

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE
SESSION DE 1985

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



COMITÉ CONSULTATIF
POUR
LA DÉFINITION DE LA SECONDE

Rapport de la 10^e session
1985

Édité par le BIPM, Pavillon de Breteuil, F-92310 Sèvres, France.

NOTICE SUR LES ORGANES DE 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⁽¹⁾.

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) et des rayonnements ionisants (1960). 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.

⁽¹⁾ Au 31 décembre 1985, 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 13 144 000 francs-or (en 1985), soit environ 23 850 000 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 » ins'..uée 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 multicoopiés).

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

La collection des *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 tomes publiés de 1881 à 1966) a été arrêtée en 1966 par décision du Comité International.

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

Comité International des Poids et Mesures

Secrétaire
J. 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.

Membres

AMT FÜR STANDARDISIERUNG, MESSWESEN UND WARENPRÜFUNG [ASMW],
Berlin.

BUREAU INTERNATIONAL DE L'HEURE [BIH], Paris.

BUREAU DES LONGITUDES, Paris.

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

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

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [NRC], Ottawa.

INSTITUT DES MESURES PHYSICOTECHNIQUES ET RADIOTECHNIQUES DE
L'U.R.S.S., [VNIIFTRI], Moscou.

INSTITUT NATIONAL DE MÉTROLOGIE [NIM], Beijing.

INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE MARINA, [OMSF], San Fernando (Espagne).

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE GALILEO FERRARIS [IEN], Turin.

LABORATOIRE DE L'HORLOGE ATOMIQUE [LHA] DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE, Orsay (France).

LABORATOIRE SUISSE DE RECHERCHES HORLOGÈRES, [LSRH], Neuchâtel.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [NBS], Boulder.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [NPL], Teddington (Royaume-Uni).

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY OF INDIA, New Delhi.

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [NRLM], Tsukuba (Japon).

OBSERVATOIRE CANTONAL DE NEUCHÂTEL, Neuchâtel.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], Braunschweig.

RADIO RESEARCH LABORATORIES [RRL], Tokyo.

ROYAL GREENWICH OBSERVATORY [RGO], Hailsham.

UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE [UAI].

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

VAN SWINDEN LABORATORIUM [VSL], Delft.

Le directeur du Bureau International des Poids et Mesures [BIPM],
Sèvres.

ORDRE DU JOUR
de la 10^e session

1. Progrès des étalons atomiques de fréquence et des horloges.
 2. Méthodes de comparaison de temps.
 3. Méthodes statistiques appliquées à la mesure du temps.
 4. Rapport d'activité du BIH.
 5. Compte rendu des réunions suivantes :
 - Symposium de l'Union Astronomique Internationale « Relativity in Celestial Mechanics and Astrometry », Leningrad, 28-31 mai 1985 ;
 - 39th Annual Frequency Control Symposium, Philadelphie, 29-31 mai 1985.
 6. Organisation des travaux sur le TAI et l'UTC.
 7. Examen de la définition du TAI dans les théories relativistes.
 8. Questions diverses.
-

RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE
(10^e session - 1985)
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
par M. GRANVEAUD, rapporteur

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS) a tenu sa 10^e session au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres, au cours de 5 séances, les mercredi 5, jeudi 6 et vendredi 7 juin 1985.

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 International de l'Heure [BIH], Paris (B. GUINOT).

Bureau des Longitudes, Paris (B. GUINOT).

Comité Consultatif International des Radiocommunications [CCIR],
Genève (J. MCA. STEELE).

Conseil National de Recherches [NRC], Ottawa (R.J. DOUGLAS).

Institut National de Métrologie [NIM], Beijing (MA FENGMING).

Instituto y Observatorio de Marina [OMSF], San Fernando,
(J. BENAVENTE SIERRA).

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

Laboratoire de l'Horloge Atomique [LHA] du CNRS, Université
de Paris-Sud, Orsay (C. AUDOIN).

Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences [LPTF], Paris
(M. GRANVEAUD).

Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères [LSRH], Neuchâtel
(J. BONANOMI).

National Bureau of Standards [NBS], Boulder (D.W. ALLAN).
National Physical Laboratory [NPL], Teddington (O.C. JONES).
Observatoire Cantonal de Neuchâtel, Neuchâtel (J. BONANOMI).
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig
(K. DORENWENDT).
Royal Greenwich Observatory [RGO], Hailsham (J.D.H. PILKING-
TON).
Union Astronomique Internationale [UAI], (W. MARKOWITZ).
U.S. Naval Observatory [USNO], Washington (G.M.R. WINKLER).
Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (R. KAARLS).

Invités :

Academia Sinica, Beijing (PAN Xiaopei).
Office Fédéral de Métrologie [OFMET], Wabern (J. BONANOMI).
Technische Universität [TUG], Graz (D. KIRCHNER).
Tokyo Astronomical Observatory [TAO], (M.-K. FUJIMOTO).
P. PAQUET, Comité Directeur du BIH.
H.F. FLIEGEL, J. BUISSON, W. JONES, Global Positioning System.

Assistaient aussi à la session : J. TERRIEN, directeur honoraire du
BIPM ; T.J. QUINN, sous-directeur du BIPM ; J. AZOUBIB (BIPM) ;
W. LEWANDOWSKI (BIPM).

Excusés :

National Research Laboratory of Metrology, Ibaraki ; Radio
Research Laboratories, Tokyo.

Absents :

Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques, Mos-
cou * ; National Physical Laboratory of India, New Delhi.

Après les souhaits de bienvenue de Mr Giacomo, directeur du BIPM,
et de Mr Kovalevsky, président du CCDS, la séance est ouverte.

Avec l'approbation du Comité Consultatif, le président confie la
tâche de rapporteur à Mr Granveaud qui sera aidé par les membres du
BIH. L'ordre du jour est modifié : les points 4 et 6 sont placés après
le point 2.

1. Progrès des étalons atomiques de fréquence et des horloges

Le président demande aux représentants des laboratoires d'indiquer
les travaux réalisés depuis 1980, date de la précédente session du CCDS,
ou en cours de réalisation.

* A. Oboukhov, V. Tatarenkov, Y. Domnin (VNIIFTRI), présents au BIPM à l'occasion
d'une comparaison de lasers, ont assisté partiellement à la session en qualité d'observateurs.

Mr Audoin résume les résultats obtenus au Laboratoire de l'Horloge Atomique (LHA) dans trois domaines (document CCDS/85-7). Après avoir rappelé les travaux originaux de Kastler sur le pompage optique et ceux de Mr Arditi, Mr Audoin indique que l'étude détaillée des conditions d'application des méthodes de pompage et de détection optiques à une horloge à jet de césium a été entreprise au LHA. Un résultat expérimental majeur est qu'il est possible de transférer, avec une excellente efficacité, la population des 16 sous-niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium soit sur le niveau $F = 3$, $m_F = 0$ soit sur le niveau $F = 4$, $m_F = 0$ en utilisant deux lasers. Le LHA a entrepris des études systématiques afin de réaliser des étalons atomiques à jet de césium à pompage optique.

Le deuxième domaine d'activité concerne les masers à hydrogène. Le LHA termine actuellement trois masers actifs à hydrogène, deux d'entre eux sont destinés aux radioastronomes. Les conditions assurant la mise en œuvre optimale d'un système d'accord automatique rapide de la cavité résonante ont été spécifiées ; en particulier la stabilité à court terme n'est pas affectée. Une comparaison théorique des stabilités des masers à hydrogène actifs et passifs a été effectuée ; il apparaît que la limite de stabilité n'est pas atteinte avec les masers passifs contrairement au cas des masers actifs.

Des études théoriques et expérimentales ont conduit à la réalisation d'un étalon de fréquence à ions $^{199}\text{Hg}^+$. Le déplacement lumineux est inférieur à 5×10^{-12} . L'effet Doppler du second ordre peut être déterminé avec précision. Par ailleurs, des ions Mg^+ , confinés dans une trappe de Penning, ont été refroidis à une température de 1 K.

Mr Granveaud donne un compte rendu sur les travaux effectués au Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences (LPTF) (document CCDS/85-7). En 1982, il a été décidé en accord avec le Bureau National de Métrologie d'étudier et de réaliser un étalon primaire de temps et de fréquence à césium utilisant le pompage optique ; cette étude se fait en collaboration avec le LHA où les premiers résultats obtenus sont tout à fait prometteurs. Le but recherché au LPTF est de disposer d'un étalon de référence très exact comme il en existe au NBS, au NRC, à la PTB et au RRL. Les premiers résultats intéressants sont attendus pour 1988. Actuellement les études portent sur les diodes laser (stabilisation, pureté spectrale, fiabilité). Il existe une difficulté certaine d'approvisionnement en diodes laser monomodes qui sont actuellement fabriquées au Japon. Toutefois, Mr Audoin souligne qu'à côté des diodes laser monomodes il est possible d'obtenir, à partir de diodes multimodes, la bonne longueur d'onde à l'aide d'une cavité externe. Le dessin général du prototype d'étalon à césium est fait et les premiers éléments devraient être assemblés et essayés début juillet 1985. A côté de l'étalon à césium qui est la principale recherche appliquée effectuée au LPTF, les travaux sur la mesure et la caractérisation des sources laser de fréquence se poursuivent. Les résultats les plus remarquables concernent les lasers à

CO₂ stabilisés par absorption saturée dans OsO₄ : l'incertitude sur les mesures de la fréquence a été ramenée à $1,5 \times 10^{-12}$; une stabilité de quelques 10^{-14} sur des intervalles de temps de 1 à 100 s a été obtenue. La mesure de la fréquence d'un laser à He-Ne asservi sur l'absorption du méthane appartenant au BIPM (BICH4.3) a donné en 1983 un résultat en très bon accord avec les valeurs annoncées par les physiciens soviétiques. Le LPTF poursuit l'amélioration de la chaîne de synthèse de fréquence ; l'un des objectifs à long terme est, à partir des mesures dans la région des 30 THz, d'effectuer des mesures de fréquence dans le visible. Il est aussi prévu, en coopération avec l'Institut National de Métrologie (INM), de mesurer la fréquence et la longueur d'onde d'un laser à He-Ne (CH₄).

Le LPTF élabore une échelle de temps atomique indépendante qui montre une stabilité de quelques unités de 10^{-14} par rapport à l'échelle du BIH sur une durée de 10 jours. Cette échelle, non pilotée en fréquence, a une exactitude de quelques unités de 10^{-13} .

Mr Benavente Sierra indique que l'activité du service horaire de l'Instituto y Observatorio de Marina a permis l'amélioration de l'échelle locale de temps, notamment par un meilleur contrôle des conditions de fonctionnement des horloges. L'arrivée prochaine d'un récepteur de signaux GPS devrait améliorer la qualité des comparaisons de temps. L'institut est d'autre part engagé dans l'expérience LASSO (comparaison d'horloges par tir laser sur satellite géostationnaire).

Mr Godone présente les recherches effectuées à l'IEN (document CCDS/85-10) ; les travaux commencés par Mr Strumia il y a 12 ans sur un étalon à jet de magnésium se poursuivent. L'asservissement en phase d'un carcinotron sur un oscillateur à quartz à 5 MHz de haute pureté spectrale a permis d'obtenir un signal à 600 GHz propre à observer la transition $^3P_0 - ^3P_1$ du ^{24}Mg avec un bon rapport signal/bruit ; celui-ci a été amélioré par l'introduction d'un résonateur ouvert dans la région d'interrogation. La stabilité obtenue pour des intervalles τ de 0,01 à 100 s est $\sigma_y(\tau) = 5 \times 10^{-10} \tau^{-1/2}$. La limite d'incertitude se situe à environ 10^{-13} , toutefois le refroidissement des atomes devrait permettre de descendre à 10^{-14} . Les travaux en cours portent sur l'augmentation de la différence de population des niveaux 3P_0 et 3P_1 par pompage optique.

Des travaux sur les étalons à jet de césium ont pour but de mieux comprendre les limites actuelles de ces étalons et de proposer des améliorations. Une étude a montré que l'effet d'entraînement par les ailes des résonances de Rabi des raies voisines de la raie centrale était vraisemblablement la cause principale d'inexactitude et d'instabilité à long terme dans les tubes commerciaux. L'expérience confirme la théorie.

L'IEN travaille aussi sur la réalisation d'une chaîne de synthèse de fréquence dans le but de mesurer la fréquence de lasers à CO₂ (OsO₄).

Les travaux du NBS sont présentés par Mr Allan (document CCDS/85-15). Le fonctionnement de l'étalon NBS-6 en août et octobre

1984 a donné deux estimations de l'écart de la fréquence du TAI par rapport à NBS-6 : $-5,4 \times 10^{-14}$ et $-2,5 \times 10^{-14}$ respectivement. L'incertitude de ces résultats (1σ) est de $8,6 \times 10^{-14}$. Ceux-ci prennent en compte les travaux de de Marchi sur l'effet d'entraînement par les ailes des résonances de Rabi des raies voisines de la raie centrale (quelques 10^{-14}). L'insertion de ces valeurs dans l'algorithme d'exactitude du NBS indique que la fréquence du TAI est inférieure à la fréquence donnée par l'étalon à césium du NBS (après corrections) de $2,3 \times 10^{-14}$ avec une incertitude de $5,5 \times 10^{-14}$ en octobre 1984. Le résultat est en accord avec celui donné par l'étalon PTB-CS1 à quelques unités de 10^{-14} près.

Le NBS poursuit l'étude d'un étalon à césium à pompage optique (NBS-7) ; ce développement se place dans le cadre d'un projet militaire ; il est effectué en coopération avec l'industrie. L'objectif visé est une incertitude de 10^{-14} vers 1988. L'étalon fonctionnera en horloge avec une évaluation semi-automatique des paramètres et la propagation simultanée de deux faisceaux permettant le contrôle du déphasage de la cavité. Mr Allan indique que le problème des diodes laser semble en voie d'être résolu. D'autre part le déplacement lumineux est, d'après des résultats théoriques récents, cinq fois plus petit que ce qui avait été précédemment annoncé. La vitesse relativement élevée des atomes conduira à une perte sur le facteur de qualité Q ; il apparaît nécessaire de faire porter l'effort sur l'électronique.

Le stockage d'ions confinés dans une trappe (radiofréquence ou Penning) et refroidis par irradiation par laser offre des avantages remarquables pour la réalisation d'étalons de fréquence. Le NBS a obtenu des résultats avec les ions ${}^9\text{Be}^+$: une incertitude de $9,4 \times 10^{-14}$ et une stabilité de $1,5 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ (τ en secondes). Des essais sont effectués avec les ions ${}^{201}\text{Hg}^+$ stockés dans une trappe de Penning. L'étude d'une horloge optique à ion Hg^+ est tout à fait intéressante pour l'avenir.

Le NBS a mis au point des masers passifs à hydrogène qui sont de taille réduite ($63 \times 45 \times 27$ cm). Sur des intervalles τ de 1 seconde à 1 jour, ils présentent une instabilité inférieure ou égale à $2 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$, la dérive de fréquence est inférieure à 3×10^{-16} par jour. Des difficultés liées à l'électronique étaient apparues sur les premiers modèles, se traduisant par des sauts de fréquence ; elles sont maintenant résolues. La Société EFRATOM commercialise, avec quelques améliorations, les masers à hydrogène du NBS. L'USNO s'appête à en acheter.

Les travaux réalisés à l'USNO sont présentés par Mr Winkler ; ils portent essentiellement sur les échelles de temps : automaticité de l'algorithme de calcul, sûreté des résultats. L'USNO utilise depuis septembre 1984 deux masers à hydrogène interchangeables du Smithsonian Astronomical Observatory comme horloges maîtresses ; les deux masers sont comparés à chaque heure et asservis en phase à 10 ps près. La dérive de ces étalons est de 3×10^{-15} par jour. Des détails concernant

l'utilisation de ces masers sont exposés dans l'article présenté au PTTI (Precise Time and Time Interval Applications and Planning Meeting) en 1984. L'USNO disposera bientôt de deux prototypes d'horloges à ions Hg^+ fabriquées par Hewlett-Packard ; celles-ci ont des coefficients de qualité Q très élevés ($> 10^{12}$) et une stabilité meilleure que 10^{-14} sur quelques jours. Dans l'état actuel de la technique, il est toutefois nécessaire de prévoir un changement de la lampe tous les 3 à 6 mois.

A une question de Mr Douglas demandant si les lectures des horloges à hydrogène sont envoyées au BIH, Mr Winkler répond que les masers de l'USNO sont volontairement ajustés en fréquence ; ce qui rend difficile leur contribution au TAI ; plus généralement, Mr Winkler déconseille l'emploi des lectures de tels appareils au BIH. Mr Guinot précise que le BIH reçoit des données de masers à hydrogène mais sur des durées qui ne sont pas assez longues.

Mr Buisson du Naval Research Laboratory indique que dans le cadre du programme GPS (General Positioning System), une dizaine de masers à hydrogène très compacts sont en cours d'essais pour mettre à l'épreuve leur sûreté de fonctionnement et leur stabilité ; celle-ci est de l'ordre de 10^{-14} par jour.

Ensuite, Mr Douglas présente les travaux réalisés au Conseil National de Recherches du Canada (document CCDS/85-8). Il mentionne tout d'abord que le NRC fait des recherches dans le domaine des étalons de fréquence optique. Le laboratoire canadien fait fonctionner en horloges son étalon CsV (incertitude 5×10^{-14}) depuis 1975 et ses trois étalons CsVI (incertitude 7×10^{-14}) depuis 1979 ; leurs performances, comme étalons primaires, sont régulièrement évaluées. En 1984, l'étalon CsV a dû être arrêté afin de recharger le four en césium ; l'échelle de temps liée à cet appareil a été extrapolée durant l'interruption en utilisant les CsVI comme mémoire. Des progrès significatifs ont été réalisés au NRC dans la mesure du champ C, en utilisant les fréquences des résonances micro-ondes des transitions $(4, -1) \leftrightarrow (3, -1)$ et $(4, 1) \leftrightarrow (3, 1)$; ces mesures sont maintenant faites de façon semi-automatique avec un ordinateur. L'utilisation de cette méthode avec CsV a apporté une correction de la fréquence de cet étalon de moins de 1×10^{-14} . D'autre part, une solution générale pour évaluer l'effet Doppler du second ordre, solution applicable aux dispositifs résonants à cavité de Ramsey, a été étudiée. La méthode permet d'évaluer l'effet Doppler du second ordre avec une incertitude de 10^{-15} ; l'application à CsV entraîne un changement de fréquence de $1,7 \times 10^{-14}$.

Mr Douglas rappelle les travaux théoriques du NBS sur le décalage de fréquence dû au rayonnement du corps noir ; celui-ci atteint $1,6 \times 10^{-14}$ pour une horloge à césium. Le président estime qu'une discussion sur ce point sera nécessaire après le tour de table. Le NRC a commencé l'étude d'un étalon à jet de césium à pompage optique ; celle-ci a été retardée par les difficultés liées aux diodes laser. Dans le domaine des masers à hydrogène, le NRC dispose de deux étalons

depuis 1967 permettant, après des améliorations, des comparaisons de fréquence à 2×10^{-14} près sur 1 jour. Les dérives de fréquence affichées par ces masers sont $-3,9 \times 10^{-12}$ en 4,5 ans et $-6,8 \times 10^{-12}$ en 10 ans ; la dérive de fréquence due à l'effet de paroi est estimée à 8×10^{-16} par jour. Deux nouveaux masers, qui présentent une meilleure stabilité que ceux qui sont actuellement disponibles, sont en cours de construction.

Pour les comparaisons de temps, le NRC dispose d'un récepteur GPS depuis juillet 1984. D'autre part l'utilisation du modem Mitrex permettra des transferts de temps de grande précision avec le NBS et l'USNO en utilisant des satellites de télécommunications.

Mr Douglas mentionne l'intérêt du NRC pour le ralentissement des atomes de césium. Le projet d'une horloge à fontaine de césium présentant une exactitude de 10^{-16} est évoqué et suscite des questions de MM. Bonanomi et McA. Steele.

Mr Allan note qu'il est important de savoir quand les étalons du NRC peuvent être utilisés comme références de fréquence ; d'autre part, il souligne que les fréquences des étalons primaires du NRC et du NBS diffèrent parfois de plus d'un écart-type. Mr Douglas attire l'attention sur quelques difficultés qui ont été résolues au NRC : mesure du champ C sur les CsVI, électronique de CsV, contrôle de température (à $0,2^\circ\text{C}$).

Le rapport sur les activités de la PTB concernant le temps et les fréquences est présenté par Mr Dorenwendt. L'horloge primaire du laboratoire, CS1, est la base des échelles de temps de la PTB ; elle a été arrêtée 14 jours à la fin de 1981. L'évaluation de la correction due au déphasage de la cavité a été modifiée en 1980 : depuis cette date, la correction est déterminée par un renversement du jet qui est fait toutes les 5 semaines ; une incertitude de 2×10^{-14} accompagne cette opération. Toutefois pour n renversements, l'incertitude est divisée par \sqrt{n} . A l'aide d'un étalon à césium expérimental (CSX) dont les principales parties sont identiques à celles de CS1, la PTB a étudié le gradient de phase de la cavité. Il en résulte qu'un défaut de précision de 0,3 mm lors du renversement du jet amène une incertitude de 3×10^{-14} ; la même incertitude peut être attribuée à CS1 (hypothèse). L'influence des transitions de Majorana a été étudiée sur l'étalon CSX en introduisant des inhomogénéités connues dans le champ magnétique. Diverses configurations ont été essayées. Les travaux pour la compréhension totale des phénomènes se poursuivent.

La PTB réalise trois nouveaux étalons primaires à double jet, CS2, CS3 et CS4, sur le modèle de CS1. L'étalon CS2 est presque terminé ; les premières mesures montrent un excellent accord avec CS1. Dans l'avenir, il est prévu d'étudier un étalon à césium à pompage optique en utilisant CSX ; d'autre part la réduction de la vitesse des atomes du jet de césium sera étudiée sur les étalons CS2, CS3, CS4.

Pour les comparaisons de temps, la PTB dispose d'un récepteur

GPS. Mr Dorenwendt fait remarquer que l'introduction du GPS n'a pas supprimé les variations saisonnières, par exemple, entre les échelles de temps de la PTB et de l'USNO.

Mr Guinot indique que l'accord, à quelques 10^{-14} près, qui existait avant 1984 entre les horloges primaires CsV et CS1 s'est fortement dégradé en 1984 : la différence de fréquence a atteint 2×10^{-13} ; elle est actuellement nettement moindre. Du côté de la PTB, il n'y a pas d'explication à ce désaccord passager. Pour le NRC, on pense que cela pourrait être dû à des bruits inexpliqués et à un changement de l'électronique.

Mr Kirchner souligne qu'au laboratoire autrichien TUG les travaux portent essentiellement sur les comparaisons de temps par satellite (document CCDS/85-16) ; le TUG a participé à des comparaisons de grande précision entre laboratoires européens avec le satellite de télévision OTS-2. Un récepteur de signaux GPS fonctionne au TUG depuis fin 1982. Les résultats obtenus par GPS montrent la persistance de variations saisonnières. Le TUG participera à l'expérience LASSO et à des expériences pour utiliser les satellites de communication ECS et Intelsat.

Les activités du laboratoire ASMW sont présentées par Mr Kalau (document CCDS/85-9). Un étalon à césium de laboratoire a été construit et a servi à diverses expériences ; un second appareil avec possibilité de renversement du jet est en construction ; les premiers essais sont prévus en 1987.

Une échelle de temps atomique TA(DDR) est calculée en République Démocratique Allemande ; elle est reliée au TAI par LORAN-C. Les laboratoires chargés des mesures de temps et de fréquence en République Démocratique Allemande ont indiqué leur intérêt pour l'expérience LASSO.

Deux organismes chinois ont envoyé des représentants. Mr Ma Fengming représente le NIM ; ce laboratoire dispose d'un étalon à césium de laboratoire dont l'exactitude est de 5×10^{-13} , de 7 étalons à césium commerciaux et de 2 masers à hydrogène. Les comparaisons de temps sont effectuées par LORAN-C et par télévision (à l'intérieur de la Chine). Le laboratoire est responsable de la diffusion d'un temps codé par télévision. Des études sont en cours pour améliorer les performances de l'étalon à césium de laboratoire ; un nouvel étalon est en projet.

Mr Pan Xiaopei est délégué par l'Academia Sinica, pour représenter l'ensemble des observatoires chinois ; il indique les possibilités actuelles du Shaanxi Astronomical Observatory (CSAO) qui dispose de 3 masers à hydrogène et de 6 étalons commerciaux à césium. Des améliorations ont été apportées aux masers à hydrogène pour la compensation de température de la cavité ; la stabilité atteint 1 à 2×10^{-14} . L'observatoire est responsable de la diffusion de signaux horaires en hautes et en basses fréquences. Une coopération entre les différents instituts chinois chargés des mesures de temps et de fréquence se développe pour établir un temps atomique national.

L'Office Fédéral de Métrologie (Suisse) est représenté par Mr Bonanomi. Une douzaine d'étalons commerciaux à césium participent à l'élaboration du TAI; les comparaisons de temps s'effectuent par LORAN-C et télévision avec une précision d'environ 50 ns, jugée satisfaisante pour les besoins actuels. Mr Bonanomi mentionne qu'une entreprise commerciale suisse participe au développement des étalons de fréquence à césium et à hydrogène.

Mr Pilkington indique qu'un ensemble d'étalons commerciaux à césium contribuent à l'échelle de temps TA (RGO) du Royal Greenwich Observatory depuis 1966. Il apparaît qu'au vu des missions du Science and Engineering Research Council, organisation qui patronne l'Observatoire, il ne sera plus possible de maintenir très longtemps une échelle de temps atomique indépendante au RGO. Les besoins des astronomes, notamment pour les mesures de distance effectuées par tirs laser, se situent au niveau de la microseconde.

Mr Jones, représentant du NPL, présente les activités de ce laboratoire (document CCDS/85-14). Les résultats escomptés avec l'étalon de laboratoire NPL III n'ont pas été obtenus. Un étalon à césium utilisant le pompage optique est en construction; des résultats ont été obtenus sur la stabilisation de diodes laser à la longueur d'onde de 852,1 nm. Des expériences préliminaires de confinement d'ions Mg^+ ont été réalisées.

L'idée d'une échelle de temps national a été avancée il y a quelques années en Grande-Bretagne. Plusieurs tentatives pour la réaliser ont été infructueuses. Actuellement, l'algorithme du NBS qui utilise un filtre de Kalman est à l'essai. Le problème des liaisons entre Teddington (NPL) et Herstmonceux (RGO) sera résolu par l'utilisation de récepteurs GPS.

Mr Jones signale d'autre part que le NPL fait des travaux dans le domaine des étalons de fréquence optique.

Les activités des laboratoires japonais qui effectuent des mesures de temps et de fréquence sont brièvement résumées par Mr Fujimoto, représentant de l'Observatoire de Tokyo (documents CCDS/85-6, -11, -12). Au RRL et au NRLM sont construits des étalons primaires à césium. Le RRL s'intéresse au pompage optique pour un étalon à césium; ce laboratoire a réalisé des masers à hydrogène et a étudié un oscillateur à cavité supraconductrice; il a d'autre part mis au point un récepteur de signaux du GPS et effectué diverses expériences dans le domaine des comparaisons de temps: utilisation du satellite GMS, du satellite de télécommunication GS2, interférométrie à longue base (VLBI). L'Observatoire de Tokyo est particulièrement actif dans les comparaisons de temps utilisant le GPS.

Mr Kaarls rapporte que les travaux effectués au laboratoire de mesure du temps et des fréquences du VSL concernent les comparaisons de temps (document CCDS/85-18). Plusieurs techniques ont été expérimentées: VLBI, avec peu de succès jusqu'à présent; satellite OTS-2 pendant 3 ans qui a permis une précision des comparaisons de temps en Europe de 20 ns; GPS, en collaboration avec le NBS (des récepteurs,

du type NBS, sont en cours de réalisation) ; LASSO, auquel le VSL va participer en 1986 ; enfin utilisation d'un « modem » de Hartl avec des satellites de télécommunications du type Intelsat. Cette dernière expérience est prévue pour la fin de l'année 1985.

Après ce tour de table, le président revient à la question posée par le NRC sur le rayonnement du corps noir. Faut-il corriger les résultats des étalons à césium pour tenir compte de cet effet ? De combien faut-il les corriger ? Faut-il apporter une modification à la définition de la seconde ? Une discussion s'engage sur ce sujet. Mr Douglas rappelle que le NBS et le RRL appliquent cette correction ; il souligne qu'un tel effet est difficile à mesurer. Lui-même est partisan d'apporter une correction mais pense qu'il est nécessaire que le CCDS adopte une position. Mr Winkler rappelle que l'effet était inconnu lors de la définition de la seconde. Mr Audoin pense, tout en acceptant la théorie, que celle-ci repose sur des travaux antérieurs et qu'elle a besoin d'être étayée par des preuves expérimentales.

Mr Godone indique que des calculs semblables à ceux du NBS ont été faits à l'IEN pour le magnésium ; la précision avec laquelle les transitions sont connues joue un rôle important et il conclut qu'on ne connaît pas la vraie valeur de la correction due au rayonnement du corps noir mais uniquement une limite supérieure. Une convergence se dégage entre les divers intervenants, MM. Allan, Audoin, Douglas, Godone, Giacomo, Guinot, Winkler, Dorenwendt, pour d'une part ne pas apporter de modification à la définition de la seconde et rappeler que cette définition correspond à des atomes de césium non perturbés et d'autre part encourager la poursuite des études théoriques et la mesure expérimentale. Il est décidé par le président de faire une recommandation qui sera préparée par un groupe de travail composé de MM. Allan, Bonanomi, Douglas, Giacomo et Winkler. Une discussion s'engage par la suite sur le projet de recommandation ; des précisions sont apportées au texte initial qui devient la Recommandation S2 (*voir* p. S 24).

2. Méthodes de comparaison de temps

Le président invite Mr Guinot à présenter la situation générale des comparaisons de temps.

Depuis une quinzaine d'années, le LORAN-C a été le système largement utilisé pour les comparaisons de temps à longue distance, notamment dans le calcul du TAI. L'utilisation opérationnelle des méthodes de comparaison de temps par satellite est récente. Les possibilités du Global Positioning System (GPS) sont bien connues ; notamment en vue commune, ce système permet des comparaisons de temps maintenant une exactitude de l'ordre de 10 ns. L'utilisation du

GPS est actuellement largement répandue dans les laboratoires qui effectuent des mesures de temps et de fréquence, grâce notamment aux efforts du NBS ; deux conséquences immédiates pour le calcul du TAI ont été l'une la suppression de certaines liaisons par LORAN-C (notamment la liaison transatlantique) et l'autre l'introduction des lectures des horloges asiatiques et australiennes dans le calcul du TAI. Il apparaît toutefois, dans la pratique, que l'exactitude de 10 ns n'est pas toujours atteinte pour diverses raisons : les coordonnées de l'antenne du récepteur GPS sont mal connues, la forme de l'impulsion de référence du laboratoire n'est pas satisfaisante, le retard de la liaison entre le récepteur et l'horloge maîtresse est inexact, les retards des divers récepteurs ne sont pas établis dans un système homogène ; en bref, une harmonisation des normes et des modes d'emploi est nécessaire. La dégradation annoncée du système GPS pour les usages civils est d'autre part un sujet de préoccupation pour tous ceux qui sont concernés par les mesures de temps et de fréquence.

Invités par le président du CCDS, MM. Jones, Fliegel et Buisson interviennent tour à tour sur le GPS. Le programme GPS qui a débuté en 1973 est un programme commun à plusieurs administrations américaines. Le développement de la partie spatiale se poursuit de la manière suivante : en 1988 un positionnement à deux dimensions sera possible en tout point du globe et en 1989 un positionnement à trois dimensions. Actuellement, 6 satellites sont utilisables ; un autre sera lancé en août 1985 complétant ainsi le bloc I. L'information concernant les satellites (disponibilité, fonctionnement, etc.) peut être obtenue par téléphone au (805) 866-5948 ou en appelant le Mark 3 de General Electric. La phase des satellites de production GPS commencera en octobre 1986 avec le lancement du premier satellite du bloc II.

Les 18 satellites du bloc II (il y a 3 satellites de secours) seront lancés sur 6 plans qui ont une inclinaison de 55°. Les plans A et C sont actuellement remplis par les satellites du bloc I. Les plans D et E seront ensuite remplis puis F et B. La mise en place de la constellation de satellites dépend de plusieurs facteurs, tels que le programme de la navette spatiale, les plans de la NASA, les demandes des stations de poursuite et les plans de charge des équipages. La partie contrôle opérationnel est en place à la « Master Control Station » de Vandenberg ; celle-ci sera déménagée en octobre 1985 à Colorado Springs et placée auprès du « Consolidated Space Operations Center ». Il est prévu d'introduire des masers à hydrogène à titre d'essai dans le système GPS, tout d'abord dans la partie contrôle opérationnel en 1986 puis dans les derniers satellites du bloc II. Chaque satellite est actuellement équipé d'étalons à césium et à rubidium. La politique américaine actuelle concernant l'utilisation du GPS peut être résumée comme suit :

- l'accès au code C/A sera gratuit ;
- le service SPS (Standard Positioning Service) obtenu avec le code

C/A sera disponible pour tous les utilisateurs avec des incertitudes (deux fois l'écart-type) de 100 m sur la position horizontale, de 156 m sur l'altitude, de 0,2 m/s sur la vitesse et de 250 ns sur le temps du GPS.

La mise en place définitive du GPS aura des incidences sur les chaînes LORAN-C à partir de 1992 ; selon Mr Winkler le maintien de certaines chaînes LORAN-C (la chaîne méditerranéenne par exemple) pourrait se négocier entre les États-Unis d'Amérique et les pays concernés.

Revenant à l'application aux comparaisons de temps, Mr Buisson décrit la première opération de synchronisation par transport d'un récepteur GPS (document CCDS/85-17). En décembre 1984, une équipe du Naval Research Laboratory (NRL) a transporté un récepteur de la société Stanford Telecommunications Inc., modèle 502 B, à l'USNO puis dans 5 laboratoires (dont 4 laboratoires européens) équipés de récepteurs GPS. La comparaison initiale à l'USNO était en accord avec les résultats du récepteur de l'USNO (moyenne = 1 ns, $\sigma = 8$ ns). Au retour une légère différence, confirmée à trois reprises, a été mesurée : en moyenne - 9, puis - 7,8, puis - 10,1 ns. D'autre part, une différence de 30 ns a été observée pour les résultats obtenus par le satellite I1 par rapport aux autres satellites pour les laboratoires européens équipés de récepteurs NBS. Il a été montré qu'une erreur existait dans le traitement des données des récepteurs NBS. Un autre résultat de cette campagne a été la détermination des coordonnées des antennes. Il apparaît que la transformation entre les systèmes WGS 5-72 et NWL-9D a été parfois mal faite. En conclusion, ce premier transport de récepteur GPS s'est révélé tout à fait fructueux : comparé à un transport d'horloge, il a permis d'obtenir, à un moindre coût, une plus grande exactitude. D'après Mr Buisson, il faudrait prévoir un transport par an. Mr Winkler indique que l'USNO a l'intention de transporter un récepteur GPS de la société Trimble (vendu maintenant par Frequency and Time Systems) avec une horloge dans un premier temps. Il suggère que les laboratoires intéressés installent à demeure une antenne et un câble et il distribue un document précisant que la différence de 10 ns trouvée par le NRL à l'USNO vient d'un changement de place du récepteur GPS de l'USNO et d'une mauvaise comptabilité des retards. Il donne quelques précisions sur le temps du GPS par rapport à l'UTC : le décalage provient des secondes intercalaires (non appliquées au temps du GPS) et du pilotage du temps du GPS par rapport à l'UTC(USNO) ; on conserve une différence inférieure à 1 μ s ; elle est donnée dans le message de navigation avec une précision d'environ 20 ns. Mr Kirchner commente certains résultats de la campagne d'étalonnage du NRL. Il montre que suivant les lissages choisis (date, durée) des différences allant jusqu'à 50 ns peuvent apparaître.

Une discussion s'engage sur différents aspects de l'utilisation du GPS pour les comparaisons de temps. MM. Granveaud et Dorenwendt soulignent que des biais de quelques dizaines de nanosecondes sont

parfois observés entre des mesures effectuées par un ou plusieurs satellites. Les différences sont connues, répond Mr Winkler ; leur importance dépend des positions relatives du satellite et du laboratoire. Pour Mr Allan, il s'agit d'un défaut de jeunesse et Mr Buisson indique qu'une prochaine réunion doit traiter de ce sujet. Mr Guinot note qu'il est nécessaire de distinguer entre une lecture de mesure faite à 0 h UTC, par exemple, et une moyenne rapportée à 0 h UTC. D'autre part, les résultats des comparaisons de temps par GPS dépendent des centres de calcul. L'importance de la qualité de l'impulsion de référence du laboratoire est rappelée par Mr Winkler qui souligne, appuyé par MM. Guinot et Pilkington, la nécessité de disposer dans chaque laboratoire d'une échelle de référence UTC(i) qui soit physiquement et immédiatement disponible. Mr Pilkington dit qu'il faut cependant s'assurer que l'usage d'un « microstepper » ne dégrade pas les qualités du récepteur. Pour Mr Allan, il faut réaliser un accord sur la façon d'utiliser les données du GPS ; le NBS établit un programme d'observations simultanées (vues communes) entre laboratoires qui donne toute satisfaction. Le NBS est prêt à passer le relais au BIH pour l'organisation des vues communes. En ce qui concerne la dégradation des signaux GPS, celle-ci s'effectuera par la dégradation de la stabilité apparente de l'horloge de bord et par l'introduction d'erreurs dans les éphémérides. La possibilité d'obtenir les bonnes éphémérides avec retard est à l'étude. Mr Granveaud soulève le problème de la disponibilité de récepteurs GPS dans les pays du Conseil d'Assistance Économique Mutuelle (COMECON).

Le président structure la discussion en distinguant trois points majeurs : tout d'abord la disponibilité du GPS et la place de ce système par rapport aux autres possibilités de comparaisons ; ensuite le développement des comparaisons de temps au moyen du GPS : algorithmes, matériel, échange d'information ; enfin les problèmes techniques tels que les dates de mesure ou la durée des intervalles de mesure.

Est-ce que le GPS est un système disponible, c'est-à-dire utilisable par tous ? Pour Mr Kalau, ce n'est pas le cas pour les pays membres du COMECON. Mr Fliegel rappelle que le problème n'est pas nouveau et qu'il s'est déjà posé avec le LORAN ; il distingue d'autre part la disponibilité de l'équipement et celle de l'exactitude. Il est clair que le signal GPS est disponible pour tous ainsi que les relations permettant de travailler dans le système WGS 72. Mr Winkler indique qu'il n'y a pas de méthode unique de comparaison de temps et qu'il est nécessaire, à l'exemple de plusieurs laboratoires, d'expérimenter d'autres moyens que le GPS. L'utilisation du modem de Hartl entre le NBS, le NRC et l'USNO devrait permettre des comparaisons à quelques nanosecondes de précision en mode aller-retour ; c'est une possibilité qui est aussi étudiée par les laboratoires européens : NPL, TUG et VSL. Mr Jones demande que dans l'intérêt commun des utilisateurs, il y ait échange d'informations sur les expériences réalisées. Il est décidé de faire une

recommandation pour favoriser de nouvelles méthodes de comparaisons horaires (voir la Recommandation S3, p. S 25).

Pour développer les comparaisons de temps par GPS, il est nécessaire que soient publiés les différents paramètres qui entrent en jeu : coordonnées de l'antenne, retards des câbles, programme de vues communes. Mr Guinot accepte que le BIH collecte ces données et les diffuse. Dans l'avenir, les possibilités offertes par les 18 satellites de la constellation seront très larges ; il apparaît nécessaire qu'un accord se fasse sur le choix des liaisons et qu'une partie du travail lié aux résultats de comparaisons soit fait dans les laboratoires et intégré par le BIH. Le support informatique servant à l'échange de données sera le Mark 3 de General Electric.

Le président pose ensuite la question de la durée des intervalles de temps utilisés par le BIH : 10 jours séparent deux résultats ; 2 mois servent à estimer la marche d'une horloge. Mr Guinot rappelle que les effets saisonniers subsistent malgré l'utilisation du GPS. Il ne lui paraît pas nécessaire de disposer actuellement de plus de données (par exemple données journalières au lieu de données tous les 10 jours). Devant la qualité des liaisons par GPS, il est envisagé de ramener de deux mois à un mois la durée utilisée pour estimer la marche d'une horloge.

3. Rapport d'activité du BIH

Mr Guinot, directeur du BIH, commente le rapport d'activité aux membres du CCDS (document CCDS/85-4). La coopération du BIH avec les trente-neuf laboratoires participants est totale ; parmi ceux-ci, dix organismes établissent une échelle de temps locale indépendante. Le TAI est établi en trois étapes depuis 1977 : calcul de l'échelle libre, EAL, à l'aide d'un algorithme de stabilité ALGOS, estimation de la durée de l'intervalle unitaire de l'EAL par les étalons primaires de laboratoire, correction appliquée à l'EAL de façon que l'échelle du TAI qui en résulte ait un intervalle unitaire proche de la seconde du SI.

Le nombre d'horloges participant au calcul de l'EAL augmente chaque année ; en janvier-février 1985, il était de cent cinquante dont cinq horloges primaires de laboratoire et deux masers à hydrogène. Les liaisons entre ces horloges sont non redondantes et le GPS est le moyen de comparaison essentiel. Le poids maximum d'une horloge dans le calcul du TAI a été augmenté en 1981 ; il est actuellement atteint par 35 % des horloges, ce qui paraît convenable. D'autre part, un graphique sur l'âge des horloges entrant dans le calcul de TAI montre que 50 % des horloges ont moins de dix-sept mois de fonctionnement continu au 1^{er} janvier 1985.

L'intervalle unitaire de l'EAL est estimé à partir des étalons primaires

du NBS, du NRC, de la PTB et du RRL. Le filtre décrit dans un article de *Metrologia* de 1977 sert de nouveau depuis 1984 à l'estimation de la fréquence de l'EAL. Les difficultés de cette estimation viennent des écarts non aléatoires qui sont observés entre les étalons et de l'existence de variations annuelles (environ $\pm 5 \times 10^{-14}$).

Le pilotage de l'échelle du TAI s'effectue par sauts de fréquence de 2×10^{-14} . Toutefois l'écart entre les étalons NRC-CsV et PTB-CS1 a atteint 2×10^{-13} en 1984 et aucun pilotage n'a été effectué depuis mars 1984. L'incertitude de l'intervalle unitaire du TAI est de l'ordre de $\pm 1 \times 10^{-13}$.

L'accélération de la rotation de la Terre est telle qu'une seconde intercalaire positive est nécessaire tous les deux ans.

L'utilisation des comparaisons de temps par GPS dans le calcul du TAI constitue une étape importante ; début 1985, neuf laboratoires sont reliés par le GPS et leurs horloges contribuent pour 50 % au TAI. L'introduction du GPS en 1983 a amené des réajustements sur les quantités UTC-UTC(i). Certains défauts signalés plus haut limitent actuellement l'exactitude des résultats. Le BIH tient à remercier le NBS pour le prêt d'un récepteur et la coordination du programme de vues communes, le NRL pour la campagne d'étalonnage, l'USNO pour l'utilisation du Mark 3 de General Electric et enfin la compagnie Stanford Telecommunications Inc. pour le prêt d'un récepteur.

Parmi les sujets d'étude figurent la prédiction de marche des horloges et leur poids. Les variations saisonnières montrées par certaines horloges industrielles ne sont pas complètement appréhendées et ont empêché, jusqu'à présent, une amélioration de la prédiction des marches. Pour les poids, il apparaît que les bonnes horloges sont sous-estimées pour des intervalles de deux mois, mais cet effet s'atténue pour des intervalles plus larges. Compte tenu de cela et aussi des variations systématiques de fréquence, il ne semble pas opportun de favoriser un petit nombre d'horloges en élevant le poids limite.

La discussion s'engage sur les causes possibles des variations saisonnières. Mr Allan signale l'importance des gradients de température et d'humidité. Mr Quinn fait le parallèle avec les étalons électriques pour lesquels l'absorption d'humidité entraîne des changements des constantes de temps et des changements des propriétés électriques. Mr Dorenwendt indique que tous les étalons à césium de la PTB montrent des variations annuelles mais que la corrélation avec l'humidité n'est pas évidente. Peut-être les résultats des horloges australiennes apporteront-ils une réponse, comme le suggère Mr Winkler. Il est proposé par Mr Granveaud d'utiliser les horloges primaires de laboratoire comme références servant à déterminer les variations saisonnières. De son côté, Mr Allan pense qu'une approche statistique permettrait de cerner l'effet saisonnier. Il est ensuite discuté de l'indépendance des contributions des laboratoires au TAI. Il est clair que certains laboratoires peuvent ajuster leurs horloges sur le temps du GPS et fausser l'indépendance nécessaire

des horloges. En demandant une contribution rapide, on peut éviter un tel inconvénient. Mr Douglas propose que le BIH attribue à chaque laboratoire des retards sous la forme d'une suite de nombres pseudo-aléatoires ajustés aux différences de temps mesurées.

4. Organisation des travaux sur le TAI et l'UTC

Mr Guinot commente le document CCDS/85-2 intitulé « Transfert des activités sur le TAI de l'Observatoire de Paris au BIPM — Dates clés ». Il trace un rapide historique du BIH depuis 1911, rappelant que contrairement à la conception initiale, le BIH n'est pas devenu un organisme intergouvernemental ; il a formé un service scientifique, international par ses missions, mais presque entièrement à la charge de l'Observatoire de Paris. Depuis 1971, année de la reconnaissance du TAI par la Conférence Générale des Poids et Mesures, la question du transfert de l'activité sur le TAI au BIPM a été souvent évoquée. En 1984, alors qu'il apparaissait que l'Observatoire de Paris ne pouvait garantir le maintien d'une équipe suffisante sur le TAI, un mémorandum sur ce transfert a été préparé par le président de l'Observatoire de Paris et le directeur du BIPM. Ce mémorandum a été approuvé par le conseil d'administration de l'Observatoire et par le CIPM. Les unions scientifiques parentes du BIH, UAI, UGGI, URSI, n'ont pas fait d'objections au principe d'une prise en charge de la responsabilité du TAI par le CIPM, mais, tout en acceptant que le travail sur le TAI soit exécuté au BIPM dès 1985, elles demandent qu'aucune modification ne soit apportée à la structure du BIH avant qu'elles n'aient pu débattre de ce sujet à leurs prochaines assemblées générales. Le travail sur le TAI est effectivement accompli au BIPM, depuis avril 1985, par une équipe qui comprend Mr Guinot, directeur du BIH et responsable de la section « temps » (la section « rotation de la Terre » du BIH restant à l'Observatoire sous la responsabilité de Mme M. Feissel), MM. Azoubib et Lewandowski, physiciens, et Mlle Konaté, technicienne.

Mr Guinot, après avoir consulté diverses personnalités, notamment les membres du Comité Exécutif de l'UAI, a remis aux présidents des commissions de l'UAI concernées un projet de recommandation sur le transfert de la responsabilité du TAI au CIPM, projet qui sera examiné lors de l'Assemblée Générale de l'UAI, en novembre 1985 *. L'URSI a déjà recommandé ce transfert. Quant à l'UGGI, son assemblée générale se tiendra en août 1987. Ce projet n'a pas été distribué au CCDS, mais il est lu en séance par Mr Markowitz. Mr Pâquet confirme qu'il n'y a pas d'objection majeure de la part de l'UAI à ce transfert. Il indique qu'en 1987 un nouveau service de la rotation de la Terre sera créé à la suite du programme MERIT. Il pense que la

* Ce projet a été adopté sous la forme de la Résolution B1, novembre 1985, de l'UAI.

séparation en deux parties du BIH devrait donner plus de souplesse pour l'établissement de ce service. Toutefois, il craint que la situation du TAI au BIPM complique les relations avec les laboratoires. Mr Winkler explique que, en effet, la correspondance avec les organismes intergouvernementaux doit, aux États-Unis d'Amérique, emprunter un canal officiel assez lent. Mais — et cela est confirmé par Mr Giacomo — cela ne s'applique pas aux échanges nécessaires pour un travail courant.

Dans le projet de Mr Guinot, la décision d'introduire les secondes intercalaires de l'UTC et leur annonce restent à la charge du service de la rotation de la Terre. Mr McA. Steele indique qu'il est troublant que la décision au sujet des secondes intercalaires vienne d'un autre organisme que le BIPM. Mr Guinot dit que cela a été aussi son sentiment initial, notamment à cause de l'aspect légal de l'UTC, mais le projet qu'il a soumis ne répond pas seulement à ses vues. Il doit être acceptable par les astronomes et les géodésiens et il ne voit pas d'inconvénient sérieux au mode de fonctionnement proposé pour l'UTC. Le BIPM publiera, comme le faisait le BIH, les valeurs des UTC-UTC(lab) des horloges maîtresses des divers laboratoires et retransmettra, en citant leur source, les informations sur l'introduction des secondes intercalaires. A une question de Mr Markowitz, il répond qu'il n'a pas l'intention de revenir sur ce point lors des discussions à l'Assemblée Générale de l'UAI.

Le projet de proposition pour la création d'un groupe de travail du CCDS sur le TAI (document CCDS/85-1) est ensuite examiné. Mr Giacomo fait distribuer le texte que le CIPM a approuvé sur le sujet (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 52, 1984, p. 5). Il apparaît difficile à Mr Douglas de concilier les points 7, 4c et 2 de la proposition faite dans le document CCDS/85-1 pour les laboratoires qui possèdent des étalons primaires. Mr Granveaud propose d'ajouter des représentants des laboratoires aux membres du groupe de travail ; il souligne la lourdeur engendrée par cette création puisque ce groupe doit faire rapport au CCDS. Mr Dorenwendt demande qui décide s'il y a une différence significative entre les résultats des étalons primaires de laboratoire ; il est répondu que le CCDS pourrait faire appel à un groupe d'experts. Le président demande que le texte du projet soit corrigé et qu'une nouvelle version soit présentée. Celle-ci est à nouveau discutée. En réponse à une question de Mr Douglas, le président indique qu'une consultation par correspondance sera organisée en cas de difficulté sur le TAI. Il est précisé que le représentant de l'UAI sera invité à prendre la première présidence du groupe. Le texte corrigé devient la Recommandation S1 (voir p. S 22).

5. Méthodes statistiques appliquées à la mesure du temps

Le président demande à Mr Allan d'introduire la discussion. L'amélioration significative des comparaisons de temps et de fréquence — en fréquence, on obtient 10^{-14} sur une durée de 10 jours — permet de réduire les durées actuellement utilisées. Mr Allan pense que ces nouvelles possibilités et les conséquences qui en découlent devraient être étudiées de façon approfondie ; ainsi la mise en évidence des effets saisonniers devrait être facilitée en calculant des fréquences moyennes sur un mois et non sur deux mois comme c'est le cas actuellement. Il offre au BIH la coopération du NBS pour ces études statistiques et signale que son équipe s'intéresse aux travaux sur les pulsars rapides (millisecond pulsars). A la requête du président, Mr Allan commente un graphique qui quantifie la capacité à garder le temps (c'est-à-dire l'erreur de prédiction) en fonction du temps écoulé depuis la synchronisation initiale pour divers étalons : horloge à césium, à rubidium, pulsar rapide. Le facteur de qualité associé au pulsar rapide est très élevé, de l'ordre de 10^{20} ; d'autre part la dérive de fréquence de l'échelle de temps associée est modélisable.

Une courte discussion suit cette présentation. Mr Winkler conclut sur la nécessité d'améliorer les horloges actuellement en service et de disposer de davantage d'étalons de laboratoire qui soient bien comparés entre eux.

6. Compte rendu de réunions

Il est rendu compte des réunions suivantes :

- Symposium N° 114 de l'Union Astronomique Internationale : « Relativity in Celestial Mechanics and Astrometry » ;
- Trente-neuvième Symposium « Frequency Control ».

Le compte rendu de la première réunion est fait par le président.

Le Symposium N° 114 de l'UAI, qui s'est tenu à Leningrad du 28 au 31 mai 1985, était consacré aux applications de la relativité aux divers aspects de l'Astrométrie, de la Mécanique Céleste et de l'Heure. Il y avait environ 140 participants dont un peu plus de la moitié étaient des soviétiques. Malheureusement, une dizaine de scientifiques, presque tous des français, parmi lesquels Mr Guinot, n'ont pu y participer par suite de la non-délivrance à temps du visa d'entrée en URSS.

Une première partie du symposium était consacrée à l'étude des effets dynamiques dans le cadre des théories relativistes avec, en particulier, les applications en Mécanique Céleste, notamment pour le

mouvement des planètes. Pour ce dernier, la base est constituée par les éphémérides numériques DE 200 du Jet Propulsion Laboratory (JPL), reprises par le Bureau des Longitudes comme référence pour les éphémérides analytiques. Dans une seconde partie, les effets relativistes en astrométrie — il s'agit de la déflexion de la lumière — ont été abordés. Une discussion approfondie de la notion de système de référence par T. Kukushima, M.-K. Fujimoto, H. Kinoshita et S. Aoki a été particulièrement claire et a permis de bien poser les principes. Plusieurs communications ont traité de façon différente les corrections relativistes pour les observations en VLBI. Un article commun qui les résumera permettra peut-être d'unifier les méthodes de calcul de la différence de temps de réception qui n'est pas du temps propre — contrairement aux mesures de distance par laser — mais dépend des systèmes de coordonnées.

Le problème des échelles de temps au voisinage de la Terre a été posé de façon très complète par D. W. Allan et N. Ashby. Leur proposition de faire adopter par le symposium le formalisme de correction étendant le TAI jusqu'aux satellites géostationnaires, selon les formules du CCDS et du CCIR, n'a cependant pas été retenue. Une nouvelle action, mieux concertée, devra être envisagée pour l'Assemblée Générale de l'UAI.

L'état actuel de nos connaissances des paramètres décrivant la structure de l'espace-temps a été donné par C. M. Will. Pour les paramètres PPN (approximation paramétrisée post-newtonienne) classiques β et γ leur valeur est maintenant connue à quelques millièmes près et correspond, à cette précision, aux valeurs de la théorie d'Einstein. Les discussions relatives aux méthodes actuelles et futures de détermination de ces paramètres ont montré que des expériences tout à fait nouvelles et originales doivent être inventées pour aller nettement au-delà de la situation présente et, surtout, pour observer directement les effets de second ordre. Ces effets sont primordiaux dans les régions à champ fort (pulsars, etc.) couramment étudiées par les astrophysiciens. Plusieurs propositions ont été faites en ce sens (double interféromètre embarqué présenté par R. D. Reasenberg, ou interféromètres optiques ou radio à longue base sur satellites).

En conclusion, l'un des buts du symposium, qui était de rapprocher les théoriciens de la relativité générale et les utilisateurs de cette théorie, semble avoir été atteint. Les théoriciens ont pris conscience des problèmes réels qui se posent en astrométrie et les astronomes ont pu un peu mieux appréhender la réalité qui se trouve derrière ce qu'on appelle les « corrections relativistes ».

Mr Winkler fait un rapport sur le 39^e Frequency Control Symposium qui s'est tenu du 29 au 31 mai 1985. Cette conférence a rassemblé 600 personnes. Un des principaux thèmes abordés fut celui des quartz qui ont fait l'objet de près de cinquante des communications présentées ; nombre de celles-ci se rapportent à l'utilisation des quartz comme

résonateurs. Une session a été consacrée à la stabilité de fréquence. Deux présentations ont retenu l'attention de Mr Winkler : d'une part celle de J. Barnes sur la stabilité d'une échelle de temps en utilisant le filtrage de Kalman et d'autre part l'approche de J. J. Gagnepain définissant la dimension fractale des bruits — approche qui s'appuie sur un livre de B. Mandelbrot —. Une table ronde sur les problèmes de bruit n'a rien apporté de nouveau. Le GPS a donné lieu à deux présentations. Les développements et les recherches effectuées sur les horloges atomiques ont fait l'objet de plusieurs communications : effets systématiques dans les étalons à césium, masers à hydrogène — avec notamment un appareil de dimensions réduites pour le programme GPS —, masers à rubidium, cavité supraconductrice, horloge à deux photons. Le pompage optique appliqué à un étalon atomique était le thème de quatre présentations. Ces derniers développements paraissent les plus prometteurs, ouvrant la possibilité de résonances atomiques qui n'ont pu être utilisées jusqu'à présent à cause des difficultés de détection. Il semble que la nouvelle génération d'étalons de référence sera constituée par des étalons à jet de césium à pompage optique. Toutefois des progrès importants en stabilité sont à attendre des dispositifs à stockage d'ions, notamment avec l'ion Hg^+ . Au vu des derniers résultats sur les étalons à césium classiques, il est clair que le renversement du jet est un élément essentiel de l'évaluation de l'appareil et que la comparaison de plusieurs étalons permet de découvrir des écarts anormaux de fréquence.

7. Examen de la définition du TAI dans les théories relativistes

Le président, après avoir rappelé que le problème des échelles de temps n'avait pas fait l'objet de discussions approfondies lors du Symposium n° 114 de l'UAI, demande d'abord à Mr Fujimoto de présenter la note qu'il a rédigée avec H. Kinoshita, S. Aoki et T. Fukushima (document CCDS/85-5).

Mr Fujimoto donne les relations entre le temps propre d'une horloge et les temps-coordonnées barycentrique et géocentrique, compte tenu des termes dépendant des paramètres PPN. Dans le cas du TAI, les termes post-newtoniens sont inférieurs à 10^{-18} en fréquence normée. Tant que cette exactitude n'est pas atteinte par les horloges, on peut limiter la discussion aux termes newtoniens et l'on ne rencontre pas de difficultés théoriques pour définir le TAI. Cependant, des limitations pratiques proviennent des incertitudes sur la connaissance des termes newtoniens : réalisation du géoïde (1×10^{-18} est le décalage gravitationnel pour une élévation de 1 cm), marées luni-solaires (quelques unités de 10^{-17}), effets des irrégularités de la rotation terrestre. Mr Fujimoto

signale aussi que les termes PPN peuvent devenir préoccupants dans les liaisons horaires par onde électromagnétique.

Ensuite, Mr Allan commente brièvement une communication commune avec Mr Ashby qu'il a présentée au Symposium n° 114 de l'UAI : « Temps-coordonnée au voisinage de la Terre » (document CCDS/85-19). Ces auteurs arrivent aussi à la conclusion que la définition du TAI suffit pour le moment pour des horloges proches de la Terre. Ils donnent l'expression de corrections valables jusqu'à 50 000 km de la Terre à l'approximation de 10^{-14} ou de 1 ns. Mr Allan mentionne l'étude des périodes des pulsars, pour laquelle il faut réaliser la meilleure échelle de temps-coordonnée possible, ce qui exige à la fois les meilleurs algorithmes et des conversions relativistes très exactes.

Dans la discussion qui suit, Mr Allan rappelle qu'en 1982, on a découvert, à l'Observatoire Arecibo, un pulsar avec une période de 1,6 ms de très grande stabilité, la décroissance de la période étant de l'ordre de 10^{-19} s.s⁻¹. Mais il faut s'assurer que ce pulsar ne subit pas de sauts de période, comme cela se produit pour des pulsars à plus longues périodes connus antérieurement.

Mr Guinot avait préparé pour le Symposium n° 114 une communication sur des thèmes voisins qu'il n'a pas pu présenter faute d'avoir obtenu son visa (document CCDS/85-13). Il attire l'attention sur le fait que l'Union Astronomique Internationale (UAI) n'a pas encore reconnu la définition du TAI : lors de l'Assemblée Générale de 1982, les commissions 4 et 31 de l'UAI avaient refusé d'en discuter. La raison est peut-être que de nombreux astronomes ont écrit que le TAI est un temps propre. Cependant, la liaison entre le TAI, temps-coordonnée géocentrique, et un temps-coordonnée barycentrique est facilement élucidée, pourvu que l'on distingue le TAI et une horloge synchronisée avec le TAI dans le système géocentrique. Rien n'empêche l'UAI de reconnaître la définition du TAI donnée par le CCDS et d'indiquer comment elle peut l'utiliser dans ses domaines propres. Mr Guinot avait préparé un projet de résolution à cet effet.

Mr Fujimoto, tout en étant d'accord sur ces principes, estime que le projet de résolution devrait être amélioré. Plusieurs personnes déplorent que l'UAI n'ait pas encore accepté une définition qui est ailleurs trouvée satisfaisante et indispensable. Il est suggéré que MM. Fujimoto et Guinot s'accordent sur les termes d'une résolution qui devrait être soumise à la prochaine Assemblée Générale de l'UAI, en novembre 1985. Mr Markowitz, représentant l'UAI au CCDS, attirera l'attention sur ce problème dans son rapport.

8. Questions diverses

Mr Markowitz expose les résultats les plus récents de ses travaux sur la relation qui lie la fréquence de la transition atomique qui sert

à la définition de la seconde et la seconde des éphémérides. Il confirme le bien fondé de la valeur adoptée.

Mr Guinot indique que les laboratoires qui participent aux travaux du TAI n'ont pas tous un représentant au CCDS. Aussi il lui paraîtrait intéressant de réunir l'ensemble des responsables de ces laboratoires. L'idée est acceptée par les membres du CCDS ; une telle réunion viendrait en complément d'une autre. Mr Guinot remercie le Comité et indique qu'il prendra les contacts nécessaires.

Le président remercie le BIPM et les participants à cette 10^e session du CCDS.

**Recommandations
du Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde
présentées
au Comité International des Poids et Mesures**

Groupe de travail du CCDS sur le TAI

RECOMMANDATION S 1 (1985)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

considérant

que l'établissement du Temps Atomique International TAI est désormais pris en charge par le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) et qu'il est envisagé que cette activité soit prochainement placée sous l'entière responsabilité du Comité International des Poids et Mesures (CIPM) ;

que les unions scientifiques et les organisations internationales concernées par le TAI doivent avoir la possibilité de s'assurer en permanence que le service du TAI répond à leurs exigences ;

propose

- 1 — qu'un Groupe de travail du CCDS sur le TAI soit créé ;
- 2 — que ce Groupe de travail soit composé
 - a) d'un représentant de chacune des organisations suivantes :
 - Union Astronomique Internationale (UAI),
 - Union Géodésique et Géophysique Internationale (UGGI),
 - Union Radioscopique Internationale (URSI),
 - Comité Consultatif International des Radiocommunications (CCIR),
 - Comité International des Poids et Mesures (CIPM),

- b) du directeur du BIPM,
- c) du responsable du TAI au BIPM ;

3 — que les représentants de l'UAI, de l'UGGI et de l'URSI soient invités à assurer par roulement la présidence de ce Groupe de travail, la durée du mandat du président étant de cinq ans * ;

4 — que les missions de ce Groupe de travail soient les suivantes :

- a) examiner les remarques et desiderata exprimés par les utilisateurs du service du TAI,
- b) préparer les directives pour l'amélioration du service du TAI, à soumettre à l'approbation du CCDS, puis du CIPM ;

5 — que ces missions s'étendent également au Temps Universel Coordonné UTC, en ce qui concerne ses qualités métrologiques, mais non pas à sa définition, ni à son contenu astronomique ;

6 — que le Groupe de travail fonctionne habituellement par correspondance adressée à son président et qu'il se réunisse, si possible, une fois par an, sur convocation de son président ;

7 — que le Groupe de travail sur le pilotage du TAI, établi par le CCDS en 1977 (Recommandation S 1 (1977), *BIPM Com. Cons. Déf. Seconde*, 8, 1977) soit supprimé, les conditions à remplir par le pilotage et les moyens à mettre en œuvre étant définis par le CCDS qui peut déléguer ses pouvoirs à un groupe de travail *ad hoc*.

* Lors de sa session d'octobre 1985, le CIPM a ajouté : « et que le BIPM assure le secrétariat permanent de ce Groupe de travail ».

Corrections nécessaires pour la réalisation de la seconde

RECOMMANDATION S 2 (1985)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

rappelle que

la définition de la seconde telle qu'elle résulte des décisions de la 13^e Conférence Générale des Poids et Mesures sous-entend que l'atome de césium utilisé comme référence est au repos et n'est soumis à aucune perturbation,

ceci implique notamment que, dans la mise en pratique, les mesures doivent être corrigées en raison de la vitesse des atomes de césium par rapport au référentiel de l'horloge, en raison des champs magnétique et électrique, de l'échange des spins et des autres perturbations éventuelles,

et afin de mettre en œuvre les corrections nécessaires,

recommande

1) que des études théoriques en vue d'établir des modèles de tous les effets perturbateurs soient développées ;

2) que des expériences permettant de mettre en évidence ces effets, d'en vérifier l'interprétation théorique et d'évaluer l'incertitude des corrections correspondantes soient poursuivies activement.

Comparaisons de temps de haute précision

RECOMMANDATION S 3 (1985)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

considérant

que la synchronisation de haute précision devient rapidement une condition essentielle des télécommunications modernes ;

que les liaisons aller et retour par satellite permettent d'effectuer des comparaisons de temps à l'échelle internationale avec une très grande précision ;

qu'il apparaît possible de transmettre des signaux horaires pseudo-aléatoires superposés à une utilisation normale des voies de communication sans qu'il y ait interférence ;

que ces techniques de signaux pseudo-aléatoires permettent aussi de mesurer la distance du satellite avec une grande précision ;

recommande

que les organes nationaux et internationaux responsables apportent leur soutien aux expériences utilisant les liaisons de télécommunication par satellites à l'aide de signaux pseudo-aléatoires, dans le cadre des programmes internationaux de liaisons horaires faisant partie de l'établissement du Temps Atomique International.

ANNEXE S 1

**Documents de travail
présentés à la 10^e session du CCDS**

Ces documents de travail, qu'ils soient ou non publiés dans ce volume, peuvent être obtenus dans leur langue originale sur demande adressée au BIPM.

Document
CCDS/

- 85-1 Projet de proposition pour la création du groupe de travail du CCDS sur le TAI, par B. Guinot, 2 pages.
- 85-2 Transfert des activités sur le TAI de l'Observatoire de Paris au BIPM — Dates-clés, par B. Guinot, 2 pages.
- 85-3 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — Report to CCDS June 1985, by K. Dorenwendt, 8 pages.
- 85-4 BIH. — BIH Report to CCDS, by B. Guinot, 12 pages.
- 85-5 TAO (Japon). — Note on the definition of TAI and the relation to TDB and TDT, by M.-K. Fujimoto, H. Kinoshita, S. Aoki and T. Fukushima, 4 pages.
- 85-6 TAO (Japon). — Current status of the GPS time transfer at TAO, 10 pages.
- 85-7 LPTF-LHA (France). — Contribution au 10^e CCDS, par M. Granveaud et C. Audoin, 8 pages.
- 85-8 NRC (Canada). — Report to CCDS from NRC, 10 pages.
- 85-9 ASMW (Rép. Dém. Allemande). — Report of the ASMW (GDR) to the 10th session of the CCDS, 3 pages.
- 85-10 IEN (Italie). — IEN Report to the 10th CCDS Session : Progress on atomic frequency standards, 4 pages.

- 85-11 RRL (Japon). — Research Activities on Time and Frequency at Radio Research Laboratory, by T. Igarashi, S. Kobayashi, K. Yoshimura and K. Nakagiri, 11 pages.
- 85-12 NRLM (Japon). — Recent Works on Atomic Frequency Standards at NRLM, by Y. Koga, Y. Nakadan and S. Ohshima, 4 pages.
- 85-13 BIH. — Is the International Atomic Time TAI a Coordinate Time or a Proper Time ?, by B. Guinot, 7 pages.
- 85-14 NPL (Royaume-Uni). — Report from the National Physical Laboratory to the 10th Meeting of CCDS, 2 pages.
- 85-15 NBS (États-Unis d'Amérique). — Notes on NBS time scales and primary standards, 9 pages.
- 85-16 TUG (Autriche). — Satellite time transfer, by D. Kirchner, 7 pages.
- 85-17 NRL, Naval Research Laboratory (États-Unis d'Amérique) and Bendix Field Engineering Corporation. — Absolute Calibration and Precise Positioning Between Major European Time Observatories and the U.S. Naval Observatory Using GPS, by J. A. Buisson, O. J. Oaks and H. Warren, 15 pages.
- 85-18 VSL (Pays-Bas). — Progress Report of the Time and Frequency Section of VSL, Delft, Netherlands, by G. de Jong, 2 pages.
- 85-19 NBS and University of Colorado (États-Unis d'Amérique). — Coordinate time in the vicinity of the Earth, by D. W. Allan and N. Ashby, 27 pages.
-

Notice for the reader of the English version

In order to make the reports of the various Comités Consultatifs more accessible to the many readers who are more familiar with the English language than with the French, the Comité International des Poids et Mesures has decided to publish an English version of these reports. The reader must however be aware that the official report is always the French one. The English version is published for convenience only. If any matter gives rise to controversy, or if an authoritative reference is needed, the French text must be used. This applies especially to the text of the recommendations submitted to the Comité International des Poids et Mesures.

Avertissement au lecteur de la version anglaise

Afin de rendre plus facile l'accès aux rapports des divers Comités Consultatifs pour de nombreux lecteurs qui sont plus familiers avec la langue anglaise qu'avec la langue française, le Comité International des Poids et Mesures a décidé de publier une version en anglais de ces rapports. Le lecteur doit cependant prendre garde au fait que le rapport officiel est toujours celui qui est rédigé en français. La version anglaise n'est publiée que pour faciliter la lecture. Si un point quelconque soulève une discussion, ou si une référence autorisée est nécessaire, c'est toujours le texte français qui doit être utilisé. Ceci s'applique particulièrement au texte des recommandations proposées au Comité International des Poids et Mesures.

NOTE
ON THE ORGANS OF
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 worldwide 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), and ionizing radiations (1960). 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 1985 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 13 144 000 gold francs, approximately 23 850 000 French francs (in 1985).

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 worldwide 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*.

AGENDA
for the 10th Meeting

1. Progress in atomic frequency standards and clocks.
 2. Time comparison methods.
 3. Statistical methods applied to the measurement of time.
 4. Report on the activities of the BIH.
 5. Reports on meetings :
 - IAU Symposium No. 114, Leningrad, 28-31 May 1985,
« Relativity in Celestial Mechanics and Astrometry ».
 - 39th Annual Frequency Control Symposium, Philadelphia,
29-31 May 1985.
 6. Organization of the work on TAI and UTC.
 7. The definition of TAI in relativistic theories.
 8. Miscellaneous.
-

REPORT
OF THE
COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE
(10th Meeting - 1985)
TO THE
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
by M. GRANVEAUD, rapporteur

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS) held its 10th meeting at the Bureau International des Poids et Mesures, at Sèvres, where it held five sessions on Wednesday 5th, Thursday 6th and Friday 7th of June 1985.

The following were present :

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

The delegates from member laboratories and organizations :

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

Bureau International de l'Heure [BIH], Paris (B. GUINOT).

Bureau des Longitudes, Paris (B. GUINOT).

Instituto y Observatorio de Marina [OMSF], San Fernando
(J. BENAVENTE SIERRA).

International Astronomical Union [IAU], (W. MARKOWITZ).

International Radio Consultative Committee [CCIR], Geneva
(J. McA. STEELE).

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

Laboratoire de l'Horloge Atomique [LHA] du CNRS, Université
de Paris-Sud, Orsay (C. AUDOIN).

Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences [LPTF], Paris
(M. GRANVEAUD).

Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères [LSRH], Neuchâtel
(J. BONANOMI).

National Bureau of Standards [NBS], Boulder (D. W. ALLAN).

National Institute of Metrology [NIM], Beijing (MA FENGMING).
National Physical Laboratory [NPL], Teddington (O. C. JONES).
National Research Council [NRC], Ottawa (R. J. DOUGLAS).
Observatoire Cantonal de Neuchâtel, Neuchâtel (J. BONANOMI).
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig
(K. DORENWENDT).
Royal Greenwich Observatory [RGO], Hailsham
(J. D. H. PILKINGTON).
U.S. Naval Observatory [USNO], Washington (G. M. R. WINKLER).
Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (R. KAARLS).

Invited guests :

Academia Sinica, Beijing (PAN Xiaopei).
Office Fédéral de Métrologie [OFMET], Wabern (J. BONANOMI).
Technische Universität [TUG], Graz (D. KIRCHNER).
Tokyo Astronomical Observatory [TAO] (M.-K. FUJIMOTO).
P. PAQUET, Directing Board of the BIH.
H. F. FLIEGEL, J. BUISSON, W. JONES, Global Positioning System.

Also attending the meeting : J. TERRIEN, director emeritus of the
BIPM ; T. J. QUINN, deputy-director of the BIPM ; J. AZOUBIB
(BIPM) ; W. LEWANDOWSKI (BIPM).

Excused :

National Research Laboratory of Metrology, Ibaraki ; Radio
Research Laboratories, Tokyo.

Absent :

Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques, Mos-
cow * ; National Physical Laboratory of India, New Delhi.

After the welcome of Mr. Giacomo, director of the BIPM, and
of Mr. Kovalevsky, president of the CCDS, the meeting is opened.

With the approval of the Consultative Committee, the president
nominates as rapporteur Mr. Granveaud, who will be helped by the
members of the BIH. The provisional agenda is modified as follows :
items 4 and 6 will follow item 2.

1. Progress in atomic frequency standards and clocks

The president asks the representatives of the laboratories to indicate
the work accomplished, or in development, since 1980, date of the
previous CCDS meeting.

* A. Oboukhov, V. Tatarenkov, Y. Domnin (VNIIFTRI), staying at the BIPM for a
laser comparison, attended part of the meeting as observers.

Mr. Audoin summarizes the results obtained in the Laboratoire de l'Horloge Atomique (LHA) in three domains (CCDS/85-7). After recalling the original researches of Kastler on optical pumping, and those of Mr. Arditi, Mr. Audoin indicates that the detailed study of the application of optical pumping and optical detection to a caesium-beam clock has been undertaken at the LHA. A major experimental result is that it is possible to transfer, with an excellent efficiency, the population of the 16 hyperfine sub-levels of the ground state of the caesium atom, either to the level $F = 3$, $m_F = 0$, or to the level $F = 4$, $m_F = 0$, using two lasers. The LHA has undertaken systematic studies, in order to realize caesium atomic-beam standards, employing optical pumping.

The second domain of activity refers to hydrogen masers. The LHA is completing three active hydrogen masers, two of them being destined for radio-astronomers. The conditions of an optimum system of automatic tuning of the resonant cavity have been specified ; in particular, the short-term stability is not affected. A theoretical comparison of stabilities of active and passive hydrogen masers has been made ; it appears that the stability limit is not reached with the passive masers, in contrast with the active masers.

Theoretical and experimental studies have led to the realization of a frequency standard using $^{199}\text{Hg}^+$ ions. The light shift is smaller than 5×10^{-12} . The second-order Doppler effect can be precisely determined. On the other hand, Mg^+ ions, confined in a Penning trap, have been cooled to 1 K.

Mr. Granveaud describes the work accomplished at the Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences (LPTF) (document CCDS/85-7). In 1982, the Bureau National de Métrologie (BNM) and the LPTF jointly decided to study and realize a caesium primary standard with optical pumping ; the study is being made in cooperation with the LHA, where the first results are most promising. The goal of the LPTF is to have a standard of high accuracy such as those of the NBS, NRC, PTB and RRL. The first interesting results are expected for 1988. At present, the studies are oriented on laser diodes (stabilization, spectral purity, reliability). There is a serious difficulty in obtaining monomode laser diodes, which are presently made in Japan only. However, Mr. Audoin states that, besides the monomode laser diode, it is possible to obtain the right wavelength from multimode laser diodes, with an external cavity. The overall design of the caesium standard prototype is completed and the first elements should be assembled and tested in July 1985. In addition to development of the caesium standard, which is the main applied research conducted at the LPTF, work on the measurement and characterization of laser frequencies is going on. The most important results refer to CO_2 lasers, stabilized

by saturated absorption in OsO_4 : the uncertainty of the frequency measurements was reduced to 1.5×10^{12} ; a stability of a few parts in 10^{14} over 1 to 100 s has been obtained. The measurement of the frequency of a He-Ne (CH_4) laser of the BIPM (BICH4.3) has given, in 1983, a result in good agreement with the value announced by the USSR team. The LPTF pursues the improvement of the chain of frequency synthesis; one of the long-term goals is to perform frequency measurements in the visible, starting from measurements in the 30 THz region. It is also intended, in cooperation with the Institut National de Métrologie (France), to measure the frequency and the wavelength of a He-Ne (CH_4) laser.

The LPTF is developing an independent atomic time scale, which shows a stability of a few parts in 10^{14} with respect to the BIH scale, over a 10-day average time. This scale, which is not steered in frequency, has an accuracy of a few parts in 10^{13} .

Mr. Benavente Sierra indicates that the activity of the time service of the Instituto y Observatorio de Marina has led to an improvement of the local time scale, in particular by a better control of the operating conditions of the clocks. A GPS time receiver will be available in the near future which will improve time comparisons. The institute will also participate in the LASSO experiment (clock comparisons by laser ranging on geostationary satellite).

Mr. Godone presents the researches made at the IEN (CCDS/85-10). The work started by Mr. Strumia 12 years ago on a magnesium beam standard continues. The phase-locking of a carcinotron to a very pure 5 MHz quartz oscillator has allowed one to obtain a 600 GHz signal suitable for observing the transition $^3\text{P}_0 - ^3\text{P}_1$ of ^{24}Mg , with a good signal-to-noise ratio. The latter has been improved by introducing in the interrogation region an open resonator. The stability obtained over intervals of τ from 0.01 s to 100 s is $\sigma_y(\tau) = 5 \times 10^{-10} \tau^{-1/2}$. The uncertainty limit is about 10^{-13} ; however, atom cooling should enable one to reach 10^{-14} . The work in progress should increase the difference of population of levels $^3\text{P}_0$ and $^3\text{P}_1$, by optical pumping.

Work has also been done in the field of caesium beam standards aiming at a better understanding of the limitations of existing standards and at proposing improvements. A study has shown that the Rabi tail-pulling effect was probably the most important cause of inaccuracy and long-term instability in short tubes. The theory has been confirmed by experiment.

The IEN is also working on the realization of a frequency synthesis chain in order to measure the frequency of CO_2 (OsO_4) lasers.

The work at the NBS is presented by Mr. Allan (document CCDS/85-15). The operation of the standard NBS-6 in August and October 1984

has given two estimates of the TAI frequency with respect to NBS-6 :
— 5.4×10^{-14} and — 2.5×10^{-14} respectively. The 1σ uncertainty is
 8.6×10^{-14} . The work of de Marchi on the Rabi tail-pulling (a few
 10^{-14}) has been taken into account. The insertion of these values in
the accuracy algorithm of the NBS shows that the TAI frequency is
lower than the frequency of the NBS caesium standard (after correction)
by 2.3×10^{-14} , with an uncertainty of 5.5×10^{-14} in October 1984.
This result agrees with that of PTB-CS1 to a few parts in 10^{14} .

The NBS pursues the study of an optically-pumped caesium standard
(NBS-7), in the framework of a military project, and with the cooperation
of industry. The goal is an uncertainty of 10^{-14} in 1988. The standard
will operate as a clock, with semi-automatic calibration and simultaneous
counterpropagating atom beams for control of the cavity phase shift.
Mr. Allan indicates that the problem of laser diodes is being solved.
On the other hand, the light shift is, according to recent theoretical
results, five times smaller than has been previously announced. The
relatively high atom velocity will lead to a lowering of the quality
factor Q ; this puts a demand on the electronics.

The storage of ions in a trap (radiofrequency or Penning), cooled
by laser irradiation, offers great advantages for the realization of
frequency standards. The NBS has obtained results with ${}^9\text{Be}^+$ ions :
uncertainty of 9.4×10^{-14} , stability $1.5 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ (τ in seconds).
Tests have been made with ${}^{201}\text{Hg}^+$ ions stored in a Penning trap. The
study of an atomic clock with Hg^+ ions is quite interesting for the
future.

The NBS has developed passive hydrogen masers of reduced size
($63 \times 45 \times 27$ cm). Over intervals of τ from 1 second to 1 day, their
stability is better than or equal to $2 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$; the frequency drift
is smaller than 3×10^{-16} per day. Some difficulties due to the electronics
appeared in the first models, giving rise to frequency steps ; these have
now been resolved. The firm EFRATOM builds NBS-type hydrogen
masers with some improvements ; some will be purchased by the USNO.

The work at the USNO is presented by Mr. Winkler ; it is concerned
mainly with time-scales : automation of the computation algorithm,
reliability of the results. Since September 1984 the USNO has used two
hydrogen masers of the Smithsonian Astronomical Observatory, inter-
changeable, as master clocks ; the two masers are intercompared every
hour and phase-servoed to 10 ps. The drift of these standards is
 3×10^{-15} per day. Details concerning the use of these masers are given

in a paper presented to the Precise Time and Time Interval Applications and Planning Meeting (PTTI) in 1984. The USNO will soon have two prototypes of Hg⁺-ion clocks, built by Hewlett-Packard; these clocks have a very high Q ($> 10^{12}$) and a stability better than 10^{-14} over a few days. In the present state of the art it is necessary, however, to change the bulb every 3 to 6 months.

To a question of Mr. Douglas, asking whether the readings of the hydrogen clocks are sent to the BIH, Mr. Winkler answers that the USNO masers are intentionally adjusted in frequency, which makes it difficult for them to contribute to TAI. More generally, Mr. Winkler would not recommend the use of such devices by the BIH. Mr. Guinot mentions that the BIH receives some data from hydrogen masers, but over time spans which are generally not long enough.

Mr. Buisson, from the Naval Research Laboratory, indicates that, in the framework of the GPS programme, about ten compact hydrogen masers are under test, in order to evaluate their reliability and their stability: the latter is of the order of 10^{-14} per day.

Next, Mr. Douglas presents the work carried out at the NRC (document CCDS/85-8). He mentions first that the NRC pursues researches in the domain of optical frequency standards. His laboratory has operated as a clock its standard CsV (uncertainty 5×10^{-14}) since 1975, and the three standards CsVI (uncertainty 7×10^{-14}) since 1979; their performances, as primary standards, are regularly evaluated. In 1984, the CsV had to be stopped for the refilling of its caesium oven. The time scale of this instrument was extrapolated during the interruption, using the CsVI's as a memory. Significant progress has been made at the NRC in the measurement of the C-field, by use of the microwave resonance frequencies of transitions $(4, -1) \leftrightarrow (3, -1)$ and $(4, 1) \leftrightarrow (3, 1)$; these measurements are now semi-automatic using a computer. The use of this method with CsV led to a frequency correction of less than 1×10^{-14} . On the other hand, a general solution for evaluating the second-order Doppler effect (which can be used for all devices using a Ramsey cavity) has been developed. The method enables one to evaluate this effect with an uncertainty of 10^{-15} ; the application to CsV gives a frequency change of 1.7×10^{-14} .

Mr. Douglas recalls the theoretical studies of the NBS on the frequency correction due to black-body radiation: it reaches 1.6×10^{-14} for a caesium clock. The president estimates that a discussion on this subject will be necessary after completion of the laboratory reports. The NRC has undertaken the study of an optically-pumped caesium standard; this study was delayed due to difficulties concerning the laser diodes. As for the hydrogen masers, the NRC has had two of these

devices since 1967, allowing, after some improvements, frequency comparisons to 2×10^{-14} over one day. The frequency drifts of these masers are -3.9×10^{-12} over 4.5 years and -6.8×10^{-12} over 10 years; the frequency drift due to the wall-shift effect is estimated to be 8×10^{-16} per day. Two new masers, with improved stability, are under construction.

For time comparisons, the NRC has had a GPS receiver since July 1984. On the other hand, the use of the Mitrex modem will permit high-precision time transfers with the NBS and the USNO, through telecommunication satellites.

Mr. Douglas mentions the interest of the NRC in the slowing down of caesium atoms. The project of a clock with a caesium fountain, with an accuracy of 10^{-16} , is mentioned and brings questions from Mr. Bonanomi and Mr. McA. Steele.

Mr. Allan says that it is important to know when the NRC standards can be used as primary references for frequency; he also emphasizes that the frequencies of the primary standards of the NRC and NBS differ sometimes by more than one standard deviation.

Mr. Douglas draws attention to several difficulties solved at the NRC: measurement of the C-field on the CsVI's, electronics of CsV, temperature control (to 0.2°C).

The report on time and frequency activities at the PTB is presented by Mr. Dorenwendt. The primary clock CS1 is the basis of the time scales at the PTB. It was stopped for 14 days at the end of 1981. The correction resulting from the cavity phase shift has been modified in 1980: since that date, the correction is determined by beam-reversal every 5 weeks; an uncertainty of 2×10^{-14} accompanies this operation. However, for n reversals, the uncertainty is divided by \sqrt{n} . With the help of an experimental caesium standard (CSX) the main parts of which are identical to that of CS1, the PTB has studied the phase gradient of the cavity. It appears that a lack of precision of 0.3 mm in the beam reversal introduces an uncertainty of 3×10^{-14} ; the same uncertainty can be attributed to CS1 (hypothesis). The influence of Majorana transitions was studied on CSX by introducing known inhomogeneities in the magnetic field. Various configurations have been tested. The work for a full understanding of these phenomena continues.

The PTB is setting up three new primary standards with double beam (CS2, CS3 and CS4) on the model of CS1. The standard CS2 is almost completed. The first measurements show an excellent agreement with CS1. In the future, it is intended to study an optically-pumped caesium standard, using CSX. On the other hand, the slowing of caesium atoms will be studied on CS2, CS3, and CS4.

For time comparisons the PTB has a GPS receiver. Mr. Dorenwendt

says that the introduction of GPS has not removed the seasonal variations, for instance between the time scales of the PTB and USNO.

Mr. Guinot mentions that the agreement to a few parts in 10^{14} which existed prior to 1984 between the standards CsV and CS1, has strongly deteriorated in 1984 : the frequency difference reached 2×10^{-13} ; although it is now much less. From the PTB side, there are no explanations for this temporary discrepancy. For the NRC, it appears to be linked with unexplained noise and the change of electronics.

Mr. Kirchner states that, at the Austrian laboratory TUG, the work deals essentially with time comparisons by satellites (document CCDS/85-16) ; the TUG has participated in highly precise comparisons between European laboratories, using the television satellite OTS-2. A GPS time receiver has been operating at TUG since the end of 1982. The results show the persistence of seasonal variations. The TUG will participate in the LASSO experiment and in experiments with the communication satellites ECS and Intelsat.

The activities at the ASMW laboratory are presented by Mr. Kalau (document CCDS/85-9). A laboratory caesium standard has been built and has been used for various experiments ; a second standard, with beam reversal, is under construction. The first tests are expected for 1987.

An atomic time scale TA(DDR) is computed in the German Democratic Republic ; it is linked to TAI by the LORAN-C. The DDR laboratories have expressed their interest in the LASSO experiment.

Two Chinese organizations have sent representatives. Mr. Ma Fengming represents the NIM ; this laboratory has one laboratory caesium standard, with an accuracy of 5×10^{-13} , 7 industrial caesium standards and 2 hydrogen masers. The time comparisons are made by LORAN-C and by television (inside China). The laboratory is responsible for the dissemination of a time code by television. Studies are under way for improving the performances of the laboratory caesium standard ; a new standard is being considered.

Mr. Pan Xiaopei is designated by the Academia Sinica for representing all the Chinese observatories. He mentions the present possibilities of the Shaanxi Astronomical Observatory (CSAO), which has 3 hydrogen masers and 6 industrial caesium standards. Improvements have been brought to the hydrogen masers for the stabilization of the cavity temperature ; the stability reaches 1 to 2×10^{-14} . The observatory is responsible for the dissemination of time signals in HF and LF. A cooperation between the Chinese institutes for time and frequency is developing, in order to establish a national atomic time scale.

The Office Fédéral de Métrologie (Switzerland) is represented by Mr. Bonanomi. About 12 industrial caesium standards participate in TAI; the time comparisons use LORAN-C and television, their precision being of the order of 50 ns, which is estimated as sufficient for the present needs. Mr. Bonanomi mentions that a Swiss firm participates in the development of caesium frequency standards and hydrogen masers.

Mr. Pilkington indicates that a set of industrial caesium standards has contributed to the scale TA(RGO) of the Royal Greenwich Observatory since 1966. It appears that, in view of the missions of the Science and Engineering Research Council, parent organization of the Observatory, it will not be possible to continue to maintain an independent atomic time scale for long at the RGO. The needs of the astronomers, especially for laser ranging, are at the microsecond level.

Mr. Jones, NPL representative, presents the activities of this laboratory (CCDS/85-14). The results expected from the laboratory standard NPL III have not been obtained. A caesium standard with optical pumping is under construction; results have been obtained on the stabilization of laser diodes at a wavelength of 852.1 nm. Preliminary experiments have been carried out on the storage of Mg^+ ions.

The general idea of a national time scale in Great Britain was considered some years ago. Several attempts to realize it have been fruitless. At present, the NBS algorithm, which uses a Kalman filter, is under testing. The problem of the link between Teddington (NPL) and Herstmonceux (RGO) will be solved by the use of GPS time receivers.

Mr. Jones mentions also that the NPL works in the domain of optical frequency standards.

The activities of the Japanese laboratories for time and frequency are briefly summarized by Mr. Fujimoto, representative of the Tokyo Astronomical Observatory (TAO) (documents CCDS/85-6, -11, -12). Primary caesium standards are developed at the RRL and NRLM. At the RRL, optical pumping is being considered. This laboratory has constructed hydrogen masers and has studied a superconducting cavity oscillator. It has also constructed a GPS time receiver and accomplished various experiments of time comparisons: use of GMS satellite, of the CS2 telecommunication satellite, of VLBI. The TAO is particularly active in GPS time comparisons.

Mr. Kaarls reports that the work performed at the time and frequency laboratory of the VSL is devoted to the time comparisons (document CCDS/85-18). Several techniques have been tested: VLBI, with little success up to now; satellite OTS-2, during 3 years, which

allowed a precision of 20 ns in Europe ; GPS, in cooperation with the NBS (receivers of the NBS type are under construction); LASSO, in which the VSL will participate in 1986; use of a Hartl modem, with telecommunication satellites of the Intelsat type. This last experiment should take place by the end of 1985.

After these reports, the president comes back to the question raised by the NRC about the black-body radiation. Should one correct the data of caesium standards to take this effect into account? What is the amount of the correction? Should the definition of the second be modified? A discussion follows. Mr. Douglas observes that the NBS and the RRL apply the correction; he emphasizes that the effect cannot be measured. As for himself, he believes that the correction must be made, but that the CCDS should adopt a position.

Mr. Winkler states that the effect was unknown at the time of the definition of the second. Mr. Audoin thinks that, while he accepts the theory, this theory is based on previous work and that it needs confirmation by experiment.

Mr. Godone states that computations similar to those of the NBS have been made at the IEN for magnesium; the precision with which the transitions are known plays an important role and his conclusion is that we do not know the true value of the correction due to black-body radiation, but only an upper limit. A convergence appears between the various persons who intervened, MM. Allan, Audoin, Douglas, Godone, Giacomo, Guinot, Winkler and Dorenwendt. On one hand, they agree that the definition of the second should not be modified and that it should be remembered that this definition corresponds to caesium atoms which are not perturbed. On the other hand, one should encourage theoretical studies and experimental measurement. The president decides to have a CCDS recommendation on this subject, which should be prepared by a Working Party consisting of MM. Allan, Bonanomi, Douglas, Giacomo and Winkler. The project of recommendation is discussed later and becomes Recommendation S2 (*see* p. S 58).

2. Time-comparison methods

The president invites Mr. Guinot to present the general situation for time comparisons.

During the last 15 years, LORAN-C has been largely used for the long-distance time comparisons, in particular for the TAI computation. The operational use of satellite methods is recent. The capabilities of the Global Positioning System (GPS) are well known; in the common view mode, the system leads to an accuracy of the order of 10 ns. The

use of GPS extends now to many time and frequency laboratories, in particular thanks to the efforts of the NBS. Two immediate consequences in the TAI computation were, first, the cancellation of some LORAN-C links (in particular, the transatlantic link), then, the introduction of the readings of clocks in Asia and Australia. However, in practice, it appears that the 10 ns accuracy is not always reached, for various reasons: the coordinates of the antenna of the GPS receiver are not sufficiently well known, the shape of the pulses of the laboratory reference is not satisfactory, the delay of the link between the receiver and the master clock is wrong, the instrumental delays of the various receivers are not expressed in a homogeneous system. A harmonization is needed. On the other hand, the voluntary degradation of the system for civil users is a matter of concern for the time and frequency community.

Invited by the president of the CCDS, MM. Jones, Fliegel and Buisson intervene in turn on the GPS. The GPS programme, which started in 1973, is a programme common to several American administrations. The development of the space segment is pursued as follows: in 1988 a two-dimension positioning will be possible all over the globe and in 1989 the three-dimension positioning will be available. At present 6 satellites can be used; another one will be launched in August 1985, thus completing Block I. Information on the satellites (availability, functioning, etc.) can be obtained by telephone, (805) 866-5948, or by the Mark 3 system of General Electric. The phase of production satellites will begin in October 1986, with the launch of the first satellite of Block II.

The 18 satellites of Block II (there are 3 spare satellites) will be positioned in 6 planes with an inclination of 55°. Planes A and C are presently filled by the satellites of Block I. Planes D and E will then be filled, followed by F and B. The realization of the satellite constellation depends on several factors, such as the schedule of the space shuttle, NASA's plans, requests of the tracking stations and the programme of the crews. Operational control is established at the Master Control Station of Vandenberg AFB; it will be moved in October 1985 to Colorado Springs and located at the Consolidated Space Operation Center. It is envisaged to introduce hydrogen masers into the GPS system, for testing, first at the operational control in 1986, then in the last satellites of Block II. Each satellite is at present equipped with caesium and rubidium standards. The American policy on the use of GPS is summarized as follows:

- the access to C/A code will be free of charge;
- the Standard Positioning Service (SPS) with the C/A code, will

be available to all users with uncertainties (2 standard deviations) of 100 m for the horizontal position, 156 m for the vertical, 0.2 m/s for the speed and 250 ns for the GPS time.

The implementation of the GPS will have consequences for the LORAN-C chains starting with 1992; according to Mr. Winkler, the survival of some chains (the Mediterranean chain, for instance) could be negotiated between the USA and interested countries.

Coming back to time comparisons, Mr. Buisson describes the first synchronization mission by transportation of a GPS receiver (document CCDS/85-17). In December 1984, a team of the Naval Research Laboratory (NRL) carried a receiver, model 502B of Stanford Telecommunications Inc., to the USNO, then to 5 laboratories, 4 of them being European laboratories, equipped with GPS receivers. The initial comparison made at the USNO was in agreement with the results of the USNO receiver (mean = 1 ns, $\sigma = 8$ ns). Upon return to the USNO, a small difference was observed and confirmed by repeated measurements: —9, then —7.8, then —10.1 ns. On the other hand, a difference of 30 ns was observed for satellite 11, with respect to the other satellites, for the European laboratories equipped with NBS receivers. It has been shown that an error affected the data-processing of these receivers. Another result of this campaign was the determination of the antenna coordinates. It appears that the conversion between the systems WGS 5-72 and NWL-9D has sometimes been wrongly made. To conclude, this first transportation of a GPS receiver was quite fruitful, leading at a lower cost to a better accuracy than the clock transportations. Mr. Buisson recommends a transportation once a year. Mr. Winkler says that the USNO intends to carry a GPS receiver from Trimble (now sold by Frequency and Time Systems), with a clock in a first stage. He suggests that interested laboratories install a permanent antenna and antenna cable. He gives a document showing that the 10 ns difference reported previously was due to a change of location of the receiver, with a wrong treatment of the delays. He gives some information on the relation of GPS time to UTC: the offset is due to the leap seconds (which are not applied to GPS time) and to the steering of GPS time with respect to UTC(USNO), the difference being kept to less than 1 μ s; this difference is given by the navigation message, with an accuracy of about 20 ns. Mr. Kirchner describes some results of the NRL calibration campaign. He shows that, depending on the smoothing which is adopted (date, duration), some differences of up to 50 ns may appear.

The various aspects of the GPS time comparisons are discussed. MM. Granveaud and Dorenwendt emphasize that biases of a few 10 ns

are sometimes observed between the measurements made by one or several satellites. These differences are well known, answers Mr. Winkler ; their amount depends on the relative position satellite-laboratory. For Mr. Allan, this defect is due to the youth of the system and Mr. Buisson says that this subject will be considered in a coming meeting. Mr. Guinot notes that it is necessary to distinguish between a measurement at 0 h UTC, for instance, and an average referred to 0 h UTC ; on the other hand, the results of the time comparisons depend on the computing centres. The importance of the quality of the laboratory reference pulses is emphasized by Mr. Winkler. He stresses, supported by MM. Guinot and Pilkington, the need of having in every laboratory a reference time scale UTC(i), which is physically and immediately available. Mr. Pilkington draws attention, however, to the need of ensuring that any microstepper used would not degrade the performance of the receiver. For Mr. Allan, an agreement should be reached on the manner in which to use the GPS data ; the NBS has developed a program of common views tracking between laboratories, which is fully satisfactory. The NBS is ready to pass this responsibility on to the BIH. Concerning the degradation of the GPS signals, it can be made by a degradation of the apparent stability of the satellite clock and by introducing biases in the ephemerides. The possibility of obtaining good ephemerides with a delay is under study. Mr. Granveaud raises the question of the availability of GPS receivers in Eastern countries (COMECON countries).

The president distinguishes three major points to be discussed : first, the availability of the GPS and the situation of this system with respect to the other possibilities for comparisons ; then, the development of the GPS time comparisons, algorithms, equipment, data exchanges ; finally, technical matters such as the dates of the measurements, their duration.

Is the GPS available, i.e. can everyone use it ? For Mr. Kalau, this is not the case for the COMECON countries. Mr. Fliegel reminds the Committee that it is not a new problem and that it was already raised for the LORAN ; he distinguishes between the availability of the equipment and that of the accuracy. It is clear that the GPS signals are available to everyone, as well as relations for working in the WGS 72 system. Mr. Winkler says that there should not be a unique method of time comparisons and that it is necessary, as already done by several laboratories, to try other means than the GPS. The Hartl modem should give a precision of a few nanoseconds, in two-way mode, between the NBS, the NRC and the USNO ; this possibility is also considered by the European laboratories NPL, TUG and VSL. Mr. Jones suggests that, for the common interest of users, information on the experiments be exchanged. The CCDS decides to prepare a

recommendation in favour of new methods of time comparisons : it will be the Recommendation S3 (*see* p. S 59).

In order to develop the GPS time comparisons, the various parameters such as antenna coordinates, delays, etc. should be published. Mr. Guinot accepts that the BIH collect data and disseminate them. In the future, the 18 GPS satellites will offer numerous possibilities ; an agreement on the choice of the time links will be needed. Also, the processing of the data should be divided between the laboratories and the BIH. For the data exchange, the General Electric Mark 3 system will be used.

The president then raises the question of the time intervals used by the BIH : the results are given at 10-day intervals ; 2 months are used to estimate the rates of the clocks. Mr. Guinot notes that the seasonal effects remain, in spite of the use of GPS. He does not think that it is, at present, necessary to have more frequent data (daily, for instance, instead of once every 10 days). However, on account of the quality of the GPS time comparisons, it is envisaged to reduce to 1 month the duration for estimating the rate of the clocks.

3. Report on the activities of the BIH

Mr. Guinot, director of the BIH, discusses his activity report to the CCDS (document CCDS/85-4). The cooperation of the BIH with the 39 participating laboratories is complete ; among these laboratories, 10 establish a local independent time scale. The TAI is established in three steps since 1977 : computation of the scale EAL, with a stability algorithm ALGOS ; estimation of the duration of the scale interval of EAL on the basis of the data of the primary standards ; then, correction to EAL so that the resulting scale TAI shall have a scale interval close to the SI second.

The number of participating clocks increases every year ; in January-February 1985 it reached 150, among them being 5 laboratory primary clocks and 2 hydrogen masers. The time links are non-redundant and the GPS has become the essential means of comparison. The maximum weight of the clocks in the TAI computations was increased in 1981 ; it is presently reached by 35 % of the clocks, which seems reasonable. On the other hand, a graph on the lifetime of the clocks entering TAI shows that 50 % of the clocks had less than 17 months of uninterrupted functioning on the 1st of January 1985.

The duration of the scale interval of EAL is estimated with the

primary standards of the NBS, NRC, PTB and RRL. The filter described in *Metrologia* (1977) is used again since 1984. The difficulties of the estimation are due to the non-random variations observed between standards and the existence of seasonal variations of EAL (about $\pm 5 \times 10^{-14}$).

The steering of TAI is made by frequency steps of 2×10^{-14} . However, since the frequency difference between the NRC-CsV and PTB-CS1 has reached 2×10^{-13} in 1984, the steering has been avoided. The uncertainty of the scale unit of TAI is of the order of $\pm 1 \times 10^{-13}$.

The acceleration of the Earth's rotation is such that a positive leap second is needed once every two years.

The use of GPS time comparisons in the TAI computation is an important advance ; at the beginning of 1985, 9 laboratories are linked by GPS, and their clocks contribute to 50 % of the total weight for TAI. The introduction of the GPS has led to readjustments of the UTC-UTC(i)'s. Some defects, previously mentioned, still limit the accuracy of the results. The BIH wishes to thank the NBS for the loan of a receiver and the coordination of the common views tracking, the NRL for the calibration campaign, the USNO for the use of Mark 3 of General Electric, and Stanford Telecommunications Inc. for the loan of a receiver.

Among the studies made at the BIH, one should mention the prediction of the rates of the clocks and the weighting procedure. The seasonal variations shown by some of the industrial caesium clocks are not yet fully explained and they impede the improvement of the prediction. As regards the weights, it appears that the good clocks are underestimated for two-month averaging times, but this effect tends to vanish for longer times. Taking this observation into account, and also the systematic frequency variations, it does not seem appropriate to favour a smaller number of clocks by raising the maximum weight.

The possible causes of seasonal variations are discussed. Mr. Allan emphasizes the importance of temperature and humidity gradients. Mr. Quinn makes a comparison with electric standards where changes of time constants and electric properties are due to the absorption of moisture. Mr. Dorenwendt says that all the PTB caesium standards show annual variations but that the correlation with humidity is not evident. Maybe the data of Australian clocks will clarify this problem, as suggested by Mr. Winkler. Mr. Granveaud proposes to use the data of primary clocks as a reference, in order to determine the seasonal variations. For his part, Mr. Allan thinks that a statistical approach is possible. The independence of the contributions to TAI is then considered. It is clear that some laboratories can adjust their clocks on GPS time and thus destroy the necessary independence. Such a drawback can be avoided by requesting rapid contributions. Mr. Douglas suggests

that the BIH attribute delays to each laboratory, under the form of a pseudo-random number series, to be added to the measured time differences.

4. Organization of the work on TAI and UTC

Mr. Guinot comments on the document CCDS/85-2 « Transfer of the activities on TAI from the Paris Observatory to the BIPM — Key dates ». He recounts briefly the BIH history since 1911. Contrary to the initial conception, the BIH did not become an intergovernmental body; it was organized as a scientific service, international by its mission but almost entirely supported by the Paris Observatory. Since 1971, when TAI was recognized by the CGPM, the subject of TAI activity at BIPM has often been brought up. In 1984, when it appeared that the Paris Observatory could not guarantee the maintenance of a sufficient staff for TAI, a memorandum on the transfer of this activity to the BIPM was prepared by the president of the Observatory and the director of the BIPM. This memorandum has been approved by the administration council of the Observatory and by the CIPM. The scientific parent unions of the BIH, the IAU, IUGG and URSI have made no objection to the principle of CIPM taking over the responsibility for TAI. However, while they accept that the work on TAI be accomplished at the BIPM starting from 1985, they ask that no modification be brought to the structure of the BIH before they can consider the matter at their next general assembly. TAI has now in fact been established at the BIPM, since April 1985, by a team consisting of Mr. Guinot, director of the BIH, head of the « Time » section (the « Rotation of the Earth » section remaining at the Paris Observatory, under the responsibility of Mrs. M. Feissel), MM. Azoubib and Lewandowski, physicists, and Miss Konaté, technician.

Mr. Guinot, after having consulted many people, in particular the members of the IAU Executive Committee, has given to the presidents of the IAU commissions concerned a draft resolution on the transfer to the CIPM of the responsibility for TAI, which will be examined at the IAU General Assembly in November 1985*. URSI has already recommended the transfer. The General Assembly of IUGG will take place in August 1987. The draft recommendation has not been distributed to the CCDS, but it is read by Mr. Markowitz. Mr. Pâquet confirms that there are no major objections from the IAU to the transfer. He mentions that, in 1987, a new service for the rotation of the Earth will

* In November 1985, the IAU adopted this draft which became Resolution B1.

be created, as an output of the MERIT program. He thinks that the separation of the BIH into two parts should give more freedom for the establishment of this new service. However, he fears that the situation of having TAI at the BIPM may make the relationship with the laboratories more difficult. Mr. Winkler explains that, as a matter of fact, the correspondence with the intergovernmental bodies would, in the USA, go through an official, and somewhat slow, channel. But — and this is confirmed by Mr. Giacomo — that does not apply to the exchanges for current work.

In Mr. Guinot's draft, the decision to introduce the leap seconds of UTC and their announcement remain the responsibility of the service of the Rotation of the Earth. Mr. McA. Steele finds it strange that this decision comes from a body other than BIPM. Mr. Guinot says that it was also his initial feeling, especially on account of the legal aspect of UTC; however, the draft he has submitted does not correspond to his own views alone. It must also be acceptable to the astronomers and the geodesists and he does not see any serious inconvenience to the mode of operation of UTC which is proposed. The BIPM will publish, as done previously by the BIH, the values of the UTC-UTC(lab) for the master clocks of the various laboratories and will re-transmit, with proper reference, the information on the introduction of leap seconds. To a question of Mr. Markowitz, he replies that he has no intention of raising this point again at the discussions of the IAU General Assembly.

The draft proposal for the creation of a CCDS Working Group on the TAI (document CCDS/85-1) is then examined. Mr. Giacomo distributes the text that the CIPM has approved on this subject (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 52, 1984, p. 5). It appears difficult to Mr. Douglas to reconcile points 7, 4c and 2 of the proposal CCDS/85-1, for the laboratories operating primary standards. Mr. Granveaud proposes to add representatives of the laboratories to the members of the Working Group; he emphasizes the complications due to the fact that the Working Group should report to the CCDS. Mr. Dorenwendt asks who decides in case of significant difference between the laboratory primary standards; the answer is that the CCDS can consult a group of experts in this case. The president requests that the draft be corrected and that a new version be presented. This latter is again discussed. In answer to a question of Mr. Douglas, the president says that a consultation by correspondence would be organized in case of difficulty on TAI. The IAU representative will be invited to take the first presidency of the group. The corrected text becomes the Recommendation S1 (see p. S 56).

5. Statistical methods applied to the measurement of time

The president asks Mr. Allan to introduce the discussion. The significant improvement of the time and frequency comparisons — in frequency, a precision of 10^{-14} is obtained over 10 days — allows one to reduce the averaging times now in use. Mr. Allan believes that these new possibilities and their consequences should be carefully studied. For instance, the detection of seasonal effects should be facilitated by computing mean frequencies over one month instead of two, as previously done. He offers to the BIH the cooperation of the NBS for these statistical studies. He also mentions that his team is interested in the work on the millisecond pulsar. At the request of the president, Mr. Allan discusses a graph which shows the ability of various clocks, caesium and rubidium clocks, ms pulsars (i.e., the prediction error) to keep time, as a function of the lapse of time after an initial synchronization. The quality factor for the ms pulsar is very high, of the order of 10^{20} ; the frequency drift of the associated time scale can be modelled.

A short discussion follows. Mr. Winkler concludes that it is necessary to further improve the clocks and to have more laboratory standards, well intercompared.

6. Reports on meetings

Reports are given on the following meetings :

— IAU Symposium No. 114, Leningrad, 28-31 May 1985, on « Relativity in Celestial Mechanics and Astrometry » ;

— 39th Annual Frequency Control Symposium, Philadelphia, 29-31 May 1985.

The report on the IAU symposium is given by the president. There were about 140 attendees, half of them being from USSR. Unfortunately, about 10 scientists, almost all of them being French (among them was Mr. Guinot) could not participate because they could not get their entry visa for the USSR in time.

A first part of the symposium was dedicated to the study of dynamical effects in the framework of relativistic theories, with application in celestial mechanics, especially for the planetary motions. For these

motions, the basis is the numerical ephemeris DE 200 of the Jet Propulsion Laboratory (JPL), also taken as a reference for the analytical ephemerides of the Bureau des Longitudes. In a second part, the relativistic effects in astrometry — the deflection of light — have been considered. A discussion of the notion of reference system by T. Kukushima, M.-K. Fujimoto, H. Kinoshita and S. Aoki was particularly clear and permitted a settlement of the principles. Several papers dealt, in different ways, with the relativistic corrections needed in VLBI. A common paper which will summarize them could lead to a unification of the methods of computation of the differences of reception times, which is not a proper time as in the case of laser ranging, but depends on the coordinate systems.

The problem of time scales in the vicinity of the Earth was very thoroughly explained by MM. Allan and Ashby. However, their proposal that the symposium adopt the formalism of the corrections extending the TAI to the distance of the geostationary satellites, according to the CCDS and CCIR formulas, was not accepted. Further action, with better coordination, should be considered for the IAU General Assembly.

The present stage of our knowledge of the parameters describing the structure of space-time was given by C. M. Will. For the classical post-newtonian (PPN) parameters β and γ , their values are now known to a few parts in 10^3 and correspond to Einstein's theory. Discussions on the present and future determination of these parameters have shown that quite new and original methods must be derived to surpass the present precision and especially to observe directly the second-order effects. These effects have a primary importance in the regions of strong field (pulsars, etc.) currently studied in astrophysics. Several proposals were made in this direction (double interferometer on board satellites, presented by R. D. Reasenberg, optical or radio long-base interferometers on satellites).

To conclude, one of the goals of the symposium, which was to favour contacts between theoreticians of general relativity and the users of this theory, seems to have been reached. The theoreticians are now conscious of the real problems met in astrometry and the astronomers had the opportunity to better comprehend what lies behind « the relativistic corrections ».

Mr. Winkler reports on the 39th Frequency Control Symposium, which was attended by 600 people. One of the main topics was quartz oscillators, which were the subject of almost fifty papers. Many of these papers were devoted to the use of quartz as resonator. A session was

devoted to frequency stability. Two papers have been especially noted by Mr. Winkler : one by J. Barnes on the stability of a time scale using Kalman filtering, the other by J.J. Gagnepain defining the fractal dimension of noise, an approach based upon a book by B. Mandelbrot. A panel on the problem of noise did not bring anything new. Two papers were devoted to the GPS and several to atomic clocks : systematic effects in caesium clocks, hydrogen masers (especially compact masers for the GPS), superconducting cavity, two-photon clocks. The application of optical pumping to atomic standards was the subject of 4 papers and appears most promising, by opening the possibility of atomic resonances which could not be used up to now, on account of the difficulties of detection. It seems that the new generation of reference standards will be the optically-pumped caesium-beam standards. However, one can expect important advances in stability from devices using ion-storage, especially with the Hg^+ ion. From the latest results of the classical caesium standards, it is clear that beam reversal is essential to the evaluation of the standards and that the intercomparison of several standards permits one to discover abnormal frequency deviations.

7. The definition of the TAI in relativistic theories

The president, after having noted that the problem of time scales had not been thoroughly discussed at the IAU symposium No. 114, asks first Mr. Fujimoto to present the note he has prepared with H. Kinoshita, S. Aoki and T. Fukushima (document CCDS/85-5).

Mr. Fujimoto gives the relationship between the proper time of a clock and the barycentric and geocentric coordinate times, taking into account the PPN parameters. In the case of TAI, the post-newtonian terms are smaller than 10^{-18} in normalized frequency. As long as the clocks do not reach this accuracy, the discussion can be limited to the newtonian terms and no theoretical difficulties are met in defining the TAI. However, practical limitations are due to the uncertainties in the newtonian terms : realization of the geoid (1×10^{-18} is the gravitational shift corresponding to an altitude change of 1 cm), lunar-solar tides (a few parts in 10^{17}), irregularities of the Earth's rotation. Mr. Fujimoto

also mentions that the PPN terms can become a matter of concern in time comparisons by electromagnetic waves.

Then Mr. Allan briefly describes his joint paper with N. Ashby, presented at the IAU symposium No. 114: «Coordinate time in the vicinity of the Earth» (document CCDS/85-19). These authors also conclude that the definition of TAI is presently sufficient for clocks near the Earth. They give expressions for the relativistic corrections valid up to a distance of 50 000 km from the Earth, with an approximation of 10^{-14} or 1 ns. Mr. Allan mentions the study of pulsars, for which the best realization of a scale of coordinate time is needed, which requires the best algorithms and very accurate relativistic corrections.

In the discussion which follows, Mr. Allan recalls that in 1982 there was discovered at the Arecibo Observatory a pulsar with a period of 1.6 ms having a very high stability, the decrease of the period being of the order of 10^{-19} s.s⁻¹. However, one has to make sure that this pulsar does not exhibit sudden changes in period, as has happened in pulsars having longer periods.

Mr. Guinot had prepared a paper for the symposium No. 114 on a closely-related theme, which could not be presented because he could not get his visa (document CCDS/85-13). He draws attention to the fact that the IAU has not yet recognized the definition of TAI: at the 1982 General Assembly, Commissions 4 and 31 of the IAU refused to discuss the matter. The reason might be that many astronomers have written that TAI is a proper time. However, the link between TAI, geocentric coordinate time, and a barycentric coordinate time can be easily clarified, provided that one makes the distinction between TAI and a clock synchronized on TAI in the geocentric system. Nothing should prevent the IAU from recognizing the definition of TAI given by the CCDS and indicating how this definition can be used in its own domain of activity. Mr. Guinot had prepared a draft resolution to this effect.

Mr. Fujimoto, while being in agreement on the principles, believes that the draft resolution should be improved. Several persons deplore that the IAU has not yet accepted a definition which is found satisfactory and necessary elsewhere. It is suggested that MM. Fujimoto and Guinot seek an agreement on the terms of a resolution which should be submitted at the 1985 IAU General Assembly. Mr. Markowitz, IAU representative at the CCDS, will draw attention to this problem in his report.

8. Miscellaneous

Mr. Markowitz shows the results of his most recent researches on the relationship between the frequency of the atomic transition used

for the definition of the second and the ephemeris second. He confirms the good choice of the value adopted.

Mr. Guinot indicates that not all of the laboratories participating in TAI work have representatives on the CCDS. He would find it interesting to have a meeting of all the laboratory representatives. The idea is accepted by the CCDS; such a meeting should be associated with another meeting. Mr. Guinot thanks the committee and says that he will make the necessary contacts.

In closing the session, the president thanks the BIPM and the participants.

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

Working Group of the CCDS on the TAI

RECOMMENDATION S 1 (1985)

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

considering

that the establishment of International Atomic Time (TAI) is henceforth taken in charge by the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) and that it is envisaged that this activity shortly be placed entirely under the responsibility of the Comité International des Poids et Mesures (CIPM);

that the Scientific Unions and the International Organizations concerned with TAI should have the opportunity of assuring that in the long term the service of TAI meets their needs;

proposes

- 1 — that a Working Group of the CCDS on TAI be created;
- 2 — that this Working Group be composed of
 - a) a representative of each of the following organizations:
International Astronomical Union (IAU),
International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG),
International Union of Radio Science (URSI),
International Radio Consultative Committee (CCIR),
Comité International des Poids et Mesures (CIPM),

- b) the Director of BIPM,
 - c) the person in charge of TAI at BIPM ;
- 3 — that a representative of IAU, IUGG and URSI be invited in turn to take the Presidency of this Working Group, the period of each Presidency being five years * ;
- 4 — that the mandate of this Working Group be as follows :
- a) to examine the remarks and requirements expressed by the users of the service of TAI,
 - b) to prepare directives for the improvement of the service of TAI to be submitted for approval by the CCDS and then by the CIPM ;
- 5 — that the said mandate extend equally to Coordinated Universal Time UTC, in respect of its metrological qualities but not its definition nor its astronomical content ;
- 6 — that the Working Group work routinely by correspondence addressed to its President and that it meet, if possible annually, at the request of its President ;
- 7 — that the Working Group on the steering of TAI, established by the CCDS in 1977 (Recommendation S 1 (1977), *BIPM Com. Cons. Déf. Seconde*, 8, 1977) be abolished, the conditions to be met by steering and means to achieve them being defined by the CCDS, which can delegate this task to an *ad hoc* Working Group.

* At its meeting in October 1985 the CIPM has added : « and that the BIPM provide the permanent secretariat for the Working Group ».

Corrections needed for the realization of the second

RECOMMENDATION S 2 (1985)

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

recalls that

the definition of the second as it results from the decisions of the 13th Conférence Générale des Poids et Mesures implies that the caesium atom used as reference is at rest and unperturbed,

this implies, in particular, that in its practical realization, measurements must be corrected for velocity of the atoms with respect to the clock reference frame, for magnetic and electric fields, spin-exchange effects and for other possible perturbations,

and, in order to implement the necessary corrections,

recommends

1) that theoretical studies in order to establish models for all disturbing effects be developed ;

2) that experiments in order to identify these effects, to verify their theoretical interpretation and to evaluate the uncertainty of the corresponding correction be actively pursued.

High-precision time comparisons

RECOMMENDATION S 3 (1985)

The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

considering

that high-precision timing is rapidly becoming an essential part of modern telecommunications ;

that two-way satellite links allow international time comparisons at very high precision ;

that it appears possible to exchange pseudo-random noise timing signals simultaneously but without interference with other uses of the channel ;

that such pseudo-random noise techniques also allow high-precision ranging ;

recommends

that the responsible national and international bodies support experiments over telecommunications satellite links for the study of synchronization techniques by means of pseudo-random noise modulation within the framework of the international timing programs as part of the generation of International Atomic Time.

APPENDIX S 1

Working documents
submitted to the CCDS at its 10th Meeting
(*see* the list of documents on page S 26)

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

10^e session (1985)

| | Pages |
|--|------------|
| Notice sur les organes de la Convention du Mètre | v |
| Liste des membres. | vii |
| Ordre du jour. | x |
| Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par M. Granveaud. | S 1 |
| Progrès des étalons atomiques de fréquence et des horloges | 2 |
| Travaux réalisés depuis 1980 et travaux en cours dans les laboratoires ; question d'une correction due au rayonnement du corps noir ; corrections nécessaires pour la réalisation de la seconde. | 2 |
| Méthodes de comparaison de temps | 10 |
| Possibilités du Global Positioning System (GPS). | 10 |
| Rapport d'activité du BIH | 14 |
| Établissement du TAI ; problème des variations saisonnières de l'EAL. | 14 |
| Organisation des travaux sur le TAI et l'UTC. | 16 |
| Transfert des activités sur le TAI de l'Observatoire de Paris au BIPM ; situation actuelle ; création d'un Groupe de travail du CCDS sur le TAI | 16 |
| Méthodes statistiques appliquées à la mesure du temps | 18 |
| Compte rendu du Symposium de l'UAI « Relativity in Celestial Mechanics and Astrometry » et du 39 ^e Symposium « Frequency Control ». | 18 |
| Examen de la définition du TAI dans les théories relativistes | 20 |
| Relation entre temps propre d'une horloge et temps-coordonnées barycentrique et géocentrique ; problème de la reconnaissance par l'UAI de la définition du TAI donnée par le CCDS. | 20 |
| Questions diverses | 21 |
| Relation entre la fréquence de la transition atomique définissant la seconde et la seconde des éphémérides ; nécessité de réunir tous les responsables des laboratoires qui participent aux travaux du TAI, y compris ceux qui ne sont pas membres du CCDS. | 22 |
| Recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures : | |
| Recommandation S1 (1985) (Groupe de travail du CCDS sur le TAI). | 22 |

| | | |
|---|----|----|
| Recommandation S2 (1985) (Corrections nécessaires pour la réalisation de la seconde) | 24 | |
| Recommandation S3 (1985) (Comparaisons de temps de haute précision) | 25 | |
| Annexe | | |
| S 1. Documents de travail présentés à la 10 ^e session du CCDS | 26 | |
| Notice for the reader of the English version. Avertissement au lecteur de la version anglaise. | | 29 |
| Note on the organs of the Convention du Mètre | 31 | |
| Agenda | 34 | |
| Report to the Comité International des Poids et Mesures, by M. Granveaud | | 35 |
| Progress in atomic frequency standards and clocks | 36 | |
| Work accomplished since 1980 and in progress in the laboratories; should one correct the data of caesium standards to account for the black-body radiation? Corrections needed for the realization of the second. | 36 | |
| Time-comparison methods | 44 | |
| Capabilities of the Global Positioning System (GPS) | 44 | |
| Report on the activities of the BIH | 48 | |
| Establishment of TAI; seasonal annual variations of EAL; steering of TAI. | 48 | |
| Organization of the work on TAI and UTC | 50 | |
| Transfer of the activities on TAI from the Paris Observatory to the BIPM; present status; creation of a CCDS Working Group on TAI | 50 | |
| Statistical methods applied to the measurement of time | 52 | |
| Reports on IAU Symposium on Relativity in Celestial Mechanics and Astrometry and on the 39th Annual Frequency Control Symposium | 52 | |
| The definition of the TAI in relativistic theories | 54 | |
| Relationship between the proper time of a clock and the barycentric and geocentric coordinate times; the IAU has not yet recognized the definition of TAI given by the CCDS | 54 | |
| Miscellaneous | 55 | |
| Relationship between the frequency of the atomic transition used for the definition of the second and the ephemeris second; need of having a meeting of representatives of all laboratories participating in TAI including those that are not members of CCDS | 56 | |
| Recommendations submitted to the Comité International des Poids et Mesures : | | |
| Recommendation S1 (1985) (Working Group of the CCDS on the TAI) | 56 | |
| Recommendation S2 (1985) (Corrections needed for the realization of the second) | 58 | |
| Recommendation S3 (1985) (High-precision time comparisons) | 59 | |
| Appendix | | |
| S1. Working documents submitted to the CCDS at its 10th Meeting (see page S 26) | 60 | |

IMPRIMERIE DURAND

28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1986, n° 5232
ISBN 92-822-2093-1

ACHEVÉ D'IMPRIMER : FÉVRIER 1986

Imprimé en France

