

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



COMITÉ CONSULTATIF
POUR
LA DÉFINITION DE LA SECONDE

Rapport de la 13^e session
Report of the 13th Meeting

1996

Organisation intergouvernementale de la Convention du Mètre

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

SESSION DE 1996

MEETING IN 1996

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



COMITÉ CONSULTATIF
POUR
LA DÉFINITION DE LA SECONDE

Rapport de la 13^e session
Report of the 13th Meeting

1996

Édité par le BIPM, Pavillon de Breteuil, F-92312 Sèvres Cedex, France

ISSN 0588-6228

ISBN 92-822-2146-6

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

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

*BIH	Bureau international de l'heure
BIPM	Bureau international des poids et mesures
BNM-LPTF	Bureau national de métrologie, Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France)
CCDS	Comité consultatif pour la définition de la seconde
CGGTTs	CCDS Group on GPS Time Transfer Standards
CGSIC	Civil GPS Service Interface Committee
CIPM	Comité international des poids et mesures
CNRS	Centre national de la recherche scientifique, Orsay (France)
CRL	Communications Research Laboratory, Tokyo (Japon)
CSIRO	(ex NML) Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Division of Applied Physics, Lindfield (Australie)
IAU	<i>voir</i> UAI
IEN	Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, Turin (Italie)
IERS	Service international de la rotation terrestre/International Earth Rotation Service
INPL	National Physical Laboratory of Israel, Jérusalem (Israël)
INTELSAT	International Telecommunications Satellite Organization
ISO	Organisation internationale de normalisation/International Organization for Standardization
ITU	<i>voir</i> UIT
IUGG	<i>voir</i> UGGI
KRISS	(ex KSRI) Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon (Rép. de Corée)
*KSRI	Korea Standards Research Institute, Taejeon (Rép. de Corée), <i>voir</i> KRISS
LHA	Laboratoire de l'horloge atomique, Orsay (France)
LPTF	Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France), <i>voir</i> BNM

* 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.

*NBS	National Bureau of Standards, Gaithersburg (É.-U. d'Amérique), <i>voir</i> 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)
NMi	(ex VSL) Nederlands Meetinstituut, Delft (Pays-Bas)
*NML	National Measurement Laboratory, Lindfield (Australie), <i>voir</i> CSIRO
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 of Canada, Ottawa (Canada)
NRLM	National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba (Japon)
OFMET	Office fédéral de métrologie/Eidgenössisches Amt für Messwesen, Wabern (Suisse)
ON	Observatoire cantonal de Neuchâtel, Neuchâtel (Suisse)
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 of Graz, 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 radio-scientifique internationale/International Union of Radio Science
USNO	U.S. Naval Observatory, Washington DC (É.-U. d'Amérique)
VNIIFTRI	Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques/All- Russian Research Institute for Physical, Technical and Radio- Technical Measurements, Moscou (Féd. de Russie)
*VSL	Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas), <i>voir</i> NMi

2. Sigles des termes scientifiques

Acronyms for scientific terms

EAL	Échelle atomique libre/Free atomic time scale
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System

ITRF	Système de référence terrestre spécifié par le Service international de la rotation terrestre/Terrestrial Reference Frame maintained by the International Earth Rotation Service
MJD	Calendrier Julien modifié/Modified Julian Dates
PHARAO	Projet d'horloge atomique à refroidissement d'atomes en orbite
SA	Accès sélectif/Selective Availability
SI	Système international d'unités/International System of Units
SONET	Synchronous Optical Network
TAI	Temps atomique international/International Atomic Time
TT	Temps terrestre/Terrestrial Time
UTC	Temps universel coordonné/Coordinate Universal Time

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 m²) du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français ; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre*.

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 pour la mesure 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 mesures des constantes physiques fondamentales 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 rassemble 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 comporte 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. La principale mission du CIPM est d'assurer l'unification mondiale des unités de mesure, en agissant directement, ou en soumettant des propositions à la Conférence Générale.

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), aux échelles de temps (1988) et à la quantité de matière (1993). 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 1996, quarante-huit 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), Singapour, Slovaque (Rép.), Suède, Suisse, Tchéque (Rép.), Thaïlande, Turquie, Uruguay, Venezuela.

Une quarantaine de physiciens ou de 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. 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 en 1927, le Comité international a institué, 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 au CIPM des recommandations concernant les unités.

Les comités consultatifs ont un règlement commun (*BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1963, 31, 97). Ils tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers. Le président de chaque comité consultatif est désigné par le Comité international ; il est généralement membre du Comité international. Les comités consultatifs ont pour membres des laboratoires de métrologie et des instituts spécialisés, dont la liste est établie en accord avec le Comité international, qui envoient des délégués de leur choix. Ils comportent aussi des membres nominativement désignés par le Comité international, et un représentant du Bureau international. Ces comités sont actuellement au nombre de neuf :

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 (CEMRI), créé en 1958 (en 1969, ce comité consultatif a institué quatre sections : Section I (Rayons x et γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α) ; 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 ;
9. Le Comité consultatif pour la quantité de matière (CCQM), créé en 1993.

Les travaux de la Conférence générale, du Comité international et des comités consultatifs sont publiés par les soins du Bureau international 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*.

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 par décision du Comité international, de même que le *Recueil de travaux du Bureau international des poids et mesures* (11 volumes publiés de 1966 à 1988).

Depuis 1965 la revue internationale *Metrologia*, éditée sous les auspices du Comité international des poids et mesures, publie des articles sur la métrologie scientifique, sur l'amélioration des méthodes de mesure, les travaux sur les étalons et sur les unités, 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.

Membres

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

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 ELETTROTECNICO 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.
NEDERLANDS MEETINSTITUUT : Van Swinden Laboratorium [NMI-VSL],
Delft.
OBSERVATOIRE ROYAL DE BELGIQUE [ORB], Bruxelles.
OFFICE FÉDÉRAL DE MÉTROLOGIE [OFMET], Wabern/OBSERVATOIRE CANTONAL
DE NEUCHÂTEL [ON], Neuchâtel.
PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], Braunschweig.
REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE LA ARMADA [ROA], San Fernando.
TECHNICAL UNIVERSITY OF GRAZ [TUG], Graz.
U.S. NAVAL OBSERVATORY [USNO], Washington DC.
UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE [UAI].
UNION GÉODÉSIQUE ET GÉOPHYSIQUE INTERNATIONALE [UGGI].
UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS [UIT], Bureau des radio-
communications.
UNION RADIO-SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE [URSI].
B. GUINOT.

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

ORDRE DU JOUR
de la 13^e session

1. Ouverture de la session; nomination d'un rapporteur.
 2. Progrès faits sur les étalons de fréquence et les horloges atomiques.
 3. Rapport du Groupe de travail du CCDS sur le TAI.
 4. Rapport de la Section du temps du BIPM.
 5. Synchronisation des horloges au moyen de satellites.
 6. Étude des pulsars-milliseconde.
 7. Rapport du Sous-groupe de travail du CCDS sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS.
 8. Rapport du Groupe de travail du CCDS sur les comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite.
 9. Rapport du Groupe de travail du CCDS sur l'application de la relativité générale à la métrologie.
 10. Groupe de travail du CIPM sur l'équivalence des étalons nationaux.
 11. Comptes rendus d'autres réunions :
 - Union astronomique internationale : 22^e Assemblée générale;
 - Union géodésique et géophysique internationale : 21^e Assemblée générale;
 - Union radio-scientifique internationale : 24^e Assemblée générale;
 - Groupe d'étude n° 7 du Bureau des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications.
 12. Questions diverses.
 13. Recommandations.
 14. Clôture de la session.
-

RAPPORT
DU COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE
(13^e session — 1996)
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
par P. FISK, rapporteur

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) a tenu sa 13^e session au Bureau international des poids et mesures (BIPM) à Sèvres, le mardi 12 et le mercredi 13 mars 1996.

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 [BNM-LPTF], Paris (M. GRANVEAUD, A. CLAIRON).

Communications Research Laboratory [CRL], Tokyo (M. IMAE).

Conseil national de recherches du Canada [NRC], Ottawa (R. J. DOUGLAS).

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

Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques [VNIIF-TRI], Moscou (V. KOUTCHEROV, S. PUSHKIN, N. 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, N. DIMARCQ).

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

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (R. W. YELL).
National Physical Laboratory of Israel [INPL], Jérusalem (A. LEPEK).
National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Tsukuba
(Y. NAKADAN).
Nederlands Meetinstituut : Van Swinden Laboratorium [NMI-VSL],
Delft (G. DE JONG).
Observatoire royal de Belgique [ORB], Bruxelles (P. PÂQUET).
Office fédéral de métrologie [OFMET], Wabern/Observatoire cantonal
de Neuchâtel [ON], Neuchâtel (L. PROST).
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig
(K. DORENWENDT, A. BAUCH).
Real Instituto y Observatorio de la Armada [ROA], San Fernando
(J. PALACIO).
Technical University of Graz [TUG], Graz (D. KIRCHNER).
U.S. Naval Observatory [USNO], Washington DC (W. J.
KLEPCZYNSKI).
Union astronomique internationale [UAI] (G. M. R. WINKLER).
Union géodésique et géophysique internationale [UGGI] (P. PÂQUET).
Union internationale des télécommunications [UIT] (G. DE JONG).
Union radio-scientifique internationale [URSI] (J. MCA. STEELE).

Membre nominativement désigné :

B. GUINOT, Chartrettes (France).

Le directeur du Bureau international des poids et mesures [BIPM]
(T. J. QUINN).

Invités :

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

G. M. R. WINKLER, Washington DC (É.-U. d'Amérique).

A. DE MARCHI, Politecnico di Torino, Turin (Italie).

Assistaient aussi à la session : C. THOMAS, J. AZOUBIB, W. LEWANDOWSKI,
G. PETIT, B. ROUGEAUX et P. WOLF (BIPM).

Absent :

National Physical Laboratory of India [NPLI], New Delhi.

1. Ouverture de la session ; nomination d'un rapporteur

Le président accueille les participants et les informe que M. Fisk
accepte d'assurer le rôle de rapporteur. M. Quinn souhaite la bienvenue

à l'ensemble du comité au nom du BIPM. Le président demande s'il y a des questions susceptibles de figurer au point 12 de l'ordre du jour. M. Allan demande qu'il lui soit permis de rendre compte des activités du sous-comité chargé du temps dans le cadre du Civil GPS Service Interface Committee (CGSIC). Le président donne son accord pour que cela soit traité au point 5 de l'ordre du jour : Synchronisation des horloges au moyen de satellites. Le projet d'ordre du jour est donc adopté et le président présente le premier point de l'ordre du jour.

2. Progrès faits sur les étalons de fréquence et les horloges atomiques

Le président demande au représentant de chaque laboratoire de présenter les progrès effectués dans la mise au point de nouveaux étalons primaires de fréquence.

2.1 Rapports des laboratoires

M. Dorenwendt présente le rapport de la PTB (Allemagne). Après dix-huit ans de fonctionnement, l'étalon primaire CS1 de la PTB a été arrêté afin de faire profiter cet étalon de l'expérience acquise lors de la construction de PTB CS2, PTB CS3 et PTB CS4. Les améliorations qui vont être apportées à PTB CS1 concernent le positionnement du jet, la différence de phase de la cavité, les fuites de micro-ondes et une nouvelle conception de la cavité en anneau du type De Marchi. Il est prévu que cet étalon sera remis en service en 1997.

L'étalon PTB CS2 fonctionne de façon continue depuis 1986, et il donne UTC(PTB) depuis 1991. Les variations de fréquence d'environ 1×10^{-14} , en valeur relative, que l'on a observées de temps en temps, sont attribuées à des activités humaines au cours de la journée, qui perturbent le champ magnétique environnant et occasionnent des fuites de micro-ondes.

L'étalon PTB CS3 fonctionne depuis la fin de l'année 1992, et ses données ont été communiquées au BIPM en 1995. Cet étalon utilise un jet atomique thermique à faible vitesse. L'exactitude de cet étalon est caractérisée par une incertitude relative (1σ) de $1,4 \times 10^{-14}$, le bilan d'incertitude correspondant sera publié dans *Metrologia**. Les principaux éléments qui contribuent à cette incertitude sont l'incertitude sur l'évaluation de la différence de phase de la cavité, le déplacement quadratique de Zeeman et un niveau de fuites de micro-ondes supérieur à ce que l'on attendait.

* Voir BAUCH A., HEINDORFF T., SCHRÖDER R., FISCHER B., The PTB primary clock CS3: type B evaluation of its standard uncertainty, *Metrologia*, 1996, **33**, 249-259.

La PTB a repoussé à plus tard ses recherches sur les étalons de fréquence fondés sur une transition micro-onde dans un nuage d'ions piégés refroidi par un gaz tampon, car il ne serait pas possible d'atteindre une incertitude inférieure à 1×10^{-14} . Toutefois, les recherches continuent sur un éventuel étalon fondé sur une transition optique dans des ions d'ytterbium refroidis par laser; on a récemment observé la raie de la transition d'horloge.

La chaîne de fréquence de la PTB, étendue auparavant jusqu'à l'infrarouge, couvre maintenant le domaine spectral du visible. Une mesure de la fréquence de la raie $\lambda = 657,5$ nm du calcium a été réalisée avec une incertitude de 1×10^{-12} par une méthode utilisant la cohérence de phase sur des atomes refroidis par laser. La PTB procède aussi à la construction d'un étalon à fontaine de césium, ce travail en est actuellement au tout début.

M. Lepek estime que les laboratoires calculent les incertitudes des étalons primaires de fréquence en se fondant sur les principes de la physique, mais que ces incertitudes ne traduisent pas nécessairement la confiance que l'on peut avoir dans la valeur de la fréquence, car elles ne tiennent pas compte de tous les types d'instabilité. M. Bauch répond que les calculs d'incertitude ne peuvent être fondés que sur les lois de la physique et il signale que les effets dus à l'intervention de l'homme, auxquels M. Dorenwendt a fait allusion, entraînent des modifications des champs magnétiques et des fuites de micro-ondes, et qu'il en est par conséquent tenu compte dans les calculs d'incertitude. M. Douglas confirme cette opinion. (La question des incertitudes des étalons primaires de fréquence sera évoquée plus tard lors de cette session.)

M. Prost présente le rapport de l'Observatoire cantonal de Neuchâtel (Suisse). Il signale qu'il remplace un collaborateur, M. Thomann. Il dit que les travaux sur la mise au point des atomes de césium froids sont en bonne voie, et il renvoie le comité à la partie rédigée du rapport pour des détails sur ces travaux et sur les autres activités.

M. Godone rend compte des activités en cours à l'IEN (Italie). La première étape des expériences sur le jet atomique de magnésium est achevée, et l'incertitude sur la fréquence de la transition d'horloge est de 1×10^{-12} en valeur relative. Le bruit à court terme de l'étalon correspond à un bruit blanc de fréquence caractérisé par un écart type d'Allan $\sigma_y(\tau)$ égal à 1×10^{-11} pour un temps d'intégration τ de 1 s. La principale limitation à l'exactitude de la fréquence est l'effet Doppler résiduel du premier ordre. Cette expérience a atteint un point où il sera difficile d'apporter de nouvelles améliorations et son avenir est remis en cause.

La mise au point d'étalons à rubidium pompés par diode laser fait aussi des progrès. Le but de cette recherche est d'améliorer la stabilité à court terme, qui est actuellement de $\sigma_y(\tau = 1 \text{ s}) = 7 \times 10^{-12}$, et d'étudier la possibilité de pulser la lumière de pompage afin de réduire l'effet du décalage lumineux sur la transition d'horloge.

M. De Marchi rend compte des activités en cours au Politecnico di Torino (Italie). L'étalon à jet de césium à pompage optique et à champ C élevé est maintenant en fonctionnement, mais on n'a pas encore de résultats au sujet de sa stabilité et de son exactitude. Cet étalon comprend un nouveau type de cavité, et on a obtenu des franges de Ramsey d'une largeur de 300 Hz. Le rapport signal sur bruit du système est actuellement limité par le bruit du laser. Le système fonctionne sur la transition entre les niveaux ($F = 4$, $M_F = -1$) et ($F = 3$, $M_F = -1$) en présence d'une induction magnétique de 82 mT. Cette situation est très proche de la configuration idéale du système à deux niveaux, par conséquent tous les effets liés aux transitions voisines sont extrêmement petits. La correction de Zeeman à ces valeurs élevées du champ comporte des termes d'ordre quadratique et aussi plus élevés; elle est actuellement à l'étude.

Le président souligne que c'est là un travail très important, puisqu'il ouvre une voie nouvelle pour les étalons à césium. Il demande ensuite à M. Yell de rendre compte des activités en cours au NPL (Royaume-Uni).

M. Yell explique que les recherches sur la fontaine de césium, financées par le NPL mais effectuées à Oxford, sont maintenant transférées au NPL. Une fontaine s'y trouve maintenant au tout premier stade de sa construction et les premiers résultats sont prévus pour dans deux ans.

M. Sullivan rend compte des activités en cours au NIST (É.-U. d'Amérique). La nouvelle horloge NIST-7 à pompage optique du jet de césium a déjà atteint l'exactitude prévue lors de sa conception, avec une incertitude relative de 1×10^{-14} . Cette incertitude a récemment été réduite et atteint 5×10^{-15} , mais cette nouvelle valeur n'a pas encore été officiellement communiquée au BIPM. On pense qu'une nouvelle amélioration, par un facteur 2, de l'exactitude est possible. Cette exactitude élevée a été atteinte en partie grâce à un système automatisé qui pilote et contrôle les effets systématiques sur la fréquence de l'étalon. Afin de conforter l'assurance que l'on a de cette exactitude, on mesure chaque effet systématique de deux façons différentes au moins. Le NIST envisage de conserver ce nouvel étalon sur une longue durée.

M. Sullivan reconnaît l'excellent fonctionnement de la fontaine de césium mise au point au BNM-LPTF (LPTF-FO1); il ajoute que le NIST a commencé à étudier le projet d'une fontaine de césium dans le cadre d'une collaboration entre les laboratoires de Boulder et ceux de Gaithersburg. Aucune échéance détaillée n'a encore été définie pour ce travail.

M. Sullivan passe ensuite aux travaux du NIST sur le piégeage d'ions, qu'il considère comme une recherche fondamentale vers des étalons de fréquence de nouvelle génération. L'équipe du NIST qui travaille sur la question estime que les déplacements systématiques de fréquence qui affectent des ions simples froids ou des chaînes d'ions froids peuvent être analysés de façon très sûre, ce qui permet d'envisager d'atteindre une exactitude très élevée. Les recherches ambitieuses sur les transitions à 40 GHz dans une chaîne d'ions de mercure froids ont subi quelques

retards car il a fallu revoir la conception de l'appareil, mais on pense obtenir prochainement des résultats. Le travail théorique sur une technique fondée sur la création d'états corrélés et destinée à améliorer le rapport signal/bruit d'étalons de ce type a été achevé en 1993, et le travail expérimental a commencé. Ces techniques présentent aussi un intérêt du point de vue des projets de « quantum computers ». D'autres recherches théoriques ont conduit à une formule améliorée pour la variance d'Allan, où la confiance sur $\sigma_y(\tau)$ pour la valeur la plus longue que l'on puisse obtenir pour τ à partir d'une série de données est nettement améliorée.

M. De Marchi indique qu'il est très impressionné par le travail d'évaluation effectué sur NIST-7, et il fait remarquer que l'incertitude absolue atteinte correspond à un millionième seulement de la largeur de la frange centrale de Ramsey. Il poursuit en disant que l'équipe qui travaille sur NIST-7 a analysé les informations obtenues à partir des sept raies du spectre micro-ondes, et qu'elle a mesuré tous les effets systématiques ainsi que leurs incertitudes. M. De Marchi conclut en soulignant qu'il convient d'apprécier le caractère exhaustif de ce travail.

M. Sullivan remercie M. De Marchi pour ses commentaires. Le président ajoute alors ses propres félicitations, et demande à M. Granveaud de présenter les travaux effectués au BNM-LPTF (France).

M. Granveaud dit que l'horloge à pompage optique de césium du BNM-LPTF (LPTF-JPO) a atteint une exactitude caractérisée par une incertitude relative de 1×10^{-13} en 1993. On a récemment amélioré les mesures des déplacements de fréquence dus aux différences de phase de la cavité et aux fuites de micro-ondes. De plus, une nouvelle cavité a été construite et sera installée cette année. L'équipe espère ainsi atteindre une incertitude de quelques 10^{-14} .

La fontaine de césium (LPTF-FO1) du BNM-LPTF a donné une stabilité à court terme de $\sigma_y(\tau = 1 \text{ s}) = 2 \times 10^{-13}$ qui est actuellement limitée par le bruit de l'oscillateur local. Cependant l'instabilité du maser à hydrogène qui sert de référence empêche l'observation de la stabilité intrinsèque de la fontaine sur des durées d'intégration supérieures à 10^4 s. L'exactitude de la fontaine est pour le moment caractérisée par une incertitude de 3×10^{-15} ; son évaluation se poursuit.

Le travail se poursuit aussi au BNM-LPTF sur le projet d'horloge atomique à refroidissement d'atomes en orbite (projet PHARAO). Un prototype d'étalon de fréquence à atomes de césium froids utilisable pour des applications dans l'espace devrait faire l'objet d'essais au début de l'année 1997 dans un avion dans des conditions d'apesanteur. Cet appareil sera aussi utilisé comme horloge terrestre : bien que l'on ne s'attende pas à ce qu'il soit aussi exact que la fontaine LPTF-FO1, il sera plus compact et transportable. Ce travail est effectué dans le cadre d'un contrat de l'Union européenne et en collaboration avec l'École normale supérieure et le LHA.

Le BNM-LPTF a aussi obtenu une stabilité de 6×10^{-15} sur des durées d'intégration de 1000 s pour un laser à gaz carbonique qui fait partie de

la chaîne de multiplication de fréquence du BNM-LPTF. Cette chaîne a récemment servi à mesurer la fréquence d'une diode laser asservie sur une transition à deux photons dans le rubidium, avec une exactitude caractérisée par une incertitude relative de 3×10^{-12} .

Le président demande si une nouvelle amélioration de l'exactitude de LPTF-FO1 est attendue. M. Granveaud laisse à M. Clairon le soin de répondre à la question : les évaluations de l'incertitude sont essentiellement limitées par la stabilité du maser à hydrogène si bien que toutes les valeurs avancées dans le bilan des incertitudes sont prudentes. Il est donc tout à fait possible que l'on obtienne des améliorations lorsqu'une deuxième fontaine à césium sera achevée.

M. Guinot indique que l'incertitude donnée pour le décalage gravitationnel peut être réduite de façon significative; M. Clairon est d'accord sur ce point.

M. Bauch fait remarquer que, selon les lois de la physique, aussi bien les amplitudes de certains déplacements de fréquence qui affectent LPTF-FO1 que leur incertitude, devraient être plus faibles que pour NIST-7. M. Clairon confirme que les incertitudes mentionnées pour LPTF-FO1 sont toutes fondées sur des mesures et non sur des calculs.

M. Allan demande ce qu'il en est de la fiabilité à long terme de l'étalon transportable à atomes de césium froids et M. Clairon répond qu'on le pense fiable mais que bien évidemment cela n'a pas encore été vérifié.

Le président fait remarquer que, bien que le maser à hydrogène soit l'étalon atomique qui a la meilleure stabilité à court terme, il représente maintenant un facteur de limitation pour l'évaluation des étalons primaires de fréquence sur des durées de quelques jours. Il demande aux participants quelles sont les améliorations que l'on peut espérer pour la stabilité à moyen et long terme des masers à hydrogène. M. Audoin répond que, alors que les étalons à césium sont fabriqués à grande échelle, les masers à hydrogène ne le sont qu'en petit nombre et par de petites sociétés. Il s'ensuit que le fonctionnement de l'électronique n'est pas toujours aussi bon qu'il pourrait l'être, et qu'il reste encore beaucoup d'améliorations à apporter à leur système d'accord automatique. On peut donc s'attendre à ce que le fonctionnement des masers à hydrogène s'améliore; toutefois, M. Audoin pense que la dérive due à l'effet de paroi limitera la stabilité à long terme.

M. Winkler dit que les masers à hydrogène que l'on trouve dans le commerce et qui sont fabriqués par Sigma-Tau Company sont conçus pour obtenir le meilleur fonctionnement à long terme. De plus, on peut décupler leur stabilité à court terme en augmentant le débit du jet d'hydrogène, ceci au détriment de la durée de vie du maser.

M. Audoin rend compte des activités du LHA (France). Il commence par préciser que le LHA cherche à comprendre les phénomènes physiques qui interviennent dans les étalons atomiques de fréquence, et à construire des étalons de volume réduit.

Le LHA a construit un tube à jet de césium à pompage optique dont la stabilité est supérieure à celle de tous les étalons d'aussi faible volume; cette stabilité est égale à $\sigma_y(\tau) = 4 \times 10^{-12}$ pour une durée d'intégration τ de 1 s. On a rencontré quelques problèmes avec les fuites de micro-ondes, mais ils sont maintenant résolus. On a observé une certaine asymétrie dans le spectre micro-onde, asymétrie dont la cause s'est avérée être un défaut d'accord du laser de pompage. Des recherches sont aussi en cours pour mieux comprendre le bruit des systèmes de détection optique.

La recherche fondamentale sur la stabilité de la fréquence des étalons atomiques de fréquence passifs se poursuit, et l'équipe qui travaille sur ce sujet comprend maintenant les limites introduites par les effets d'intermodulation. On a mis au point des méthodes pour réduire les effets d'intermodulation en filtrant et en traitant les signaux; celles-ci peuvent être utilisées aussi bien pour des rythmes lents ou rapides de modulation. De plus, on a conçu un système qui sélectionne automatiquement la valeur optimale des paramètres. On a aussi mis au point une théorie complète de la boucle de contrôle de fréquence des étalons pulsés, comme ceux du type fontaine ou piège à ions; cette théorie rend compte des effets déjà prédits par Dick *et al.*

Le LHA a aussi réussi à refroidir des atomes de césium en utilisant un éclairage isotrope à l'intérieur d'une sphère intégrant. La vitesse de capture est supérieure à ce qu'elle est dans la méthode courante des six faisceaux, même si la puissance du champ de rayonnement laser est limitée. On estime que la température atteinte est relativement faible, mais elle n'a pas encore été mesurée avec précision.

En collaboration avec le groupe de Neuchâtel, le LHA met au point un jet continu, ou quasiment continu, d'atomes de césium froids en vue de dépasser les limites des étalons fondés sur des nuages d'atomes pulsés.

Le LHA a aussi participé au projet PHARAO, en particulier à la conception et à la réalisation du prototype de l'horloge, ainsi qu'à la conception de sources diodes lasers très fiables déjà testées en avion lors de vols en apesanteur.

En réponse à une question de M. Sullivan, M. Audoin indique qu'un jet continu d'atomes de césium froids pourrait être utilisé dans un instrument de petite taille.

M. Fisk rend ensuite compte des activités du CSIRO National Measurement Laboratory (Australie). Deux étalons à 12,6 GHz fondés sur des ions d'ytterbium refroidis par gaz tampon confinés dans un piège linéaire de Paul ont été construits. La stabilité à court terme que l'on a obtenue est caractérisée par $\sigma_y(\tau = 1 \text{ s}) = 6 \times 10^{-14}$; actuellement on estime l'incertitude relative de cet étalon à 2×10^{-13} .

M. Dorenwendt demande des précisions sur les facteurs qui limitent l'exactitude des étalons. M. Fisk répond que la principale limitation est la validité du modèle de la distribution spatiale du nuage d'ions dans le piège, que l'on utilise pour calculer le décalage Doppler du second ordre.

Le président invite M. Imae à présenter son rapport sur l'activité du CRL (Japon). M. Imae dit que les progrès sur l'étalon primaire à pompage optique du césium ont été lents, et qu'il a été décidé de reconstruire cet étalon en collaboration avec le NIST. Des résultats sont attendus dans deux ans. Le CRL entreprend aussi la mise au point d'un maser à hydrogène de faibles dimensions pour des utilisations spatiales. Ce travail en est actuellement au stade de la conception. Une fontaine à césium étalon est aussi en cours de mise au point, et on a obtenu le refroidissement par laser des atomes de césium à moins de 1 mK.

M. Allan signale qu'il a entendu dire que le Japon envisage de lancer un système de navigation à l'aide de satellites comparable au Global Positioning System (GPS). M. Imae répond que les ministères japonais des sciences et du transport ont l'intention d'établir un système de ce genre, toutefois les objectifs et le programme de réalisation sont encore en discussion. M. Allan demande si des applications au temps et aux fréquences sont envisagées dans ce programme et M. Imae répond qu'il y en aura.

M. Douglas rend compte des activités du NRC (Canada). Il dit que les conditions matérielles qui entourent l'étalon primaire à jet de césium NRC Cs V font l'objet d'un réaménagement soigneux, afin de maîtriser les gradients de température qui constituent la principale source d'instabilité. On installe aussi une meilleure protection contre les radiofréquences, afin de protéger l'étalon des effets des téléphones portables qui sont parfois utilisés dans le voisinage. Il est envisagé de mettre au point un étalon à jet de césium utilisant des atomes dans la gamme de vitesses de 5 m/s à 10 m/s; on a déjà obtenu le refroidissement des atomes de césium dans des molasses à trois dimensions optiques à moins de 3 μ K. Le travail de mise au point des étalons de fréquence optique dans l'infrarouge, fondés sur des ions isolés piégés, se poursuit. Un ion isolé de baryum a été refroidi à 15 mK, et la fréquence de la transition d'horloge à 12 μ m a été mesurée en utilisant la chaîne de fréquence du NRC avec une incertitude relative de $1,8 \times 10^{-11}$. La fréquence de la transition à 674 nm d'un ion isolé et refroidi de strontium a été mesurée par rapport à un laser à hélium-néon asservi sur l'iode avec une incertitude relative de $6,3 \times 10^{-11}$.

Une étude théorique de l'ionisation à photons multiples et à étapes multiples, comme constituant une méthode moins perturbante pour mesurer la polarisation atomique est en cours, en collaboration avec M. Gagné de l'École polytechnique de Montréal. On pense que cette méthode permettra aussi de résoudre les problèmes de détection optique dus au bruit provoqué par le fond de rayonnement diffusé.

M. Yakadan, représentant le NRLM (Japon), dit que les travaux sur leur fontaine de césium avancent bien : ils ont obtenu des franges de Ramsey d'une largeur spectrale de 1 Hz. Les études sur leur étalon à pompage optique se poursuivent et une stabilité de 3×10^{-14} a été obtenue pour des durées d'intégration de 20000 s.

Le rapport du VNIIFTRI (Féd. de Russie) a été présenté en russe par M. Pushkin et traduit par M. Koshelyaevsky. M. Pushkin indique que deux étalons primaires à césium et plusieurs masers à hydrogène y sont en fonctionnement. Les laboratoires secondaires sont aussi équipés de masers à hydrogène et des comparaisons de temps et de fréquence entre ces laboratoires sont effectuées au moyen du Global Navigation Satellite System (GLONASS) depuis 1989. Plus récemment, la conception de l'étalon primaire à jet de césium MCsR 102 a été revue : on a obtenu une exactitude caractérisée par une incertitude relative de 5×10^{-14} , avec une stabilité améliorée de 2×10^{-14} à 3×10^{-14} sur des durées d'intégration d'environ trois mois. L'étalon primaire à césium MCsR 103 est aussi en cours de reconstruction, avec une cavité raccourcie. On pense obtenir une incertitude de 2×10^{-14} d'ici à la fin de 1996.

Le VNIIFTRI poursuit la mise au point d'autres étalons à jet de césium, en utilisant une cavité du type De Marchi.

M. Koshelyaevsky poursuit avec le rapport du VNIIFTRI et dit que l'étalon national de fréquence de la Russie, fondé sur deux étalons primaires à césium, a reçu l'approbation de l'État avec une incertitude de 5×10^{-14} . L'ensemble de masers à hydrogène a reçu l'approbation avec une stabilité de 1×10^{-14} pour des durées d'intégration allant de 100 s à 100 d. La stabilité effective de l'ensemble sur cet intervalle est de 3×10^{-15} . Plusieurs masers faisant partie de cet ensemble ne présentent pas de dérive de fréquence détectable (inférieure à $3 \times 10^{-17}/\text{d}$), ce qui pose avec plus d'acuité le problème du manque de références appropriées à ce niveau de stabilité.

Le VNIIFTRI poursuit la mise au point de masers à hydrogène de petite taille chargés de saphir. On a atteint des stabilités de quelques 10^{-15} sur des durées d'intégration comprises entre 1 heure et 1 jour, on ne dispose toutefois pas de résultats à plus long terme. L'objectif de cette recherche est de mettre au point une horloge transportable peu coûteuse utilisable pour des applications spatiales. Un appareil de ce type est quasiment prêt pour des essais dans l'espace, mais aucun projet de lancement n'est prévu pour le moment. Un maser à hydrogène à cavité sphérique est aussi en cours de mise au point, et sa stabilité est comparable à celle des masers chargés de saphir.

Le 23 mars 1995 l'unité d'échelle de l'échelle de temps atomique de la Russie a été ajustée à la seconde du SI telle qu'elle est produite par ses étalons primaires à césium, et l'unité d'échelle coïncide maintenant avec celle du TAI, dans les limites d'incertitude de ces étalons.

M. Allan dit qu'à son avis on utilisera des masers à hydrogène dans la prochaine génération de satellites du GLONASS, et il demande des indications quant à ce qui est attendu de leur fonctionnement. M. Koshelyaevsky répond que ce ne seront pas des masers du VNIIFTRI, mais qu'il n'a pas d'autres informations à ce sujet.

Suite à une question de M. Bauch, M. Koshelyaevsky confirme que les étalons primaires à césium du VNIIFTRI fonctionnent de façon continue et que leurs résultats sont communiqués au BIPM.

M. Chung présente alors le rapport du KRISS (Rép. de Corée). L'efficacité du pompage optique de leur étalon primaire à jet de césium a été améliorée en modifiant la polarisation de la lumière de pompage. On a réalisé le piégeage et le refroidissement d'atomes de césium et de rubidium, dans le cadre d'un programme de mise au point d'un étalon à fontaine.

2.2 Incertitudes des étalons primaires de fréquence

Le président remercie les délégués pour leur rapport et ouvre la discussion sur les étalons primaires de fréquence. M. Quinn pose alors la question de savoir comment sont exprimées les incertitudes sur les étalons primaires de fréquence. Il fait remarquer que le *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* de l'ISO recommande que les incertitudes soient exprimées sous la forme d'une combinaison des incertitudes statistiques (type A) et des autres incertitudes (type B). Compte tenu de cela, il suppose que les incertitudes mentionnées pour les étalons primaires de fréquence sont entièrement du type B, puisqu'il n'est donné aucune indication des durées d'intégration.

Il s'ensuit une assez longue discussion sur ce sujet, que M. Allan résume en disant que pour les utilisations dans les domaines du temps et des fréquences nous analysons en général une série temporelle de données. Cela conduit à la question de savoir ce que l'on veut faire quand on calcule une incertitude, c'est-à-dire s'attend-on à une variation de la grandeur au cours du temps, ou recherche-t-on simplement l'incertitude d'une mesure unique? Il dit que le guide de l'ISO ne traite pas de cette question, et que le suivre de façon rigoureuse dans les applications du temps et des fréquences conduirait à des confusions.

M. Quinn répond que l'objectif du guide de l'ISO est d'assurer l'uniformité dans le calcul des incertitudes, cela n'est-il pas applicable dans ces cas? M. Winkler dit que l'évaluation d'un étalon de fréquence comporte deux étapes : la détermination des effets systématiques et ensuite la mesure de sa fréquence par rapport au TAI. Cette deuxième étape inclut l'étude des durées de mesure et l'instabilité. M. De Marchi est d'accord avec M. Winkler pour dire que stabilité et exactitude sont deux notions très différentes, et qu'il n'est pas d'accord pour utiliser l'expression « incertitude-type » lorsqu'on parle d'exactitude. M. De Marchi dit qu'il existe de nombreuses sources d'incertitude dans un calcul de l'exactitude, dont certaines ne sont pas facilement quantifiables, par exemple quand la question de la validité des théories est soulevée.

M. Winkler estime que le guide de l'ISO peut être utilisé dans la mesure où l'on fait la distinction entre stabilité et exactitude.

M. Sullivan ajoute que quelques-uns des effets que l'on rencontre dans le bilan d'incertitude d'un étalon primaire peuvent ne pas être indépendants. Dans ces conditions il ne suffit pas de faire la somme quadratique des différentes composantes.

M. Bauch ajoute qu'il est quelquefois difficile de faire la distinction entre incertitude de type A et de type B ; par exemple l'incertitude sur l'effet Doppler de premier ordre dans la fréquence de la fontaine est évaluée à l'aide de mesures et ne peut donc être prise en compte comme une incertitude de type B.

Après plus ample discussion, le président clôt les débats sur le problème des incertitudes, en faisant remarquer qu'à l'évidence il existe un certain désaccord sur la façon dont celles-ci doivent être présentées. Il suggère que la question est suffisamment importante pour créer un groupe de travail chargé de rendre compte de la façon dont l'exactitude des étalons primaires doit être évaluée en conformité avec le guide de l'ISO. Il demande à M. Douglas de présider ce Groupe de travail du CCDS sur l'expression des incertitudes dans les étalons primaires de fréquence. M. Douglas accepte. Avec M. Douglas, ce groupe de travail comprend MM. Allan, Bauch, Lepek, De Marchi et Mme Thomas ; il reste par ailleurs ouvert à d'autres experts appartenant à des laboratoires du temps.

2.3 Déplacement dû au rayonnement du corps noir dans les étalons primaires de fréquence

Le président invite M. Audoin à parler du déplacement dû au rayonnement du corps noir de la fréquence de la transition entre niveaux hyperfins de l'atome de césium.

M. Audoin commence son exposé en faisant remarquer que la définition de la seconde dans le SI suppose que l'atome de césium observé soit non perturbé, et que soient apportées des corrections pour les perturbations inévitables. Il résume les méthodes bien connues qui permettent d'apporter des corrections pour les effets dus au champ magnétique statique (effet Zeeman quadratique statique), au champ électrique statique (effet Stark statique) et pour les effets Bloch-Siegert (actuellement négligeables) dus au rayonnement micro-onde et à ses composantes spectrales parasites. Il dit que l'on comprend bien aussi, depuis de nombreuses années, la théorie physique des effets dus aux champs magnétique et électrique alternatifs (effets Zeeman et Stark alternatifs). En fait, le déplacement dû au rayonnement du corps noir provient des effets Stark et Zeeman alternatifs auxquels sont soumises les structures hyperfines des atomes alcalins exposés au spectre du rayonnement émis par les parois environnantes qui se trouvent à des températures non nulles. Il existe donc deux composantes essentielles au déplacement dû au rayonnement du corps

noir de la fréquence des atomes de césium au voisinage de la température ambiante :

- Le couplage du rayonnement du corps noir au dipole magnétique de la transition d'horloge à 9 GHz, au moyen de l'effet Zeeman alternatif. Cela donne un décalage de fréquence relatif :

$$\frac{\Delta v_0}{v_0} = 1,3 \times 10^{-17} \left(\frac{T}{T_0} \right)^2,$$

où $T_0 = 300$ K et où T est exprimé en kelvins.

- Le couplage du rayonnement du corps noir au dipole électrique de la transition de résonance optique à 850 nm, au moyen de l'effet Stark alternatif. Cela donne un décalage de fréquence relatif beaucoup plus grand :

$$\frac{\Delta v_0}{v_0} = 1,69 (4) \times 10^{-14} \left(\frac{T}{T_0} \right)^4,$$

où $T_0 = 300$ K et où T est exprimé en kelvins.

Le calcul est rendu complexe par la nature spectrale semi-continue de ce rayonnement, mais il est simplifié si l'on tient compte de ce qu'à la température ambiante ($T_0 = 300$ K) l'essentiel de l'énergie du spectre du corps noir se situe à des fréquences supérieures à la fréquence de la transition d'horloge et inférieures à la fréquence de la transition de la résonance optique.

M. Audoin conclut en disant que le déplacement dû au rayonnement du corps noir dans la fréquence de la transition d'horloge du césium est significatif, et que l'incertitude que nous avons dans la connaissance de ce déplacement se situe entre 2×10^{-16} et 3×10^{-16} , à la condition que le rayonnement soit émis par un corps noir parfait.

M. Bauch félicite M. Audoin pour son rapport, et demande que le texte en soit distribué, ce que M. Audoin accepte.

3. Rapport du Groupe de travail du CCDS sur le TAI

Le président invite M. Pâquet, président depuis 1996 du Groupe de travail du CCDS sur le TAI, à rendre compte des activités de ce groupe de travail. M. Pâquet demande à M. Winkler, qui a présidé le groupe de 1985 à 1995, de faire le rapport. M. Winkler dit que le principal sujet de discussion lors de la dernière réunion du groupe de travail, qui s'est tenue au BIPM le 13 et le 14 mars 1995, a été l'effet du rayonnement du corps noir sur la fréquence des étalons primaires de fréquence. Il demande

à M. Petit, rapporteur de la réunion de 1995, d'en résumer les points principaux. M. Petit a présenté le rapport suivant :

- Un projet de recommandation, demandant aux laboratoires de calculer la correction qui compense l'effet du rayonnement du corps noir sur la fréquence de leurs étalons, et d'en communiquer le résultat au BIPM, a été préparé pour être soumis au CCDS, et a été communiqué aux laboratoires qui contribuent à l'établissement du TAI.
- Le rôle de l'UTC et les besoins en temps réel des utilisateurs ont été examinés. Cependant le groupe de travail n'est pas parvenu à un accord et a estimé que les études sur ces questions devaient être continuées.
- Le groupe de travail a souligné que les laboratoires devaient continuer à étudier les corrélations entre leurs horloges; il a fait remarquer que le BIPM n'avait reçu aucun rapport sur cette question.
- Le groupe de travail a conclu que les données provenant des masers à hydrogène sont utilisées correctement pour le calcul du TAI; toutefois, des améliorations restent toujours possibles.
- Le groupe de travail a fait remarquer que la qualité des équipements de comparaison d'horloges conçus spécialement pour les observations simultanées des satellites du GPS et que l'on trouve dans le commerce semble se détériorer; il convient donc de prendre des mesures. De plus, les améliorations de l'exactitude et de la stabilité des horloges donnent à penser qu'il convient d'étudier de nouvelles méthodes de comparaison d'horloges par le GPS.
- Le groupe de travail a recommandé que le poids maximal des horloges qui contribuent à l'élaboration du TAI soit accru d'un facteur de 2,5 et que la durée de base entre deux mises à jour du TAI soit ramenée à 5 jours. Il a donc été demandé aux laboratoires de communiquer leurs données d'horloges pour les dates se terminant par 4 et 9 dans le calendrier Julien modifié.
- Le groupe de travail a recommandé que le TAI soit piloté par petits sauts afin de compenser les écarts qui apparaîtront quand la correction pour l'effet du rayonnement du corps noir sera appliquée uniformément à toutes les mesures des étalons primaires de fréquence. Le groupe de travail a aussi recommandé que, dans la mesure du possible, le pilotage soit annoncé à l'avance.

À la fin du rapport de M. Petit, M. Winkler souligne l'importance de l'étude des corrélations entre horloges, car le système de pondération utilisé pour le calcul du TAI ne convient pas si de telles corrélations existent. Il dit qu'une étude de ce type a été menée à l'USNO et que parmi les cinquante horloges HP 5071A qui y fonctionnent, on a observé des variations de fréquence de 1×10^{-14} à 3×10^{-14} en valeur relative, non corrélées, durant des périodes comprises entre 100 d et 300 d. M. Winkler dit aussi que, du point de vue de l'Union astronomique internationale

(UAI), la caractéristique la plus importante du TAI est sa stabilité à long terme ; c'est à celle-ci qu'il convient de donner toute la priorité. Compte tenu du fait que l'amélioration de la stabilité à court terme du TAI est récente et rapide, nous ne disposons pas encore de suffisamment de données pour en évaluer la nouvelle stabilité à long terme.

Le président signale que des projets de recommandations traitant des corrélations entre horloges et du rayonnement du corps noir ont été rédigés ; il suggère qu'ils soient discutés à la fin de la réunion du CCDS avec l'ensemble des projets de recommandations.

Le président demande ensuite à M. Pâquet de rendre compte de la réunion des représentants des laboratoires qui participent à l'élaboration du TAI, qui s'est tenue la veille de la présente session. M. Pâquet dit qu'il y a eu cinquante participants, et que la plupart des sujets discutés ont déjà été présentés par M. Winkler et par M. Petit. M. Pâquet dit qu'au cours de la réunion l'accord a été général en faveur du nouveau système de pondération. Il semble toutefois que le TAI présente une variation saisonnière résiduelle et il a été suggéré d'étudier l'effet produit dans le calcul du TAI par l'exclusion de toutes les horloges qui ne sont pas des horloges à césium HP 5071A ou des masers à hydrogène.

M. Pâquet dit que lors de cette réunion les représentants des laboratoires ont pris note du fait que la plupart des perturbations qui affectent les comparaisons d'horloges par le GPS sont déjà bien connues des milieux qui s'intéressent à la géodésie : par exemple, la correction ionosphérique et l'effet de la pression atmosphérique sur l'écorce terrestre. À son avis, cela vaudrait la peine d'avoir davantage de contacts avec les utilisateurs du GPS intéressés par la géodésie.

M. Pâquet fait remarquer que bien que des recommandations relatives aux caractéristiques que doit comporter le logiciel des récepteurs de comparaison d'horloges par le GPS aient été faites en 1992, seuls les récepteurs de type NBS possèdent réellement ces caractéristiques. Au cours de la réunion, il a été discuté de la possibilité d'évaluer le marché qu'aurait un nouveau récepteur satisfaisant à tous les besoins de la métrologie du temps et de prendre contact avec un fabricant potentiel. M. Pâquet signale aussi que la qualité des récepteurs deviendra critique lorsqu'on sera dans la période d'activité maximale du soleil.

Les représentants des laboratoires ont aussi fait remarquer qu'il faut étudier le passage des coordonnées de référence du GPS à celles du GLONASS. Enfin, ils ont apprécié la façon dont le BIPM a mis en œuvre les recommandations de la précédente réunion. Le CCDS a formalisé cette appréciation dans les termes suivants :

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde,

considérant que la Section du temps du BIPM a mis en œuvre de façon exemplaire toutes les recommandations faites en 1995 lors de la réunion du Groupe de travail sur l'amélioration du TAI et qu'elle a

conduit les études sur les possibilités d'améliorer encore les services rendus à la communauté internationale du temps, ce qui s'est avéré très utile lors des discussions de ce groupe de travail,

exprime au BIPM ses remerciements et ses félicitations pour son action remarquable.

Le président remercie M. Pâquet pour son rapport et demande à Mme Thomas de présenter le rapport de la Section du temps du BIPM.

4. Rapport de la Section du temps du BIPM

Mme Thomas indique que le TAI est calculé tous les 5 jours depuis le 1^{er} janvier 1996, ce qui permettra aux laboratoires qui souhaitent piloter leur réalisation locale de l'UTC de prévoir plus facilement le comportement de l'UTC. On utilise des blocs de données portant sur deux mois et la réduction de la longueur de cet intervalle n'a pas encore été décidée. Le poids maximal des horloges qui participent à l'élaboration du TAI a été accru d'un facteur 2,5. La *Circular T* du BIPM comporte maintenant des renseignements sur le pilotage du TAI ; elle comporte aussi des évaluations de la durée de l'unité d'échelle du TAI par rapport à la seconde du SI telle qu'elle résulte des étalons primaires.

Mme Thomas fait remarquer qu'il y a une amélioration rapide de la stabilité des données communiquées au BIPM depuis 1993. Cela est attribué au fait qu'il y a de plus en plus d'horloges à césium HP 5071A, qui semblent avoir un niveau de bruit de scintillation de 6×10^{-15} sur des durées d'intégration comprises entre 20 jours et 40 jours. Actuellement 42 % des horloges dont les données entrent dans le calcul du TAI sont de ce type et ce pourcentage s'accroît. Il existe maintenant quarante-six laboratoires de temps qui conservent une réalisation locale de l'UTC, et quatre autres vont prochainement entreprendre cette activité. Presque tous ces laboratoires effectuent des observations du GPS conformément au programme international de vues simultanées du GPS tel qu'il a été publié par le BIPM. Mme Thomas fait aussi remarquer que plusieurs masers à hydrogène dont les données sont communiquées au BIPM présentent une stabilité à long terme tout-à-fait remarquable.

En 1995, la stabilité de l'EAL, l'échelle atomique libre obtenue par moyenne pondérée des données d'horloges, est caractérisée par un écart-type d'Allan de $2,6 \times 10^{-15}$ pour une durée d'intégration de 40 jours. Pendant cette même année, l'unité d'échelle du TAI s'est écartée de la seconde du SI de $1,8 \times 10^{-14}$ s, écart connu avec une incertitude de 5×10^{-15} s. Cet écart provient de l'application uniforme à la fréquence de tous les étalons primaires de la correction qui compense le décalage dû au rayonnement du corps noir. Il a été possible de réduire l'incertitude relative à la valeur de 5×10^{-15} grâce à l'excellente exactitude des mesures de fréquence fournies par l'étalon LPTF-FO1.

Le BIPM a effectué un certain nombre d'études sur les effets entraînés par des modifications de la pondération des horloges dans le calcul de l'EAL. La stabilité de l'EAL a été évaluée au moyen de la méthode du chapeau à N pointes en utilisant quatre échelles atomiques indépendantes calculées dans divers laboratoires (BNM-LPTF, NIST, USNO, VNIIFTRI) et en utilisant les données de l'étalon primaire de fréquence PTB CS2 qui fonctionne en continu. Il s'est avéré que l'on obtient la stabilité la meilleure si, au lieu d'utiliser un poids maximal absolu comme on le fait actuellement, on peut donner à chaque horloge un poids maximal relatif de 1,37 %. Cela revient à ce que les horloges les plus stables réduisent le poids des horloges les moins bonnes. En dépit de ses avantages apparents, il a été décidé de ne pas adopter ce nouvel algorithme jusqu'à ce qu'on ait étudié sa sensibilité aux variations saisonnières ainsi qu'aux autres variations à long terme.

Mme Thomas dit que le traitement actuel des données des masers à hydrogène n'est pas optimal à cause de la difficulté à prévoir leur dérive de fréquence, mais une méthode meilleure n'a pas encore été mise au point.

Mme Thomas poursuit en disant que le pilotage du TAI est effectué par sauts de 1×10^{-15} tous les deux mois, et qu'il faudra donc plusieurs années pour que l'unité de cette échelle coïncide avec la seconde du SI. Les étalons primaires de la PTB qui fonctionnent en continu entrent dans le calcul de l'EAL ainsi que pour évaluer l'unité d'échelle du TAI à intervalles de 60 jours. Les étalons primaires qui ne fonctionnent pas en continu ne peuvent participer à l'élaboration de l'EAL, mais fournissent une évaluation indépendante de l'unité d'échelle du TAI. Ces étalons comprennent actuellement LPTF-F01, NIST-7 et SU MCsR 102.

M. Lepek demande à Mme Thomas si elle peut donner quelques chiffres à propos des variations observées dans les estimations des dérives des masers à hydrogène. Mme Thomas répond que des variations de dérive atteignant un facteur 2 ont été observées. M. Lepek demande si ces variations pourraient en fait être dues à l'instabilité du TAI, et Mme Thomas répond qu'elle ne le pense pas. M. Bauch précise que, à la PTB, les masers à hydrogène de construction russe présentaient au début une dérive de $10^{-16}/d$, qui est devenue nulle au bout de deux ans, et qui ultérieurement a changé de signe.

M. Allan suggère que, étant donné l'incertitude de 3×10^{-15} de LPTF-F01 et la stabilité de l'EAL, il serait peut-être préférable pour estimer l'unité d'échelle du TAI de prendre une moyenne sur 30 jours des données de LPTF-F01, ce qui réduirait le bruit des mesures et donnerait une meilleure comparaison. M. Guinot répond qu'il faudrait disposer au BNM-LPTF d'un étalon de transfert ayant une stabilité comparable en moyenne sur 30 jours, or on ne dispose pas pour le moment d'un tel étalon. Minimiser le bruit apporté par cet étalon de transfert exige que la durée d'intégration pour l'estimation de l'unité d'échelle du TAI soit aussi

voisine que possible de la durée sur laquelle la fréquence de LPTF-FO1 est mesurée.

M. Winkler demande comment on estime la dérive de fréquence des masers à hydrogène au BIPM. Mme Thomas répond que, généralement, on ajuste une parabole sur les données temporelles prises tous les 10 jours. M. Winkler approuve cette méthode qu'il considère comme étant la plus efficace.

M. Bauch demande si les estimations de la stabilité de l'EAL dépendent du choix des cinq échelles de temps utilisées pour la comparaison. Mme Thomas répond que cela a été étudié et qu'il n'existe pas de dépendance significative.

M. Allan fait remarquer que le fait de pouvoir obtenir pour l'EAL une plus grande stabilité en attribuant aux horloges très stables un poids plus fort au détriment des horloges moins bonnes est important et que, selon lui, ce travail est digne d'éloges. Il fait aussi remarquer que la stabilité de l'échelle de temps qui fait appel à un poids maximal relatif et à une période de calcul sur 30 jours, caractérisée par $\sigma_y(\tau = 20 \text{ d}) = 6 \times 10^{-16}$, est voisine de la valeur théorique qu'il calcule en supposant un algorithme optimal pour combiner les données d'un ensemble d'horloges du type HP 5071A.

M. Lepek fait remarquer que la méthode du chapeau à N pointes ne s'applique que dans le cas où les échelles de temps considérées comportent un bruit blanc de phase. Mme Thomas convient qu'il peut exister un problème à cet égard, mais que pour le moment il n'y a guère de choix dans les méthodes dont on dispose pour évaluer la stabilité des échelles de temps.

M. Bauch demande si le pilotage appliqué au TAI va toucher les gens qui sont concernés par l'astronomie et s'il ne vaudrait pas mieux avoir un saut unique de fréquence pour amener l'unité d'échelle du TAI en concordance avec la seconde du SI. M. Winkler répond que pour le moment le pilotage ne se distingue pas des autres dérives et par conséquent ne pose pas de problème, alors qu'un saut important serait gênant.

M. Guinot reconnaît que le TAI souffre d'un certain nombre de défauts à long terme, comme la correction imprévue pour le déplacement dû au rayonnement du corps noir. Cela peut poser un problème aux radioastronomes qui étudient les pulsars-milliseconde. C'est pour résoudre ce problème que le BIPM produit une échelle de temps, TT(BIPM), qui est recalculée annuellement afin de donner une échelle de temps exacte à long terme. Ainsi TT(BIPM) devrait répondre aux exigences de la communauté scientifique qui a particulièrement besoin de stabilité à long terme. Il faut donc que le TAI soit corrigé pour le déplacement dû au rayonnement du corps noir et il faut accepter la dégradation de stabilité que cela entraîne.

M. Bauch suggère que le groupe de travail de M. Douglas, dont on vient de proposer la création, étudie aussi, lorsqu'on estime la durée de l'unité d'échelle du TAI, la validité de l'hypothèse selon laquelle les

mesures faites sur des intervalles consécutifs de 60 jours avec PTB CS2 ne sont pas indépendantes les unes des autres seulement parce que cet étalon primaire particulier fonctionne de façon continue. Mme Thomas convient que cela doit être étudié, en particulier parce que le BIPM ne connaît que partiellement la manière dont l'évaluation des incertitudes est faite. M. Sullivan approuve : c'est un point qui en vaut la peine puisqu'il est important d'optimiser l'utilisation des données.

Le président clôt la discussion sur la stabilité des échelles de temps du BIPM et passe au problème de la synchronisation des horloges. Il invite Mme Thomas à prendre la parole.

5. Synchronisation des horloges au moyen de satellites

Mme Thomas dit que le BIPM publie deux fois par an des programmes de vues simultanées du GPS, et que les données brutes reçues sont traitées de façon aussi uniforme que possible. On continue d'étudier les variations des retards internes des récepteurs du temps du GPS. La Section du temps du BIPM travaille avec un récepteur multicanal à double fréquence produit par Allen-Osborne Associates (modèle TTR4-P) qui, bien qu'il ne fonctionne pas bien, semble être capable de transférer des fréquences avec une incertitude relative de 1×10^{-15} sur des durées d'intégration de 1 jour quand on utilise des mesures de phase de l'onde porteuse. La mesure des retards ionosphériques et l'estimation des retards troposphériques au moyen de données de température et de pression continuent d'être deux questions importantes.

Le BIPM a publié son premier programme de vues simultanées pour le GLONASS en janvier 1996, et une expérience entre la société 3S Navigation, Californie (É.-U. d'Amérique), l'USNO et le BIPM sur la comparaison d'horloges par le GLONASS, à l'aide de la technique des vues simultanées, a donné des résultats encourageants. Un bruit blanc de phase, caractérisé par un écart-type de 9 ns, est détecté sur l'observation d'un satellite durant 13 minutes, mais il subsiste des problèmes en ce qui concerne l'étalonnage absolu des récepteurs du temps du GLONASS.

Le président remercie Mme Thomas pour son rapport et invite M. Allan à présenter un rapport sur les activités du Civil GPS Service Interface Committee (CGSIC), un organisme qui joue un rôle d'interface entre les utilisateurs civils du GPS et la gestion opérationnelle du GPS. M. Allan fait remarquer que les utilisations civiles du GPS dépassent maintenant de beaucoup les utilisations militaires, de telle sorte que l'importance de cet organisme s'accroît. Un groupe de travail, présidé par M. Allan, a été créé au sein du CGSIC afin d'améliorer la communication avec les milieux civils qui s'intéressent au temps et M. Allan demande que les contributions adressées à ce groupe de travail passent soit par lui-même soit par M. Lewandowski.

Le CGSIC a constaté qu'il est nécessaire d'améliorer la mesure des retards ionosphériques, car on approche d'une période d'activité solaire maximale. De plus, il est clair que ce sont les méthodes habituelles de comparaison de temps qui constituent maintenant une limitation pour transférer le niveau d'exactitude et de stabilité des nouveaux étalons de fréquence aux échelles de temps internationales. M. Allan dit que plusieurs nouvelles méthodes sont en cours d'étude, y compris l'utilisation de la phase de l'onde porteuse du GPS, et une méthode pour déterminer de façon très précise les orbites des satellites du GPS, qui en théorie permettra des comparaisons de temps avec une exactitude de 10 ps. Il signale aussi que l'accès sélectif (SA) est très gênant pour la plupart des utilisateurs civils.

M. Winkler mentionne que deux rapports ont été faits aux É.-U. d'Amérique, l'un par la National Academy of Sciences et l'autre par la National Academy of Public Affairs; ils ont recommandé que l'accès sélectif soit supprimé. Il est donc possible que l'accès sélectif soit réduit ou même supprimé durant les périodes où il n'y a pas de tension internationale. M. Sullivan craint que cela ne soit pas nécessairement bénéfique pour les milieux intéressés par le temps et les fréquences, car cela risque d'éliminer toute stimulation pour mettre au point des méthodes de comparaison d'horloges, nouvelles et meilleures, dont on aura besoin si l'accès sélectif est remis en vigueur. M. Winkler répond que certains utilisateurs peuvent considérer cela comme un problème, mais estime que de tels arguments ne sont que de peu de poids dans les décisions prises pour l'accès sélectif.

M. Pâquet fait remarquer que, bien que beaucoup de progrès aient été faits au cours des dix dernières années, les récepteurs du GPS utilisés pour les comparaisons d'horloges sont encore pour la plupart de la première génération. Il souligne la nécessité qu'il y a de convaincre un fabricant ou un laboratoire de mettre au point un récepteur qui corresponde aux besoins des laboratoires de temps. Il souligne également l'intérêt d'avoir un système uniforme, afin de pouvoir échanger les connaissances que l'on acquiert sur l'étalonnage et l'entretien, et il demande l'appui du CCDS sur ces questions. Le président est d'accord et demande à M. Pâquet de préparer un projet de recommandation à examiner lors de la présente session du CCDS. Ce projet de recommandation a par la suite été transformé en une demande officielle du CCDS au groupe de travail qui s'occupe de la normalisation des comparaisons d'horloges par le GPS. (Le texte complet en est donné au paragraphe 7.)

Le président clôt alors la discussion sur la synchronisation des horloges et demande à M. Petit de présenter un rapport sur l'étude des pulsars-milliseconde.

6. Étude des pulsars-milliseconde

M. Petit remarque que la Recommandation S 2 (1993) intitulée « Chronométrie des pulsars-milliseconde », adoptée par le CCDS lors de

sa 12^e session, a constitué une aide pour les radioastronomes. Il signale que les pulsars sont les horloges astronomiques les plus stables et qu'un temps des pulsars, correspondant à une moyenne des données reçues de plusieurs pulsars observés sur une longue période (au moins dix ans), présenterait une stabilité de 2×10^{-15} sur des durées d'intégration de plusieurs années et pourrait donc servir à contrôler les instabilités à long terme du TAI. Il dit que trois pulsars ont été observés pendant plus de huit ans. Parmi ceux-ci deux seulement sont de bons candidats pour servir d'horloges et seulement l'un des deux présente des caractéristiques proches du bruit blanc. Les limites apparentes à leur stabilité sont le bruit intrinsèque au pulsar et l'interaction gravitationnelle dans le voisinage du pulsar ou à proximité du lieu de passage du signal radio.

M. Petit indique que des observations chronométriques sont actuellement effectuées dans dix centres répartis dans le monde entier et qu'une vingtaine de programmes d'observation sont consacrés à la recherche de nouveaux pulsars-milliseconde. Il conclut en disant qu'il faudra encore plusieurs années avant que la métrologie du temps tire tout le profit possible du chronométrage des pulsars-milliseconde.

M. Guinot demande si l'instabilité à long terme du TAI contribue à l'instabilité à long terme apparente du temps des pulsars. M. Petit répond que c'est là une question importante, et il n'est pas encore évident de savoir quelle est la meilleure échelle de temps à utiliser comme référence pour étudier les pulsars.

M. Winkler observe que les pulsars les plus stables sont ceux que l'on connaît le moins bien, car ils ne fournissent que très peu de données sur les variations dans leur structure interne. Il exprime des craintes quant à l'utilisation d'objets mal connus pour servir d'horloges. Il a aussi des craintes quant à l'utilisation d'un système non local pour autre chose que des comparaisons.

Le président clôt la discussion sur les pulsars et passe au rapport du Sous-groupe de travail du Groupe de travail du CCDS sur le TAI, qui s'occupe de la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS. M. Allan, président de ce sous-groupe, présente son rapport.

7. Rapport du Sous-groupe de travail du CCDS sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS

M. Allan dit que le Sous-groupe de travail du CCDS sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS a défini des directives techniques, pour la normalisation des logiciels des récepteurs du temps du GPS, qui sont maintenant publiées dans *Metrologia* (1994, **31**, 69-79). Ces directives sont déjà implantées dans les logiciels produits par les sociétés Allen-Osborne Associates et 3S Navigation. Ces deux sociétés sont

en outre prêtes à coopérer sur d'autres questions. On pense que le nouveau format des données, avec une résolution de 0,1 ns, répondra aux besoins des comparaisons d'horloges durant les prochaines années. M. Allan dit que, compte tenu du fait que l'on dispose depuis peu de récepteurs du temps du GLONASS et que les premiers résultats sont prometteurs, le travail de ce sous-groupe n'est pas achevé et qu'il doit s'étendre aussi à la normalisation des comparaisons d'horloges par le GLONASS. (Plus tard dans la réunion, il est décidé de modifier le nom de ce sous-groupe et de l'appeler « Sous-groupe de travail sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS ».) Une demande officielle du CCDS destinée à ce sous-groupe a été rédigée afin de renforcer les contacts entre les fabricants de récepteurs des temps du GPS et du GLONASS et les milieux intéressés par le temps.

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde,

prenant note des nettes améliorations tant de la qualité des étalons primaires de fréquence que de celle des horloges atomiques commerciales,

reconnaissant que le fonctionnement des récepteurs du GPS et du GLONASS que l'on trouve dans le commerce et que l'on utilise couramment ne répond pas aux exigences des comparaisons d'horloges,

demande au Sous-groupe de travail sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS

— de prendre contact avec les fabricants de récepteurs et de les prier d'adapter leurs appareils, tant pour le matériel que pour le logiciel, aux exigences des laboratoires de temps et de fréquence, afin que ces récepteurs puissent enregistrer les signaux des satellites du GPS et du GLONASS en mode de double fréquence, sur plusieurs canaux, sous un format de données défini par le sous-groupe, avec étalonnage interne et qu'ils soient dans toute la mesure du possible insensibles aux conditions ambiantes,

— de maintenir les laboratoires de temps et de fréquence informés de ses actions.

M. Allan note que le temps du GLONASS et UTC(SU) sont respectivement décalés de 25 μ s et de 7 μ s par rapport à l'UTC, et que cela n'est pas souhaitable. M. Koshelyaevsky suggère qu'il pourrait être utile que le CCDS demande que ces échelles de temps soient synchronisées. M. Klepczynski ajoute que, dans le cadre du Global Navigation Satellite System (GNSS) qui va être mis en œuvre, il serait aussi important pour les milieux de la navigation que le temps du GLONASS soit plus proche de l'UTC. Le président suggère que MM. Allan et Koshelyaevsky rédigent un projet de document qui serait discuté. Il ajoute aussi que dans ce document, mention devrait être faite des difficultés occasionnées par le

fait que les systèmes de coordonnées utilisés par le GPS et le GLONASS sont différents.

Au cours de la discussion qui s'ensuit, il est unanimement reconnu que le temps du GLONASS doit être aussi proche que possible de l'UTC (± 100 ns paraît un objectif réaliste pour M. Winkler) et que le système de coordonnées utilisé par le GLONASS doit être aussi proche que possible du Système de référence terrestre (ITRF) spécifié par le Service international de la rotation terrestre (IERS).

Le président clôt la discussion sur la normalisation des comparaisons d'horloges par le GPS et le GLONASS, et passe au rapport du Groupe de travail sur les comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite. M. Klepczynski, président de ce groupe de travail, présente son rapport.

8. Rapport du Groupe de travail CCDS sur les comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite

M. Klepczynski dit que l'objectif du Groupe de travail du CCDS sur les comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite est d'établir comment la technique de comparaison par aller et retour sur satellite peut au mieux contribuer à l'élaboration du TAI. À cet égard, il souligne plusieurs problèmes qui se posent, en particulier le fait que les installations de comparaison par aller et retour sont souvent situées loin du bâtiment où les échelles locales de temps sont élaborées et qu'il n'existe pas toujours un lien exact entre les deux.

Le réseau actuel de comparaison de temps par aller et retour sur satellite comporte six stations en Europe, plus deux autres qui vont bientôt entrer en fonction, et quelques stations aux États-Unis. Le principal problème est le manque d'uniformité entre systèmes; il existe par exemple des différences dans l'équipement, la longueur des câbles et les méthodes d'étalonnage. Un autre problème est celui du coût et de la disponibilité de temps d'utilisation de satellites convenables, puisque l'époque récente d'utilisation gratuite des satellites de l'International Telecommunications Satellite Organization (INTELSAT) à des fins expérimentales est terminée.

M. de Jong dit que le NMI-VSL a mis au point un système automatisé pour étalonner les retards dans les stations sur Terre et qu'un système de ce genre sera nécessaire dans chaque station si on veut atteindre un fonctionnement optimal. M. Kirchner dit que le TUG lui aussi possède un simulateur de satellite à des fins d'étalonnage et qu'il l'utilise depuis quinze mois. Il dit que l'équipe du TUG a établi un bilan d'incertitude de 50 ps pour une donnée individuelle; toutefois cette équipe observe une variation saisonnière d'une amplitude crête à creux de 1,5 ns, due à la sensibilité de l'équipement à la température et à l'humidité.

M. Sullivan félicite M. de Jong et M. Kirchner pour leur contribution à l'amélioration de l'exactitude des stations terrestres, mais il ajoute que jusqu'à maintenant le NIST a été déçu par le fonctionnement de la technique de comparaison d'horloges par aller et retour sur satellite, et aimerait voir une démonstration claire de la supériorité de celle-ci sur l'utilisation du GPS pour les comparaisons de temps et de fréquence sur de très longues distances. Il dit qu'une telle démonstration sera nécessaire pour justifier le capital et la main-d'oeuvre investis dans les recherches sur la technique par aller et retour sur satellite.

M. Kirchner fait remarquer qu'il est difficile de faire la preuve de la supériorité du fonctionnement de la méthode par aller et retour sur la méthode par vues simultanées des satellites du GPS sans avoir de très bonnes horloges reliées aux stations terrestres et toutes les stations terrestres n'en sont pas équipées.

M. Bauch parle des comparaisons d'horloges effectuées entre l'USNO et la PTB, et entre le NIST et la PTB, en utilisant les deux méthodes. À son avis, les résultats prouvent que les deux méthodes conviennent pour comparer les fréquences des étalons primaires de fréquence à leur niveau actuel d'incertitude. Cet avis n'est pas partagé par tous les participants.

Le président suggère que pour évaluer les qualités de la méthode de comparaison par aller et retour sur satellite, il faut que quelqu'un prenne toutes les données disponibles, en déduise les résultats de comparaison deux à deux des horloges et les communique au BIPM. M. Klepczynski dit que le groupe de travail est en train d'établir un traitement unifié pour les mesures à court terme et un format pour les fichiers de données. De plus, il annonce que l'USNO conservera une liaison horaire entre l'horloge maîtresse du GPS dans le Colorado et l'USNO à Washington DC, en utilisant des stations terrestres équipées de façon semblable pour comparaison par aller et retour. Cela devrait fournir une série à long terme de données fiables et bien connues.

M. Sullivan demande ce que le BIPM pense de la possibilité d'incorporer les résultats des comparaisons par aller et retour sur satellite dans le TAI. Mme Thomas répond que cela pose deux problèmes fondamentaux : l'un est celui de l'étalonnage des liaisons horaires concernées et l'autre est le fait que les mesures par aller et retour ne sont pas effectuées aux dates normalisées (dates du calendrier Julien modifié se terminant par 4 et 9, à 0 h 00 UTC). M. Petit ajoute que les résultats des comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite présentent peu d'avantages pour le TAI pour le moment, puisque les comparaisons par GPS intégrées sur quelques jours sont aussi efficaces. M. Lewandowski dit que sur de très longues distances la méthode par aller et retour est peut-être supérieure à la méthode des vues simultanées sur les satellites du GPS, à cause des perturbations ionosphériques et autres qui affectent les comparaisons d'horloges par le GPS, mais seulement à la condition qu'un étalonnage convenable de l'équipement soit effectué.

M. Kirchner fait alors remarquer qu'il convient de distinguer entre la méthode et sa mise en œuvre. Il dit que la méthode par aller et retour sur satellite eut un succès immédiat lorsqu'elle a commencé à être utilisée il y a vingt ans ; on ne peut donc pas la proscrire simplement pour des problèmes de matériel qui se sont posés ultérieurement. On peut s'attendre à une amélioration significative dans le fonctionnement de la technique des comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite grâce aux nouveaux équipements qui entrent en usage et qui sont prometteurs, comme le modem SATRE et le nouveau système d'étalonnage automatisé en cours de mise au point au TUG. Pour conclure, M. Kirchner dit que la méthode par aller et retour se trouve dans une phase de changement ; il fait remarquer que nous disposons maintenant de deux systèmes de qualité comparable pour effectuer des comparaisons d'horloges, celui des vues simultanées du GPS et celui des comparaisons par aller et retour sur satellite. Il faut conserver et continuer de perfectionner ces deux systèmes.

Il s'ensuit une discussion, dont le ton général est favorable à la poursuite des travaux sur la technique de comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite. Le président clôt la discussion et demande à M. Guinot, président du Groupe de travail du CCDS sur l'application de la relativité générale à la métrologie, de présenter son rapport.

9. Rapport du Groupe de travail du CCDS sur l'application de la relativité générale à la métrologie

M. Guinot commence par dire que les objectifs du Groupe de travail du CCDS sur l'application de la relativité générale à la métrologie étaient de préparer un rapport sur l'interprétation et l'utilisation des unités du SI dans le cadre de la relativité générale et d'étudier les conséquences qu'entraîne l'accroissement d'exactitude des réalisations des unités du SI. Il précise que le rapport préparé par le groupe de travail n'aborde que la première de ces deux questions.

M. Guinot présente un rapport complet et détaillé. Il dit que, selon le principe d'équivalence d'Einstein, les lois de la physique locale gardent leur forme habituelle partout et n'importe quand si les mesures se réfèrent à des étalons locaux. Cela reste vrai même dans le système de référence lié à la surface de la Terre, qui est accéléré et tournant. L'une des conséquences est que l'on doit considérer les constantes de la physique comme des grandeurs locales exprimées en unités issues d'étalons locaux. Puisque toutes les unités de base du SI sont à l'heure actuelle définies à partir d'expériences locales, qui utilisent les constantes de la physique, il n'est pas utile de modifier leur définition pour tenir compte de la relativité générale. Cependant il faut bien comprendre qu'elles sont des unités « propres » du lieu où fonctionnent les étalons qui les réalisent.

La modélisation mathématique des expériences qui ont lieu dans des domaines étendus nécessite l'utilisation d'un système de coordonnées spatio-temporel. Dans le cadre de la relativité générale, il est essentiel de faire la distinction entre coordonnées et grandeurs mesurables localement. Le rapport donne un exemple simple en ce qui concerne les coordonnées spatiales. Le cas des coordonnées temporelles est développé avec plus de détails dans le rapport : les définitions des temps-coordonnée que l'on utilise, en particulier du TAI, sont données, la convention choisie pour la comparaison à distance des grandeurs propres est rappelée et les formules les plus utiles déduites de cette convention sont développées dans le cas des comparaisons de temps et de fréquence.

En conclusion, M. Guinot souligne qu'il est dangereux d'appliquer à des résultats des corrections pour la relativité plutôt que de les analyser en se servant d'un traitement plus global des mesures dans le cadre de la relativité générale. Dans le premier cas, il y a un risque sérieux d'omettre des corrections ou d'appliquer deux fois la même correction.

Le président félicite le groupe de travail pour son rapport, en disant que c'est là une excellente introduction pour des documents plus complexes. Il convient que nous devons modifier notre façon de voir et penser en fonction de la relativité générale, plutôt que d'inclure des corrections séparées pour la relativité. Il demande à M. Brumberg, qui a été spécifiquement invité à assister à la présente session du CCDS pour cette question sur la relativité générale, de faire ses commentaires.

M. Brumberg dit que la théorie de la relativité générale entre dans une nouvelle phase. Précédemment elle intervenait sous forme de petites corrections apportées à la physique newtonienne, mais cela s'est révélé non satisfaisant il y a dix à quinze ans, lorsqu'on est parvenu à des mesures très précises à l'échelle locale et à l'échelle du cosmos.

M. Pâquet demande si les corrections pour la relativité sont appliquées de façon courante aux données reçues par le BIPM. M. Petit répond qu'une correction est appliquée aux données des étalons primaires pour assurer que celles-ci correspondent bien à la seconde du SI sur le géoïde en rotation. M. Wolf ajoute qu'une correction pour l'effet Sagnac est appliquée aux données de comparaisons d'horloges par le GPS.

M. Guinot signale qu'il existe dans l'application des corrections gravitationnelles des problèmes pratiques dus à la difficulté de connaître le potentiel gravitationnel local. M. Petit souligne que la Terre n'est pas suffisamment bien connue pour comparer des étalons de fréquence au niveau de 10^{-18} .

M. De Marchi demande si le fait que le potentiel gravitationnel de la Terre est variable entraîne un problème pour la définition de la seconde du TAI. M. Guinot répond qu'il n'y a pas encore de réponse à cette question, dont il s'attend qu'elle devienne importante au niveau de quelques 10^{-17} : cela constituera à l'avenir une tâche pour le groupe de travail.

M. Quinn présente ses compliments à l'adresse de M. Guinot et recommande à tous ce rapport comme étant une claire expression des principes de base. M. Quinn ajoute que ce rapport sera publié dans *Metrologia*.

Le président remercie alors le président du groupe de travail et clôt la discussion.

10. Groupe de travail du CIPM sur l'équivalence des étalons nationaux

M. Quinn fait quelques commentaires sur les délibérations du Groupe de travail du CIPM sur l'équivalence des étalons nationaux. Il dit qu'il est maintenant demandé aux comités consultatifs d'identifier les comparaisons clés qui permettront d'apporter la preuve de l'équivalence des étalons nationaux de mesure. À son avis il n'y a pas de problème dans le domaine du temps et des fréquences, car les étalons font de façon courante et continue l'objet de comparaisons dont les résultats sont publiés dans *Circular T*. M. Douglas soulève la question de l'équivalence des grandeurs apparentées, par exemple le bruit de phase. M. Quinn estime que cela est de la compétence d'un autre comité consultatif. M. Douglas n'est pas d'accord. M. Quinn répond qu'il n'est pas possible de tout traiter et que le CCDS doit concentrer ses efforts sur les points essentiels.

M. Steele demande ce qu'il en est au niveau international de l'équivalence des mesures de fréquence. M. Quinn répond qu'à son avis *Circular T* fournit les données à partir desquelles l'équivalence entre étalons primaires de fréquence peut être établie.

11. Comptes rendus d'autres réunions

11.1 Union astronomique internationale : 22^e Assemblée générale

M. Winkler ayant dû s'absenter, le président présente le compte rendu de la 22^e Assemblée générale de l'Union astronomique internationale (UAI) qui s'est tenue à La Haye (Pays-Bas) en 1994. Les recommandations faites en 1991 par l'UAI ont été confirmées et la définition du système de référence céleste a été achevée au mois d'octobre 1995, quand les coordonnées d'un certain nombre de quasars et de galaxies ont été adoptées. M. Brumberg ajoute qu'un groupe de travail a été créé pour étudier les constantes astronomiques dans le cadre de la relativité générale.

M. Allan précise qu'il existe deux autres groupes de travail de l'UAI, l'un sur les comparaisons horaires, dont il est le président, et l'autre sur les pulsars-milliseconde, présidé par M. Petit.

M. Dorenwendt demande si l'UAI souhaite abandonner l'emploi des dates du calendrier Julien modifié (MJD). Le président explique que même si l'UAI recommande d'éviter d'utiliser le calendrier Julien modifié au profit du calendrier Julien, pour certaines applications, elle n'en recommandera pas l'abandon total.

11.2 Union géodésique et géophysique internationale : 21^e Assemblée générale

Le président demande à M. Pâquet de rendre compte de la 21^e Assemblée générale de l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI) qui s'est tenue à Boulder (É.-U. d'Amérique) en 1994. M. Pâquet dit qu'il ne s'est pas passé grand'chose en ce qui concerne le temps pendant la réunion à Boulder, essentiellement parce que les mêmes personnes assistent aux réunions de l'UGGI et de l'UAI et que les questions relatives au temps sont davantage discutées au sein de l'UAI. Il rappelle que les géophysiciens et les géodésistes connaissent beaucoup de choses sur certaines des préoccupations des milieux concernés par le temps, comme par exemple le comportement de l'ionosphère. Il serait donc du plus grand intérêt d'avoir des relations étroites avec eux.

11.3 Union radio-scientifique internationale : 24^e Assemblée générale

M. Steele rend compte des activités de la Commission A (Métrologie) de l'Union radio-scientifique internationale (URSI) au cours de sa 24^e Assemblée générale qui s'est tenue à Kyoto (Japon) en 1993. La principale résolution concerne la définition du kilogramme et recommande qu'elle soit remplacée par un rapport de constantes fondamentales. M. Steele indique également que la 25^e Assemblée générale se tiendra à Lille (France) du 28 août au 5 septembre 1996.

11.4 Groupe d'étude n° 7 du Bureau des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications

M. de Jong rend compte des activités du Groupe d'étude n° 7 du Bureau des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (UIT-R). Il dit que ce groupe d'étude n'est plus seulement concerné par le temps et les fréquences; il s'appelle maintenant « services scientifiques ». Lors de sa plus récente réunion ce groupe d'étude a modifié la recommandation concernant les signaux et les codes horaires. Ce groupe d'étude émet aussi des recommandations concernant l'utilisation

opérationnelle de la méthode de comparaison d'horloges par aller et retour sur satellite ; il définit en particulier le format des données pour les mesures par aller et retour. Un projet de recommandation sur l'utilisation de la technique de comparaison d'horloges par aller et retour sur le Synchronous Optical Network (SONET) a été présenté ; M. Hanson du NIST a été nommé rapporteur devant la Section des télécommunications de l'UIT, afin d'assurer la liaison avec le Bureau des radiocommunications.

M. Steele indique qu'un manuel de l'UIT sur la dissémination du temps par satellite est en cours de préparation et sera achevé au mois d'octobre 1996. M. Allan mentionne qu'un manuel du même genre sur la sélection et l'utilisation des systèmes de temps et de fréquence est soumis au secrétariat de l'UIT-R pour traduction et diffusion.

12. Questions diverses

Comme sujet complémentaire de discussion, M. Lepek évoque les comparaisons de temps et de fréquence par aller et retour au moyen de fibres optiques. Il propose de créer un groupe de travail pour étudier ce sujet. M. Quinn répond que les questions qui se posent ne sont pas encore claires et il suggère que les laboratoires prennent contact avec les sociétés de télécommunications dans leur pays respectif pour évaluer la nécessité qu'il y a pour le CCDS de s'intéresser à cette technique. M. Sullivan signale que l'UIT travaille déjà sur la question.

13. Recommandations

Le président passe ensuite à la discussion des recommandations que le CCDS veut soumettre au CIPM. Les quatre recommandations intitulées « Étalons primaires de fréquence », « Déplacement de fréquence dû au rayonnement du corps noir », « Corrélations entre horloges qui contribuent au TAI » et « Coordination des systèmes satellitaires qui diffusent le temps » sont adoptées.

Un projet de recommandation sur un nouvel UTC en temps réel (CCDS/96-23) a été préparé par M. Allan, et le président lui demande de le présenter au comité. M. Allan dit que ce projet de recommandation est le résultat d'un travail de collaboration entre lui-même, MM. Lepek, Cutler et Giffard, ces deux dernières personnes étant des employés de la société Hewlett Packard. M. Allan dit que l'utilité de l'UTC est très amoindrie du fait que cette échelle n'est pas disponible en temps réel. Toutefois sa stabilité est telle que l'on peut la prévoir à ± 3 ns près avec un mois d'avance si les horloges sont utilisées d'une manière optimale. Il suggère par conséquent que le CCDS recommande à chaque laboratoire

qui contribue à l'élaboration du TAI de maintenir sa propre prédiction de l'UTC par rapport à une référence commune, par exemple le temps du GPS, et de communiquer les résultats au BIPM. Le BIPM pourrait alors produire une moyenne pondérée de ces prédictions et en publier le résultat sur Internet en temps quasi réel.

M. Guinot fait remarquer que cela reviendrait à rompre le lien solide entre le TAI et l'UTC, lien qui fut recommandé par le Bureau international de l'heure (BIH) en 1965 ; il ne voit aucune raison pour le faire. M. Lepek dit que la corrélation entre l'UTC et le TAI n'est pas le point essentiel, et que l'UTC pourrait être conservé sous sa forme originale, parallèlement à une nouvelle échelle, disponible en temps quasi réel.

M. Allan insiste pour dire qu'il ne proposera pas d'abandonner l'UTC avant d'être sûr de disposer de quelque chose de meilleur : il propose simplement que l'on étudie à fond les possibilités et le fonctionnement de cet UTC en temps quasi réel.

M. de Jong craint que si ce nouvel UTC est disponible cela ne court-circuite les laboratoires nationaux. M. Sullivan estime qu'une telle échelle serait plus vulnérable et il voudrait avoir davantage de temps pour examiner cette proposition.

Le président est du même avis ; il suggère que cette proposition soit étudiée par le Groupe de travail du CCDS sur le TAI et qu'elle ne fasse pas déjà l'objet d'une recommandation du CCDS.

M. Douglas demande à Mme Thomas de parler de ce qui est fait au BIPM sur l'UTCp, une échelle de temps provisoire similaire. Mme Thomas répond que celle-ci a été complètement abandonnée et M. Quinn ajoute que cela s'est fait par manque de consensus à l'époque au sein du CCDS et du Groupe de travail sur le TAI.

Le président clôt la discussion sur les recommandations et il remercie M. Winkler qui a dirigé le Groupe de travail du CCDS sur le TAI pendant les dix dernières années.

14. Clôture de la session

Avant de clore la session et de remercier les participants, le président fait remarquer que de nombreuses améliorations sont intervenues dans le domaine du temps et des fréquences depuis la précédente session, il y a trois ans, et qu'il y a tout lieu de penser que cette tendance va se poursuivre.

Mars 1996

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

Étalons primaires de fréquence

RECOMMANDATION S 1 (1996)

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde,

considérant

— qu'il est important d'entretenir un nombre convenable d'étalons primaires de fréquence pour assurer l'exactitude et la stabilité à long terme du TAI,

— que de nouveaux étalons primaires sont mis au point en faisant appel à des techniques nouvelles,

— que ces nouveaux étalons s'avèrent de façon significative plus exacts que les étalons primaires traditionnels sur lesquels se sont fondés le TAI et l'UTC dans le passé,

— que par conséquent, l'exactitude du TAI et de l'UTC dépendra rapidement de ces nouveaux étalons,

— que d'importantes ressources sont nécessaires pour conserver en état de marche ces étalons de fréquence afin d'assurer l'exactitude du TAI,

rappelant sa Recommandation S 1 (1993) sur l'exactitude des étalons primaires de fréquence,

demande aux laboratoires, nationaux ou non, qui travaillent sur de nouveaux étalons primaires, d'assurer les ressources en personnel et en fonctionnement nécessaires pour conserver en état de marche ces nouveaux étalons sur lesquels est fondée l'exactitude du TAI et de l'UTC.

Déplacement de fréquence dû au rayonnement du corps noir

RECOMMANDATION S 2 (1996)

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde,

considérant

— que l'incertitude relative de certains étalons primaires de fréquence est inférieure à 5×10^{-15} et que des incertitudes encore plus faibles sont attendues dans un proche avenir,

— que le déplacement relatif de fréquence dû au rayonnement du corps noir peut atteindre $-1,7 \times 10^{-14}$ à la température de 300 K,

— qu'il y a un besoin croissant de comparaisons plus exactes des fréquences des étalons primaires,

— que, même en l'absence actuelle de mesure du décalage de la fréquence du césium dû au rayonnement du corps noir, l'interprétation théorique et les vérifications expérimentales du décalage dû à l'effet Stark alternatif ont donné des résultats concordants dans d'autres systèmes,

— que l'on a besoin d'uniformité dans la manière de présenter la fréquence et l'incertitude correspondante des étalons primaires et

— que l'on a besoin d'améliorer l'exactitude du TAI,

recommande qu'une correction pour tenir compte du décalage de fréquence dû au rayonnement du corps noir soit appliquée à tous les étalons primaires de fréquence.

Corrélations entre les horloges qui contribuent au TAI

RECOMMANDATION S 3 (1996)

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde,

considérant

— que l'on a signalé l'existence de corrélations entre des horloges fonctionnant dans un même endroit,

— que les bases de calcul du TAI supposent que de telles corrélations n'existent pas,

— qu'un comportement corrélé entre horloges contribuant au TAI risque d'entraîner une dégradation du TAI,

— qu'il n'existe pas de preuves suffisantes qui permettent pour le moment de prendre des mesures spécifiques,

demande

— que les laboratoires qui contribuent au TAI entreprennent des études de leurs lectures d'horloges ainsi que des expériences destinées à mieux comprendre les corrélations entre horloges, à apprécier l'importance de ces effets, et

— que les résultats de ces recherches soient échangés entre tous les laboratoires qui contribuent au TAI et communiqués au Bureau international des poids et mesures.

Coordination des systèmes satellitaires qui diffusent le temps

RECOMMANDATION S 4 (1996)*

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde,

considérant

— l'intérêt sur le plan international du fonctionnement simultané du Global Positioning System (GPS) et du Global Navigation Satellite System (GLONASS) avec une configuration complexe de 48 satellites,

— la possibilité d'utiliser l'un ou l'autre ou les deux systèmes à discrétion,

— les différences actuellement significatives qui existent entre les deux systèmes,

— les différences significatives dans les systèmes de coordonnées de référence utilisés pour l'un et l'autre,

— les autres systèmes satellitaires destinés à diffuser le temps actuellement en cours de mise au point,

recommande

— que les temps de référence (modulo 1 seconde) des systèmes satellitaires de navigation à couverture globale** soient synchronisés aussi étroitement que possible avec l'UTC,

— que leur système de référence soit conforme au système de référence terrestre déterminé par le Service international de la rotation terrestre (ITRF),

— que l'on utilise indifféremment les récepteurs du GPS et du GLONASS dans les laboratoires du temps.

* Le CIPM a adopté cette recommandation comme Recommandation 1 (CI-1996) lors de sa 85^e session en septembre 1996.

** Tels que Global Positioning System (GPS), Global Navigation Satellite System (GLONASS), International Maritime Satellite Organization (INMARSAT), Global Navigation Satellite System 1 (GNSS1), Global Navigation Satellite System 2 (GNSS2).

ANNEXE S 1

Documents de travail présentés à la 13^e session du CCDS

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

Document
CCDS/

- 96-1 BIPM. — Report on the discussions and decisions of the meeting of the CCDS Working Group on TAI (13 and 14 March 1995), by G. Petit, 10 p.
- 96-2 PTB (Allemagne). — Report on Activities to the 13th session of the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde, 4 p.
- 96-3 B. Guinot. — Report of the Working Group on the Application of General Relativity to Metrology to the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde, 58 p.
- 96-4 KRISS (Rép. de Corée). — Report to the 13th Session of CCDS, 9 p.
- 96-5 Report of the CCDS Group on GPS Time Transfer Standards (CGGTTS), by D.W. Allan and C. Thomas, 4 p.
- 96-6 Report of the CCDS Working Group on Two Way Satellite Time Transfer, by W.J. Klepczynski, 2 p.
- 96-7 OFMET (Suisse), Observatoire de Neuchâtel (Suisse). — Report to the 13th session of the Comité consultatif pour la définition de la seconde, by L. Prost and P. Thomann, 6 p.
- 96-8 BIPM. — Timing of millisecond pulsars, by G. Petit, 2 p.
- 96-9 BIPM. — Realization of Terrestrial Time and definition of TAI, by G. Petit and P. Wolf, 1 p.
- 96-10 NMi-VSL (Pays-Bas). — Contribution of the NMi Van Swinden Laboratorium 1993-1996, by G. de Jong, 2 p.
- 96-11 BIPM. — Report of the BIPM Time Section 1993-1995, by C. Thomas, 14 p.

Document
CCDS/

- 96-12 IEN (Italie). — Report to the 13th Session of CCDS, 7 p.
- 96-13 TUG (Autriche). — Report to the 13th Meeting of the CCDS, by D. Kirchner, 6 p.
- 96-14 NPL (Royaume-Uni) . — Report of Activities to the 13th Session of the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde, 8 p.
- 96-15 NIST (É.-U. d'Amérique). — Report on Activities of the National Institute of Standards and Technology, 6 p.
- 96-16 BNM-LPTF (France), LHA (France). — Contribution to the 13th CCDS, by M. Granveaud and C. Audoin, 19 p.
- 96-17 ORB (Belgique). — Generation of the reference time scale UTC(ORB), by F. Collin and P. Defraigne, 3 p.
- 96-18 CSIRO-NML (Australie). — Report to the 13th session of CCDS, by P. Fisk, 5 p.
- 96-19 PTB (Allemagne). — The PTB primary clock CS3 : type B evaluation of its standard uncertainty, by A. Bauch, T. Heindorff, R. Schröder and B. Fischer, *Metrologia*, 1996, **33**, 249-259.
- 96-20 CRL (Japon). — Research Activities on Time and Frequency at Communications Research Laboratory, 3 p.
- 96-21 NRC (Canada). — Report from the National Research Council of Canada to the 13th Session of the CCDS, 6 p.
- 96-22 A. De Marchi. — Contribution to the 13th CCDS, 3 p.
- 96-23 D. W. Allan. — Proposal for a recommendation on new real-time UTC, 11 p.
- 96-24 NRLM (Japon). — Report to the 13th Session of CCDS, 2 p.
- 96-25 LHA (France). — About the blackbody radiation frequency shifts, by C. Audoin, 7 p.

TABLE DES MATIÈRES
TABLE OF CONTENTS

COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

13^e session (1996)
13th Meeting (1996)

	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 du Comité consultatif pour la définition de la seconde	XI
Ordre du jour	XIV
Rapport au Comité international des poids et mesures, par P. Fisk	S 1
1. Ouverture de la session ; nomination d'un rapporteur.....	S 2
2. Progrès faits sur les étalons de fréquence et les horloges atomiques	S 3
2.1 Rapports des laboratoires	S 3
2.2 Incertitudes des étalons primaires de fréquence	S 11
2.3 Déplacement dû au rayonnement du corps noir dans les étalons primaires de fréquence.....	S 12
3. Rapport du Groupe de travail du CCDS sur le TAI	S 13
4. Rapport de la Section du temps du BIPM	S 16
5. Synchronisation des horloges au moyen de satellites	S 19
6. Étude des pulsars-milliseconde.....	S 20
7. Rapport du Sous-groupe de travail du CCDS sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS	S 21

8. Rapport du Groupe de travail du CCDS sur les comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite	S 23
9. Rapport du Groupe de travail du CCDS sur l'application de la relativité générale à la métrologie	S 25
10. Groupe de travail du CIPM sur l'équivalence des étalons nationaux	S 27
11. Comptes rendus d'autres réunions	S 27
11.1 Union astronomique internationale : 22 ^e Assemblée générale	S 27
11.2 Union géodésique et géophysique internationale : 21 ^e Assemblée générale ...	S 28
11.3 Union radio-scientifique internationale : 24 ^e Assemblée générale	S 28
11.4 Groupe d'étude n° 7 du Bureau des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications.....	S 28
12. Questions diverses	S 29
13. Recommandations	S 29
14. Clôture de la session	S 30
 Recommandations présentées au Comité international des poids et mesures	
S 1 (1996) : Étalons primaires de fréquence	S 31
S 2 (1996) : Déplacement de fréquence dû au rayonnement du corps noir	S 32
S 3 (1996) : Corrélations entre les horloges qui contribuent au TAI	S 33
S 4 (1996) : Coordination des systèmes satellitaires qui diffusent le temps	S 34
 Annexe	
S 1. Documents de travail présentés à la 13 ^e session du CCDS	S 35
 English text of the report	
Note on the use of the English text. Note sur l'utilisation du texte anglais	S 39
The BIPM and the Convention du Mètre	S 41
Members of the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde	S 43
Agenda	S 46
 Report to the Comité International des Poids et Mesures, by P. Fisk	 S 47
1. Opening of the meeting; appointment of a rapporteur	S 48
2. Progress in atomic frequency standards and clocks	S 49
2.1 Reports from laboratories	S 49
2.2 Uncertainties in primary frequency standards	S 56
2.3 Black-body radiation shift in primary frequency standards	S 57
3. Report of the CCDS working group on TAI	S 58
4. Report of the BIPM Time section	S 61

5. Synchronization of clocks using satellites	S 63
6. Timing of millisecond pulsars	S 65
7. Report of the Sub-group of the CCDS working group on TAI on GPS time transfer standards	S 65
8. Report of the CCDS working group on two-way satellite time transfer	S 67
9. Report of the CCDS working group on the application of general relativity to metrology	S 68
10. CIPM working group on the equivalence of national standards	S 70
11. Reports on other meetings	S 70
11.1 International Astronomical Union: 22nd General Assembly	S 70
11.2 International Union of Geodesy and Geophysics: 21st General Assembly	S 71
11.3 International Union of Radio Science: 24th General Assembly	S 71
11.4 Study Group 7 of the Radiocommunication Bureau of the International Telecommunication Union	S 71
12. Other business	S 72
13. Recommendations	S 72
14. Closure of the meeting	S 73

Recommendations submitted to the Comité International des Poids et Mesures

S 1 (1996): Primary frequency standards	S 74
S 2 (1996): Black-body frequency shift	S 75
S 3 (1996): Correlations among clocks contributing to TAI	S 76
S 4 (1996): Coordination of satellite systems providing timing	S 77

Appendix

S 1. Working documents submitted to the CCDS at its 13th meeting (<i>see</i> page S 35)	S 78
---	------

IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS

PARIS 18^e

Dépôt légal : Imprimeur, 1996, n° 4475

ISBN 92-822-2146-6

ISSN 0588-6228

ACHEVÉ D'IMPRIMER : DÉCEMBRE 1996

Imprimé en France