

**Comité consultatif
du temps et des fréquences**
15^e session (juin 2001)

**Consultative Committee
for Time and Frequency**
15th Meeting (June 2001)

Bureau international des poids et mesures

Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF)

15^e session (juin 2001)

Note sur l'utilisation du texte anglais (*voir* page 79)

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 1606-3767
ISBN 92-822-2185-7

TABLE DES MATIÈRES

Photographie des participants à la 15^e session du Comité consultatif du temps et des fréquences **2**

États membres de la Convention du Mètre et associés à la Conférence générale **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 ; ordre du jour ; nomination d'un rapporteur **19**

2 Progrès des étalons primaires de fréquence **20**

2.1 Étalons primaires de fréquence opérationnels et nouveaux étalons primaires en préparation **20**

2.2 Groupe de travail du CCTF sur l'expression des incertitudes des étalons primaires de fréquence **26**

3 Le Temps atomique international **27**

3.1 Rapport de la section du temps du BIPM sur le TAI **27**

3.2 Rapport du Groupe de travail du CCTF sur le TAI **29**

3.3 Rapport du Sous-groupe de travail sur les algorithmes du Groupe de travail du CCTF sur le TAI **31**

4 Progrès futurs de l'UTC et du TAI **32**

5 Redéfinition de l'UTC : secondes intercalaires **34**

6 Nomenclature conventionnelle pour l'UTC **37**

7 Méthodes de comparaisons de temps et de fréquences **38**

7.1 Rapport du Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite **38**

7.2 Mesures de phase du GPS : Rapport sur le projet pilote IGS/BIPM **40**

7.3 Rapport du Sous-groupe de travail du CCTF sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS **42**

- 8 La relativité générale et les références spatio-temporelles **43**
 - 8.1 Rapport du Comité mixte BIPM/UAI sur les systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale **43**
 - 8.2 Rapport sur le Conventions Product Centre de l'IERS **45**
- 9 Horloges dans l'espace **46**
- 10 Futurs systèmes de navigation satellitaires **49**
- 11 Les comparaisons clés et l'arrangement de reconnaissance mutuelle dans le domaine du temps et des fréquences **51**
- 12 Programme de travail du BIPM **56**
- 13 Recommandations **58**
- 14 Questions diverses **60**

Recommandations présentées au Comité international des poids et mesures

- CCTF 1 (2001). Représentations secondaires de la seconde **62**
- CCTF 2 (2001). Comparaison de temps et de fréquences utilisant des mesures de phase et de code des signaux du Global Positioning System (GPS) **63**
- CCTF 3 (2001). Signification de la notation « k » dans UTC(k) et TAI(k) **64**
- CCTF 4 (2001). Étalonnage des liaisons horaires du Temps atomique international **65**
- CCTF 5 (2001). Instructions techniques à l'attention des fabricants de récepteurs du temps des systèmes de satellites de navigation à couverture globale **66**

Annexe 1. Documents de travail présentés à la 15^e session du CCTF **69**

Liste des sigles utilisés dans le présent volume **73**

ÉTATS MEMBRES DE LA CONVENTION DU MÈTRE ET ASSOCIÉS À LA CONFÉRENCE GÉNÉRALE

au 20 juin 2001

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
Grèce	Turquie
Hongrie	Uruguay
Inde	Venezuela
Indonésie	

Associés à la Conférence générale

Cuba	Lettonie
Équateur	Lituanie
Hong Kong, Chine	Malte

LE BIPM ET LA CONVENTION DU MÈTRE

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

Le Bureau international a son siège près de Paris, dans le domaine (43 520 m²) du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français ; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre.

Le Bureau international a pour mission d'assurer l'unification mondiale des mesures physiques ; il est 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), aux échelles de temps (1988) et à la chimie (2000). 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, en 1988 pour la bibliothèque et des bureaux, et en 2001 a été inauguré un bâtiment pour l'atelier, des bureaux et des salles de réunion.

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 dans le *Rapport du directeur sur l'activité et la gestion du Bureau international des poids et mesures*.

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 γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α) ; cette dernière section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II) ;
- 7 le Comité consultatif des unités (CCU), créé en 1964 (ce Comité consultatif a remplacé la « Commission du système d'unités » instituée par le 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 1998.

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 le *Rapport du directeur sur l'activité et la gestion du Bureau international des poids et mesures*.

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 juin 2001

Président

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

Secrétaire exécutive

E.F. Arias, Bureau international des poids et mesures [BIPM], Sèvres.

Membres

Bureau national de métrologie, Laboratoire primaire du temps et des fréquences [BNM-LPTF]/Laboratoire de l'horloge atomique [LHA] du Centre national de la recherche scientifique [CNRS], Paris.

Communications Research Laboratory [CRL], Tokyo.

Conseil national de recherches du Canada [NRC], Ottawa.

Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques, Gosstandart de Russie [VNIIFTRI], Moscou.

Institut national de métrologie [NIM], Beijing.

Istituto Elettrotecnico Galileo Ferraris [IEN], Turin.

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

National Institute of Standards and Technology [NIST], Boulder.

National Measurement Laboratory, CSIRO [NML-CSIRO], Lindfield.

National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology [NMIJ/AIST], Tsukuba.

National Physical Laboratory [NPL], Teddington.

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

National Physical Laboratory of Israel [INPL], Jérusalem.

NMI Van Swinderen Laboratorium [NMI VSL], Delft.

Observatoire royal de Belgique [ORB], Bruxelles.

Office fédéral de métrologie et d'accréditation [METAS], 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.

Observateurs

CSIR, National Metrology Laboratory [CSIR-NML], Pretoria.

Singapore Productivity and Standards Board [PSB], Singapour.

Ulusal Metroloji Enstitüsü/National Metrology Institute of Turkey [UME],
Gebze-Kocaeli.

**Comité consultatif
du temps et des fréquences**

Rapport de la 15^e session
(20 - 21 juin 2001)

Ordre du jour

- 1 Ouverture de la session ; ordre du jour ; 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 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 ;
 - 3.3 Rapport du Sous-groupe de travail sur les algorithmes du Groupe de travail du CCTF sur le TAI.
- 4 Progrès futurs de l'UTC et du TAI.
- 5 Redéfinition de l'UTC : secondes intercalaires.
- 6 Nomenclature conventionnelle pour l'UTC.
- 7 Méthodes de comparaison de temps et de fréquences :
 - 7.1 Rapport du Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite ;
 - 7.2 Mesures de phase du GPS : Rapport sur le projet pilote IGS/BIPM ;
 - 7.3 Rapport du Sous-groupe de travail du CCTF sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS.
- 8 La relativité générale et les références spatio-temporelles :
 - 8.1 Rapport du Comité mixte BIPM/UAI sur les systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale ;
 - 8.2 Rapport sur le Conventions Product Centre de l'IERS.
- 9 Horloges dans l'espace.
- 10 Futurs systèmes de navigation satellitaires.
- 11 Les comparaisons clés et l'arrangement de reconnaissance mutuelle dans le domaine du temps et des fréquences.
- 12 Programme de travail du BIPM.

13 Recommandations.

14 Questions diverses.

1 OUVERTURE DE LA SESSION ; ORDRE DU JOUR ; NOMINATION D'UN RAPPORTEUR

Le Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF) a tenu sa 15^e session au Bureau international des poids et mesures (BIPM), à Sèvres. Quatre séances ont eu lieu les 20 et 21 juin 2001.

Étaient présents : P. Banerjee (NPLI), A. Bauch (PTB), R. Beard (UIT), L.-G. Bernier (METAS), C. Boucher (UGGI), J.-S. Boulanger (NRC), G. de Jong (NMI VSL), A.B. Demichev (VNIIFTRI), Y.S. Domnin (VNIIFTRI), G. Duddle (METAS), N. Dimarcq (BNM-LPTF/LHA), P. Fisk (CSIRO-NML), T. Fukushima (UAI), X. Gao (NIM), A. Godone (IEN), M. Granveaud (BNM-LPTF/LHA), D. Henderson (NPL), M. Hosokawa (CRL), T. Ikegami (NMIJ/AIST), M. Imae (CRL), D. Kirchner (TUG), J. Kovalevsky (président du CIPM), J. Lavery (NPL), H.S. Lee (KRISS), S. Leschiutta (président du CCTF, IEN), J. Levine (NIST), F. Ma (NIM), J. Mc A. Steele (URSI), D. McCarthy (USNO), D. Matsakis (USNO), S. Ohshima (NMIJ/AIST), J. Palacio (ROA), P. Pâquet (ORB), S.B. Pushkin (VNIIFTRI), T.J. Quinn (directeur du BIPM), F. Riehle (PTB), D.B. Sullivan (NIST), P. Tavella (IEN), P. Thomann (METAS/ON).

Observateurs : H.A. Chua (PSB), R. Gamidov (UME), L. Marais (CSIR-NML).

Invités : S.-Y. Lin (TL), J. Ray (USNO).

Assistaient aussi à la session : P. Giacomo (directeur honoraire du BIPM), E.F. Arias (secrétaire exécutive du CCTF), J. Azoubib, W. Lewandowski, G. Petit, P. Wolf (BIPM).

Excusés : R. Douglas (NRC), B. Guinot, T.E. Parker (NIST).

Le président ouvre la réunion et souhaite la bienvenue aux participants, aux délégués et observateurs. Faisant référence au point 1 de l'ordre du jour, il informe les participants qu'il a reçu une lettre de M. Guinot dans laquelle il prie le CCTF de l'excuser de ne pouvoir assister à la réunion et demande à être rayé de la liste de ses membres. Le président lui présente tous ses vœux et exprime sa gratitude à M. Guinot pour sa contribution aux activités du CCTF durant de nombreuses années, et il recommande au CCTF de demander à M. Quinn de préparer en son nom une lettre de remerciements. Les participants se joignent à lui et M. Quinn dit qu'il écrira à M. Guinot.

Le président demande ensuite aux participants de rendre hommage à M. Louis Essen, qui a effectué les essais du premier étalon de fréquence à césium au NPL, à Londres, en 1955. Il suggère que l'année 2005 marquera le cinquantième anniversaire de cette date ; le CCTF pourrait alors lui rendre hommage. M. Quinn répond qu'il ne sera plus directeur du BIPM en 2005, mais il fera part de cette suggestion à son successeur.

Enfin, le président informe les participants que M. Fisk a accepté la fonction de rapporteur.

2 PROGRÈS DES ÉTALONS PRIMAIRES DE FRÉQUENCE

En introduction, le président note qu'un grand nombre de fontaines à césium sont en construction dans le monde entier, et que la PTB se sert actuellement de sa fontaine en tant qu'horloge. Il invite ensuite les représentants de chaque laboratoire à présenter oralement un bref rapport résumant les documents qu'ils ont soumis au CCTF et qui figurera dans le rapport sur la réunion du CCTF.

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

Un résumé des rapports suivants des laboratoires mentionnés ci-dessous est présenté par les intervenants dont le nom figure entre parenthèses.

CCTF/01-01a (NIST, M. Sullivan) :

- La fontaine étalon de fréquence à césium NIST-F1 est en fonctionnement et le NIST a soumis au BIPM quatre évaluations de sa fréquence pour comparaison avec celle du TAI. Le NIST envisage de faire fonctionner cet étalon de manière régulière pour qu'il contribue au TAI.
- La fontaine étalon NIST-F1 et la fontaine à césium CSF1 de la PTB ont été comparées par aller et retour sur satellite et par mesures de la phase de la porteuse des signaux du GPS. Leur fréquence est en accord avec les incertitudes calculées.
- Le NIST poursuit sa collaboration au projet d'horloge primaire atomique de référence dans l'espace (Primary Atomic Reference Clock in Space,

PARCS) ; l'horloge devrait être prête à temps pour être placée dans la station spatiale internationale (International Space Station, ISS) en 2005.

- Un laser dans l'ultraviolet à bande très étroite a été asservi sur la transition d'un ion simple piégé de $^{199}\text{Hg}^+$. La valeur mesurée du facteur de qualité Q du signal de résonance est de $1,6 \times 10^{14}$, c'est la valeur la plus élevée observée pour des transitions optiques. L'incertitude relative de l'étalon devrait approcher 1×10^{-18} . La fréquence du laser asservi sera liée de manière cohérente au domaine des radiofréquences et des micro-ondes au moyen de la technologie des lasers à peignes à impulsions femtosecondes.
- L'amplitude des fluctuations du signal de fluorescence de quatre ions piégés préparés dans un état quantique corrélé, déterminée de manière expérimentale, s'est avérée inférieure à la limite quantique normale pour quatre ions indépendants. Ce phénomène pourrait avoir des applications pratiques pour les futurs étalons de fréquence.

CCTF/01-02a (CRL, M. Hosokawa) :

- L'étalon de fréquence à pompage optique à césium CRL-01 est en fonctionnement depuis le début de l'an 2000, l'évaluation des incertitudes est en cours.
- Un maser à hydrogène prototype élaboré au CRL pour fonctionner dans l'espace est actuellement soumis à des essais environnementaux.

CCTF/01-03 (METAS, M. Thomann) :

- Une fontaine étalon de fréquence à césium générant un flot continu d'atomes de césium refroidis, au lieu de nuages isolés, est en cours de mise au point. Le flot continu d'atomes devrait permettre de réduire le décalage de la fréquence dû aux collisions entre atomes d'un facteur 50, et l'instabilité due à l'effet Dicke d'un facteur supérieur à 100, par rapport aux fontaines à césium de conception traditionnelle. On devrait atteindre une stabilité relative $\sigma_y(\tau)$ de $7 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$.

CCTF/01-04 (NPLI, M. Banerjee) :

- Le NPLI envisage de construire une fontaine étalon de fréquence à césium ; il négocie actuellement le financement de ce projet.

CCTF/01-05 (KRISS, M. Lee) :

- Une fontaine étalon de fréquence à césium est en cours de mise au point depuis 1998 ; une largeur de la raie de résonance micro-onde inférieure à 2 Hz a été obtenue, elle devrait pouvoir être encore réduite à 1 Hz en 2001.

- Un étalon de fréquence à césium fondé sur un flot continu d'atomes lents (30 m/s) est en cours de mise au point ; des franges de Ramsey de 60 Hz de largeur ont été observées. Une nouvelle technique de refroidissement transversal a été utilisée ; elle emploie une molasse optique bi-dimensionnelle, ce qui améliore le signal d'un facteur 10.
- La cavité micro-onde de l'étalon à césium classique KRISS-1 a été remplacée pour réduire des fuites de micro-ondes gênantes. L'évaluation de l'incertitude du système sera bientôt terminée.

CCTF/01-06 (ORB, M. Pâquet) :

- Des progrès importants ont été réalisés dans le domaine des techniques de comparaisons d'horloges par observations simultanées du GPS et au moyen de la phase du signal de la porteuse du GPS.

CCTF/01-08 (VNIIFTRI, M. Domnin) :

- L'incertitude relative de l'étalon primaire classique de fréquence à césium MCs-102 est évaluée à 2×10^{-14} ; sa fréquence diffère de celle du TAI de -5×10^{-15} en valeur relative.
- Une fontaine à césium étalon est en cours de mise au point : le piégeage, le refroidissement et le lancement des atomes devraient pouvoir être réalisés en 2001.
- Un maser à hydrogène à haute puissance a été mis au point pour servir d'oscillateur local ultra-stable à comparer à la fontaine à césium.

CCTF/01-09 (NMIJ/AIST [anciennement dénommé NRLM], M. Ohshima) :

- Le NRLM a été récemment restructuré et a fusionné avec d'autres organisations pour devenir une organisation plus étendue, le NMIJ.
- L'étalon de fréquence primaire classique à césium NRLM-04 a été déplacé dans un nouveau bâtiment et est en cours d'assemblage. Il devrait fonctionner à nouveau dans quelques mois.
- La fontaine à césium qui était en cours de mise au point est maintenant opérationnelle, avec une stabilité relative de fréquence $\sigma_y = 1 \times 10^{-12}$ pour un temps moyen τ de 1 s. Cette stabilité est moins bonne que prévu, et l'on en cherche la cause.
- Le système de division de fréquence optique du NRLM/NMIJ fondé sur des oscillateurs paramétriques optiques à ondes continues a été remplacé par un système à peigne à impulsions femtosecondes. Ce système est actuellement utilisé pour mesurer la fréquence de lasers à He-Ne asservis sur l'iode et de lasers à YAG aux longueurs d'onde de 633 nm et de 532 nm respectivement.

CCTF/01-11 (NML, M. Fisk) :

- Les travaux effectués récemment sur l'étalon à ions de $^{171}\text{Yb}^+$ piégés étaient centrés sur des mesures tri-dimensionnelles du taux de réchauffement du nuage d'ions refroidis quand on supprime les lasers de refroidissement pendant la séquence d'interrogation de Ramsey par impulsions micro-ondes. Les résultats indiquent qu'il est possible d'obtenir une incertitude relative composée totale meilleure que 4×10^{-15} .
- Le département du temps et des fréquences du NML a reçu à la fin de 1999 l'accréditation pour ses activités d'étalonnage et de maintien du temps, conformément au Guide 25 de l'ISO.
- Des progrès conséquents sont réalisés dans la conception et la mise en pratique de systèmes de comparaisons d'horloges par observations simultanées du GPS à une ou deux fréquences.

CCTF/01-12 (PTB, M. Bauch) :

- La mise au point de la fontaine étalon primaire de fréquence à césium CSF1 de la PTB s'est achevée en l'an 2000, et la fontaine fonctionne quasiment en continu (environ 28 jours par mois). L'évaluation détaillée de son incertitude sera publiée dans *Metrologia* en 2001.
- Plusieurs mesures absolues de fréquence de la raie d'atomes de calcium piégés à 657 nm et de la raie d'ions simples de $^{171}\text{Yb}^+$ piégés à 435 nm ont été réalisées au moyen de la chaîne de mesure de fréquences à mélange d'harmoniques de la PTB, et plus récemment avec un système de mesure de fréquences optiques à peigne à impulsions femtosecondes. La largeur de raie des ions de $^{171}\text{Yb}^+$ à 435 nm est inférieure à 30 Hz, et des mesures répétées de sa fréquence sont en accord relatif à mieux que 1×10^{-14} près.

M. Bauch estime que, même si un grand nombre de fontaines à césium sont mises au point dans le monde, il faut continuer à faire fonctionner des étalons primaires de fréquence classiques à césium telles que PTB CS1 et CS2.

CCTF/01-13 (TUG, M. Kirchner) :

- M. Kirchner dit que le laboratoire horaire de la TUG a cessé ses activités à la fin de l'an 2000. M. Bauch dit que c'est très dommage pour la communauté du temps, et exprime ses remerciements à M. Kirchner et à la TUG, en particulier pour leur contribution dans le domaine des comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite.

- Le président se joint à M. Bauch et remercie M. Kirchner au nom du CCTF pour sa contribution.

CCTF/01-15 (IEN, M. Godone) :

- Une fontaine à césium a été construite en coopération avec le NIST et l'université de Turin. Le bilan d'incertitude est presque terminé, et les travaux sur le décalage de fréquence dû aux collisions progressent. Les progrès sont toutefois limités par le manque d'un maser à hydrogène qui servirait de référence de fréquence pendant les études sur les incertitudes.

CCTF/01-18 (NMi VSL, M. de Jong) :

- L'équipe du NMi VSL s'est principalement consacrée aux problèmes de comparaisons horaires, y compris l'identification et la correction des défauts de conception de certains récepteurs pour les comparaisons horaires par observations simultanées du GPS, et aux questions liées à la réflexion du signal dans les câbles d'antennes.

CCTF/01-25 (BNM-LPTF/LHA, MM. Granveaud et Dimarcq) :

- Le LHA a quitté Orsay pour s'installer à l'Observatoire de Paris en l'an 2000, ce qui lui permet de collaborer plus étroitement avec le BNM-LPTF.
- Le BNM-LPTF fait actuellement fonctionner trois étalons primaires de fréquence : l'un d'entre eux (LPTF-JP0) est un étalon classique à césium à pompage optique, et les deux autres (LPTF-F01 et PHARAO) sont des fontaines à césium étalons. Aucune comparaison avec le TAI n'a été soumise au BIPM en raison de problèmes relatifs aux masers à hydrogène.
- L'estimation de l'incertitude relative de la fontaine étalon à césium LPTF-F01 atteint maintenant $1,1 \times 10^{-15}$, en raison notamment d'une meilleure détermination du décalage dû au rayonnement du corps noir. Les essais d'un oscillateur à résonateur diélectrique construit par l'University of Western Australia et utilisé comme oscillateur local pour cette fontaine sont en cours.
- La fontaine PHARAO, construite il y a quatre ans, a été modifiée pour être transportable, et son incertitude relative actuelle est estimée meilleure que 2×10^{-15} . Elle a été utilisée au Max Planck Institute for Quantum Optics en l'an 2000 comme étalon de référence pour des mesures de fréquence de transitions optiques.
- Une fontaine « double » à césium et à rubidium est en construction ; l'estimation actuelle de son incertitude relative est de 2×10^{-15} en mode

rubidium seul. La cavité micro-onde pour le césium est maintenant installée, et le système devrait fonctionner dans les deux modes à la fin de l'an 2001.

- Un étalon de fréquence optique à atome de Sr refroidi et un système de mesure de fréquences optiques à peigne à impulsions femtosecondes sont en construction.
- Un équipement pour les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite est en cours de mise au point.
- L'ESA et l'agence spatiale française (le CNES) ont approuvé les projets PHARAO et ACES pour installation sur la station spatiale internationale en 2005.
- Des horloges à jet de césium thermique ou refroidi à pompage optique sont en cours de mise au point. L'Europe fait un effort important dans ce domaine avec la mise au point du système de navigation globale par satellite Galileo.
- De nouveaux capteurs inertiels et gravimétriques fondés sur l'interférométrie atomique sont en cours de mise au point, leurs performances devraient être supérieures à celles de systèmes optiques.

CCTF/01-31 (USNO, M. Matsakis) :

- Plusieurs systèmes sont mis à niveau pour pouvoir contribuer aux changements à venir dans l'architecture du GPS.
- L'horloge maîtresse de l'USNO est pilotée à moins de 5 ns de l'UTC.
- Des efforts sont faits pour étalonner les liaisons pour les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite.
- L'utilisation du Wide Area Augmentation System (WAAS) et de l'European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) pour des applications aux comparaisons d'horloges est à l'étude.
- Des études sur les comparaisons horaires au moyen de la phase du signal de la porteuse des signaux du GPS sont réalisées en collaboration avec les fabricants de matériel, le JPL et le réseau canadien des stations de contrôle de l'IGS.
- Une fontaine étalon primaire de fréquence à césium est en cours de mise au point.

CCTF/01-32a (NRC, M. Boulanger) :

- Les étalons primaires de fréquence classiques à césium du NRC sont remis à niveau pour fonctionner de manière plus automatisée.

- Les masers à hydrogène du NRC ont été équipés de sorties à 100 MHz comme équipement de comparaison à la fontaine à césium en cours de mise au point et afin d'effectuer des mesures de fréquences optiques.
- Une fontaine étalon primaire de fréquence à césium (NRC-F1) est en cours de mise au point ; les premières franges de Ramsey ont été observées en décembre 1999. Elle utilise une géométrie de piégeage des atomes en mode 110, et la fontaine fonctionnera avec deux nuages d'atomes de césium refroidis lancés simultanément.
- La fréquence de la raie à 574 nm d'un atome unique de Sr^+ piégé a été mesurée au moyen de la chaîne de fréquence à mélange d'harmoniques du NRC, avec une incertitude relative de quelques 10^{-13} .
- Un système de mesure de fréquences à peigne à impulsions femtosecondes est en cours de mise au point.
- Des expériences de comparaisons horaires sont effectuées dans le cadre du WAAS.

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

M. Petit présente un résumé du rapport (CCTF/01-21) sur la mise en pratique des recommandations du groupe de travail.

Il signale qu'en réponse aux Recommandations S 2 et S 3 adoptées lors de la 14^e session du CCTF en 1999, la section du temps du BIPM a étudié comment les résultats des étalons primaires de fréquence doivent être utilisés pour évaluer la durée de l'unité d'échelle du TAI et a examiné leur présentation dans la *Circulaire T* et les autres publications du BIPM. Les changements qui ont résulté de ces études ont été pris en compte pour la première fois dans la *Circulaire T* de mai 2000. Les points principaux sont les suivants :

- Tous les résultats des comparaisons d'étalons primaires de fréquence avec le TAI, communiqués au BIPM pour publication, doivent inclure un bilan d'incertitudes détaillé de la fréquence de l'étalon et préciser quelle liaison horaire a été utilisée pour la comparaison avec le TAI.
- La Recommandation S 3 (1999) du CCTF encourageait les laboratoires qui fournissent les résultats des étalons primaires de fréquence à publier les résultats des comparaisons bilatérales avec le TAI. À l'initiative de la PTB, des rapports communs à la PTB et au BIPM ont été soumis pour publication dans *Metrologia*.

M. Petit conclut en disant que le traitement actuel des résultats des comparaisons d'étalons primaires de fréquence répond aux besoins pour le moment, compte tenu du fait que l'exactitude des meilleurs étalons, la stabilité relative des meilleures liaisons horaires et celles de l'EAL sont très proches, de l'ordre de un à quelques 10^{-15} . L'algorithme de calcul du TAI et les liaisons horaires devront être améliorés pour bénéficier des améliorations à venir de l'exactitude des étalons primaires de fréquence.

Le président remercie M. Petit pour son rapport, et demande si le CCTF doit à nouveau intervenir sur ces questions. M. Petit répond que la situation est satisfaisante compte tenu des performances actuelles des étalons primaires de fréquence et des liaisons horaires, mais avant la prochaine session du CCTF il faudra se poser la question de savoir comment tirer le meilleur profit des améliorations à venir.

M. Quinn ajoute que, indépendamment du CCTF, des progrès importants sont réalisés dans le monde dans le domaine des étalons primaires de fréquence, et il faut faire en sorte que le TAI en bénéficie pleinement.

3 LE TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL

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

Mme Arias résume le rapport CCTF/01-29.

Depuis la 14^e session du CCTF en 1999, la section du temps du BIPM a publié les volumes 12 (1999) et 13 (2000) du *Rapport annuel de la section du temps du BIPM*, qui comprend entre autres les informations publiées dans la *Circulaire T* pendant la période en question. À l'avenir, la section du temps souhaite diffuser principalement les données mensuelles de la *Circulaire T* par voie électronique (courrier électronique ou transfert de fichiers par FTP), et après consultation des représentants des laboratoires qui contribuent au TAI, elle propose de ne publier des rapports imprimés qu'à l'intention des seuls laboratoires qui en feront explicitement la demande. Le rapport annuel continuera toutefois à être imprimé. Ces propositions sont largement approuvées (le BIPM avait envoyé au préalable un questionnaire à ce sujet aux laboratoires qui contribuent au TAI).

Le calcul du TAI à partir des données fournies par les laboratoires est progressivement automatisé, ce qui facilitera le calcul des prédictions quasiment en temps réel du TAI et de l'UTC (ce sera discuté au point 4 de l'ordre du jour « Progrès futurs de l'UTC et du TAI »).

Une amélioration de la stabilité de l'EAL a été observée ; elle est attribuée à des améliorations successives (en janvier 1998 et janvier 2001) de l'algorithme servant à la pondération des horloges qui contribuent à l'EAL, ainsi qu'à une amélioration générale des performances des équipements. La stabilité actuelle de l'EAL est caractérisée par un écart-type relatif d'Allan $\sigma_y(\tau) = 0,6 \times 10^{-15}$ pour des durées de moyenne τ de vingt à quarante jours. L'amélioration la plus récente de la procédure de pondération des horloges est discutée plus en détail au point 4 de l'ordre du jour « Progrès futurs de l'UTC et du TAI ».

Comme l'a dit M. Petit au point 2 de l'ordre du jour sur les « Progrès des étalons primaires de fréquence », la section du temps du BIPM œuvre à la mise en pratique des Recommandations S 2 et S 3 adoptées lors de la 14^e session du CCTF en 1999. Les résultats des comparaisons bilatérales entre les étalons primaires de fréquence et le TAI ont donc été publiés dans la *Circulaire T*, à partir du numéro 148 de mai 2000.

Depuis 1999, l'évaluation de l'unité d'échelle du TAI utilise les résultats des comparaisons entre la fréquence du TAI et celle de neuf étalons primaires de fréquence (CRL-01, NIST-7, NIST-F1, NRLM-4, PTB CS1, CS2 et CS3, PTB CSF1 et LPTF-JP0). Pendant cette période, l'écart relatif entre l'unité d'échelle du TAI et la seconde du SI se situe entre $+0,2 \times 10^{-14}$ et $+0,7 \times 10^{-14}$, avec une incertitude de $0,2 \times 10^{-14}$.

En réponse à une décision de la 14^e session du CCTF en 1999, les résultats de trois liaisons horaires obtenus par comparaison de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite contribuent maintenant au TAI : il s'agit des liaisons entre le NPL et la PTB, entre l'USNO et le NPL et entre le VSL et la PTB. La liaison entre la PTB et le TUG était aussi utilisée jusqu'à la fermeture du laboratoire horaire de la TUG en 2000. Pour ces trois liaisons les résultats des observations simultanées classiques du GPS continuent à être collectés et évalués à titre de sauvegarde.

Les résultats des liaisons utilisant des récepteurs du GPS à canaux multiples ont été introduits dans le calcul du TAI au début de l'an 2000, et l'éventuelle prise en compte dans le TAI de résultats de liaisons horaires fondées sur le signal de la phase de la porteuse des signaux du GPS est maintenant à l'étude.

L'utilisation de résultats de récepteurs à canaux multiples GPS/GLONASS et de récepteurs du code P du GLONASS est aussi à l'étude, le BIPM collectant les données des laboratoires convenablement équipés. Une campagne d'étalonnage différentiel inter-laboratoires de récepteurs à canaux multiples du GPS et du GLONASS a débuté en 1998, elle est coordonnée par le BIPM. Un des récepteurs du GLONASS en fonctionnement au BIPM contribue aux données de l'International GLONASS Experiment (IGEX) et de l'International GLONASS Service Pilot Project (IGLOS-PP) depuis 1998.

En conclusion, Mme Arias ajoute que le personnel du BIPM continue à collaborer avec d'autres organisations dans le domaine des références spatio-temporelles (un rapport est présenté au point 8 de l'ordre du jour sur « La relativité générale et les références spatio-temporelles »), le temps des pulsars-milliseconde, l'interférométrie atomique, et les horloges dans l'espace.

Le président félicite Mme Arias et la section du temps du BIPM pour leurs activités dans un domaine aussi vaste.

3.2 Rapport du Groupe de travail du CCTF sur le TAI

M. Pâquet et M. Azoubib soulignent les points principaux du rapport CCTF/01-14.

M. Pâquet explique tout d'abord qu'il se contentera de faire des remarques générales, car la plupart des conclusions du Groupe de travail sur le TAI figurent dans d'autres rapports soumis dans le cadre du point présent de l'ordre du jour ou d'autres. En particulier, le travail sur les algorithmes sera présenté par Mme Tavella (CCTF/01-28) et les travaux relatifs au projet pilote IGS/BIPM (CCTF/01-07a et 07b) seront présentés au point 7 de l'ordre du jour « Méthodes de comparaisons de temps et de fréquences » par M. Ray. Les travaux sur la pondération des horloges dans l'algorithme de calcul du TAI (CCTF/01-14) seront présentés par M. Azoubib à ce point de l'ordre du jour et les travaux sur les liaisons horaires ont été présentés par Mme Arias dans le cadre du rapport de la section du temps sur le TAI (CCTF/01-29).

La question de l'étalonnage des liaisons horaires était au centre des discussions du groupe de travail, ainsi que de celles sur l'arrangement de reconnaissance mutuelle (MRA). Il est clair que ce problème doit être traité avec soin par la communauté du temps, en particulier parce que les performances des étalons de fréquence primaires et des autres horloges

progressent plus vite que l'exactitude des étalonnages et que la stabilité des liaisons horaires.

La collaboration entre les communautés du temps et de la géodésie a été très fructueuse, et il est nécessaire de resserrer les liens entre les laboratoires horaires et les services de contrôle géodésiques. Les bénéfices potentiels d'un hébergement commun à ces deux types d'équipement est souligné dans les conclusions du projet pilote IGS/BIPM.

M. Pâquet termine son rapport en disant que c'est la dernière année pendant laquelle il présidera ce groupe de travail. Il remercie les membres du groupe de travail et propose que Mme Tavella lui succède à ce poste.

M. Azoubib résume les travaux (CCTF/01-14) sur la pondération des horloges dans l'algorithme de calcul du TAI.

Il dit tout d'abord que les résultats de ce travail ont été mis effectivement en œuvre en janvier 2001, et depuis une amélioration significative de la stabilité de l'EAL et du TAI a été observée.

Dans le précédent algorithme, les résultats fournis par 83 % des horloges Hewlett-Packard 5071A étaient affectés d'un poids maximal de 0,7 % dans l'algorithme de calcul du TAI. Cette pondération était de moins en moins appropriée, et il était clair que certaines de ces horloges à césium sont bien plus stables que d'autres, or l'algorithme ne donnait pas un poids plus grand aux horloges plus stables. Un problème similaire se posait pour les résultats des masers à hydrogène.

Pendant un certain temps la section du temps du BIPM a cherché d'autres méthodes pour déterminer le poids relatif maximal, w_{\max} , à assigner à une horloge particulière. L'expression simple

$$w_{\max} = A/N,$$

où A est une constante empirique et N le nombre d'horloges qui contribuent au calcul, permet d'améliorer au maximum la stabilité de l'EAL caractérisée par $\sigma_y(\tau = 40 \text{ d}) = 4 \times 10^{-16}$ quand $A = 2,5$, alors que la stabilité est au mieux égale à $\sigma_y(\tau = 40 \text{ d}) = 1 \times 10^{-15}$ en utilisant la procédure de pondération précédente. Si $A = 2,5$, la stabilité de l'horloge doit être meilleure que $\sigma_y(\tau) = 5,8 \times 10^{-15}$ pour des durées τ comprises entre vingt et trente jours pour être affectée de la pondération maximale.

Bien que les recherches faites au BIPM indiquent que la stabilité optimale de l'EAL est obtenue quand $A = 2,5$, nous avons choisi la valeur $A = 2,0$ pour changer le moins possible le poids maximal. Pour $A = 2,0$, la stabilité de l'horloge doit être meilleure que $\sigma_y(\tau) = 7,8 \times 10^{-15}$ pour des durées τ

comprises entre douze et trente jours pour être affectée du poids maximal. M. Azoubib conclut en disant qu'il a fait circuler en l'an 2000 aux laboratoires membres du CCTF le détail des changements proposés à la procédure de pondération, et que ces changements ont été largement approuvés.

3.3 **Rapport du Sous-groupe de travail sur les algorithmes du Groupe de travail du CCTF sur le TAI**

Mme Tavella résume le rapport CCTF/01-28.

Elle explique que le sous-groupe de travail sur le TAI a été établi lors de la 14^e session du CCTF en 1999, et qu'il a été chargé des missions suivantes :

- promouvoir des études approfondies et élargies sur les algorithmes pour le temps et les fréquences ;
- encourager les publications, les discussions et les collaborations dans ce domaine ;
- étudier les nouveaux besoins éventuels relatifs au traitement des résultats dans le domaine du temps et des fréquences, et les applications nouvelles.

Le sous-groupe a été établi récemment, et vingt-cinq personnes appartenant à quatorze institutions différentes ont fait part de leur intérêt à y participer. Une des questions les plus urgentes à traiter est celle de l'usage optimal des résultats des nouveaux étalons de fréquence primaires très exacts qui ne fonctionnent pas en continu. Un problème similaire se pose pour les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite, qui ne peuvent fonctionner en continu en raison de leur coût et d'autres facteurs tels que les vacances ou week-ends.

Le sous-groupe a mis au point un site web (<http://www.ien.it/tf/cctf/>), et il va organiser le 4^e symposium international sur les algorithmes pour les échelles de temps (4th International Symposium on Time Scale Algorithms), qui aura lieu au BIPM les 18 et 19 mars 2002.

Pour terminer, Mme Tavella remercie M. Pâquet de l'avoir proposée pour lui succéder et dit qu'elle est prête à assumer ces fonctions si on le lui demande (cette question sera discutée au point 14 de l'ordre du jour « Questions diverses »).

Le président remercie M. Pâquet, M. Azoubib et Mme Tavella pour leur rapport, et dit que le moment est bien choisi pour étudier de nouveaux algorithmes pour les échelles de temps.

4 PROGRÈS FUTURS DE L'UTC ET DU TAI

M. Petit présente un rapport de la section du temps du BIPM intitulé « A rapid computation of a prediction of TAI and UTC » (CCTF/01-22).

Il souligne que le délai d'accès au TAI et à l'UTC varie actuellement de quinze jours (pour les résultats obtenus à la fin d'un mois calendaire) à quarante-cinq jours (pour les résultats obtenus au début d'un mois calendaire). Mais de nombreuses organisations (par exemple les laboratoires de métrologie et les opérateurs de systèmes satellitaires) souhaitent piloter leur temps de référence sur l'UTC et le TAI, et aimeraient disposer de ces échelles de temps plus rapidement.

Pour répondre à ces demandes, il serait nécessaire soit d'écourter le temps de calcul du TAI, soit de pouvoir fournir rapidement une prédiction du TAI. L'option d'écourter le temps de calcul a été écartée, puisque le délai serait encore en réalité compris entre dix et vingt-cinq jours, ce qui ne répondrait pas à la demande. De plus, il est possible que cette procédure altère sérieusement les caractéristiques du TAI.

Par conséquent, la section du temps du BIPM a mis au point une méthode de calcul pour fournir une prédiction du TAI, connue sous le nom de TAIp. Le but est de :

- calculer TAIp au moyen d'une procédure simple, rapide et sûre ;
- de minimiser $[TAI - TAIp]$.

L'approche choisie est d'utiliser un algorithme similaire à celui utilisé pour le TAI, appliqué aux résultats d'un sous-ensemble des horloges qui contribuent au TAI. Celui-ci est choisi parmi les horloges des laboratoires ayant de « bons » résultats puisque, pour faciliter une publication rapide de TAIp, nous n'essaierons pas de résoudre des problèmes délicats ni d'obtenir des résultats manquants.

Les essais de cette nouvelle procédure appliqués à des résultats anciens ont montré qu'il est possible de prédire le TAI à mieux que 5 ns pour des périodes pouvant atteindre quarante-cinq jours. De plus, puisque le TAI et TAIp sont calculés au moyen d'algorithmes séparés (mais similaires) et en combinant des ensembles d'horloges différents, détecter un écart entre TAIp et TAI supérieur à 5 ns est un indicateur très utile d'erreurs dans les liaisons horaires ou provenant d'autres sources.

M. Petit termine sa présentation en annonçant qu'un projet pilote de calcul de TAIp quasiment en temps réel est envisagé pour le début de 2002, avec un intervalle de calcul de probablement dix jours. Les laboratoires participant au projet pilote devront envoyer les résultats de leurs horloges et des liaisons horaires rapidement (de préférence automatiquement) pour chaque MJD se terminant par zéro, ensuite TAIp sera calculé et disséminé le jour ouvrable suivant.

Le président remercie M. Petit pour son rapport et demande si le BIPM a besoin d'une décision du CCTF à ce sujet. M. Petit répond qu'il aimerait savoir quels laboratoires seraient prêts à y participer. Le président demande aux représentants des laboratoires de répondre à cette question et demande aussi s'ils ont des demandes spécifiques au sujet de TAIp.

M. Laverty répond que le NPL aimerait y participer, et que ses clients tireraient profit de TAIp. M. Sullivan indique que le NIST y participerait aussi, même s'il calcule sa propre prédiction de TAIp. M. Matsakis dit que l'USNO travaille aussi à la prédiction de l'UTC, et qu'un écart maximal de 7 ns entre leur prédiction et l'UTC a été observé pour une prédiction à quarante-cinq jours.

M. Banerjee demande si TAIp sera fourni à la demande, ou s'il sera publié, et il demande aussi si TAIp aura une incidence sur TAI. M. Petit répond que son intention première est de disséminer d'abord TAIp aux seuls laboratoires participant à l'expérience, et que TAIp n'affecterait pas TAI, si ce n'est en facilitant la détection et la correction des erreurs que l'on n'aurait pas décelées autrement.

Mme Tavella note que le TAI est supposé être une échelle de temps définitive et de très bonne qualité à long-terme, et elle se demande si l'établissement de TAIp ne pourrait pas être interprété comme un pas vers une réduction de la période de calcul et de moyenne du TAI. Le président demande à M. Quinn de répondre.

M. Quinn dit que l'un des devoirs du BIPM est d'anticiper l'avenir, et puisque la technologie et la demande pour TAIp existent, il pense qu'il faut l'étudier, faire des essais et éventuellement écarter cette proposition si elle n'est pas utile. Il saisit ensuite cette occasion pour faire d'autres commentaires plus généraux. Il note qu'il y a actuellement trois éléments principaux dans le domaine du temps et des fréquences : les étalons primaires de fréquence, les comparaisons d'horloges et les échelles de temps. La stabilité et l'exactitude de chacune d'entre elles sont actuellement

similaires, mais le BIPM doit se préparer, au cas où ce ne serait plus le cas à l'avenir.

De plus, la distinction entre les étalons primaires de fréquence et les étalons de longueur est de moins en moins nette suite aux récents progrès des étalons de fréquence optiques à atomes ou ions refroidis liés à la seconde du SI au moyen de la technologie des lasers à peigne à impulsions femtosecondes. Cet outil puissant risque d'entraîner un saut qualitatif des étalons à césium en termes d'exactitude et de stabilité, et en particulier on prédit une exactitude meilleure que 1×10^{-16} en valeur relative. Cela soulève le problème de comparer ces étalons, la technique la plus exacte de comparaison à distance, c'est-à-dire la méthode de comparaison de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite, semble actuellement peu susceptible d'améliorer ce niveau d'exactitude.

En conclusion, M. Quinn dit qu'une autre solution à ce problème de comparaison des étalons primaires de fréquence en cours de mise au point consiste à faire circuler des étalons de fréquence portables, et il demande au CCTF d'examiner si le BIPM doit acquérir cette aptitude.

Le président considère que ce point est très important, et dit qu'il sera discuté au point 12 de l'ordre du jour « Programme de travail du BIPM ». Il ouvre ensuite la discussion sur la question de TAIp.

M. Pâquet dit que, même si l'on a besoin de TAIp ou d'une prédiction analogue, il est important de ne pas augmenter la charge de travail globale du BIPM. Il suggère donc que TAIp soit considéré comme une étape de pré-production du TAI, et qu'il soit publié sur le site FTP du BIPM.

M. de Jong est préoccupé de la publication supplémentaire des différences [*UTCp* – *GPS*] ou de [*UTCp* – *GLONASS*], qui pourraient être utilisées pour reléguer au second plan les laboratoires nationaux.

Le président répond que ces questions devront être examinées.

5 REDÉFINITION DE L'UTC : SECONDES INTERCALAIRES

M. Beard et M. de Jong présentent les rapports du Special Rapporteur Group 7a de l'UIT-R sur l'échelle de temps UTC (CCTF/01-17, CCTF/01-33).

Ce groupe a été créé pour étudier la question 236/7 de l'UIT-R sur l'avenir de l'échelle de temps UTC.

Lors de sa réunion de mai 2001, sur l'utilisation des échelles de temps dans les systèmes de navigation satellitaires, les systèmes de télécommunications, les réseaux informatiques, les services de radio-diffusion et pour des usages scientifiques, le groupe a proposé les options suivantes pour l'avenir de l'UTC et des secondes intercalaires :

Option 1 : maintenir le statut quo

- recommander l'utilisation de l'UTC avec sa définition actuelle ;
- recenser les échelles de temps disponibles et considérer leurs usages ;
- fournir les informations plus tôt et les rendre plus accessibles ;
- créer une échelle de temps pour la navigation.

Option 2 : modifier les procédures ou l'occurrence des secondes intercalaires

- augmenter la tolérance pour la différence [$UTC - UTI$], allonger la durée de prédiction et réduire la fréquence d'occurrence des secondes intercalaires ;
- effectuer les ajustements à intervalle fixe avec éventuellement plusieurs secondes intercalaires ;
- effectuer les corrections à des intervalles prédits selon un modèle de décélération de la rotation de la Terre, ré-évalué à des intervalles fixes.

Option 3 : utiliser ou effectuer une transition vers une autre échelle de temps

- rendre plus accessible le TAI dans sa version actuelle ;
- fournir une nouvelle échelle de temps pour la navigation qui pourrait être nécessaire pour des utilisateurs dans l'espace ;
- fournir une nouvelle échelle de temps fondée sur une redéfinition de la seconde du SI.

Afin de collecter des informations avant de mettre au point les recommandations qui seront présentées lors de la réunion d'octobre 2002, le groupe de l'UIT envisage d'adresser une lettre générale aux deux secteurs de l'UIT pour les informer de l'existence de ce groupe et de ses objectifs ; il envisage aussi de publier des articles et des notices dans des journaux et bulletins.

Le président demande à M. Beard si les propositions actuelles du groupe de l'UIT doivent être portées à l'attention du CCTF. M. Beard répond que pour le moment elles ne sont pas claires, puisqu'il a reçu peu de réponses des groupes intéressés.

M. Levine souligne qu'il est demandé à de nombreuses organisations de « dater » des événements (souvent par rapport à une échelle de temps disséminée par ordinateur) et qu'il n'existe aucun moyen satisfaisant de « dater » un événement qui arrive pendant une seconde intercalaire quand on utilise l'UTC comme échelle de temps de référence. Une solution pourrait être de transmettre $[UTC - TAI]$ par Internet, et d'utiliser en pratique le TAI comme l'échelle de temps de référence, mais cela pose des problèmes juridiques, puisque le TAI n'est pas reconnu dans la législation de tous les pays. Il faut trouver une solution qui soit à la fois réalisable d'un point de vue technique et juridique.

Le président note que la question des secondes intercalaires est très importante, mais qu'elle ne fait pas partie des missions du CCTF ; il demande aux délégués de se prononcer sur les trois options proposées par M. Beard à propos de l'avenir de l'UTC. Les résultats sont les suivants :

M. Sullivan : Option 1.

M. Fisk : Option 1.

M. Granveaud : Option 2, en rendant le TAI plus accessible.

Prof. Pâquet : Option 3.

M. Matsakis : Suppression des secondes intercalaires.

M. McCarthy : Option 3.

M. Steele : Option 2, car l'UTC dans sa version actuelle a été définie il y a plus de trente ans, et n'est plus nécessairement appropriée aujourd'hui.

M. Fukushima : (en son nom propre, mais pas au nom de l'UAI) Option 3.

M. Leschiutta : Option 3, sans redéfinir la seconde du SI.

M. Quinn : Pas de préférence, mais est d'accord avec le commentaire de M. Steele.

M. Arias : Option 1, avec l'introduction d'une échelle de temps pour la navigation.

M. Godone : Option 1, avec l'introduction d'une échelle de temps pour la navigation.

M. Palacio : Option 1, en rendant le TAI plus accessible.

M. de Jong : Option 1, en rendant le TAI plus accessible.

M. Imae : Suppression des secondes intercalaires.

M. Hosokawa : Option 2.

M. Ikegami : Option 3.

M. Lavery : Pas de préférence, mais il souligne l'importance de conserver la seconde du SI comme unité d'échelle.

M. Henderson : Suppression des secondes intercalaires

M. Domnin : Option 3, sans redéfinir la seconde du SI.

6 NOMENCLATURE CONVENTIONNELLE POUR L'UTC

Le président invite M. McCarthy à présenter une recommandation (CCTF/01-10) proposée par l'USNO, sur la désignation des institutions participant à l'UTC.

M. McCarthy commence par rappeler aux participants que la Recommandation 536 (1978) du CCIR définit les notations $TA(k)$ et $UTC(k)$ comme des échelles de temps réalisées par l'institution « k ».

Cette définition pose plusieurs questions :

- Que recouvre la désignation « institution k » ?
- Une organisation peut-elle avoir une réalisation reconnue de l'UTC ou du TAI ?
- Il n'est pas fait de distinction entre l'échelle de temps et sa réalisation.

Pour clarifier ces questions, M. McCarthy présente un projet de recommandation (CCTF/01-10) qui propose en substance que les institutions « k » soient uniquement celles qui participent au calcul du TAI en contribuant aux comparaisons d'horloges du BIPM. La notation « $UTC(k)$ via m » proposée dans le document CCTF/01-10 n'est pas approuvée.

M. Pâquet, Mme Arias et M. Lavery expriment leur soutien à cette proposition, disant qu'il serait utile de désigner clairement les institutions qui sont reconnues à la source de l'UTC.

M. Quinn souligne que la nomenclature servant à désigner le degré d'équivalence entre instituts est déjà mentionnée dans le MRA, et qu'il est possible que plusieurs instituts d'un même pays figurent dans la liste des instituts qui participent au MRA. Par conséquent, nous disposons déjà d'une liste d'institutions maintenant des échelles de temps traçables à l'échelle de temps du BIPM. La proposition de M. McCarthy ne doit donc pas être discutée en dehors du contexte du MRA. M. McCarthy répond que selon lui

il faut encore tirer les conséquences du MRA dans ce contexte, et sa proposition lui semble utile pour une période transitoire.

Le président repousse la discussion de cette proposition au point 13 de l'ordre du jour « Recommandations ».

7 MÉTHODES DE COMPARAISONS DE TEMPS ET DE FRÉQUENCES

7.1 Rapport du Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite

Un résumé du rapport de ce groupe de travail (CCTF/01-26) est présenté par MM. de Jong et Lewandowski.

M. de Jong dit que le groupe de travail s'est réuni deux fois depuis la 14^e session du CCTF en 1999. Le point le plus important à souligner est que depuis 1999, le GPS n'est plus le seul moyen utilisé pour fournir des résultats de comparaisons d'horloges au BIPM à utiliser dans le calcul du TAI. Cela vient en réponse à la Recommandation S 7 adoptée lors de la 14^e session du CCTF en 1999. Actuellement, trois liaisons par aller et retour sur satellite sont utilisées pour le calcul du TAI : la liaison entre la PTB et le NPL, la liaison entre la PTB et le VSL, et celle entre l'USNO et le NPL. Comme nous l'avons dit précédemment, la station du TUG a cessé de fonctionner en l'an 2000.

Les comparaisons de temps s'effectuent en trois sessions d'une demi-heure par semaine. Nous aimerions effectuer ces comparaisons au moyen de sessions quotidiennes de vingt-cinq minutes, afin que les résultats soient espacés de manière régulière dans le temps, mais cela demande d'automatiser les stations terrestres, et tous les laboratoires participants ne l'ont pas encore fait.

Les liaisons par aller et retour sur satellite ont toutes été étalonnées au moyen d'une ou plusieurs des méthodes suivantes :

- station terrestre portable ;
- simulateur de satellite mis au point par M. de Jong ;
- comparaison avec les observations simultanées du GPS.

Il existe aussi plusieurs stations pour les comparaisons horaires par aller et retour sur satellite dans la région pacifique : l'AUS, le CRL, le CSAO, le NMIJ, le TL et le KRISS. Certaines de ces liaisons sont maintenant prêtes à fournir des résultats au BIPM, et des liaisons de ce type sont proposées entre le CRL et l'AUS, entre le CRL et le CSAO, et entre le CRL et le NMIJ ; la liaison entre le CRL et le TL sera bientôt opérationnelle. Une liaison horaire par aller et retour sur satellite entre le CRL et les stations du réseau européen est à l'étude, mais les satellites qui pourraient offrir ce service ne sont pas gérés par INTELSAT et ils seraient beaucoup plus onéreux à utiliser.

M. de Jong établit une liste de priorités pour le groupe de travail dans un avenir proche :

- augmenter le nombre de sessions (comme mentionné ci-dessus) et automatiser les stations terrestres ;
- établir un groupe de travail pour travailler à la liaison entre le réseau de la région pacifique et le réseau européen ;
- étalonner les stations qui y participent au moyen de stations terrestres portables utilisant la bande des fréquences X ;
- établir un bilan d'incertitude pour les comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite ;
- introduire d'autres liaisons par aller et retour sur satellite dans le calcul du TAI.

En conclusion à son rapport, M. de Jong remercie M. Kirchner au nom du groupe de travail pour sa contribution à ces activités.

Répondant aux commentaires de M. Quinn sur les limites ultimes de la méthode des comparaisons horaires par aller et retour sur satellite, M. Kirchner dit qu'il ne faut pas oublier que cette méthode date de vingt ans, et qu'elle n'avait pas été conçue à l'origine pour les comparaisons d'horloges. Par exemple, l'utilisation de bandes de fréquence plus larges, de taux de répétition supérieur et de fréquences porteuses plus élevées (par exemple, la bande K_U), ainsi qu'un fonctionnement en environnement contrôlé, pourraient apporter une amélioration substantielle des performances, à un niveau meilleur que 1×10^{-16} .

M. Lewandowski apporte quelques précisions à propos d'autres aspects des liaisons par aller et retour sur satellite servant au calcul du TAI.

Il dit que la section du temps du BIPM publie des rapports sur ces comparaisons depuis 1999 : ceux-ci donnent les résultats des comparaisons entre les techniques par aller et retour sur satellite et par le GPS pour chaque

liaison horaire individuelle. La section du temps dispose de plus de deux ans et demi de tels résultats, par exemple pour la liaison entre la PTB et le NIST, et l'avantage de la méthode des comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite par rapport à celle des observations simultanées du GPS est plus évident pour des durées moyennes d'une vingtaine de jours environ. La technique des comparaisons par aller et retour sur satellite devrait améliorer l'exactitude des liaisons horaires et elle a déjà été utilisée pour comparer la fréquence des fontaines étalons à césium et du TAI.

M. Lewandowski conclut en disant qu'il est souhaitable de diversifier les liaisons horaires pour continuer à améliorer la stabilité et la fiabilité du TAI ; à cette fin, la liaison entre l'USNO et le NPL est assurée par les méthodes de comparaison par aller et retour sur satellite, par observations simultanées du GPS, par utilisation des résultats fournis par des récepteurs du GPS et du GLONASS à canaux multiples, et fournis par des récepteurs à code P du GLONASS. L'étude et la comparaison des résultats de ces techniques diverses aideront le BIPM à introduire ces méthodes de comparaisons d'horloges dans le calcul du TAI le moment venu.

7.2 Mesures de phase du GPS : Rapport sur le projet pilote IGS/BIPM

L'IGS et le BIPM ont établi un projet pilote commun sur les comparaisons de temps et de fréquences par le GPS. Le but de ce projet pilote est d'étudier l'utilisation des mesures de phase et de code du GPS afin d'améliorer l'accès mondial aux mesures exactes de temps et de fréquence.

M. Ray présente les rapports CCTF/01-07a et 07b.

Il dit qu'une douzaine de stations de l'IGS sont situées dans des laboratoires de temps et participent au projet pilote IGS/BIPM : parmi ces laboratoires, cinq participent aussi au réseau de comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite entre l'Europe et l'Amérique du Nord. Il existe d'autres laboratoires équipés de récepteurs convenables, mais non agréés par l'IGS, et certains d'entre eux diffusent leurs résultats. Plusieurs types de récepteurs contribuent actuellement au projet pilote, le récepteur Ashtech Z12-T est bien adapté à des applications horaires car il peut être étalonné. M. Petit, de la section du temps du BIPM, a déjà présenté une méthode d'étalonnage absolu et différentiel de ce type de récepteur et une campagne d'étalonnage est en cours. L'évaluation du tout nouveau récepteur Javad Legacy a commencé, ainsi que celle des récepteurs bien connus AOA. La nécessité de contrôler la température des récepteurs eux-mêmes, des câbles et des antennes est reconnue.

Les progrès réalisés dans l'analyse des résultats de l'IGS comprennent entre autres la mise au point d'une nouvelle échelle de temps de l'IGS fondée sur un ensemble d'horloges de l'IGS pondérées de manière dynamique. Actuellement, cette échelle de temps est plus ou moins alignée sur le temps du GPS, et une liaison étroite à l'UTC devrait être établie après l'installation d'un plus grand nombre de récepteurs étalonnés dans les laboratoires de temps.

Ce produit diffusé de manière ultra-rapide par l'IGS fournit des prédictions quasiment en temps réel du temps conservé par les horloges placées à bord des satellites du GPS, avec une précision d'environ 20 ns (écart-type), précision limitée par l'instabilité de l'échelle de temps de référence de l'IGS.

Lors de la réunion de l'IGS Analysis Workshop, qui s'est tenue à l'USNO en septembre 2000, les recommandations suivantes, relevant de sujets traités au CCTF, ont été faites :

- promouvoir l'intégration complète des laboratoires de temps dans le réseau de l'IGS ;
- donner des informations sur l'exactitude et la précision des produits horaires ;
- établir une nouvelle échelle de temps de l'IGS ;
- promouvoir une prédiction de l'UTC pour des applications en temps réel ;
- promouvoir des méthodes d'étalonnage des récepteurs et de documentation, ainsi que leur dissémination dans les laboratoires horaires ;
- promouvoir une collaboration plus étroite avec les fabricants de récepteurs pour en améliorer les performances ;
- revoir la liste d'adresses électroniques des participants au projet IGS/BIPM ;
- normaliser les échanges de résultats horaires.

En conclusion, M. Ray dit que les laboratoires savent bien quels sont les avantages à installer des stations de l'IGS sur leur site, et qu'il faut renforcer cette implantation. Il recommande que le projet pilote devienne opérationnel à dater du 31 décembre 2002, et que le CCTF étudie la possibilité d'utiliser ses résultats dans le calcul du TAI lors de sa prochaine session.

Pour terminer, M. Ray présente un projet de recommandation (CCTF 2) à ce sujet, projet qui sera examiné au point 13 de l'ordre du jour « Recommandations ».

7.3 **Rapport du Sous-groupe de travail du CCTF sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS**

Le CCTF n'a pas reçu de rapport officiel de ce groupe, mais le président dit que M. Levine a envoyé une lettre (CCTF/01-27) et lui demande de la présenter.

M. Levine dit que depuis que l'accès sélectif au GPS a été désactivé en mai 2000, la précision des mesures horaires faites avec des récepteurs du GPS autonomes s'est grandement améliorée. Il note aussi que la plupart des laboratoires nationaux de métrologie qui conservent leurs propres réalisations de l'UTC enregistrent régulièrement les différences $[UTC(k) - GPS]$. Par conséquent, l'échelle de temps du GPS est maintenant un moyen très efficace de diffusion en temps réel des réalisations locales $UTC(k)$, à condition de fournir aux utilisateurs les mesures de $[UTC(k) - GPS]$.

M. Levine poursuit en disant que de nombreux laboratoires nationaux de métrologie offrent au grand public un accès électronique à leurs mesures de $[UTC(k) - GPS]$, et suggère dans sa lettre que le BIPM étudie la possibilité de publier ces résultats, qu'il reçoit régulièrement et archive, dans un format adapté, à déterminer. Il souligne qu'il fait cette suggestion en qualité de président du Sous-groupe de travail du CCTF sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS ou le GLONASS (CGGTTS), et pas au nom du NIST, qui n'a pas encore pris de décision officielle à ce sujet. Enfin, M. Levine attire l'attention du CCTF sur un projet de recommandation concernant des directives techniques (CCTF 5) au sujet des récepteurs du GPS et du GLONASS, disant que ces directives ont été rédigées après consultation de collègues de nombreux laboratoires.

En réponse à la suggestion de M. Levine au sujet de la publication des résultats du GPS, Mme Arias dit que le BIPM a aussi examiné cette possibilité, et souligne que la *Circulaire T* contient suffisamment d'informations pour permettre aux utilisateurs de récepteurs du GPS de lier leurs résultats aux réalisations locales $UTC(k)$. M. Levine répond que cette proposition a l'avantage de permettre aux utilisateurs d'effectuer des comparaisons horaires par observations simultanées strictes.

M. Ray dit que, bien qu'il soit d'accord en principe avec la suggestion de M. Levine, il n'est pas évident qu'un utilisateur non averti soit capable d'interpréter le format des fichiers du CGGTTS et d'y appliquer les corrections nécessaires.

M. Wolf souligne que les données brutes des observations simultanées du GPS présentées au format du CGGTTS utilisé pour le calcul du TAI sont déjà accessibles sur le serveur FTP du BIPM. M. Levine répond qu'il ne le savait pas, et retire donc son projet de recommandation ; il étudiera ultérieurement cette question.

Le président demande à Mme Arias d'étudier aussi cette question, et de déterminer si le BIPM peut faire quelque chose pour faciliter l'accès à ces données, suivant la suggestion de M. Levine.

M. Laverty suggère qu'il pourrait être utile d'étendre la suggestion de M. Levine aux résultats obtenus par tous les types de comparaisons d'horloges.

M. Palacio et M. de Jong expriment leur préoccupation quant au libre accès aux fichiers de données des laboratoires, car certains utilisateurs pourraient les utiliser (correctement ou pas) pour prétendre à une traçabilité qu'ils n'ont pas.

8 LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE ET LES RÉFÉRENCES SPATIO-TEMPORELLES

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

M. Petit présente un résumé du rapport CCTF/01-23.

Il rappelle que le Comité mixte BIPM/UAI sur les systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale (JCR) a été créé en 1997 par l'UAI, et qu'il travaille en collaboration avec le Groupe de travail de l'UAI sur la relativité en mécanique céleste et en astrométrie (RCMA). Le Comité mixte a pour mission « d'établir des définitions et des conventions afin de fournir un cadre relativiste cohérent pour toutes les activités dans le domaine des références spatio-temporelles et la métrologie à un niveau d'incertitude suffisamment faible, d'établir un système de notation uniforme pour les grandeurs et unités, et d'élaborer des définitions et des conventions adoptées aux besoins pratiques des utilisateurs. »

Le groupe de travail RCMA a mis au point un cadre cohérent (cadre 2000 de l'UAI) pour la définition des systèmes de référence célestes barycentrique et géocentrique au premier niveau d'approximation post-newtonienne. Le Comité mixte a donc centré ses activités sur des applications liées aux mesures de temps et de fréquence dans le système solaire, pour soutenir les nombreuses missions spatiales à venir utilisant des horloges embarquées. Son travail a abouti à deux résolutions adoptées par l'assemblée générale de l'UAI en 2000 :

Résolution B1.5 : « Extension du cadre relativiste pour les transformations de temps et pour la réalisation des temps-coordonnée dans le système solaire ». Cette résolution fournit une formule explicite pour les transformations d'échelles de temps ainsi que l'incertitude associée, et les domaines de validité (0,2 ps dans le domaine temporel et 5×10^{-18} dans le domaine fréquentiel).

Résolution B1.9 : « Redéfinition du Temps terrestre (TT) ». Cette résolution fournit une nouvelle définition de TT et fixe sa variation linéaire par rapport au temps coordonnée géocentrique, TCG. Les composantes de l'incertitude de TT dues aux incertitudes dans la réalisation du géoïde sont ainsi éliminées.

M. Petit termine sa présentation en disant que l'adoption de ces résolutions répond aux objectifs originels du JCR, qui a été dissous en janvier 2001. Le BIPM a alors proposé que le RCMA poursuive ces activités, que le mot « métrologie » soit ajouté à son nom, et que la liste des membres soit complétée en conséquence. Cette proposition a été adoptée par le secrétaire général de l'UAI en janvier 2001, donnant naissance au RCMAM (le Groupe de travail de l'UAI sur la relativité en mécanique céleste, en astrométrie et dans le domaine de la métrologie).

M. Fukushima poursuit la discussion sur la redéfinition de TT présentée par M. Petit, en disant qu'au niveau de 10^{-16} , la représentation newtonienne du géoïde n'est plus fiable, à cause des modifications de son potentiel moyen, dues aux changements séculiers dans la distribution des masses de la Terre. La position des surfaces équipotentiels du géoïde est aussi influencée par l'effet des marées lunaires et solaires. Pour les besoins de la géodésie, il s'est avéré nécessaire d'éliminer les fluctuations temporelles du potentiel du géoïde en utilisant une moyenne temporelle. Cependant, ceci n'est pas acceptable pour les calculs horaires, et de plus, les fluctuations du géoïde ne sont pas assez bien caractérisées ni comprises pour corriger TT avec exactitude en-dessous du niveau de 10^{-16} selon sa définition actuelle. L'UAI a donc décidé d'introduire une surface équipotentielle fixe pour définir la

nouvelle échelle de temps TT, ce qui permettra de l'utiliser à de très bons niveaux d'exactitude sans qu'il y ait d'incohérence avec sa définition.

Le président demande à M. Petit de commenter l'impact de ces résolutions sur le TAI. M. Petit répond que cette question doit être examinée avec soin, puisque le TAI est une réalisation de TT. Le président demande donc à la section du temps du BIPM de suivre de près ces progrès et de déterminer s'il est nécessaire d'entreprendre une action quelconque.

M. Levine demande quel est l'impact de ces résolutions sur les corrections actuellement appliquées aux étalons primaires de fréquence en fonction de l'altitude de l'étalon par rapport au géoïde. M. Fukushima répond que la surface équipotentielle sur laquelle la nouvelle définition de TT est fondée est, pour des applications pratiques, équivalente au géoïde actuel.

M. Steele observe que la correction relativiste publiée pour les étalons primaires de fréquence du NIST a une incertitude de l'ordre de 10^{-16} , comparable aux changements pouvant résulter de la nouvelle définition de TT. M. Sullivan répond qu'au moment de son calcul (qui n'a pas été fait par le NIST) cette incertitude était insignifiante.

M. Petit demande que les laboratoires qui utilisent des étalons primaires de fréquence n'apportent pour l'instant aucune modification à leur fréquence suite à la nouvelle définition de TT. Quand l'incertitude des étalons primaires deviendra meilleure que 10^{-16} , le BIPM étudiera cette question et présentera un rapport.

8.2 Rapport sur le Conventions Product Centre de l'IERS

M. Petit, présente un résumé du rapport CCTF/01-24, en qualité de co-directeur du Conventions Product Centre de l'IERS.

Il dit qu'uniformiser les définitions des systèmes de référence spatio-temporels prend de plus en plus d'importance, en particulier pour des activités fondées sur des mesures globales, telles que les techniques astro-géodésiques qui fournissent les données brutes utilisées par l'IERS. L'IERS établit donc une série de conventions, qui fournissent ces définitions ainsi que les procédures de transformation entre les différents systèmes de référence.

À la demande de l'IERS, le BIPM et l'USNO ont collaboré avec eux à l'établissement du Conventions Product Centre (CPC) depuis le 1^{er} janvier 2001. Le CPC a pour mission de conserver sous une forme électronique et de réviser les conventions de l'IERS et des logiciels associés, d'étudier la

cohérence entre les procédures utilisées par les centres d'analyse de l'IERS et les conventions adoptées, et d'analyser l'impact des incohérences éventuelles sur les produits de l'IERS.

En conclusion à son rapport, M. Petit dit que M. McCarthy est l'autre co-directeur de ce centre, et que de nombreux scientifiques dans le monde contribuent à ces activités. M. McCarthy ajoute que le CPC envisage de publier des Conventions révisées en 2001.

9 HORLOGES DANS L'ESPACE

Le président invite M. Thomann à présenter au CCTF le projet ACES (Atomic Clock Ensemble in Space).

M. Thomann dit que le projet ACES a d'abord été proposé à l'Agence spatiale européenne en 1994, et qu'il est envisagé de placer plusieurs horloges atomique dans l'espace sur la station spatiale internationale. Les objectifs de ce projet sont les suivants :

- démontrer qu'il est possible de placer et d'utiliser des horloges du plus haut niveau technologique dans l'espace ;
- réaliser des vérifications liées à la physique fondamentale.

Depuis la proposition initiale, des limitations de masse et de puissance ont été imposées à l'équipement ACES embarqué, réduisant à deux le nombre d'horloges dans l'espace : une horloge à atomes de césium refroidis (PHARAO) fabriquée par le BNM-LPTF, et un maser à hydrogène mis au point par l'Observatoire de Neuchâtel. Il a aussi été décidé en avril 2001, en raison de ces mêmes limitations, de supprimer la liaison optique entre le sol et l'espace, et de se borner à une liaison micro-onde et un récepteur GPS pour assurer une liaison précise entre les horloges au sol et les horloges embarquées.

Nous espérons que le coût de la station terrestre assurant la liaison micro-onde sera inférieur à 100 000 U.S. \$.

Les objectifs du matériel embarqué sont les suivants :

- faire fonctionner une horloge dans une bande de fréquence d'une largeur inférieure à 50 mHz avec une stabilité relative de fréquence $\sigma_y(\tau)$ meilleure que $10^{-13} \tau^{-1/2}$;
- démontrer que l'exactitude de l'horloge est voisine de 10^{-16} ;
- comparer des échelles de temps terrestres au niveau mondial avec une exactitude temporelle de 30 ps et une exactitude de fréquence relative de 10^{-16} , et utiliser ces comparaisons dans le calcul du TAI ;
- mesurer le décalage de fréquence relativiste dans le rouge avec une amélioration de la sensibilité d'un facteur de l'ordre de vingt-cinq par rapport aux mesures précédentes ;
- chercher à mettre en évidence une éventuelle dérive de la valeur de la constante de structure fine avec une amélioration de la sensibilité d'un facteur cent par rapport aux mesures précédentes ;
- chercher à mettre en évidence une éventuelle anisotropie de la vitesse de la lumière avec une amélioration de la sensibilité d'un facteur dix par rapport aux mesures précédentes.

M. Thomann conclut sa présentation en disant que le groupe ACES est très intéressé à collaborer avec d'autres groupes, comme l'équipe américaine PARCS (voir ci-dessous), et encourage tous ceux qui sont intéressés par cette expérience à le contacter.

Le président remercie M. Thomann, et invite M. Sullivan à présenter au CCTF le projet PARCS (Primary Atomic Reference Clock in Space) et les autres expériences américaines d'horloges dans l'espace.

Avant de commencer sa présentation, M. Sullivan répond au dernier commentaire de M. Thomann, en disant que la NASA et l'ESA se sont déjà réunies pour discuter de la coordination des expériences ACES et PARCS. Ces deux agences souhaitent placer leurs horloges dans l'espace en même temps, et recherchent un moyen de connecter ces horloges entre elles sur la Station spatiale internationale.

M. Sullivan poursuit son rapport sur les expériences américaines d'horloges dans l'espace. Il y a actuellement trois expériences américaines fondées sur des horloges placées à bord de la station spatiale internationale :

- le projet PARCS, une horloge à césium pulsée refroidie par laser, mise au point conjointement par le NIST, le JPL, l'Harvard-Smithsonian et l'université de Turin ;

- le projet RACE (Rubidium Atomic Clock Experiment), une horloge à rubidium pulsée refroidie par laser, mise au point conjointement par l'université de Yale et le JPL ;
- le projet SUMO (Superconducting Microwave Oscillator), un oscillateur à micro-onde ultra-stable mis au point par l'université de Stanford, qui devrait être placé dans l'espace concurremment au projet RACE, mais qui suscite des doutes parce qu'il demande des équipements à basse température.

Le dernier projet présenté par M. Sullivan est le projet GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), qui doit fournir une carte précise du champ gravitationnel terrestre au moyen de mesures micro-ondes d'exactitude élevée et de mesures par GPS de la distance entre deux satellites en orbite polaire. Les satellites GRACE devraient être mis sur orbite en 2001.

M. Kovalevsky demande si la liaison micro-onde utilisée dans les expériences de l'ESA pourrait aussi être utilisée dans les expériences américaines, si les horloges étaient embarquées en même temps. M. Sullivan répond que ce n'est pas possible. Il dit que les deux ensembles d'horloges seront montés à différents emplacements sur la station spatiale internationale ; une liaison par laser entre les deux a été envisagée mais a été déclarée irréalisable. M. Thomann ajoute qu'une liaison par câble entre les deux est hors de question, bien que l'emplacement des horloges ne soit pas encore fixé. Il dit que la meilleure méthode pour comparer les résultats des deux ensembles d'horloges sera probablement d'effectuer des mesures à partir de la Terre.

Pour clore la discussion sur les horloges dans l'espace, le président note qu'une grande partie des expériences dans l'espace en cours et proposées semblent fondées sur des horloges ou des instruments de mesure du temps de précision.

10 FUTURS SYSTÈMES DE NAVIGATION SATELLITAIRES

M. Laverty présente un rapport (CCTF/01-34) sur les activités du GalileoSat Working Group on the Galileo Time Interface (WGGTI), dont il est président et dont d'autres membres du CCTF font partie.

M. Laverty dit que le WGGTI a été établi par l'ESA après consultation des Communautés européennes, et que tous les États membres de l'ESA sont invités à y participer. Les missions du WGGTI sont les suivantes :

- étudier les demandes liées au temps des stations au sol du système GalileoSat ;
- présenter des recommandations à l'équipe GalileoSat.

La première réunion du WGGTI s'est tenue en juin 2000, et son rapport final a été soumis à l'ESA en mars 2001 ; les conclusions du groupe ont été présentées à plusieurs conférences.

Le WGGTI a centré ses études sur trois domaines :

- les comparaisons par GPS (en termes de coût et de performances) ;
- l'interface Galileo-UTC ;
- les comparaisons de temps et la synchronisation.

Le GPS sert de référence pour l'évaluation des coûts et des performances d'un système satellitaire de navigation à couverture globale (GNSS), et la disponibilité de récepteurs des systèmes combinés GPS et Galileo serait le meilleur moyen de commercialiser Galileo.

Le WGGTI a donc recommandé que, pour les activités liées au domaine du temps :

- Galileo soit indépendant du GPS ;
- Galileo soit compatible avec le GPS ;
- les performances de Galileo dans le domaine du temps soient comparables à celles du GPS ;
- Galileo anticipe les besoins futurs des utilisateurs (le GPS va s'améliorer).

Le WGGTI fixe les objectifs suivants à Galileo en matière d'échelles de temps (notons que GST est l'abréviation de Galileo System Time) :

- décalage de temps [$GST - TAI$] : 33 ns (2σ) avec une limite de 50 ns, 95 % du temps sur une période d'un an ;

- décalage relatif de fréquence [$GST - TAI$] : $5,5 \times 10^{-14}$ (2σ).

Dans sa conception actuelle, Galileo (qui n'est pas encore finalisé) comprend trente satellites MEO dans l'espace, chacun équipé de deux masers à hydrogène passifs et de deux étalons à rubidium. Le segment terrestre comprend douze stations d'orbitographie et de synchronisation, deux installations de traitement des données et deux stations fournissant un temps précis, équipées chacune de deux masers à hydrogène actifs et de douze horloges à césium.

Le WGGTI a recommandé que :

- le GST soit auto-suffisant à court terme ;
- le GST soit piloté d'après une prédiction de TAI à moyen terme (les détails n'ont pas encore été fixés), ce qui aura pour résultat un pilotage du GST par le TAI à long terme.

Le GST doit donc fonctionner en continu et être fondé sur le TAI, et il doit diffuser le décalage par rapport à l'UTC.

M. Laverty note que les groupes du secteur industriel qui soutiennent l'expérience Galileo sont favorables à ce qu'il n'y ait qu'une seule source de référence à l'UTC. En conclusion, il dit que le WGGTI a souligné dans son rapport les avantages d'une redondance, en particulier dans le domaine des liaisons pour les comparaisons d'horloges (y compris les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite), la détermination des orbites de satellites et les algorithmes pour la synchronisation du temps, et les liaisons à l'UTC, et que certains de ces principes sont appliqués pendant les essais du Galileo System Test Bed.

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

M. Matsakis demande comment ont été fixées les limites d'exactitude pour les signaux horaires et les fréquences. M. Laverty répond que les performances du GPS ont servi de référence dans ce domaine, et il ajoute que les groupes du secteur de l'industrie qui soutiennent l'expérience Galileo ne sont pas convaincus de ces besoins.

Le président demande si des stations terrestres supplémentaires sont nécessaires pour assurer l'intégrité, et M. Laverty répond que ce n'est pas clair pour le moment, même si l'on a pensé à utiliser les stations EGNOS.

M. Matsakis observe que dans sa configuration actuelle, le système Galileo repose essentiellement sur le lien montant des segments terrestres et qu'il y a peu de liaisons entre satellites. Il suggère que des liaisons inter-satellites

amélioreraient l'intégrité du système. M. Laverty répond que ces détails n'ont pas encore été mis au point, mais cette possibilité a été évoquée.

11 LES COMPARAISONS CLÉS ET L'ARRANGEMENT DE RECONNAISSANCE MUTUELLE DANS LE DOMAINE DU TEMPS ET DES FRÉQUENCES

Le président invite M. de Jong à présenter le rapport (CCTF/01-19) du Groupe de travail du CCTF sur le MRA, dont il est le président.

M. de Jong dit que le groupe de travail a été chargé d'examiner les conséquences du MRA pour le CCTF et de présenter un rapport à ce sujet. Le groupe comprend, outre lui-même, MM. Douglas (NRC), Lepek (INPL), Ohshima, Palacio et Sullivan.

Le groupe de travail note que le but du MRA est d'établir le degré d'équivalence entre les laboratoires nationaux de métrologie, à partir d'une série de comparaisons clés. Les degrés d'équivalence déduits d'une comparaison clé sont définis comme les différences entre les valeurs locales et la valeur de référence, et les incertitudes associées.

Le groupe de travail considère que l'EAL est la référence commune aux horloges maintenues par les laboratoires nationaux de métrologie qui contribuent au calcul du TAI. Ainsi le calcul du TAI et la publication de la différence $[UTC - UTC(k)]$ dans la *Circulaire T* pourraient être considérés comme constituant la comparaison clé du CCTF. Toutefois, les incertitudes associées à $[UTC - UTC(k)]$ ne figurent pas dans la *Circulaire T* et ce problème doit être résolu.

Le groupe de travail recommande que :

- le calcul du TAI et d'UTC soit défini comme la comparaison clé du CCTF ;
- la valeur de référence de la comparaison clé soit l'UTC.

Les définitions ci-dessus permettent de connaître le degré d'équivalence de l'échelle de temps $UTC(k)$ par rapport à l'UTC. De plus, comme l'unité d'échelle de l'UTC est connue par rapport à la seconde du SI, la traçabilité au SI est assurée.

Le calcul des incertitudes de $[UTC - UTC(k)]$ demande de connaître :

- pour les horloges qui contribuent à l' $UTC(k)$: la stabilité et la valeur des retards et des incertitudes sur ces retards pour les liaisons entre ces horloges et l' $UTC(k)$;
- pour le lien entre l' $UTC(k)$ et le TAI ou l' UTC : la stabilité, la valeur des retards et des incertitudes sur ces retards pour les récepteurs du GPS et les émetteurs-récepteurs utilisés dans les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite ; les incertitudes sur les coordonnées des antennes ; les incertitudes des retards ionosphériques ; les incertitudes sur les retards des répéteurs de satellite pour les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite, etc.

M. de Jong présente trois autres recommandations :

- Le BIPM devrait commencer à calculer les incertitudes de $[UTC - UTC(k)]$ en utilisant, entre autres, les estimations des composantes d'incertitudes mentionnées ci-dessus, et en remplaçant les estimations par des mesures dès que ces dernières seront disponibles. Des comparaisons régionales supplémentaires devraient être organisées pour étalonner de manière absolue ou relative les équipements pour les comparaisons d'horloges.
- D'autres méthodes d'étalonnage des équipements pour les comparaisons d'horloges devraient être étudiées.
- L'identificateur de la comparaison clé devrait être CCTF-K2001.UTC.

En conclusion à son rapport, M. de Jong évoque trois problèmes qui devront être résolus et quatre actions qui réclament l'attention :

Problèmes :

- les laboratoires qui ne sont pas des laboratoires nationaux de métrologie et qui contribuent au TAI ;
- les pays qui possèdent plusieurs laboratoires nationaux de métrologie ;
- les pays qui ne sont pas signataires de la Convention du Mètre.

Actions qui réclament l'attention :

- l'établissement de la liste des aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMC) dans le domaine du temps et des fréquences ;
- la coordination entre les organisations régionales de métrologie pour la détermination et la fourniture des données utilisées pour le calcul des incertitudes ;

- l'avenir du Groupe de travail sur le MRA ;
- l'organisation pratique de campagnes d'étalonnage des équipements pour les comparaisons d'horloges.

Le président remercie M. de Jong et le groupe de travail pour leur rapport, et dit que M. Quinn souhaite présenter une proposition relative à ce point de l'ordre du jour ainsi qu'au point 6 de l'ordre du jour sur la « Nomenclature conventionnelle pour l'UTC ».

M. Quinn propose la définition suivante :

« Les laboratoires participant à l'établissement du TAI sont :

- les laboratoires nationaux de métrologie et les instituts officiellement désignés par les États membres de la Convention du Mètre et par les associés à la Conférence générale, c'est-à-dire figurant sur la liste des signataires du MRA ;
- les autres institutions ou observatoires chargés officiellement de la conservation des échelles de temps pour les besoins scientifiques de la navigation et de l'astronomie. »

M. Quinn suggère aussi que le cas des laboratoires, autres que les laboratoires nationaux de métrologie, responsables du temps dans certains pays pourrait être traité de manière satisfaisante par un échange de lettres.

M. Kovalevsky dit qu'il ne voit pas d'objection à ce que des laboratoires autres que les laboratoires nationaux de métrologie participent à l'établissement du TAI, et demande comment traiter le cas d'un laboratoire d'un pays non membre de la Convention du Mètre. M. Quinn répond qu'un seul laboratoire se trouve dans ce cas, à Taïwan (Chine), et que le problème devrait être résolu quand Taïwan deviendra associé à la Conférence générale.

M. Ohshima demande si tous les laboratoires faisant partie de la première catégorie mentionnée par M. Quinn pourront voir leurs aptitudes figurer dans l'annexe C du MRA, s'il existe plusieurs laboratoires nationaux de métrologie ou instituts désignés dans le pays. M. Quinn assure que oui.

M. Palacio suggère que les institutions classées dans la seconde catégorie par M. Quinn ne devraient pas figurer dans l'annexe C du MRA parce qu'ils ne délivrent pas de certificats d'étalonnage. M. Quinn répond que seuls les instituts désignés, et figurant donc dans la liste des signataires du MRA, seront inclus dans l'annexe C.

M. Quinn dit qu'il est entièrement d'accord avec M. de Jong et avec les conclusions du groupe de travail sur le MRA : la procédure de calcul du TAI et de l'UTC n'a pas besoin d'être modifiée pour répondre aux besoins du

MRA. Il est d'avis qu'il ne doit y avoir qu'une seule comparaison clé pour le CCTF, et dit que la nomenclature proposée est acceptable, peut-être faudrait-il ajouter l'année à son nom. Enfin, il dit que le BIPM travaille déjà à l'adjonction des incertitudes sur $[UTC - UTC(k)]$ à la *Circulaire T*.

M. de Jong est d'accord avec la suggestion d'ajouter l'année au nom de la comparaison clé, puisque les résultats du *Rapport annuel de la section du temps du BIPM* seront utilisés pour l'annexe B du MRA.

En accord avec M. de Jong, M. Quinn dit que l'alternative serait de considérer cette comparaison comme une comparaison du BIPM et pas comme une comparaison clé du CCTF, car elle se déroule en continu. Il ajoute qu'il ne souhaite pas encourager les organisations régionales de métrologie à entreprendre leurs propres comparaisons clés dans ce domaine, parce que ce n'est pas nécessaire.

Il est décidé que le nom de la comparaison clé du CCTF reste celui proposé, c'est-à-dire CCTF-K2001.UTC.

M. Sullivan souligne qu'une partie de la comparaison clé consiste dans la mesure des retards et autres tâches annexes, tâches qui pourraient être tout aussi bien organisées au niveau régional par les organisations régionales de métrologie. Le président dit que le CCTF est dans son ensemble d'avis que l'UTC sera la valeur de référence de la comparaison clé du CCTF, et que cette comparaison sera organisée par le BIPM ; les organisations régionales de métrologie coordonneront des activités telles que les mesures des retards et autres recherches connexes. M. de Jong ajoute que ces activités sont qualifiées de comparaisons supplémentaires dans le MRA, et pourraient être dénommées CCTF-S2001.GPSCAL, etc.

M. Ohshima dit que n'importe quelle organisation peut envoyer des résultats au BIPM et participer aux activités des organisations régionales de métrologie, et il demande si cela signifie que n'importe quel pays peut participer à la comparaison clé. M. Quinn répond que pour participer à la comparaison clé, le pays doit être membre de la Convention du Mètre ou associé à la Conférence générale, et que l'un des rôles des organisations régionales de métrologie est d'encourager leurs membres à acquérir ce statut.

M. Lavery demande si l'on doit mentionner l'UTC plutôt que la différence $[UTC - UTC(k)]$ dans l'annexe C du MRA et donc dans la liste des aptitudes des laboratoires. M. de Jong répond que l'échelle de temps, ainsi que l'intervalle de temps et la fréquence, peuvent tous être dérivés de la comparaison clé, et il ne voit aucune raison pour que l'UTC n'apparaisse pas

dans la description d'une aptitude. M. Lavery demande donc que l'UTC soit ajouté à la liste des CMCs.

M. Quinn souligne que les organisations régionales de métrologie sont responsables des CMCs, et dit que l'on recommandera d'ajouter l'UTC à la liste des CMCs.

Le président propose que le Groupe de travail sur le MRA poursuive ses activités et que les organisations régionales de métrologie soient encouragées à organiser des étalonnages et des mesures connexes. Il demande à M. de Jong de présenter les nouvelles missions de ce groupe.

M. de Jong propose que jusqu'à la prochaine session du CCTF le groupe de travail soit chargé des missions suivantes :

- d'exécuter toutes les actions mentionnées dans le MRA qui relèvent de la responsabilité du CCTF et qui doivent être effectuées avant la prochaine session du CCTF ; les décisions à ce sujet devront être prises après consultation du président du CCTF, et seront considérées comme provisoires ;
- de coordonner toute action qui s'avérerait nécessaire avec les organisations régionales de métrologie ;
- de servir de point de contact du CCTF pour les questions liées au MRA ;
- de présenter un rapport à la prochaine session du CCTF.

Cette proposition ne faisant l'objet d'aucune objection, le président note que les missions du groupe sont approuvées.

M. Fukushima demande ce qui se passerait si une organisation internationale privée souhaitait faire reconnaître son échelle de temps. M. Kovalevsky répond que cette demande pourrait être satisfaite en établissant la traçabilité à un des laboratoires signataires du MRA, et que seuls les laboratoires nationaux de métrologie et les laboratoires désignés seront reconnus dans le MRA.

M. Quinn ajoute que le MRA est un arrangement intergouvernemental, et que les gouvernements peuvent donc désigner des laboratoires responsables du temps.

M. Lavery cite l'exemple de l'université de Leeds, qui contribue au TAI et figure dans la *Circulaire T*, mais n'est pas désignée par le gouvernement britannique comme responsable du temps. M. Quinn répond que le BIPM peut, à sa discrétion, accepter d'inclure des organisations dans la *Circulaire T* pour des raisons scientifiques, mais pas pour des raisons commerciales.

12 PROGRAMME DE TRAVAIL DU BIPM

En réponse à une question de M. Banerjee qui souhaite savoir à quelle date le BIPM envisage d'inclure les incertitudes de $[UTC - UTC(k)]$ dans la *Circulaire T*, M. Quinn dit que le BIPM va essayer de le faire à dater du 1^{er} mars 2002, mais il ajoute que cela demandera une étroite coopération avec les laboratoires nationaux de métrologie.

Le président demande ensuite à M. Quinn de présenter aux participants le programme de travail de la section du temps du BIPM.

M. Quinn dit que la tâche principale de la section du temps du BIPM est de produire les résultats qui sont publiés dans la *Circulaire T* et dans d'autres bulletins. La section du temps travaille à l'automatisation du calcul du TAI et de l'UTC ; quand elle y sera parvenue, les membres de la section auront plus de temps à consacrer au calcul de nouveaux produits tels que TAIp et UTCp.

À plus long terme, M. Quinn dit qu'il aimerait savoir comment est perçue la manière dont le BIPM répondra aux questions qui se posent du fait de l'amélioration rapide de l'exactitude des étalons primaires de fréquence, en particulier quand l'exactitude aura atteint un niveau tel que les résultats des comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite limiteront les bénéfices de leur contribution au TAI.

Tout en reconnaissant la possibilité d'améliorer les performances des comparaisons par aller et retour sur satellite, M. Quinn dit qu'il pense que le BIPM devrait acquérir l'aptitude à transporter une horloge convenable entre les laboratoires possédant les meilleurs étalons de fréquence. Il souligne qu'il ne propose pas que le BIPM mette au point une horloge de ce type ; elle serait achetée ou fabriquée en collaboration avec des institutions compétentes.

M. Levine approuve la proposition de M. Quinn, disant que le BIPM possède une grande expérience en ce qui concerne la circulation d'étalons de référence pour les comparaisons. Il ajoute que les meilleurs étalons primaires de fréquence ne sont pas tous capables de fonctionner en continu à l'heure actuelle, et ne peuvent donc être comparés de manière régulière, même si la technique de comparaisons par aller et retour sur satellite ou d'autres techniques similaires étaient suffisamment exactes.

M. Riehle approuve aussi la proposition de M. Quinn, mais demande si les étalons voyageurs doivent être des étalons micro-ondes ou optiques.

M. Quinn répond qu'il n'a pas de point de vue arrêté à ce sujet, et propose de consulter largement les spécialistes. Il ajoute que le BIPM maîtrise déjà la technologie des peignes à impulsions femtosecondes nécessaire pour comparer les étalons optiques aux étalons micro-ondes.

M. Matsakis remarque que M. Quinn s'est fixé un objectif élevé, mais que le BIPM devrait aussi se consacrer à obtenir une précision d'une nanoseconde pour les comparaisons d'horloges actuelles. M. Quinn répond qu'il n'est pas prévu de faire quoi que ce soit à ce sujet qui affecte le travail actuel et les objectifs de la section du temps, mais il pense qu'il faut maintenant réfléchir aux propositions qu'il a faites.

M. Granveaud souligne que l'exactitude des étalons primaires de fréquence approchera de 1×10^{-16} d'ici quelques années, et le BNM-LPTF sait par expérience que la réalisation d'une horloge portable d'une exactitude comparable demande beaucoup de travail. Cependant, les expériences ACES et PARCS ont des objectifs très similaires, ainsi il sera très profitable de se tenir au courant de la mise en œuvre de ces projets et de combiner l'expérience de plus de douze laboratoires qui travaillent sur des problèmes connexes.

M. Domnin dit qu'il est nécessaire d'établir un système très souple de comparaisons de fréquences qui soit fondé à la fois sur des transitions optiques et micro-ondes.

Le président demande à M. Kirchner de commenter la possibilité d'améliorer la technique de comparaison par aller et retour sur satellite pour répondre aux besoins évoqués. M. Kirchner présente à nouveau au CCTF ses conclusions (présentées au point 7.1 de l'ordre du jour « Rapport du Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite »), et ajoute qu'il ne voit pas de limite claire aux progrès éventuels de la technique de comparaison par aller et retour sur satellite, puisque, par exemple, très peu de recherches ont été faites sur les liaisons optiques par aller et retour. D'autre part, il dit qu'il pense que toutes les méthodes prometteuses de comparaisons d'horloges doivent être étudiées et expérimentées.

M. Laverty suggère que la section du temps du BIPM devrait maintenir, voire étendre ses interactions avec la communauté des géodésistes et des astronomes, et que la mise au point de nouvelles échelles de temps est importante.

M. Quinn remercie les membres du CCTF de leur soutien et de leurs suggestions, et souligne à nouveau que le programme de travail actuel de la section du temps ne sera pas affecté par la proposition qu'il a faite.

13 RECOMMANDATIONS

CCTF 1 (2001) : Recommandation sur les représentations secondaires de la seconde

Le président demande à M. Sullivan de présenter cette recommandation.

M. Sullivan dit que cette recommandation résulte de discussions informelles lors de la précédente session du CCTF, et qu'elle n'a pas pris sa source au NIST. Le but de cette recommandation est de mettre au point une structure officielle pour étudier les résultats des étalons de fréquence d'exactitude élevée et mettre ces résultats à la disposition du BIPM, afin qu'ils contribuent au TAI (notant que les étalons autres que ceux à césium ne réalisent pas la seconde du SI et ne peuvent donc contribuer au TAI en qualité d'étalons primaires). Cette structure fournira un mécanisme bien établi pour évaluer les performances de nouveaux types d'étalons de fréquence, et ainsi pourrait contribuer à la procédure de décision au cas où il s'avérerait nécessaire de redéfinir la seconde du SI.

M. Kovalevsky approuve l'esprit de cette recommandation, et suggère de créer un groupe de travail sur les représentations secondaires de la seconde.

Après une longue discussion sur la forme et le contenu de la mise en pratique proposée, et sur la possibilité de la relier à celle du mètre, M. Quinn fait remarquer que la mise en pratique de la définition du mètre présente plusieurs moyens de réaliser le mètre, tous sont équivalents à sa définition, laquelle n'est généralement pas réalisée directement. La situation de la seconde du SI est différente, puisqu'il existe déjà une réalisation directe de la seconde et que la mise en pratique de la définition de la seconde du SI devrait, en toute logique, faire seulement référence à l'étalon à césium. Il suggère que dans le contexte où l'on disposerait d'autres méthodes pour la réalisation de la seconde du SI, les mots « représentation secondaire » soient utilisés de préférence à « autres méthodes de réalisation », et que la mise en pratique de la définition de la seconde du SI proposée soit alors remplacée

par une liste de représentations de la seconde. M. Sullivan approuve cet argument.

La recommandation est adoptée après quelques modifications.

Le président dit que le groupe de travail proposé par M. Kovalevsky sera établi, et qu'il examinera ces questions. Il propose que le Groupe de travail du CCTF sur les représentations secondaires de la seconde soit chargé des missions suivantes :

- examiner si la Recommandation CCTF 1 (2001) est mise en pratique ;
- établir des liens avec le CCL ;
- proposer une liste de fréquences à la prochaine session du CCTF ;
- consulter à ce sujet les laboratoires membres du CCTF.

Le président demande au BNM-LPTF, à l'IEN, au NIST, au NPL, au NRC, au NMIJ, à la PTB et au VNIIFTRI de suggérer des noms de spécialistes qui seraient chargés en commun avec un délégué du CCTF de remplir les missions de ce groupe. Pour terminer, il demande à M. Quinn d'établir ce groupe de travail. M. Quinn accepte de le faire.

CCTF 2 (2001) : Recommandation sur les comparaisons de temps et de fréquences utilisant des mesures de phase et de code des signaux du Global Positioning System (GPS)

La recommandation est adoptée sans changement.

CCTF 3 (2001) : Signification de la notation « k » dans UTC(k) et TAI(k)

Plusieurs membres du CCTF ayant souligné que la désignation « via m » discutée au point 6 de l'ordre du jour sur « La nomenclature conventionnelle de l'UTC » n'était pas nécessaire ni appropriée, celle-ci est retirée de la recommandation.

La recommandation est adoptée avec ce changement.

CCTF 4 (2001) : Étalonnage des liaisons horaires du Temps atomique international

La recommandation est adoptée sans changement.

CCTF 5 (2001) : Instructions techniques à l'attention des fabricants de récepteurs du temps des systèmes de satellites de navigation à couverture globale (GNSS)

La recommandation est adoptée après des changements mineurs.

14 QUESTIONS DIVERSES

M. Sullivan suggère que les présidents des groupes de travail qui sont membres du personnel du BIPM soient nommés pour une période définie, parce que cela représenterait pour eux une lourde charge que d'être responsables pour une période illimitée. Le président approuve sa suggestion et dit qu'il demandera au CIPM d'examiner cette question.

M. Kovalevsky dit qu'un problème analogue se pose avec les présidents des Comités consultatifs du CIPM, mais la plupart d'entre eux ne sont présidents que pour une durée de six ou huit ans. Il ajoute qu'il est parfois difficile de trouver des personnes ayant les connaissances et l'expérience requises.

M. Quinn dit que les groupes de travail pilotés par le BIPM et leur président font normalement l'objet d'un examen lors de chaque session des Comités consultatifs ; il faudrait alors peut-être s'assurer que le maintien du président de l'un ou l'autre groupe ne pose pas de problème.

M. Sullivan propose Mme Tavella présidente du Groupe de travail sur le TAI et M. Palacio appuie cette proposition.

Le président constatant que cela ne fait l'objet d'aucune objection et que Mme Tavella a déjà fait part de son accord, la nomme officiellement à cette fonction.

Mme Tavella remercie le CCTF de sa confiance. Elle note que le dynamisme de ce groupe vient de tous ses membres et espère qu'ils pourront mettre en pratique les progrès réalisés sur les échelles de temps.

Le président déclare la session close et remercie les délégués.

M. P. Fisk, rapporteur
juillet 2001
révisé octobre 2001

**Recommandations du
Comité consultatif du temps et des fréquences
présentées au
Comité international des poids et mesures**

RECOMMANDATION CCTF 1 (2001) :
Représentations secondaires de la seconde

Le Comité consultatif du temps et des fréquences,

considérant

- que la définition actuelle de la seconde, fondée sur l'atome de césium 133, n'est pas modifiée,
- qu'un certain nombre d'études sont menées pour réaliser des étalons atomiques de fréquence fondés sur de nouveaux atomes et ions,
- que des dispositifs nouvellement conçus pour la mesure des fréquences optiques fournissent directement un signal de sortie micro-onde et donc peuvent permettre d'utiliser des transitions optiques comme étalons de fréquence,
- que de nouveaux étalons de fréquence fondés sur d'autres transitions micro-ondes sont à l'étude,
- que l'un d'entre eux pourrait servir de fondement à une nouvelle définition de la seconde ;

a l'intention d'examiner et d'adopter des mesures exactes de fréquences de transitions atomiques d'atomes et d'ions étalonnées par rapport à la fréquence de l'atome de césium 133 comme représentations secondaires de la seconde,

recommande

- d'établir une liste de représentations secondaires de la seconde, étant entendu que la définition de la seconde fondée sur l'atome de césium 133 n'est pas modifiée pour le moment,
- de documenter l'incertitude de ces représentations secondaires de la seconde en leur appliquant les mêmes exigences qu'aux étalons primaires à césium, pour leur utilisation dans le Temps atomique international.

RECOMMANDATION CCTF 2 (2001) :**Comparaison de temps et de fréquences utilisant des mesures de phase et de code des signaux du Global Positioning System (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,
- 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 des méthodes d'étalonnage sont en cours de mise au point 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 participent 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 appliquées à l'étalonnage des 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 le Temps universel coordonné (UTC),
- que les laboratoires de temps et le BIPM prennent les dispositions nécessaires pour aider l'IGS à atteindre cet objectif.

RECOMMANDATION CCTF 3 (2001) :**Signification de la notation « k » dans UTC(k) et TAI(k)**

Le Comité consultatif du temps et des fréquences,

considérant

- que le Bureau international des poids et mesures (BIPM) établit le Temps atomique international (TAI) et, avec le Service international de la rotation terrestre (IERS), maintient le Temps universel coordonné (UTC), à partir des données horaires provenant de laboratoires de temps répartis dans le monde,
- qu'une notation spécifique internationale pour les échelles de temps est nécessaire afin d'éviter toute ambiguïté quant à leur traçabilité aux références de temps du BIPM,
- que la Recommandation UIT-R TF.536-1 (1978, 1998) « Notations à utiliser pour désigner les échelles de temps » a établi la notation UTC(k) pour les échelles de temps réalisées par l'institution « k » ;

approuve la Recommandation UIT-R TF.536-1 (1978, 1998) « Notations à utiliser pour désigner les échelles de temps » ; mais

recommande qu'à l'avenir, la notation « k » pour désigner une institution ne s'applique qu'à celles qui participent à la formation du TAI et donc à celles qui apparaissent dans la section 1, [UTC - UTC(k)], de la *Circulaire T* du BIPM ;

demande au directeur du BIPM d'écrire au directeur de l'UIT-R pour l'informer de la présente Recommandation et demander que l'UIT-R prenne en considération l'établissement de la notation TAI(k) de manière analogue à la notation UTC(k).

Notes annexées à la Recommandation CCTF 3 (2001)

1. Les institutions participant à l'établissement du TAI sont :
 - a) les laboratoires nationaux de métrologie et les laboratoires désignés qui participent à l'arrangement de reconnaissance mutuelle (MRA) du CIPM, et
 - b) d'autres institutions et observatoires des États membres de la Convention du Mètre ainsi que des associés à la Conférence générale officiellement

désignés pour maintenir des échelles de temps pour des applications scientifiques, astronomiques ou de navigation.

2. Il est suggéré que $TAI(k)$ soit défini comme $TAI(k) = UTC(k) + DTAI$, où $DTAI$ est le nombre de secondes entières spécifié par l'IERS comme étant la différence entre l'UTC et le TAI.

RECOMMANDATION CCTF 4 (2001) :

Étalonnage des liaisons horaires du Temps atomique international

Le Comité consultatif du temps et des fréquences,

considérant

- que des recommandations antérieures du Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) et du Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF) avaient déjà mis en évidence l'importance d'étalonner les équipements de comparaison d'horloges afin de garantir l'exactitude des liaisons horaires,
- que l'amélioration des horloges et des techniques de comparaison horaire a accru la stabilité des échelles de temps fondées sur des ensembles d'horloges, en particulier celle du Temps atomique international (TAI),
- que ne pas prendre en compte les variations des retards instrumentaux des équipements de comparaison d'horloges peut dégrader de manière significative la stabilité d'une échelle de temps fondée sur des ensembles d'horloges telle que le TAI ;

recommande

- que des méthodes absolues et différentielles d'étalonnage continuent d'être étudiées et mises en œuvre pour toutes les techniques de comparaison d'horloges utilisées pour le TAI, dans le but d'obtenir une incertitude-type d'une nanoseconde,
- que les laboratoires qui contribuent au TAI participent régulièrement à des campagnes d'étalonnage et contrôlent de manière continue leurs équipements de comparaison d'horloges,
- que les diverses techniques de comparaison d'horloges utilisées pour le TAI soient étalonnées de manière indépendante les unes des autres.

RECOMMANDATION CCTF 5 (2001) :
Instructions techniques à l'attention des fabricants de récepteurs du temps
des systèmes de satellites de navigation à couverture globale

Le Comité consultatif du temps et des fréquences,

considérant

- que la méthode d'observation en vue simultanée des satellites du Global Positioning System (GPS) et du Global Navigation Satellite System (GLONASS) est l'une des méthodes les plus précises et les plus exactes de comparaison d'horloges sur la Terre et à son voisinage, et qu'elle est utilisée pour établir les échelles de temps internationales de référence du Temps atomique international (TAI) et du Temps universel coordonné (UTC),
- que l'incertitude de cette méthode liée aux effets spatiaux, tels que les éphémérides des satellites et les retards ionosphériques et autres effets, à l'exception de l'incertitude provenant des retards instrumentaux du récepteur lui-même, est proche de 1 ns,
- que d'autres méthodes utilisant des systèmes de satellites de navigation à couverture globale pour les comparaisons de temps et de fréquence, actuellement en cours de mise au point, pourraient permettre d'obtenir des incertitudes encore plus petites,
- que la principale source d'incertitude de ces méthodes est l'instabilité des retards instrumentaux des récepteurs, qui peut fréquemment atteindre plusieurs nanosecondes en quelques jours et, dans certains cas, plusieurs dizaines de nanosecondes ;

recommande

- que les fabricants de récepteurs de temps mettent en application les instructions techniques que le Groupe de travail du CCTF sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant des systèmes de satellites de navigation à couverture globale (CGGTTS) a élaborées pour la partie instrumentale des récepteurs utilisés pour les comparaisons de temps et de fréquence,
- que les laboratoires de temps accordent une attention particulière aux conditions dans lesquelles fonctionnent leurs récepteurs de temps.

Note annexée à la Recommandation CCTF 5 (2001)

Les instructions techniques du CGGTTS figurent dans la liste des documents de travail de la 15^e session du CCTF.

ANNEXE 1.

Documents de travail présentés à la 15^e session du CCTF

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

Document
CCTF/

- 01-01a NIST (États-Unis). — Report to the 15th meeting of the CCTF on the activities of the NIST Time and Frequency Division, June 2001, 11 p.
- 01-01b NIST (États-Unis). — Recommendation Concerning the Alternate Realization of the Second, 2 p.
- 01-02a CRL (Japon). — Summary of time and frequency activities at CRL, 5 p.
- 01-02b CRL (Japon). — Recent time and frequency activities in CRL (présentation Power Point), 8 p.
- 01-03 METAS, ON (Suisse). — Report to the 15th session of the Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF), 20-21 June 2001, G. Duddle, P. Thomann, 3 p.
- 01-04 NPLI (Inde). — Status report of time and frequency activities of National Physical Laboratories, New Delhi, India, 2 p.
- 01-05 KRISS (Rép. de Corée). — Report to the 15th session of the Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF), 3 p.
- 01-06 ORB (Belgique). — Report of the Royal Observatory of Belgium, P. Defraigne, 4 p.
- 01-07a IGS/BIPM. — IGS/BIPM Pilot Project to study time and frequency comparisons using GPS phase and code measurements: Interim report, J. Ray, E.F. Arias, 7 p.
- 01-07b IGS/BIPM. — Progress in carrier phase time transfer, J. Ray, E.F. Arias, G. Petit, T. Springer, T. Schildknecht, J. Clarke, J. Johansson, 12 p.
- 01-08 VNIIFTRI (Russie). — VNIIFTRI, 1 p.

Document
CCTF/

- 01-09 NMIJ/AIST (Japon). — Research activities on Time and Frequency; National Metrology Institute of Japan /AIST (formerly called « National Research Laboratory of Metrology »), 5 p.
- 01-10 USNO (États-Unis). — Recommendation on time scale notation, D. McCarthy, 2 p.
- 01-11 NML-CSIRO (Australie). — Report to CCTF from the National Measurement Laboratory CSIRO, Australia, 8 p.
- 01-12 PTB (Allemagne). — Report on Activities to the 15th Session of the Consultative Committee for Time and Frequency, June 2001, 6 p.
- 01-13 TUG (Autriche). — Report to the 15th Meeting of the Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF), June 2001, D. Kirchner, 2 p.
- 01-14 BIPM. — A revised way of fixing an upper limit to clock weights in TAI computation, J. Azoubib, 12 p.
- 01-15 IEN (Italie). — Report of the Istituto Elettrotecnico Nazionale « G. Ferraris » to the 15th meeting of the CCTF, 6 p.
- 01-16 URSI. — URSI Commission J Working Group Questionnaire Concerning Leap Seconds in UTC, 4 p.
- 01-17 ITU Radiocommunication Study Group. — Report of the activities of the Special Rapporteur Group 7A on the future of UTC, 10 p.
- 01-18 NMi VSL (Pays-Bas). — Contribution of the NMi Van Swinden Laboratorium, 1999-2001, G. de Jong, 3 p.
- 01-19 CCTF Working Group on the Consequences of the Global MRA. — Draft Report and Proposals from the CCTF WGMRA, G. de Jong, 16 p.
- 01-20 BIPM. — Calibration of time links for TAI, 1 p.
- 01-21 BIPM. — Use of primary frequency standards for estimating the duration of the scale unit of TAI, 2 p.
- 01-22 BIPM. — A rapid computation of a prediction of TAI and UTC, 1 p.
- 01-23 BIPM/IAU JCR. — BIPM/IAU Joint Committee on relativity for space-time reference systems and metrology, G. Petit, 2 p.

Document
CCTF/

- 01-24 IERS/CPC. — IERS Conventions Product Centre Report, G. Petit, 1 p.
- 01-25 BNM-LPTF/LHA (France). — Contribution to the 15th CCTF, M. Granveaud, N. Dimarcq, 9 p.
- 01-26 BIPM. — Publication of the BIPM TWSTFT reports and introduction of TWSTFT into the construction of TAI, J. Azoubib, W. Lewandowski, 20 p.
- 01-27 CGGTTS. — Letter of the chairman of the CCTF Sub-group on GPS and GLONASS Time-Transfer Standards, J. Levine, 2 p.
- 01-28 CCTF Sub-Working Group on Algorithms. — Report of the Working Group on TAI, Sub-Working Group on Algorithms, P. Tavella, 1 p.
- 01-29 BIPM. — Report of the BIPM Time section 1999-2001, E.F. Arias, 10 p.
- 01-30 CGGTTS. — GPS and GLONASS timing receivers – Draft recommendation, 1 p.
- 01-31 USNO (États-Unis). — Report on the Time and Frequency Activities of the Time Service Department of the U.S. Naval Observatory, 4 p.
- 01-32a NRC (Canada). — Report on activities to the 15th session of the Consultative Committee for Time and Frequency, June 2001, 5 p.
- 01-32b NRC (Canada). — Report to the 15th meeting of the CCTF, June 2001 (présentation Power Point), 19 p.
- 01-33 ITU Radiocommunication Study Group. — Report of the IUT-R Working Party 7A in the period 1999 to 2001, G. de Jong, 2 p.
- 01-34 Galileo Satellite System. — UTC and Galileo time services: a report from the Galileosat Working Group on the Galileo time interface, P. Tavella, J. Lavery, J. Hahn, 6 p.
- 01-35 EUROMET. — MRA implications on the time and frequency field EUROMET (présentation Power Point), J. Palacio, 15 p.
- 01-36 CGGTTS. — CGTTS guidelines for manufacturers of GNSS receivers used for timing, 4 p.

LISTE DES SIGLES UTILISÉS DANS LE PRÉSENT VOLUME

1 Sigles des laboratoires, commissions et conférences

AOA	Allen Osborne Associates Inc.
AUS	Consortium de laboratoires en Australie
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)
CCDM*	Comité consultatif pour la définition du mètre, <i>voir</i> CCL
CCDS*	Comité consultatif pour la définition de la seconde, <i>voir</i> CCTF
CCIR	Comité consultatif international des radiocommunications (organe permanent de l'UIT)
CCL	(ex CCDM) Comité consultatif des longueurs
CCTF	(ex CCDS) Comité consultatif du temps et des fréquences
CGGTTs	Groupe de travail du CCTF sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS/ CCTF Working Group on GPS and GLONASS Time Transfer Standards
CIPM	Comité international des poids et mesures
CNES	Centre national d'études spatiales, Toulouse (France)
CNRS	Centre national de la recherche scientifique, Paris (France)
CPC	Conventions Product Centre de l'IERS
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*	<i>voir</i> NML-CSIRO
ESA	Agence spatiale européenne/European Space Agency
EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
IEN	Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, Turin (Italie)

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

IERS	Service international de la rotation terrestre/International Earth Rotation Service
IGS	Service international du GPS/International GPS Service
INPL	National Physical Laboratory of Israel, Jérusalem (Israël)
INTELSAT	International Telecommunications Satellite Organization
ISO	Organisation internationale de normalisation
ISS	Station spatiale internationale/International Space Station
JCR	Comité mixte BIPM/UAI sur les systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale/BIPM/IAU Joint Committee on General Relativity for Space-time Reference Systems and Metrology
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)
LPTF*	Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France), voir BNM
METAS	(ex OFMET) Office fédéral de métrologie et d'accréditation, Wabern (Suisse)
MRA	Arrangement de reconnaissance mutuelle/Mutual Recognition Arrangement
NASA	National Aeronautics and Space Administration, Washington DC (États-Unis)
NBS*	National Bureau of Standards (États-Unis), voir 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)
NMIJ/AIST	National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba (Japon)
NML-CSIRO	National Measurement Laboratory, CSIRO, Lindfield (Australie)
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), <i>voir</i> NMIJ/AIST
OFMET*	Office fédéral de métrologie/Eidgenössisches Amt für Messwesen, Wabern (Suisse), <i>voir</i> METAS
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)
RCMA	Groupe de travail de l'UAI sur la relativité en mécanique céleste et en astrométrie/IAU Working Group on Relativity for Celestial Mechanics and Astrometry
RCMAM	Groupe de travail de l'UAI sur la relativité en mécanique céleste, en astrométrie et dans le domaine de la métrologie/IAU Working Group on Relativity for Celestial Mechanics, Astrometry and for Metrology
ROA	Real Instituto y Observatorio de la Armada, San Fernando (Espagne)
TL	Telecommunication Laboratories, Ching-Li (Taïwan, Chine)
TUG	Technical University, Graz (Autriche)
UAI	Union astronomique internationale
UGGI	Union géodésique et géophysique internationale
UIT	Union internationale des télécommunications
UME	Ulusal Metroloji Enstitüsü/National Metrology Institute, Marmara Research Centre, Gebze-Kocaeli (Turquie)
URSI	Union radio-scientifique internationale
USNO	U.S. Naval Observatory, Washington DC (États-Unis)
VNIFTRI	Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques, Moscou (Féd. de Russie)
VSL*	Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas), <i>voir</i> NMi
WGGTI	GalileoSat Working Group on the Galileo Time Interface

2 Sigles des termes scientifiques

ACES	Atomic Clock Ensemble in Space
CMC	Aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages/ Calibration and Measurement Capabilities
EAL	Échelle atomique libre
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service

GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Système satellitaire à couverture globale/Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GST	Galileo System Time
IGEX	International GLONASS Experiment
IGLOS-PP	International GLONASS Service Pilot Project
MEO	Medium Earth Orbite (satellite)
MJD	Jour Julien modifié
PARCS	Primary Atomic Reference Clock in Space
PHARAO	Projet d'horloge atomique à refroidissement d'atomes en orbite
RACE	Rubidium Atomic Clock Experiment
SI	Système international d'unités
SUMO	Superconducting Microwave Oscillator
TA	Temps atomique
TAI	Temps atomique international
TCG	Temps-coordonnée géocentrique
TT	Temps terrestre
TWSTFT	Comparaison de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite/Two-way Satellite Time and Frequency Transfer
UT	Temps universel
UTC	Temps universel coordonné
WAAS	Wide Area Augmentation System