Beijing.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY [NIST], Boulder.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [NPL], Teddington.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY OF INDIA [NPLI], New Delhi.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY OF ISRAEL [INPL], Jerusalem.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA [NRC], Ottawa.

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [NRLM], Tsukuba.

OBSERVATOIRE ROYAL DE BELGIQUE [ORB], Brussels.

OFFICE FÉDÉRAL DE MÉTROLOGIE [OFM], Wabern/OBSERVATOIRE CANTONAL  
[ON], Neuchâtel.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], Braunschweig.

REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE LA ARMADA [ROA], San Fernando.

TECHNICAL UNIVERSITY [TUG], Graz.

U.S. NAVAL OBSERVATORY [USNO], Washington.

VAN SWINDEN LABORATORIUM [VSL], Delft.

B. GUINOT.

The Director of the Bureau International des Poids et Mesures [BIPM],  
Sèvres.

---



AGENDA  
for the 12th Meeting

---

1. Progress in atomic frequency standards and clocks.
  2. Report of the BIPM time section.
  3. Reports on other meetings :
    - 21st General Assembly of the International Astronomical Union, Buenos Aires,
    - Study Group 7 of the Radio Consultative Committee, Geneva,
    - International Union of Radio Science,
    - Working Group on improvements to TAI,
    - Group on GPS Time Transfer Standards,
    - BIPM *ad hoc* Working Group on two-way satellite time transfer.
  4. Synchronization of clocks using satellites.
  5. Implications of General Relativity for the metrology of time.
  6. Pulsar time.
  7. Other business.
  8. Recommendations.
-



---

REPORT  
OF THE COMITÉ CONSULTATIF  
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE  
(12th meeting - 1993)  
TO THE  
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

by Dr A. BAUCH, Rapporteur

---

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS) held its 12th meeting at the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) at Sèvres during the three days, Wednesday to Friday 24-26 March 1993.

The following were present :

Professor J. KOVALEVSKY, Secretary of the CIPM, President of the CCDS.

Delegates from the member laboratories and organizations :

All-Russian Research Institute for Physical, Technical and Radio-Technical Measurements, [VNIIFTRI], Moscow (N. B. KOSHELYAEVSKY).

Bureau National de Métrologie : Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences [LPTF], Paris (M. GRANVEAUD).

Communications Research Laboratory [CRL], Tokyo (K. NAKAGIRI).

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield (P.T.H. FISK).

International Astronomical Union [IAU] (G.M.R. WINKLER).

International Radio Consultative Committee [CCIR] of the International Telecommunication Union (J. McA. STEELE).

International Union of Radio Science [URSI] (J. McA. STEELE).

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris [IEN], Turin (A. GODONE).

Korea Research Institute of Standards and Science [KRISS], Taejon (NAK SAM CHUNG).

- Laboratoire de l'Horloge Atomique [LHA] du Centre National de la Recherche Scientifique, Orsay (C. AUDOIN).  
National Institute of Metrology [NIM], Beijing (MA FENGMING).  
National Institute of Standards and Technology [NIST], Boulder (D.B. SULLIVAN).  
National Physical Laboratory [NPL], Teddington (S. POLLITT).  
National Physical Laboratory of Israel [INPL], Jerusalem (A. LEPEK).  
National Research Council of Canada [NRC], Ottawa (R.J. DOUGLAS).  
National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Tsukuba (Y. NAKADAN).  
Office Fédéral de Métrologie [OFM], Wabern/Observatoire Cantonal [ON], Neuchâtel (P. THOMANN).  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig (K. DORENWENDT, A. BAUCH).  
Technical University [TUG], Graz (D. KIRCHNER).  
U.S. Naval Observatory [USNO], Washington (G.M.R. WINKLER).  
Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (G. DE JONG).

The member by appointment :

B. GUINOT, Chartrettes (France).

The Director of the BIPM (T.J. QUINN).

Invited guests :

D.W. ALLAN, Allan's TIME, Fountain Green, Utah (U.S.A.).  
A. de MARCHI, Politecnico di Torino (Italy).

Also attending the meeting: P. GIACOMO, Director emeritus of the BIPM; C. THOMAS, J. AZOUBIB, W. LEWANDOWSKI, G. PETIT and P. WOLF (BIPM).

Excused :

International Union of Geodesy and Geophysics [IUGG], National Physical Laboratory of India [NPLI], New Delhi ; Observatoire Royal de Belgique [ORB], Brussels.  
M. FEISSEL, IERS, Paris; J.H. TAYLOR, Princeton University.

Absent :

Real Instituto y Observatorio de la Armada [ROA], San Fernando.

The President extended a welcome to the members of the Committee and asked them to introduce themselves. He then proposed that Dr A. Bauch of the PTB be appointed rapporteur to be helped as necessary by Mr Petit of the BIPM. This was agreed unanimously. Dr Quinn, Director of the BIPM, then addressed the Committee. He expressed his welcome to the delegates and took the opportunity to present an outline of the work done by the BIPM. The President recalled that the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) has endorsed four of the recommendations which the CCDS had submitted to it, following its last meeting. These recommendations were incorporated in a single formal resolution [Resolution 1] adopted by the 19th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) in 1991. This resolution addresses the means for improving time standards and time comparisons: it calls for an increase in the number of primary atomic clocks, studies for improving the accuracy of clocks, studies of those environmental factors which have an impact on the performance of commercial clocks and the establishment of a GPS time comparison network based on well-known antenna coordinates and well-calibrated equipment. It was noted that some of these matters had again been included on the agenda of the current meeting. The President stressed two particular points for discussion, the emergence of new frequency standards at an uncertainty level of  $10^{-16}$  in normalized frequency and the problem of data treatment in clock comparisons carried out with sub-nanosecond accuracy.

The President submitted the draft agenda for approbation by the Committee. The draft agenda was adopted without change and the President called for brief reports from the delegates concerning the first item.

### **1. Progress in atomic frequency standards and clocks**

Prof. Dorenwendt gave a short report on progress at the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) (Doc. CCDS/93-2). The two primary caesium clocks CS1 and CS2 have operated continuously since 1986 and have a mean frequency difference of 25 parts in  $10^{15}$  with an instability corresponding to an Allan deviation  $\sigma_y(\tau)$  of  $6 \times 10^{-15}$  for averaging times  $\tau$  of 250 days. Two new clocks CS3 and CS4, both mounted vertically, were put into operation in 1992 and 1991 respectively, and are presently being evaluated. It is expected that data from clock CS4 will shortly be reported to the BIPM. In these clocks the atoms contributing to the clock transition are slower than those in the old clocks, so it should be feasible to reduce some systematic effects.

Research projects at the PTB also include frequency shifting due to Majorana transitions in the atomic beam, the study of cavity configurations with reduced spatial phase variations (in collaboration

with Prof. de Marchi), and a the study of optical pumping in collaboration with the LPTF, and with the support of the European Community. With the aim of creating a frequency standard based on stored ions, the 12,6 GHz hyperfine splitting frequency of the ion  $^{171}\text{Yb}^+$  has been measured with an uncertainty (type B) of 9 mHz. A quality factor  $Q$  of almost  $10^{12}$  was obtained. Research is also in progress on infrared transitions in the same ion, whose resonance frequencies are measurable with the frequency-synthesis chain operated at the PTB.

In closing, Prof. Dorenwendt pointed out that the time scale UTC(PTB) has always been an unsteered scale, and that it has been based on the signals from clock CS2 since the autumn of 1991.

The President congratulated the PTB on the results obtained, and then asked whether the two primary clocks CS1 and CS2 can be considered as perfectly independent. Prof. Dorenwendt pointed out that apparently correlated data usually come from a common answer to changes in environmental conditions. He declared this possibility to be very unlikely, in the case of CS1 and CS2, as CS2 has been found immune to environmental perturbations. However, Dr Lepek insisted that indications of systematic frequency changes can be deduced from the variation of the Allan standard deviation  $\sigma_y(\tau)$  of CS2 compared to CS1, observed for averaging times of 12 hours.

Dr Nakagiri reported on the numerous activities of the Communications Research Laboratory (CRL) (Doc. CCDS/93-3). The fifteen year old clock Cs1 has been modified more than once and is now evaluated periodically. Data will continue to be made available to the BIPM, as on three occasions in the last four years. These exchanges show agreement with the clocks of the NRC and the PTB to within 1 part in  $10^{13}$ . The device has been equipped with new magnets, a tube shielding the atomic beam from spurious microwave fields and an overall thermal shield. Nevertheless, the clock frequency is still measurably affected by variations in microwave power, an effect which is not fully understood.

Work on Cs2, an instrument with an optically pumped beam, has been shelved because laser diodes of sufficient reliability for the task are not available. Instead, work on a cold-caesium fountain clock has been started and cold atoms have already been detected. In this a Ti-sapphire laser is used as the light source.

At the CRL, research is also in progress on a compact hydrogen maser, and on trapped ion devices employing Paul and Penning traps. The ions under study are  $\text{Ca}^+$  and  $\text{Be}^+$ , in particular laser cooling of  $\text{Ca}^+$  ions to less than 0,1 K using solid state lasers has been demonstrated.

Contributions were made to the improvement of GPS time comparisons by the development of a dual-frequency codeless receiver (named TECmeter) which allows the ionospheric propagation delay of the GPS signals to be measured. Two-way time comparisons were made with the KRISS using a MITREX modem and a newly developed, MITREX compatible, modem

(I-Modem). These measurements show that the equipment has rather poor long-term stability. The CRL is also engaged in pulsar timing and experiments on Very Long Baseline Interferometry (VLBI).

The President remarked that the CRL provides full coverage of all fields of interest to the time and frequency community. He then asked Dr Douglas, National Research Council of Canada (NRC), to present his report (Doc. CCDS/93-4).

Dr Douglas reported that three of the four primary caesium clocks of the NRC had contributed to the generation of TAI since the last CCDS meeting, but, very recently, clocks CsV and CsVI A ran out of caesium. These two clocks are expected to operate again, immediately after some modifications. The fourth clock, CsVI B, has been used for experimental work which has shown, among other things, the feasibility of electrical insulation of the microwave cavity in this type of clock. When applied to clock CsVI A, this improves its long-term stability and reduces its environmental sensitivity. The research activities are strongly focused on the development of a cold caesium fountain clock and on a conceptually new electronic system for the control of such a device. The work on two active hydrogen masers continues.

Dr Douglas then drew the attention of the Committee to activities in the length section of the NRC which have a potential impact on the field of frequencies. The absolute frequency of a fine structure optical transition in a single barium ion in a Paul trap cooled by laser radiation, has been measured using the NRC frequency chain with an accuracy of about 1 part in  $10^{10}$  and further improvement can be expected. Further work is focused on an optical frequency standard based on the strontium ion in which only diode lasers will be employed.

Two-way time comparisons with the NIST and the USNO have been made regularly using US domestic satellites, but the final data evaluation is incomplete so the accuracy achieved could not yet be given.

In answer to a question from Dr Sullivan, Dr Douglas confirmed that the new concept for the operation in pulsed-mode of a fountain can be found in the open literature.

The President then invited Dr Nak Sam Chung from the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS) to give his report (Doc. CCDS/93-9). He reported that work on an optically pumped caesium beam instrument, the laser system of which is similar to that of the NIST-7, has been in progress at the KRISS for four years. Resonance signals have been obtained, but no frequency measurements have yet been performed. Trapping of ions in a Paul trap has also been studied. The laboratory is equipped with an active hydrogen maser and several commercial caesium clocks. These serve to realize TA(KRIS) and UTC(KRIS). In collaboration with the CRL, the technique of ionospheric delay measurement of GPS signals and two-way time transfer were

actively studied. The President warmly welcomed this new member of the CCDS and wished success for future work at the KRISS.

Two delegates from France reported on the activities of their institutes (Doc. CCDS/93-6). First, Dr Granveaud described the work done at the Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences (LPTF), at the Paris Observatory (OP) and stressed that this enforces the recommendations passed by the CCDS in 1989. The time scale UTC(OP) has been held to within  $\pm 1 \mu\text{s}$  of UTC since 1989. For some time the LPTF has been developing a primary clock using the optical pumping technique. The device is at an operational stage, but no accuracy evaluation has yet been made. Very promising results of frequency stability have been obtained : for averaging times  $\tau$  between 100 s and  $10^4$  s, the Allan standard deviation varies according to a  $\tau^{-1/2}$  law, and is equal to  $6 \times 10^{-14}$  for  $\tau = 100$  s. Further research concerns the setting-up of a cold caesium fountain clock. The cooling mechanisms and properties of the cold atom cloud have been studied in detail and Ramsey fringes have been detected. Collisions between the cold atoms are currently seen as a limiting factor to the accuracy of the device.

The LPTF is also collaborating in the establishment of a European complement to GPS, and participated in a time comparison experiment between the OCA, Grasse and the TUG, Graz, which combines two techniques : Laser Synchronization from Satellite Orbit (LASSO) and two-way satellite time transfer.

In collaboration with other French laboratories and the BIPM, the frequency of an iodine-stabilized He-Ne laser at 473 THz was measured with an accuracy of one part in  $10^{11}$ , this value being limited by the reproducibility of the laser. The result will form the basis of a value recommended by the CIPM for the realization of the metre. At the request of Dr Douglas, Dr Granveaud explained that the frequency accuracy of the reference oscillator, an  $\text{OsO}_4$  stabilized  $\text{CO}_2$  laser, was 2 parts in  $10^{12}$ .

Dr Audoin reviewed the activities of the Laboratoire de l'Horloge Atomique (LHA) of the Centre National de la Recherche Scientifique, pointing out that its basic interests lie in understanding the physics of the optically pumped caesium beam frequency standard, in particular the interaction between light and atoms. In this work the use of the  $D_1$  line to excite the atoms, the creation of Zeeman coherence and fluctuations in the laser frequency and amplitude which give rise to correlated noise in the detection of the clock transition, have all been addressed. The use of a microwave cavity inducing a phase difference of  $\pi$  between its extremities has been investigated. This promises advantages already seen in a miniature unit, recently constructed and now under test. More general studies cover the frequency instability of passive frequency standards due to an intermodulation effect and some systems for hydrogen-maser cavity auto-tuning.

Two new projects have begun : a continuous source of cold caesium atoms is being developed and an optical frequency standard, based on trapped calcium ions cooled by laser radiation, is being investigated.

The President noted the important contribution of the laboratory to the understanding of the physics of caesium clocks. At the request of Dr Bauch, Dr Audoin explained that frequency measurements of the clock transition have not yet been made at the LHA but that this will be done in the future.

Dr Pollitt, reviewing progress at the National Physical Laboratory (NPL) noted that UTC(NPL) has remained within  $\pm 100$  ns of UTC over 1992. UTC(NPL) has been based on an active hydrogen maser since June 1992 (Doc. CCDS/93-11). Time transfer using television signals from direct broadcasting satellites has been studied. The NPL will also be able to participate in two-way satellite time transfer experiments very soon. Two extra-mural research agreements are being pursued. One supports Leeds University in the observation of GLONASS satellites and leads to regular publication by the BIPM of [UTC - GLONASS time]. Under the other agreement, at Oxford University, a cold caesium fountain clock apparatus has been constructed and Ramsey fringes with a width of less than 2 Hz have been observed. Research in the length division of the NPL addresses optical frequency standards based on stored ytterbium and strontium ions. In the Basic Metrology Programme of the NPL a study of cryogenic frequency standards is in hand.

In presenting the contribution from the NIST (Doc. CCDS/93-15), Dr Sullivan emphasized that the newly constructed optically pumped caesium clock, NIST-7, is now the official frequency standard of the USA. An ultimate accuracy of 1 part in  $10^{14}$  is expected, and the first evaluation has confirmed 4 parts in  $10^{14}$ . Evaluation of the standard is in part facilitated by the excellent short-term stability which allows experiments of sufficient duration to permit good estimation of systematic errors. Dr Sullivan mentioned the contributions from other laboratories to the success of NIST-7, in particular the work of Professor de Marchi. He also mentioned a new evaluation of the old NBS-4 standard. Stimulated by previous discussions among the delegates and within the time and frequency community, he pointed out that careful documentation and discussion of all relevant frequency corrections are needed in order to compare usefully measurements of the accuracy of different primary clocks.

Work at the NIST also includes the supply of ultra-stable local oscillators for use in passive frequency standards. The operation of a 40,5 GHz frequency standard based on mercury ions cooled by laser radiation in a linear trap is expected to be feasible soon. Research into optical frequency standards and basic quantum physics related to cold ions is also active. The latter subject was explained in some detail at

the request of Dr Douglas. In reply to Dr Bauch, Dr Sullivan commented that the laser cooled ion ensemble in the trap does not appear to be subject to significant heating for up to 100 s after the cooling lasers are switched off. The President acknowledged the concise presentation of the very important contribution from the NIST.

Concerning the activities of the CSIRO (Doc. CCDS/93-16), Dr Fisk reported on the development of a microwave frequency standard based on stored cold ytterbium ions in a linear Paul trap. In this, Ramsey fringes have been observed and laser cooling has been demonstrated.

Describing the activities of the Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (IEN) (Doc. CCDS/93-17), Dr Godone presented recent results obtained with the magnesium beam frequency standard at 601 GHz. The clock transition in  $^{24}\text{Mg}$  has been measured with an accuracy of 1 part in  $10^{12}$  and the reproducibility was found to 3 parts in  $10^{13}$ . There is a close collaboration with other Italian institutes in the field of caesium clocks and cooling of atomic beams by laser radiation. A two-way link using a domestic satellite has been operated on an experimental basis. Dr Tavella has visited the BIPM on a number of occasions to work on time-scale algorithms.

The contribution from the National Research Laboratory of Metrology (NRLM) (Doc. CCDS/93-19) was given by Dr Nakadan who first described the results obtained with an optically pumped caesium clock. The ac-Stark shift due to interaction with laser radiation has been analyzed theoretically and experimentally, and good agreement has been found. This allows the evaluation of the potential frequency shift in optically pumped caesium clocks. A cold caesium fountain clock is being developed and, as a first step, the cooling and trapping of atoms have been studied. A trapped ion frequency standard is also under investigation and, as in some other laboratories, ytterbium is considered the preferred candidate ion with reference transitions in both the microwave and optical regions of the electromagnetic spectrum.

Dr Koshelyaevsky gave details of how time scales are generated and how time comparisons are performed at the Institute of Metrology for Time and Space (IMVP-VNIIFTRI) (Doc. CCDS/93-20). The scale UTC(SU) is a software time scale, based on four carefully maintained active hydrogen masers (CH1-80 from IEM Quartz). This is a free atomic time scale, not steered on UTC, which maintains a scale unit obtained several years ago from caesium clocks. In the course of previous internal Russian comparisons these masers were shown to perform excellently. This has now been confirmed through recent GLONASS comparisons with the University of Leeds and through GPS comparisons supported by the BIPM. The stability of UTC(SU) lies below 1 part in  $10^{14}$  at averaging



times from 10 days to 100 days when compared with UTC(PTB). The VNIIFTRI currently develops GLONASS time-comparison equipment in collaboration with the St. Petersburg Research Radiotechnical Institute. The President and several delegates expressed their surprise at the outstanding performance of the masers. After questions from Dr Thomann and Dr Winkler, Dr Koshelyaevsky explained that more than ten masers are in operation in the laboratory. These undergo a six-month evaluation phase, and are usually found to be very stable. They operate with a specific cavity auto-tuning system and their residual frequency drift, about 1 part in  $10^{16}$  for one day, is attributed to ageing of the teflon coating. In answer to a question from Dr Allan, Dr Koshelyaevsky said that UTC(SU) is defined as the simple average of data from four masers. The President asked about the work on primary caesium clocks at the VNIIFTRI. Dr Koshelyaevsky explained that two of the old clocks were transferred to a new laboratory building and will return to operation soon. A new clock of conventional design is under construction. Later, Dr Thomas remarked that the BIPM results indicate a larger instability in the time scale comparison data, between UTC(SU) and UTC(PTB), than indicated. This question remains open for the moment.

The President then asked Dr Thomann, representing the Federal Office of Metrology (OFM) (Doc. CCDS/93-22), to outline the activities of the Observatory of Neuchâtel. Dr Thomann reported that active hydrogen masers are being developed to support space research and VLBI stations. Ultra-stable rubidium oscillators are also under construction for use in space under an ESA contract and for general applications in a programme of the European Research Coordination Agency (EUREKA). A magneto-optic trap for caesium atoms has been constructed, the research being directed towards obtaining a continuous source of cold atoms.

The President finally asked for some information about the frequency standards in use at the United States Naval Observatory (USNO). Dr Winkler emphasized the outstanding long-term performance of active hydrogen masers now available. He confirmed that at least some units from the Sigma-Tau company show a frequency drift of less than 1 part in  $10^{16}$  per day, similar to the results reported from the VNIIFTRI and the PTB. Observation of the first units of the new caesium clocks HP 5071A, available from Hewlett-Packard, revealed their immunity to environmental changes and their good long-term performance with a flicker-level at about 6 parts in  $10^{15}$  for averaging times of 10 days to 60 days. Two standards using mercury ion traps of the HP design are used at the USNO and a new model from the Jet Propulsion Laboratory, which promises even better frequency stability, has been ordered.

The President then invited Prof. de Marchi for his statement about the first topic of the agenda. Prof. de Marchi expressed his thoughts

about the need for developing primary frequency standards of different configurations (Doc. CCDS/93-8). According to him, over recent decades, the accuracy of conventional primary clocks has improved by several orders of magnitude, obviously not continuously but in successive steps. Several new design concepts have recently been proposed. All are in some way locally-optimized systems, the condition of global optimization not really being known. However, the investigation of these new types of standards, like the fountain or the high C-field approach (pursued at Politecnico di Torino by Prof. de Marchi himself), have provided a unique opportunity for ever deeper studies of the wide range of systematic effects, and may point out some effects which have been overlooked or not really understood, in the past, in conventional systems. Merely to enlarge the number of primary clocks of conventional design does not, therefore, improve the level of accuracy, and the resolution of the CGPM mentioned by the President at the beginning of the meeting, should be interpreted as a mandate to increase the variety of designs under investigation.

At the request of the President, Prof. de Marchi illustrated the high C-field concept in which the clock transition is the  $(-1,-1)$  transition in the ground state of caesium in a field of about 0,08 tesla. As there are essentially no neighbouring transitions, the effects named Rabi-pulling, Ramsey-pulling and Majorana transitions are insignificant. A special cavity design will also help to suppress cavity phase difference-related effects. In addition, the Breit-Rabi formula ties the frequency of the  $(-1,-1)$  transition, in a very simple way, to the zero-field hyperfine splitting in  $^{133}\text{Cs}$ . Deviations from that formula may occur, but can be monitored experimentally.

An intense discussion followed Prof. de Marchi's presentation. In particular, Prof. Dorenwendt and Dr Bauch pointed out that the use of new design philosophies is not by itself a guarantee of accuracy if well-established design criteria, known to be necessary for high accuracy, are not followed. Dr Sullivan, Dr Winkler and Dr Audoin agreed with this comment, but also emphasized the need to look at new concepts as these may yet reveal previously unsuspected effects.

The question was raised as to whether a specially selected individual might be found who would visit laboratories having primary clocks to ensure that the accuracy claims advanced for such clocks are trustworthy and based on common physical and statistical grounds. Dr Quinn replied that such a proposal is not realistic: in practice, it can be done only by peer review within the scientific community.

A draft recommendation about the accuracy of primary frequency standards was then discussed and, after revision of the text by a small working group, the final version of Recommendation S 1 (1993) was unanimously adopted.

## 2. Report of the BIPM Time section

In her report on the activities of the BIPM Time section (Doc. CCDS/93-1), Dr Thomas began by outlining the calculation of the free atomic time scale EAL, which is based on the combination of data from about 185 clocks kept in 60 laboratories. It has been shown that the weighting procedure used in the BIPM algorithm allows the optimum stability of the time scale to be achieved in the long term. As an example, the frequency stability of the EAL compared with the primary standard CS2 of the PTB is one part in  $10^{14}$  over a 100 day averaging time. The relationship between the EAL and the TAI is adjusted when necessary by discrete frequency steps (frequency steering), so that the scale unit of TAI is in close agreement with the SI second on the rotating geoid, as realized in primary caesium clocks. Since 1989, twelve such adjustments have been made.

Several studies of time scale algorithms have been carried out. They include comparative studies of algorithms and weighting rules, the problem of the entry of clocks to the ensemble and their exit from it, the correlation of a clock with the ensemble, and correlations of frequency changes in clocks contributing to the TAI. This final study was called for specifically by the 11th meeting of the CCDS in 1989. The problem of including active hydrogen masers in the ensemble of clocks has been addressed. Several of these masers recently reached the maximum weight and, at the end of 1992, their total relative contribution in EAL was 13,5 %. Hydrogen masers are known to drift in frequency and it may become necessary, in the future, to include an estimation of the drift in the mode of frequency prediction used by the algorithm.

The BIPM Time section has actively participated to the improvement in accuracy of GPS time comparisons. This technique is used in 36 out of the 45 centres keeping a local realization of UTC, and the organization and computation procedure of this international network were described by Dr Thomas. Means to circumvent the degradation of the system capabilities caused by Selective Availability (SA) are the use of observations in strict common view and of precise ephemerides for the satellites. The accuracy of GPS comparisons is tested using the around-the-world closure condition. Using precise ephemerides, available with some delay, and ionospheric signal delay measurements, a closure with a deviation from zero of a few nanoseconds has been achieved. Dr Thomas pointed out that such a high level of accuracy cannot be attributed to each individual link because calibration problems and long-term variations of signal delays in the receiving equipment affect individual links but not the closure. These questions are addressed in the report from the Group on GPS Time Transfer Standards (GGTTS), together with the problem of standardization of receivers.

The first GLONASS common view comparison between the Russian VNIIFTRI and a Western laboratory took place in 1992. It appears that GLONASS should allow time comparisons with a precision similar to that of GPS. These activities will be continued as soon as commercial, computer controlled, receivers become available. Two-way time transfer via geostationary satellites has been successfully demonstrated as an alternative method of accurate time comparison. The BIPM has actively supported two-way experiments : Professor Guinot and Dr Thomas have both chaired the BIPM *ad hoc* Working Group on Two-Way Satellite Time Transfer. The BIPM is also involved in Laser Synchronization from Satellite Orbit (LASSO) experiments.

Dr Thomas concluded by noting that work on other topics, specifically general relativity and pulsars, would be reported at appropriate points in the agenda. She thanked all the laboratories and companies which contributed to the work of the Time section by the loan of equipment.

The President thanked Dr Thomas for the completeness and quality of her presentation and for the excellent work done at the BIPM Time section. During the subsequent discussion, Dr Winkler asked about the consistency of the calibration of GPS equipment. Dr Lewandowski indicated that two successive experiments of the same differential calibration show reproducibilities of 1 ns to 4 ns. Another issue was the inclusion of hydrogen masers in EAL. Dr Bauch asked whether the computations of EAL had been made without including the maser data. Dr Thomas said that this had not yet been done. Dr Bauch then presented some details of the two masers at the PTB, previously suspected of providing correlated data, and explained that, since they were manufactured at the same time, their ageing characteristics might be very similar. The correlation might thus be intrinsic and not due to environmental effects or to cross-talk between the units. A data correlation might also appear if the masers were much more stable than the reference scale against which they were compared. Dr Winkler explained that at the USNO a time-varying weight is given to masers in the algorithm to calculate the scale A1(MEAN), preventing the drift of the masers from spoiling the long-term stability of the scale. Dr Winkler then raised the question whether the BIPM could publish the UTC with a shorter delay and whether it would be of help to submit more frequent clock data, e.g. on a daily basis. Dr Thomas explained that the current practice must be kept as long as clock data from laboratories not linked via GPS are used in the computation. She also drew attention to the fact that data are frequently not submitted on schedule and that corrections are sometimes made to data already used by the BIPM several months before. This makes the rapid and definitive calculation of UTC much more difficult. Dr Thomas said that the plan, in the future, is to calculate UTC on a monthly basis, possibly giving zero weight to clocks not

linked via GPS. At the request of Dr Lepek and Dr Bauch, the values of the frequency difference between EAL and TAI will henceforth be included in the BIPM *Circular T*.

The President then initiated a discussion of the document submitted by the International Earth Rotation Service (IERS) (Doc. CCDS/93-7) and asked Prof. Guinot to explain its rationale. The IERS document raises the question of whether the current practice of introducing leap seconds (which results in a leap second about every year) is still needed and can still be considered an optimum procedure. Dr Winkler said that, having carried out this practice for more than 20 years, the time has probably come to re-examine the question. He made the point that he had previously proposed that leap seconds be introduced only once every four years on each leap day (if necessary), but his proposal was not adopted in 1970. A change to this system could now be made only after very careful consideration of all its aspects, as it might touch upon the meaning of 'time' for the common man. This was generally accepted among the delegates. Prof. Guinot proposed that the IERS report be brought to the attention of other organizations, in particular to the International Radio Consultative Committee (CCIR) now embraced within the Radiocommunication Bureau of the International Telecommunication Union (ITU), since the latter body, rather than the CCDS, would have formal responsibility for the decision. The Director of the BIPM was asked to prepare a letter in this spirit. (Later in the meeting the Director of the BIPM read a draft of his letter to the Committee: this was approved).

### **3. Reports on other meetings**

#### **3.1 International Astronomical Union**

Dr Winkler presented some matters of relevance to the CCDS found in the recommendations of Resolution A4 of the 21st General Assembly of the International Astronomical Union (Doc. CCDS/93-18). Recommendation I explicitly introduces the General Theory of Relativity as the theoretical background for the definition of all space-time coordinate systems in defining their relativistic line element  $ds^2$ . In addition, the basic physical units for all measurements are the SI metre and the SI second. It must be stressed that the scale units of the time coordinates established in conformity with the IAU Resolution A4 differ from the metre and the second as realized on the rotating geoid. They then diverge secularly from TAI. Prof. Guinot recalled that the International Union of Geodesy and Geophysics has adopted the same rules as the IAU in its Resolution 2 (1991) for the definition of the Geocentric Reference System. For practical reasons, the IAU has also defined

Terrestrial Time TT, which does not follow the general rule for the definition of time coordinates, because its scale unit is by definition equal to the SI second on the rotating geoid. Terrestrial Time is considered to be an ideal form of TAI apart from the 32,184 s offset between the two scales. The President pointed out that this Resolution is fundamental for further work in the fields of space-time references and will help to unify the scientific world in the sense that the SI units are introduced as the basis of all measurements. Dr Winkler emphasized that the IAU has again expressed its vital interest in the establishment and dissemination of stable time scales necessary for any long term observations.

Dr Allan mentioned a workshop to be organized by the IAU on millisecond pulsar timing. The President asked him to ensure that invitations to this workshop are sent to the CCDS members.

### **3.2 International Radio Consultative Committee**

At the request of the President, Dr Steele reported on the activities of the International Radio Consultative Committee (CCIR), now the Radiocommunication Bureau of the International Telecommunication Union (ITU), of interest to the CCDS. Dr Steele noted, in particular, that the former Study Groups 2 and 7 have been merged in a new Study Group 7 (Science Services) which also covers space research and radioastronomy. Time signals and frequency standard emissions are dealt with in Working Party 7A under the chairmanship of Prof. Leschiutta. Mr de Jong is the Chairman of Task Group 7/2 dealing with standard frequency and time signals from satellites.

Two recommendations were passed in 1992 : Recommendation 538-2 on frequency and time instability measures and Recommendation 767 on the use of GPS and GLONASS for high-accuracy time transfer.

Dr Lepek asked for revision of the CCIR Recommendation 458-2 which specifies that 'time markers having a negligible time departure from UTC(k) should be immediately accessible' in a time-keeping laboratory k. According to him, this requirement is not useful. In reply, Dr Thomas explained that it is absolutely necessary for the BIPM, so that it may produce TAI to the agreed schedule, that each laboratory k should report its clock and time comparison data directly related to UTC(k), without retrospective correction. The task is easier if a hardware UTC(k) is realized in (near) real-time in laboratory k. Dr Lepek was asked to initiate a contribution on this topic to the CCIR, through the ITU representatives of Israel.

At the request of Prof. Dorenwendt, Dr Steele explained that the system of documentation used by the CCIR will change significantly.

The CCIR will continue to issue recommendations, but, instead of publishing periodically updated reports, the emphasis is now on handbooks which contain the relevant background information.

### **3.3 International Union of Radio Science**

Dr Steele then reported on a resolution (Commission A, A.1. Accurate Time Comparison) of the last General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI), which asked the agencies responsible for the operation of satellite based navigation systems to refrain from degrading their services in view of the uses now made of these systems by the scientific community. Dr Winkler expressed the view that this resolution has had no noticeable effect, but was convinced that the accumulated effect of numerous demands of this kind might eventually convince the authorities.

### **3.4 Working Group on Improvements to TAI**

The President invited Dr Winkler to present the conclusions of the Working Group on Improvements to TAI which had organized the second meeting of time laboratories representatives during the days preceding the CCDS session. Three topics were discussed and were reported in the order of their importance :

— scientific aspects of the formation of TAI: algorithms, data collection and data processing ;

— availability of high precision means for time comparisons such as GPS and GLONASS satellite systems, two-way satellite time transfer, Laser Synchronization from Satellite Orbit (LASSO) and Very Long Baseline Interferometry (VLBI) ;

— economic and manpower considerations for the contributing laboratories.

Dr Winkler said that different items discussed during the meeting could be the subjects of eventual CCDS recommendations. The President expressed his thanks to the Working Group for their preparatory activities and to Dr Winkler, who had chaired its work. He then proposed to discuss one of these items, about the need for improving worldwide time coordination to UTC. According to Dr Allan, this would greatly assist synchronization of telecommunication networks. After discussion and some re-wording, Recommendation S 5 (1993) was unanimously passed. The other topics which had arisen during the meeting of the Working Group on improvements to TAI were considered in the course of the CCDS meeting.

### 3.5 Group on GPS Time Transfer Standards

At the President's invitation Dr Allan gave an account of the comprehensive work done by the Group on GPS Time Transfer Standards (GGTTS) (Doc. CCDS/93-23), a sub-group of the Working Group of the CCDS on improvements to TAI. In particular he expressed his thanks to Dr Thomas for serving as the Secretary of the Group. The Group held its second meeting in June 1992 (Doc. CCDS/93-12). During the days preceding the CCDS, the Group prepared a text which contains a detailed technical description of the short-term data reduction procedure and of the data format, and forwarded it to the CCDS for further consideration. In going through a list of effects which limit the accuracy of time comparisons made with GPS, Dr Allan explained how rules of standardization might help to make full use of the potential of the GPS system. From his work in the Civil GPS Service Interface Committee, he also mentioned a memorandum of understanding between the US Departments of Defence and Transportation which ensures that all necessary information about the GPS system are made available to civil users.

The President expressed his thanks to the Group and its Chairman, and the CCDS requested that the Group continue its activities. During the discussions Dr Thomas and Dr Sullivan pointed out that the implementation of Selective Availability (SA) will in all cases be an impediment to the use of the GPS system, even if, to some extent, means have been devised to circumvent it. Dr Winkler mentioned the possibility, when SA is operational, of improving real-time access to GPS time by averaging measurements made simultaneously on numerous Block II satellites. The questions of absolute and relative calibration of the equipment were also discussed. Finally the CCDS agreed upon the text of Recommendation S 6 (1993), which emphasizes these problems and recommends the implementation of the technical directives produced by the Group on GPS Time Transfer Standards. At the request of Dr Bauch, Dr Allan confirmed that three manufacturers had expressed their willingness to modify their receiver software according to these directives.

### 3.6 Two-way satellite time transfer

At the President's invitation, Dr Lewandowski spoke on the activities of the BIPM *ad hoc* Working Group on Two-Way Satellite Time Transfer, in particular about the second meeting of this Group (Doc. CCDS/93-13) held in October 1992. Its work is based on declaration 1989/1 of the CCDS. In practice two-way satellite time transfer has not been pursued very actively during the last few years, for both technological and administrative reasons. At present, four types of modem are available or are under development – MITREX, SATRE, ATLANTIS and NIST – but problems of mutual compatibility exist. However, a few successful



experiments have been conducted. A two-way satellite time transfer experiment was carried out between the OCA (France) and the TUG (Austria) using an EUTELSAT satellite at 7° East, with MITREX modems. The precision of the observational points obtained is smaller than 1 ns and the accuracy estimation is 1,7 ns ( $1 \sigma$ ). Recently, the results of links between the PTB and the FTZ in Germany using DFS-Kopernikus 2, and between the TUG and the USNO using INTELSAT VA(F13) at 307° East, have also been published. The two-way satellite time transfer appears to be an efficient tool for real-time time comparisons when the modems used also have the capability of transferring local measurements to the other station. For now, it remains that no standards exist for data handling and evaluation. The CCDS agreed to convert the *ad hoc* Group to a permanent CCDS Working Group with the task of assisting the establishment of regular two-way experiments and their evaluation, and of preparing a standard format for data exchange. Dr Thomas will chair this Working Group.

#### 4. Synchronization of clocks using satellites

The President called for contributions dealing with the use of satellite systems for time comparisons and invited Dr Koshelyaevsky to begin by reporting on the Russian Global Navigation Satellite System GLONASS (in part in Doc. CCDS/93-20). Within Russia this system has been available for use since 1990 and the results of comparisons between different timing centres inside the country were given. The most important information was that at present 13 satellites are useable, spread out in two planes of constellation. In 1995, the full constellation will contain 24 satellites in three planes. The GLONASS Interface Control Document states that '...no deliberate means are used for the deterioration of the GLONASS navigation parameters'. In the future, a GLONASS Information Centre\* will furnish current information on the system.

The coordination of both systems, GPS and GLONASS, was discussed and, on request, Dr Lewandowski explained a possible common view schedule for GLONASS time comparisons. Finally, agreement was reached on the text of Recommendation S 3 (1993), which was passed unanimously.

The next question addressed by the CCDS concerned the eventual need for a CCDS recommendation asking for protection of GPS and GLONASS from harmful interference from other services. Dr Steele spoke strongly against such an action, explaining that the forum in which international frequency allocations are made is the International

---

\* Bolshevo-1, Moscow region, 141090, Russia.

Telecommunication Union (ITU). He noted that the GLONASS system is partially in conflict with the current regulations. The President concluded that the CCDS should not produce any recommendation on this point.

The next subject considered was the use of hydrogen masers in space. Dr Thomann described plans to fly two compact active hydrogen masers on board a Russian METEOR III satellite intended which will be launched in 1996 in a joint Russian-European Space Agency (ESA) project. This is part of a study on time dissemination using microwave links, which should allow high precision time and frequency comparisons to be made without the need for common-view techniques. During this flight, the maser will be tested to ensure its qualification for future VLBI space applications.

The President then asked for two more contributions dealing with two-way satellite time transfer. Dr Kirchner gave an overview of past and present activities in this field (Doc. CCDS/93-5). The TUG has been actively involved in two-way time transfer with the USNO, and was involved in LASSO experiments when the reflecting satellite could be seen from the laser station in Graz. For details, he referred to the reports of Dr Thomas and Dr Lewandowski. Mr de Jong explained that the VSL equipment is almost ready for use with INTELSAT for two-way time transfer. He also addressed detailed work on the calibration of two-way equipment which had been done at the VSL using a satellite signal simulator (Doc. CCDS/93-14). The final accuracy of the calibration was estimated to be 2 ns. Dr Kirchner and Dr Douglas commented that not all internal modem delays can be calibrated individually using a satellite signal simulator. Mr de Jong indicated that the internal modem delays were also measured, but for this purpose the modem unit had to be opened and a temporary modification had to be performed.

The President reported on the current status of the LASSO experiment, showing the latest results of comparisons between the Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), France, and the McDonald Astronomical Observatory, Texas, USA. The statistical treatment of each observational point reveals a precision of order 100 ps ( $1\sigma$ ) in the time scale comparisons, the successive observational points showing a dispersion of 0,5 ns. On request, Dr Lewandowski explained preliminary work on comparing the LASSO link with a GPS common-view link, calibrated with an accuracy of 10 ns. The data points are systematically offset by 190 ns, an offset which may be caused by the use of uncalibrated laser firing equipment. To encourage space agencies to fly a LASSO package on satellites, a draft recommendation was proposed and the topic opened for discussion. There was general agreement that activities in this field should be continued. The President proposed to refer to these activities

under the acronym LASSO, which is already very widely known. He suggested a slightly different meaning, namely 'LAser Synchronization from Satellite Orbit', instead of 'Stationary Orbit', so that it could also be applied to a non-geosynchronous orbit. Finally, Recommendation S 4 (1993) was adopted by the CCDS with one abstention.

### 5. Implications of general relativity for the metrology of time

In April 1992, Prof. Guinot proposed to the CIPM the formation of a Working Group on the Application of General Relativity to Metrology (Doc. CCDS/93-21). The President reported that the CIPM had approved the establishment of this Working Group and had invited the CCDS to arrange for its creation. He then asked Prof. Guinot to outline the reasons for his suggestion. Prof. Guinot explained that the effects of general relativity on time measurements are by no means negligible compared with the accuracy of primary clocks, or with that of time comparison methods employing satellites. Corrections are, of course, applied at present, but some practical difficulties have been identified. These arise from ambiguous definitions, insufficient documentation and multiple sign and notation conventions. He proposed that an explanatory report, based on well established grounds, be issued: he noted that this would be of assistance to metrologists and others in the practical application of general relativity.

In the subsequent discussion some delegates expressed the opinion that the text should focus primarily on applications and allow the limitations of the rules currently in use to be identified. To accommodate frequency standards which might be accurate to levels approaching 1 part in  $10^{16}$ , the text should also deal with the definition of the geoid and the gravitational potential at the actual sites of time laboratories. Mr Wolf reminded the Committee that the text of the explanatory report would also have to address the problem of the distinction between proper units and time coordinates. The President summarized the discussion, noting that the need for an explanatory text was evident. He asked Prof. Guinot to be the chairman of this new CCDS Working Group. A document listing the terms of reference to be submitted to the CIPM was accepted unanimously after further discussions.

The Working Group on the Application of General Relativity to Metrology is entrusted with the following tasks.

1. Preparation of a report on the interpretation and use of SI units in the framework of the Theory of General Relativity.

The report should be oriented toward practical applications for weak gravitational fields and low velocities (with respect to the

velocity of light). In this spirit, it should indicate, possibly by examples, when a relativistic treatment of the measurements becomes necessary.

In addition to providing an interpretation of the existing definitions of the units, it should give an unambiguous definition of International Atomic Time, TAI, and describe the synchronization convention for worldwide time metrology. The report should give the most useful formulae, with indications on their range of validity.

The report should suggest a unified system of notations and sign conventions for quantities used in relativistic applications.

2. Studies on the consequences of the increasing accuracy of the realizations of the SI units.

New problems will arise with the increasing accuracy of the realizations of the SI units, especially for time and length. These should be considered by the Working Group in order to prepare the decisions which will have to be taken so that, as far as possible, they satisfy all interested parties.

## 6. Pulsar time

At the request of the President, Mr Petit presented the current status of pulsar observations and data on pulsar timing. Mr Petit reported that data are currently available from the observatories at Arecibo (Puerto Rico, USA), Nançay (France) and Greenbank (Virginia, USA), but that the first two sites may be unavailable in the near future as equipment is being upgraded. After the upgrades, an increased sensitivity, which will yield a reduced measurement noise, is expected. Other sites involved are in Japan, Australia and the United Kingdom.

One of the problems in data evaluation is the signal propagation delay in the interstellar medium. Observations at more than one frequency have so far not given conclusive results. The data treatment at present includes the fitting of up to nine parameters (sixteen for binary pulsars), including the position and proper motion of the pulsar, the period and the time-derivative of the period of its rotation. For this reason a pulsar time scale can be meaningfully compared with atomic time only for integration times greater than two years, up to about one third of the total time of observation. At present, long-term data are available only for the two millisecond pulsars, PSR1937+21 and PSR1855+09, and the instability of the comparison data with atomic time shows, for both of them, a flicker level of several parts in  $10^{14}$ . Mr Petit pointed out that some contributions to noise and systematic error may be averaged out by observing several pulsars. He then proposed that a pulsar time scale based on data from an ensemble of pulsars observed simultaneously

over several years, be formed in order to exhibit and monitor the long-term variations of TAI. Dr Allan emphasized that it is now possible to observe pulsars which have orthogonal space coordinates, which ensures a greater independence of systematic errors of observation.

To conclude, it appeared that more pulsar timing data are needed and the President called for discussion about a recommendation encouraging the observation of millisecond pulsars. Dr Winkler was much in favour of such a recommendation which would strengthen the mutual relationship between the time and radioastronomy communities. He suggested that the CCDS should also recommend that the pulsar community report in detail to the BIPM on the data evaluation procedure and so make the data simpler to interpret. Dr Douglas strongly supported this opinion. After a lengthy discussion on the appropriate wording, the CCDS unanimously passed Recommendation S 2 (1993).

## 7. Other business

In reply to a question from Dr Granveaud, the Director of the BIPM explained his policy concerning work done by the BIPM for states that are not members of the Convention du Mètre. In respect of calibrations, he said that when time and resources permit these are undertaken and an appropriate charge is made. He reminded the Committee that calibrations for member countries are free of charge. The resources of the BIPM being very limited, other kinds of assistance, particularly those related to training of metrologists from developing countries, cannot be offered. Requests for such assistance are passed on to the major national laboratories. As regards contributions to TAI from laboratories of non-member countries he said that at present there is only one such case, that of the Republic of Cuba. Since the marginal cost of taking this data and providing the time link between UTC and the local realization of UTC kept by Cuba is very small, he considers it correct to do so without any charge, taking into account the desirability of spreading TAI and UTC as widely as possible. Were the number of such cases to increase significantly, however, such a policy would have to be reviewed. Dr Winkler expressed the view that interested non-member countries could be persuaded to join the Convention du Mètre by the BIPM refusing to take their time data. The Director replied that, in the case of Cuba, discussions had taken place on the possibility of its joining the Convention, but to Cuba the cost of so doing remains an impediment.

In thanking Dr Winkler for the generous loan of a caesium clock, and mentioning other generous loans from the NIST and some private

companies, the Director of the BIPM reminded members of the Committee that his request to the 19th Conférence Générale in October 1991 for additional funds to meet the costs of developing the Time section at the BIPM had been refused. In the present climate of financial restraint he said that such assistance in kind was of great value to the BIPM and is very much appreciated. Dr Winkler replied, strongly supporting the work on time at the BIPM.

Concluding the meeting, the President thanked the present members of the CCDS for their constructive collaboration and the members of the BIPM Time section for their excellent work over the years and during the meeting. He especially thanked the chairmen of the working groups, Dr Allan and Dr Winkler.

June 1993, revised October 1993

**Recommendations  
of the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde  
submitted  
to the Comité International des Poids et Mesures**

Accuracy of primary frequency standards

RECOMMENDATION S 1 (1993)

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde  
*considering*

— that new configurations of primary frequency standards have been proposed that appear to have a high potential for accuracy,

— that the accuracy of an increasing number of primary frequency standards is now approaching the level of one part in  $10^{14}$ ,

— that at this level of accuracy certain corrections should be made that were previously considered insignificant or not sufficiently well known ; these include for instance those related to the ac Stark shift due to black body radiation,

— that the magnitude of frequency biases such as those related to atomic collisions and possible departures from the Breit-Rabi law are not presently known,

— that it is important to account for all systematic effects,

— that in the past evaluations of the accuracy of primary frequency standards have not always been fully documented and published,

— that an essential step in establishing confidence in the accuracy of primary standards is the international comparison among independent standards of different designs,

— that the steering of TAI has been based upon the stated accuracies of these primary standards,

*recommends*

— that different configurations of primary frequency standards should be realized and studied in detail along with the established ones,

— that all corrections including those not previously considered significant be studied in detail,

— that reports on the accuracy of primary frequency standards should include a full account of uncertainties expressed in a manner consistent with the 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement',

— that primary frequency standards be compared using the best means available,

— that the results of these comparisons including the above reports be communicated to the BIPM.

## Timing of millisecond pulsars

### RECOMMENDATION S 2 (1993)

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

*considering*

— that the stability of the drift-corrected frequency of some millisecond pulsars is comparable to the stability of atomic frequency standards for averaging times longer than one year,

— that independent data from different pulsars may allow their combination to be used to provide a highly stable scale,

*recommends*

— that radioastronomy observatories already timing millisecond pulsars carry on regular observations and continue the search for new pulsars,

— that other observatories initiate programmes of observations for the timing of millisecond pulsars, aiming at a sub-microsecond measurement noise,

— that reports on the timing data and data reduction procedures be communicated to the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) noting that privacy of the data can be maintained if desired.



International schedule for GLONASS common-view time comparisons

RECOMMENDATION S 3 (1993)

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde

*considering*

— the need for an additional operational system for time transfer and comparison at the highest possible level of accuracy over intercontinental distances,

— that the Russian Global Navigation Satellite System (GLONASS) has been demonstrated to provide common-view time transfer with an uncertainty below 25 ns,

— that GLONASS is a comparable system to the Global Positioning System (GPS) and is anticipated to have a similar important utility,

— the extensive favourable experience gained over many years from the wide use of GPS satellites for time transfer under an international common-view tracking schedule,

— that fully automated GLONASS time transfer receivers are now becoming commercially available,

*recommends*

— that the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) issue a regular international GLONASS common-view tracking schedule in order to allow time laboratories to develop GLONASS time transfer techniques,

— that the BIPM draw up a standard GLONASS data format to allow time laboratories to use a unified data presentation.

## Clock comparison by satellite laser techniques

### RECOMMENDATION S 4 (1993)

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

*considering*

— the need for long distance time transfer at the highest possible level of accuracy,

— that successful time transfer with a precision of 100 ps has been achieved between Western Europe and North America using LASSO (Laser Synchronization from Satellite Orbit) experiment,

— that time transfer techniques, such as GPS, GLONASS and two-way satellite time transfer, need an independent means of assessment of their accuracy,

— that solutions have been proposed that may lead to clock synchronization by laser techniques using non-geostationary satellites,

*recommends* that the space agencies consider the installation on their satellites of appropriate equipment for clock comparison by satellite laser techniques.

Need to improve worldwide time coordination to UTC

RECOMMENDATION S 5 (1993)

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

*considering*

— that the widespread use of improved frequency standards has led to requirements for increased coordination to UTC,

— that this is expected to lead to pressure for increased short-term stability and availability of UTC, for instance from national telecommunication systems attempting to synchronize to UTC within 100 ns (standard deviation) without incurring large changes in rate for clocks within such systems,

— that the technical problems involved in high-accuracy time coordination are complex and not yet fully understood,

*recommends*

— that the BIPM and the laboratories that contribute to TAI take cognizance of these developing requirements,

— that time centres provide information to facilitate time coordination to UTC in real time with a goal of 100 ns, standard deviation, when this is feasible,

— that the technical problems implicit in this goal be carefully studied.

## GPS time transfer standardization

### RECOMMENDATION S 6 (1993)

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

*considering*

— that the common-view method for the observation of satellites of the Global Positioning System (GPS), is one of the most precise and accurate methods for time comparison between remote clocks on the Earth or in its close vicinity,

— that this method has the potential for reaching an accuracy approaching 1 ns,

— the need for removing the effects of Selective Availability (SA),

— the lack of standardization in GPS timing receiving equipment,

— the need for absolute as well as relative calibration of GPS timing receiving equipment,

*recommends*

— that GPS timing receiver manufacturers proceed towards the implementation of the technical directive produced by the Group on GPS Time Transfer Standards,

— that methods be developed and implemented for frequent and systematic calibration of GPS timing receiving equipment.

---

APPENDIX S 1

---

**Working documents  
submitted to the CCDS at its 12th Meeting**

(see the list of documents on page S 31)

---



---

TABLE DES MATIÈRES  
TABLE OF CONTENTS

---

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

12<sup>e</sup> session (1993)  
12th Meeting (1993)

---

	Pages
Liste des sigles utilisés dans le présent volume . . . . .	V
List of acronyms used in the present volume . . . . .	V
Le BIPM et la Convention du Mètre . . . . .	IX
Liste des membres . . . . .	XI
Ordre du jour . . . . .	XIV
<b>Rapport au Comité international des poids et mesures, par A. Bauch . . . . .</b>	<b>S 1</b>
1. Progrès des étalons atomiques de fréquence et des horloges . . . . .	S 3
2. Rapport d'activité de la section du temps du BIPM . . . . .	S 11
3. Comptes rendus d'autres réunions . . . . .	S 14
3.1 Union astronomique internationale . . . . .	S 14
3.2 Comité consultatif international des radiocommunications . . . . .	S 15
3.3 Union radioscientifique internationale . . . . .	S 16
3.4 Groupe de travail sur l'amélioration du TAI . . . . .	S 16
3.5 Groupe sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS . . . . .	S 17
3.6 Comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite . . . . .	S 18
4. Synchronisation des horloges au moyen de satellites . . . . .	S 18
5. Implications de la relativité générale dans la métrologie du temps . . . . .	S 20
6. Temps des pulsars . . . . .	S 22
7. Questions diverses . . . . .	S 23
<b>Recommandations présentées au Comité international des poids et mesures . . . . .</b>	<b>S 25</b>
S 1 (1993) : Exactitude des étalons primaires de fréquence . . . . .	S 25
S 2 (1993) : Chronométrie des pulsars-milliseconde . . . . .	S 26
S 3 (1993) : Horaire international pour les comparaisons d'horloges à l'aide du système GLONASS en vue simultanée . . . . .	S 27

S 4 (1993) : Comparaison d'horloges à l'aide de techniques par laser visant des satellites . . . . .	S 28
S 5 (1993) : Nécessité d'améliorer la synchronisation mondiale avec l'UTC . . . . .	S 29
S 6 (1993) : Normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le Global Positioning System . . . . .	S 30
<b>Annexe</b> . . . . .	S 31
S 1. Documents de travail présentés à la 12 <sup>e</sup> session du CCDS . . . . .	S 31

### English text of the report

<b>Note on the use of the English text.</b> Note sur l'utilisation du texte anglais . . . . .	S 35
The BIPM and the Convention du Mètre . . . . .	S 37
List of members . . . . .	S 39
Agenda . . . . .	S 42
<b>Report to the Comité International des Poids et Mesures, by A. Bauch</b> . . . . .	S 43
1. Progress in atomic frequency standards and clocks . . . . .	S 45
2. Report of the BIPM Time section . . . . .	S 53
3. Reports on other meetings . . . . .	S 55
3.1 International Astronomical Union . . . . .	S 55
3.2 International Radio Consultative Committee . . . . .	S 56
3.3 International Union of Radio Science . . . . .	S 57
3.4 Working Group on Improvements to TAI . . . . .	S 57
3.5 Group on GPS Time Transfer Standards . . . . .	S 58
3.6 Two-way satellite time transfer . . . . .	S 58
4. Synchronization of clocks using satellites . . . . .	S 59
5. Implications of general relativity for the metrology of time . . . . .	S 61
6. Pulsar time . . . . .	S 62
7. Other business . . . . .	S 63
<b>Recommendations submitted to the Comité International des Poids et Mesures</b> . . . . .	S 64
S 1 (1993) : Accuracy of primary frequency standards . . . . .	S 64
S 2 (1993) : Timing of millisecond pulsars . . . . .	S 66
S 3 (1993) : International schedule for GLONASS common-view time comparisons . . . . .	S 67
S 4 (1993) : Clock comparison by satellite laser techniques . . . . .	S 68
S 5 (1993) : Need to improve worldwide time coordination to UTC . . . . .	S 69
S 6 (1993) : GPS time transfer standardization . . . . .	S 70
<b>Appendix</b> . . . . .	S 71
S 1. Working documents submitted to the CCDS at its 12th Meeting (see page S 31) . . . . .	S 71







IMPRIMERIE DURAND

28600 LUISANT (FRANCE)

---

Dépôt légal : Imprimeur, 1993, n° 8260

ISBN 92-822-2129-6

ISSN 0588-6228

ACHEVÉ D'IMPRIMER : NOVEMBRE 1993

Imprimé en France



