

**Comité consultatif  
du temps et des fréquences**  
14<sup>e</sup> session (avril 1999)

**Consultative Committee  
for Time and Frequency**  
14th Meeting (April 1999)

**Bureau international des poids et mesures**

# **Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF)**

14<sup>e</sup> session (avril 1999)

Note sur l'utilisation du texte anglais (*voir page 75*)

Afin de mieux faire connaître ses travaux,  
le Comité international des poids et mesures  
publie une version en anglais de ses rapports.  
Le lecteur doit cependant noter que le rapport officiel  
est toujours celui qui est rédigé en français.  
C'est le texte français qui fait autorité si une référence  
est nécessaire ou s'il y a doute sur l'interprétation.

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

Conception graphique :  
Monika Jost

Imprimé par : Stedi, Paris

ISSN 0588-6228  
ISBN 92-822-2170-9

## TABLE DES MATIÈRES

Photographie des participants à la 14<sup>e</sup> session du Comité consultatif du temps et des fréquences **2**

États membres de la Convention du Mètre **7**

Le BIPM et la Convention du Mètre **9**

Liste des membres du Comité consultatif du temps et des fréquences **13**

### **Rapport au Comité international des poids et mesures, par P. Fisk 15**

Ordre du jour **16**

1 Ouverture de la session ; nomination d'un rapporteur **17**

2 Progrès des étalons primaires de fréquence **18**

2.1 Étalons primaires de fréquence opérationnels et nouveaux étalons primaires en préparation **18**

2.2 Rapport du Groupe de travail du CCTF sur l'expression des incertitudes des étalons primaires de fréquence **23**

3 Le Temps atomique international **26**

3.1 Rapport de la section du temps du BIPM sur le TAI **26**

3.2 Rapport du Groupe de travail du CCTF sur le TAI **28**

4 L'avenir des secondes intercalaires **31**

5 Comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour : rapport du Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite **32**

6 Comparaisons de temps et de fréquences au moyen de satellites de navigation **38**

6.1 Mesures de la phase des signaux du GPS : rapport sur le projet pilote IGS/ BIPM **38**

6.2 Normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS : rapport du sous-groupe de travail sur le GPS et le GLONASS **40**

7 Relativité générale et références spatio-temporelles **43**

7.1 Rapport du Comité mixte BIPM/UAI sur les systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale **43**

7.2 Système de référence terrestre conventionnel **44**

- 8 Chronométrage des pulsars-milliseconde **46**
- 9 Horloges dans l'espace : problèmes et potentialités **46**
- 10 Comparaisons clés et l'arrangement de reconnaissance mutuelle dans le domaine du temps et des fréquences **48**
- 11 Mise en pratique de la seconde du SI **51**
- 12 Programme de travail du BIPM **51**
- 13 Recommandations **53**
- 14 Questions diverses **53**
- 15 Clôture de la session **54**

**Recommandations présentées au Comité international des poids et mesures**

- S 1 (1999) : Mise en pratique de la définition de la seconde **56**
- S 2 (1999) : Sur l'expression de l'incertitude dans les comparaisons mettant en jeu des étalons primaires de fréquence **57**
- S 3 (1999) : Comparaisons d'étalons primaires de fréquence **58**
- S 4 (1999) : Sur l'utilisation des récepteurs du temps du GPS et du GLONASS multicanaux et multicodes **60**
- S 5 (1999) : Comparaisons de temps et de fréquences utilisant des mesures de phase et de code des signaux du GPS **61**
- S 6 (1999) : Futurs systèmes satellitaires de navigation à couverture globale **62**
- S 7 (1999) : Sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite **63**

**Annexe 1. Documents de travail présentés à la 14<sup>e</sup> session du CCTF **65****

**Liste des sigles utilisés dans le présent volume **69****

**ÉTATS MEMBRES  
DE LA CONVENTION DU MÈTRE**

Afrique du Sud	Iran (Rép. islamique d')
Allemagne	Irlande
Argentine	Israël
Australie	Italie
Autriche	Japon
Belgique	Mexique
Brésil	Norvège
Bulgarie	Nouvelle-Zélande
Cameroun	Pakistan
Canada	Pays-Bas
Chili	Pologne
Chine	Portugal
Corée (Rép. de)	Roumanie
Corée (Rép. pop. dém. de)	Royaume-Uni
Danemark	Russie (Féd. de)
Dominicaine (Rép.)	Singapour
Égypte	Slovaquie
Espagne	Suède
États-Unis	Suisse
Finlande	Tchèque (Rép.)
France	Thaïlande
Hongrie	Turquie
Inde	Uruguay
Indonésie	Venezuela



## **LE BIPM ET LA CONVENTION DU MÈTRE**

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

Le Bureau international a son siège près de Paris, dans le domaine (43 520 m<sup>2</sup>) du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français ; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre.

Le Bureau international a pour mission d'assurer l'unification mondiale des mesures physiques ; il est donc 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) à laquelle il présente son rapport sur les travaux accomplis par le Bureau international.

La Conférence générale rassemble des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit actuellement tous les quatre ans dans le but :

- 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 toutes les décisions importantes concernant la dotation, l'organisation et le développement du Bureau international.



Le Comité international comprend 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 Comité international 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 et radiométriques (1937), des rayonnements ionisants (1960) et aux échelles de temps (1988). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 ; de nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la section des rayonnements ionisants, en 1984 pour le travail sur les lasers et en 1988 a été inauguré un bâtiment pour la bibliothèque et des bureaux.

Environ quarante-cinq physiciens et 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 Comité international 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 par le Comité international, qui envoient des délégués de leur choix. Ils comprennent aussi

des membres nominativement désignés par le Comité international, et un représentant du Bureau international (Critères pour être membre des Comités consultatifs, *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1996, **64**, 6). Ces Comités sont actuellement au nombre de dix :

1. Le Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM), nouveau nom donné en 1997 au 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 CCE s'est occupé des questions de photométrie) ;
3. Le Comité consultatif de thermométrie (CCT), créé en 1937 ;
4. Le Comité consultatif des longueurs (CCL), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM) créé en 1952 ;
5. Le Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) créé en 1956 ;
6. Le Comité consultatif des rayonnements ionisants (CCRI), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (CCEMRI) créé en 1958 (en 1969, ce Comité consultatif a institué quatre sections : Section I (Rayons x et  $\gamma$ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie  $\alpha$ ) ; cette dernière section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II) ;
7. Le Comité consultatif des unités (CCU), créé en 1964 (ce Comité consultatif a remplacé la « Commission du système d'unités » instituée par le Comité international 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 ;
10. Le Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations (CCAUV), créé en 1999.

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* ;
- *Rapports des 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).

Les travaux du Bureau international font l'objet de publications dans des journaux scientifiques ; une liste en est donnée chaque année dans les *Procès-verbaux des séances du Comité international*.

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.

## **LISTE DES MEMBRES DU COMITÉ CONSULTATIF DU TEMPS ET DES FRÉQUENCES**

au 20 avril 1999

### **Président**

S. Leschiutta, membre du Comité international des poids et mesures, Istituto Elettrotecnico Galileo Ferraris, Turin.

### **Secrétaire exécutif**

G. Petit, Bureau international des poids et mesures [BIPM], Sèvres.

### **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 physico-techniques et radiotechniques [VNIIFTRI], Moscou.

Institut national de métrologie [NIM], Beijing.

Istituto Elettrotecnico Galileo Ferraris [IEN], Turin.

Korea Research Institute of Standards and Science [KRISS], Taejeon.

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 [ON], Neuchâtel.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig.

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

Technical University [TUG], Graz.

U.S. Naval Observatory [USNO], Washington DC.

Union astronomique internationale [UAI].

Union géodésique et géophysique internationale [UGGI].

Union Internationale des Télécommunications [UIT], Bureau des  
radiocommunications.

Union radio-scientifique internationale [URSI].

B. Guinot.

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

**Comité consultatif  
du temps et des fréquences**

**Rapport de la 14<sup>e</sup> session**

(20-22 avril 1999)

**au Comité international des poids et mesures**

## Ordre du jour

- 1 Ouverture de la session ; nomination d'un rapporteur.
- 2 Progrès des étalons primaires de fréquence :
  - 2.1 Étalons primaires de fréquence opérationnels et nouveaux étalons primaires en préparation ;
  - 2.2 Rapport du Groupe de travail du CCTF sur l'expression des incertitudes des étalons primaires de fréquence.
- 3 Le Temps atomique international :
  - 3.1 Rapport de la section du temps du BIPM sur le TAI ;
  - 3.2 Rapport du Groupe de travail du CCTF sur le TAI.
- 4 L'avenir des secondes intercalaires.
- 5 Comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour : rapport du Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite.
- 6 Comparaisons de temps et de fréquences au moyen de satellites de navigation :
  - 6.1 Mesures de la phase des signaux du GPS : rapport sur le projet pilote IGS/BIPM ;
  - 6.2 Normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS : rapport du sous-groupe de travail sur le GPS et le GLONASS.
- 7 Relativité générale et références spatio-temporelles :
  - 7.1 Rapport du Comité mixte BIPM/UAI sur les systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale ;
  - 7.2 Système de référence terrestre conventionnel.
- 8 Chronométrage des pulsars-milliseconde.
- 9 Horloges dans l'espace : problèmes et potentialités.
- 10 Comparaisons clés et l'arrangement de reconnaissance mutuelle dans le domaine du temps et des fréquences.
- 11 Mise en pratique de la seconde du SI.
- 12 Programme de travail du BIPM.
- 13 Recommandations.
- 14 Questions diverses.
- 15 Clôture de la session.

## **1 OUVERTURE DE LA SESSION ; NOMINATION D'UN RAPPORTEUR**

Le Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF) a tenu sa 14<sup>e</sup> session au Bureau international des poids et mesures (BIPM), à Sèvres. Six séances ont eu lieu du 20 au 22 avril 1999.

Étaient présents : A. Bauch (PTB), C. Boucher (UGGI), J.-S. Boulanger (NRC), G. de Jong (NMI-VSL), N. Dimarcq (LHA), K. Dorenwendt (PTB), G. Duddle (OFMET), P. Fisk (CSIRO-NML), M. Granveaud (BNM-LPTF), B. Guinot, M. Imae (CRL), D. Kirchner (TUG), J. Kovalevsky (UAI), J. Lavery (NPL), H.S. Lee (KRISS), A. Lepek (INPL), S. Leschiutta (président du CCTF, IEN), F.M. Ma (NIM), J. McA. Steele (URSI), D. McCarthy (USNO), T. Morikawa (CRL), S.I. Ohshima (NRLM), J. Palacio (ROA), P. Pâquet (ORB), L. Prost (OFMET), S.B. Pushkin (VNIIFTRI), T.J. Quinn (directeur du BIPM), A. Sen Gupta (NPLI), D.B. Sullivan (NIST), P. Tavella (IEN).

Observateurs : C. Audoin (LHA), A.B. Demichev, Yu. S. Domnin (VNIIFTRI), R. Douglas (NRC), J. Levine (NIST), D.N. Matsakis (USNO), T.E. Parker (NIST).

Invités : E.F. Arias, H.A. Chua (PSB), W.J. Klepczynski, C.S. Liao (TL), L. Marais (CSIR-NML), J. Ray (USNO).

Assistaient aussi à la session : P. Giacomo (directeur honoraire du BIPM) ; J. Azoubib, Z. Jiang, W. Lewandowski, G. Petit, P. Wolf (BIPM).

Excusés : A. Clairon (BNM-LPTF), K. Johnston (USNO).

Le président ouvre la session et constate que le nombre de participants (quarante-huit) est le plus important jamais observé à une session d'un Comité consultatif ; certaines organisations ont accordé suffisamment d'importance à cette réunion pour y envoyer deux ou trois représentants. Il ajoute que M. Fisk a accepté d'en être le rapporteur.

M. Quinn est invité à faire quelques remarques d'ordre général. Il explique que, depuis la 13<sup>e</sup> session de l'ex-CCDS, Mme Claudine Thomas a quitté ses fonctions de responsable de la section du temps du BIPM pour prendre en charge d'autres activités au BIPM. Il la remercie pour son action à la tête de cette section pendant huit ans, et dit qu'elle est grandement responsable de la situation florissante du TAI. Mme Thomas est maintenant responsable de la base de données sur les comparaisons clés, qui est une composante centrale de l'arrangement de reconnaissance mutuelle.



M. Quinn présente Mme Elisa Felicitas Arias qui a été choisie pour remplacer Mme Thomas comme responsable de la section du temps. Mme Arias est actuellement directeur de l'Observatoire naval de Buenos Aires et professeur d'astronomie à l'université de La Plata (Argentine). Elle prendra son poste en novembre 1999. M. Quinn remercie M. Gérard Petit pour avoir assuré par intérim la responsabilité de la section du temps.

M. Quinn dit qu'une des missions principales du BIPM est la conservation du Temps atomique international (TAI) et il suggère d'ajouter à l'ordre du jour un point relatif au programme de travail de la section du temps du BIPM. Le président accepte sa proposition.

## **2 PROGRÈS DES ÉTALONS PRIMAIRES DE FRÉQUENCE**

Le président constate un intérêt croissant pour les étalons atomiques de fréquence, comme en témoignent les soixante-dix et quelques articles sur ce sujet présentés à la réunion commune de l'European Frequency and Time Forum et de l'IEEE Frequency Control Symposium (EFTF/FCS). Il signale, qu'en 1997, le prix Nobel de physique a été attribué pour des travaux qui ont conduit à améliorer considérablement les étalons primaires de fréquence.

Le président félicite aussi le BNM-LPTF et la PTB pour avoir mené à bien des mesures importantes sur le déplacement de la fréquence du césium dû au rayonnement du corps noir, études effectuées en réponse à la Recommandation S 2 de la 13<sup>e</sup> session du CCDS en 1996.

### **2.1 Étalons primaires de fréquence opérationnels et nouveaux étalons primaires en préparation**

M. Quinn rappelle que les documents de travail du CCTF, y compris les rapports des laboratoires, seront reliés et qu'il pourra y être fait référence, ainsi il suffit, en séance, d'en résumer brièvement les sections appropriées à chaque point de l'ordre du jour.

M. Lee présente le rapport du KRISS (CCTF99-02). Trois nouveaux étalons primaires au césium sont à l'étude :

- 1) un étalon atomique à pompage optique classique : l'étalon est presque terminé et son exactitude est en cours d'évaluation ;
- 2) une fontaine étalon : le refroidissement par laser à 2,2  $\mu\text{K}$  des atomes de césium a été effectué, et l'on travaille au lancement des atomes dans la cavité à hyperfréquence ;
- 3) un étalon à jet atomique lent et continu : un jet d'atomes lents, refroidis par laser, de vitesse moyenne inférieure à 50 m/s a été réalisé.

Mme Tavella présente le rapport de l'IEN (CCTF99-03). Un maser prototype à césium est à l'étude ; sa stabilité à court terme devrait être caractérisée par un écart-type d'Allan  $\sigma_y(\tau)$  de  $1 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ . L'IEN construit aussi une fontaine à césium étalon en collaboration avec le NIST et le Politecnico de Turin, le système optique et les chambres à vide sont prêtes.

M. Bauch présente le rapport de la PTB (CCTF99-04). L'ancien étalon primaire PTB CS1 qui a maintenant trente ans a été remis en état et modernisé en 1995 et 1996 avant d'être remis en service en 1997 ; son incertitude de type B est de  $7 \times 10^{-15}$ . M. Bauch dit aussi que la mesure du décalage relatif de la fréquence de la transition d'horloge à césium, dû au champ électrique du rayonnement du corps noir à 300 K, donne un résultat de  $-17,9 \times 10^{-15}$  avec une incertitude-type de  $1,6 \times 10^{-15}$ , ce qui s'accorde bien avec la prédiction théorique de  $-16,9 \times 10^{-15}$ . La PTB construit aussi une fontaine à césium étalon et vient d'achever une comparaison préliminaire sur une durée de cinq jours avec un maser à hydrogène ; les résultats sont encourageants.

M. Duddle présente le rapport commun à l'Office fédéral de métrologie (OFMET) et à l'Observatoire de Neuchâtel (ON) (CCTF99-05). Une fontaine à césium est en cours de mise au point ; les atomes sont lancés en jet continu ce qui est une nouveauté. On devrait observer les premières franges de Ramsey à la fin de l'année 1999 ou en l'an 2000, et nous ne disposons pas de bilan d'incertitude.

M. Boulanger présente le rapport du NRC (CCTF99-06). La fréquence de la transition à 674 nm d'un ion de  $^{88}\text{Sr}^+$  isolé, piégé et refroidi, a été comparée à celle d'un étalon primaire à césium avec une incertitude de  $5 \times 10^{-13}$ . Le principal facteur qui contribue à l'incertitude provient de la chaîne de mesure de fréquence depuis l'hyperfréquence jusqu'à la fréquence optique. M. Boulanger présente aussi les progrès de la fontaine à césium du NRC, dont on espère observer les franges de Ramsey prochainement.

M. Sullivan présente le rapport du NIST (CCTF99-07). L'étalon NIST-7 est toujours en service et un étalon similaire (CRL-01) a été construit à la

demande du CRL (Japon). L'évaluation préliminaire de l'exactitude de la fontaine à césium du NIST, NIST-F1, effectuée en collaboration avec l'IEN, est terminée ; l'incertitude estimée est de  $3,8 \times 10^{-15}$ . L'exactitude est actuellement limitée par le bruit statistique plutôt que par des effets systématiques.

M. Sullivan dit que l'étalon de fréquence du NIST à ion piégé de  $^{199}\text{Hg}^+$  refroidi par laser à 40,5 GHz a été modifié pour fonctionner en continu en vue de contrôler des échelles de temps. L'incertitude de cet étalon est actuellement de  $3 \times 10^{-15}$  et l'on espère la réduire à  $1 \times 10^{-15}$  après réfection.

La transition dans l'ultraviolet (282 nm) d'ions piégés de  $^{199}\text{Hg}^+$  refroidis par laser a été étudiée par spectroscopie à une largeur de bande inférieure au hertz ; une chaîne de synthèse de fréquence depuis l'hyperfréquence jusqu'à la fréquence optique est en construction pour mesurer la fréquence de cette transition. On devrait obtenir des résultats d'ici deux ans. Une mesure de la fréquence de la transition à 282 nm par rapport à la fréquence de l'étalon au calcium de la PTB devrait avoir lieu en 1999.

M. Sullivan dit que le NIST tient, pour l'avenir proche, à poursuivre des études sur tous les types d'horloges possibles et envisage de se consacrer autant au développement d'étalons de fréquence à ions piégés qu'aux étalons à césium.

M. Granveaud présente le rapport du BNM-LPTF (CCTF99-11). Il dit que le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et le BNM ont décidé de fusionner le LPTF et le LHA en un seul laboratoire au cours de l'année à venir, mais ces laboratoires ont présenté deux rapports séparés à la présente session. Il présente les études suivantes :

- 1) L'étalon à césium classique à pompage optique, LPTF-JPO, a été modifié ; il dispose maintenant d'une nouvelle cavité à hyperfréquence et d'un nouveau dispositif de pompage optique à deux lasers. Son incertitude est actuellement de  $6,3 \times 10^{-15}$ . L'étalon LPTF-JPO fonctionnera en continu dans un proche avenir.
- 2) Des études ont été menées sur la fontaine à césium LPTF-FO1 pour mesurer le déplacement de fréquence dû au rayonnement du corps noir et aux collisions entre les atomes de césium. Le résultat obtenu pour le déplacement de fréquence dû au rayonnement du corps noir s'accorde bien avec celui obtenu par la PTB.
- 3) Une deuxième fontaine étalon, LPTF-FO2, a été construite ; elle peut fonctionner avec des atomes de césium ou de  $^{87}\text{Rb}$ . Elle fonctionne actuellement avec des atomes de rubidium, et la fréquence de la

transition hyperfine de l'état fondamental a été mesurée avec une incertitude de  $2 \times 10^{-15}$ . Il semble possible d'améliorer cette exactitude, en partie parce que le décalage de fréquence dû aux collisions dans le rubidium est bien moindre que dans le césium.

- 4) Des études sur un étalon à césium à faisceau d'atomes lents et refroidis pour des applications dans l'espace (projet PHARAO, en collaboration avec le LHA et le LKB) ont été effectuées en 1997 avec un prototype placé dans un avion en microgravité. Le prototype a été modifié pour fonctionner en mode fontaine et l'on évaluera son exactitude prochainement.
- 5) La fréquence de la radiation R(12) d'un laser à CO<sub>2</sub> a été mesurée avec une incertitude de  $7 \times 10^{-13}$ .
- 6) Des mesures de fréquence absolue de diodes laser accordées sur une transition à deux photons du rubidium ont été effectuées, avec une incertitude de  $5,2 \times 10^{-12}$ . Ces mesures, ainsi que celles du laser à CO<sub>2</sub>, ont été effectuées en collaboration avec l'Institut Lebedev, la PTB et le BIPM, et ces deux fréquences ont été adoptées par le CCDDM (1997) comme valeurs recommandées pour la mise en pratique de la définition du mètre.

M. Dimarcq présente le rapport du LHA (CCTF99-12). Il rapporte la mise au point d'une nouvelle horloge miniature fondée sur un faisceau d'atomes de césium lents, refroidis par laser, à l'intérieur de la cavité à hyperfréquence. Il ajoute que les progrès réalisés dans le cadre du projet PHARAO permettront de construire une fontaine à césium transportable.

M. Morikawa présente le rapport du CRL (CCTF99-15). L'étalon à césium classique à pompage optique CRL-01, une copie de NIST-7, est achevé ; sa différence de fréquence par rapport à NIST-7, mesurée au NIST, est de  $1 \times 10^{-15}$ . L'étalon CRL-01 a été expédié au Japon, où il fait l'objet d'une nouvelle évaluation. La mise au point d'une fontaine à césium se poursuit, les atomes de césium froids ont été lancés à une hauteur de 30 cm.

M. Fisk présente le rapport du CSIRO-NML (CCTF99-16). Les travaux se poursuivent sur la mise au point d'un étalon à ions de  $^{171}\text{Yb}^+$  piégés et refroidis à l'aide d'un gaz tampon, dont la stabilité à court terme  $\sigma_y(\tau)$  est de  $5 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ . L'exactitude s'améliore en refroidissant les ions par laser et des franges de Ramsey ont été obtenues avec des nuages d'ions refroidis par des impulsions laser séparées de 10 s. La température du nuage d'ions reste inférieure à 1 K pendant la période d'interrogation de 10 s.

M. Ohshima présente le rapport du NRLM (CCTF99-23). L'étalon à césium à pompage optique NRLM-4 a été largement modifié, son incertitude totale ayant été réduite à  $3 \times 10^{-14}$ . Les travaux se poursuivent pour réduire cette incertitude à moins de  $1 \times 10^{-14}$ . Les travaux sur la fontaine étalon à césium du NRLM progressent lentement, en raison de problèmes techniques. Les franges de Ramsey observées avec l'ancien dispositif expérimental avaient été présentées en 1996 au CCDS et un nouvel appareil est en construction. Une chaîne de synthèse de fréquence depuis l'hyperfréquence jusqu'à la fréquence optique comprenant des oscillateurs optiques paramétriques est en cours d'étude.

M. Domnin dit que le VNIIFTRI a mis en œuvre un projet de fontaine à césium en 1998 ; le système optique est achevé. Des franges de Ramsey devraient être observées en l'an 2000.

Pour clôturer la discussion sur le point 2.1 de l'ordre du jour, le président commente l'accroissement des activités depuis la session de 1996 du CCDS, en particulier dans le domaine des fontaines. La mise au point de plusieurs dispositifs de types différents est particulièrement intéressante.

Le président dit que M. Quinn souhaite s'adresser au Comité et l'invite à le faire.

M. Quinn explique qu'il a reçu une lettre de M. Douglas, dans laquelle il souligne qu'une note ajoutée à la 7<sup>e</sup> édition de la brochure sur le SI est incorrecte en français et en anglais. L'intention de cette note était de préciser que la définition de la seconde du SI est fondée sur un atome de césium non perturbé par le rayonnement du corps noir, c'est-à-dire placé dans un environnement à la température de 0 K, et que la fréquence des étalons primaires de fréquence doit donc être corrigée pour tenir compte de ce décalage. Cependant, le texte anglais de la note est le suivant « a caesium atom in its ground state at a temperature of 0 K », alors qu'en français il est fait référence à « un atome de césium au repos à une température de 0 K ». Les deux versions ne sont pas cohérentes et ce n'est pas clair.

M. Quinn endosse la responsabilité de cette erreur et dit qu'elle sera corrigée dans la prochaine édition de la brochure sur le SI. Il dit aussi qu'il faudrait réfléchir à la rédaction, et à la nécessité, de cette note. (Cette question sera discutée ultérieurement, au point 3.1 de l'ordre du jour.)

Le président remercie M. Quinn, et le félicite pour son intervention.

## 2.2 Rapport du Groupe de travail du CCTF sur l'expression des incertitudes des étalons primaires de fréquence

Le président invite M. Douglas à présenter son rapport (CCTF99-09).

M. Douglas dit que ce groupe de travail a été formé lors de la session de 1996 du CCDS ; il était chargé de préparer un rapport pour la session de 1999 sur la manière d'exprimer les incertitudes des étalons primaires de fréquence. Il a été créé pour répondre aux questions posées lors de la session de 1996 sur la manière d'appliquer le *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* de l'ISO aux mesures d'étalons de fréquence.

En expliquant son approche du problème, M. Douglas dit que les utilisateurs finaux des incertitudes ont besoin d'informations sur l'exactitude de leurs mesures présentes et à venir, alors qu'une déclaration d'incertitude fait généralement référence à une mesure effectuée dans le passé. Par conséquent, ils ont besoin non seulement d'une méthode cohérente pour calculer et exprimer les incertitudes des étalons primaires de fréquence, mais aussi d'une méthode pour extrapoler ces incertitudes. Toutefois, il a été décidé qu'on ne pouvait pas répondre convenablement à ce dernier point dans un délai aussi court que trois ans. Le groupe de travail s'est donc concentré sur le problème de l'expression des incertitudes des comparaisons d'étalons primaires de fréquence qui présentent le plus haut niveau d'exactitude dans la chaîne de traçabilité des fréquences.

M. Douglas dresse la liste d'un certain nombre de facteurs qui simplifient, ou limitent, la tâche du groupe de travail :

- L'exactitude des étalons primaires de fréquence est largement suffisante pour la plupart des applications.
- Il est rarement nécessaire que l'incertitude relative de l'incertitude soit inférieure à 0,2.
- Le Guide de l'ISO répond aux demandes de nombreux utilisateurs pour les déclarations d'incertitude.
- Les résultats des comparaisons clés du CIPM seront publiés dans *Metrologia*.
- L'exactitude de la plupart des étalons primaires de fréquence est indépendante de la durée de moyenne.
- Les résultats de la majeure partie des expériences utilisant des étalons primaires de fréquence se présentent sous la forme de séries temporelles de comparaisons.

M. Douglas explique que le groupe de travail considère que l'expression de l'incertitude dans un contexte métrologique consiste à délivrer le domaine des valeurs possibles de la grandeur mesurée, tout bien considéré. Pour communiquer de manière efficace une déclaration d'incertitude à un utilisateur final il convient de s'entendre sur les trois points suivants :

- avoir la même compréhension des phénomènes physiques inhérents aux étalons primaires de fréquence ;
- utiliser la même définition de l'unité d'échelle (c'est-à-dire la seconde du SI) pour évaluer les étalons primaires de fréquence ;
- concevoir de la même manière l'expression du domaine des valeurs possibles, c'est-à-dire comment les composantes de l'incertitude totale sont déterminées et combinées.

Sur la base des principes et des contraintes exposés ci-dessus, le groupe de travail a formulé un certain nombre de projets de recommandation (annexes 5 et 6 du rapport du groupe de travail).

Ces recommandations ont pour objet de conseiller de suivre le Guide de l'ISO, lorsqu'il est adapté, et d'expliquer suffisamment en détail comment l'incertitude globale a été calculée lors de la publication des résultats (de préférence dans *Metrologia*), pour que les déclarations d'incertitude soient compréhensibles de tous les utilisateurs, et aussi, si nécessaire, puissent être modifiées a posteriori par l'utilisateur final sur la base de nouvelles informations ou d'une meilleure compréhension.

Le président remercie M. Douglas pour son rapport, et remarque que ces dernières années les métrologistes du temps et des fréquences ont eu le luxe de bénéficier d'une marge importante (de plus de deux ordres de grandeur) entre la demande des utilisateurs finaux et l'exactitude offerte par les étalons primaires de fréquence. La situation n'est plus la même aujourd'hui, certaines applications (par exemple la métrologie des fréquences optiques) demandant une exactitude bien plus grande, et par conséquent il devient de plus en plus important d'exprimer et d'utiliser convenablement les déclarations d'incertitude. De plus, l'établissement de l'arrangement de reconnaissance mutuelle renforce l'importance d'établir et de démontrer, documents à l'appui, l'exactitude des comparaisons effectuées entre les laboratoires.

Le président demande ensuite aux participants s'ils ont des commentaires.

M. Petit dit qu'il a discuté en détail de ces questions avec M. Douglas et avec d'autres membres de la section du temps du BIPM. Il souligne qu'il est important que la première évaluation, ou toute réévaluation majeure, d'un étalon primaire de fréquence fasse l'objet d'un contrôle par des pairs. Il

ajoute que bien que le rapport soit centré sur la publication des résultats des comparaisons bilatérales d'étalons primaires de fréquence, ou d'un étalon primaire de fréquence et du TAI, il serait utile que le BIPM publie en outre une synthèse (éventuellement annuelle) de toutes les comparaisons d'étalons primaires de fréquence et du TAI, pour mémoire.

Le président prend acte de la proposition de recommandation du groupe de travail qui concerne le pilotage du TAI, et pense qu'il appartient au Groupe de travail du CCTF sur le TAI de préparer des directives sur le pilotage du TAI.

Mme Tavella partage avec M. Douglas l'avis que la classification des composantes de l'incertitude en type A et type B est liée à leur méthode d'évaluation : une composante particulière de l'incertitude peut être initialement l'objet d'une estimation de type B puis, lorsqu'on dispose de mesures répétitives, il devient possible d'en obtenir une évaluation de type A (par exemple pour la correction due au rayonnement du corps noir) ou vice-versa. Elle ajoute qu'une annexe sur l'analyse des séries temporelles devrait être ajoutée à la prochaine édition du Guide de l'ISO.

M. Guinot commente qu'il y aurait beaucoup à apprendre d'un traitement global de toutes les comparaisons d'étalons primaires de fréquence, car les différences systématiques entre les étalons seraient plus évidentes, et cela montrerait quels auteurs et organisations ont tendance à sous-estimer leurs incertitudes.

M. Quinn dit que les métrologistes réfléchissent maintenant aux incertitudes d'une manière plus large, et que les auteurs du Guide de l'ISO seraient sans doute d'accord pour constater que ce sujet est en pleine évolution. Il note qu'un groupe de travail s'est réuni pour réviser le Guide de l'ISO, sous la direction de M. Barry Taylor du NIST, et qu'une des tâches importantes de ce groupe sera de clarifier l'analyse des mesures de séries temporelles. M. Quinn attire ensuite l'attention des participants sur un article de M. Witt du BIPM (soumis à *Metrologia*), dans lequel les résultats sont considérés comme étant des séries temporelles et sont traités comme tels ; sa conclusion est qu'il faudrait appliquer les techniques mises au point pour les séries temporelles à tout type de mesure.

À la fin de la discussion, les Recommandations S 2 (1999) et S 3 (1999) sont adoptées.



### 3 LE TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL

#### 3.1 Rapport de la section du temps du BIPM sur le TAI

Le président exprime son approbation à la remarque précédente de M. Quinn (au point 1 de l'ordre du jour) sur l'importance du TAI dans le programme de travail du BIPM et invite M. Petit à présenter son rapport (CCTF99-13).

M. Petit dit tout d'abord que la principale fonction de la section du temps est le calcul du TAI et de l'UTC. Il rappelle que, depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1996, le TAI est diffusé tous les 5 jours au lieu de 10 jours précédemment.

M. Petit note que 75 % des horloges qui contribuent au TAI sont des horloges commerciales au césium du type Hewlett-Packard 5071A ou des masers à hydrogène auto-accordés. La proportion du poids total calculée par l'algorithme ALGOS, utilisé pour générer le TAI, est de 89 % pour l'ensemble de ces horloges. À la fin de 1997, plus de la moitié de ces horloges se voyait attribuer le poids individuel maximal, ce qui rendait difficile la discrimination entre les meilleures d'entre elles.

Pour résoudre en partie ce problème, la méthode de pondération utilisée dans ALGOS a été modifiée le 1<sup>er</sup> janvier 1998 : le poids maximal d'une horloge individuelle est maintenant une valeur relative du poids total des horloges, fixée au départ à 0,7 %. Ce système de pondération relatif a légèrement réduit le nombre d'horloges auquel est attribué le poids maximal et a amélioré la stabilité de la fréquence relative de l'EAL de  $1,4 \times 10^{-15}$  pour une moyenne de 40 jours en 1996-1997 à  $6 \times 10^{-16}$  pour une durée de moyenne de 20 à 40 jours en 1998-1999. La stabilité requise d'une horloge individuelle pour se voir attribuer le poids maximum est maintenant variable ; elle correspond typiquement à une valeur de  $\sigma_y$  de  $1 \times 10^{-14}$  pour une durée de moyenne d'un mois.

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1998 également, le TAI est calculé en traitant en bloc les données collectées sur des durées d'un mois au lieu de deux précédemment.

Le pilotage du TAI se poursuit depuis 1996, et l'écart relatif entre la seconde du SI et l'unité de l'échelle a été réduit de  $2,4 \times 10^{-14}$  avec une incertitude-type de  $0,7 \times 10^{-14}$  en 1996 (suite à la correction recommandée par le CCDS en 1996 et appliquée aux résultats des étalons primaires de fréquence afin de tenir compte du déplacement de fréquence dû au rayonnement du corps noir) à  $-0,4 \times 10^{-14}$  avec une incertitude-type de  $0,4 \times 10^{-14}$  au début de 1999. En mars 1998, on a arrêté d'appliquer les corrections régulières de pilotage,

prises en œuvre dès 1995, pour compenser le décalage dû au rayonnement du corps noir. Neuf étalons primaires de fréquence ont été utilisés pour ces évaluations, certains de façon régulière, d'autres pas.

Le président remercie M. Petit pour la présentation de son rapport et le travail de la section du temps du BIPM et ouvre la discussion.

M. Lepek remarque que l'incertitude sur une comparaison entre le TAI et un étalon primaire de fréquence dépend entre autres choses de la durée de la comparaison, et demande comment cette incertitude est prise en compte dans le pilotage du TAI. M. Petit répond que l'on combine deux composantes de l'incertitude :  $\sigma_B$ , qui est l'incertitude de l'étalon primaire de fréquence provenant des effets systématiques et qui est fournie par le laboratoire qui le conserve, et  $\sigma_A$ , l'incertitude statistique sur la comparaison de fréquence. Celle-ci comprend l'incertitude du transfert au TAI pendant la durée de la comparaison et dépend donc de celle-ci.

M. Matsakis souligne que le pilotage d'une échelle de temps est un processus plus complexe qu'on ne l'imagine, l'algorithme de pilotage optimal dépend fortement des qualités souhaitées pour l'échelle de temps : par exemple, sa stabilité de fréquence, sa stabilité de phase ou son exactitude. Il suggère que ce sujet pourrait être soumis à la considération d'un groupe de travail sur les algorithmes pour les échelles de temps, dont la création doit être discutée au point suivant de l'ordre du jour.

Le président clôt la discussion sur le rapport de la section du temps et retourne à la question, posée à la fin du point 2.1 de l'ordre du jour, sur la rédaction d'une note erronée de la brochure sur le SI.

Une discussion approfondie s'ensuit, et les participants arrivent à la conclusion que, à l'époque où la note avait été insérée, elle était destinée à attirer l'attention sur le fait que la fréquence des étalons primaires devait être corrigée pour tenir compte du déplacement résultant du rayonnement ambiant du corps noir. M. Quinn remarque que lors de la dernière session du CCU il avait été proposé de rédiger à nouveau toutes les définitions des unités de base du SI suivant un même format. Le Comité international a décidé que cela ne pouvait être fait qu'avec l'accord des Comités consultatifs concernés, et a constaté que le CCPR n'était pas d'accord. Le CCL avait suggéré que des directives plus précises sur la mise en pratique des unités seraient utiles et M. Quinn a donc proposé d'inclure un texte sur la mise en pratique de la seconde du SI en annexe à la brochure sur le SI.

M. Kovalevsky approuve cette proposition et suggère que le CCTF prépare un document de ce type pour la prochaine édition de la brochure sur le SI.

Cette conclusion est approuvée sous la forme de la Recommandation S 1 (1999).

### 3.2 Rapport du Groupe de travail du CCTF sur le TAI

Le président invite M. Pâquet à présenter son rapport (CCTF99-28).

M. Pâquet dit que les représentants des laboratoires qui contribuent au TAI se sont réunis le jour précédent cette session du CCTF ; les principaux sujets de discussion ont été les algorithmes pour les échelles de temps, le matériel pour les comparaisons de temps et de fréquences et le projet pilote IGS/BIPM.

#### *1) Algorithmes pour les échelles de temps*

M. Pâquet note que plusieurs laboratoires (dont le BNM-LPTF, le NIST, le NRC, l'USNO, le VNIIFTRI) ont mis au point leurs propres algorithmes pour le calcul d'échelles de temps. Pour bénéficier de leur expérience, le Groupe de travail sur le TAI a décidé de créer un groupe de travail pour étudier, mettre au point et comparer les algorithmes pour les échelles de temps.

#### *2) Équipement pour les comparaisons de temps et de fréquences*

Les progrès des techniques de comparaisons d'horloges permettent d'effectuer des mesures horaires avec une précision courante égale ou meilleure que 0,1 ns, mais certains décalages constants doivent être déterminés par étalonnage. Cependant, même en étalonnant les retards des récepteurs, l'exactitude des comparaisons d'horloges se situe actuellement entre 1 ns et 3 ns et l'exactitude est bien moindre quand ces retards ne sont pas étalonnés. Le BIPM a résolu cette question en faisant circuler des récepteurs étalonnés entre les laboratoires. Les mesures ont montré des modifications inexplicables des retards d'un grand nombre de récepteurs utilisés pour les comparaisons d'horloges. Ceci met en évidence la nécessité d'étalonnages réguliers et d'études approfondies. M. Palacio accepte de coordonner d'autres étalonnages dans le cadre des activités de l'EUROMET.

Il est aussi devenu clair que les retards des récepteurs sont sensibles d'une manière significative aux variations de température, il a donc été décidé de préparer une recommandation sur la thermo-régulation des laboratoires à l'attention du CCTF.

À la fin de la discussion, le comité approuve la déclaration suivante :

Le Comité consultatif du temps et des fréquences

**ayant noté que**

- les expériences effectuées ces dernières années montrent que les comparaisons des horloges sont effectuées avec une précision meilleure qu'une nanoseconde ;
- on a montré qu'un tel niveau de précision ne peut être atteint que si les conditions d'environnement sont aussi stables que possible ;
- les améliorations à venir dans les comparaisons d'horloges nécessitent la réalisation de ces conditions ;

**recommande** de prendre toutes les mesures nécessaires pour réduire autant que faire se peut les effets de l'environnement

- en utilisant des équipements peu sensibles aux effets de l'environnement ;
- en maintenant l'environnement dans des conditions aussi stables que possible.

M. Pâquet dit que les anciens, mais très efficaces, récepteurs pour les comparaisons d'horloges de type NBS sont devenus difficiles à maintenir en état de marche et il propose que le BIPM étudie le moyen d'intégrer les données des récepteurs GPS multi-canaux modernes dans le calcul du TAI. Il note que cela soulève beaucoup de problèmes, tels que les algorithmes, les méthodes mathématiques et les étalonnages, et dit que le BIPM aurait besoin d'aide pour ce travail. Après discussion, le comité approuve la Recommandation S 4 (1999).

*3) Le projet pilote IGS/BIPM*

Ce projet a débuté à la fin de 1997 à l'initiative de l'IGS, pour étudier les comparaisons exactes de temps et de fréquences au moyen de mesures de phase et de code du GPS. Plusieurs intervenants ont présenté des données montrant que des comparaisons d'horloges ont été effectuées avec une précision bien inférieure à 1 ns, mais le manque d'étalonnage du retard des récepteurs et les variations de température dans l'environnement d'un grand nombre de récepteurs en limitent l'exactitude.

Les effets de l'ionosphère ont constitué un autre sujet de discussion connexe. Un des produits de l'IGS est une carte de l'ionosphère mise à jour toutes les deux heures, qui d'après M. Wolf du BIPM pourrait être la meilleure source fournissant les retards ionosphériques pour corriger les mesures de comparaisons de temps par le GPS. Cela pourrait devenir très important puisque l'activité du soleil tend à augmenter.

Le président remercie M. Pâquet pour son rapport et demande s'il y a des commentaires.

M. Kovalevsky demande si la décision de créer un groupe de travail sur les algorithmes pour les échelles de temps a été motivée par des critiques spécifiques de l'algorithme utilisé pour le calcul du TAI. M. Pâquet répond que non. M. Matsakis souligne que les travaux de ce nouveau groupe de travail seront toutefois utiles au BIPM car ils utiliseront des mesures fournies par les nouvelles techniques de comparaisons d'horloges.

M. Quinn dit qu'en raison de l'importance du TAI pour le BIPM, le BIPM souhaite participer à ces activités, et il ne verrait aucune objection à ce que les missions du Groupe de travail sur le TAI soient élargies pour prendre en charge les algorithmes.

Une discussion approfondie s'ensuit sur la nécessité, et les missions, d'un groupe de travail sur les algorithmes. L'avis général est que c'est une priorité, et que cette activité devrait être ajoutée aux missions actuelles du Groupe de travail sur le TAI. Un sous-groupe de travail est créé, dont Mme Tavella est nommée présidente, avec les missions suivantes :

Prenant en compte

- 1) les progrès actuels des algorithmes expérimentés par les laboratoires de temps pour vérifier les performances de leurs horloges et/ou établir des échelles de temps ;
- 2) les étalons de fréquence atomique de conception nouvelle et les nouvelles techniques de comparaison qui rendent nécessaire un traitement adapté des données ;
- 3) les besoins émergeants de caractériser les performances des horloges et des échelles de temps de manière fiable, en particulier pour de nouvelles applications (télécommunications, systèmes de navigation par satellite...) ;

le Groupe de travail sur le TAI est invité à créer un groupe chargé

- 1) de présenter une liste d'algorithmes qui puissent être utilisés pour les comparaisons d'horloges et l'établissement d'échelles de temps locales ;
- 2) d'estimer les performances de ces algorithmes ;
- 3) d'étudier les nouvelles approches possibles pour ce faire ;
- 4) d'encourager les publications sur les nouvelles méthodes et expériences.

M. Lepek est préoccupé du fait que certaines personnes ou organisations effectuant des recherches sur les échelles de temps ne sont pas membres du Groupe de travail sur le TAI, ce qui nuit à son efficacité. Le président répond

que la participation à ce groupe n'est pas fixée une fois pour toutes, et que d'autres peuvent s'y joindre.

## 4 L'AVENIR DES SECONDES INTERCALAIRES

Le président invite M. McCarthy à présenter son rapport (CCTF99-18).

M. McCarthy commence par retracer l'histoire de la seconde du SI, notant que sa durée a été définie à l'origine à partir de la seconde des éphémérides, fondée sur des observations astronomiques du 19<sup>e</sup> siècle. Le ralentissement de la rotation de la Terre depuis lors a eu pour conséquence l'introduction d'une seconde intercalaire à l'UTC tous les un an et demi à deux ans.

Cette convention occasionne plusieurs sources de préoccupation :

- l'éventualité d'augmenter la fréquence des secondes intercalaires à l'avenir ;
- des problèmes de communication ;
- un désagrément pour les personnes chargées de la dissémination du temps et la prolifération consécutive d'échelles de temps indépendantes, sans secondes intercalaires, pour des besoins spécifiques (par exemple le temps du GPS).

M. McCarthy présente une liste de moyens éventuels pour répondre à ces questions :

- maintenir le statu quo ;
- arrêter d'introduire des secondes intercalaires dans l'UTC :  
Pour : aurait la faveur des responsables de la dissémination du temps ;  
Contre : augmentation sans limite de la différence [ $UTC - UT1$ ].
- redéfinir la seconde :  
Pour : serait une solution radicale ;  
Contre : impliquerait la redéfinition d'autres grandeurs physiques ; cette solution ne serait que temporaire et son efficacité n'est pas garantie.
- augmenter la tolérance pour la différence [ $UTC - UT1$ ] :  
Pour : serait aisé à mettre en œuvre ;

Contre : la date de l'ajustement n'est pas prévisible, il serait difficile d'établir quelle est la limite acceptable.

- ajuster périodiquement l'UTC à des intervalles plus espacés :

Pour : la date de l'ajustement serait prévisible ;

Contre : le nombre de secondes intercalaires serait imprévisible, et les discontinuités plus grandes.

Aucune de ces options n'étant satisfaisante pour la majorité des utilisateurs de l'UTC, M. McCarthy suggère de créer un groupe de travail sur ce sujet, dans lequel l'IERS, l'UAI, l'UIT-R et d'autres organismes de navigation seraient représentés.

Le président remercie M. McCarthy pour son rapport et ouvre la discussion, que l'on peut résumer de la manière suivante :

- Le CCTF, et à plus forte raison l'un de ses groupes de travail, n'a probablement pas autorité pour recommander la suppression des secondes intercalaires (question soulevée par M. Guinot). Cependant, tous les participants sont d'avis qu'il faudrait arrêter d'introduire des secondes intercalaires et que le CCTF devrait attirer l'attention de l'UAI, de l'UIT, de l'URSI et d'autres organismes sur cette question au moyen d'une lettre rédigée par M. Quinn (question soulevée par le président).
- L'utilisation du TAI doit être encouragée pour les applications dans lesquelles les secondes intercalaires posent problème (question soulevée par M. Bauch), comme le Global Navigation Satellite System (GNSS), mais il est nécessaire de faciliter l'accès au TAI pour généraliser cette solution (question soulevée par M. McCarthy). La lettre mentionnée au point précédent doit recommander l'usage du TAI quand on a besoin d'une échelle de temps continue.

M. Quinn accepte de rédiger la lettre mentionnée ci-dessus, en collaboration avec M. McCarthy.

## **5 COMPARAISONS DE TEMPS ET DE FRÉQUENCES PAR ALLER ET RETOUR : RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL DU CCTF SUR LES COMPARAISONS D'HORLOGES PAR ALLER ET RETOUR SUR SATELLITE**

Le président invite M. Klepczynski à présenter son rapport (CCTF99-26).

M. Klepczynski dit que le groupe de travail a tenu trois sessions plénières depuis la session de 1996 du CCDS, à l'IEN (octobre 1996), au NIST (décembre 1997) et au ROA (octobre 1998). Lors de la réunion au NIST quatre groupes d'étude se sont réunis :

- vérification et validation ;
- étalonnages et simulateurs de signaux de satellites ;
- comparaison entre les méthodes de comparaison de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite et au moyen de la phase de la porteuse du GPS ;
- étalonnage avec une station transportable pour les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite.

Des progrès conséquents ont été réalisés au cours de ces trois dernières années :

- 1) On a commencé à utiliser INTELSAT 706 sur une base commerciale pour des liaisons européennes et transatlantiques : les stations concernées sont le DTAG, le NIST, le NPL, l'OCA, la PTB, le TUG, l'USNO et le VSL ; l'IEN et le ROA s'y joindront prochainement. Les comparaisons s'effectuent sur une fenêtre d'une heure tous les lundis, mercredis et vendredis. On dispose actuellement de deux années de données.
- 2) Mme Tavella présente un rapport sur une étude maintenant terminée sur l'interpolation de données espacées de manière irrégulière, disant que l'IEN a évalué trois techniques différentes pour calculer l'écart-type d'Allan de résultats espacés de manière irrégulière. De plus, l'IEN a étudié le moyen d'obtenir des données espacées de manière régulière par interpolation de données espacées de manière irrégulière et a calculé les meilleures évaluations et leurs incertitudes.
- 3) M. Lewandowski présente le rapport de l'étude réalisée au BIPM sur l'étalonnage de stations pour les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite au moyen de mesures des vues simultanées du GPS : le BIPM a fait circuler un récepteur étalonné pour les comparaisons de temps par vues simultanées du GPS entre plusieurs stations participant aux comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite. Des variations des retards pouvant atteindre 50 ns ont été observées, elles ont été attribuées à des modifications de l'équipement déjà connues. Il souligne que le code-P du GLONASS, une fois que les biais dus aux différentes fréquences ont été retirés, pourrait permettre d'effectuer des comparaisons horaires avec un bruit résiduel



inférieur à la nanoseconde (CCTF99-24). Cette possibilité sera étudiée pour l'étalonnage des stations.

- 4) Comparaison des données des stations pour les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite et des vues simultanées du GPS : M. Azoubib présente les données d'une comparaison à courte distance qui a duré deux ans entre la PTB et le TUG. La différence moyenne entre la méthode des vues simultanées du GPS et celle par aller et retour sur satellite était de 0 ns, avec un écart-type de 1,5 ns, ce qui montre que l'accord entre les deux méthodes est bon. À plus grande distance, entre la PTB et le NIST, la différence moyenne était de 9 ns et l'écart-type était de 3 ns, sur une période de deux ans. Cette plus grande différence est supposée être due au fait que l'on a utilisé un modèle pour les retards ionosphériques afin de corriger les données du GPS.
- 5) Étalonnage au moyen de la station transportable du TUG pour les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite au DTAG et à la PTB : M. Kirchner dit qu'on a observé des différences inférieures à 1 ns lors de quatre campagnes d'étalonnage entre la PTB et le TUG.
- 6) Études sur la stabilité des comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite : M. Kirchner dit qu'on a observé un écart de 100 ps sur une durée de moyenne d'un jour pour des comparaisons sur site entre deux stations terrestres liées à la même horloge de référence. De plus, il dit qu'on a observé un écart de 200 ps pour des durées de moyenne d'une heure sur des mesures de retard en boucle fermée entre l'émetteur et le récepteur de stations terrestres situées au TUG et au VSL, et une variation crête à creux d'environ 1 ns sur deux ans. Cette dernière semble due à des variations de température.
- 7) Début des comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite en Asie : M. Imae dit qu'une liaison est établie entre le CRL et le NML depuis le mois d'avril 1998, avec deux comparaisons de 30 minutes toutes les semaines sur INTELSAT 702 (bande Ku). Depuis octobre 1998, une liaison est établie entre le CRL et le CSAO sur JCSAT 128E, également avec deux comparaisons par semaine. Une liaison entre le CRL et le NRLM est établie sur ce même satellite depuis le mois de mars 1999. Des liaisons sont envisagées entre le KRISS, le NIST, le TL et des laboratoires européens. Une liaison en bande C entre le NIST et le NML devrait être établie en 1999.

Pour terminer, M. Klepczynski attire l'attention des participants sur la recommandation, qui propose, entre autres, de préparer l'utilisation des données des comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite pour le calcul du TAI.

Le président remercie M. Klepczynski et les membres du groupe de travail pour ce rapport, et propose que la recommandation soit adoptée. Il ouvre ensuite la discussion, que l'on peut résumer comme suit :

- Il subsiste des différences encore inexpliquées de plus de 1 ns entre les résultats des comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite et les vues simultanées du GPS (question soulevée par M. Levine), que l'on pense être dues principalement aux comparaisons par les vues simultanées du GPS (selon M. Kirchner). La nécessité d'effectuer des campagnes d'étalonnage supplémentaires plus fréquentes est évidente.
- Le calcul du TAI fait appel à un certain nombre de considérations pratiques liées à l'incorporation des résultats des comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite. Par exemple, quand on dispose à la fois de résultats du GPS et de comparaisons par aller et retour sur satellite, sur quels critères doit-on choisir les résultats à utiliser (question de M. Wolf) ? Le président demande à la section du temps du BIPM d'étudier la question et de faire des propositions, et lui exprime toute sa confiance.
- Le projet de recommandation proposé par le groupe de travail recueille l'approbation générale et est adopté comme Recommandation S 7 (1999).

Le président demande ensuite à M. Klepczynski d'explicitier les conditions requises pour mettre en œuvre les systèmes satellitaires globaux tels que le Wide Area Augmentation System (WAAS) et les autres systèmes similaires, comme les GNSS.

M. Klepczynski dit que le WAAS comprend vingt-sept ou vingt-huit stations de référence, situées aux États-Unis, en Alaska et à Hawaï. Chaque station est équipée de trois horloges à césium, et le temps de ces stations est coordonné au moyen de comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur deux satellites géostationnaires, ce qui offre une couverture quasi-hémisphérique. L'échelle de temps du réseau, connue sous le nom de temps du WAAS, est établie et maintenue à 50 ns du temps du GPS. Outre leur rôle primaire qui consiste à transmettre des données complémentaires à celles du GPS, les satellites géostationnaires ont la capacité de transmettre les

différences entre le temps du WAAS et huit échelles de temps UTC(k) différentes, à condition que les laboratoires de temps nationaux qui produisent ces échelles mesurent le temps du WAAS et transmettent les différences aux satellites appropriés.

Le président remercie M. Klepczynski et suggère qu'il conviendrait maintenant d'étudier une recommandation sur les futurs systèmes satellitaires de navigation à couverture globale, proposée par le BIPM (CCTF99-14). Dans ce cadre, il invite les participants à présenter leurs rapports sur les activités liées à ces nouveaux systèmes.

M. Imae dit que le CRL effectue des recherches sur la nouvelle génération de systèmes satellitaires de navigation à couverture globale (GNSS). En particulier, un maser à hydrogène prévu pour fonctionner dans l'espace est en préparation, et un satellite géostationnaire (ETS-8) équipé de deux horloges à césium et destiné à des comparaisons horaires devrait être lancé en 2002.

Mme Tavella dit que l'IEN a commencé une étude, en collaboration avec le DLR (Allemagne) et l'ESA, sur l'établissement d'une échelle de temps convenable pour les futurs GNSS. Il est particulièrement intéressant de se demander ce qui est le plus important : la stabilité à court terme ou à long terme ? l'exactitude ou la stabilité ? Elle ajoute que, bien que l'ESA n'ait pas formulé de demande particulière en matière de synchronisation de l'échelle de temps du GNSS avec l'UTC, les méthodes qui permettraient de le faire sont néanmoins étudiées. Elle suggère que ce pourrait être un sujet d'étude pour le Groupe de travail sur le TAI, dans le cadre des activités proposées sur les algorithmes pour les échelles de temps.

M. Quinn commente que selon lui, ce serait une profonde erreur que d'établir des systèmes qui demandent de la stabilité sans rechercher aussi l'exactitude. Il souligne que les observations à long terme des petites variations demandent des liens exacts au SI, c'est-à-dire dans le contexte actuel, au TAI. Il est important de garder à l'esprit que tout système fonctionnant sur le long terme aura des utilisations non prévues au moment de son établissement. Il propose de rédiger une recommandation à ce sujet. M. Petit souligne qu'un des buts de la recommandation proposée est d'informer les responsables de l'élaboration des systèmes de satellites des besoins de la communauté du temps.

À la fin de la discussion, la Recommandation S 6 (1999) est adoptée par le comité.

Le président invite ensuite M. Quinn à présenter le projet de lettre mentionné à la fin de la discussion sur le point 5 de l'ordre du jour. M. Quinn présente

ce projet et M. Pâquet commente que, pour atteindre l'exactitude visée par les systèmes tels que le WAAS, on aura besoin du positionnement exact des satellites. Il suggère que M. Quinn recommande aussi dans sa lettre d'utiliser un système de référence de positionnement particulier.

Compte tenu de la portée accrue de cette lettre, le président suggère de rédiger deux lettres séparées, la première sur les secondes intercalaires et la seconde, destinée aux concepteurs de systèmes satellitaires de navigation à couverture globale, tels que le WAAS et les autres systèmes similaires, contenant des recommandations sur les échelles de temps et les systèmes de positionnement de référence. M. Quinn accepte de considérer ce point de vue. [Finalement, une seule lettre a été envoyée.]

Le président invite ensuite M. Sen Gupta à présenter aux participants le système de dissémination du temps par satellite du NPLI (CCTF99-29).

M. Sen Gupta dit que ce système est fondé sur un satellite appartenant au Gouvernement indien et dont la diffusion couvre principalement l'Inde. Des signaux horaires unilatéraux synchronisés par rapport à UTC (NPLI) sont diffusés en bande S par le satellite. La liaison vers le satellite depuis le NPLI s'effectue en bande C. La position du satellite, exacte à 5 km près, est aussi diffusée en temps réel. L'exactitude en temps du système pour l'utilisateur final est limitée à environ  $\pm 20 \mu\text{s}$ , principalement par l'incertitude sur la position du satellite. L'exactitude potentielle a récemment été améliorée à  $\pm 1 \mu\text{s}$  en contrôlant les écarts de temps résiduels au NPLI et en les diffusant. Le nombre d'utilisateurs de ce système a récemment augmenté à plus de cent.

M. Sullivan commente que l'Égypte envisage de mettre au point un système de ce type, et M. Sen Gupta pourrait étudier la possibilité de collaborer avec ce pays. M. Sen Gupta répond qu'il a été contacté par plusieurs pays intéressés par le système indien, y compris la République de Corée, le Mexique et la Turquie.

Le président remercie M. Sen Gupta et aborde le point 6 de l'ordre du jour.

## **6 COMPARAISONS DE TEMPS ET DE FRÉQUENCES AU MOYEN DE SATELLITES DE NAVIGATION**

### **6.1 Mesures de la phase des signaux du GPS : rapport sur le projet pilote IGS/BIPM**

Le président invite M. Ray à présenter son rapport (CCTF99-20), et celui-ci demande à son tour aux représentants des laboratoires de présenter leurs travaux sur la phase des porteuses du GPS.

M. Dudgeon présente le rapport de l'OFMET et dit qu'une comparaison entre la PTB et l'USNO (distance voisine de 6000 km) a été effectuée entre les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite et celles qui utilisent la phase des porteuses du GPS ; des résultats ont été enregistrés pendant 200 jours (CCTF99-05). Les comparaisons de fréquence ont été effectuées avec une stabilité de l'ordre de  $10^{-13}$  sur une durée de moyenne de 300 s et on a observé une dérive de 33 ps par jour entre les deux méthodes. La cause de cette dérive est à l'étude.

M. Douglas, du NRC, demande aux participants de se référer à la section appropriée du rapport du NRC (CCTF99-06).

M. Levine dit que le NIST a effectué des essais de comparaisons horaires fondées sur la phase des porteuses du GPS sur de courtes et de longues distances. Cette technique a, en particulier, été comparée à celle fonctionnant par aller et retour sur satellite, entre l'horloge maîtresse du GPS à Colorado Springs et celle de l'USNO à Washington DC. Il dit que ces expériences ont montré que sur des durées de moyenne inférieures à 1000 s, la technique de la phase des porteuses du GPS est supérieure à celle des comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite.

M. Petit rapporte que le BIPM a observé que la différence de fréquence mesurée entre deux récepteurs GPS à deux fréquences, Ashtech Z12 modifiés, liés à une même horloge, était inférieure à  $1 \times 10^{-16}$  sur une durée de moyenne d'un jour dans des conditions environnementales correctement contrôlées. Il ajoute que les comparaisons d'étalons primaires de fréquence ont constitué une motivation importante pour entreprendre ces travaux au BIPM.

M. Ray présente ensuite le rapport sur le projet pilote IGS/BIPM (CCTF99-20).

Il rappelle tout d'abord que le projet a débuté à la fin de 1997 avec les objectifs suivants :

- mettre en œuvre des récepteurs GPS géodésiques à deux fréquences dans des laboratoires horaires ;
- mettre au point des techniques affinées d'analyse des données du GPS ;
- étudier le problème de l'étalonnage des récepteurs GPS géodésiques ;
- effectuer des comparaisons horaires au moyen de récepteurs GPS géodésiques.

Ces techniques devraient permettre d'atteindre une exactitude meilleure que 200 ps dans les comparaisons horaires.

Il existe maintenant plus de vingt-cinq groupes de recherche impliqués dans le projet pilote, plus de la moitié d'entre eux sont des laboratoires horaires. Dans le cadre de l'IGS, plus de deux cents sites d'observation sont distribués sur le Globe, soixante-dix d'entre eux utilisent des références de fréquence externes, et onze sont situés dans des laboratoires horaires. Le récepteur Allen-Osborne Turbo-Rogue est le plus répandu sur les sites d'observation, mais une nouvelle génération de récepteurs, qui décodent le code Y, voit le jour.

Les données sont analysées dans huit centres, qui génèrent et publient un certain nombre de produits, y compris les orbites des satellites avec une exactitude de l'ordre du centimètre, des données des horloges à bord des satellites, des données sur le mouvement du pôle, des données ionosphériques, des données de récepteurs horaires et les coordonnées de ces récepteurs.

L'échelle de temps utilisée comme référence dans le système de l'IGS est le temps du GPS. L'IGS préférerait relier ses résultats à l'UTC, mais il n'existe pas de moyen aisé de le faire actuellement. L'aide du BIPM serait bienvenue pour résoudre ce problème.

M. Ray dit que l'accès sélectif impose actuellement une limite, et note que le président des États-Unis a ordonné que l'accès sélectif soit supprimé en 2006 au plus tard, l'organisme en charge du GPS, le GPS Program Office, doit présenter chaque année un rapport pour expliquer pourquoi l'accès sélectif n'a toujours pas été supprimé.

Pour résumer, M. Ray dit que ce projet a bien débuté et que les questions immédiates à traiter, résumées dans le projet de recommandation, sont les suivantes :

- l'étalonnage des retards des récepteurs ;

- meilleur contrôle de l'environnement des récepteurs ;
- l'augmentation du nombre de récepteurs dans les laboratoires de temps ;
- l'utilisation de l'UTC comme échelle de temps de référence.

Le président remercie M. Ray, M. Petit et les autres membres du groupe de travail, et observe qu'il est inhabituel d'accomplir autant de travail en moins de deux ans pour des activités réalisées en coopération à une telle échelle. M. Quinn dit que ces progrès rapides ont été facilités par le fait que les objectifs ont été clairement définis au début du projet.

Le président demande à M. Petit ce qui serait nécessaire pour aligner l'échelle de temps de l'IGS sur l'UTC. M. Petit répond qu'il faudrait d'une part qu'un plus grand nombre de laboratoires de temps deviennent des stations d'observation de l'IGS, et d'autre part qu'il faudrait étalonner les retards des récepteurs géodésiques.

M. Sen Gupta propose à l'IGS d'augmenter le nombre de stations d'observation dans les latitudes équatoriales puisque les variations de l'ionosphère se produisent sur une échelle spatiale très restreinte dans cette région. M. Ray répond qu'il pense que des récepteurs du GPS à deux fréquences constituent une solution plus rentable financièrement, parce qu'ils fournissent des mesures des retards ionosphériques selon la ligne de visée des satellites.

M. Boucher dit qu'il est important de garder à l'esprit que les organisations doivent demander à faire partie des stations d'observation de l'IGS ; il ne suffit pas d'acheter et d'installer les équipements.

À la fin de la discussion, la Recommandation S 5 (1999) est adoptée par le comité.

## **6.2 Normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS : rapport du sous-groupe de travail sur le GPS et le GLONASS**

Le président invite M. Levine à présenter son rapport.

### *1) Format des données*

M. Levine dit tout d'abord que la disponibilité de récepteurs du GPS à canaux multiples, de récepteurs du GPS à deux fréquences et de récepteurs du GLONASS adaptés aux comparaisons de temps et de fréquences a incité le groupe de travail du CCTF à étendre le format original des données des vues

simultanées du GPS pour traiter les données de ces récepteurs. Il souligne l'importance d'utiliser ce format commun.

M. Levine continue par un résumé des progrès récents de la technologie du temps et des fréquences du GPS et du GLONASS.

#### *2) Récepteurs GPS Allen Osborne TTR4-P*

La plupart des laboratoires ont cessé d'étudier ces récepteurs en raison des multiples problèmes intrinsèques au logiciel et au matériel.

#### *3) Récepteurs GPS Motorola Oncore*

M. Levine dit qu'un certain nombre de laboratoires ont essayé ce type de récepteurs à canaux multiples pour des applications dans le domaine du temps et des fréquences.

Les connaissances dont nous disposons à ce jour indiquent que :

- les récepteurs Oncore, qui n'observent que sur une seule fréquence, seront de plus en plus affectés par les effets ionosphériques dus à l'augmentation de l'activité solaire ;
- leurs performances pour les comparaisons d'horloges sont aussi bonnes, voire meilleures, que celles des récepteurs actuels à un seul canal ;
- les récepteurs ne souffrent pas du passage à l'an 2000 ni du passage à la semaine 1024 du GPS ;
- les récepteurs sont très sensibles aux variations de température, à l'impédance des câbles et à d'autres facteurs ;
- parce que le coût du récepteur ne représente qu'une petite fraction (environ 6 %) du coût total du système de comparaison d'horloges auquel il sert de base, il pourra facilement être remplacé quand de meilleurs récepteurs seront disponibles ;
- malheureusement, le modèle VP-Oncore, sur lequel bon nombre d'études ont été menées, ne sera plus fabriqué après novembre 1999. D'autres récepteurs similaires continueront à être fabriqués par Motorola, mais leurs performances dans le domaine du temps et des fréquences n'ont pas été étudiées en détail.

#### *4) Récepteurs du GPS et du GLONASS 3S Navigation*

Des récepteurs mixtes, à plusieurs canaux, du temps du GPS sur une seule fréquence et du temps du GLONASS sur deux fréquences, sont disponibles dans le commerce depuis dix-huit mois. Une douzaine de laboratoires s'en est déjà équipée, et certains ont eu des problèmes avec leur unité. Les récepteurs



produisent des données du GPS et du GLONASS en mode multi-canal, au format recommandé par le BIPM, et d'autres données au format RINEX préconisé par l'IGS.

#### 5) *Le GLONASS*

M. Levine dit que le GLONASS présente certains avantages potentiels sur le GPS pour les comparaisons de temps car il ne subit aucune dégradation analogue à l'accès sélectif du GPS. Mais il présente aussi un certain nombre d'inconvénients :

- parce que chacun des satellites du GLONASS émet sur une fréquence différente de celle des autres, il est difficile d'étalonner les retards des récepteurs ;
- le GLONASS et le GPS utilisent des systèmes de référence des coordonnées spatiales différents ;
- parmi les quatorze satellites en service dans l'espace, neuf risquent de ne plus fonctionner d'ici deux ans ;
- on ne sait pas actuellement si d'autres satellites seront lancés dans l'espace ; cette situation devrait s'éclaircir au cours de l'année prochaine.

#### 6) *Programmes de poursuite*

M. Levine note qu'une meilleure utilisation des récepteurs du GPS et du GLONASS à canaux multiples serait possible :

- en n'utilisant pas de programme de poursuite, puisqu'ils ne sont pas nécessaires pour ce type de récepteurs ;
- en écourtant la durée de poursuite classique de 13 minutes, adoptée à l'origine pour permettre à un récepteur à un seul canal de recevoir un message d'éphémérides complet à chaque passage ;
- en simplifiant la méthode utilisée pour effectuer la moyenne des données du GPS, puisque la combinaison actuelle des méthodes d'ajustement quadratique et linéaire n'est pas optimale compte-tenu des caractéristiques spectrales de l'accès sélectif.

#### 7) *Résumé*

M. Levine dit à nouveau que la plupart des récepteurs actuels sont du type NBS à un seul canal ; ceux-ci deviennent de plus en plus difficile à maintenir en service du fait de leur ancienneté et certaines variations à long terme de leur retard interne ne sont pas complètement expliquées. Il note qu'aucun des récepteurs du GPS et du GLONASS disponibles actuellement n'est parfait à

tous égards, et que certains d'entre eux présentent même de sérieux problèmes. Néanmoins, l'utilisation de ces nouveaux récepteurs peut permettre un gain significatif des performances, en particulier si on modifie les protocoles de traitement des données pour tenir compte de leurs caractéristiques.

Le président remercie M. Levine pour son rapport, et ouvre la discussion.

M. Sullivan dit qu'il est important d'être conscient de l'impact potentiel du changement des méthodes de traitement des données du GPS sur la charge de travail de la section du temps du BIPM, et qu'il est important aussi de continuer à être capable d'utiliser efficacement les données des récepteurs existants, ou moins coûteux, pour optimiser l'impact du TAI.

M. Petit souligne que, tant que des laboratoires continuent à fournir des données provenant de récepteurs à un seul canal, le BIPM ne pourra pas utiliser de manière optimale les données des vues simultanées des récepteurs multi-canaux.

Pour terminer, M. Lewandowski dit que le GLONASS devrait être utilisé quand il existe, puisque c'est le seul moyen dont dispose la communauté du temps et des fréquences pour acquérir une expérience sur un système satellitaire de navigation à couverture globale libre de tout accès sélectif.

## **7 RELATIVITÉ GÉNÉRALE ET RÉFÉRENCES SPATIO-TEMPORELLES**

### **7.1 Rapport du Comité mixte BIPM/UAI sur les systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale**

Le président invite M. Petit à présenter son rapport (CCTF99-19).

M. Petit commence par expliquer que le Comité mixte BIPM/UAI sur les systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale a été créé en 1997 en réponse à une proposition faite par le BIPM à l'UAI de créer un groupe de travail pour étudier ces problèmes. Jusqu'à maintenant, le Comité mixte a étudié l'extension du tenseur métrique à utiliser pour le système de référence barycentrique, la transformation des échelles de temps-coordonnée lors du passage du système géocentrique au

système barycentrique, et les limites en exactitude imposées par les définitions de ces échelles de temps.

M. Petit dit qu'en 1991 l'UAI a défini une nouvelle échelle de temps-coordonnée barycentrique (TCB) pour remplacer l'échelle de temps assez mal définie qu'était le temps dynamique barycentrique (TDB). La définition actuelle du temps-coordonnée barycentrique convient à son calcul en fonction de l'échelle de temps-coordonnée géocentrique (TCG) à un niveau d'exactitude relative de plusieurs  $10^{-16}$  et la métrique doit donc être étendue pour l'adapter à une meilleure exactitude. De plus, la présente définition du temps terrestre (TT) limite l'exactitude relative de son calcul à environ  $1 \times 10^{-17}$  en raison des incertitudes sur la réalisation du géoïde.

Le Comité mixte a identifié et proposé des solutions au moins partielles à certains problèmes qui doivent être résolus pour améliorer cette situation :

- des définitions plus claires des constantes d'échelle qui expriment les rapports moyens entre TCB, TCG et TT ;
- l'extension de la métrique de 1991 de l'UAI pour le système barycentrique afin d'inclure les termes d'ordre supérieur à  $c^{-2}$  ;
- la détermination d'une formule de calcul de TCB en fonction de TCG ;
- la détermination d'une convention pour réaliser TT et TCG au moyen d'horloges sur Terre et au voisinage de la Terre ;
- le changement de la définition de TT en utilisant une valeur spécifique de  $L_G$ , donnée par  $L_G = W_0/c^2$ , comme constante de définition, pour laquelle la valeur du potentiel de pesanteur au niveau du géoïde,  $W_0$ , pourrait être la même que celle choisie pour un nouveau système de référence géodésique.

Le président remercie M. Petit et le comité pour leur rapport et leur demande de rester informés des activités de l'UAI, de l'UGGI et des autres organisations connexes dans ce domaine, et d'en informer le CCTF.

## 7.2 Système de référence terrestre conventionnel

Le président invite M. Petit à présenter ce sujet au CCTF (CCTF99-22).

M. Petit dit que le BIPM a été contacté par le Bureau des longitudes français au sujet des systèmes de référence pour la géodésie à l'échelle mondiale à usage terrestre et spatial. Le Bureau des longitudes a souligné que bien que le système de référence terrestre spécifié par le Service international de la rotation terrestre (ITRF), qui est constitué de plusieurs centaines de points connus avec une exactitude de l'ordre du centimètre et distribués à l'échelle

du Globe, soit largement reconnu par les utilisateurs scientifiques, il n'existe pas d'accord global sur l'utilisation générale d'un seul système de référence spatial, et des divergences pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres ont été constatées entre les systèmes nationaux.

Le Bureau des longitudes a suggéré que le BIPM crée un groupe de travail constitué de représentants de toutes les parties intéressées, comme les unions scientifiques, les organisations de navigation et les utilisateurs, pour recommander un système de référence spatial à usage général. Le Bureau des longitudes a souligné que les délibérations de ce groupe de travail devraient être complémentaires aux activités scientifiques de l'IERS.

À la fin de la présentation de M. Petit, le président ouvre la discussion.

M. Boucher souligne l'importance de choisir un système de référence unifié qui prenne en compte les besoins de tous les utilisateurs, et pas uniquement ceux de la communauté des géodésiens, par exemple. Il souligne aussi un parallèle entre l'unité de temps et les échelles de temps d'un côté, et l'unité de longueur et les systèmes de référence spatiaux de l'autre, qui a poussé le Bureau des longitudes à adresser une lettre au BIPM.

M. McCarthy suggère d'en référer à l'Association internationale de géodésie et dit qu'à son avis cela n'a que peu de rapport avec le temps et les fréquences, et il commente qu'il serait peut-être difficile de convaincre de nombreux pays de changer leur définition des positions.

M. Sullivan est d'accord avec lui jusqu'à un certain point et dit que cette activité devrait être encouragée mais sans absorber trop les ressources du BIPM, car elle dépasse son champ d'activité centré sur les étalons de mesure.

M. Guinot dit que le Bureau des longitudes a envoyé une lettre au BIPM car cet organisme a une grande habitude de collaborer ou de faciliter la collaboration entre les organisations internationales. Il souligne que le BIPM n'était pas, à l'origine, actif dans le domaine des échelles de temps, et qu'il n'est pas nécessairement déplacé d'ajouter de nouvelles activités. D'un autre côté, ces nouvelles activités ne concernent pas les activités scientifiques et techniques relatives au système de référence terrestre qui dépendent de l'IERS.

Une discussion s'ensuit, résumée par le président, qui dit que le CCTF n'est pas parvenu à un consensus à ce sujet, mais reconnaît l'importance de voir cette question traitée par une organisation appropriée. M. Quinn ajoute que le CCTF n'est pas tenu de prendre une décision à ce sujet, parce qu'il déborde le domaine du temps et des fréquences.

## **8 CHRONOMÉTRAGE DES PULSARS-MILLISECONDE**

Le président demande à M. Petit de présenter cette question au comité.

M. Petit présente un bref résumé sur les progrès réalisés dans ce domaine depuis la 13<sup>e</sup> session du CCDS :

- L'observatoire d'Arecibo avait cessé ses activités en raison de travaux pendant plusieurs années et vient de recommencer ses observations.
- L'observatoire de Nançay est aussi en travaux pour améliorer sa sensibilité. Son programme d'observations de chronométrage se poursuit malgré les travaux.
- D'autres radiotélescopes effectuent aussi des programmes d'observation de pulsars-milliseconde, mais avec une sensibilité moindre que les observatoires mentionnés ci-dessus.
- Un certain nombre de programmes de recherche de pulsars-milliseconde sont en cours, les plus importants sont les suivants :
  - le programme utilisant le nouvel instrument à faisceaux multiples Parkes, qui a permis de localiser plus de 350 nouveaux pulsars à ce jour, mais seulement un pulsar-milliseconde ;
  - le programme de recherche de pulsars Nançay-Berkeley, qui a permis de trouver deux nouveaux pulsars classiques.

M. Petit conclut en soulignant la nécessité d'intensifier les observations à long terme et à faible bruit de pulsars-milliseconde, qui ont une bonne stabilité rotationnelle.

Le président remercie M. Petit, et demande à la section du temps du BIPM de se tenir informée des progrès dans ce domaine et d'en informer le CCTF.

## **9 HORLOGES DANS L'ESPACE : PROBLÈMES ET POTENTIALITÉS**

Le président invite M. Dimarcq à ouvrir la discussion sur ce point de l'ordre du jour par un rapport sur les activités du LHA dans ce domaine (CCTF99-12).

M. Dimarcq dit que la plupart des activités du LHA liées aux horloges dans l'espace concerne le projet ACES (Atomic Clock Ensemble in Space), dans le cadre duquel il est envisagé de placer plusieurs horloges atomiques ainsi que les équipements de comparaisons horaires de précision associés, sur la station spatiale internationale en 2003 ou 2004. Des horloges fondées sur des atomes de césium refroidis par laser sont mises au point dans le cadre d'un projet commun au BNM-LPTF, au CNRS, à l'ENS-LKB et au LHA (projet PHARAO). Un maser à hydrogène pouvant fonctionner dans l'espace est aussi en préparation à l'ON.

Plusieurs stations au sol équipées d'horloges de haute exactitude et de systèmes adaptés aux comparaisons horaires participeront aussi au projet ACES. Les comparaisons horaires entre le sol et l'espace s'effectueront par des liaisons hyperfréquence et optique. La station au sol primaire pour la liaison par laser sera l'OCA. Une équipe doit être constituée pour la liaison hyperfréquence.

Les objectifs du projet ACES sont les suivants :

- démontrer les performances des horloges atomiques (avec une stabilité de la fréquence prévue de  $10^{-16}$  à  $10^{-17}$  sur une durée de moyenne d'un jour) et des liaisons horaires (avec une stabilité prévue de 30 ps par jour) ;
- effectuer des expériences de physique fondamentale, y compris des expériences sur le décalage gravitationnel vers le rouge ou d'autres expériences relativistes, et la recherche d'éventuelles dérives de la constante de structure fine ;
- synchroniser les horloges au sol à un niveau d'exactitude de  $10^{-16}$  pour des expériences sur la métrologie du temps et des fréquences ;
- construire des échelles de temps ultra-stables.

M. Dimarcq dit que l'une des difficultés majeures à surmonter pour atteindre tous ces objectifs est le calcul de la position et de la vitesse du point de référence horaire d'ACES sur la station spatiale, qui doivent être connus respectivement à moins de 1 m et à moins de 1 mm/s.

M. Sullivan présente ensuite les activités américaines dans ce domaine : il y a actuellement quatre programmes sur la mise au point d'horloges atomiques pouvant fonctionner dans l'espace sur la station spatiale internationale :

- Primary Atomic Reference Clock in Space (PARCS), une horloge à césium refroidi par laser mise au point dans le cadre d'un programme commun au NIST, à l'université du Colorado et au JPL ;

- Rubidium Atomic Clock in Space (RACE), en collaboration entre l'université de Yale et le JPL ;
- Glovebox Atomic Clock in Space (GLACE), qui est un programme de l'université de Yale pour mettre au point une horloge à césium compacte, indépendante, destinée à être placée sur la navette spatiale ;
- une collaboration entre le NIST et la Smithsonian Institution pour mettre au point un maser à hydrogène pouvant fonctionner dans l'espace.

M. Sullivan dit que le coût de la station spatiale internationale est tel qu'il incite à réduire le coût des programmes de comparaisons horaires liés à ces projets ; le programme PARCS utilisera donc le GPS pour les comparaisons horaires, plutôt qu'un équipement spécial installé dans la station au sol. Il souligne aussi que ces projets représentent le début d'un programme de recherche américain à plus long terme sur les applications des horloges dans l'espace.

## **10 COMPARAISONS CLÉS ET L'ARRANGEMENT DE RECONNAISSANCE MUTUELLE DANS LE DOMAINE DU TEMPS ET DES FRÉQUENCES**

Le président invite M. Quinn à présenter cette question au comité.

M. Quinn commence par expliquer ce qui a motivé la mise en place de l'arrangement de reconnaissance mutuelle (MRA) :

- le commerce international a besoin d'une infrastructure pour assurer la conformité de la reconnaissance mutuelle des étalons ;
- cette infrastructure repose essentiellement sur les laboratoires d'étalonnage, d'essais et de vérification, et la manière dont ils sont accrédités ;
- les laboratoires nationaux de métrologie sont appelés à superviser la conformité technique de cette infrastructure ;
- la reconnaissance mutuelle des laboratoires nationaux de métrologie est donc nécessaire ;

- la reconnaissance *ad hoc* entre les laboratoires nationaux de métrologie qui existait dans le passé n'est plus adaptée, et une documentation détaillée est devenue nécessaire.

Les objectifs de l'arrangement de reconnaissance mutuelle sont d'établir le degré d'équivalence des étalons nationaux des laboratoires nationaux de métrologie et d'assurer la reconnaissance mutuelle de ces étalons et des certificats d'étalonnage émis par les laboratoires. Ils reposent sur une série de comparaisons clés, dont les résultats sont conservés dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. Toutefois, ces résultats doivent être approuvés par le Comité consultatif approprié du CIPM avant d'être entrés dans la base de données.

M. Quinn poursuit en disant que les activités du CCTF dans le domaine du temps et des fréquences sont un cas particulier, puisque le système existant du TAI et de l'UTC répond déjà à toutes les directives établies pour les comparaisons clés. Il dit que le BIPM n'a pas l'intention de modifier ce système de manière significative pour l'adapter à l'arrangement de reconnaissance mutuelle.

M. Quinn suggère que la seule chose nécessaire serait peut-être d'identifier comme comparaisons clés du CCTF les comparaisons entre le TAI et les étalons primaires de fréquence ou entre les étalons primaires de fréquence, mais la discussion reste ouverte sur cette question.

Le président remercie M. Quinn et ouvre la discussion.

M. Douglas exprime sa préoccupation quant à l'opinion selon laquelle les procédures suivies actuellement pour les comparaisons des UTC(k) seraient suffisantes, à la lumière des difficultés que nous connaissons quant à l'étalonnage des récepteurs pour les comparaisons horaires. Il propose que les comparaisons clés du CCTF soient les suivantes :

- étalons primaires de fréquence, étalons primaires de fréquence et TAI ;
- équivalence des UTC(k) ;
- équivalence des fréquences relatives des UTC(k).

M. Quinn répond que toutes ces informations figurent dans la *Circulaire T* du BIPM, à cela près que ce bulletin ne mentionne pas les incertitudes, une question qui sera traitée, mais qui prendra du temps.

M. Granveaud suggère que les comparaisons clés du CCTF pourraient être limitées aux fréquences et exclure le temps, car cela ne serait pas commode à réaliser pour les raisons invoquées par M. Douglas.



MM. Palacio et Kovalevsky soulignent qu'il n'existe pas de protocole approuvé par tous pour exprimer les incertitudes dans les certificats d'étalonnage de temps et de fréquences. M. Kovalevsky suggère de créer un groupe de travail sur cette question et, reconnaissant l'urgence de la situation créée par l'arrangement de reconnaissance mutuelle, demande à ce que le groupe présente un rapport dans un an.

M. Douglas suggère qu'il serait utile aux laboratoires de temps et de fréquences des laboratoires nationaux de métrologie, qui fondent l'accréditation de leur système de qualité sur le Guide 25 de l'ISO, que le BIPM ait aussi un système de qualité. M. Quinn répond qu'il est conscient du besoin de transparence quant aux procédures utilisées par le BIPM. Cependant, bien que le BIPM élabore actuellement une documentation sur les procédures qu'il met en œuvre, il ne souhaite pas pour le moment que le BIPM soit soumis au processus d'accréditation du Guide 25 de l'ISO.

M. Douglas suggère que le CIPM pourrait s'auto-déclarer conforme au Guide 25 de l'ISO, et M. Quinn répond que cette question pourrait être étudiée.

M. Sullivan dit qu'il doit encore discuter avec les organisations régionales de métrologie américaines avant de prendre position sur cette question. M. Boulanger est du même avis, et dit que ces questions doivent d'abord être approuvées au niveau régional.

Le président demande des volontaires pour participer à un groupe de travail qui sera chargé d'étudier les conséquences pour le CCTF du système de comparaisons clés mis en œuvre dans le cadre de l'arrangement de reconnaissance mutuelle, et de recommander une action appropriée. M. de Jong accepte de présider ce groupe, et MM. Douglas, Ohshima, Palacio et Sullivan acceptent d'en être membres. M. Quinn assure le groupe de travail du soutien du BIPM. Un rapport devra être présenté lors de la prochaine session du CCTF. [Après la réunion, M. Lepek a demandé à faire partie de ce groupe.]

Le président invite ensuite M. Guinot à faire quelques remarques sur l'exactitude dans le contexte du temps et des fréquences.

M. Guinot dit que les problèmes liés à la mesure des fréquences ne sont pas essentiellement différents des autres domaines de la métrologie, tant que la nature de ces mesures, des séries temporelles, est bien reconnue et traitée de manière appropriée. Cependant, le temps, qui résulte d'une intégration de fréquence, est plus difficile à traiter, puisque qu'une incertitude fixe sur les mesures de fréquence se traduit par une incertitude des mesures de temps qui croît en fonction de la durée. Cela rend difficile d'exprimer les incertitudes

sur  $[UTC - UTC(k)]$ , comme il serait nécessaire dans la *Circulaire T*, puisque les étalonnages concernent  $[UTC(i) - UTC(j)]$  et sont très espacés. Cela pose aussi la question difficile de l'interpolation des incertitudes entre les étalonnages.

M. Guinot suggère, temporairement, que le BIPM publie les résultats de tous les étalonnages de  $[UTC(i) - UTC(j)]$ .

Le président remercie M. Guinot, et dit que cette question souligne l'importance d'effectuer des étalonnages plus fréquents des  $[UTC(i) - UTC(j)]$ .

## 11 MISE EN PRATIQUE DE LA SECONDE DU SI

Le président invite M. Quinn à présenter cette question au CCTF.

M. Quinn propose la formation d'un groupe de travail chargé de rédiger un document sur la mise en pratique de la seconde du SI, sachant qu'il convient de le faire avant la publication de la prochaine édition de la brochure sur le SI prévue avant la prochaine session du CCTF. Il demande au BNM-LPTF, au NIST et à la PTB de collaborer avec le BIPM au sein de ce groupe de travail.

Après une brève discussion, le président résume la situation en disant que cette proposition est approuvée à l'unanimité et note que le CCTF n'envisage pas de modifier la définition de la seconde du SI ; il faudra prendre soin de rédiger la mise en pratique de manière à ne pas limiter les progrès à venir des étalons primaires de fréquence. Le moment venu, un projet sera envoyé aux membres du CCTF.

## 12 PROGRAMME DE TRAVAIL DU BIPM

Le président demande à M. Quinn de présenter cette question au comité.

M. Quinn rappelle tout d'abord que la section du temps du BIH avait été transférée au BIPM en 1985, et que la Conférence générale avait ensuite

confié la responsabilité du TAI au BIPM. À l'époque, la participation directe à certaines activités expérimentales était nécessaire pour que le BIPM conserve un niveau de connaissance et d'expérience suffisants dans la métrologie du temps ; le laboratoire de temps du BIPM avait donc été établi à cet effet. Cependant, la possibilité de conserver un étalon primaire de fréquence au BIPM avait été exclue, pour de nombreuses raisons.

M. Quinn dit qu'il est de toute évidence important de s'assurer, par un contrôle régulier, que le personnel très compétent de la section du temps du BIPM est utilisé au mieux, compte tenu des ressources disponibles au BIPM. Il dit que les trois fonctions primaires de la section du temps sont actuellement les suivantes :

- conserver et distribuer le TAI et l'UTC ;
- effectuer des étalonnages de récepteurs pour les comparaisons d'horloges ;
- effectuer un travail de recherche.

Les activités de recherche auxquelles le personnel de la section du temps participe actuellement portent sur :

- l'exactitude du TAI ;
- les liaisons horaires ;
- les récepteurs du GPS et du GLONASS ;
- les mesures de phase et de code des signaux du GPS ;
- les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite, par l'intermédiaire du secrétaire du groupe de travail concerné ;
- les pulsars ;
- les systèmes de référence spatio-temporels et la relativité générale.

M. Quinn note que les sujets mentionnés ci-dessus sont très vastes, et que la capacité à entreprendre ces recherches ne peut exister qu'en raison du niveau de compétence élevé du personnel. De plus un certain recouvrement des compétences est nécessaire pour assurer les tâches régulières (par exemple le calcul du TAI et de l'UTC) sans interruption en l'absence de certains membres du personnel pour cause de maladie, congés ou raisons diverses.

Le président remercie M. Quinn pour avoir donné à la communauté du temps et des fréquences l'occasion d'en savoir plus sur les activités de la section du temps, et il félicite la section du temps pour ses travaux. Il note que le BIPM est prêt à accepter toute suggestion à ce sujet.

M. Matsakis remarque que tous les sujets cités ci-dessus représentent une charge de travail trop lourde par rapport aux ressources de la section du temps, et il demande que les travaux sur les comparaisons d'horloges soient aussi généraux que possible, pour pouvoir s'appliquer aussi bien aux comparaisons horaires par aller et retour sur satellite, qu'aux mesures de la phase des porteuses du GPS etc.

### **13 RECOMMANDATIONS**

Le président note que toutes les recommandations ont déjà été discutées aux points précédents de l'ordre du jour, et il suggère que le personnel du BIPM soit chargé d'y apporter les modifications nécessaires et de les traduire en français. Cette proposition est approuvée.

### **14 QUESTIONS DIVERSES**

M. Sullivan, en qualité de vice-président de la conférence EFTF/FCS qui vient d'avoir lieu, demande au BIPM que les réunions des groupes de travail du CCTF aient lieu en liaison avec un plus grand nombre de conférences internationales. Il pense que beaucoup de conférences seraient honorées d'accueillir ces réunions.

Le président approuve sa proposition et dit qu'elle sera étudiée.

Il demande ensuite au comité de noter que la prochaine conférence EFTF aura lieu à Turin en mars 2000, et que la même année une école internationale de physique sur « Recent advances in metrology and fundamental constants » se tiendra à Varenne (Italie). Un séminaire sur l'établissement des échelles de temps, organisé conjointement par l'IEN et le Politecnico de Turin, aura aussi lieu en 2001.

M. Dorenwendt observe qu'une collaboration plus importante entre le CCTF et le CCL serait nécessaire, en raison des liens accrus entre les mesures de

longueur et de fréquence dans les chaînes de multiplication depuis les hyperfréquences jusqu'aux fréquences optiques. Il suggère d'étudier la possibilité de combiner les activités du CCL et du CCTF.

M. Quinn accepte le principe d'une telle collaboration, mais dit qu'en pratique le nombre de participants à cette réunion conjointe serait très élevé et peu commode à gérer.

M. Sullivan suggère qu'il serait utile de faire la distinction entre les travaux sur les étalons de fréquence optiques et les étalons de longueur optiques pour clarifier le rôle de chaque communauté, et les interactions entre le CCL et le CCTF. Il ajoute qu'il pense que ces comités devraient rester séparés.

Pour terminer, M. Quinn dit qu'il a été décidé, lors de la dernière session du CCPR, de compiler et de publier une liste des publications récentes des membres des Comités consultatifs sur la page Internet du BIPM, avec des mises à jour annuelles. Il suggère que le CCTF devrait faire la même chose.

Le président, ne constatant aucune objection, demande aux membres du comité de fournir les informations demandées le moment venu.

## 15 CLÔTURE DE LA SESSION

Le président demande au comité d'observer une minute de silence à la mémoire de trois collègues décédés, qui ont apporté une contribution précieuse au domaine du temps et des fréquences, MM. Paul Vigoureux, William Markowitz et Gerhard Becker.

Le président remercie ensuite M. Petit pour avoir organisé les travaux du CCTF, et présente tous ses vœux à Mme Arias. Il remercie M. Quinn, le BIPM, les présidents des groupes de travail, les membres et les observateurs du CCTF.

Enfin, le président ajoute que la prochaine session du CCTF devrait se tenir à Paris en 2001.

P. Fisk, rapporteur  
août 1999

**Recommandations du  
Comité consultatif du temps et des fréquences**

**présentées au  
Comité international des poids et mesures**

**1 RECOMMANDATION S 1 (1999) :  
Mise en pratique de la définition de la seconde**

Le Comité consultatif du temps et des fréquences,

**considérant**

- que lors de sa 86<sup>e</sup> session (1997), le CIPM a introduit, dans la 7<sup>e</sup> édition de la brochure sur le SI, une note adjointe à la définition de la seconde,
- que la plus grande clarté est souhaitable pour ceux qui doivent interpréter cette définition afin de concevoir et de mettre en œuvre des réalisations primaires de la définition de la seconde,
- que le CCDS a déjà émis une Recommandation S 2 (1985) intitulée « Corrections nécessaires pour la réalisation de la seconde »,

**recommande**

- que la note adjointe en 1997 soit complétée et devienne : « Cette définition implique que l'atome de césium soit au repos et non perturbé. En conséquence, pour la réalisation expérimentale de la seconde, des corrections doivent être appliquées aux mesures pour tenir compte de la vitesse des atomes par rapport à l'horloge, des champs électriques et magnétiques, y compris ceux dus au rayonnement du corps noir ambiant, des effets d'échange de spin et des autres perturbations éventuelles »,
- que dans la prochaine édition de la brochure sur le SI, cette note soit développée et prenne la forme d'une mise en pratique de la définition et que cette mise en pratique soit incluse dans l'Annexe 2 de la brochure avec les mises en pratique des définitions des autres unités de base du SI.

## 2 RECOMMANDATION S 2 (1999) : Sur l'expression de l'incertitude dans les comparaisons mettant en jeu des étalons primaires de fréquence

Le Comité consultatif du temps et des fréquences,

### considérant

- que pour une date et un intervalle de temps donnés, la comparaison d'un étalon de fréquence avec un autre étalon peut s'adapter à la plupart des recommandations données dans le *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* de l'ISO,
- que l'application des méthodes de type A et de type B aux étalons primaires de fréquence semble parfois ambiguë,
- que le Guide de l'ISO suggère de fournir au lecteur les informations suffisantes pour combiner une composante de l'incertitude avec d'autres composantes,
- que la fonction d'autocorrélation ne semble pas être un moyen approprié pour communiquer à l'utilisateur la manière de combiner les incertitudes-types estimées sur des intervalles de temps plus petits que l'intervalle de mesure,
- que le Guide de l'ISO recommande, pour communiquer l'incertitude sur la valeur de l'incertitude, d'utiliser le nombre de degrés de liberté  $\nu \approx (\Delta u/u)^{-2}/2$  et qu'il existe des différences d'interprétation dans la manière d'attribuer une valeur de  $\nu$  à certaines composantes,

### recommande

- que pour une comparaison mettant en jeu un étalon primaire de fréquence, la méthode d'estimation de chaque composante de l'incertitude soit décrite par les métrologistes responsables, de façon explicite, et que les désignations « type A » et « type B » données dans le Guide de l'ISO ne soient pas utilisées lorsqu'elles peuvent paraître ambiguës ou inutiles,
- que lors de la publication d'une série de comparaisons entre un étalon primaire de fréquence et un autre étalon, la formule utilisée pour combiner les incertitudes partielles afin d'établir l'incertitude composée sur un intervalle de temps soit donnée explicitement,



- que lors de la révision du Guide de l'ISO, les auteurs soient invités à suggérer une manière de remplacer l'adjectif « systématique », déconseillé dans la combinaison des incertitudes relatives à des séries temporelles,
- que pour exprimer l'incertitude sur la valeur de l'incertitude, le nombre effectif de degrés de liberté  $\nu \approx (\Delta u/u)^{-2}/2$  soit donné, en considérant toutes les causes de variation identifiées par l'auteur.

### **3 RECOMMANDATION S 3 (1999) : Comparaisons d'étalons primaires de fréquence**

Le Comité consultatif du temps et des fréquences,

#### **considérant**

- que les résultats des comparaisons d'étalons primaires de fréquence sont essentiels pour établir l'exactitude du TAI et assurer la traçabilité à la définition de la seconde du SI,
- que le pilotage du TAI serait mieux assuré s'il devait être fondé exclusivement sur la discussion des résultats publiés des comparaisons du TAI avec des étalons primaires de fréquence,
- que les travaux à venir ayant pour but d'établir l'exactitude à long terme des mesures de temps demanderont la connaissance des résultats de telles comparaisons et, par conséquent, qu'il est nécessaire, d'ores et déjà, d'archiver les publications,
- que l'interprétation des résultats obtenus avec un étalon primaire de fréquence est plus facile lorsque ces résultats prennent la forme d'une comparaison avec un autre étalon de fréquence, durant un intervalle de temps donné,
- que les résultats d'un étalon primaire de fréquence et des méthodes de comparaison utilisées, leur interprétation ainsi que les incertitudes associées ne sont pas stationnaires,
- que le *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* de l'ISO recommande, pour tout résultat de mesure, d'établir une incertitude-type

composée et de donner les informations nécessaires pour combiner les composantes de l'incertitude,

**recommande**

- que les résultats obtenus à partir d'un étalon primaire de fréquence soient donnés explicitement sous la forme d'une comparaison à une date donnée et pendant un intervalle de temps donné, accompagnée de son incertitude-type composée, suivant les directives du Guide de l'ISO et conformément à la Recommandation S 2 (1999),
- que pour chaque comparaison dont la responsabilité incombe à plusieurs métrologistes, la responsabilité de l'estimation de l'incertitude soit endossée en commun par ces métrologistes,
- que cette estimation de l'incertitude se réfère à la description déjà publiée de toutes les corrections, leur méthode d'évaluation et la description de tous les instruments utilisés, ou constitue elle-même une publication de ce type,
- que les laboratoires dont les étalons primaires de fréquence sont comparés au TAI publient régulièrement les résultats de comparaisons bilatérales, de préférence dans *Metrologia*, sous la signature conjointe des responsables de la comparaison,
- que le pilotage du TAI soit guidé, en priorité, par les comparaisons qui ont été ou sont, de manière sûre, sur le point d'être publiées.

**4 RECOMMANDATION S 4 (1999) :**  
**Sur l'utilisation des récepteurs du temps du GPS et**  
**du GLONASS multicanaux et multicodes**

Le Comité consultatif du temps et des fréquences,

**considérant**

- qu'un certain nombre de récepteurs commerciaux du temps du GPS et du GLONASS, multicanaux et multicodes, existent désormais,
- que les performances de ces récepteurs se comparent favorablement avec celles des récepteurs actuellement en usage dans les laboratoires de temps pour la coordination du temps et des fréquences,
- que l'accroissement de la quantité de résultats disponibles et leur utilisation peuvent conduire à améliorer les comparaisons de temps réalisées en vue simultanée,
- que les récepteurs existants sont de plus en plus difficiles à entretenir,

**recommande**

- l'inclusion des récepteurs du temps du GPS et du GLONASS dans le réseau de liens utilisé pour la coordination internationale du temps,
- que l'utilisation de ces récepteurs soit étudiée par le sous-groupe sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS (CGGTTS),
- que, pour juin 2000, ce sous-groupe fournisse un rapport proposant des normes pour le matériel et les logiciels ainsi que des méthodes d'étalonnage pour ces récepteurs,
- que le BIPM identifie les procédés appropriés à la mise en œuvre de cette technique pour la coordination internationale du temps.

**5 RECOMMANDATION S 5 (1999) :**  
**Comparaisons de temps et de fréquences utilisant**  
**des mesures de phase et de code des signaux du**  
**GPS**

Le Comité consultatif du temps et des fréquences,

**considérant**

- que le Service international du GPS (IGS) a mis en place une infrastructure comprenant un réseau global d'observation, un système de distribution des données, des méthodes d'analyse robustes et des produits de grande qualité, dérivés des mesures du GPS,
- qu'un projet pilote commun IGS/BIPM a été créé pour étudier les comparaisons de temps et de fréquences utilisant des mesures de phase et de code des signaux du GPS,
- que les méthodes d'étalonnage sont encore insuffisantes pour tirer totalement profit des possibilités de ces techniques pour les comparaisons horaires,

**approuve sans réserve** le projet commun IGS/BIPM,

**et recommande**

- que les laboratoires de temps se préparent à participer à l'IGS en installant des récepteurs GPS appropriés et en suivant autant que possible les normes et les procédures de l'IGS,
- que des méthodes appropriées soient mises en œuvre pour étalonner les retards instrumentaux entre la référence interne des récepteurs et l'horloge externe,
- que la référence de l'IGS utilisée pour les produits horaires soit alignée autant que possible sur l'UTC et le TAI,
- que les laboratoires de temps et le BIPM prennent les dispositions nécessaires pour aider l'IGS à atteindre cet objectif.

**6 RECOMMANDATION S 6 (1999) :  
Futurs systèmes satellitaires de navigation à  
couverture globale\***

Le Comité consultatif du temps et des fréquences,

**considérant**

- que l'ancien Comité consultatif pour la définition de la seconde a déjà recommandé que « le temps de référence (modulo 1 s) des systèmes satellitaires de navigation à couverture globale soit synchronisé aussi étroitement que possible avec l'UTC » et que « le repère de référence de ces systèmes soit conforme à l'ITRF » (Recommandation S 4 (1996)),
- que les systèmes GPS et GLONASS suivent déjà ces instructions,
- que ces systèmes sont maintenant largement utilisés pour les comparaisons de temps et de fréquences,

**recommande**

- que tous les systèmes satellitaires de navigation à couverture globale soient conçus de telle façon qu'il soit possible d'utiliser leurs signaux pour les comparaisons de temps et de fréquences,
- que ces systèmes diffusent en plus de leur temps spécifique (ST) :
  1. la différence entre ST et une réalisation en temps réel de l'UTC et du TAI,
  2. une prévision des différences de temps entre ST, TAI et UTC,
- que les fabricants étudient des récepteurs et des systèmes de traitement spécifiquement conçus pour servir aux comparaisons de temps et de fréquences.

---

\* Cette recommandation a été approuvée par le Comité international des poids et mesures à sa 88<sup>e</sup> session comme Recommandation 1 (CI-1999).

**7 RECOMMANDATION S 7 (1999) :**  
**Sur les comparaisons de temps et de fréquences**  
**par aller et retour sur satellite**

Le Comité consultatif du temps et des fréquences,

**considérant**

- qu'il est nécessaire d'effectuer des comparaisons entre les nouveaux étalons primaires de fréquence en utilisant les meilleures méthodes existantes,
- que lors des trois dernières années, la méthode de comparaison de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite est devenue opérationnelle,
- qu'un format normalisé a été adopté pour l'échange des données,
- que des progrès significatifs ont été réalisés en ce qui concerne les modems du commerce et les méthodes d'étalonnage,
- que les résultats obtenus par la méthode par aller et retour sur satellite sont comparables à ceux que l'on obtient par la méthode des vues simultanées des signaux de code civil du GPS en canal unique, dans le cadre des programmes courants d'observation, et présentent même une meilleure stabilité pour les distances les plus courtes,
- que l'utilisation éventuelle de techniques encore plus avancées fait espérer de nouvelles améliorations significatives des résultats,
- qu'un certain nombre de laboratoires de temps dans le monde sont maintenant équipés de stations fonctionnant en aller et retour et que d'autres le seront bientôt,
- que la méthode par aller et retour sur satellite fournit une technique indépendante de la méthode des vues simultanées du GPS, actuellement la seule méthode de comparaison d'horloges utilisée pour la formation du TAI,

**recommande**

- que les laboratoires de temps continuent à travailler à la technique de comparaison de temps et fréquences par aller et retour sur satellite,

- que les études nécessaires pour incorporer les résultats de cette technique dans la construction du TAI soient entreprises et que ceci soit mis en œuvre aussitôt que possible.

**ANNEXE 1.****Documents de travail présentés à la 14<sup>e</sup> session du CCTF**

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

Document  
CCTF/

- 99-01 ORB (Belgique). — Report of the Royal Observatory of Belgium, P. Defraigne, 4 p.
- 99-02 KRISS (Rép. de Corée). — Report to the 14th session of the CCTF, 4 p.
- 99-03 IEN (Italie). — Report to the 14th session of the CCTF, 6 p.
- 99-04 PTB (Allemagne). — Report on activities to the 14th session of the CCTF, 4 p.
- 99-05 OFMET, Observatoire de Neuchâtel (Suisse). — Report to the 14th session of the CCTF, L. Prost, G. Dudle, P. Thomann, 2 p.
- 99-06 NRC (Canada). — Report from the NRC to the 14th session of the CCTF, 3 p.
- 99-07 NIST (États-Unis). — 14th meeting of the CCTF – Highlights of the activities of the Time and Frequency Division of the NIST, 11 p.
- 99-08 Draft recommendation “On the use of multi-channel and multi-code GPS and GLONASS time receivers” (1 April 1999), 1 p.
- 99-09 Groupe de travail du CCTF sur l’expression des incertitudes des étalons primaires de fréquence. — Report of the CCTF working group on the expression of uncertainty in primary frequency standards, R.J. Douglas, 40 p.
- 99-10 TUG (Autriche). — Report to the 14th meeting of the CCTF, D. Kirchner, 7 p.
- 99-11 BNM-LPTF, BNM-LHA (France). — Contribution to the 14th CCTF, M. Granveaud, N. Dimarcq, 9 p.
- 99-12 BNM-LHA (France). — Progress of atomic frequency standards: Contribution of the Laboratoire de l’Horloge Atomique, N. Dimarcq, 5 p.



Document  
CCTF/

- 99-13 BIPM. — Report of the BIPM Time section 1996-1998, G. Petit, 11 p.
- 99-14 BIPM. — Future global navigation satellite systems: Recommendation proposed by the BIPM, 1 p.
- 99-15 CRL (Japon). — Report on activities of the Communications Research Laboratory, 5 p.
- 99-16 CSIRO-NML (Australie). — Report to the 14th session of CCTF, P. Fisk, 7 p.
- 99-17 UAI. — Report from the International Astronomical Union, J. Kovalevsky, 2 p.
- 99-18 USNO (États-Unis). — The future of leap seconds, D.D. McCarthy, 3 p.
- 99-19 BIPM. — Progress report, BIPM/IAU Joint Committee on relativity for space-time reference systems and metrology, G. Petit, 6 p.
- 99-20 USNO (États-Unis), BIPM. — IGS/BIPM pilot project to study time and frequency comparisons using GPS phase and code measurements: Interim report, J. Ray, G. Petit, 15 p.
- 99-21 NMi-VSL (Pays-Bas). — Contribution of the NMi Van Swinden Laboratorium period 1996-1999, G. de Jong, 3 p.
- 99-22 BIPM. — Conventional terrestrial reference frame, 1 p.
- 99-23 NRLM (Japon). — Research activities on time and frequency, 4 p.
- 99-24 BIPM. — A test of GLONASS precise code, J. Azoubib, W. Lewandowski, 5 p.
- 99-25 BIPM. — Evaluation of two-way satellite time transfer data, J. Azoubib, W. Lewandowski, 6 p.
- 99-26 CCTF working group on two-way satellite time transfer. — Working group report on TWSTFT to the 14th CCTF meeting, 6 p.
- 99-27 NPL (Royaume-Uni). — Report to the 14th session of the CCTF, J. Lavery, 3 p.
- 99-28 Groupe de travail du CCTF sur le TAI. — Report of the working group on TAI: Meeting of the representatives of time laboratories, BIPM, 19 April 1999, P. Pâquet, 2 p.

Document  
CCTF/

- 99-29 NPLI (Inde). — Broadcasting of standard time and frequency signals (STFS) via INSAT, A. Sen Gupta, A.K. Hanjura, B.S. Mathur, 10 p.



## LISTE DES SIGLES UTILISÉS DANS LE PRÉSENT VOLUME

### 1 Sigles des laboratoires, commissions et conférences

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
CCL	Comité consultatif des longueurs
CCPR	Comité consultatif de photométrie et radiométrie
CCTF	(ex-CCDS) Comité consultatif du temps et des fréquences
CGGTTS	Sous-groupe sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS/CCDS Group on GPS and GLONASS 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)
CSAO	Shaanxi Astronomical Observatory, Lintong (Chine)
CSIR-NML	Council for Scientific and Industrial Research, National Metrology Laboratory, Pretoria (Afrique du Sud)
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Division of Applied Physics, Lindfield (Australie)
DLR	Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen (Allemagne)
DTAG	Deutsche Telecom AG, Darmstadt (Allemagne)
EFTF	European Frequency and Time Forum
ESA	Agence spatiale européenne/European Space Agency
EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
FCS	Frequency Control Symposium
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway NJ (États-Unis)

---

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

IEN	Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, Turin (Italie)
IERS	Service international de la rotation terrestre/International Earth Rotation Service
IGS	Service international du GPS/International GPS Service
IGS-RINEX	Receiver Independent Exchange Format of IGS
INPL	National Physical Laboratory of Israel, Jérusalem (Israël)
INTELSAT	International Telecommunications Satellite Organization
ISO	Organisation internationale de normalisation
JPL	Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Ca (États-Unis)
KRISS	Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon (Rép. de Corée)
LHA	Laboratoire de l'horloge atomique, Orsay (France)
LKB	Laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supérieure, Paris (France)
LPTF	Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France), <i>voir</i> BNM
NBS*	National Bureau of Standards (États-Unis), <i>voir</i> NIST
NIM	Institut national de métrologie/National Institute of Metrology, Beijing (Chine)
NIST	(ex NBS) National Institute of Standards and Technology, Boulder (États-Unis)
NMi-VSL	Nederlands Meetinstituut, Van Swinden Laboratory, 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)
OCA	Observatoire de la Côte d'azur, Grasse (France)
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)
PSB	Singapore Productivity and Standards Board (Singapour)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig (Allemagne)

ROA	Real Instituto y Observatorio de la Armada, San Fernando (Espagne)
TL	Telecommunication Laboratories, Ching-Li (Taiwan)
TUG	Technical University, Graz (Autriche)
UAI	Union astronomique internationale
UGGI	Union géodésique et géophysique internationale
UIT	Union internationale des télécommunications
URSI	Union radio-scientifique internationale
USNO	U.S. Naval Observatory, Washington DC (États-Unis)
VNIIFTRI	Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques, Moscou (Féd. de Russie)
VSL*	Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas), voir NMI

## **2 Sigles des termes scientifiques**

ACES	Atomic Clock Ensemble in Space
ALGOS	Algorithme pour établir le TAI
EAL	Échelle atomique libre
GLACE	Glovebox Atomic Clock in Space
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Système satellitaire à couverture globale/Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
ITRF	Système de référence terrestre spécifié par le Service international de la rotation terrestre
PARCS	Primary Atomic Reference Clock
PHARAO	Projet d'horloge atomique à refroidissement d'atomes en orbite
RACE	Rubidium Atomic Clock in Space
SA	Accès sélectif/Selective Availability
SI	Système international d'unités
TAI	Temps atomique international
TCB	Temps-coordonnée barycentrique
TCG	Temps-coordonnée géocentrique
TDB	Temps dynamique barycentrique
TT	Temps terrestre
UTC	Temps universel coordonné
WAAS	Wide Area Augmentation System