

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

SESSION DE 1989
MEETING OF 1989



COMITÉ CONSULTATIF
POUR
LA DÉFINITION DE LA SECONDE

Rapport de la 11^e session
Report of the 11th Meeting

1989

LE BIPM

ET LA CONVENTION DU MÈTRE

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

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

Le Bureau international a pour mission d'assurer l'unification mondiale des mesures physiques ; il est chargé :

- d'établir les étalons fondamentaux et les échelles des principales grandeurs physiques et de conserver les prototypes internationaux ;
- d'effectuer la comparaison des étalons nationaux et internationaux ;
- d'assurer la coordination des techniques de mesure correspondantes ;
- d'effectuer et de coordonner les déterminations relatives aux constantes physiques qui interviennent dans les activités ci-dessus.

Le Bureau international fonctionne sous la surveillance exclusive du Comité international des poids et mesures (CIPM), placé lui-même sous l'autorité de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM).

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

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

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

Limitées à l'origine aux mesures de longueur et de masse et aux études métrologiques en relation avec ces grandeurs, les activités du Bureau international ont été étendues aux étalons de mesure électriques (1927), photométriques (1937), des rayonnements ionisants (1960) et aux échelles de temps (1988). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 et deux nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la section des rayonnements ionisants.

(*) Au 31 décembre 1989, quarante-sept États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne (Rép. fédérale d'), Allemande (Rép. démocratique), Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Chine (Rép. pop. de), Corée (Rép. de), Corée (Rép. pop. dém. de), Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Israël, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Venezuela, Yougoslavie.

Une quarantaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau international. Ils y font principalement des recherches métrologiques, des comparaisons internationales des réalisations des unités et des vérifications d'étalons dans les domaines mentionnés ci-dessus. Ces travaux font l'objet d'un rapport annuel détaillé qui est publié avec les procès-verbaux des séances du Comité international. La dotation annuelle du Bureau international est de l'ordre de 17 960 000 francs-or (en 1989), soit environ 32 600 000 francs français.

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

Les comités consultatifs ont un règlement commun (*BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 31, 1963, p. 97). Chaque comité consultatif, dont la présidence est généralement confiée à un membre du Comité international, est composé de délégués de chacun des grands laboratoires de métrologie et des instituts spécialisés dont la liste est établie par le Comité international, de membres individuels désignés également par le Comité international et d'un représentant du Bureau international. Ces comités tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers ; ils sont actuellement au nombre de huit :

1. Le Comité consultatif d'électricité (CCE), créé en 1927.
2. Le Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR), nouveau nom donné en 1971 au Comité consultatif de photométrie (CCP) créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent (CCE) s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le Comité consultatif de thermométrie (CCT), créé en 1937.
4. Le Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM), créé en 1952.
5. Le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS), créé en 1956.
6. Le Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (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 CIPM en 1954).
8. Le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM), créé en 1980.

Les travaux de la Conférence générale, du Comité international, des comités consultatifs et du Bureau international sont publiés par les soins de ce dernier dans les collections suivantes :

- *Comptes rendus des séances de la Conférence générale des poids et mesures* ;
- *Procès-verbaux des séances du Comité international des poids et mesures* ;
- *Sessions des comités consultatifs* ;
- *Recueil de travaux du Bureau international des poids et mesures* (ce recueil hors commerce rassemble les articles publiés dans des revues et ouvrages scientifiques et techniques, ainsi que certains travaux publiés sous forme de rapports multicopiés).

Le Bureau international publie aussi des monographies sur des sujets métrologiques particuliers et, sous le titre « *Le Système international d'unités (SI)* », une brochure remise à jour périodiquement qui rassemble toutes les décisions et recommandations concernant les unités.

La collection des *Travaux et mémoires du Bureau international des poids et mesures* (22 tomes publiés de 1881 à 1966) a été arrêtée en 1966 par décision du Comité international.

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

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

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

AIG/IAG	Association internationale de géodésie/International Association of Geodesy
ASMW	Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung, Berlin (Rép. dém. allemande)
BIH	Bureau international de l'heure
BIPM	Bureau international des poids et mesures
CCDM	Comité consultatif pour la définition du mètre
CCDS	Comité consultatif pour la définition de la seconde
CCIR	Comité consultatif international des radiocommunications/International Radio Consultative Committee
CGPM	Conférence générale des poids et mesures
CIPM	Comité international des poids et mesures
CRL	Communications Research Laboratory, Tokyo (Japon)
CSIRO	CSIRO, Division of Applied Physics, Lindfield (Australie)
CPEM	Conference on Precision Electromagnetic Measurements
ESA	Agence spatiale européenne/European Space Agency
EUROMET	European Collaboration on Measurement Standards
IEN	Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, Turin (Italie)
IERS	International Earth Rotation Service/Service international de la rotation terrestre
INMARSAT	International Maritime Satellite Organization
INPL	National Physical Laboratory, Jérusalem (Israël)
INTELSAT	International Telecommunications Satellite Organization
IPMS	International Polar Motion Service/Service international du mouvement du pôle
JPL	Jet Propulsion Laboratory, Pasadena (États-Unis d'Amérique)
KSRI	Korea Standards Research Institute, Taejon (Rép. de Corée)
LHA	Laboratoire de l'horloge atomique, Orsay (France)

LPTF	Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France)
METEOSAT	Meteorological Satellite Organization
NIM	National Institute of Metrology, Beijing (Rép. pop. de Chine)
NIST	National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg (États-Unis d'Amérique)
NML	National Measurement Laboratory, Lindfield (Australie)
NPL	National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni)
NRC	Conseil national de recherches/National Research Council, Ottawa (Canada)
NRL	Naval Research Laboratory, Washington (États-Unis d'Amérique)
NRLM	National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba (Japon)
OACI/ICAO	Organisation de l'aviation civile internationale/International Civil Aviation Organization
OFMET	Office fédéral de métrologie, Wabern (Suisse)
ON	Observatoire cantonal, Neuchâtel (Suisse)
OP	Observatoire de Paris (France)
ORB	Observatoire royal de Belgique, Bruxelles (Belgique)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig (Rép. féd. d'Allemagne)
RGO	Royal Greenwich Observatory, Cambridge (Royaume-Uni)
TAO	Tokyo Astronomical Observatory, Tokyo (Japon)
TUG	Technical University, Graz (Autriche)
UAI/IAU	Union astronomique internationale/International Astronomical Union
URSI	Union radio-scientifique internationale/International Union of Radio Science
USNO	U.S. Naval Observatory, Washington (États-Unis d'Amérique)
VNIIFTRI	All Union Research Institute for Physical, Technical and Radio-Technical Measurements, Moscou (URSS)
VSL	Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas)

Sigles des termes scientifiques

Acronyms for scientific terms

ALGOS	Algorithme pour établir le TAI/Time scale algorithm for TAI
EAL	Échelle atomique libre/Free atomic time scale
FM	Modulation de fréquence/Frequency modulation
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System

LASSO	Laser Synchronization from Stationary Orbit
PT	Temps des pulsars/Pulsar Time
RMS	Communication par radio par l'intermédiaire de traînées météoritiques/Radio Meteor-burst Communication
SA	Disponibilité sélective (du GPS)/Selective availability (of GPS)
TA	Temps atomique/Atomic Time
TAI	Temps atomique international/International Atomic Time
TE	Temps des éphémérides/Ephemeris Time
UTC	Temps universel coordonné/Coordinated Universal Time
VLBI	Interférométrie à très grande base/Very Long Baseline Interferometry

Comité international des poids et mesures

Secrétaire
J. DE BOER

Président
D. KIND

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

Président

J. KOVALEVSKY, Centre d'études et de recherches géodynamiques et astronomiques, Grasse (France).

Membres

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung [ASMW], Berlin (Rép. dém. allemande).

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

Comité consultatif international des radiocommunications [CCIR] de l'Union internationale des télécommunications.

Communications Research Laboratory [CRL], Tokyo (Japon).

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

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

Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques de l'URSS [VNIIFTRI], Moscou (URSS).

Institut national de métrologie [NIM], Beijing (Rép. pop. de Chine).

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

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

National Institute of Standards and Technology [NIST], Gaithersburg (États-Unis d'Amérique).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (Royaume-Uni).

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

National Physical Laboratory of Israel [INPL], Jérusalem (Israël).

National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Tsukuba (Japon).

Observatoire royal de Belgique [ORB], Bruxelles (Belgique).

Office fédéral de métrologie [OFMET], Wabern (Suisse).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig (Rép. féd. d'Allemagne).

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

Royal Greenwich Observatory [RGO], Cambridge (Royaume-Uni).

Technical University of Graz [TUG], Graz (Autriche).

Union astronomique internationale [UAI].

Union radio-scientifique internationale [URSI].

U.S. Naval Observatory [USNO], Washington (États-Unis d'Amérique).

Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (Pays-Bas).

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

ORDRE DU JOUR
de la 11^e session

1. Progrès des étalons atomiques de fréquence et des horloges.
 2. Méthodes de comparaison de temps :
 - Global Positioning System, évolution du système et de son usage, organisation des liaisons horaires ;
 - autres méthodes, expériences et projets (LASSO, MITREX, NAVSAT, ...).
 3. Méthodes statistiques appliquées à la mesure du temps.
 4. Relations entre le temps atomique et les pulsars.
 5. Rapport d'activité de la section du temps du BIPM.
 6. Compte-rendu des réunions suivantes :
 - réunion intérimaire de la Commission d'étude 7 du Comité consultatif international des radiocommunications, Genève, 11-19 avril 1988.
 - Assemblée générale de l'Union astronomique internationale, Baltimore, 2-11 août 1988.
 7. Rapport du Groupe de travail sur le TAI du CCDS, améliorations à apporter au service du TAI.
 8. Questions diverses.
-

RAPPORT
DU COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE
(11^e session - 1989)
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

par M. J. McA. STEELE, rapporteur

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) a tenu sa 11^e session au Bureau international des poids et mesures, à Sèvres, au cours de 4 séances, les mercredi 19 et jeudi 20 avril 1989.

Étaient présents :

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

Les délégués des laboratoires et organisations membres :

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

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

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

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

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield
(I. K. HARVEY).

Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques de l'URSS
[VNIIFTRI], Moscou (N. KOSHELYAEVSKY).

Institut national de métrologie [NIM], Beijing (MA Feng Ming).

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris [IEN], Turin
(P. G. GALLIANO).

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

National Institute of Standards and Technology [NIST], Boulder
(D. W. ALLAN).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (D. J. E. KNIGHT).
National Physical Laboratory of Israel [INPL], Jérusalem
(A. LEPEK).

Observatoire royal de Belgique [ORB], Bruxelles (P. PÂQUET).

Office fédéral de métrologie [OFMET], Wabern (L. PROST).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig
(K. DORENWENDT, H. DE BOER).

Royal Greenwich Observatory [RGO], Cambridge (J. D. H. PIL-
KINGTON).

Technical University of Graz [TUG], Graz (D. KIRCHNER).

Union astronomique internationale [UAI] (G. M. R. WINKLER).

Union radio-scientifique internationale [URSI] (J. McA. STEELE).

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

Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (G. DE JONG).

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

Invités :

M. NAK SAM CHUNG, Korea Standards Research Institute [KSRI],
Taejon (Rép. de Corée).

M. P. GIACOMO, Bureau des Longitudes, Paris.

M. G. BUSCA, Observatoire cantonal [ON], Neuchâtel.

Assistaient aussi à la session : B. GUINOT, C. THOMAS et J. AZOUBIB
(BIPM).

Excusés :

Communications Research Laboratory [CRL], Tokyo ; National
Physical Laboratory of India [NPLI], New Delhi ; National
Research Laboratory of Metrology [NRLM], Tsukuba.

Absent :

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

Le président adresse ses souhaits de bienvenue aux membres du comité parmi lesquels nombreux sont ceux qui ont assisté à la réunion précédente des représentants des laboratoires horaires organisée par le groupe de travail du CCDS. Il est spécialement heureux de la présence des nouveaux membres du comité, MM. Harvey, de Jong (remplaçant M. Kaarls), Lepek, Pâquet et Prost. Il accueille aussi, comme observateur, M. Nak Sam Chung, de la République de Corée. M. J. McA. Steele a aimablement accepté d'être le rapporteur de la réunion.

Passant à l'ordre du jour, M. Kovalevsky propose de prendre les sujets dans un ordre légèrement différent, les points 1 et 2 étant suivis par les points 5 et 7, puis par les autres points dans leur ordre d'origine. En réponse à une demande de questions supplémentaires, M. Allan suggère qu'on examine la possibilité d'améliorer les liens horaires avec l'URSS en utilisant les signaux des satellites GLONASS.

1. Progrès des étalons de fréquence et des horloges atomiques

Le président invite à présenter brièvement les principales avancées dans ce domaine. Il demande d'abord à M. Granveaud d'exposer les progrès au Laboratoire primaire du temps et des fréquences (LPTF).

M. Granveaud mentionne d'abord les deux échelles de temps qui sont maintenues par le LPTF à l'Observatoire de Paris :

a) UTC(OP) qui a été asservi pour rester dans les limites de $\pm 2 \mu\text{s}$ de l'UTC durant les quatre dernières années et b) TA(F) qui repose sur un ensemble d'environ 20 horloges à césium commerciales conservées dans onze laboratoires répartis en France (Document CCDS/89-1). Les liaisons entre horloges font appel aux comparaisons par la télévision (région de Paris) et par le GPS (dans le reste du pays) ; la précision est de quelques nanosecondes dans les deux cas. La stabilité du TA(F) est de quelques unités de 10^{-14} pour un mois, ce qui procure une référence utile à divers laboratoires nationaux.

Dans le domaine de la recherche, le laboratoire en est maintenant au stade final de montage d'un étalon à césium à pompage optique. Une chaîne de multiplication à 9 GHz a été réalisée et l'on a particulièrement étudié l'émission de diodes laser à 852 nm afin d'obtenir une radiation monomode à largeur de bande réduite. Les bases théoriques d'un pompage efficace ont été aussi examinées. Ce travail sur les étalons primaires a été mené en étroite coopération avec, à l'échelle nationale, le Laboratoire de l'horloge atomique et, à l'échelle internationale, la PTB et le NRC.

Aux fréquences optiques, à la suite d'améliorations de la chaîne de multiplication du LPTF, l'incertitude de la mesure de fréquence du laser à CO_2 stabilisé par le OsO_4 est maintenant au niveau de 10^{-12} . En 1986 la chaîne a été utilisée pour mesurer la fréquence d'un laser transportable He-Ne(CH_4) de l'URSS et un bon accord avec les résultats du VNIIFTRI a été obtenu ; ceci a aussi confirmé des valeurs antérieures obtenues dans d'autres laboratoires et a montré que la valeur de 88 376 181 608 kHz recommandée par le CCDM est trop élevée d'environ 6 kHz. Une décision de principe d'étendre la chaîne de multiplication de fréquence jusqu'au visible a été prise et l'on se propose, comme l'un des premiers buts, de mesurer la fréquence d'un laser à He-Ne(I_2) à 473,6 THz.

Le président remarque que le Document CCDS/89-1 comprend des contributions séparées du LPTF et du Laboratoire de l'horloge atomique [LHA] et il invite M. Audoin à résumer les activités à Orsay.

Au LHA l'on a poursuivi des études théoriques pour comprendre dans le détail l'interaction entre un jet d'atomes de césium et la lumière

laser incidente, dans le but d'obtenir la conception optimale d'un étalon à césium pompé optiquement. Du côté expérimental, deux machines à jet de césium ont été construites, toutes deux avec une région d'interaction relativement courte de 21 cm. Dans l'une d'entre elles, le champ magnétique est transversal et la résonance hyperfine est obtenue avec un rapport signal/bruit d'environ 10^4 : cela donne lieu à une stabilité à court terme de l'oscillateur à quartz asservi de $\sigma_y(\tau) = 2 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$. Dans la seconde machine, plus récente, le champ est longitudinal et peut être réglé indépendamment dans trois régions séparées : dans le mode d'opération actuel un champ de 6×10^{-6} T (60 mG) est employé dans la région micro-onde centrale et de 3×10^{-5} T (300 mG) dans chacune des deux régions d'interaction optique.

Jusqu'à présent, les résultats ont été obtenus avec la configuration la plus simple utilisant un seul laser, à la fois pour la préparation des états atomiques et pour la détection optique, bien qu'il fût reconnu que l'on obtiendrait de meilleures performances en utilisant un pompage optique à deux lasers et une transition cyclante pour la détection, pourvu que celle-ci soit excitée par une laser à bande étroite. Les enregistrements du spectre des 7 transitions hyperfines obtenus avec les machines actuelles présentent une excellente symétrie, si bien que l'effet de déplacement de la fréquence centrale (« Rabi pulling ») devrait être pratiquement absent et que l'on peut travailler avec une valeur plus faible du champ C permettant un gain en exactitude et en stabilité à long terme.

M. Audoin mentionne des études destinées à améliorer la pureté spectrale des sources à diode laser et à supprimer l'accroissement du bruit provenant de l'utilisation de transitions cyclantes pour la détection de la résonance micro-onde. La contribution au bruit est largement réduite par utilisation d'un laser à cavité externe qui, stabilisé par absorption saturée dans une cellule de césium, a montré une stabilité de fréquence de 1×10^{-12} en 1 s.

Trois masers à hydrogène actifs ont été construits et deux d'entre eux sont utilisés par les astronomes et géodésiens français. On a développé un système expérimental d'accord automatique de la cavité qui améliore la stabilité à long terme du maser, sans altérer ses qualités à court terme. Des études théoriques sur les effets du remplissage partiel de la cavité par un diélectrique, ici l'alumine, dans les masers de taille réduite, ont montré un léger avantage en stabilité de fréquence pour le mode de fonctionnement actif par rapport au mode passif.

Le travail au LHA sur le confinement d'ions se rapporte aux cas des ions Hg^+ dans un piège RF et Mg^+ dans un piège de Penning. Un modèle du premier a été établi avec l'hypothèse d'un puits sphérique de pseudo-potential. L'incertitude relative dans l'estimation de l'effet Doppler du second ordre est inférieure à 2×10^{-13} . Dans une expérience d'observation des transitions à deux photons d'ions Hg^+ confinés, la mesure de la largeur de la transition à 563 nm permet d'obtenir l'énergie

des ions, celle-ci pouvant atteindre une valeur aussi importante que 1 eV. Pour les ions Mg^+ , le refroidissement radiatif sub-Doppler a été accompli jusqu'à une température de 60 mK pour un ion isolé.

Finalement, M. Audoin attire l'attention sur le biais possible des mesures de stabilité de fréquence dans le domaine temporel provenant de l'usage, dans la pratique, de filtres passe-bas, plutôt que de filtres passe-bande comme on le suppose habituellement dans les travaux théoriques.

En réponse à M. Busca, il dit que l'on n'a pas de nombres disponibles pour caractériser l'exactitude des machines à jet de césium du LHA, celles-ci ne fonctionnant pas comme des étalons à long terme. En réponse à M. Allan, il confirme que l'asservissement de cavité des masers à hydrogène conduit à une stabilité de fréquence de quelques unités de 10^{-15} par jour ; on est en train de construire une version opérationnelle du système automatique d'asservissement de la cavité.

M. Douglas, passant en revue les progrès accomplis au Conseil national de recherches [NRC], Ottawa, rappelle (Document CCDS/89-5) que CsV a été retiré du service en juin 1988 pour une révision complète. Il a été remis en service en septembre de la même année, mais il n'est encore malheureusement pas à son niveau d'exactitude antérieur. Parmi les trois autres étalons, CsVI-B a été retiré du service comme horloge et il est utilisé uniquement comme dispositif expérimental.

Les deux nouveaux masers à hydrogène en construction ont fonctionné tous deux à champs magnétiques faibles : de premiers essais ont donné des valeurs du facteur de qualité Q de la raie atomique plus élevées que pour les masers précédents et, montrent par conséquent, que les flux d'atomes nécessaires sont plus faibles. Le fonctionnement à stabilité maximale sous température pleinement contrôlée est attendu pour 1990.

Une nouvelle chaîne de multiplication de 5 MHz à 30 THz a été achevée en utilisant seulement 4 lasers à CO_2 au lieu de 5 comme précédemment ; elle a été employée pour mesurer les fréquences à 88 THz de deux lasers He-Ne(CH_4), l'un du VNIIFTRI, l'autre du BIPM. Avec le premier, on a observé des perturbations périodiques d'environ 3×10^{-11} qui peuvent être dues à une dégradation accidentelle de la fréquence des oscillateurs non asservis. Dans le cas du laser du BIPM, cet effet n'existe pas, mais le niveau de bruit est plusieurs fois plus élevé que ce que l'on attendait.

Des expériences sur les ions isolés Ba^+ dans un piège RF sont en cours depuis un an et la transition non radiative du niveau métastable $5d^2D_{5/2}$ vers le niveau fondamental, a été étudiée pour un certain nombre de gaz tampons. Un maser à ammoniac pompé optiquement en fonctionnement libre a montré une stabilité de 1×10^{-11} et le NRC cherche à le faire fonctionner sur une transition de l'ammoniac proche de la transition de structure fine du $Ba^+ 5d^2D$ à 24 THz qui puisse offrir des possibilités intéressantes pour la spectroscopie à ion isolé confiné.

En présentant la contribution de l'URSS donnée dans les Documents CCDS/89-6 et 89-6a, M. Koshelyaevsky attire l'attention sur la structure du service d'état du temps et des fréquences qui comprend un établissement primaire au VNIIFTRI et des stations secondaires pourvues de masers à hydrogène dans cinq autres sites de l'Union soviétique. Alors que son échelle de temps primaire est aussi maintenue par un certain nombre de masers à hydrogène, le VNIIFTRI est en outre capable de vérifier l'unité d'échelle par référence à plusieurs étalons à jet de césium.

Trois étalons à césium n^{os} 101, 102 et 103 sont en service ; le premier utilise des aimants dipolaires et un champ C transversal tandis que le second a des aimants hexapolaires et un champ C axial. L'électronique de ces deux étalons est similaire et sur la période 1985-1988 leur différence de fréquence normée a été moindre que 5×10^{-14} . L'exactitude de ces deux étalons est estimée à 2×10^{-13} . L'étalon 103 diffère significativement des deux autres, tant par sa conception que par son électronique. Sa fréquence s'en écarte d'environ -15×10^{-14} . Les raisons de cet écart sont recherchées ; il peut être dû, entre autres, à des effets tels que le déplacement de la fréquence centrale (« Rabi pulling ») ou le décalage de phase de cavité, il peut être lié aussi au spectre de puissance en haute fréquence. On a récemment construit un quatrième étalon à césium, le numéro 104, à des fins expérimentales ; sa conception permet de remplacer la sélection magnétique des états atomiques par une excitation optique et on a procédé aux premiers essais de pompage optique.

On effectue les transferts de temps entre le VNIIFTRI et les stations secondaires en utilisant la communication par radio par l'intermédiaire de traînées météoritiques [RMC] qui fonctionne sur des distances allant jusqu'à 2 000 km. Le canal RMC permet d'effectuer des transferts de temps dans les deux sens entre les stations participantes avec une incertitude d'environ 20 ns. Cela a été confirmé par des comparaisons d'horloges portables pour les liaisons par RMC entre Moscou, Karkov et Uzhgorod. La plus proche station secondaire située à l'est de Moscou se trouve à Novosibirsk, soit à plus de 3 000 km, et compte tenu de la portée limitée des communications RMC il s'est avéré nécessaire d'installer une station réceptrice intermédiaire à Sverdlovsk afin d'effectuer des transferts de temps entre l'étalon primaire et les étalons secondaires.

Les horloges portables dont il est question plus haut sont constituées d'un maser à hydrogène compact récemment mis au point. Il fonctionne en mode actif sur le mode TE_{011} de la cavité, dont la taille est réduite grâce à un remplissage partiel avec un cylindre creux en saphir revêtu de Téflon qui fonctionne aussi comme réservoir de stockage. Le facteur de qualité Q de la cavité remplie est de 50 000, mais compte tenu de l'influence de la température sur la permittivité du saphir il est nécessaire d'effectuer sur la cavité un contrôle automatique de la fréquence, en utilisant des techniques déjà mises au point pour les masers classiques.

On obtient une stabilité relative de 3×10^{-14} pour des durées allant de 100 s à un jour. L'encombrement total de l'appareil est de $550 \times 450 \times 300$ mm.

En conclusion, M. Koshelyaevsky attire l'attention sur les difficultés rencontrées pour relier UTC(SU) à UTC(BIPM) au moyen des signaux du LORAN-C tels qu'ils sont reçus à Paris et à Pulkovo, près de Leningrad. En dépit de la précision limitée de cette liaison il se plaît à constater la stabilité à long terme de UTC-UTC(SU) sur les trois dernières années telle qu'elle apparaît sur la courbe montrée au BIPM, bien qu'il faille admettre l'existence d'un bruit à court terme qui se superpose.

M. Dorenwendt demande à quelle référence se rapportent les écarts de fréquence des étalons à césium présentés sur la figure 2.5 (Document CCDS/89-6a); il est confirmé qu'il s'agit de UTC(SU) fondée sur un certain nombre (3 à 5) de masers à hydrogène qui, ayant une stabilité à long terme très grande, sont par conséquent indépendants des horloges à césium.

M. Kalau présente le Document CCDS/89-7 qui donne des détails sur l'étalon à jet de césium en cours de construction à l'ASMW. Cet étalon comporte des jets d'atomes réversibles, une combinaison d'aimants quadrupolaires et hexapolaires et sa longueur de transition est de 743 mm. Les résultats de la première évaluation donnent une stabilité de $\sigma_y(\tau) = 3 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ pour $100 \text{ s} < \tau < 10^5 \text{ s}$ et une correction de phase de la cavité de $0,065 \pm 0,01$ Hz. Les recherches se poursuivent afin d'affiner ces valeurs et on espère que l'étalon entrera en service comme référence nationale en 1990.

M. Kovalevsky se dit heureux de voir s'augmenter le nombre actuellement très faible d'étalons primaires.

En présentant le Document CCDS/89-8 de la PTB, M. de Boer commente les tableaux sur les étalons primaires à césium, CS1 et CS2, qui constituent la base de l'échelle de temps de la PTB. L'incertitude sur la phase de la cavité demeure encore la source la plus importante dans l'évaluation des erreurs. On constate qu'une courbe $\sigma_y(\tau)$ de CS1 par rapport à CS2 suit une loi en $\tau^{-1/2}$ pour τ inférieur à cinq jours; elle approche ensuite graduellement le palier de scintillation inférieur à 10^{-14} . Pour τ supérieur à 30 jours le comportement est vraisemblablement influencé par un bruit additionnel dû aux renversements du jet toutes les 5 à 7 semaines (pour CS1) et toutes les trois semaines (pour CS2). Pour la période de 1985 à 1988 la différence moyenne de fréquence (CS2-CS1), est de 25×10^{-15} , ce qui est inférieur aux incertitudes combinées des deux étalons.

On procède actuellement à l'évaluation d'un troisième étalon CS3. Il est disposé verticalement pour éviter la déflexion gravitationnelle de son jet atomique à faible vitesse (environ 70 ms^{-1}); toutefois cela pose des problèmes de protection dus à la composante plus élevée du champ magnétique terrestre dans cette direction. Afin de réduire les effets

du décalage de phase de la cavité on a construit une cavité en forme d'anneau avec laquelle des essais ont été faits sur l'étalon expérimental CSX. Les défauts spatiaux de phase se trouvent réduits d'un facteur trois ; toutefois le niveau prédit par la théorie n'a pas encore été atteint.

Il y a un an environ on a commencé des expériences sur le piégeage d'ions en vue d'étudier la transition micro-onde à 12,6 GHz dans $^{171}\text{Yb}^+$ contenu dans un piège à hautes fréquences. On n'a pas réussi jusqu'ici à effectuer de piégeages.

Le président souligne que les résultats qui viennent d'être présentés confirment la qualité élevée des étalons à césium de la PTB. En réponse à M. Douglas, M. de Boer dit que la PTB n'a pas fait de correction pour le rayonnement du corps noir. En réponse à M. Allan il confirme que la variation de phase à l'intérieur de la cavité a constitué la source la plus élevée d'incertitude.

En ce qui concerne les activités de l'IEN (Document CCDS/89-11), M. Galliano rend compte d'une interrogation de type Ramsey de l'étalon à jet de magnésium. La largeur de raie pour un domaine d'interaction de 30 cm était de 1,2 kHz avec un rapport signal/bruit de 240. La stabilité était de $\sigma_y(\tau) = 8 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$. Dans l'infrarouge une chaîne de synthèse améliorée a permis d'établir une grille de 50 raies de référence dans la région de 10,9 μm en utilisant des techniques d'absorption saturée dans la bande ν_3 du RuO_4 . On a facilement obtenu des largeurs de raie de 300 kHz avec des valeurs du rapport signal/bruit convenables pour verrouiller des sources laser.

Le président prend note des contributions du NRLM (Document CCDS/89-13) et du CRL (Document CCDS/89-14) bien qu'aucun délégué japonais ne soit là pour les présenter.

Au nom du NPL, M. Knight rend compte (Document CCDS/89-15) de la mise au point d'un étalon à césium à pompage optique à Teddington. Le fonctionnement monomode et le rétrécissement spectral avec une diode laser à cavité externe ont été obtenus et on a observé le pompage optique du jet atomique.

UTC(NPL) est fondé sur une horloge désignée choisie dans un ensemble de sept étalons à césium de type commercial. Des ajustements ont été faits récemment pour réduire la différence $|\text{UTC}-\text{UTC}(\text{NPL})|$ bien que les corrections de fréquence nécessaires aient entraîné une certaine instabilité de l'échelle de temps.

Pour ce qui est du NIST, M. Allan rend compte (Document CCDS/89-16) de l'état actuel de l'étalon primaire du NIST, NBS-6, qui fonctionne comme étalon de fréquence et non comme horloge. On est en train d'en procéder à une évaluation approfondie qui permettra peut-être d'améliorer l'exactitude déjà avancée d'environ 1×10^{-13} . Pour le moment ce nombre est tombé à $2,5 \times 10^{-13}$ par suite d'une sensibilité accrue à la puissance. Un nouvel étalon primaire (NIST-7) avec pompage optique et détection optique sera mis en fonctionnement comme horloge

de façon quasi continue ; sa conception devrait permettre d'obtenir une exactitude de 10^{-14} et une stabilité à court terme de $5 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$. Le tube contenant le jet atomique a été fabriqué selon des conceptions totalement nouvelles pour ce qui est de la cavité et du four à césium ; par ailleurs, des sous-ensembles importants sont actuellement soumis à des essais.

Il est envisagé d'inclure dans l'ensemble des horloges du NIST des horloges nouvelles et meilleures. L'électronique de NBS-4 a été refaite ; dans le passé cette horloge a eu une stabilité à long terme de quelques 10^{-15} . Les travaux faits avec M. de Marchi ont permis d'obtenir une nette amélioration jusqu'au niveau de 10^{-14} , ou moins, sur la stabilité à long terme de deux types d'étalons commerciaux à césium.

Dans le domaine des recherches sur le stockage d'ions, une transition hyperfine à renversement de spin (électronique) des ions Be^+ confinés par piégeage de Penning et refroidis par interaction mutuelle avec des ions Mg^+ stockés et refroidis dans le même piège, fournit un étalon de référence. Cette combinaison permet de longues durées d'interrogation allant jusqu'à 550 s tout en maintenant l'effet Doppler de second ordre à moins de 1×10^{-14} . La stabilité est meilleure que $2 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$. Dans le visible, on étudie des ions simples de Hg^+ confinés dans un piège à hautes fréquences, au moyen d'une transition $^3\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ à $1,07 \times 10^{15}$ Hz. On a observé un facteur de qualité Q de raie de 10^{12} et on devrait pouvoir obtenir 5×10^{14} . Le but de ces travaux est maintenant de trouver surtout un moyen efficace de relier les étalons dans le visible aux étalons micro-onde déjà existants.

À une question de M. de Boer portant sur la pluralité des échelles de temps du NIST, M. Allan répond que le NIST maintient trois échelles. L'échelle de temps fondamentale destinée à la recherche en métrologie du temps et des fréquences est NIST(AT1) : la stabilité de celle-ci est donnée comme étant de $3 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ avec un palier de scintillation à long terme inférieur à 10^{-14} . UTC(NIST) est l'échelle officielle utilisée par les services du NIST qui disséminent le temps et les fréquences. Grâce à l'utilisation d'une technique de synchronisation asservie à long terme, sur les trois dernières années l'écart-type de 1σ pour UTC-UTC(NIST) a été de 361 ns et la moyenne du décalage de fréquence $2,8 \times 10^{-15}$. La troisième échelle de temps est TA(NIST) qui est ajustée à la meilleure estimation de la seconde du SI telle qu'elle est obtenue avec l'étalon primaire à césium du NIST. Cette échelle est fondée sur une méthode faisant appel à un algorithme de prédiction de Kalman.

M. Busca résume les travaux effectués à l'Observatoire de Neuchâtel (Document CCDS/89-18). Quatre horloges à césium de type commercial situées à l'Observatoire contribuent à l'établissement de l'échelle suisse de temps, TA(CH), sous la responsabilité du Bureau fédéral de métrologie. La conception d'un étalon primaire au césium est actuellement à l'étude. L'essentiel des recherches expérimentales est prévu pour 1991.

Dans un premier temps, on utilisera la sélection magnétique de l'état atomique, mais une version ultérieure comportera le pompage optique.

L'Observatoire a repris ses recherches sur les masers à hydrogène, cette activité ayant été complètement transférée de la Société Oscilloquartz SA au début de l'année 1989. L'effort va se porter surtout sur un nouveau maser actif à haute performance (EFOS-B) dans le cadre d'un programme parrainé par l'Agence spatiale européenne. Le document complémentaire (CCDS/89-19) donne des détails sur le fonctionnement de la gamme EFOS de masers à hydrogène ainsi que les spécifications de EFOS-B.

À propos du programme du NML, M. Harvey dit qu'aucun travail de recherche n'est actuellement fait sur les étalons primaires mais que le laboratoire a l'intention de continuer à faire fonctionner les masers à hydrogène qui existent.

M. Ma indique que le NIM fait fonctionner un étalon primaire à césium, NIM-3. Sur la période comprise entre 1984 et 1986 l'exactitude de cet étalon a été estimée à 3×10^{-13} . On a décidé de construire un étalon d'une qualité supérieure mais aucune décision n'a été prise quant au choix entre la séparation et la détection magnétiques ou optiques des états atomiques.

Le président conclut que ce tour d'horizon fait apparaître des progrès significatifs depuis la dernière session du CCDS ; toutefois, à son avis, le nombre d'étalons à césium sur lesquels est fondé TAI est encore insuffisant. Il est nécessaire que soient accrus aussi bien le nombre que l'exactitude des étalons. Le Comité reviendra sans doute sur ce point ultérieurement lorsqu'il discutera des recommandations éventuelles à faire au CIPM.

2. Méthodes de comparaison de temps

M. Kovalevsky demande à M. Allan d'exposer la situation actuelle à l'égard du GPS et des autres méthodes possibles de transfert de temps.

M. Allan signale le récent lancement (le 14 février 1989) du premier des satellites du bloc II du GPS et les difficultés qui résultent, pour les milieux internationaux intéressés aux problèmes de temps et de fréquence, de l'introduction de la disponibilité sélective (SA) qui comporte aussi bien une modulation de l'horloge du satellite que la dégradation des éphémérides. Ainsi qu'il en est rendu compte dans le rapport de la 10^e session du CCDS (p. S46), les incertitudes de 2σ qui résultent de l'utilisation de la SA s'élèveront à 100 m en positionnement horizontal et à 250 ns en mesure de temps. La technique de transfert de temps par vues simultanées, à la condition que le programme soit suivi de

façon précise, annulera complètement l'effet de dégradation de l'horloge du satellite ; toutefois, la dégradation des éphémérides aura encore une répercussion négative de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes.

Il existe trois possibilités pour tenter de résoudre cette difficulté.

(1) Les utilisateurs civils du GPS ont proposé à l'US Department of Defence qu'un petit nombre (≤ 4) de satellites ne soient pas affectés du plein effet de la SA de façon que l'accès au temps du GPS et le transfert par vues simultanées puissent s'accomplir avec la même exactitude que celle qui est obtenue avec les satellites actuels du bloc I.

(2) On peut envisager d'obtenir des éphémérides précises auprès d'autres services américains tels que le US Naval Observatory, le National Geodetic Survey, ou la Defence Mapping Agency. Ces éphémérides pourraient être mises à la disposition de la communauté internationale intéressée par le temps, avec quelque retard, et permettraient de remédier aux effets de dégradation des éphémérides en recalculant après coup les valeurs originales de transfert de temps.

(3) Le NIST, en liaison avec le BIPM, tente de produire des éphémérides indépendantes fondées sur les résultats de poursuites obtenus par des centres nationaux de mesure du temps : d'autres organisations (non militaires) déploient elles aussi pour leur propre compte des efforts dans ce sens.

Le président demande comment s'opère actuellement le transfert de temps par GPS. M. Guinot répond que les arrangements qui existent et qui sont préconisés par le BIPM comportent un lourd programme de poursuites permettant de relier entre eux tous les centres s'occupant de mesure du temps à l'échelle mondiale. La tâche serait simplifiée si un certain nombre de centres régionaux pouvaient être sélectionnés comme centres pivots et que les liaisons à longue distance soient limitées à ces stations. Pour l'avenir, un des problèmes importants consiste à déterminer les coordonnées des stations participantes. Elles pourraient déjà être sérieusement améliorées de manière différentielle grâce à une analyse des données de temps elles-mêmes : pour des stations distantes d'environ 1 000 km ou moins on peut déduire les coordonnées relatives avec des incertitudes de l'ordre de 20 cm.

Il s'ensuit une longue discussion sur les trois principaux facteurs que l'on considère comme déterminant l'exactitude présente et future des transferts de temps au moyen du GPS, c'est-à-dire la nécessité qui résulte d'une éventuelle SA d'avoir des éphémérides précises pour les satellites, les coordonnées des stations et enfin les corrections ionosphériques (et troposphériques). Pour ce qui est de la composante ionosphérique, M. Allan signale qu'un récepteur sans décodage est actuellement mis au point au NIST et que son plan sera communiqué à toute la communauté internationale.

Le président souhaite connaître le retard auquel il faut s'attendre pour obtenir les éphémérides précises : M. Allan pense que c'est de l'ordre de 3 ou 4 semaines mais il souligne le fait que pour le moment il n'y a aucune certitude qu'elles soient communiquées aux utilisateurs civils. D'autres organismes pourront peut-être les calculer mais généralement de cas en cas et il sera difficile de s'assurer d'un engagement à long terme. M. Guinot dit que le VLBI constitue une autre méthode d'obtention des résultats de poursuite dont on a besoin. M. Pilkington demande quel sera l'effet des modifications proposées dans les paramètres orbitaux des satellites du GPS. M. Allan précise que ces modifications sont encore à l'étude mais qu'elles pourraient entraîner un relèvement de l'altitude des satellites d'environ 50 km. Cela donnerait une période orbitale égale à 1/2 jour solaire plutôt qu'à 1/2 jour sidéral, comme c'est le cas actuellement, et que cela compliquerait de façon considérable le programme international de vues simultanées.

À propos des corrections ionosphériques, M. Pâquet suggère qu'il serait utile de faire la liste des stations équipées de récepteurs capables de fonctionner en double fréquence. Il mentionne San Fernando et Wettzell, deux stations qui sont ainsi équipées et qui pourraient fournir des données afin de modéliser le retard ionosphérique. M. Allan est favorable à l'idée d'une banque de données ionosphériques bien que M. Kovalevsky se demande si de telles données seraient valables au-delà d'un rayon limité à, disons, 100 km. Cela pourrait toutefois être utile pour une région comme l'Europe de l'ouest. Compte tenu des difficultés qu'il y a à modéliser le retard ionosphérique il souligne la nécessité pour chacun d'avoir un équipement fonctionnant sur double fréquence afin d'opérer ses propres mesures. Mme Thomas confirme que les différences entre modèle et mesure peuvent atteindre 10 à 20 ns. M. de Jong demande si les résultats du BIPM pour l'ionosphère obtenus au moyen d'un récepteur sans décodage sont disponibles. M. Guinot répond qu'en principe ils le sont mais il émet des réserves sur la possibilité de transférer les résultats obtenus pour une ligne de visée à d'autres lignes de visée, en particulier à celles pour lesquelles l'azimut est très différent. M. Steele suggère qu'il serait avantageux d'utiliser des poursuites nocturnes pour lesquelles le retard ionosphérique a des valeurs réduites. M. Guinot est d'accord mais cela est impossible à programmer avec la constellation actuelle des satellites.

M. Harvey remarque qu'il ne faut pas négliger la correction troposphérique. M. Kovalevsky dit qu'elle a été bien modélisée, au moins pour l'atmosphère sèche ; et plus difficilement pour la composante humide. Il pense que des visées correspondant à une hauteur inférieure à 30° ne sont pas souhaitables et M. Allan confirme que les liaisons en vues simultanées s'appuient sur des hauteurs supérieures à cette valeur.

Le président passe du GPS aux autres possibilités qui ont déjà été recommandées par le CCDS en 1985 (Recommandation S3) et approuvées par la CGPM. Il demande à M. Kirchner d'exposer l'état actuel du

projet LASSO ; M. Kirchner rappelle le lancement de l'équipement LASSO sur le satellite METEOSAT P2 en 1988. Les premiers retours des rétro réflecteurs ont été reçus à Grasse en octobre 1988, et ensuite de façon régulière, à l'aide d'un laser lunaire à haute puissance et d'un télescope à grande ouverture (150 cm). Comme les réflecteurs sont situés sur le corps tournant du satellite il est nécessaire de connaître non seulement la position du satellite mais aussi la phase de sa rotation afin de se placer dans des conditions où l'on puisse avoir des retours de lumière corrects. À Graz on n'a reçu aucun signal réfléchi à cause de mauvaises conditions météorologiques. Les stations laser situées en Pologne et en URSS pourraient elles aussi procéder à des tirs. Le nombre de stations équipées pour fonctionner dans les deux sens est malheureusement très faible.

M. Kovalevsky évoque la possibilité de fonctionner dans un seul sens, bien que les méthodes de travail avec le satellite soient encore très difficiles pour des systèmes à laser conventionnels ayant des ouvertures de, disons, 20 à 25 cm. On a besoin d'éphémérides améliorées du satellite afin de calculer les données nécessaires au pointage du laser quand on utilise le mode à un seul sens pour lequel il n'existe aucun signal de retour qui confirme la poursuite correcte du satellite.

M. Kirchner aborde ensuite les méthodes de transfert de temps dans les deux sens utilisant des modem Mitrex. Des essais ont montré que le retard du modem est constant à 0,5 ns près à la condition que la fréquence d'entrée demeure égale à la fréquence nominale à ± 3 kHz près. Par conséquent, pour toute liaison aller et retour au moins une station doit être à fréquence variable. Pour de telles expériences l'évaluation de la puissance nécessaire à la liaison doit tenir compte d'éventuelles perturbations dues aux autres services fonctionnant à puissance élevée compte tenu de la limitation de puissance du transpondeur satellitaire. Il est nécessaire d'étalonner avec exactitude les retards des stations au sol, retards qui toutefois paraissent stables à 1 ns près ou moins. Récemment, un transfert de temps dans les deux sens a été effectué avec l'URSS entre Graz et Dubna en utilisant des signaux conventionnels en FM de préférence à des codes de bruit pseudo-aléatoire.

M. de Jong indique que le VSL est également équipé d'un modem Mitrex. De gros efforts ont été faits pour déterminer les retards de transmission et de réception de la station avec le modem Mitrex, l'estimation totale ayant une incertitude de 1 à 2 ns. Le programme EUROMET prévoit le transfert de temps dans les deux sens à l'intérieur de l'Europe avec la possibilité de l'étendre aux États-Unis en passant par les satellites INTELSAT au moyen de transpondeurs fonctionnant dans la bande de fréquence 12,5-12,7 GHz.

En réponse à une question du président, M. Kirchner dit que Graz et le VSL pourront certainement coopérer sur le plan technique ; la difficulté est d'obtenir les approbations nécessaires des services des postes

et télécommunications nationaux et des autorités en charge des satellites. M. Winkler ainsi que M. Steele insistent sur les gros problèmes administratifs que soulève toute tentative d'organisation de transferts aller et retour, et plus particulièrement en Europe où l'imbroglio des réglementations est encore plus dense qu'aux États-Unis. M. Douglas rend compte de l'échec du NRC pour obtenir des communications satisfaisantes au-delà de la frontière avec les États-Unis ; le NRC était prêt à fonctionner depuis un an mais n'a reçu d'autorisation que pour la réception et non pour la transmission. Se référant aux discussions au sujet de ces difficultés, lors de la réunion des représentants des laboratoires horaires, M. Quinn dit qu'il est nécessaire pour le BIPM de connaître l'étendue du problème et de savoir auprès de qui il doit intervenir s'il y a quelque espoir d'influer sur la situation. Il est évident que le support d'une résolution de la CGPM sur la question constitue un avantage réel.

M. de Boer ainsi que M. Prost mentionnent que leur laboratoire respectif est intéressé par la mise sur pied de transfert de temps dans les deux sens au moyen du modem Mitrex de Hartl. M. Winkler ajoute que ce modem est devenu une norme de fait mais qu'il doit être modifié de façon à inclure une possibilité de communication. M. de Jong souligne que les postes et télécommunications hollandaises ont accordé la gratuité aux transferts de temps dans les deux sens compte tenu de leur contenu d'information minime. M. Galliano attire l'attention sur le lancement en 1990 du satellite Olympus muni de transpondeurs à haute puissance non seulement pour 12/14 GHz mais aussi pour 20/30 GHz.

Le président sollicite des commentaires sur les autres méthodes que l'on peut employer pour les transferts de temps. M. Guinot mentionne le développement possible d'un système de navigation par INMARSAT, à partir de ses satellites géostationnaires ; ce système pourrait à l'avenir aider au transfert de temps. M. Steele confirme qu'une transmission expérimentale a eu lieu l'an dernier à partir du satellite de MARECS B à 26 °W sur une fréquence de 1 542 MHz en utilisant une séquence pseudo-aléatoire identique au code SPS N° 1 du GPS.

Le président demande à M. Koshelyaevsky de présenter GLONASS ; celui-ci explique que le système en est actuellement à une phase expérimentale mais on pense que, vers 1991-1992, 10 à 12 satellites seront déployés sur des orbites presque circulaires à une altitude de 19 100 km, la période orbitale étant 11 h 15 min et l'inclinaison 64,8°. On estime que ce système permettra d'effectuer des transferts de temps à quelques dizaines de nanosecondes près et cela a déjà été confirmé par transport d'un maser à hydrogène de taille réduite entre deux stations distantes de 3 000 km. Jusqu'ici seuls des récepteurs expérimentaux sont disponibles mais leur production commerciale devrait commencer à la fin de 1990. Aucune restriction n'est imposée sur l'utilisation du système par la communauté civile de temps et de fréquences. À une question de M. Audoin concernant le type d'horloge des satellites,

M. Koshelyaevsky répond qu'il n'a aucune information précise mais qu'il est peu probable toutefois que ce soient des masers à hydrogène. M. Pilkington demande à quelle échelle de temps se réfère le GLONASS et M. Koshelyaevsky indique que l'on espère le coordonner avec UTC(SU). M. Knight fait remarquer que le Satellite Communications Group à l'université de Leeds a réussi depuis quelques années à relier les signaux des satellites GLONASS avec le temps du GPS. Pour répondre à M. Allan, il confirme qu'une façon de soutenir l'action du groupe de Leeds dans ses travaux serait de lui fournir une horloge à césium. Mme Thomas demande quelles sont les fréquences d'émission des satellites GLONASS. M. Steele dit qu'elles sont dans la gamme de 1 602 à 1 615 MHz et que la liste en est donnée avec d'autres informations dans le document général (FANS/4-WP/75) sur GLONASS qui a été présenté à une réunion du Special Committee of Future Air Navigation Systems de l'OACI à Montréal (2-20 mai 1988).

3. Rapport de la section du temps du BIPM

À la demande du président, Mme Thomas résume les points principaux de l'activité de la section du temps (Document CCDS/79-3). L'échelle EAL est maintenant fondée sur un total de 172 horloges commerciales plus 7 masers à hydrogène et 5 horloges primaires. Au 1^{er} janvier 1988 on a introduit une modification dans la pondération, la nouvelle limite supérieure pour le poids d'une horloge correspondant à une stabilité sur deux mois de $3,66 \times 10^{-14}$ contre $8,16 \times 10^{-14}$ auparavant. Au cours de 1988 douze horloges ont eu le poids maximal pour six intervalles consécutifs de deux mois, entre autres quatre masers à hydrogène et les étalons primaires de la PTB, CS1 et CS2. Aucun pilotage de l'unité d'échelle de TAI n'a été nécessaire depuis 1984 mais son évaluation ne repose plus maintenant, en pratique, que sur les seules données de CS1 et CS2, en raison de leur exactitude élevée et du fait qu'ils fonctionnent de façon continue.

Une bonne prédiction de fréquence des horloges permet de limiter le bruit qui se produit lorsque certaines d'entre elles entrent dans l'ensemble ou le quittent, ou quand les poids sont modifiés. Une étude a montré que la prédiction linéaire à un pas, utilisée depuis le début d'ALGOS, demeure la meilleure pour les horloges commerciales à césium. Avec la nouvelle méthode de pondération et la prédiction à un pas la stabilité de fréquence de l'EAL atteint $1,1 \times 10^{-14}$ par rapport à CS1 sur des échantillons d'une année, CS1 elle-même n'entrant que pour deux pour cent dans le poids total des horloges participant à l'EAL. Toutefois, une étude a également montré que l'on peut introduire dans ALGOS un système de double pondération permettant d'assurer

une stabilité à long terme de l'échelle calculée équivalente à celle que l'on a actuellement mais d'améliorer en même temps sa qualité à court terme. Le filtrage de Kalman présente des avantages bien connus dans le calcul d'une échelle de temps en temps quasiment réel et on a entrepris au BIPM une analyse théorique d'un algorithme de Kalman simple ; la prédiction de fréquence des horloges apparaît alors comme un filtre récursif. Si l'on choisit des échantillons de durée de base de deux mois, on retrouve la prédiction linéaire à un pas d'ALGOS, et des poids représentatifs du comportement des horloges sur des périodes de plusieurs échantillons de base consécutifs.

Les comparaisons de temps à longue distance par GPS ont une précision réduite à cause de l'estimation médiocre du retard ionosphérique et aussi à cause des erreurs sur la position du satellite. Ce dernier point est traité dans le document CCDS/89-10 qui montre la réduction des résidus par suite de l'utilisation, *a posteriori*, d'éphémérides précises. Le problème de l'ionosphère a été résolu au BIPM par la mise au point d'un récepteur double-fréquence sans décodage conçu et réalisé par un stagiaire du CRL (Japon). Ce récepteur estime le retard ionosphérique à la fréquence L1 à partir de la corrélation des signaux aux fréquences L1 et L2. L'incertitude de la mesure le long de la ligne de visée est de l'ordre de 1 à 2 ns et l'application de corrections ionosphériques mesurées a largement amélioré la liaison USNO-OP.

Au rapport de Mme Thomas M. Guinot ajoute quelques commentaires sur la génération de l'échelle de temps terrestre, TT(BIPM), en particulier pour les recherches sur les pulsars. Pour une période donnée on peut considérer le TT(BIPM) comme une EAL améliorée par pilotage sur la fréquence des étalons de fréquence du NRC et de la PTB. Il insiste aussi sur l'importance de l'expérience pratique pour la résolution des problèmes de comparaison de temps. Ainsi des expériences sur le GPS ont déjà été entreprises à l'Observatoire de Paris par le BIPM. Il aimerait voir ces travaux se poursuivre mais au BIPM plutôt qu'à l'Observatoire de Paris ; dans ce cas, l'observation directe des signaux des satellites nécessite la mise en fonction d'une ou plusieurs horloges à Sèvres.

Le président demande des avis sur la question en faisant de plus mention de son incidence sur d'éventuels changements de personnel au BIPM. M. Winkler soutient l'idée d'un élargissement du champ d'activités expérimentales du BIPM et indique qu'une certaine aide pourrait être apportée par l'USNO. M. Quinn est d'accord pour dire que la section du temps doit participer à des expériences pour améliorer aussi bien l'établissement que la dissémination du TAI et il apprécie beaucoup la suggestion d'aide en matière d'équipement faite par M. Winkler. En ce qui concerne le personnel il envisage une augmentation à long terme du nombre de personnes, mais pas dans l'avenir immédiat.

M. Allan transmet les remerciements des milieux qui travaillent sur les pulsars pour les efforts qui ont conduit à l'établissement du TT(BIPM)

et souhaite s'associer à l'offre faite par M. Winkler. En plus de récepteurs du GPS, il serait souhaitable d'avoir un récepteur du GLONASS. Il serait favorable aussi à l'introduction d'une double pondération pour le TAI. M. Busca et M. Kirchner posent des questions sur certains aspects du nouveau système de pondération. Mme Thomas répond qu'une description détaillée paraîtra dans le Rapport annuel de la section du temps dans le cours de l'année ; pour l'intervalle janvier-février 1988, 14 % des horloges ont eu le poids maximal. M. Granveaud constate qu'il semble là y avoir un changement important de principe dans l'établissement du TAI à la suite de la modification de la limite supérieure de poids : M. Winkler estime que cela reflète la diversité des horloges qui contribuent maintenant à l'échelle de temps. M. de Boer ainsi que M. Lepek se posent des questions sur l'efficacité des nouvelles méthodes : M. Guinot concède qu'il est difficile de la tester de façon objective bien que des essais aient été faits sous forme de calculs en parallèle avec les deux systèmes de poids sur des périodes de plusieurs années. Il mentionne que la distribution des poids est quelque peu curieuse ; elle est en forme de U, avec une prépondérance d'horloges faisant preuve d'un fonctionnement soit assez médiocre, soit assez bon. On ne comprend pas les raisons physiques de cette situation.

4. Rapport du Groupe de travail sur l'amélioration du TAI

Le président invite M. Winkler à présenter les conclusions du groupe de travail. M. Winkler distingue quatre domaines principaux d'intérêt :

(a) les liaisons horaires entre laboratoires par différents moyens (par ex. GPS, GLONASS, transfert aller et retour) et la nécessité de développer les liaisons régionales ;

(b) le faible nombre d'étalons primaires qui contribuent à l'établissement du TAI ;

(c) l'indépendance statistique des horloges qui contribuent à l'établissement du TAI, et

(d) le fait que seuls quelques laboratoires ont suivi la recommandation faite par le CCIR et ont rapproché leur UTC(k) à $\pm 1 \mu\text{s}$ près de UTC comme cela est souhaitable.

Au cours des deux jours qui ont précédé, le groupe de travail a étudié ces questions et les problèmes qui y sont liés ; il a rédigé au total huit projets de recommandations qui sont à considérer plutôt comme l'expression de son avis soumise à l'étude du CCDS. À côté de cette action formelle le Groupe de travail s'est mis d'accord sur un certain nombre de mesures qu'il est souhaitable de prendre en ce qui

concerne les transferts de temps par le GPS. M. Winkler passe ensuite rapidement en vue le texte des recommandations en donnant les précisions de détails qui s'imposent.

Le président remercie M. Winkler pour sa présentation et sollicite des commentaires généraux préalables à l'examen détaillé des textes avant que le CCDS ne décide de les adopter et d'en faire des recommandations officielles. M. Allan dit qu'il aurait aimé voir mentionner de façon explicite la nécessité d'une meilleure liaison horaire entre le BIPM et le VNIIFTRI. M. Kovalevsky répond qu'il faut garder cela à l'esprit pour décision ultérieure. Il ouvre ensuite la discussion sur le premier projet de recommandation du groupe de travail. Il suit un examen détaillé par le Comité de tous les projets de recommandations du groupe de travail. L'accord se fait sur quelques modifications rédactionnelles avec, dans certains cas, des changements plus fondamentaux. La discussion a été reprise le lendemain lorsque des versions révisées des projets de recommandations ont été distribuées pour nouvel examen. Deux de ces projets revêtent maintenant la forme de déclarations ; les autres projets constituent, soit tels quels ou remaniés, la base des Recommandations S1, S2, S3, S4 et S6. La Recommandation S5 résulte de la discussion dont il est rendu compte au point précédent sur l'extension des travaux expérimentaux de la section du temps du BIPM. Après approbation par le CCDS ces recommandations seront transmises au CIPM. Il a été établi des versions des projets en français et en anglais et le président rappelle qu'en cas de doute sur l'interprétation seul le texte français fait foi. Le Comité poursuit en étudiant en détail et en approuvant la déclaration 1989/1 portant sur la mise en œuvre de liaisons dans les deux sens par satellite :

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde,

— *considérant* la Résolution 4 de la 18^e Conférence générale des poids et mesures (1987),

— *tenant* compte de l'expérience mondiale acquise et

— *considérant* les limitations actuelles et futures de l'exactitude des transferts de temps au moyen des systèmes de navigation par satellites,

suggère de mettre en œuvre des liaisons dans les deux sens par l'intermédiaire de satellites pour les comparaisons horaires de grande exactitude,

recommande dans ce but que l'on demande au Bureau international des poids et mesures d'établir des groupes de travail *ad-hoc*, de coordonner leurs activités et d'entrer en contact avec les organisations spatiales appropriées.

La tâche des groupes de travail sera de définir les conditions d'un système opérationnel, par exemple :

- satellites et bandes de fréquence,
- spécifications des stations terriennes,
- étalonnage des stations,
- méthodes de mesure et horaires,
- traitement des données.

De la même manière, le Comité approuve la déclaration 1989/2 portant sur la publication des corrélations entre changements de fréquence des horloges :

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde,

considérant qu'une corrélation entre les variations de fréquences des horloges qui contribuent au TAI peut dégrader sa stabilité à long terme et son exactitude,

recommande

— que le BIPM étudie les corrélations entre les variations de fréquence des horloges qui contribuent au TAI et établisse un rapport à ce sujet,

et

— que le BIPM agisse auprès des laboratoires qui contribuent au TAI afin d'améliorer l'indépendance statistique des horloges.

Le président passe ensuite à l'examen des projets proposés des Recommandations S1 à S6. Au cours de la discussion qui s'ensuit sur la rédaction de la Recommandation S1 l'opinion se divise nettement pour savoir de quelle façon et dans quelle mesure l'on doit se rapprocher de l'UTC ainsi que le recommande le CCIR. M. Guinot ainsi que M. Winkler font des réserves sur l'emploi des horloges « calculées » tandis que M. Allan et M. Lepek estiment que le rapprochement étroit à l'UTC est souhaitable, que celui-ci soit obtenu par le calcul ou physiquement. M. Kirchner mentionne les difficultés que rencontrent les petits laboratoires pour se conformer aux limites suggérées de $\pm 1 \mu\text{s}$; pourtant M. de Jong insiste pour dire que les systèmes de télécommunications ont besoin de ce degré d'exactitude pour leurs échelles de temps de référence. Après une longue discussion le président suggère de satisfaire aux objections en supprimant toute référence à la Recommandation A/7 du CCIR dans le texte et en reportant celle-ci en annexe à la Recommandation S1 ; cette proposition est jugée acceptable. Avec ce changement et en admettant un peu de souplesse dans la tolérance avancée pour UTC-UTC(k) la Recommandation S1 est approuvée.

La Recommandation S2 combine deux projets soumis par le groupe de travail : elle a été rédigée en termes généraux en assumant que les laboratoires doivent rester libres de décider eux-mêmes avec quels détails ils doivent rendre compte au BIPM des conditions d'environnement des horloges qu'ils conservent et des modifications de ces conditions. La Recommandation S2 est adoptée avec des modifications rédactionnelles mineures. La Recommandation S3 diffère de la précédente version car elle comporte un 'recommande' supplémentaire à propos de l'étude des différences systématiques entre les étalons primaires ; cela est inspiré par la différence de 2×10^{-13} constatée entre les étalons de la PTB et du VNIIFTRI. Avec cet ajout et des modifications mineures la Recommandation S3 est approuvée.

La forme finale de la Recommandation S4 a été obtenue après un profond remaniement rédactionnel effectué par MM. Pilkington et Allan, aidés du président. En réponse à un commentaire de M. Lepek, M. Kovalevsky défend l'emploi de la terminologie utilisée en géodésie dans un texte qui, en fait, fait appel à des concepts de géodésie. Toutefois, il suggère une modification et avec ce changement la Recommandation S4 est approuvée. La Recommandation S5 est également approuvée avec des améliorations mineures. M. Guinot souhaite saisir la présente occasion pour remercier le NIST d'avoir prêté du matériel au BIH et au BIPM, ainsi que l'USNO qui avait fait de même précédemment. Enfin, le texte de la Recommandation S6 est approuvé (voir Recommandations S1 à S6, pp. S 25 à S 28).

Le président conclut en remerciant M. Winkler pour son excellent travail de présidence du groupe de travail dont les projets de recommandations sont devenus avec fort peu de changements des déclarations et des recommandations que le CCDS vient d'approuver.

5. Méthodes statistiques appliquées aux mesures horaires

Le président demande un rapport sur le 3rd Symposium on Time Scale Algorithms qui s'est tenu à Turin en septembre 1988. En réponse, M. Allan dit que M. Guinot a présidé la réunion et que M. Galliano l'a accueillie à l'IEN. Il ne veut parler que d'un ou deux des documents ; on peut se procurer la série complète des contributions en la demandant à la Time and Frequency Division, NIST, Boulder. L'USNO a montré qu'en regardant une horloge on la perturbe et que les horloges fonctionnent mieux lorsqu'elles ne sont aucunement perturbées ! De ce point de vue, les horloges à bord de satellites doivent bien se comporter ; pourtant M. Winkler note que les horloges du GPS sont soumises à des manœuvres et M. Guinot fait remarquer que la période orbitale sidérale entraîne une modification de la position par rapport au soleil et donc une fluctuation annuelle éventuelle. M. Allan mentionne un certain nombre de documents sur le filtrage de Kalman. Stein et Gifford (NRL) ont appliqué cette technique à l'ensemble des horloges du GPS et ont montré la présence de bruit blanc de fréquence et de marche aléatoire. Le filtre de Kalman utilise un modèle déterminé et si celui-ci constitue une bonne approximation de la réalité alors le filtre fonctionne bien. Il est utilisé par le Jet Propulsion Laboratory pour piloter les horloges du Deep Space Network. En ce qui concerne les algorithmes qu'emploie le NIST, il semble que l'échelle de temps NIST(AT1) est comparable au TAI ou même meilleure que le TAI. L'une de ses caractéristiques est de réduire automatiquement le poids d'une horloge qui présente un saut de fréquence. L'utilisation de cet algorithme n'a toutefois pas donné de bons résultats à l'IEN et à l'USNO. Il est intéressant de noter que les courbes $\sigma_y(\tau)$ du temps des éphémérides

(TE) et du temps atomique (TA) se rencontreront après quelques siècles tandis que le PT (le temps des pulsars, obtenu à partir des pulsars à la milliseconde) et le temps atomique atteignent un niveau comparable après environ un an.

Mme Thomas rappelle que le BIPM a l'intention d'introduire une méthode de double pondération. M. Kovalevsky demande si cela comporte l'addition de deux algorithmes. M. Guinot dit qu'il est difficile d'en donner une brève description mais les détails seront exposés dans le prochain Rapport annuel qui doit être publié en juin 1989. M. Allan dit qu'on a aussi étudié au NIST des variations systématiques. Il se peut que l'application de l'algorithme de AT1 aux étalons de la PTB ait révélé une corrélation au niveau d'environ 3×10^{-14} entre CS1 et CS2.

6. Relation entre le temps atomique et les pulsars

À la demande du président M. Allan donne un compte rendu de l'état actuel des recherches sur les pulsars en tant qu'horloges. Il donne des résultats pour quatre des pulsars dont la période est inférieure à 10 ms, 1937 + 21, 1953 + 29, 1855 + 09 et 1957 + 20. L'intérêt principal se porte sur le 'pulsar à la milliseconde' 1937 + 21, dont la période est de 1,56 ms et que l'on a observé pour la première fois en novembre 1982. Le résultat des mesures de temps sur les sept années écoulées ont montré une décélération de 1×10^{-14} par jour combinée avec une précision de mesure du temps d'environ 300 ns. La dérive de fréquence est estimée en partant d'un modèle du mouvement de la Terre comportant 7 paramètres ; on la soustrait bien entendu avant de la comparer avec des horloges terrestres. Cela étant fait, la stabilité sur une période de sept ans est de $2,7 \times 10^{-15}$.

1937 + 21 est la seule source actuellement assez bonne pour les recherches sur le fond d'ondes gravitationnelles (qui doit se traduire par de petites irrégularités dans l'indication du temps des pulsars), recherches qui sont poursuivies, entre autres, par J.H. Taylor à l'Université de Princeton. À l'heure actuelle le résidu par moindres carrés des résultats des observations augmente avec le temps : il est impossible de donner une raison spécifique de ce comportement bien que l'on ait considéré quatre processus plausibles.

L'obtention de l'éphéméride terrestre est effectuée au JPL ainsi qu'à l'Université de Harvard en utilisant des extrapolations fondées sur des polynômes de Chebyshev, conçues pour donner une exactitude de 0,5 μ s. J. H. Taylor a effectué des comparaisons de 1937 + 21 avec les échelles UTC du LPTF, NIST, NRC, PTB, TAO et USNO qui donnent dans la plupart des cas une dispersion (Document CCDS/89-16) de ± 1 à 2 μ s sur une période de quatre ans et qui dépassent à peine ± 1 μ s pour UTC(NIST) et UTC(PTB).

M. Guinot fait remarquer que l'utilisation de l'UTC(k) comme référence de temps introduit un bruit additionnel dû au pilotage sauf, ainsi que le fait observer M. Pilkington, dans le cas de la PTB pour lequel il n'y a pas de pilotage. M. Dorenwendt et M. Douglas demandent ce qu'il en est de la stabilité de la dérive et de l'éventualité de sauts du taux de ralentissement.

M. Allan répond que l'incidence des sauts de fréquence dans un vieux pulsar devrait être petite. Jusqu'ici on n'a observé aucune variation dans le taux de ralentissement de 1937 + 21 et on pense que ce pulsar restera stable pendant au moins deux décennies. M. Lepek suggère que l'on pourrait communiquer au BIPM les résultats des pulsars à la milliseconde comme horloge complémentaire pour comparaison avec le TAI. M. Guinot répond qu'il serait heureux de recevoir de telles données.

M. Granveaud parle de l'observation des pulsars faite au site de Nançay qui fait partie de l'Observatoire de Paris; on y utilise un radiotélescope à grande ouverture (200 m × 40 m). On a obtenu une résolution de 700 ns sur les temps d'arrivée. M. Kovalevsky demande quelle est la situation en URSS. M. Koshelyaevsky répond que l'Académie des sciences a un radio-observatoire en fonctionnement près de Moscou; le VNIIFTRI apporte son appui financier mais n'y est pas impliqué ni du point de vue scientifique ni du point de vue technique.

7. Rapports des autres réunions

Des rapports sont présentés sur les réunions suivantes :

(a) Réunion intérimaire de la Commission d'études 7 du CCIR, Genève, 11-19 avril 1988.

(b) XX^e Assemblée générale de l'Union astronomique internationale, Baltimore, 2-11 août 1988.

M. Steele, rapporteur principal de la Commission d'études 7, présente un ou deux aspects des travaux de la réunion intérimaire susceptibles de concerner le CCDS. À l'occasion de la discussion de la Recommandation S1 on a déjà parlé du projet de Recommandation A/7 et il bon que le texte du CCIR accompagne la proposition faite par le CCDS au CIPM. Selon toute vraisemblance la Recommandation A/7 sera confirmée lors de la réunion finale de la Commission d'études 7 en septembre 1989 et ultérieurement par l'Assemblée plénière du CCIR en 1990.

Il attire l'attention sur les travaux en cours au sein de la Commission d'études 7 en vue de la rédaction d'un manuel sur la dissémination du temps et de la fréquence par satellite, pour lequel il joue le rôle de coordonnateur. Le BIPM a déjà contribué à ce travail en rédigeant un chapitre sur les échelles de temps ainsi que deux annexes sur la relativité

et la géodésie. Les autres contributions arrivent et il espère que les manuscrits de tous les chapitres seront prêts à l'époque de la réunion finale ce qui permettrait de voir la publication sortir en 1990, en même temps que les autres volumes du CCIR. Plusieurs membres du CCDS ont fait part de leur intention de participer au transfert de temps dans les deux sens et c'est le but de ce manuel de donner des informations complètes et des conseils précisément aux nouveaux participants à ce domaine des communications par satellites.

Rendant compte de l'Assemblée générale de l'UAI, M. Winkler parle d'abord d'intéressants développements au sujet des gyromètres à laser conçus pour détecter les changements dans le rythme de rotation de la Terre. Les questions de transfert de temps ont été traitées en faisant spécialement référence au GPS mais on a parlé aussi des transmissions terriennes. Une session spéciale sur le pulsar 1937 + 21 a été présidée par M. Allan ; M. Guinot et M. Seidelmann ont exposé comment sont dérivés le temps terrestre (TT) et le temps barycentrique, ce dernier ne différant que par des termes périodiques. Il a été rendu compte des premiers résultats d'expériences faites à l'Université du Maryland tendant à confirmer que la vitesse de la lumière est invariable dans des systèmes en rotation. On pouvait s'attendre à un décalage de 150 ps sur une mesure locale d'aller et retour mais cela n'a pas été constaté. Toutefois ce résultat n'est pas encore significatif à cause du peu de mesures expérimentales non perturbées.

M. Winkler aborde cinq résolutions d'intérêt pour le CCDS qui ont été adoptées à Baltimore :

C1 traite d'un référentiel céleste fondé sur la radio-astrométrie et son ajustement au système visuel de référence conventionnel ;

C2 reconnaît l'importance de l'action du Groupe de travail sur les systèmes de référence et souhaite que cette action se poursuive dans plusieurs domaines y compris celui du temps ;

C7 reconnaît la valeur des services du GPS et souhaite que ce service soit maintenu ;

C8 recommande que des recherches soient faites sur de nouvelles méthodes de comparaisons de temps en coopération avec le BIPM ;

C10 demande aux présidents de l'UAI, l'AIG et l'URSI d'intervenir auprès de B. Guinot et S. Yumi afin qu'ils écrivent une histoire du BIH et de l'IPMS.

Dans la suite de la discussion M. Winkler s'accorde avec M. Lepek pour dire qu'un gyromètre à laser ne conviendrait pas pour suivre à long terme la rotation de la Terre. Ce type de gyromètre est toutefois bien adapté pour observer les changements dans le rythme de cette rotation. On est en train de mettre au point des gyromètres supraconducteurs. M. Quinn relève qu'il y a des progrès intéressants qui risquent d'avoir des conséquences sur les théories fondamentales ; toutefois M. Kovalevsky estime qu'il sera difficile de distinguer entre

différentes formulations de la relativité à mieux qu'environ 20 pour cent. M. Winkler souligne que maintenant la relativité est devenue un aspect des sciences de l'ingénieur ; par exemple, il n'est pas possible d'utiliser le GPS sans faire des corrections de relativité.

8. Questions diverses

Le président demande s'il y a d'autres questions. M. Allan indique qu'un récepteur de GPS étalonné a été transporté en différents endroits au Japon à l'époque de la réunion de la CPEM à Tsukuba. Cette expérience pourra être intéressante pour les transferts de temps dans la région du Pacifique ouest.

M. Quinn demande que le projet de comptes rendus de la session, en langue anglaise, soit distribué à tous les participants dans les semaines qui viennent pour commentaires et approbation. De plus, les contributions seront rassemblées en un volume dont un exemplaire sera envoyé à tous les participants. Enfin, à une date nettement plus lointaine, la version imprimée des comptes rendus de cette réunion sera disponible en français et en anglais.

En conclusion de la session, le président exprime au BIPM la reconnaissance de tous les participants pour l'excellent travail de la section du temps. Il ne fait aucun doute pour lui que, dans le monde entier, on apprécie la qualité de ce service et il est évident que tous les intéressés en attendent encore d'autres améliorations. Dans le cours normal des choses on peut envisager que le CCDS se réunira dans trois ou quatre ans. M. Guinot sera certes le bienvenu à la prochaine session, mais alors il ne sera plus responsable de la section du temps puisqu'il doit prendre sa retraite l'année prochaine. Le président saisit donc l'occasion pour souhaiter à M. Guinot, en son nom propre et au nom des membres du CCDS, une très heureuse et agréable retraite. Les applaudissements de l'ensemble des délégués accompagnent ces paroles.

En réponse, M. Guinot remercie le président et les délégués pour leurs aimables vœux. Les travaux de la section du temps se sont montrés assez lourds à certains moments mais il y a toujours pris plaisir grâce à l'excellente coopération dont il a bénéficié de la part de nombreux laboratoires et aux agréables relations qui existent entre tous dans les milieux internationaux concernés par les problèmes de temps et de fréquences.

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

Synchronisation des UTC(k) avec UTC

RECOMMANDATION S 1 (1989)

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde,
considérant

— que certains laboratoires fournissent au Bureau international des poids et mesures (BIPM) des valeurs de UTC(k) qui présentent des différences significatives avec UTC,

— que le fait que les centres horaires soient en bon accord avec UTC facilite les opérations dans de nombreux programmes en astronomie, géodésie, navigation et télécommunications,

recommande

— que les laboratoires, en consultation avec le BIPM, utilisent des méthodes appropriées pour réduire à quelques microsecondes les écarts pouvant exister entre UTC(k) et UTC sans toutefois effectuer d'ajustement en fréquence sur les horloges contribuant au TAI.

Annexe à la Recommandation S1 (1989)

RECOMMANDATION 685 *

SYNCHRONISATION INTERNATIONALE DES ÉCHELLES DE TEMPS UTC
(Question 1/7)

Le Comité consultatif international des radiocommunications (CCIR),
considérant

a) qu'aux termes de la Recommandation 460-4, il suffit que les émissions de signaux horaires soient synchronisées avec l'UTC à \pm une milliseconde près, tout en étant cependant « aussi étroitement que possible » conforme à l'UTC ;

b) que l'UTC(k) de chaque centre horaire doit être étroitement conforme à l'UTC (Recommandation 536) ;

* Le Directeur du CCIR est prié de porter la présente Recommandation à l'attention du Président du CIPM et du Directeur du BIPM.

c) que l'absence de synchronisation entre les échelles de temps UTC(k), qui se situe typiquement au niveau de quelques microsecondes, est source de confusion et de difficulté pour certains utilisateurs ;

d) qu'il y a un nombre croissant d'utilisateurs de systèmes de communications, de navigation, de radioastronomie et de géodésie qui ont besoin d'une synchronisation mondiale au niveau de quelques nanosecondes,

recommande

1. que chaque centre horaire, dans les limites de ses caractéristiques de fonctionnement, cherche à perfectionner ses méthodes, ses techniques d'asservissement numériques et ses algorithmes pour synchroniser son UTC(k) avec l'UTC, étant entendu qu'une microseconde est un objectif souhaitable ;

2. que les centres horaires continuent à améliorer la stabilité à long terme de leurs horloges et les méthodes associées utilisées pour engendrer leur UTC(k) ;

3. que les centres horaires, en synchronisant leur UTC(k), cherchent à coordonner leurs efforts avec le Bureau international des poids et mesures.

Amélioration de la stabilité à long terme du TAI

RECOMMANDATION S 2 (1989)

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde,

considérant

— qu'il est nécessaire d'améliorer et de contrôler la stabilité à long terme du Temps atomique international (TAI),

— que les modifications de l'environnement peuvent être une des causes principales de changement de fréquence des horloges contribuant au TAI,

recommande que les laboratoires participant au TAI

— améliorent la stabilité à long terme de leurs étalons, par exemple à l'aide de techniques telles que celles qui ont été mises en œuvre par A. de Marchi,

— rendent compte au Bureau international des poids et mesures (BIPM) des résultats obtenus à l'aide de nouveaux types d'étalons, en tenant compte du fait que les informations fournies au BIPM pourront, si cela est demandé, être considérées comme confidentielles,

— stabilisent les conditions physiques de l'environnement de chaque horloge contribuant au TAI,

— notent soigneusement ces conditions dans leurs archives et les communiquent au BIPM.

Amélioration de l'exactitude en fréquence des étalons primaires

RECOMMANDATION S 3 (1989)

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde,

considérant

— la nécessité d'améliorer l'exactitude de l'intervalle unitaire de l'échelle du Temps atomique international (TAI),

— le nombre réduit d'étalons primaires à césium qui contribuent effectivement au TAI,

recommande

— la construction de nouveaux étalons primaires à césium,

— l'amélioration de l'exactitude en fréquence des étalons primaires existants,

— l'étude des différences systématiques de fréquences qui existent entre eux.

Coordonnées de référence des antennes

RECOMMANDATION S 4 (1989)

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS),

considérant que le manque de cohérence des coordonnées des antennes est une importante source d'erreurs dans les comparaisons de temps par satellites utilisant les méthodes unidirectionnelles,

recommande que, dans chaque site, pour de telles comparaisons employées pour le Temps atomique international (TAI) :

— les coordonnées de référence de l'antenne correspondent à sa position réelle dans le repère de référence terrestre du Service international de la rotation terrestre (IERS),

— les coordonnées de référence et les coordonnées opérationnelles utilisées dans le récepteur soient communiquées au Bureau international des poids et mesures (BIPM) et aux laboratoires coopérants,

— ni les coordonnées opérationnelles, ni l'emplacement de l'antenne ne soient modifiés sans raison pressante,

— si une telle modification apparaît cependant nécessaire, les données suffisantes pour maintenir l'exactitude des comparaisons horaires soient communiquées au BIPM et aux laboratoires coopérants.

Le CCDS *recommande également* que des méthodes de positionnement relatif soient employées pour relier les antennes aux stations de l'IERS, en consultation avec le BIPM.

Installation d'horloges au BIPM

RECOMMANDATION S 5 (1989)

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS),
considérant,

— qu'il est important de maintenir au Bureau international des poids et mesures (BIPM) un haut niveau de compétence dans la coordination des comparaisons de temps qui sont à la base du calcul du Temps atomique international (TAI),

— qu'une expertise de la pratique des comparaisons du temps au BIPM est d'ores et déjà souhaitable et deviendra indispensable dans l'avenir,

— que les compétences déjà acquises l'ont été grâce aux installations généreusement mises à sa disposition par l'Observatoire de Paris,

recommande que le BIPM prenne des mesures pour disposer d'une ou plusieurs horloges ainsi que de l'équipement nécessaire pour faire des comparaisons de temps, et

invite, par suite du coût élevé de ces équipements, les laboratoires membres du CCDS à examiner de prêter un tel matériel au BIPM.

Liaisons horaires

RECOMMANDATION S 6 (1989)

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

— qu'il est nécessaire d'améliorer l'efficacité et l'exactitude des comparaisons internationales de temps pour le Temps atomique international (TAI),

— qu'il est également nécessaire d'améliorer les liaisons horaires entre les étalons primaires,

recommande que le Bureau international des poids et mesures (BIPM) étudie et organise un réseau optimal de liaisons horaires en utilisant toutes les méthodes appropriées qui peuvent être disponibles.

ANNEXE S 1

Documents de travail présentés à la 11^e session du CCDS

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

Document
CCDS/

- 89-1 LPTF-LHA (France). — Contribution to the 11th CCDS, par M. Granveaud et C. Audoin.
- 89-2 OFMET (Suisse). — Situation in Switzerland.
- 89-3 BIPM. — Report of the BIPM Time Section to CCDS, par B. Guinot et C. Thomas.
- 89-4 TUG (Autriche). — Report to the 11th Session of CCDS : Satellite Time Transfer, par D. Kirchner.
- 89-5 NRC (Canada). — Report on Activities to the 11^e Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde.
- 89-6 VNIIFTRI (U.R.S.S.). — Report State Time and Frequency Service of USSR to CCDS.
- 89-7 ASMW (Rép. dém. allemande). — Report of the ASMW (GDR) to the 11th session of the CCDS.
- 89-8 PTB (Rép. féd. d'Allemagne). — Report to the 11th Session of CCDS, par H. de Boer.
- 89-9 BIPM. — Format for GPS data at BIPM.
- 89-10 BIPM. — GPS Time Comparisons, Test on the use of precise ephemerides, par W. Lewandowski et B. Guinot.
- 89-11 IEN (Italie). — Report on activities to the 11th Session of CCDS.
- 89-12 VSL (Pays-Bas). — Contribution to the 11th Session of CCDS, par G. de Jong.

- 89-13 NRLM (Japon). — Report to CCDS from NRLM, par Y. Nakadan, S. Ohshima, I. Ikegami et Y. Koga.
- 89-14 CRL (Japon). — Research Activities on Time and Frequency at Communications Research Laboratory, par R. Hayashi, K. Nakagiri, F. Takahashi, S. Urabe et T. Satoh.
- 89-15 NPL (Royaume-Uni). — Report to the 11th Session of CCDS, par D. J. E. Knight.
- 89-16 NIST (É.-U. d'Amérique). — Report of the National Institute of Standards and Technology for Eleventh CCDS.
- 89-17 NIST (É.-U. d'Amérique) et BIPM. — The positioning of GPS Antennas in Time-Keeping Laboratories of North America.
- 89-18 Observatoire de Neuchâtel (Suisse). — Rapport, par G. Busca.
- 89-19 Observatoire de Neuchâtel (Suisse). — Performances of the existing EFOS-Masers and of the new generation of EFOS-Masers, par G. Busca.
- 89-20 RGO (Royaume-Uni). — Report of the RGO to the 11th Session of the CCDS, par J. D. H. Pilkington.
-

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

MEETING IN 1989

Note on the use of the English text

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

Note sur l'utilisation du texte anglais

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

THE BIPM AND THE CONVENTION DU MÈTRE

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

BIPM has its headquarters near Paris, in the grounds (43 520 m²) of the Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) placed at its disposal by the French Government; its upkeep is financed jointly by the Member States of the Convention du Mètre*.

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

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

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

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

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

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

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

* As of 31 December 1989 forty-seven States were members of this Convention: Argentina (Rep. of), Australia, Austria, Belgium, Brazil, Bulgaria, Cameroon, Canada, Chile, China (People's Rep. of), Czechoslovakia, Denmark, Dominican Republic, Egypt, Finland, France, German Democratic Rep., Germany (Federal Rep. of), Hungary, India, Indonesia, Iran, Ireland, Israel, Italy, Japan, Korea (Dem. People's Rep.), Korea (Rep. of), Mexico, Netherlands, Norway, Pakistan, Poland, Portugal, Romania, Spain, South Africa, Sweden, Switzerland, Thailand, Turkey, U.S.S.R., United Kingdom, U.S.A., Uruguay, Venezuela, Yugoslavia.

Some forty physicists or technicians are working in the BIPM laboratories. They are mainly conducting metrological research, international comparisons of realizations of units and the checking of standards used in the above-mentioned areas. An annual report published in *Procès-Verbaux des séances du Comité International* gives the details of the work in progress. BIPM's annual appropriation is of the order of 17 960 000 gold francs, approximately 32 600 000 French francs (in 1989).

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

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

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

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

- *Comptes rendus des séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures*;
- *Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures*;
- *Sessions des Comités Consultatifs*;
- *Recueil de Travaux du Bureau International des Poids et Mesures* (this collection for private distribution brings together articles published in scientific and technical journals and books, as well as certain work published in the form of duplicated reports).

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

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

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

Comité International des Poids et Mesures

Secrétaire

J. DE BOER

Président

D. KIND

MEMBERS
OF THE
COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

President

J. KOVALEVSKY, Centre d'études et de recherches géodynamiques et astronomiques, Grasse (France).

Members

All Union Research Institute for Physical, Technical and Radio-Technical Measurements [VNIIFTRI], Moscow (USSR).

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung [ASMW], Berlin (German Dem. Rep.).

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

Communications Research Laboratory [CRL], Tokyo (Japan).

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

International Astronomical Union [IAU].

International Radio Consultative Committee [CCIR] of the International Telecommunication Union.

International Union of Radio Science [URSI].

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

- Laboratoire de l'Horloge Atomique [LHA] du Centre National de la Recherche Scientifique, Orsay (France).
- National Institute of Metrology [NIM], Beijing (Pop. Rep. of China).
- National Institute of Standards and Technology [NIST], Gaithersburg (U.S.A.).
- National Physical Laboratory [NPL], Teddington (United Kingdom).
- National Physical Laboratory of India [NPLI], New Delhi (India).
- National Physical Laboratory of Israel [INPL], Jerusalem (Israel).
- National Research Council of Canada [NRC], Ottawa (Canada).
- National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Tsukuba (Japan).
- Observatoire Royal de Belgique [ORB], Brussels (Belgium).
- Office Fédéral de Métrologie [OFMET], Wabern (Switzerland).
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig (Fed. Rep. of Germany).
- Real Instituto y Observatorio de la Armada [ROA], San Fernando (Spain).
- Royal Greenwich Observatory [RGO], Cambridge (United Kingdom).
- Technical University of Graz [TUG], Graz (Austria).
- U.S. Naval Observatory [USNO], Washington (U.S.A.).
- Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (Netherlands).
- The Director of the BIPM (T. J. QUINN).
-

AGENDA
for the 11th meeting

1. Progress in atomic frequency standards and of clocks.
 2. Time comparison methods :
 - Global Positioning System, evolution of the system and its use, organisation of time links ;
 - other methods, experiences and projects (LASSO, MITREX, NAVSAT, ...).
 3. Statistical methods applied to time measurements.
 4. Relations between Atomic Time and Pulsar Time.
 5. Report on the activities of the Time Section of the BIPM.
 6. Reports on meetings :
 - Interim meeting of the Study Group 7 of the CCIR, Geneva, 11-19 April 1988.
 - General Assembly of the International Astronomical Union, Baltimore, 2-11 August 1988.
 7. Report of the Working Group on TAI of the CCDS, improvements to bring to the TAI service.
 8. Miscellaneous.
-

REPORT
OF THE COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE
(11th meeting - 1989)
TO THE
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

by Mr J. McA. STEELE, rapporteur

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS) held its 11th meeting at the Bureau International des Poids et Mesures at Sèvres during the two days, Wednesday and Thursday, 19 and 20 April 1989.

The following were presents :

J. KOVALEVSKY, member of the CIPM, president of the CCDS.

Delegates from the member laboratories and organizations :

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

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

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

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield (I. K. HARVEY).

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

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

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

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris [IEN], Turin (P. G. GALLIANO).

Laboratoire de l'Horloge Atomique [LHA] du Centre National de la Recherche Scientifique, Orsay (C. AUDOIN).

National Institute of Metrology [NIM], Beijing (MA Feng Ming).

National Institute of Standards and Technology [NIST], Boulder (D. W. ALLAN).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (D. J. E. KNIGHT).
National Physical Laboratory of Israel [INPL], Jerusalem (A. LEPEK).
National Research Council of Canada [NRC], Ottawa (R. J. DOUGLAS).
Observatoire Royal de Belgique [ORB], Brussels (P. PÂQUET).
Office Fédéral de Métrologie [OFMET], Wabern (L. PROST).
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig (K. DORENWENDT, H. DE BOER).
Royal Greenwich Observatory [RGO], Cambridge (J. D. H. PILKINGTON).
Technical University of Graz [TUG], Graz (D. KIRCHNER).
U.S. Naval Observatory [USNO], Washington (G. M. R. WINKLER).
Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (G. DE JONG).
The Director of the BIPM (T. J. QUINN).

Invited guests :

Mr NAK SAM CHUNG, Korea Standards Research Institute [KSRI],
Taejon (Rep. of Korea).
Mr P. GIACOMO, Bureau des Longitudes, Paris.
Mr G. BUSCA, Observatoire Cantonal [ON], Neuchâtel.

Also attending the meeting : B. GUINOT, C. THOMAS et J. AZOUBIB (BIPM).

Excused :

Communications Research Laboratory [CRL], Tokyo ; National Physical Laboratory of India [NPLI], New Delhi ; National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Tsukuba.

Absent :

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

The Chairman extended a welcome to the members of the Committee, many of whom had also attended the preceding meeting of the representatives of the time laboratories organised by the CCDS Working Group. He was especially pleased to see present the new members of the CCDS, Messrs Harvey, de Jong (replacing Mr Kaarls), Lepek, Pâquet and Prost. He also welcomed Mr Nak Sam Chung from the Republic of Korea as an observer. Mr Steele had kindly agreed to act as rapporteur for the meeting.

Turning to the Agenda, Mr Kovalevsky proposed taking the topics in a slightly different order, items 1 and 2 being followed by items 5 and 7, then resuming the original order. In reply to a request for additional items Mr Allan suggested that attention be given to the possibility of improving time links with the USSR by use of the signals from the GLONASS satellites.

1. Progress in atomic frequency standards and clocks

The Chairman invited brief presentations on the main advances in the field, calling first on Mr Granveaud to report on progress at the Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences [LPTF].

Mr Granveaud referred (Doc. CCDS/89-1) to the two time scales maintained by LPTF at the Paris Observatory; (a) UTC(OP) which has been regulated to remain within $\pm 2 \mu\text{s}$ of UTC over the past 4 years and (b) TA(F) which is based on an ensemble of about 20 commercial caesium clocks in 11 laboratories distributed throughout France. Time links with the clocks are obtained by TV comparisons (within the Paris region) and by GPS (in the rest of the country) with a precision of a few nanoseconds in both cases. The stability of TA(F) averages a few parts in 10^{14} per month and provides a valuable reference scale for various national laboratories.

In the field of research the Laboratory is now in the final stages of assembling an optically-pumped caesium standard. A 9 GHz multiplication chain has been realized and laser diodes at 852 nm have been extensively studied to secure monomode operation combined with reduced line-width. The theoretical basis for efficient pumping has also been examined. This work on primary standards has been carried out in close cooperation, nationally, with the Laboratoire de l'Horloge Atomique and, internationally, with the PTB and the NRC.

At optical frequencies, following improvements in the LPTF multiplication chain, the uncertainty in the frequency measurement of the OsO_4 stabilized CO_2 laser is now at the level of 10^{-12} . In 1986 the chain was used in measurements of the frequency of a Soviet portable He-Ne(CH_4) laser and good agreement obtained with the results at VNIIFTRI; these measurements confirmed earlier values at other laboratories and showed that the value recommended by the CCDDM of 88 376 181 608 kHz is too high by about 6 kHz. A policy decision has now been taken to extend the frequency multiplication chain to the visible region and it is proposed, as one of the first tasks, to measure the frequency of a He-Ne(I_2) laser at 473,6 THz.

The Chairman noted that Document CCDS/89-1 includes separate contributions from the LPTF and the Laboratoire de l'Horloge Atomique [LHA] and invited Mr Audoin to outline the activity at Orsay.

At the LHA, theoretical studies have been pursued with the aim of understanding in detail the interaction between a beam of caesium atoms and incident laser light, so as to permit the optimum design of an optically-pumped caesium standard. On the experimental side two caesium beam machines have been constructed, both having the relatively short interaction length of 21 cm. In one the magnetic field is

transverse and the hyperfine resonance is obtained with a S/N ratio of about 10^4 ; this gives rise to a short-term stability in the controlled quartz oscillator with $\sigma_y(\tau) = 2 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$. In the second, and more recent, machine the field is longitudinal and can be set independently in three separate sections: in the present operation a field of 6×10^{-6} T (60 mG) is used in the central microwave region and 3×10^{-5} T (300 mG) in each of the two optical interaction regions.

The results so far have been obtained with the simplest configuration using a single laser both for state preparation and optical detection. It is recognised that improved performance will result if two-laser optical pumping is combined with a cycling transition for detection, provided the excitation is by a narrow-band laser. The present machines display excellent symmetry in the recorded spectra of the 7 hyperfine transitions; in consequence the Rabi pulling effect should be virtually absent and there is the possibility of operating at a lower value of C-field leading to improvement in accuracy and long-term stability.

Mr Audoin referred to work designed to improve the spectral purity of laser diode sources and suppress the increased noise arising from the use of a cycling transitions for detection of the microwave resonance. This noise contribution is greatly reduced with an external cavity laser and such a device, controlled by saturated absorption in a caesium cell, has shown a frequency stability of 1 in 10^{12} over 1 s.

Three active hydrogen masers have been built and two of them are in use by French astronomers and geophysicists. An experimental auto-tuning system has been developed which improves the long-term stability of the maser without disturbing the short-term performance. Theoretical studies of the effects of dielectric loading by alumina in reduced size masers have shown a slight advantage in frequency stability for the active as opposed to the passive mode of operation.

The work at LHA on stored ions includes Hg^+ ions in an RF trap and Mg^+ ions in a Penning trap. A model for the former has been developed on the assumption of a spherical pseudo-potential well. The fractional uncertainty in the estimate of the second-order Doppler is less than 2×10^{-13} . In an experiment to observe two-photon transitions in stored Hg^+ the measurement of the width of the 563 nm transition yields the energy of the ions, which can be as large as 1 eV. For Mg^+ , sub-Doppler radiative cooling has been achieved with a single-ion temperature of 60 mK.

Finally, Mr Audoin drew attention to possible bias in the time domain measurement of frequency stability due to the use, in practice, of low-pass filters rather than the band-pass filters assumed in the theoretical derivation.

In reply to Mr Busca, he said that no figures were available for the accuracy of the LHA caesium-beam machines which were not operated as long-term standards. In response to Mr Allan, he confirmed that the hydrogen maser cavity servo provides a frequency stability of

a few parts in 10^{15} per day: an operational version of the auto-tuning control is being produced.

Mr Douglas, reviewing progress at the National Research Council (NRC), Ottawa, recalled (Doc. CCDS/89-5) that CsV had been taken out of service in June, 1988 for comprehensive refurbishing. It was restored to service in September of that year but, unfortunately, is not yet at its previous level of accuracy. Of the remaining three standards, CsVI-B has been removed from operation as a clock and is now used purely as an experimental device.

The two new hydrogen masers under construction have been operated at low magnetic fields: initial tests indicate higher line Q than was obtained with earlier masers and consequently lower atomic flux levels are needed. Operation at maximum stability under full temperature control is expected by 1990.

A new multiplier chain extending from 5 MHz to 30 THz has been completed using only four CO^2 lasers, as compared to five previously, and was used to measure the 88 THz frequencies of two He-Ne(CH^4) lasers, one from the VNIIFTRI the other from the BIPM. With the former, periodic perturbations of about 3 in 10^{11} were observed: this may have been due to an accidental degeneracy between free-running oscillators. In the BIPM laser this effect was not observed but the noise level was several times higher than anticipated.

Experiments on single Ba^+ ions in a radiofrequency trap have been under way for over a year and quenching of the $5d^2D_{5/2}$ metastable level has been measured for a variety of gases. An optically-pumped ammonia maser has shown a free-running stability of 1 in 10^{11} and the NRC is investigating an ammonia transition close to the 24 THz $5d^2D$ fine structure transition in Ba^+ which may offer interesting possibilities for trapped single-ion spectroscopy.

In presenting the contribution from the USSR (Documents CCDS/89-6 and 89-6a), Mr Koshelyaevsky drew attention to the structure of the State Time and Frequency Service which has primary facility at the VNIIFTRI and secondary standards based on hydrogen masers at five other locations in the Soviet Union. The primary time scale is also maintained by a number of hydrogen masers, but the VNIIFTRI is able, in addition, to verify the accuracy of the scale unit by reference to several caesium beam standards.

Three caesium standards, # 101, # 102 and # 103, are in operation; the first uses dipole magnets and a transverse C-field while the second has hexapole magnets and an axial C-field. The electronics of these two standards are similar and over the period 1985-1988 the mean fractional frequency difference between # 101 and # 102 has been less than 5×10^{-14} . The accuracy of these two standards is estimated to be $\pm 2 \times 10^{-13}$. Both in design and electronics the third standard, # 103, differs significantly from the others: it also differs in frequency by about 15×10^{-14} . The reason for this discrepancy, which could arise from a

number of effects such as RF power spectrum, Rabi pulling or distributed cavity phase-shift is being investigated. A fourth caesium beam machine, # 104, has recently been constructed and is intended for experimental use: its design enables magnetic state selection to be replaced by optical excitation and the first trials of optical pumping have been carried out.

Time transfer between the VNIIFTRI and the secondary standards is accomplished by the use of radio meteor-burst communication (RMC) which is effective over distances of up to 2 000 km. The RMC channel enables two-way time transfer to be established between cooperating stations with an uncertainty of about 20 ns. This has been confirmed by portable clock comparisons for the RMC links between Moscow, Kharkov and Uzhgorod. The first of the secondary standards east of Moscow is at Novosibirsk, more than 3 000 km distant, so, given the limited range of meteor communication, it has been necessary to set up an intermediate receiving station at Sverdlovsk to enable time transfers to take place between the primary and secondary standards.

The portable clock referred to above was developed recently and takes the form of a compact hydrogen maser. It operates in the active mode with a TE₀₁₁ mode cavity reduced in size by partially filling it with a hollow sapphire cylinder coated with Teflon. This cylinder also functions as the storage bulb. The loaded cavity Q factor is 50 000 but, due to the temperature dependence of the permittivity of sapphire, it is necessary to apply automatic frequency control to the cavity using techniques already developed for the fixed masers. A fractional stability of 3×10^{-14} is realised for periods of between 100 s and one day. The overall dimensions of the equipment are 550 × 450 × 300 mm.

In conclusion Mr Koshelyaevsky pointed to the difficulties in relating UTC(SU) to UTC(BIPM) via the Loran-C signals received in Paris and in Pulkovo, near Leningrad. Despite the limited precision of this link he had been pleased to see the long-term stability of UTC-UTC(SU) over the past three years in the plot displayed at BIPM, although admittedly the stability had been marred by the superimposition of some short-term noise.

Mr Dorenwendt questioned the reference for the frequency deviations of the caesium standards (shown in Fig. 2.5, document CCDS/89-6a) and it was confirmed that this was UTC(SU) based on a number (3 to 5) of hydrogen masers with the highest long-term stability and therefore independent of the caesium clocks.

Mr Kalau gave details (document CCDS/89-7) of the caesium beam standard being constructed at the Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung [ASMW]. It embodies reversible beams, a combination of quadrupole and hexapole magnets and a transition length of 743 mm. The results of the initial evaluation indicate a stability of $\sigma_y(\tau) = 3 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ for 100 s < τ < 10⁵ s and a cavity phase correction of 0,065 ± 0,01 Hz. Work continues to refine these values and the standard is expected to enter service as the national reference in 1990.

Mr Kovalevsky welcomed the prospect of an addition to the present small number of primary standards.

Presenting the work of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], (document CCDS/89-8) Mr de Boer referred to the tabulated data on the existing primary caesium standards, CS1 and CS2, which form the basis of the PTB time scale. The uncertainty in cavity phase is still the largest item in the error budgets. A $\sigma_y(\tau)$ plot of CS1 v. CS2 is seen to follow a $\tau^{-1/2}$ law for $\tau < 5$ days, thereafter gradually approaching the flicker floor of less than 10^{-14} . The behaviour for $\tau > 30$ days is probably influenced by the additional noise contributions from beam reversals which occurs every 5-7 weeks, for CS1, and every 3 weeks, for CS2. The mean normalized frequency difference, (CS2-CS1), for the period 1985-1988 is 25×10^{-15} , which is less than the combined uncertainties of the two standards.

A third standard, CS3, is at present undergoing evaluation. It is disposed vertically to avoid the gravitational deflection of its low velocity (70 ms^{-1}) beam but this also creates shielding problems because the Earth's magnetic field has a higher component in this direction. In an effort to reduce the effects of cavity phase shift a ring-shaped cavity has been constructed and tested in the experimental standard, CSX. Spatial phase defects have been reduced by a factor of three but have not yet reached the level predicted by theory.

Experiments began about a year ago on ion-trapping, with the aim of studying the microwave transition at 12,6 GHz in $^{171}\text{Yb}^+$ contained in a radiofrequency trap. So far, successful trapping has not been achieved.

The Chairman remarked that the results which had been presented confirmed the high quality of the PTB caesium standards. Mr de Boer, in reply to Mr Douglas, said that the PTB did not apply a correction for black-body radiation. Responding to Mr Allan he confirmed that phase variation *within* the cavity has been the source of greatest uncertainty.

Concerning the activities at the Istituto Elettrotecnico Nazionale [IEN] (document CCDS/89-11) Mr Galliano reported on a Ramsay-type interrogation of the Mg-beam standard. In this work the linewidth for a 30 cm interaction region is 1,2 kHz with a S/N ratio of 240. The stability is $\sigma_y(\tau) = 8 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$. In the infrared an improved synthesis chain has enabled the development of a grid of 50 reference lines in the $10,9 \mu\text{m}$ region based on saturated absorption techniques in the ν_3 band of RuO_4 . Linewidths of 300 kHz are easily obtained with S/N values suitable for locking laser sources.

The Chairman noted the contributions from the National Research Laboratory of Metrology [NRLM] (document CCDS/89-13) and the Communications Research Laboratory [CRL] (document CCDS/89-14) and expressed regret that there was no Japanese delegate to present them.

Mr Knight, on behalf of the National Physical Laboratory [NPL] referred (document CCDS/89-15) to the development of an optically-pumped caesium standard at Teddington. Single-mode operation and spectral narrowing with an external-cavity diode laser had been demonstrated and optical pumping of the beam observed.

UTC(NPL) is based on a nominated clock from a set of 7 commercial caesium standards. Adjustments have recently been made to minimise the difference UTC-UTC(NPL), but the rate corrections required have produced some instability in the time scale.

In regard to the National Institute of Standards and Technology [NIST] Mr Allan reported (document CCDS/89-16) on the present state of the NIST primary standard, NBS-6, which is operated as a frequency standard and not as a clock. It is undergoing extensive evaluation which may lead to an improvement in the previously assessed accuracy of about 1×10^{-13} . At present, this figure has been degraded to $2,5 \times 10^{-13}$ by reason of an enhanced power sensitivity. A new primary standard (NIST-7) with optical pumping and detection will be operated nearly continuously as a clock the design goal being an accuracy of 10^{-14} and a short-term stability of $5 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$. The beam tube has been fabricated incorporating radically new designs for the cavity and caesium oven and other major subsystems are presently undergoing test.

New and better clocks are planned for inclusion in the NIST clock ensemble. The electronics of NBS-4 have been refurbished, this clock having previously shown long-term stability of parts in 10^{15} . Work with Mr de Marchi has produced marked improvement, to the level of 10^{-14} , or less, in the long-term stability of two types of commercial caesium standard.

In the field of stored ion research a hyperfine spin-flip transition in Be^+ stored in a Penning trap with sympathetic cooling from cooled and stored Mg^+ in the same trap provides a reference standard. This combination allows long interrogation times of up to 550 s while keeping the 2nd order Doppler to less than 1 in 10^{14} . The stability is better than $2 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$. In the visible, single Hg^+ ions stored in an RF trap are being investigated, using a $^2\text{S}_{1/2}$ - $^2\text{D}_{5/2}$ transition at $1,07 \times 10^{15}$ Hz. A line Q of 10^{12} has been observed and 5×10^{14} should be possible. This research has the potential to provide a major breakthrough in the means to link the visible to existing microwave standards.

In reply to Mr de Boer's request for clarification on the several NIST time scales, Mr Allan explained that the NIST maintains three scales. The fundamental time scale for research in time and frequency metrology is the NIST(AT1) : this has a stability given by $3 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ with a long-term flicker floor of less than 10^{-14} . The official time and frequency output for the NIST dissemination services is designated UTC(NIST). As the result of the application of a long-term servo-synchronisation technique the 1σ deviation of UTC-UTC(NIST) over the past three years has been 361 ns and the average frequency offset

$2,8 \times 10^{-15}$. The third time scale is TA(NIST) which is synchronised to the best estimate of the SI second as realised by the NIST primary caesium standards. This scale is based on a Kalman-prediction algorithm.

Mr Busca summarized the relevant activities at the Observatoire Cantonal, Neuchâtel [ON] (document CCDS/89-18). The Observatory contributes four commercial caesium clocks to the Swiss time scale, TA(CH), which is the responsibility of the Federal Office of Metrology. The design of a primary caesium standard is presently in progress. The bulk of the experimental work is scheduled for 1991. Initially, magnetic state selection will be used but a later version will incorporate laser pumping.

The Observatory has resumed research on hydrogen masers this activity having been transferred entirely from Oscilloquartz SA earlier in the year. Attention will be concentrated on a new high-performance active maser (EFOS-B) in a programme sponsored by the European Space Agency. Details of the performance of the EFOS range of hydrogen masers together with the EFOS-B specification are given in an associated paper (document CCDS/89-19).

Speaking on the programme of the National Measurement Laboratory [NML] Mr Harvey said that no research is being conducted on primary standards but it is the intention of the Laboratory that the existing hydrogen masers should continue in operation.

Mr Ma reported that the National Institute of Metrology [NIM] operates one primary caesium standard, NIM-3. In the period 1984-1986 its accuracy had been assessed at 3×10^{-13} . It has been decided to construct a standard with improved performance but no decision has yet been taken as between magnetic or optical state separation and detection.

The Chairman concluded that the survey had shown significant progress since the last meeting of the CCDS but that the number of caesium standards available for the support of TAI is still insufficient: an increase is required both in numbers and in accuracy. He commented that the Committee would no doubt return to this point later when considering possible recommendations to the CIPM.

2. Methods of time comparison

Mr Kovalevsky called upon Mr Allan to expand on the present position in regard to Global Positioning System (GPS) and other possible methods of time transfer. Mr Allan referred to the recent launch (on 14 February 1989) of the first of the GPS Block II satellites and the consequent difficulties for the international time and frequency community arising from the introduction of selective availability (SA), which involves both satellite clock modulation and ephemeris degradation. As reported in the minutes of 10th meeting of the CCDS (p. S46) the

2σ uncertainties resulting from the use of SA will amount to 100 m in horizontal positioning and 250 ns in time. The common-view time transfer technique, provided the schedule is followed precisely, will completely cancel the satellite clock dither, but the ephemeris degradation will still have an effect amounting to several tens of nanoseconds.

Three approaches are being pursued to deal with this problem.

(1) The Civil GPS Organisation has proposed to the US Department of Defence that a small number (≤ 4) of the satellites be insulated from the full effect of SA so that access to GPS time and common-view transfer can be conducted to the same accuracy as with the present Block I satellites.

(2) The possibility of obtaining precise ephemerides from other US agencies such as the US Naval Observatory, National Geodetic Survey, or the Defence Mapping Agency has been considered. Such ephemerides could be made available to the international timing community, with some delay, but would allow removal of the effects of ephemeris degradation by post-processing of the original time transfer values.

(3) The NIST, in cooperation with the BIPM, is seeking to produce independent ephemerides based on the tracking data from the national timing centres; other, non-military, organisations are pursuing independent efforts to the same end.

The Chairman asked to be informed of the present organisation for time transfer by GPS. Mr Guinot replied that the existing arrangements formulated by the BIPM involve a heavy tracking schedule in order to link time centres on a worldwide scale. The task would be simplified if a number of regional centres were nominated and long-range links confined to these stations. For the future, an important problem is to determine the coordinates of the cooperating stations. These could already be improved considerably by an analysis of the time readings; for station separations up to about 1 000 km the relative coordinates can be derived with uncertainties of order 20 cm.

There followed an extended discussion on the three main factors seen as determining the present and future accuracy of time transfer by means of the GPS system: SA and the consequent need for precise satellite ephemerides; station coordinates; and ionospheric, also tropospheric, corrections. Concerning the ionospheric component, Mr Allan advised that a codeless receiver is being developed at the NIST and the design will be made available to the international community.

The Chairman wished to know what delay might be expected in obtaining the precise ephemerides: Mr Allan suggested that it might be three or four weeks but emphasised that there is at present no assurance that they will be made available for civil use. Other groups could compute the ephemerides but they usually do this on an *ad hoc* basis and it would be difficult to ensure a long-term commitment.

Mr Guinot said that the VLBI offered an alternative method of generating the necessary tracking data. Mr Pilkington enquired what would be the effect of the proposed changes in the orbital parameters of the GPS satellites. Mr Allan cautioned that these were still under consideration but would involve an increase in the satellite height of about 50 km. This would lead to an orbital period equal to one half of the solar day rather than one half of the sidereal day, as at present, and would present a considerable complication for the worldwide common-view schedule.

Turning to ionospheric corrections, Mr Pâquet suggested that it would be useful to list stations having receivers with dual-frequency capability. He cited San Fernando and Wettzell as two locations so equipped, which might provide data for ionospheric modelling. Mr Allan supported the idea of an ionospheric data bank. Mr Kovalevsky questioned whether such data would be valid over more than a limited distance, say, 100 km: it could be useful, however, in an area such as western Europe. In view of the difficulty in modelling ionospheric behaviour he stressed the need for dual-frequency equipment and Mrs Thomas confirmed that differences between models and measurements could reach 10-20 ns. Mr de Jong asked if the BIPM results for the ionosphere obtained by codeless receiver were available for access. Mr Guinot replied in principle, yes, but he had reservations on how precisely the data for a specific path could be transferred to other paths, especially those differing considerably in azimuth. Mr Steele suggested that there would be an advantage in using night-time paths with reduced values of ionospheric delay. Mr Guinot agreed that there is a potential advantage but notes that present satellites do not provide a workable schedule.

Mr Harvey remarked that the tropospheric correction should not be neglected. Mr Kovalevsky said it was well modelled, at least for the dry atmosphere but the wet component is more difficult. He was of the opinion that any path with an elevation of less than 30° is undesirable and Mr Allan confirmed that the links in the common-view schedule use elevations greater than this value.

The Chairman turned from GPS to the other possibilities recommended by the CCDS in 1985 (Recommendation S3) and supported by the CGPM. He sought a statement on the present state of the LASSO project from Mr Kirchner who recalled the launch of the LASSO package on the METEOSAT P2 satellite in 1988. The first returns from the retroreflectors were received at Grasse in October 1988 and then on a regular basis using a high-power (lunar) laser and a large aperture (150 cm) telescope. Since the reflectors were on the rotating body of the satellite it was necessary to know not only the satellite position, but also the phase of its rotation in order to establish the conditions for successful returns. At Graz no reflected signals had been received, due to poor weather conditions. Laser stations in Poland and the USSR

were also a possibility for ranging. Unfortunately very few stations were equipped for two-way operation.

Mr Kovalevsky raised the possibility of one-way operation. He noted that operating procedures with the satellite are still very difficult for conventional satellite laser systems having apertures of, say, 20-25 cm and that an improved satellite ephemeris is required in order to generate the necessary laser pointing data in the one-way mode where no return signal exists to confirm correct satellite tracking.

Mr Kirchner turned to satellite methods of two-way time transfer based on the Mitrex modem. Tests have shown that the modem delay is constant to within 0,5 ns provided the input frequency remains within ± 3 kHz of nominal. In any two-way link, therefore, one station at least should be frequency agile. In such experiments the link (power) budget should take into account possible disturbance from other high-power services in a power-limited satellite transponder. There is also a need for accurate calibration of ground-station delays which do, however, appear to be stable to better than 1 ns. Recently, a two-way time transfer with the USSR had been carried out between Graz and Dubna using conventional FM signals rather than pseudo-random noise (PN) codes.

Mr de Jong reported that the Van Swinden Laboratorium [VSL] is also provided with Mitrex equipment. Considerable effort had been made to determine the station delays on transmission and reception and also the delays within the Mitrex modem, the overall estimate having an uncertainty of 1-2 ns. The EUROMET programme contains provision for two-way time transfer within Europe but it extends to the USA via INTELSAT satellites with transponders operating in the frequency band 12,5-12,7 GHz.

In response to the Chairman, Mr Kirchner said that Graz and VSL could certainly work together technically but there are difficulties in obtaining the necessary approvals from national PTT and satellite authorities. Both Mr Winkler and Mr Steele emphasized the severe problems which can arise in attempting set up two-way transfers, especially in the European area which has more numerous regulatory hurdles than the USA. Mr Douglas recounted the failure at NRC to obtain satisfactory cross-border communications with the USA; they had been ready for operation for a year but were authorized only for reception and not for transmission. Recalling the discussion in the meeting of representatives of the time laboratories on these difficulties Mr Quinn said that BIPM needed to know the extent of the problem and authorities which should be approached if an impact is to be made on the situation. He noted that it is a distinct advantage to those concerned that they have the backing of a CGPM Resolution on the subject.

Both Mr de Boer and Mr Prost indicated an interest at their respective establishments, the PTB and the Office Fédéral de Métrologie,

in setting up two-way time transfer facilities based on the Hartl Mitrex modem. Mr Winkler commented that the modem had become a *de facto* standard but should be modified to include a communications capability. Mr de Jong remarked that the Dutch PTT had applied a zero tariff to two-way time transfers by virtue of their minimal information content. Mr Galliano drew attention to the launch in 1990 of the OLYMPUS satellite with high-power transponders operating not only at 12/14 GHz but also at 20/30 GHz.

The Chairman invited comments on other possible methods of time transfer. Mr Guinot referred to the possibility that INMARSAT, in developing a navigational facility from its geostationary satellites, might provide a useful time transfer capability. Mr Steele confirmed that an experimental transmission took place last year from the MARECS B satellite at 26 °W on a frequency of 1 542 MHz using a PN sequence identical to the GPS # 1 SPS code.

The Chairman called for a presentation on GLONASS from Mr Koshelyaevsky who explained that the system is at present in an experimental phase but by 1991-1992 it is expected to deploy 10-12 satellites in near circular orbits at a height of 19 100 km, the orbital period being 11 h 15 m and the inclination 64,8°. The capability for time transfer is estimated to be several tens of nanoseconds and has been confirmed by a portable hydrogen-maser clock over a distance of 3 000 km. Only experimental equipment is so far available but commercial production of receivers should begin at the end of 1990. There is no restriction on the use of the system by the civil time and frequency community. Questioned by Mr Audoin on the type of satellite clock Mr Koshelyaevsky said he had no precise information but it is unlikely to be a hydrogen maser. Mr Pilkington asked about the timekeeping of GLONASS and Mr Koshelyaevsky indicated that it is hoped to coordinate GLONASS system time with UTC(SU). Mr Knight remarked that the Satellite Communications Group at the Leeds University has successfully monitored these satellite signals for the past few years relative to GPS time. He confirmed, in response to Mr Allan, that it would be possible to support the role of the Leeds group in its monitoring work by the provision of a caesium clock. Mrs Thomas asked about the GLONASS frequencies: Mr Steele said that these fall in the range of 1 602-1 615 MHz and are listed with other information in the comprehensive paper (FANS/4-WP/75) on GLONASS presented to a meeting of the Special Committee of Future Air Navigation Systems of ICAO in Montreal, 2-20 May 1988.

3. Report of the Time Section, BIPM

At the Chairman's invitation, Mrs Thomas summarised the main features of the Time Section activity (document CCDS/79-3). The EAL scale is now based on a total of 172 commercial clocks, 7 hydrogen masers and 5 primary clocks. A change in the weighting was introduced on 1 January 1988: the new upper limit for clock weight corresponds to a 2-monthly stability of $3,66 \times 10^{-14}$ as compared with the value $8,16 \times 10^{-14}$ used previously. During 1988, 12 clocks had the maximum weight for six 2-monthly intervals including 4 hydrogen masers and the PTB primary standards, CS1 and CS2. No steering of the TAI scale unit has been necessary since 1984 although the evaluation is now practically limited to CS1 and CS2 by virtue of their high accuracy and continuous operation.

A study of clock rate prediction has confirmed that the one-step linear prediction remains the best for commercial caesium standards, to limit the noise which occurs when clocks enter or leave the ensemble or when weights are changed. With the new weighting procedure and one-step prediction, the stability of EAL reached $1,1 \times 10^{-14}$ relative to CS1 over a period of one year, CS1 itself having only 2 per cent of the total weight in EAL. However, a study has also shown that a double-weight system can be applied to ALGOS ensuring long-term stability as at present and also improving short-term performance. The Kalman filter has well known advantages in computing a time scale in near real-time and theoretical analysis of a simple Kalman algorithm has been undertaken at BIPM. The prediction of clock rates appears as recursive filter and assuming a basic sample duration of 2 months this reduces to a one-step linear prediction, as in ALGOS, with weights representing the clock behaviour over several basic sample periods.

Long-distance time comparisons by GPS suffer reduced precision from uncertainties in the ionospheric delay and from errors in satellite position. The latter point is addressed in document CCDS/89-10 which demonstrates the reduction in residuals following the use, in arrears, of precise ephemerides. The ionospheric problem has been resolved at the BIPM by a guest-worker from CRL (Japan) by the development of a codeless dual-frequency receiver which derives the ionospheric delay at frequency L_1 by a correlation of the L_1 and L_2 signals. The uncertainty of the measurement along the line of sight is of the order of 1-2 ns and the application of these corrections has greatly improved the USNO-OP link.

Mr Guinot added to the report by Mrs Thomas some comments on the generation of the Terrestrial Time, TT(BIPM), scale developed specifically for pulsar studies. TT(BIPM) for a particular epoch can be

regarded as an improved steering of EAL relative to the frequency of the NRC and PTB frequency standards. Mr Guinot also stressed the value of practical experience in time comparisons and pointed out that work has already been undertaken on experiments with GPS at the Paris Observatory. He would like to see this work continue, but at BIPM rather than OP: he noted that to look at satellite signals directly would require the installation of a clock or clocks at Sèvres.

The Chairman asked for opinions and linked this with the prospect of staff changes at the BIPM. Mr Winkler supported the increase in facilities at the BIPM and indicated that some assistance might be available. Mr Quinn agreed that the Time Section must take part in experiments to improve both the formation and dissemination of TAI: he expressed his appreciation of Mr Winkler's suggestion of assistance in the matter of equipment, and as regards staff, mentioned that he envisaged some increase in the long term but none in the immediate future.

Mr Allan conveyed the thanks of the pulsar community for the efforts leading to TT(BIPM) and gave support to the offer made by Mr Winkler. He suggested that in addition to GPS it would be desirable to have a GLONASS receiver: he would support also the introduction of double-weighting for TAI. There were questions from Mr Busca and Mr Kirchner on aspects of the new weighting system. Mrs Thomas replied that a full description would appear in the Annual Report of the Time Section later this year; for interval January-February 1988 the 14 per cent of the clocks had maximum weight. Mr Granveaud remarked that there appeared to be a significant change in the formation of TAI following the revised upper weight limit: Mr Winkler suggested that this reflects the diversity of clocks now contributing to the time scale. Both Mr de Boer and Mr Lepek questioned the effectiveness of the new procedures: Mr Guinot agreed that they are difficult to test objectively although trials have been run in the form of computations in parallel with the two weight systems over periods of several years. He reported that the distribution of weights is somewhat curious, being U-shaped, with a preponderance of clocks having either rather poor or rather good performance. The physical reasons for this are not understood.

4. Report of the Working Group of the CCDS on improvements to TAI

The Chairman invited Mr Winkler to present the conclusions of the Working Group. Mr Winkler said he distinguished four main areas of concern:

(a) the time links between laboratories by various means (e.g. GPS, GLONASS, two-way transfer) and the need to develop regional links;

- (b) the small number of primary standards contributing to TAI ;
- (c) the statistical independence of the clocks contributing to TAI ;
- (d) that only a few laboratories have followed the CCIR Recommendation to bring their UTC(k) within the desirable $\pm 1 \mu\text{s}$ of UTC.

Following the consideration of these and related topics in the past two days the Working Group had produced a total of eight draft recommendations which should be seen as opinions submitted to the CCDS for further consideration. In addition to this formal output the Working Group had agreed on a number of desirable measures in relation to GPS time transfers. Mr Winkler then surveyed briefly the recommendations before the Committee, giving appropriate background detail.

The Chairman thanked Mr Winkler for his presentation and called for general comments before proceeding to a detailed examination of the texts and a decision on their adoption as CCDS Recommendations. Mr Allan said that he would have liked to see an explicit mention of the need for a closer time relation between the BIPM and the VNIIFTRI. Mr Kovalevsky replied that this should be kept in mind for a future decision. He then opened discussion on the first Working Group recommendation. A detailed examination by the Committee of all the Working Group recommendations followed with some rewording being agreed and more substantial changes being accepted in relation to some of the texts. The discussion was resumed on the following day when revised versions of the draft recommendations were tabled for further consideration. Two of the recommendations now took the form of Declarations 1989/1 and 1989/2 ; the other recommendations either singly or in combination formed the basis of CCDS Recommendations S1, S2, S3, S4 and S6. A further Recommendation S5 arose from the discussion reported in the previous section on expanding the experimental work of the Time Section, BIPM. It was understood that, following their approval by the Committee, the Recommendations would be transmitted to the CIPM. Both English and French versions of the texts were provided and the Chairman explained that in matters of interpretation the French text is the definitive version.

The Committee proceeded to give detailed consideration and approval to Declaration 1989/1 bearing on the implementation of two-way satellite links and agreed the following :

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,
considering Resolution 4 of the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures (1987),
taking into account the worldwide experience gained, and
considering the present and future accuracy limitations in the transfer of time by satellite-based navigation systems,
suggests the implementation of two-way satellite links for international time comparisons of very high accuracy,

recommends for this purpose that the BIPM be asked to establish appropriate *ad-hoc* working groups, to coordinate their activities and to contact the appropriate satellite organisations,

The task of the working groups will be to define conditions of the operational system, e.g. :

- satellites and frequency bands,
- specifications of the earth stations,
- station calibration,
- measuring procedures and schedules,
- data processing.

In the same way the Committee approved the Declaration 1989/2 bearing on reports of correlation in the frequency changes of clocks :

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

considering that correlation among the frequency changes between contributing clocks can degrade the long-term stability and accuracy of TAI,

recommends

— that the BIPM studies and reports on correlation in frequency changes among the clocks contributing to TAI,

and

— that the BIPM acts with contributing laboratories towards improving the statistical independence of the clocks.

The Chairman then turned to the consideration of the proposed Recommendations, S1 to S6. During the subsequent discussion on the terms of S1 a clear division of opinion emerged both on the means and on the extent to which closer adherence to UTC, as recommended by the CCIR, should be followed. Both Mr Guinot and Mr Winkler expressed reservations on the use of 'software' clocks while Mr Allan and Mr Lepek considered that close adherence to UTC was desirable whether obtained by means of software or hardware. Mr Kirchner mentioned the difficulties small laboratories face in complying with the suggested limits of $\pm 1 \mu\text{s}$ but Mr de Jong maintained that telecommunications systems needed this degree of accuracy in their reference time. After an extended discussion the Chairman suggested that the objections might be met by deleting all reference to CCIR Recommendation A/7 from the text while retaining it as an appendix to S1. The proposal was found acceptable, and with this change and some relaxation of the suggested tolerance for UTC-UTC(k), Recommendation S1 was approved.

Recommendation S2 combines two Working Group recommendations : it is couched in broad terms in the belief that laboratories should be left to decide in what detail to report their environmental conditions, and changes in them, to the BIPM. Recommendation S2 was approved with minor editorial changes. Recommendation S3 differs from the earlier version by the inclusion of an additional 'recommends' on the

study of systematic differences between primary standards, prompted by the difference of 2×10^{-13} between the standards of PTB and VNIIFTRI. With this addition, and minor changes Recommendation S3 was approved.

The final form of Recommendation S4 was reached after detailed re-drafting by Messrs Pilkington and Allan in acting cooperation with the Chairman. In reply to a comment from Mr Lepek, Mr Kovalevsky defended the use of geodetic terminology in a text which did, in fact, address geodetic concepts. However, he suggested one modification and with that change Recommendation S4 was approved. Recommendation S5 was also approved with minor amendments. Mr Guinot said he would like to take this opportunity to acknowledge the loan of equipment to the BIH and the BIPM from the NIST and at an earlier stage from the USNO. Finally, the text of Recommendation S6 was approved. Recommendations S1 to S6 are appended at pp. S 62 to S 66.

The Chairman concluded by thanking Mr Winkler for his excellent work in chairing the Working Party whose recommendations had been carried over with remarkably few changes to form the CCDS Declarations and Recommendations which they had just approved:

5. Statistical methods applied to time measurement

The Chairman called for a report on the 3rd Symposium on Time Scale Algorithms held in Torino in September 1988. Mr Allan, in reply, said that Mr Guinot had been chairman of the meeting and Mr Galliano its host at the IEN. He would comment on only one or two of the papers; a complete set of the contributions is available on application to the Time and Frequency Division, NIST, Boulder. The USNO had shown that by looking at a clock you disturb it and that clocks perform best when entirely undisturbed: from that standpoint the clocks in satellites should behave well. In reservation Mr Winkler noted that GPS clocks are subject to manœuvres and Mr Guinot remarked that the sidereal orbital period involves a changing attitude to the Sun and hence a possible annual fluctuation. Mr Allan referred to a number of papers on Kalman filtering. Stein and Gifford (NRL) had applied this technique to the GPS clock ensemble and shown the presence of white frequency and random walk terms. The Kalman filter uses a fixed model and, if this is a good approximation to reality, the filter works well. It is used by the Jet Propulsion Laboratory for steering the clocks of the Deep Space Network. Turning to the algorithms in use at NIST, he noted that the NIST(AT1) time scale appears comparable with, or better than, TAI. One of the features was a learning behaviour which reduces the weight of a clock which experiences a frequency step. Application of this algorithm to clocks at the IEN and the USNO

have not, however, given comparable results. It is interesting to note that the $\sigma_y(\tau)$ plots of Ephemeris Time (ET) and Atomic Time (AT) will intersect after some centuries whereas PT (Pulsar Time, from the millisecond pulsar) and AT reach a comparable level after about one year.

Mrs Thomas recalled the intention at the BIPM to introduce a two-stage weighting procedure. Mr Kovalevsky asked if this involved the addition of two algorithms. Mr Guinot said it was difficult to describe briefly but the details will be given in the next Annual Report to be published in June, 1989. Mr Allan said systematic variations had also been studied at NIST. The application of the AT1 algorithm to the PTB standards may have revealed a correlation at the level of about 3×10^{-14} between CS1 and CS2.

6. The relation between atomic time and pulsars

At the Chairman's invitation Mr Allan gave an account of the present state of research on pulsar clocks. He introduced results for four of the pulsars with periods of less than 10 ms: 1937 + 21, 1953 + 29, 1855 + 09 and 1957 + 20. The main interest lies in the 'millisecond pulsar' 1937 + 21, with a period of 1,56 ms, first observed in November 1982. Timing results over the past 7 years have shown a deceleration at the rate of 1×10^{-14} /day combined with a timing precision of about 300 ns. The frequency drift is assessed on the basis of a 7-parameter model of the Earth's motion and is, of course, subtracted before comparison with terrestrial clocks. This having been done, the stability over a 7-year period is 2,7 in 10^{15} .

The source 1937 + 21 is the only one of significance in the search for gravitational background radiation (which should induce small irregularities in the pulsar time indication) and is being investigated, *inter alia* by J. H. Taylor at Princeton University. At present the RMS residual of the observations is increasing with time: it is not possible to assign a specific cause for this behaviour although four plausible mechanisms have been considered.

Derivation of the Earth's ephemeris is being carried out at JPL and at Harvard University using expansions, based on Chebyshev polynomials, designed to give an accuracy of 0,5 μ s. J. H. Taylor has produced comparisons of 1937 + 21 with the UTC scales at LPTF, NIST, NRC, PTB, TAO and USNO showing, over a 4 year period, (document CCDS/89-16) scatter of $\pm (1-2) \mu$ s in most cases and barely exceeding $\pm 1 \mu$ s for UTC (NIST) and UTC(PTB).

Mr Guinot remarked that the use of UTC(k) as the time reference introduces additional noise due to steering except, as Mr Pilkington observed, for the case of PTB where steering is absent. Mr Dorenwendt

and Mr Douglas asked about the stability of the drift and the likelihood of 'glitches' in the spin-down rate. Mr Allan replied that the incidence of frequency jumps in an old pulsar should be small. So far no variation in the decay of $1937 + 21$ had been observed and it was expected to be stable for at least two decades. Mr Lepek suggested that the millisecond pulsar data might be reported to BIPM as an additional clock for comparison with TAI. Mr Guinot responded that he would welcome such data.

Mr Granveaud reported on the observation of pulsars at the facility of the Paris Observatory at Nançay using the large (200 m \times 40 m) aperture radio telescope. A resolution of 700 ns in arrival time had been obtained. Mr Kovalevsky asked about the position in the USSR. Mr Koshelyaevsky replied that the Academy of Sciences operates a radio observatory near to Moscow; the VNIIFTRI supports this financially but has no scientific or technical involvement.

7. Reports on other meetings

Reports were received on :

(a) Interim Meeting of Study Group 7, CCIR, Geneva, 11-19 April, 1988

(b) XXth General Assembly of the International Astronomical Union, Baltimore, 2-11 August 1988

Mr Steele, Chairman of Study Group 7, presented one or two aspects of the Interim Meeting of relevance to the CCDS.

The draft of Recommendation A/7 had already been considered in the context of Recommendation S1 and it was thought satisfactory that the CCIR text would accompany the CCDS proposal to the CIPM. Recommendation A/7 would be confirmed, in all probability, at the Final Meeting of Study Group 7 in September, 1989 and thereafter by the Plenary Assembly, CCIR, in 1990.

Mr Steele drew attention to the work in progress within Study Group 7 on a Handbook on Satellite Time and Frequency Dissemination for which he was acting as coordinator. A chapter had already been contributed by the BIPM on Time Scales together with two appendices on Relativity and Geodesy. Other contributions were now being received and he was hopeful that drafts of all chapters would be available by the time of the Final Meeting to meet a publication date, in company with other CCIR volumes, in 1990. Several members of the CCDS had indicated their intention to participate in two-way time transfer and it is the purpose of the Handbook to provide comprehensive information and guidance for just such new entrants to the satellite communications field.

Mr Winkler, reporting on the International Astronomical Union [IAU] General Assembly, referred first to interesting developments in laser gyros designed to sense changes in the Earth's rate of rotation. The questions of time transfer had been addressed with special reference to the GPS but also treated ground-based transmissions. A special session on the pulsar 1937 + 21 had been chaired by Mr Allan ; Mr Guinot and Mr Seidelmann had described the derivation of the terrestrial time (TT) and of the barycentric time, the latter differing from TT only in periodic terms. The first results had been reported from experiments at the University of Maryland to confirm that the speed of light is invariant in rotating systems. A discrepancy of about 150 ps was expected in a local go-and-return experiment but has not been found. However this result is not yet significant because the number of undisturbed experimental runs is, so far, insufficient.

Mr Winkler referred to five pertinent resolutions adopted at Baltimore :

- C1 looks to a celestial reference frame based on radio astrometry and its alignment with the conventional visual reference system ;
- C2 recognises the value of the Working Group on Reference Systems and urges its continued activity in several areas including Time ;
- C7 acknowledges the value of the GPS service and urges its continuance ;
- C8 recommends the investigation of new methods of time comparison in coordination with the BIPM ;
- C10 asks that the Presidents of the IAU, IAG and URSI request B. Guinot and S. Yumi to write a history of the BIH and the IPMS.

In subsequent discussion Mr Winkler agreed with Mr Lepek that a laser gyro is unsuitable for long-term monitoring of the Earth's rotation. It is, however, well adapted to looking at changes in the rate of rotation. Superconducting gyros are also being developed. Mr Quinn remarked on the exciting developments which might have consequences for fundamental theory : Mr Kovalevsky thought it would be difficult to distinguish between different formulations of relativity to better than about 20 per cent. Mr Winkler commented that relativity is now an aspect of engineering ; it is not possible, for example, to use GPS without the application of relativistic corrections.

8. Other business

The Chairman asked for notice of any additional items. Mr Allan reported that a calibrated GPS receiver had been taken to several sites in Japan at the time of the CPEM meeting in Tsukuba. This exercise could be of value for time transfer in the western Pacific region.

Mr Quinn intimated that the draft minutes of the meeting, in English, will be circulated to all delegates within the next few weeks for comment and approval. In addition, the contributions will be published in a booklet and a copy sent to all those attending. Finally, some considerable time later, the printed record of the meeting will be made available in both the English and French languages.

Concluding the meeting, the Chairman said that all members would be grateful to the BIPM for the excellent work of the Time Section. He had no doubt of the high regard that exists worldwide for the quality of the service and it was clear that members could look forward to further improvements. In the normal course of events, the CCDS could expect to meet again in 3-4 years time, and, while they would welcome Mr Guinot to the next meeting, in view of his retirement next year he would not then be responsible for the Time Section. The Chairman therefore took the opportunity, on behalf of himself and the members of the CCDS, to wish to Mr Guinot a very happy and pleasant retirement. These sentiments were unanimously applauded by the delegates.

In reply, Mr Guinot thanked the Chairman and members for their kind good wishes. The work of the Time Section had been rather heavy on occasion but always enjoyable thanks to the excellent cooperation which he enjoyed from the many contributing laboratories and the pleasant relations which existed with those involved in the international time and frequency community.

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

Synchronization of UTC(k) and UTC

RECOMMENDATION S1 (1989)

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,
considering

— that some laboratories report values of UTC(k) to the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) that show appreciable departures from UTC,

— that the existence of timing centres in close agreement with UTC facilitates the operation of a number of systems in astronomy, geodesy, navigation and telecommunications,

recommends

— that laboratories, in consultation with the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), adopt appropriate means to reduce existing offsets between UTC(k) and UTC to the region of a few microseconds without making any adjustment in frequency to clocks contributing to TAI.

Appendix to Recommendation S1 (1989)

RECOMMENDATION 685 *

INTERNATIONAL SYNCHRONIZATION OF UTC TIME SCALES

(Question 1/7)

The International Radio Consultative Committee (CCIR),

considering

(a) that Recommendation 460-4 only requires time-signal emissions to be synchronized to UTC to within one millisecond, but that they should conform to UTC « as closely as possible »;

(b) that each timing centre's UTC(k) should be in close agreement with UTC (Recommendation 536);

(c) that the lack of synchronization between the UTC(k) time scales, typically of a few microseconds, causes confusion and difficulty among some users;

(d) that there is an increasing number of users, in communication systems, navigation systems, radioastronomy and geodesy, requiring worldwide synchronization at the few nanoseconds level,

recommends

1. that each timing centre, within the constraints of their operational requirements, pursue improved methods, digital servo techniques, and algorithms for synchronizing their UTC(k) to UTC, one microsecond being a desirable goal;

2. that timing centres, as appropriate, pursue the improvement of the long-term stability of their clocks and of associated methods used to generate their UTC(k);

3. that the timing centres in synchronizing their UTC(k) should seek to coordinate their efforts with the BIPM.

* The Director of the CCIR is requested to bring this Recommendation to the attention of the President of the CIPM and of the Director of the BIPM.

Improvement of the long-term stability of TAI

RECOMMENDATION S2 (1989)

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

considering that

— there is a need to enhance and to monitor the long-term stability of TAI,

— changes in environmental conditions may be one of the principal causes of frequency changes of clocks contributing to TAI,

recommends that contributing laboratories to TAI :

— improve the long-term stability of their standards, for example, by the use of techniques such as those developed by A. de Marchi,

— report data from novel types of standards to the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) noting that privacy of the data can be maintained if desired,

— stabilize the environmental conditions of each contributing clock,

— keep careful records of these environmental conditions and report them to the BIPM.

Improvement of the frequency accuracy of primary standards

RECOMMENDATION S3 (1989)

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

considering

— the need for increased accuracy in the scale unitary interval of TAI,

— the small number of primary caesium standards contributing effectively to TAI,

recommends

— the construction of additional primary caesium standards,

— the improvement of the frequency accuracy of existing primary standards,

— the study of the systematic differences in frequency between them.

Reference coordinates of antennas

RECOMMENDATION S4 (1989)

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS),

considering that the use of inconsistent coordinates of the antennas is an important source of error in time transfer by one-way satellite techniques,

recommends that, in any site, for such operations in support of TAI :

— the reference coordinates of the antenna should correspond to its real position in the terrestrial reference frame of the International Earth Rotation Service (IERS),

— the reference coordinates and the operational coordinates used within the receiver should be reported to the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) and collaborating laboratories,

— neither the operational coordinates nor the location of the antenna should be subject to change without pressing cause,

— if such a change is, however, found to be necessary, information sufficient to maintain the accuracy of the time comparisons should be passed without delay to the BIPM and the collaborating laboratories.

The CCDS *also recommends* that the methods of relative positioning be employed to link the antenna to the IERS stations, in consultation with the BIPM.

Installation of clocks at the BIPM

RECOMMENDATION S5 (1989)

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS),
considering

— the importance of maintaining at the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) a high level of competence in the coordination of the time comparisons which provide the basis of TAI,

— that practical experience at the BIPM in such time comparisons is already desirable and in the future will become essential,

— that the present experience has been gained thanks to the facilities generously provided by the Paris Observatory,

recommends that the BIPM should take steps to install one or more clocks together with the necessary time-comparison equipment, and

invites member laboratories of CCDS, in view of the high cost of such installations, to examine the possibility of providing equipment on loan to the BIPM.

Time links

RECOMMENDATION S6 (1989)

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

considering

— that there is a need to improve the efficiency and accuracy of international time comparisons for TAI,

— that there is also a need for improved time links between primary standards,

recommends that the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) study and organize an optimum network of time links using all appropriate techniques which may be available.

APPENDIX S1

Working documents submitted to the CCDS at its 11th Meeting

Copies of these documents may be obtained in their original language upon application to the Director of the BIPM.

Document
CCDS/

- 89-1 LPTF-LHA (France). — Contribution to the 11th CCDS, by M. Granveaud and C. Audoin.
- 89-2 OFMET (Switzerland). — Situation in Switzerland.
- 89-3 BIPM. — Report of the BIPM Time Section to CCDS, by B. Guinot and C. Thomas.
- 89-4 TUG (Austria). — Report to the 11th Session of CCDS : Satellite Time Transfer, by D. Kirchner.
- 89-5 NRC (Canada). — Report on Activities to the 11^e Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde.
- 89-6 VNIIFTRI (U.S.S.R.). — Report State Time and Frequency Service of USSR to CCDS.
- 89-7 ASMW (G.D.R.). — Report of the ASMW (GDR) to the 11th session of the CCDS.
- 89-8 PTB (F.R.G.). — Report to the 11th Session of CCDS, by H. de Boer.
- 89-9 BIPM. — Format for GPS data at BIPM.
- 89-10 BIPM. — GPS Time Comparisons, Test on the use of precise ephemerides, by W. Lewandowski and B. Guinot.
- 89-11 IEN (Italy). — Report on activities to the 11th Session of CCDS.

- 89-12 VSL (Netherlands). — Contribution to the 11th session of CCDS, by G. de Jong.
- 89-13 NRLM (Japan). — Report to CCDS from NRLM, by Y. Nakadan, S. Ohshima, I. Ikegami and Y. Koga.
- 89-14 CRL (Japan). — Research Activities on Time and Frequency at Communications Research Laboratory, by R. Hayashi, K. Nakagiri, F. Takahashi, S. Urabe and T. Satoh.
- 89-15 NPL (U.K.). — Report to the 11th Session of CCDS, by D. J. E. Knight.
- 89-16 NIST (U.S.A.). — Report of the National Institute of Standards and Technology for Eleventh CCDS.
- 89-17 NIST (U.S.A.) and BIPM. — The positioning of GPS Antennas in Time-Keeping Laboratories of North America.
- 89-18 Observatory of Neuchâtel (Switzerland). — Report, by G. Busca.
- 89-19 Observatory of Neuchâtel (Switzerland). — Performances of the existing EFOS-Masers and of the new generation of EFOS-Masers, by G. Busca.
- 89-20 RGO (U.K.). — Report of the RGO to the 11th session of the CCDS, by J. D. H. Pilkington.
-

TABLE DES MATIÈRES
TABLE OF CONTENTS

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE
11^e session (1989)

	Pages
Notice sur les organes de la Convention du Mètre	V
Liste des sigles	VII
Liste des membres	XI
Ordre du Jour	XIV
Rapport au Comité international des poids et mesures, par M. Steele	S 1
1. Progrès des étalons de fréquence et des horloges atomiques	S 3
Travaux accomplis depuis 1985 dans les laboratoires ; nécessité d'accroître le nombre d'étalons à césium de grande exactitude qui contribuent au TAI	S 3
2. Méthodes de comparaison de temps	S 10
GPS, correction ionosphérique, disponibilité sélective et éphémérides précises ; transferts de temps dans les deux sens ; possibilités de GLONASS	S 10
3. Rapport de la section du temps du BIPM	S 15
EAL et nouvelle pondération ; comparaisons de temps à grande distance et récepteurs bi-fréquence sans décodage ; établissement et dissémination du TT(BIPM)	S 15
4. Rapport du Groupe de travail sur l'amélioration de TAI	S 17
Mise en œuvre des liaisons horaires dans les deux sens ; corrélations entre les étalons de fréquence ; réponse à la recommandation du CCIR d'accorder les UTC(k) avec UTC à moins d'une microseconde près	S 17
5. Méthodes statistiques appliquées aux mesures horaires	S 20
Symposium sur les algorithmes pour les échelles de temps ; double pondération	S 20
6. Relation entre le temps atomique et les pulsars	S 21
Intérêt du « pulsar à la milliseconde » 1937 + 21 ; comparaison de 1937 + 21 avec les échelles de temps des laboratoires LPTF, NIST, NRC, PTB, TAO et USNO	S 21
7. Rapports des autres réunions	S 22
Manuel du CCIR sur la dissémination du temps et des fréquences par satellite ; résolutions de l'UAI (1988) ; gyromètres à lasers et variation de la vitesse de rotation terrestre	S 22
8. Questions diverses	S 24
Recommandations présentées au Comité international des poids et mesures :	
Recommandation S1 (1989) : Synchronisation des UTC(k) avec UTC	S 25
Recommandation S2 (1989) : Amélioration de la stabilité à long terme du TAI	S 26

Recommandation S3 (1989): Amélioration de l'exactitude en fréquence des étalons primaires	S 27
Recommandation S4 (1989): Coordonnées de référence des antennes	S 27
Recommandation S5 (1989): Installation d'horloges au BIPM	S 28
Recommandation S6 (1989): Liaisons horaires	S 28

Annexe

S1. Documents de travail présentés à la 11 ^e session du CCDS	S 29
-------------------------------------------------------------------------------	------

English text of the Report

Note on the organs of the Convention du Mètre	S 35
Members of the Comité Consultatif	S 37
Agenda	S 40

Report to the Comité International des Poids et Mesures, by Mr Steele

1. Progress in atomic frequency standards and clocks	S 43
Work accomplished since 1985 in the laboratories; need to increase the number of high accuracy caesium standards contributing to TAI	S 43
2. Methods of time comparison	S 49
GPS, ionosphere correction, selective availability and precise ephemerides; two-way time transfer; GLONASS capabilities	S 49
3. Report of the Time Section, BIPM	S 54
EAL and new weightings; long-distance comparisons and codeless dual-frequency receivers; generation and dissemination of TT(BIPM)	S 54
4. Report of the Working Group of the CCDS on improvements to TAI	S 55
Implementation of two-way satellite links; correlations among the frequency standards; response to CCIR Recommendation on bringing UTC(k) within 1 μ s of UTC	S 55
5. Statistical methods applied to time measurement	S 58
Symposium on Time Scale Algorithms; comparison of algorithms; two-stage weighting	S 58
6. The relation between atomic time and pulsars	S 59
Interest in the 'millisecond pulsar', 1937 + 21; comparisons of 1937 + 21 with UTC scales at LPTF, NIST, NRC, PTB, TAO and USNO	S 59
7. Reports on other meetings	S 60
CCIR Handbook on Satellite Time and Frequency Dissemination; IAU resolutions (1988); laser gyros and changes in rate of Earth's rotation ...	S 60
8. Other business	S 61
Recommendations submitted to the Comité International des Poids et Mesures.	S 62
Recommendation S1 (1989): Synchronization of UTC(k) and UTC	S 62
Recommendation S2 (1989): Improvement of the long-term stability of TAI	S 64
Recommendation S3 (1989): Improvement of the frequency accuracy of primary standards	S 64
Recommendation S4 (1989): Reference coordinates of antennas	S 65
Recommendation S5 (1989): Installation of clocks at the BIPM	S 66
Recommendation S6 (1989): Time links	S 66

Appendix

S1. Working documents submitted to the CCDS at its 11th Meeting	S 67
-----------------------------------------------------------------------	------

IMPRIMERIE DURAND

28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal : Imprimeur, 1990, n° 7353
ISBN 92-822-2109-1

ACHEVÉ D'IMPRIMER : NOVEMBRE 1990

Imprimé en France

