

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE
SESSION DE 1977

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF

POUR

LA DÉFINITION DE LA SECONDE

8^e SESSION — 1977

(26-27 avril)



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES, France

Dépositaire: OFFILIB, 48 rue Gay-Lussac, F-75005 Paris

NOTICE HISTORIQUE

Les organes de la Convention du Mètre

Le Bureau International, le Comité International et la Conférence Générale des Poids et Mesures

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 au moins une fois tous les six 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 au moins une fois tous les deux 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.

Une trentaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International; ils font des recherches métrologiques ainsi que des mesures dont les résultats sont consignés dans des certificats portant sur des étalons des grandeurs ci-dessus. Le budget annuel du Bureau International est de l'ordre de 5 000 000 de francs-or, soit environ 2 000 000 de dollars U.S.

⁽¹⁾ Au 31 décembre 1977, quarante-cinq 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), Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Venezuela, Yougoslavie.

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 modifications à apporter aux définitions et aux valeurs des 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 (*Procès-Verbaux CIPM*, 31, 1963, p. 97). Chaque Comité Consultatif, dont la présidence est généralement confiée à un membre du Comité International, est composé d'un délégué 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 sept :

1. Le *Comité Consultatif d'Électricité* (CCE), créé en 1927.
2. Le *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie* (CCPR), nouveau nom donné en 1971 au *Comité Consultatif de Photométrie* (CCP) créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent (CCE) s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le *Comité Consultatif de Thermométrie* (CCT), créé en 1937.
4. Le *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre* (CCDM), créé en 1952.
5. Le *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde* (CCDS), créé en 1956.
6. Le *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants* (CEMRI), créé en 1958. En 1969, ce Comité Consultatif a institué quatre sections : Section I (Rayons X et γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α); cette dernière Section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II.
7. Le *Comité Consultatif des Unités* (CCU), créé en 1964.

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 rassemble les articles publiés dans des revues et ouvrages scientifiques et techniques, ainsi que certains travaux publiés sous forme de rapports multicopiés).

Le Bureau International publie de temps en temps, sous le titre *Les récents progrès du Système Métrique*, un rapport sur les développements du Système Métrique (SI) dans le monde.

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

<i>Secrétaire</i>	<i>Vice-Président</i>	<i>Président</i>
J. DE BOER	P. HONTI	J. V. DUNWORTH

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

Président

J. V. DUNWORTH, Ancien Directeur du National Physical Laboratory;
Président du Comité International des Poids et Mesures.

Membres

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

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

BUREAU DES LONGITUDES, *Paris*.

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

COMMISSION NATIONALE DE L'HEURE [CNH], *Paris*.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [NRC], *Ottawa*.

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

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* (Grande-Bretagne).

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [NRLM], *Tokyo*.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], *Braunschweig*.

RADIO RESEARCH LABORATORIES [RRL], *Tokyo*.

ROYAL GREENWICH OBSERVATORY [RGO], *Hailsham*.

UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE [UAI].

U.S. COAST GUARD [USCG], *Washington*.

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

J. BONANOMI, Observatoire de Neuchâtel, *Neuchâtel*.

A. ORTE, Instituto y Observatorio de Marina, *San Fernando* (Espagne).

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

ORDRE DU JOUR
de la 8^e Session

1. Progrès des étalons de temps et de fréquence.
 2. État actuel du Temps Atomique International, TAI ; rapport du directeur du Bureau International de l'Heure.
 3. Considérations sur les limitations dans l'établissement et la diffusion du TAI (Recommandation S 3 (1974)).
 4. État et utilisation du Temps Universel Coordonné, UTC (Recommandation S 1 (1974)).
 5. Recommandations intéressant le CCDS adoptées par la 16^e Assemblée Générale de l'Union Astronomique Internationale, Grenoble, 1976.
 6. Mise en oeuvre des techniques de pilotage du TAI (Recommandation S 4 (1974)).
 7. Questions diverses.
-

RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE
(8^e Session — 1977)

AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

par B. GUINOT, Rapporteur

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS) a tenu sa 8^e session au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres, au cours de deux séances, les mardi 26 et mercredi 27 avril 1977.

Étaient présents :

J.V. DUNWORTH, président 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. DECAUX).

Commission Nationale de l'Heure [CNH], Paris

(B. GUINOT).

Conseil National de Recherches [NRC], Ottawa

(C.C. COSTAIN).

Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques

[IMPR], Moscou (S.B. POUCHKINE, V. SAGINE).

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris

[IEN], Turin (S. LESCHIUTTA).

Laboratoire de l'Horloge Atomique du CNRS, Université

de Paris-Sud, Orsay (C. AUDOIN).

National Bureau of Standards [NBS], Boulder (J.A. BARNES, H. HELLWIG).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (A.E. BAILEY).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig (G. BECKER).

Royal Greenwich Observatory [RGO], Hailsham (J.D.H. PILKINGTON, H.M. SMITH).

Union Astronomique Internationale [UAI], W. MARKOWITZ).

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

Les membres nominativement désignés :

J. BONANOMI, Directeur de l'Observatoire de Neuchâtel.

A. ORTE, sous-directeur de l'Instituto y Observatorio de Marina, San Fernando.

Le directeur du BIPM (J. TERRIEN).

Assistaient aussi à la session : P. GIACOMO, sous-directeur du BIPM, J. AZOUBIB et P. CARRÉ (BIPM), M. GRANVEAUD (BIH).

Excusés : Comité Consultatif International des Radiocommunications de l'Union Internationale des Télécommunications, Genève ; Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères, Neuchâtel ; National Research Laboratory of Metrology, Tokyo ; Radio Research Laboratories, Tokyo.

Absent : U.S. Coast Guard, Washington.

Après les souhaits de bienvenue de Mr Terrien et du Président, la séance est ouverte.

Avec l'approbation du Comité Consultatif, le Président confie la tâche de rapporteur à Mr Guinot. Il indique les points essentiels que le CCDS aura à considérer : le "pilottage" de la fréquence du TAI, les progrès des horloges, les corrections relativistes, l'utilisation des satellites pour comparer les horloges. Il passe ensuite au premier point de l'ordre du jour.

1. PROGRÈS DES ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE ET DES HORLOGES ATOMIQUES

Mr *Barnes* et Mr *Hellwig* présentent les étalons de fréquence du National Bureau of Standards. L'étalon à jet de césium NBS-4, employé depuis 1973, fonctionne d'une façon quasi continue depuis juillet 1975 et est devenu l'une des horloges qui contribuent à l'établissement de TA(NBS) ; son exactitude est de l'ordre de 3×10^{-13} (1σ). Il est cependant déconseillé d'utiliser ses données pour étalonner la fréquence du TAI. L'étalon à jet de césium NBS-6 résulte d'une transformation de NBS-5 ; il fonctionne depuis octobre 1976 et il réalise la seconde avec une exactitude de 9×10^{-14} (1σ). Il semble que les étalons à césium puissent être encore améliorés.

Le NBS a construit un étalon passif à hydrogène dont la stabilité surpasse celle de toutes les horloges présentes. Il continue l'étude de dispositifs fonctionnant dans l'infrarouge et le visible et des chaînes qui permettent de les utiliser comme étalons de temps.

Mr *Costain* estime qu'un étalon à césium peut servir à la fois d'horloge et d'étalon primaire. Ainsi, l'étalon NRC CsV du Conseil National de Recherches fonctionne d'une façon continue depuis mai 1975, tout en assurant une exactitude de 5×10^{-14} . L'exactitude est maintenue par des réévaluations totales qui ont lieu environ deux fois par an et par des réévaluations partielles. Il faut remarquer que les réévaluations dégradent momentanément la qualité des étalons, ce qui justifie leur fonctionnement prolongé, et que la publication régulière des résultats exigée par le fonctionnement en horloge est une garantie de l'intégrité des résultats.

Le NRC a entrepris de construire trois nouveaux étalons à jet de césium destinés à établir TA(NRC), étalons qui doivent être plus stables et plus économiques que les étalons commerciaux.

En dépit des qualités de NRC CsV, Mr *Costain* estime qu'il n'est pas recommandable de lui donner un poids supérieur à celui des horloges commerciales dans le calcul du TAI, tant que de nouvelles méthodes de comparaison de temps

n'apporteront pas une précision améliorée.

Une discussion s'ouvre entre MM. Costain, Hellwig, Becker et Winkler à propos de l'indépendance statistique des réalisations successives de la seconde. Bien que Mr *Becker* ait admis la notion de cohérence entre les étalonnages, il n'approuve pas la notion d'erreur systématique constante. Des réévaluations partielles peuvent avoir lieu avec des périodicités différentes et, de plus, des changements progressifs des composants des étalons peuvent contribuer à une dérive de fréquence.

Mr *Leschiutta* fait état des travaux poursuivis à l'Istituto Elettrotecnico Nazionale sur les étalons à jet de magnésium ou de calcium. Un second dispositif à magnésium a été construit ; mais la puissance disponible à la sortie de la chaîne de multiplication de fréquence n'est pas suffisante pour la spectrométrie dans la région submillimétrique. Les travaux portent actuellement sur l'accroissement de cette puissance.

Mr *Kalau* indique que le Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung a entrepris de construire un étalon à jet de césium.

Mr *Becker* mentionne les améliorations apportées à l'étalon à jet de césium CS1 de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Lorsque toutes les incertitudes connues sont prises en compte, l'exactitude est de $0,26 \times 10^{-13}$, mais il faut aussi estimer le rôle des imperfections des dispositifs réels et l'exactitude estimée d'une manière réaliste est de 1×10^{-13} . Pour les raisons indiquées précédemment, Mr *Becker* ne distingue plus les erreurs systématiques et les erreurs aléatoires. Les résultats des étalonnages de TA(PTB) sont envoyés au BIH dès qu'ils sont obtenus, avec une incertitude globale. A ce propos, Mr *Becker* fait remarquer que les incertitudes des liaisons horaires par LORAN-C qui conduisent à des ajustements des TAI-TA(i) effectués par le BIH, affectent sensiblement la qualité des étalonnages. Il signale que peu de progrès ont été réalisés sur CS2 et les masers à hydrogène ; le travail sur la synthèse des fréquences des infrarouges est poursuivi, en particulier par l'étude des diodes à pointe et

et des lasers pompés.

Mr *Bailey* mentionne que l'étalon à jet de césium du National Physical Laboratory pourra apporter des résultats avant la fin de l'année 1977. Les travaux sur les masers à hydrogène sont provisoirement suspendus.

MM. *Pouchkine* et *Sagine* indiquent que l'étalon à jet de césium construit au Gosstandart de l'U.R.S.S. en 1975 a une exactitude de 3 à 4×10^{-13} . Trois jeux de masers à hydrogène sont maintenant disponibles. Les derniers instruments, construits en 1976, ont une reproductibilité de 0,6 à $1,2 \times 10^{-13}$. Trois masers à hydrogène et six étalons à césium commerciaux contribuent à former les échelles TA(SU) et UTC(SU).

Mr *Audoin* présente les travaux réalisés dans les laboratoires français. L'amélioration des masers à hydrogène est poursuivie. L'étude des étalons de fréquence infrarouge et visible et de leur raccordement aux fréquences radioélectriques a été entreprise.

2. ÉTAT ACTUEL DU TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL (TAI)

Mr *Guinot* présente un rapport sur cette question (Annexe S 4). Il insiste sur le fait que la qualité des travaux sur le TAI est actuellement limitée par le manque de précision des comparaisons de temps. Il fait aussi remarquer que les discussions sur les incertitudes des étalonnages du TAI ont un intérêt essentiellement théorique. La combinaison des données des laboratoires en utilisant des modèles statistiques fort différents pour ces étalonnages ne fait apparaître que des divergences de l'ordre de 2×10^{-14} .

3. LIMITATIONS DANS L'ÉTABLISSEMENT ET LA DIFFUSION DU TAI

Sur grandes distances, les horloges sont actuellement comparées par le LORAN-C et par les transports d'horloges. Le LORAN-C introduit des erreurs progressives qui atteignent, par exemple, 0,5 μ s en quelques années. Les transports

d'horloges dont l'exactitude est assurée avec des incertitudes généralement inférieures à $0,1 \mu\text{s}$ sont beaucoup plus satisfaisants, mais ils sont trop peu fréquents pour les travaux courants.

De nombreuses expériences ont montré que les liaisons par satellites artificiels peuvent apporter une précision et une exactitude améliorées ainsi qu'une couverture mondiale. Ainsi, des liaisons expérimentales ont été établies entre le Japon et les États-Unis d'Amérique, à l'aide de ATS-1 et entre l'Allemagne et la France à l'aide de "Symphonie" avec des incertitudes voisines de 1 ns (précision) ; dans l'expérience faite avec ATS-1, l'exactitude était de l'ordre de 10 ns.

Actuellement, le satellite expérimental NTS-1 du futur "Global Positioning System" est utilisé entre les États-Unis d'Amérique, la Grande-Bretagne et l'Australie avec une précision de $0,2 \mu\text{s}$ et une exactitude de $1 \mu\text{s}$. Mais on ne peut se fonder sur ces résultats, car le satellite est défectueux : le Global Positioning System devrait fournir des comparaisons d'horloges courantes avec une exactitude de 50 à 100 ns, sans complications instrumentales.

Des membres du CCDS se demandent s'il n'y aurait pas lieu d'organiser une réunion ou un groupe de travail sur les liaisons horaires par satellite. Mais il semble suffisant que les aspects scientifiques soient considérés par l'Union Radioscopique Internationale et les aspects opérationnels par le Comité Consultatif International des Radiocommunications.

Afin de réduire les inconvénients des moyens existants, il est suggéré de comparer entre eux les étalons de fréquence en faisant usage des transports d'horloges au lieu du LORAN-C. De même, ces transports d'horloges pourraient réduire l'incertitude des étalonnages du TAI. Mr *Smith* propose même d'organiser des campagnes d'étalonnages simultanés, mais cette organisation présente des contraintes excessives et est jugée peu compatible avec la recherche sur les étalons.

4. ÉTAT ET UTILISATION DU TEMPS UNIVERSEL COORDONNÉ

Mr *Markowitz* demande des éclaircissements sur la suite

que la Conférence Générale des Poids et Mesures a donnée à la Recommandation S 1 (1974).

Mr *Terrien* rappelle que la 15^e CGPM a recommandé que le Temps Universel Coordinné (sigle UTC) soit la base des temps légaux, mais qu'elle a ignoré l'emploi du sigle UT à employer pour les cas où aucune confusion n'est à craindre.

Plusieurs pays ont entrepris de modifier leur définition de l'heure légale afin de la fonder sur UTC (Allemagne, Espagne, France, ...).

5. RECOMMANDATIONS DE LA 16^e ASSEMBLÉE GÉNÉRALE DE L'UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE

Mr *Markowitz* a commenté les résolutions au sujet du temps adoptées par l'UAI à Grenoble, en août 1976. Ces résolutions avaient été distribuées précédemment par le président du CCDS. Il n'y a eu ni questions, ni commentaires.

6. MISE EN OEUVRE DES TECHNIQUES DE PILOTAGE DU TAI

Jusqu'à présent, le TAI repose sur les données d'un ensemble d'horloges traitées de façon à assurer la meilleure stabilité. Mais, par suite des fluctuations aléatoires et systématiques de ces horloges, la fréquence du TAI peut différer de sa valeur idéale. Au cours de sa 7^e session, en 1974. Le CCDS avait admis qu'un asservissement de la fréquence du TAI (pilotage) pouvait être avantageux et il avait recommandé sa mise en oeuvre.

Toutefois, le défaut d'exactitude du TAI était alors voisin de 10×10^{-13} et il ne pouvait être résorbé qu'après un temps trop long si l'on désirait que les ajustements de fréquence du TAI soient restreints à une valeur correspondant aux fluctuations aléatoires du TAI [Recommandation S 4 (1974)].

A la suite d'une correspondance entre les membres du CCDS, il avait été décidé de différer la mise en oeuvre du pilotage jusqu'à ce que l'importante erreur initiale de fréquence soit corrigée. A la suite des recommandations de l'UAI, cette correction a été effectuée le 1^{er} janvier 1977.

La fréquence du TAI se trouve maintenant très proche de sa valeur nominale et le moment est venu d'entreprendre le pilotage.

Mr *Granveaud* expose les travaux accomplis au BIH. En résumé, dans l'hypothèse où les étalonnages successifs du TAI sont affectés de bruit blanc sur la fréquence, le pilotage le plus efficace consiste à combiner tous les étalonnages passés à l'aide d'un filtre optimal qui a été établi, dès qu'un nouvel étalonnage apparaît, puis d'appliquer au TAI la correction de fréquence trouvée. Il est précisé que cette méthode exige le maintien d'une "échelle libre", calculée sans tenir compte des étalonnages et qui sert de référence pour ces étalonnages. TAI est alors déduit de cette échelle libre.

Mr *Barnes* propose qu'une correction ne soit appliquée au TAI que dans le cas où son erreur de fréquence excéderait une tolérance fixée, afin d'éviter des fluctuations à court terme qui ne seraient pas dues aux horloges, mais aux étalonnages par des étalons primaires.

Mr *Becker* propose que tous les étalonnages de la fréquence du TAI durant une année soient utilisés pour former une moyenne pondérée. L'incertitude $\sqrt{2} \times \sigma$ du résultat devrait être utilisée comme seuil de tolérance. Le pilotage ne s'exercerait que l'année suivante, en cas de dépassement de la tolérance, par un ajustement progressif de la fréquence du TAI.

Mr *Guinot* objecte que l'utilisation de tolérances, si elles sont larges, et le retard à l'application des corrections conduisent l'une comme l'autre à une dégradation de la stabilité à long terme comme l'ont prouvé des simulations.

Comme la discussion prend un caractère très technique, le *Président* suggère qu'un groupe de travail formé par les principaux intéressés par ces problèmes se réunisse dans l'après-midi du 26 avril et fasse part au CCDS le lendemain de ses conclusions.

Les conclusions de ce groupe de travail sont les suivantes :

Il ne faut pas fixer de périodicité pour les ajustements de fréquence du TAI, car ce serait une incitation aux laboratoires primaires à effectuer des opérations de routine au détriment de la recherche. L'application d'une tolérance peut éviter quelques fluctuations à court terme de la fréquence du TAI, mais cette tolérance doit être petite (Mr *Guinot* suggère $0,2 \times 10^{-13}$ dans les conditions présentes). La rapide évolution technique ne permet pas de fixer des règles trop précises. Le BIH doit pouvoir agir avec une liberté suffisante pour tirer profit des améliorations techniques qui pourraient survenir. Il paraît utile, afin de maintenir des contacts étroits entre les laboratoires primaires et le BIH, d'établir un groupe de travail du CCDS pour conseiller le BIH du point de vue technique en ce qui concerne le niveau de confiance dans les mesures, la tolérance et les méthodes de pilotage. Ces divers points font l'objet de la *Recommandation S 1* (1977).

Il a été précisé, suivant les suggestions de Mr *Smith*, que ce groupe de travail ne devrait pas donner d'instructions au directeur du BIH. Si des changements importants des procédés du BIH étaient proposés, ils devraient être soumis au Comité de direction du BIH (par l'intermédiaire du CCDS, si c'était nécessaire). Une étroite coopération devrait être maintenue entre le groupe de travail et le Comité de direction du BIH ; ce groupe devrait comprendre le président du Comité de direction du BIH comme membre *ex officio*.

7. QUESTIONS DIVERSES

—Le *Président* suggère que le CCDS prenne l'initiative d'une réunion entre ses membres et des spécialistes de la Relativité, afin d'éclairer le CCDS sur le rôle des corrections relativistes dans la mesure du temps.

Mr *Guinot* estime que ces spécialistes ne sont guère intéressés par nos problèmes opérationnels. Les diverses théories de la relativité qui sont viables donnent les mêmes corrections, avec une précision bien supérieure à celle qu'il nous faut, tant pour l'exploitation des horloges fixes ou mobiles que pour les méthodes de comparaison de temps par ondes électromagnétiques. Mr *Winkler* approuve ce

point de vue.

— Mr *Becker* demande s'il y a lieu de tenir compte des termes dus à la rotation terrestre dans le champ gravitationnel solaire (ces termes sont de l'ordre de $1 \mu\text{s}$).

Mr *Winkler* et Mr *Guinot* mentionnent que ces termes disparaissent dans les comparaisons d'horloges. Mr *Winkler* est en train d'organiser une expérience pour s'assurer qu'il en est bien ainsi.

— Mr *Costain* estime qu'on devrait unifier et collationner les heures d'été et suggère que le CCDS recherche l'organisme qui pourrait s'en charger, comme l'Organisation des Nations Unies ou l'UNESCO. Une fois de plus, le problème reste sans solution.

— Mr *Guinot* signale qu'il compte faire une proposition à l'Agence Spatiale Européenne pour mettre en oeuvre un système de synchronisation par satellites utilisant des lasers. L'exactitude escomptée serait de 1 à $0,1 \mu\text{s}$.

*
* *

Le *Président* remercie les membres du CCDS et clôt la session le 27 avril 1977 à 11 h 30.

(Mai 1977 ;
révisé en août 1977)

RECOMMANDATION
du Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde
présentée
au Comité International des Poids et Mesures

Pilotage du Temps Atomique International ; constitution d'un
Groupe de travail

RECOMMANDATION S 1 (1977) *

*Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde
(CCDS),*

considérant

- qu'un pilotage utilisant la meilleure estimation disponible de l'unité de temps, en faisant appel à des étalons primaires de temps et de fréquence, améliorera l'exactitude et la stabilité à long terme du Temps Atomique International (TAI), comme il l'a déjà affirmé, à sa 7^e session, dans sa Recommandation S 4 (1974),

- que la mise en oeuvre de ce pilotage par le Bureau International de l'Heure (BIH) a été retardée, en raison de la nécessité de corriger d'abord la fréquence du TAI de 1×10^{-12} , ce qui a été fait au 1^{er} janvier 1977,

recommande

1. que le BIH mette en oeuvre un pilotage du TAI fondé sur les résultats de mesures appropriées fournis par des étalons primaires de temps et de fréquence,

2. qu'on utilise à cet effet, autant que possible, les méthodes de comparaison les plus exactes, comme les transports d'horloges ou les liaisons par satellite,

3. que ce pilotage soit réalisé au moyen d'ajustements de fréquence et que ces ajustements restent petits par rapport au bruit de fréquence du TAI,

4. qu'aucun ajustement ne soit effectué si la différence entre l'intervalle unitaire du TAI et la seconde du SI au niveau de la mer (voir "Mise en pratique du Temps Atomique International", CCDS, 5^e session, 1970, p. S 22) n'excède pas une tolérance déterminée,

* Cette Recommandation a été approuvée par le Comité International des Poids et Mesures à sa 66^e session (septembre 1977).

5. qu'un Groupe de travail du CCDS soit constitué pour conseiller le BIH, du point de vue technique, en ce qui concerne le niveau de confiance dans les mesures, la tolérance et les méthodes de pilotage,

6. que ce Groupe de travail soit composé

- a) de représentants des laboratoires dont les étalons primaires contribuent au pilotage du TAI,
- b) du président du Comité de direction du BIH,
- c) du directeur du BIH et
- d) du directeur du Bureau International des Poids et Mesures,

et qu'il se réunisse lorsque le directeur du BIH l'estime nécessaire.

ANNEXE S 1

Documents de travail présentés à la 8^e session du CCDS

Document
CCDS/

- 77-1 NBS.- Contribution of the National Bureau of Standards (United States of America) to the 8th session of the CCDS (voir Annexe S 2).
- 77-2 NBS.- Congruence of recent measurements of the rate of International Atomic Time, by D.W. Allan, D.J. Wineland and H. Hellwig (voir Annexe S 3).
- 77-3 BIH.- Present state of the International Atomic Time, by B. Guinot (voir Annexe S 4).
- 77-4 NRLM.- Cesium frequency standards of the National Research Laboratory of Metrology (Japan), by Y. Nakadan, J. Yoda and Y. Koga (voir Annexe S 5).
- 77-5 LHA et CNH.- Rapport pour la 8^e session du CCDS, par C. Audoin et B. Guinot (voir Annexe S 6).
- 77-6 BIH et BIPM.- Study of a steering of TAI, by M. Granveaud and J. Azoubib (voir Annexe S 7).

Document

CCDS/

- 77-7 NRC.- For : Consultative Committee for the Definition of the Second, 8th session (voir Annexe S 8).
- 77-8 PTB.- Proposals for topics to be discussed by the CCDS 1977, by G. Becker (voir Annexe S 9).
- 77-9 PTB.- Progress in the work on the time unit and on time scales at the Physikalisch-Technische Bundesanstalt, since 1974, by G. Becker (voir Annexe S 10).
- 77-10 PTB.- Problems of TAI steering with primary standards, by G. Becker (voir Annexe S 11).
- 77-11 NRLM et RRL.- Report to the 8th CCDS meeting (voir Annexe S 12).
- 77-12 RRL.- Study of cesium beam standard, by M. Kobayashi, K. Nakagiri, S. Urabe, M. Shibuki and Y. Saburi (voir Annexe S 13).
- 77-13 ASMW.- Bericht des ASMW für die 8. Sitzung des CCDS (texte bilingue allemand et français ; voir Annexe S 14).
- 77-14 NPL.- CCDS : Contribution by the National Physical Laboratory to the 8th meeting (voir Annexe S 15).
- 77-15 Bureau des Longitudes.- Commentaires de J. Kovalevsky (voir Annexe S 16).
- 77-16 IEN.- Contribution by the Istituto Elettrotecnico Nazionale to the 8th meeting of the CCDS (voir Annexe S 17).
- 77-17 Gosstandart de l'U.R.S.S.- Submission to the 8th CCDS : The state primary time and frequency standard of the USSR in 1976, by S.B. Pushkin and V.V. Sajin (voir Annexe S 18).

ANNEXE S 2

Contribution du NBS (États-Unis d'Amérique) pour la 8^e session du CCDS

(Traduction du Document CCDS/77-1)

Summary. - The National Bureau of Standards is active in the areas of frequency standards, clocks, time generation and measurement. Using primary standards for frequency and time the duration of the SI second is determined. The NBS maintains an atomic time scale TA(NBS) based on internal data and UTC(NBS) which is derived from NBS data but coordinated with UTC(BIH). Comparison with other laboratories and with the BIH is done via television signals, Loran-C and portable clocks. The primary cesium standards are being improved via the development and implementation of digital electronics and via research on new evaluation methods and new design options. Research is executed towards the development of new clocks as well as potential candidates for better primary frequency and time standards. These efforts include a passive hydrogen standard, a calcium beam/dye laser device, saturated absorption stabilized lasers and an ion storage/dye laser system. Devices for practical applications are developed including a portable rubidium clock, a small environmentally insensitive ammonia absorption standard and a crystal oscillator using multiple crystal resonators. Frequency measurements are extended throughout the infrared region based on superconducting cavity oscillators, Josephson junctions and point contact diodes, and various lasers including saturated absorption stabilized lasers and CO₂-pumped far infrared lasers.

I. ÉTALONS PRIMAIRES

NBS-4 et NBS-6 contribuent à la réalisation de la seconde du SI et aussi à l'établissement de TA(NBS) et UTC(NBS) grâce à leur fonctionnement comme horloges pendant une durée suffisante. On a observé pour NBS-4 une stabilité qui atteint

$\sigma_y(\tau) = 1,5 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$, une limite du bruit de scintillation de 5×10^{-15} et une exactitude de 3×10^{-13} (1 σ). Il fonctionne de façon presque continue depuis juillet 1975 comme élément de l'ensemble d'horloges de l'échelle de temps du NBS. On a observé pour NBS-6 une stabilité qui atteint $\sigma_y(\tau) = 7 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, une limite du bruit de scintillation de 9×10^{-15} et une exactitude estimée à 9×10^{-14} (1 σ). Depuis octobre 1976, NBS-6 est utilisé comme élément de l'ensemble des horloges atomiques du NBS. Le fonctionnement comme horloges de NBS-4 et NBS-6 est interrompu de temps en temps pour l'entretien et la réévaluation. NBS-6 est issu de NBS-5 dont on a revu entièrement la conception 1) de la construction de l'ensemble four et détecteur, 2) du dispositif permettant de renverser le jet et 3) du système de pompage, qui a été nettement amélioré. NBS-4 a été amélioré en rendant plus robuste le système d'alimentation en hyperfréquence et en ajoutant un troisième blindage magnétique. A partir des données disponibles relatives aux comparaisons entre étalons primaires de fréquence et de temps en fonctionnement au NBS, au NRC et à la PTB, le NBS pense qu'une incertitude résiduelle additionnelle affecte la réalisation actuelle de la seconde du SI et que l'on n'a trouvé aucune interprétation physique claire de cette incertitude. Le NBS estime que cette incertitude est actuellement de l'ordre de 1×10^{-13} . Son opinion est qu'elle pourrait être incluse dans les incertitudes indiquées pour la réalisation de la seconde du SI, mais il aimerait mieux recommander une indication séparée de cette incertitude, distincte des résultats intrinsèquement cohérents d'une évaluation. Pour NBS-6, nous indiquons donc une incertitude de 9×10^{-14} et une incertitude additionnelle de 1×10^{-13} sur la connaissance de la seconde du SI, fondée sur les comparaisons de tous les étalons primaires de fréquence du monde disponibles et évalués. Nous pensons que, pour certaines applications, ces deux valeurs peuvent être combinées statistiquement.

II. ÉTABLISSEMENT ET MESURE DU TEMPS

L'ensemble d'horloges atomiques du NBS est typiquement constitué de neuf horloges participantes. Elles comprennent divers modèles de différents constructeurs ainsi que, pour des durées étendues (plusieurs mois), NBS-4 et NBS-6. On effectue des lectures quotidiennes des indications des horloges et on en déduit TA(NBS) et UTC(NBS) par des procédés automatiques.

Des algorithmes ont été mis au point et sont utilisés pour l'établissement de l'échelle de temps du NBS. TA(NBS) est fondé sur un algorithme d'exactitude dont on a précédemment fait état et qui est publié par ailleurs.

Les relations entre les échelles de temps du NBS et les échelles de temps des autres laboratoires et du BIH sont connues grâce aux comparaisons de temps par l'intermédiaire du Loran-C et de la télévision et par transport d'horloges. Le NBS a mis au point, à partir d'un dispositif commercial, une petite horloge à rubidium transportable comme bagage à main sur les lignes aériennes. Le NBS poursuit un programme de comparaisons de temps régulières avec le BIH, sur la base d'une comparaison par trimestre, afin d'accroître la précision de la connaissance de TAI en fonction de l'étalon du NBS et d'obtenir des données sur les fluctuations présumées de la phase du Loran-C le long de la liaison Paris-Boulder.

Notre estimation actuelle de l'intervalle unitaire de TAI d'après sa dernière évaluation avec NBS-6 est

$Y_{\text{TAI}} - Y_{\text{Césium}} = (+ 1,7 \pm 1,5) \times 10^{-13}$. Un décalage gravitationnel vers les basses fréquences de $1,8 \times 10^{-13}$ est inclus dans cette valeur. L'incertitude comprend le défaut d'exactitude de l'évaluation au NBS, les incertitudes de mesure de TAI (dues au Loran-C et à l'horloge transportable), ainsi que l'estimation du NBS, mentionnée ci-dessus, d'une incertitude additionnelle inexpliquée des étalons primaires à césium.

On estime d'après les mesures que même des ensembles bien entretenus d'horloges atomiques et leurs échelles de temps associées présentent des dérives résiduelles de fréquence ou des fluctuations de fréquence à très basse fréquence. Les mesures indiquent que ces effets sont actuellement de l'ordre de 1×10^{-13} par an. Pour cette raison, les étalons primaires de temps et de fréquence peuvent jouer un rôle important dans la mesure ou la correction (pilotage) des échelles de temps. Notre opinion est que l'on ne doit toutefois appliquer ce processus qu'avec une extrême prudence afin de ne pas ajouter de bruit ou de composantes fluctuantes aux échelles de temps (par exemple TAI) et de ne pas restreindre la liberté scientifique et la possibilité d'améliorations futures des étalons primaires en les soumettant de façon excessive à une utilisation de routine.

Un problème qui préoccupe le NBS et dont on devrait se préoccuper dans l'établissement du TAI est l'utilisation

d'étalons primaires de fréquence et de temps à la fois pour réaliser la seconde du SI et, comme éléments d'ensembles d'horloges, pour l'établissement du temps. Notre avis, fondé sur notre expérience principalement avec NBS-4 et quelque peu avec NBS-6, est que des évaluations détaillées et complètes des étalons primaires sont incompatibles avec leur fonctionnement comme horloges. En d'autres termes, l'évaluation complète peut seulement être effectuée après une interruption totale du fonctionnement comme horloge et, réciproquement, le fonctionnement comme horloge conduit à une transformation progressive de l'étalon primaire en quelque chose qui n'est rien de plus qu'une autre horloge élément de l'ensemble d'horloges : c'est-à-dire qu'il perd ses qualités "primaires". Par conséquent, nous recommandons que les étalons primaires soient de temps en temps complètement évalués. Donner fréquemment les résultats d'étalons primaires conduit à ne faire que des évaluations "limitées". En d'autres termes, des valeurs de la seconde du SI moins fréquentes sont vraisemblablement de meilleures valeurs que des résultats plus fréquents, fortement corrélés avec des mesures antérieures analogues, affectées par les mêmes erreurs systématiques. A la limite, cela est naturellement vrai pour les étalons "primaires" fonctionnant comme des horloges et présentant une très forte corrélation. On pense aussi que tout algorithme d'exactitude utilisé pour le pilotage de TAI doit tenir compte de cela et ne pas attribuer en fait à des données relativement médiocres un poids d'autant plus grand qu'elles sont plus fréquemment fournies.

III. AMÉLIORATIONS ULTÉRIEURES ET RECHERCHES SUR LES ÉTALONS

On estime que l'on peut encore améliorer de façon significative l'exactitude des dispositifs à jet de césium en améliorant les techniques des mesures électroniques, la conception de la cavité et l'optique du jet, ainsi qu'en diminuant les vitesses des atomes et en améliorant la forme de la distribution de ces vitesses. Le NBS a entrepris plusieurs travaux dans ce but.

Nous avons construit et évalué expérimentalement un étalon passif à hydrogène. On a observé $\sigma_y(\tau) = 1 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$; aucune limite de stabilité due au bruit de scintillation n'est apparue et on a mesuré une stabilité sur $\tau = 4$ jours de $\sigma_y(\tau) = 2 \times 10^{-15}$. Ces résultats indiquent que ce dispositif

surpasse toutes les horloges actuellement disponibles, telles que les étalons primaires à césium fonctionnant comme horloges ou les dispositifs commerciaux à jet de césium. Il est possible d'équiper le maser passif à hydrogène d'une petite cavité diélectrique et le NBS met au point un dispositif d'environ 40 cm de diamètre et 50 cm de hauteur, fondé sur ce principe.

D'autres dispositifs fonctionnant dans l'infrarouge lointain ou non ou dans le visible sont très prometteurs ; toutefois, il faut noter que : 1) ils sont tous, comme les étalons à jet de césium, limités par des effets fonction de la vitesse, c'est-à-dire l'effet Doppler résiduel du premier ordre et l'effet Doppler du second ordre ; 2) leurs possibilités comme véritables étalons de temps ne peuvent être atteintes que si on peut construire une chaîne de synthèse de fréquences de précision appropriée dans le domaine du visible et de l'infrarouge. Dans ce but, au NBS, on fait un effort notable pour asservir en phase un laser sur un signal obtenu à partir du domaine des hyperfréquences par multiplication en une seule étape. Cet effort met en jeu des oscillateurs en bande X à cavité supraconductrice, des multiplicateurs et mélangeurs à jonction Josephson et des lasers pompés par laser à CO₂ fonctionnant dans l'infrarouge lointain à des fréquences allant jusqu'à 4,25 THz. En outre, nous poursuivons notre effort sur l'exactitude et la précision de la synthèse des fréquences dans le visible, au moyen de diodes "MOM" et de divers lasers stabilisés entre 4,25 THz et le visible.

IV. DONNÉES SUR LE TAI ET SUR LA SECONDE DU SI

Cette partie de notre contribution est un document technique par D.W. Allan, D.J. Wineland et H. Hellwig intitulé : "Cohérence des mesures récentes de la marche du Temps Atomique International" ; il expose, résume et clarifie les données disponibles sur la marche de TAI, la seconde du SI et les contributions aux incertitudes (*Voix* Annexe S 3).

V. PROJETS DE RECOMMANDATIONS

Nous soumettons au CCDS trois projets de recommandations en rapport avec les possibilités futures concernant le TAI et l'utilisation d'étalons primaires pour le pilotage du TAI.

Mise en oeuvre du pilotage du TAI

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

considérant

- que les mesures laissent à penser qu'il existe des dérives de fréquence dans les échelles de temps des laboratoires,
- que, en raison de sa nature composite, le TAI peut aussi être actuellement sujet à des dérives,
- que ces dérives sont actuellement de l'ordre de 1×10^{-13} par an,
- que l'exactitude interne des étalons primaires de temps est évaluée à environ 10^{-14} et que, cependant, les comparaisons entre divers dispositifs de différents laboratoires font apparaître des désaccords de l'ordre de 1×10^{-13} ,

reconnaissant

- qu'un pilotage du TAI utilisant les données d'étalons primaires pourrait améliorer sa stabilité à long terme et limiter les dérives éventuelles de fréquence,

recommande

- qu'un pilotage du TAI fondé sur les données d'étalons primaires soit mis en oeuvre par le BIH,
- que ce pilotage soit fondé sur des ajustements de fréquence petits par rapport au niveau de bruit du TAI,
- et qu'aucun pilotage ne soit effectué si la durée de l'intervalle unitaire du TAI, déterminée internationalement en fonction de la seconde du SI, tombe à l'intérieur de limites de tolérance spécifiées. Cette tolérance doit être déterminée par le BIH et fondée sur les exactitudes indiquées ainsi que sur la comparaison des diverses valeurs obtenues par différents laboratoires pour la seconde du SI.

*Manière d'établir les contributions
au pilotage du TAI*

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

considérant

- que les divers étalons primaires en fonctionnement ou en cours de mise au point sont différents dans leur conception et dans leur construction,
- que les méthodes et les techniques d'évaluation des différents laboratoires varient et sont adaptées à chaque étalon primaire,

reconnaissant

- que la stabilité du TAI dépasse l'exactitude de la seconde du SI telle qu'elle est réalisée par les étalons primaires, sauf pour de très longues durées,

recommande

- que le BIH désigne les laboratoires équipés d'étalons primaires qui contribuent au pilotage du TAI,
- que le BIH combine avec des poids égaux les mesures de ces laboratoires pour déterminer la durée de l'intervalle unitaire du TAI sans tenir compte des résultats d'évaluation et des indications d'exactitude individuels,
- que le BIH encourage les échanges occasionnels de personnel entre ces laboratoires et entre ceux-ci et lui-même, en particulier lors de la mise en oeuvre de nouveaux étalons ou de nouvelles méthodes d'évaluation,
- que le BIH recueille l'opinion de tous ces laboratoires avant d'effectuer tout pilotage du TAI,
- et que ces laboratoires soumettent au BIH aussi souvent que nécessaire des rapports abrégés avec leurs meilleures estimations de la seconde du SI et de ses relations avec le TAI.

*Utilisation des données fournies par
les horloges transportables*

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

considérant

- que les meilleures mesures de la fréquence du TAI sont fondées sur des étalons primaires associés à des échelles de temps locales de haute stabilité,
- que les comparaisons d'horloges transportables fournissent des comparaisons de temps supplémentaires et peut-être meilleures que les liaisons radio actuellement disponibles, pour les laboratoires éloignés,
- que les fluctuations de phase du Loran-C, observées sur de grandes distances, risquent de limiter l'utilité des données provenant des laboratoires qui contribuent à l'établissement du TAI,

reconnaissant

- que l'on ne disposera peut-être pas dans un proche avenir de méthodes plus précises que les comparaisons d'horloges transportables,

recommande

- que les laboratoires équipés d'étalons primaires s'efforcent de maintenir une échelle de temps locale de haute stabilité,
- que ces laboratoires participent, lorsque cela est nécessaire, à des transports d'horloges au BIH,
- et que le BIH inclue les données fournies par les horloges transportables dans l'établissement du TAI ainsi que dans son algorithme de pilotage.

(2 mars 1977)

ANNEXE S 3

Cohérence des récentes mesures de la marche du Temps Atomique International

par D. W. ALLAN, D. J. WINELAND et H. HELLWIG

National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

(Traduction du Document CCDS/77-2)

Le but de cette note est :

- d'étudier les résultats les plus récents des mesures de la marche du Temps Atomique International (TAI) effectuées par les laboratoires du National Bureau of Standards (NBS), Boulder, Colorado, du Conseil National de Recherches (NRC), Ottawa, Ontario, Canada et de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Rép. Féd. d'Allemagne ;

- d'élucider un désaccord apparent entre la réalisation de la seconde du SI au NBS et au NRC, désaccord qui a été à l'origine signalé par le NRC [1] ;

- et de rendre compte de quelques-unes des dernières mesures du TAI faites par le NBS.

Aux paragraphes 3.E et 3.F de la publication [1], Mungall *et al.* reprennent une équation, tirée du "NBS Time and Frequency Services Bulletin for 1975", qui donne la marche de UTC(NBS) par rapport à la "meilleure estimation" du NBS de la seconde du SI [2]. On peut représenter de façon équivalente l'équation en question sous la forme suivante :

$$y_{\text{UTC(NBS)}}(1975 \text{ jusqu'à fin octobre}) - y_{\text{Cs(NBS)}}(1975) = + 6,9 \times 10^{-13} \quad (1)$$

où $y_i(t)$ représente la fréquence normalisée $(\nu_i(t) - \nu_0)/\nu_0$, $\nu_i(t)$ étant la fréquence de la $i^{\text{ème}}$ référence de fréquence,

dont on a fait la moyenne sur la durée t telle qu'elle est donnée dans la référence en question et ν_0 étant la fréquence nominale. Dans la publication [1] nous trouvons aussi :

$$\nu_{\text{CsV}}(1975) - \nu_{\text{UTC(NBS)}}(1975 \text{ jusqu'à fin octobre}) = - 10,3 \times 10^{-13} \quad (2)$$

où CsV est l'étalon primaire de fréquence à césium du NRC. En combinant les équations (1) et (2), on obtient le résultat suivant de Mungall *et al.* :

$$\nu_{\text{CsV}}(1975) - \nu_{\text{Cs(NBS)}}(1975) = - 3,4 \times 10^{-13}. \quad (3)$$

Malheureusement, l'équation (3) ne rend pas compte du décalage de fréquence (décalage gravitationnel vers les basses fréquences) dû à la différence d'altitude entre le NBS et le NRC.

Comme ils le font remarquer [1], ce résultat est nettement en dehors des limites d'inexactitude (1σ) d'environ 1×10^{-13} pour chacun des étalons primaires du NRC et du NBS. Il existe aussi une incertitude d'environ 1×10^{-13} dans la méthode de comparaison au moyen du Loran-C. Ces erreurs, considérées comme provenant de causes indépendantes, se combineront pour donner des limites (1σ) d'environ $1,7 \times 10^{-13}$. La valeur donnée par Cs(NBS) est le résultat d'un algorithme d'exactitude du NBS qui combine les évaluations antérieures des étalons primaires de fréquence du NBS avec une pondération optimale [3]. Les principales données conduisant à la valeur de référence ci-dessus de Cs(NBS) proviennent de NBS-4 et NBS-5. Étant donné la différence d'altitude entre les laboratoires du NBS à Boulder, Colorado (1635 m) et ceux du NRC à Ottawa, Canada (≈ 100 m), la fréquence d'un étalon au NBS sera décalée vers les hautes fréquences, selon la théorie de la relativité générale (décalage gravitationnel), de :

$$\nu_{i@NBS}(t) - \nu_{i@NRC}(t) = 1,7 \times 10^{-13} \quad (4)$$

où le symbole "@" signifie "ramené à l'altitude" de ces laboratoires.

En combinant l'équation (3), l'équation (4) et les limites d'erreur ci-dessus mentionnées, on obtient :

$$\nu_{\text{CsV}}(1975) - \nu_{\text{Cs(NBS)@NRC}}(1975) = (- 1,7 \pm 1,7) \times 10^{-13} \quad (5)$$

qu'il convient d'utiliser à la place de l'équation (3).

Nous allons comparer maintenant quelques mesures d'autres étalons primaires de fréquence faites en 1976. En 1976, on s'est servi de l'étalon primaire de fréquence NBS-6 pour mesurer la marche de UTC(NBS) et celle du TAI ; on a obtenu les résultats suivants [2,4] :

$$y_{\text{UTC(NBS)}}^{(1976)} - y_{\text{NBS-6}}^{(1976)} = + 8,3 \times 10^{-13} \quad (6)$$

et

$$y_{\text{TAI}}^{(1976)} - y_{\text{NBS-6@niveau de la mer}}^{(1976)} = + 11,7 \times 10^{-13} \quad (7)$$

En 1975, Mungall *et al.* [1] ont donné :

$$y_{\text{TAI}}^{(1975)} - y_{\text{CsV@niveau de la mer}}^{(1975)} = + 9,7 \times 10^{-13} \quad (8)$$

(Remarque.- Nous avons inclus dans l'équation (8) une correction de $+ 0,1 \times 10^{-13}$ pour l'altitude du NRC par rapport au niveau de la mer).

En supposant la marche de TAI constante pour 1975 et 1976, on peut combiner les équations (7) et (8) pour obtenir :

$$y_{\text{CsV}}^{(1975)} - y_{\text{NBS-6}}^{(1976)} = + 2,0 \times 10^{-13} \quad (9)$$

On peut également obtenir une mesure de la marche du TAI en 1976 par rapport à CsV en utilisant UTC(NBS) comme volant de 1975 à 1976. En tenant compte de la correction pour le décalage vers les hautes fréquences par rapport au niveau de la mer, du changement de marche de UTC(NBS) de $- 20$ ns par jour ($- 2,3 \times 10^{-13}$) le 1^{er} novembre 1975 et en combinant les équations (2), (6) et (7), on obtient [2] :

$$y_{\text{TAI}}^{(1976)} - y_{\text{CsV@niveau de la mer}}^{(1975)} = + 9,7 \times 10^{-13} \quad (10)$$

qui est en excellent accord avec l'équation (8).

Si l'on tient compte de la variation de $- 10 \times 10^{-13}$ de la marche du TAI le 1^{er} janvier 1977 (pour améliorer la conformité de cette échelle avec la seconde du SI), on obtient les équations suivantes :

$$y_{\text{TAI}}^{(1977)} - y_{\text{CsV@niveau de la mer}}^{(1975)} = - 0,3 \times 10^{-13} \quad (11)$$

$$y_{\text{TAI}}^{(1977)} - y_{\text{NBS-6@niveau de la mer}}^{(1976)} = + 1,7 \times 10^{-13} \quad (12)$$

et l'algorithme d'exactitude du NBS donne [3] :

$$y_{TAI}^{(1977)} - y_{Cs(NBS)@niveau\ de\ la\ mer}^{(1976)} = + 1,2 \times 10^{-13}. \quad (13)$$

(Remarque.- La fréquence donnée par l'algorithme d'exactitude du NBS, Cs(NBS), n'est pas identique à celle qui est donnée par TA(NBS). TA(NBS) est à très long terme piloté vers Cs(NBS) [2,3]).

En exprimant les données sous une forme comparable aux équations (11) et (12), l'étalon primaire de la PTB donne [5] :

$$y_{TAI}^{(1977)} - y_{CSI@niveau\ de\ la\ mer}^{(1973\ \grave{a}\ 1976)} = + 0,4 \times 10^{-13}. \quad (14)$$

(Remarque.- Nous avons introduit dans l'équation (14) une correction de $+ 0,1 \times 10^{-13}$ pour l'altitude, environ 80 m au-dessus du niveau de la mer, des laboratoires de la PTB.)

La moyenne arithmétique des résultats des équations (11), (13) et (14) donne :

$$y_{TAI}^{(1977)} - y_{Cs\ moy.@niveau\ de\ la\ mer}^{(1975\ \grave{a}\ 1976)} = (+0,4 \pm 2) \times 10^{-13}. \quad (15)$$

Les limites d'erreur correspondent à la différence crête à creux entre les valeurs extrêmes des étalons primaires ; on considère que c'est une estimation prudente d'éventuels écarts systématiques inconnus entre les étalons.

Bien entendu, les limites d'erreur de l'équation (15) ne devraient jamais être inférieures à une combinaison convenable des limites d'erreurs estimées propres à chaque étalon et de l'incertitude sur la comparaison (essentiellement due au Loran-C), qu'à l'heure actuelle nous évaluons à $\pm 1,2 \times 10^{-13}$.

Dans la période du 27 septembre 1975 au 12 janvier 1977, il y a eu six comparaisons au moyen d'une horloge transportable entre UTC (BIH) et UTC (NBS) [6]. Un ajustement d'une fonction du second degré par la méthode des moindres carrés, sur ces valeurs des différences de temps, permet d'obtenir une mesure de la fréquence du TAI par rapport à Cs(NBS) :

*seulement
au moyen d'une
horloge transportable*

$$y_{TAI}^{(1977)} - y_{Cs(NBS)}^{(1976)} = + 1,0 \times 10^{-13}. \quad (16)$$

On estime l'intervalle de confiance (1σ) de cette mesure à $\pm 0,2 \times 10^{-13}$, ce qui est nettement mieux que pour le Loran-C. On a obtenu la valeur donnée dans l'équation (13) en se servant à la fois des comparaisons au moyen du Loran-C et de deux comparaisons au moyen d'une horloge transportable [4] ; les intervalles de confiance (1σ) étaient respectivement de $\pm 0,8 \times 10^{-13}$ et $\pm 0,4 \times 10^{-13}$. L'algorithme d'exactitude du NBS donne pour l'exactitude avec laquelle on connaît $\nu_{CS}(\text{NBS})$ (1976), la valeur $1,1 \times 10^{-13}$.

En résumé, nous voyons qu'il est nécessaire de tenir compte du décalage gravitationnel pour obtenir un accord raisonnable entre les étalons primaires du Canada, de la République Fédérale d'Allemagne et des États-Unis. La marche de TAI (durée de son intervalle unitaire telle qu'elle est mesurée au niveau de la mer depuis la modification introduite le 1^{er} janvier 1977) est en accord avec la seconde du SI telle qu'elle est déterminée au moyen des étalons primaires dans un intervalle de confiance propre à cette série de mesures. Enfin, il semble que la méthode qui consiste à faire des comparaisons répétées de fréquences au moyen d'horloges transportables soit significativement meilleure que celle qui utilise le Loran-C.

BIBLIOGRAPHIE

1. MUNGALL (A.G.), DAAMS (H.), MORRIS (D.) and COSTAIN (C.C.), *Metrologia*, 12, 1976, p. 129.
2. HOWE (S.), *The NBS Time & Frequency Services Bulletin*, Nos 226 et 228, 1976.
3. ALLAN (D.W.), HELLWIG (H.) and GLAZE (D.J.), *Metrologia*, 11, 1975, p. 133.
4. WINELAND (D.J.), ALLAN (D.W.), GLAZE (D.J.), HELLWIG (H.) and JARVIS (S. Jr.), *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, IM-25, 1976, p. 453.
5. BECKER (G.), *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, IM-25, 1976, p. 458.
6. HELLWIG (H.), ALLAN (D.W.), STEIN (S.R.) and PRICHARD (K.), Proc. 31st Annual Symposium on Frequency Control, à paraître.

(2 mars 1977)

ANNEXE S 4

État actuel du Temps Atomique International

par B. GUINOT

Bureau International de l'Heure

(Traduction remise du Document CCDS/77-3)

Remarques générales

Parmi les divers éléments qui contribuent à la formation du Temps Atomique International (TAI), le plus important progrès de ces dernières années apparaît dans le rôle des étalons primaires à césium. Ces instruments donnent des mesures fréquentes de la durée de l'intervalle unitaire du TAI. De plus, deux d'entre eux ont fonctionné en permanence (comme horloges) durant des intervalles de temps assez longs pour qu'ils puissent entrer dans les calculs courants, au même titre que les horloges à césium commerciales, mais avec une meilleure stabilité à long terme.

Cependant, les étalons commerciaux restent nécessaires car leur nombre garantit la pérennité du TAI et aussi améliore sa stabilité. D'autre part, on peut se demander s'il y a compatibilité entre les rôles d'étalon primaire et d'horloge quand on désire des résultats de la meilleure qualité. Cette question devrait être débattue.

La stabilité à long terme des étalons commerciaux n'a pas changé d'une manière significative, sauf peut-être en 1976, où l'on remarque un accroissement de leur poids moyen dans les calculs du BIH. En dépit de la Recommandation S 5 (1974) du CCDS et de demandes pressantes, aucune donnée d'horloges

d'autres types que les horloges à césium n'a été reçue par le BIH.

Les méthodes courantes de comparaison de temps sur grandes distances ne se sont pas améliorées. Le LORAN-C reste le lien essentiel. Il ne permet d'utiliser que les données d'Amérique du Nord et d'Europe. Une liaison utilisant le satellite NTS 1 fonctionne entre l'Australie et les É.-U. d'Amérique, mais elle n'a pas encore permis d'insérer les horloges australiennes dans le réseau du BIH. Les incertitudes des comparaisons de temps affectent sensiblement les qualités des horloges et des étalons de fréquence, tels qu'ils sont vus par le BIH.

Depuis la 7^e session du CCDS,

- le BIH continue d'établir TAI d'après la lecture d'horloges. TAI est toujours une "échelle libre", c'est-à-dire sans référence aux déterminations de la seconde réalisées par des étalons primaires (sauf en ce qui concerne l'ajustement de 1977 janvier 1) ;

- une méthode a été mise au point pour évaluer la durée de l'intervalle unitaire du TAI à partir des données des étalons primaires à césium ;

- un "pilotage" de l'échelle libre a été étudié ; en utilisant les données des étalons primaires, il assure l'exactitude et la stabilité à long terme sans dommage pour la stabilité à court terme.

Voici quelques commentaires sur les points ci-dessus.

Calcul de l'échelle libre

Le nombre d'horloges qui contribuent au calcul du TAI fut de l'ordre de 100 en 1976 ; elles étaient réparties dans 22 laboratoires. Les données sont gérées par le programme ALGOS, dont l'algorithme assure la continuité de phase et de marche en dépit des changements dans la liste des horloges participantes. ALGOS a été décrit dans les Rapports Annuels du BIH pour 1973 et 1974. On rappelle qu'il assigne des poids aux horloges en fonction de leurs propriétés passées, mais avec un critère d'élimination des horloges qui montrent un comportement actuel anormal.

La seule difficulté rencontrée est provenue de défauts dans les liens horaires par LORAN-C, particulièrement en juillet-décembre 1974, entre l'Amérique et l'Europe. Cette difficulté a pu être surmontée grâce aux transports d'horloges. Il faut remarquer que le retard total de propagation des signaux

de LORAN-C, y compris la part due aux récepteurs, varie parfois de quelques 0,1 μ s en quelques années. Ces retards sont étalonnés par des transports d'horloges. Des réajustements ont été nécessaires et ils furent faits le 1^{er} janvier 1974 et le 1^{er} janvier 1977.

Conformément à la Recommandation N° 2 des Commissions 4 et 31 de l'UAI (1976), la durée de l'intervalle unitaire du TAI a été accrue de 10×10^{-13} s le 1^{er} janvier 1977 afin d'obtenir un meilleur accord avec la seconde du SI. Après cet ajustement, TAI est resté une échelle libre.

Les corrections relativistes ne sont pas complètement appliquées. La correction gravitationnelle des fréquences est automatiquement prise en compte par le programme ALGOS où elle est incluse dans la correction systématique des marches des horloges. Cette correction est appliquée explicitement lorsqu'on utilise les données des étalons primaires pour évaluer la durée de l'intervalle unitaire du TAI. Cependant, les corrections aux comparaisons d'horloges ne sont pas employées ; comme elles peuvent atteindre quelques 0,1 μ s, il serait judicieux d'en tenir compte. Il apparaît que le terme annuel et le terme diurne dépendant de la latitude, qui sont dus à la rotation de la Terre dans le champ gravitationnel solaire, sont compensés par les méthodes de comparaison de temps et qu'on doit les négliger dans la définition d'un réseau d'horloges terrestres synchronisées. Les autres termes sont bien connus. Le BIH est prêt à introduire les corrections si l'on est d'accord pour qu'il le fasse.

Durée de l'intervalle unitaire du TAI

Un filtre optimal à appliquer aux mesures de la durée de l'intervalle unitaire du TAI (étalonnages) a été établi.

Le choix du modèle statistique du TAI n'est pas critique et ne présente guère de difficulté. Mais le modèle des étalonnages pose de nombreux problèmes qui ne sont pas encore tous bien résolus.

Nous avons admis que les étalonnages successifs réalisés sans réévaluation d'un étalon pouvaient être affectés par une erreur systématique commune et par des fluctuations aléatoires. Ces dernières, de moyenne nulle, sont supposées être un bruit blanc en fréquence caractérisé par son écart-type σ_A . Il faut connaître une valeur possible de l'erreur systématique, que l'on caractérise par son écart-type σ_S . (σ_A et σ_S sont des incertitudes relatives sur la fréquence).

- En pratique, les difficultés sont dues
- aux réévaluations partielles,
 - aux estimations plus ou moins prudentes de σ_A et σ_S par les laboratoires primaires,
 - au fait qu'en dépit des réévaluations, des différences systématiques subsistent entre les données de certains étalons.

A notre avis, ce dernier point est important. Il est illustré par les étalonnages suivants du TAI. Les estimations sont calculées sur l'année entière.

Étalon	Durée de l'intervalle unitaire du TAI : 1 s + Δ		
	Δ en unités de 10^{-13} s		
	1974	1975	1976
NBS-4	9,4	9,1	9,3
NBS-6			11,5
NRC CsV		9,6	9,7
PTB CS1	10,5	10,6	10,1

Nous proposons d'appliquer les règles suivantes, tant que la raison de ces différences systématiques n'est pas comprise.

- La même valeur de σ_S devrait être appliquée durant toute la vie d'un étalon, ou, du moins, entre ses modifications de structure essentielles, même si des réévaluations ont été pratiquées.

- Pour les étalons existants, la valeur minimale de σ_S devrait être de 1×10^{-13} . Des valeurs plus élevées seraient utilisées quand elles sont mentionnées par les laboratoires primaires.

- Quand des mesures répétées, de qualité identique, sont réalisées avec le même étalon, la valeur de σ_A devrait être estimée par le BIH, en utilisant la dispersion de ces mesures. Dans les autres cas, les estimations de σ_A par les laboratoires primaires devraient être utilisées.

- Le BIH désire être libre d'utiliser seulement les données d'étalons qu'il a choisis. Cela est une précaution contre des résultats préliminaires d'étalons non suffisamment connus.

- Les échanges d'informations entre laboratoires primaires et entre ces laboratoires et le BIH devraient être encouragés.

Pilotage du TAI selon les données des étalons primaires

Ce problème est traité séparément par J. Azoubib et M. Granveaud (Voir Annexe S 7).

Leur conclusion est que le pilotage du TAI assure l'exactitude et améliore la stabilité à long terme (sur 5 à 10 ans et au-delà). En employant une méthode convenable, la détérioration de la stabilité à court terme est négligeable.

Dans les circonstances présentes, une bonne méthode est d'ajuster la fréquence du TAI tous les deux mois, d'après les résultats du filtre d'exactitude présenté ci-dessus. La valeur de l'ajustement pourrait être limitée, par exemple à $0,2 \times 10^{-13}$, ce qui donnerait une correction de $0,1 \mu\text{s}$ au plus après deux mois, plus petite que les incertitudes dues aux comparaisons de temps.

(21 mars 1977)

ANNEXE S 5

Les étalons de fréquence à césium du NRLM

par Y. NAKADAN, J. YODA et Y. KOGA

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

(Traduction du Document CCDS/77-4)

Depuis la dernière session du CCDS, un nouvel étalon atomique à jet de césium a été construit, en 1975, au NRLM ; il est désigné par NRLM-II.

Ce document résume les résultats des expériences récentes effectuées avec NRLM-I et NRLM-II.

NRLM-I

En incorporant un guide d'ondes souple au guide d'ondes d'alimentation, on a éliminé le changement de fréquence dû aux variations des conditions ambiantes.

De plus, on a amélioré l'uniformité du champ C et la qualité du vide réalisable. On a vérifié que l'uniformité du champ C est meilleure que 1,5 % crête à creux, ce qui est suffisant pour déterminer l'exactitude de l'étalon de fréquence avec une incertitude de 1×10^{-13} , et que l'on peut réaliser un vide correspondant à une pression résiduelle aussi faible que 3×10^{-6} Pa.

A la suite de ces perfectionnements, la stabilité s'est trouvée améliorée par un facteur 3.

NRLM-II

Sur la base des expériences effectuées avec NRLM-I, on a conçu et construit NRLM-II de façon à améliorer l'uniformité du champ C, le vide réalisable et les systèmes électroniques, encore que l'optique du jet de NRLM-II soit semblable à celle de NRLM-I.

On a limité à 2,5 m la longueur totale du tube du jet de NRLM-II pour assurer l'uniformité du champ C, compte tenu de la commodité de fabrication ; la longueur d'interaction de la cavité de Ramsey est 1,2 m.

La chambre à vide est évacuée au moyen de trois pompes ioniques de débit 500 l/s et la pression de fonctionnement est environ 3×10^{-6} Pa.

Le déplacement de fréquence en fonction de l'amplitude de modulation a été réduit à un ou quelques dixièmes de sa valeur en utilisant une modulation par une onde carrée de fréquence 2 Hz au lieu d'une modulation par une onde sinusoïdale de fréquence 21 Hz. La modulation en onde carrée utilise deux fréquences décalées commutées dans un synthétiseur.

STABILITÉS

La stabilité de NRLM-I et celle de NRLM-II ont été mesurées

- 1) à court terme, avec un oscillateur à quartz,
- 2) à long terme, avec une horloge atomique équipée d'un tube de hautes performances.

On a trouvé que la stabilité des étalons est caractérisée par $\sigma_y(\tau) = 8 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ pour une durée d'intégration inférieure à 10^3 s. Toutefois, la stabilité de NRLM-II semble être meilleure que cela, puisque la stabilité calculée à partir de la valeur mesurée de la fréquence est caractérisée par $3 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$.

La stabilité à long terme de NRLM-I est $1,5 \times 10^{-13}$ pour des durées d'intégration supérieures à 1 h.

Pour NRLM-2, on a observé, lors de la comparaison avec l'horloge atomique pendant 6 jours, un palier de 8×10^{-14} , pour une durée d'intégration comprise entre 3 h et 12 h, lorsque les fluctuations de la température de la salle n'excédaient pas 1 °C. La valeur de ce palier varie avec les condi-

tions ambiantes. Lorsque la durée d'intégration dépassait 12 h, la stabilité à long terme de NRLM-II s'améliorait. La stabilité de 5×10^{-14} était atteinte pour une durée d'intégration de 2 jours comme le montre la figure 1 dans laquelle ΔT représente le domaine de variation de la température ambiante.

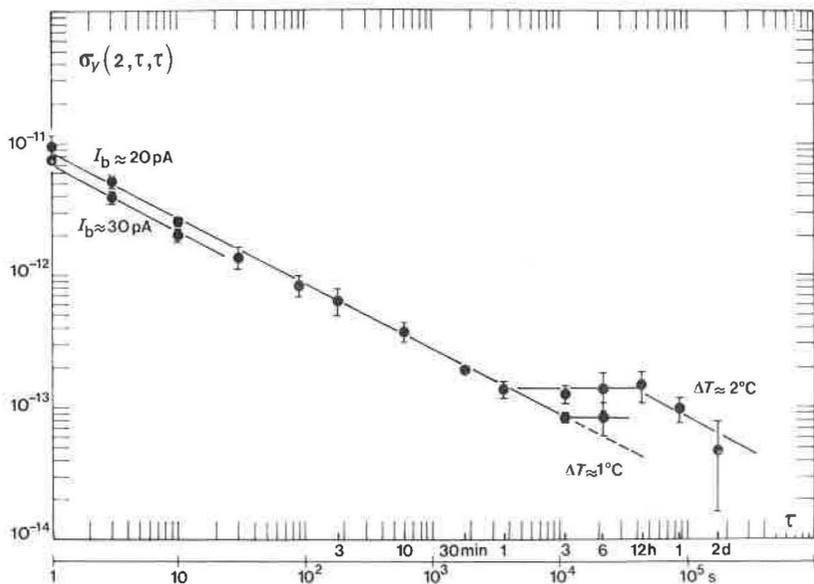


Fig. 1.- Stabilité de l'étalon atomique à jet de césium NRLM-II en fonction de la durée d'intégration τ .

Pour $\tau \leq 10$ s, NRLM-II est comparé à un oscillateur à cristal (mesure de la période de battement) ; pour $\tau > 10$ s, il est comparé à un "Supertube" 5061A (enregistrement de phase).

Nous avons mesuré les décalages de fréquence dus à la phase dans la cavité, à la puissance et à la modulation, afin d'évaluer l'exactitude. Le décalage dû à la phase dans la cavité peut être déterminé en renversant la direction du jet sans rompre le vide. Toutefois, la différence de phase dans la cavité est supérieure à 10^{-2} mrad, de sorte que nous n'avons pas encore de données valables pour évaluer l'exactitude.

Nous construisons une nouvelle cavité du type de Ramsey pour réduire la différence de phase à quelques 10^{-3} mrad. Nous essaierons d'évaluer l'exactitude avec la nouvelle cavité.

Rapport pour la 8^e session du CCDS

par C. AUDOIN

Laboratoire de l'Horloge Atomique (France)

et B. GUINOT

Commission Nationale de l'Heure* (France)

(Document CCDS/77-5)

1. PROGRÈS DES ÉTALONS DE FRÉQUENCE ET DE TEMPS

Les performances usuelles des étalons de fréquence et de temps ont été décrites dans un article de revue [1]. Des travaux théoriques sur la caractérisation des propriétés statistiques des étalons sont poursuivis [2].

a) Étalon de fréquence à hydrogène (LHA)

Une étude détaillée des interactions entre atomes d'hydrogène et paroi de téflon a été effectuée dans une gamme étendue de température (de 77 à 395 K). Les temps de relaxation, la probabilité de recombinaison et le déplacement de fréquence associés à ces collisions ont été mesurés de façon précise [3]. Il a été constaté que les propriétés de la paroi de téflon se modifient à des températures égales à 202, 296 et 360 K [3,7]. Les résultats de cette étude suggèrent que la reproductibilité des propriétés de tels revêtements pourrait être améliorée, aux températures usuelles d'utilisation, par une réticulation du revêtement de téflon.

* Le rapport de la Commission Nationale de l'Heure couvre également les activités du Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences (LPTF), créé en 1975, qui regroupe à l'Observatoire de Paris les travaux du Service de l'Heure et d'un laboratoire chargé d'expériences sur la métrologie des fréquences optiques. Ces derniers travaux sont effectués en liaison avec les laboratoires d'Université et le Laboratoire de l'Horloge Atomique (LHA) [21].

L'étude expérimentale des collisions entre atomes d'hydrogène [4] (section efficace de collision, section efficace de déplacement de fréquence par échange de spins) confirme les résultats théoriques de Allison [5].

Il a été prouvé expérimentalement que l'observation de la phase de l'oscillation, lorsque le niveau d'oscillation est modulé, permet d'accorder correctement la cavité résonnante d'un maser à hydrogène [6]. Ce travail a nécessité la mise au point de circuits électroniques ne présentant pas de déphasages corrélés au niveau des signaux. Ces circuits sont utiles à l'amélioration des performances de tous les étalons de fréquence à hydrogène soumis à l'accord automatique de leur cavité résonnante.

La mise en oeuvre d'un ballon de stockage à double configuration est en cours. Il permet d'opérer à la température, voisine de 100 °C, à laquelle le déplacement de fréquence par collision sur la paroi s'annule [7].

Par ailleurs, des travaux de recherche ont pour but d'explorer la possibilité d'utiliser, comme référence de fréquence, des ions possédant une structure hyperfine, stockés dans une trappe radioélectrique [8].

b) Horloge atomique à hydrogène (CNET)

Le Centre National d'Études des Télécommunications a construit, en collaboration avec le LHA, une horloge atomique à hydrogène, dont la mise au point est en cours.

c) Étalons de fréquence optique (LHA)

L'étude de la stabilisation de fréquence de lasers He-Ne, par la technique de l'absorption saturée, a été poursuivie au LHA. L'écart, voisin de 3 GHz, entre la raie E du méthane (d'intérêt métrologique car dépourvue de structure hyperfine) et la raie F₂(2), habituellement utilisée à 88 GHz, a été mesuré de façon précise [9].

L'étude détaillée des déplacements de fréquence pouvant apparaître dans la stabilisation d'un laser He-Ne sur la raie R(127) de l'iode à 474 THz a été effectuée [11]. Une reproductibilité de 8×10^{-12} a été obtenue [10]. Récemment, une amélioration du contraste du pic d'absorption saturée de l'iode à 474 THz, par un facteur égal à 10, a été observée [12]. Ce progrès a été obtenu en optimisant le couplage laser-cellule [13] et en chauffant les parois de la cuve d'iode, ce

qui peuple le niveau inférieur de la transition R(127). Ce résultat ouvre la voie à une amélioration de la stabilité à court terme de cet étalon ainsi qu'à une étude plus approfondie de l'effet des collisions entre molécules d'iode.

Des travaux en cours au LHA portent sur le contrôle de la stabilité à court terme et à long terme d'un laser à colorant accordable en vue d'étudier des résonances optiques très étroites.

d) Étalons de fréquence à cavité supraconductrice (IEF)

L'étude de la stabilisation de fréquence des oscillateurs micro-ondes par couplage direct à une cavité supraconductrice a été réalisée à l'Institut d'Électronique Fondamentale [14]. Par une méthode simple, il a été possible d'obtenir des stabilités à court terme de l'ordre de 10^{-12} . L'étude des divers paramètres affectant la stabilité de fréquence de cet oscillateur a ouvert la voie à l'amélioration de celle-ci.

Un tel étalon secondaire de fréquence doit permettre la réalisation de chaînes de raccordement de fréquence plus simples, en reliant directement avec un ordre de multiplication élevé, des étalons micro-ondes et submillimétriques [15].

e) Chaînes de raccordement de fréquence (LPTF)

Le programme général de recherche du LPTF dans le domaine de la métrologie des fréquences optiques a pour but la synthèse et la mesure de toute fréquence appartenant aux domaines submillimétrique, infrarouge et, plus tard, visible. Il comprend trois lignes générales :

- la mise en oeuvre d'une chaîne de raccordement de fréquences, comprenant les lasers à HCN, H_2O , CO_2 [16,17] et He-Ne (3,39 μm) réalisés par des laboratoires de l'Université (Paris VI et Paris XI),

- l'étude et la réalisation au LPTF d'un laser moléculaire pompé optiquement par un laser de puissance à CO_2 . Ce laser sera incorporé dans une chaîne de raccordement comprenant un oscillateur supraconducteur et une jonction Josephson [18] développés actuellement dans l'Université (Paris XI),

- la mise en oeuvre des techniques de synthèse des fréquences infrarouges utilisant deux lasers à CO_2 stabilisés par fluorescence saturée et une diode métal-isolant-métal (MIM) ou diode Schottky [19].

Ce programme nécessite la mise en oeuvre des lasers développés dans l'Université et au LHA, mais également la réali-

sation au LPTF :

- d'un laser de transfert à He-Ne (longueur : 8 mètres) à $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$,
- d'un laser moléculaire à pompage optique et de son laser de pompage à CO_2 ,
- d'un laser à CO_2 guide d'ondes amplificateur,
- de lasers métrologiques à CO_2 , stabilisés par fluorescence saturée dans CO_2 ,
- de diodes à pointe MIM.

Diverses études à caractère technologique ou théorique sont également nécessaires pour mener à bien ce programme dont la réalisation effective au LPTF a commencé au printemps 1976. Actuellement, deux lasers à CO_2 stabilisés et les lasers à He-Ne (CH_4) et He-Ne (I_2) sont opérationnels. Le laser de transfert à He-Ne et le laser moléculaire pompé sont sur le point de l'être.

2. MÉTHODES DE COMPARAISON DE TEMPS ET DE FRÉQUENCE

Les laboratoires français qui participent à l'élaboration du temps atomique national TA(F) ont été pourvus de récepteurs automatiques améliorés des impulsions de la télévision. En vue du même émetteur, la précision atteint quelques nanosecondes. Des liaisons horaires par télévision ont été établies avec la Suisse (Hewlett-Packard) et la Belgique (Observatoire Royal de Belgique).

Une liaison horaire expérimentale utilisant les satellites de communication "Symphonie" a été réalisée entre l'Allemagne et la France, à l'initiative du Centre National d'Études Spatiales, en collaboration avec la PTB et le LPTF. L'écart-type d'une mesure pour une impulsion isolée est typiquement de 5 ns. Une extension de l'expérience à l'Amérique du Nord est prévue pour 1977.

L'Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales a poursuivi l'étude de liaisons par impulsions de lasers, avec des précisions de quelques 0,1 ns sur plusieurs kilomètres.

Le Centre National d'Études des Télécommunications (CNET) a développé une méthode de comparaison à distance d'horloges ultra-stables [19]. Elle utilise la fréquence porteuse d'un signal de télévision. Cette méthode est en cours d'expérimentation, avec deux étalons de fréquence à hydrogène, sur une distance de 16 km entre le CNET et le LHA. La méthode permet des mesures de temps à 0,1 ns près.

3. ÉTAT ET UTILISATION DU TEMPS UNIVERSEL COORDONNÉ

Une modification de la loi française est en préparation, afin d'adopter le Temps Universel Coordonné (UTC) comme base officielle de l'heure légale.

(22 mars 1977)

BIBLIOGRAPHIE

1. AUDOIN (C.) and VANIER (J.), *J. of Physics E. Scientific Instruments*, *9*, 1976, p. 697.
2. RUTMAN (J.), Proc. 31st Annual Frequency Control Symposium, Atlantic City, N.J., 1-3 June 1977.
3. DESAINTFUSCIEN (M.), VIENNET (J.) and AUDOIN (C.), *Metrologia*, *13*, 1977, p. 125. Special issue of the 2nd FSMS, Copper Mountain, Colorado, USA, 5-7 July 1976, p. 565.
4. DESAINTFUSCIEN (M.), VIENNET (J.), AUDOIN (C.) and VANIER (J.), *Journal de Physique - Lettres*, *36*, 1975, p. L-281.
DESAINTFUSCIEN (M.) and AUDOIN (C.), *Phys. Rev.*, *A 13*, 1976, p. 2070.
5. ALLISON (A.C.), *Phys. Rev.*, *A 5*, 1972, p. 2695.
6. BARILLET (R.) and AUDOIN (C.), *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, *IM-25*, 1976, p. 465.
7. PETIT (P.), DESAINTFUSCIEN (M.) and AUDOIN (C.), Proc. 31st Annual Frequency Control Symposium, Atlantic City, N.J., 1-3 June 1977.
8. MAJOR (F.G.) et DUCHÊNE (J.L.), *Journal de Physique*, *36*, 1975, p. 953.
9. BRILLET (A.), CÉREZ (P.), HAJDUKOVIC (S.) and HARTMANN (F.), *Optics Com.*, *17*, 1976, p. 336.
10. BRILLET (A.), CÉREZ (P.), HAJDUKOVIC (S.) and HARTMANN (F.), *Atomic Masses and Fundamental Constants 5*, Paris 1975, Plenum Press, New York-London, 1976, p. 350.
11. CÉREZ (P.) and BRILLET (A.), *Metrologia*, *13*, 1977, p. 29.
12. CÉREZ (P.), BRILLET (A.), HAJDUKOVIC (S.) and MAN (N.), Informative meeting about iodine stabilized He-Ne lasers, 10-11 Feb. 1977, PTB, Braunschweig (RFA).
13. BRILLET (A.) and CÉREZ (P.), *Metrologia*, *13*, 1977, p. 137. Special issue of the 2nd FSMS, Copper Mountain, Colorado, USA, 5-7 July 1976, p. 137.
14. JIMENEZ (J.J.) and SEPTIER (A.), Proc. of the 27th Annual Frequency Control Symposium, New Jersey, 1973, p. 406.
15. JIMENEZ (J.J.) et RUTMAN (J.), *Bull. BNM*, *23*, 1976, p. 27.
16. CLAIRO (A.) et HENRY (L.), *C.R. Acad. Sci.*, *B-278*, 1974, p. 419.
17. OUHAYOUN (M.) and BORDÉ (C.), *Metrologia*, *13*, 1977, p. 149. Special issue of the 2nd FSMS, Copper Mountain, Colorado USA, 5-7 July 1976, p. 145.
18. LOURTIOZ (J.M.), ADDE (R.), VERNET (G.) et HENNAUX (J.C.), *Rev. Phys. Appl.*, *12*, 1977, p. 487.
19. PYÉE (M.) et AUVRAY (J.), *Bull. BNM*, *19*, 1975, p. 11.
20. GABRY (A.) et FAUCHERON (G.), Note technique NT/EST/DEF/1591, Centre National d'Études des Télécommunications.
21. GUINOT (B.) et RUTMAN (J.), *Bull. BNM*, *23*, 1976, p. 21.

Étude du pilotage du TAI

par M. GRANVEAUD

Bureau International de l'Heure

et J. AZOUBIB

Bureau International des Poids et Mesures

(Traduction remise du Document CCDS/77-6)

Généralités

Depuis 1969 et particulièrement depuis 1973 lors de la mise en oeuvre du programme ALGOS, l'accent a été mis sur la stabilité à très long terme du TAI. Ces dernières années, les estimations de l'intervalle unitaire du TAI provenant des étalons primaires de la PTB, du NBS et du NRC ont fourni des valeurs voisines les unes des autres avec des incertitudes du même ordre de grandeur. Il est bien connu que l'intervalle unitaire du TAI était trop court de 9 à 12×10^{-13} en valeur relative entre 1973 et 1976. Cela est en contradiction avec la Recommandation S 4 (1974) du CCDS.

La conformité pratique de l'intervalle unitaire du TAI à la seconde du SI peut être réalisée en corrigeant l'intervalle unitaire du TAI à partir des informations des étalons primaires, c'est-à-dire en pilotant TAI. La première application d'un tel procédé a été faite le 1^{er} janvier 1977 en effectuant un ajustement de fréquence.* A présent, excluant un ajustement important de fréquence, nous voulons éviter toute dérive éventuelle, toute variation à long terme, ou simplement toute erreur constante en fréquence. Mais nous devons aussi respecter la stabilité du TAI

* Par fréquence, on entend la fréquence normalisée.

et appliquer les ajustements de fréquence de manière qu'ils n'aient pas d'effet défavorable pour les utilisateurs du TAI. Trouver un compromis entre la stabilité et l'exactitude est le but de cette étude.

Modèle

L'échelle de temps TAI et les étalonnages résultant des étalons primaires doivent être modélisés. La stabilité du TAI n'est pas connue directement, elle peut être estimée à partir des résultats (TAI-horloge).

Nous avons établi un modèle pour la stabilité du TAI en nous servant des résultats (TAI-horloge) et en ajoutant le bruit blanc de phase qui est introduit par les moyens de comparaison des horloges :

$$\sigma(\tau) = (324 \tau^{-2} + 0,25 + 4 \times 10^{-4} \tau)^{1/2}$$

où $\sigma(\tau)$ est la "variance paire" de la fréquence du TAI exprimée en 10^{-13} ; τ est exprimé en jours.

A l'aide de ce modèle, nous avons simulé 10 échellés de temps s'étendant chacune sur 120 ans.

Jusqu'à présent, nous disposons d'environ 59 étalonnages réels. A partir de ceux-ci, nous avons construit un modèle pour les étalonnages avec les spécifications suivantes :

- Les étalons sont supposés avoir des qualités similaires.
- Les données des étalons sont les fréquences moyennes calculées sur 60 jours à partir des échelles simulées.
- Les dates de début des étalonnages sont aléatoires.
- L'incertitude de l'erreur systématique est $\pm 1 \times 10^{-13}$ ou 0.
- Les erreurs aléatoires sont distribuées suivant un bruit blanc d'écart-type $1,5 \times 10^{-13}$.
- Il y a en moyenne 11 étalonnages par an.

Pilotage

Nous devons trouver réponse à deux questions : Quelle est la valeur de la correction à appliquer ? Comment cette correction peut-elle être appliquée ? La réponse à la première question se trouve dans l'article "Estimation of the Scale Unit Duration of Time Scales" ⁽¹⁾. En quelques mots, la correction à

(1) AZOUBIB (J.), GRANVEAUD (M.) and GUINOT (B.), *Metrologia*, 13, 1977, pp. 87-93.

appliquer est une combinaison linéaire des N données des étalonnages primaires, le coefficient attribué à chaque donnée étant fonction des incertitudes et des dates des données. La figure 1 donne un exemple de répartition des coefficients des étalonnages dans le temps.

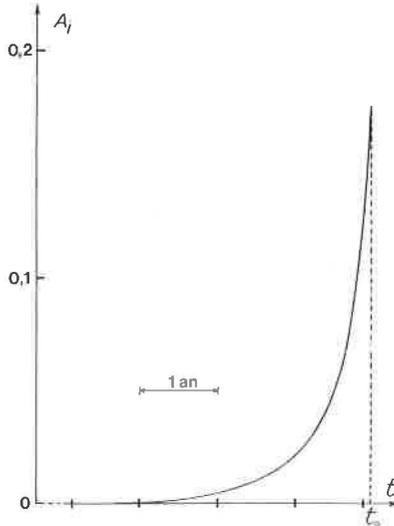


Fig. 1.- Exemple de répartition des coefficients A_i des étalonnages.

t_0 est la date de début de la prédiction ; $\sum_i A_i = 1$.

En principe, N devrait être le nombre total d'étalonnages disponibles. Cependant, il peut être judicieux, pour éviter une dérive systématique éventuelle de la fréquence de l'échelle de temps, de limiter N aux derniers étalonnages. Le cas extrême est $N = 1$ où seul le dernier étalonnage est utilisé.

Il est clair que les procédés pour appliquer la correction au TAI sont nombreux. Des recherches ont été effectuées en utilisant les méthodes suivantes :

- La correction est appliquée brutalement.
- La correction est appliquée avec une constante de temps.
- La valeur absolue de la correction C est comparée à une limite L fixée à l'avance et appliquée si elle est supérieure à L .

Résultats

Les figures 2, 3 et 4 montrent les variances paires des fréquences des échelles corrigées par les méthodes citées

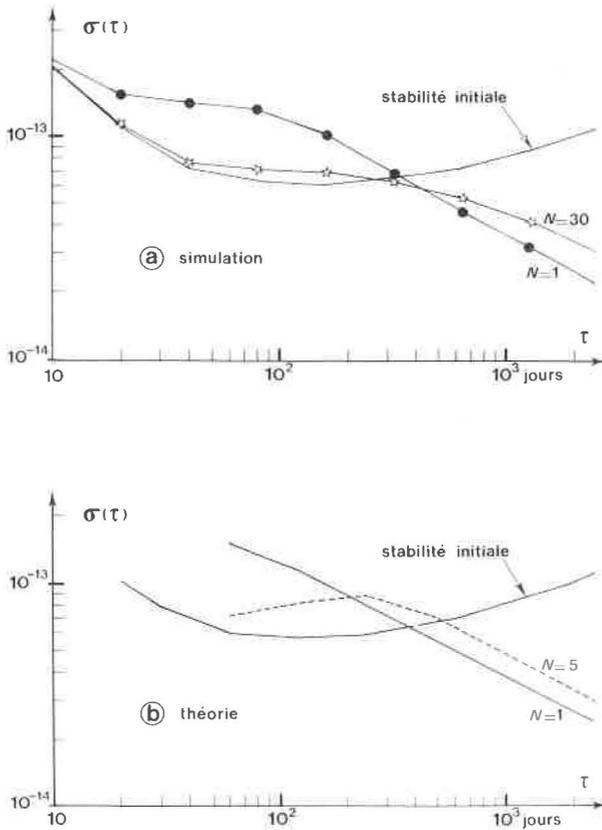


Fig. 2.- a La correction de fréquence calculée à partir de $N = 1$ puis $N = 30$ étalonnages est appliquée brutalement à l'échelle de temps.
b La correction de fréquence calculée à partir de $N = 1$ puis $N = 5$ étalonnages obtenus à partir d'un étalon fonctionnant de façon continue est appliquée brutalement à l'échelle de temps.

ci-dessus. Les résultats présentés sont des moyennes sur les 10 échelles simulées. Il est important de noter qu'il n'a été observé aucune divergence appréciable entre les dix échelles de temps corrigées. La comparaison par rapport à zéro de la fréquence moyenne sur 120 ans après correction a été choisie comme critère d'exactitude.

La figure 2a montre les résultats obtenus par application brutale de la correction. L'échelle de temps corrigée est affectée du même bruit que les étalonnages, c'est-à-dire de bruit blanc, pour les valeurs de τ supérieures à 300 jours environ.

Pour les valeurs de τ inférieures à 300 jours, la stabilité est fortement détériorée avec $N = 1$, mais ne l'est que très légèrement avec $N = 30$. L'exactitude est légèrement moins bonne pour $N = 30$ que pour $N = 1$.

Une étude analytique du problème a été effectuée dans deux cas : d'abord lorsque l'étalon primaire fonctionne de façon continue comme horloge, ensuite lorsque l'étalon primaire fournit des étalonnages régulièrement espacés dans le temps. La figure 2b montre quelques courbes correspondant au premier cas. Les mêmes faits généraux que ceux trouvés par la simulation sont mis en évidence.

La figure 3 montre des résultats relatifs à l'application progressive de la correction. Cette dernière résultant des 12 derniers étalonnages est appliquée linéairement durant 3 ans et 10 ans. La stabilité initiale n'est pratiquement pas détériorée pour τ inférieur à 800 jours, et légèrement améliorée après 800 jours. Par rapport à la méthode précédente de correction, la stabilité à long terme ainsi que l'exactitude sont nettement moins améliorées.

Diverses limites L ont été choisies pour la troisième méthode de correction. La figure 4 montre les stabilités obtenues avec $L = 0,5 \times 10^{-13}$ et $L = 2,5 \times 10^{-13}$ lorsque la correction est calculée à partir des 30 derniers étalonnages. Pour le premier cas, l'échelle de temps est corrigée environ 9 fois par an, ce qui est voisin du nombre maximal (11) de corrections par an ; la stabilité de l'échelle de temps corrigée présente les mêmes caractéristiques que pour la première méthode de correction : légère détérioration avant 300 jours et amélioration après. Dans le second cas, l'échelle de temps est corrigée environ 3 fois par an ; la stabilité est très nettement moins bonne que dans le premier cas.

D'autres essais ont été effectués, particulièrement avec les deux premières méthodes de correction. Lorsque le bruit de l'échelle de temps est divisé par 2, la valeur limite de τ à partir de laquelle il y a amélioration de la stabilité est de 640 jours au lieu de 300 comme le montre la figure 5.

Proposition

La deuxième méthode de correction avec $N = 30$ apparaît la plus simple et la plus efficace. La correction est calculée en utilisant 30 étalonnages, c'est-à-dire les données de 3 ans,

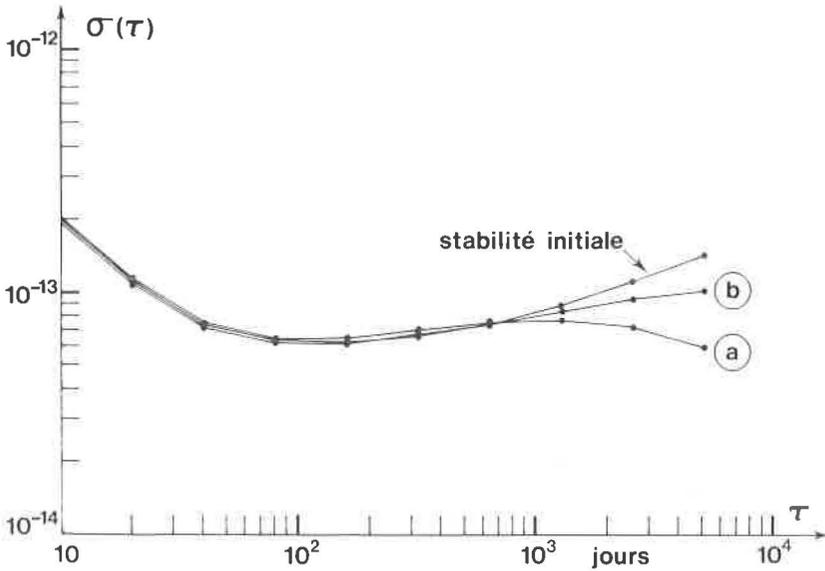


Fig. 3.- La correction de fréquence calculée à partir de 12 étalonnages est appliquée avec une constante de temps de 3 ans (courbe a) puis de 10 ans (courbe b).

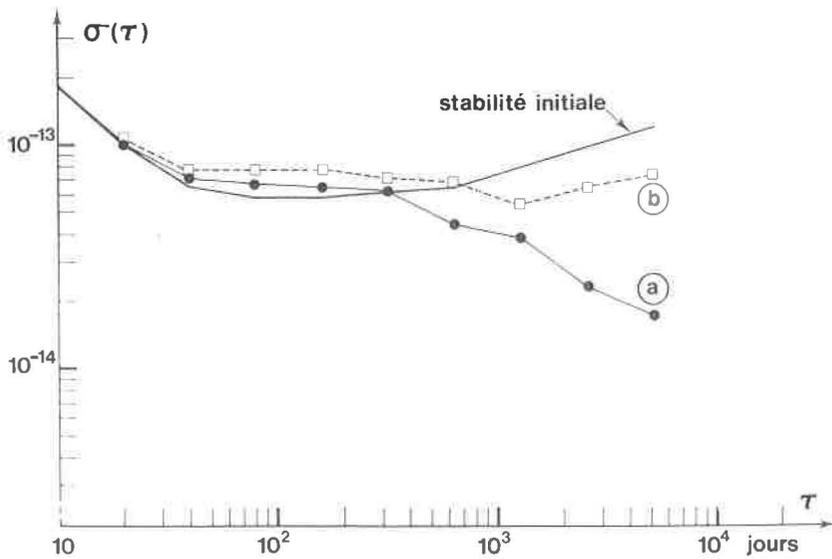


Fig. 4.- La correction de fréquence calculée à partir de 30 étalonnages est appliquée brutalement si sa valeur absolue est supérieure à la limite L . Les courbes représentées correspondent à une échelle de temps particulière.

courbe a $L = 0,5 \times 10^{-13}$ (9 corrections par an)

courbe b $L = 2,5 \times 10^{-13}$ (3 corrections par an)

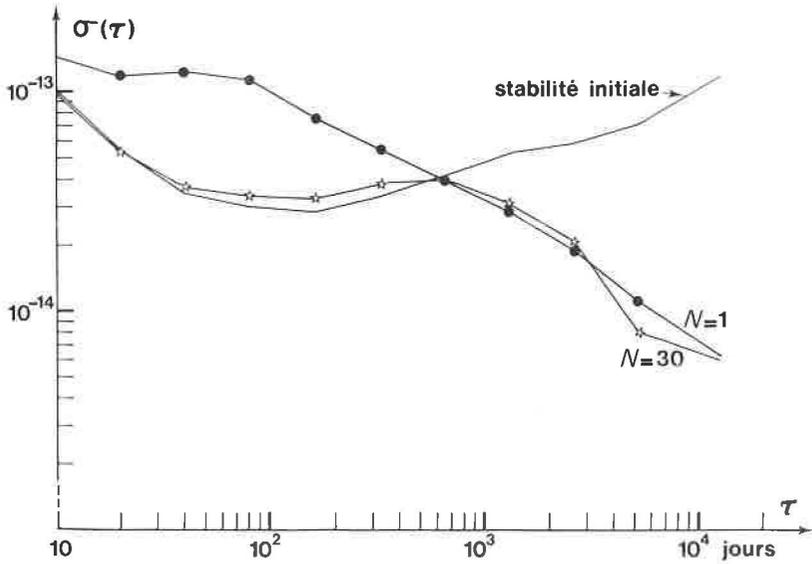


Fig. 5.- La correction de fréquence calculée à partir de $N = 1$ puis $N = 30$ étalonnages est appliquée brutalement à l'échelle de temps précédente dont le bruit a été divisé par 2.

et elle est appliquée directement pour ajuster la fréquence du TAI. La stabilité à long terme est améliorée après 2 ans (ou avant) et l'exactitude est assurée. Pour éviter des corrections trop grandes, une limite de sécurité peut être utilisée.

(6 avril 1977)

ANNEXE S 8

Contribution du NRC (Canada) pour la 8^e session du CCDS

(Traduction du Document CCDS/77-7)

1. ÉTALONS PRIMAIRES À CÉSIIUM ET ÉCHELLES DE TEMPS DU NRC

Depuis 1965, les échelles de temps du NRC reposent directement sur les étalons primaires à césium CsIII ou CsV du NRC. Jusqu'à la fin de 1975, on a établi ces échelles au moyen d'étalonnages bi-hebdomadaires sur six heures, par rapport à CsIII, de la fréquence d'un ou plusieurs étalons commerciaux à césium. Cette méthode a donné des échelles de temps ayant une instabilité à court terme caractéristique des fluctuations statistiques des étalons commerciaux considérés, mais une stabilité à long terme déterminée par CsIII.

Cette méthode, qui consiste à faire des étalonnages à court terme fréquemment répétés, a des limites évidentes ; cela a conduit en 1970 à prendre la décision de construire un nouvel étalon, CsV, destiné à fonctionner de façon continue comme horloge, c'est-à-dire comme étalon primaire de fréquence et de temps.

CsV a commencé à fonctionner comme étalon de fréquence en février 1973. Les mesures faites en mars et avril 1973, et de mars à juin 1974, ont fait apparaître entre TAI et CsV une différence relative de fréquence de $10,5 \pm 0,5 \times 10^{-13}$.

Pendant la seconde moitié de 1974, on a réétudié et reconstruit une grande partie de l'électronique pour permettre le fonctionnement continu comme horloge. Les modifications apportées à la source de micro-ondes ont amélioré à la fois la pureté spectrale du signal d'excitation et la stabilité de la fréquence ; au début de 1975, on évaluait l'exactitude⁽¹⁾ de CsV à 5×10^{-14} . CsV a commencé à fonctionner de façon continue, c'est-à-dire comme horloge, le 1^{er} mai 1975. Au cours des deux premiers mois de son fonctionnement en 1975, on a trouvé une différence entre TAI et PT(NRC CsV) de 83 ns/d, soit $9,6 \times 10^{-13}$. Cette différence s'est maintenue dans l'ensemble sans changement durant la fin de 1975, en 1976 et au début de 1977. La figure 1 donne la différence entre ces échelles de temps, telle qu'elle est fournie par le BIH pour la période du 1^{er} mai 1975 au 1^{er} janvier 1977.

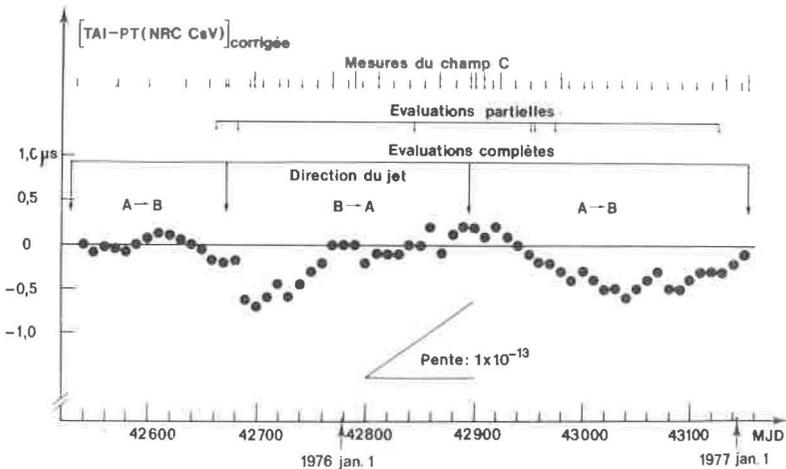


Fig. 1.

En ordonnées : Différence entre les échelles TAI et PT(NRC CsV) corrigée de - 83 ns par jour ;
en abscisses : MJD, Date Julienne Modifiée.

La figure donne aussi les dates des quatre évaluations complètes. L'évaluation complète comprend : le renversement du jet, les renversements et les mesures du champ C, l'établissement des courbes de résonance de Ramsey (vitesses dans le jet), les mesures du déplacement dû à la puissance et le fonctionnement avec des courants de jet fort et faible. Au cours des évaluations répétées, on n'a dépassé ni les erreurs individuelles telles qu'elles ont été publiées⁽¹⁾, ni la somme quadratique

⁽¹⁾ MUNGALL (A.G.), DAAMS (H.), MORRIS (D.) and COSTAIN (C.C.), Performance and Operation of the NRC Primary Cesium Clock, CsV. Seventh Annual PTTI, December 1975.

de 5×10^{-14} . Lorsque l'on interrompt le fonctionnement en horloge pour certaines étapes de l'évaluation (jusqu'à une journée pour le renversement du jet), l'erreur due au raccordement de l'échelle de temps à l'aide d'autres horloges est inférieure à 5 ns.

On fait généralement les évaluations partielles pour des contrôles particuliers, la vérification du déplacement dû à la puissance en micro-ondes, la substitution de nouvelles sources de micro-ondes, l'exploration du jet par le détecteur, etc. Les mesures du champ C sont faites tous les 14 jours et contribuent pour moins de 1 ns à l'erreur de l'échelle de temps. On peut ajuster le champ C pour régler la fréquence dans un domaine de 1 ou 2×10^{-15} pour que la fréquence de sortie de CsV reste égale à la fréquence nominale, soit environ 5,000 000 000 000 00 MHz ; la dérive du champ C entre les mesures provoque rarement un changement de fréquence supérieur à 2×10^{-15} .

L'examen de la figure conduit à plusieurs remarques intéressantes. Il y a plusieurs sauts dont on sait, pour des raisons internes ou externes, qu'ils sont dus à des sauts dans les mesures au moyen du Loran-C. Il y a aussi une variation périodique qui pourrait être une modification saisonnière de phase d'environ 30° , soit 0,8 μ s. Même avec ces effets, le fonctionnement de CsV comme horloge a dépassé ce que l'on en attendait d'après les évaluations. Sur les 610 jours, l'écart quadratique moyen entre TAI et les valeurs prévues d'après les soixante premiers jours de fonctionnement de CsV est de 0,3 μ s. La variance d'Allan pour le fonctionnement comme horloge avec une amplitude de la résonance de Ramsey de 1,7 pA, mesurée par rapport aux masers à hydrogène du NRC, est $\sigma(2, \tau) = 2,5 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$.

Avec l'amplitude de la résonance utilisée pour l'évaluation (environ 5 pA), $\sigma(2, \tau) = 1 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$, et l'on peut atteindre une exactitude de 2×10^{-14} en moins d'une heure. Cette valeur est la limite à laquelle on peut parvenir avec les masers à hydrogène et il n'est pas possible à l'heure actuelle de déterminer jusqu'où la loi de variation en $\tau^{-1/2}$ est valable pour CsV.

La figure montre clairement les qualités de CsV fonctionnant de façon continue comme horloge. Du fonctionnement sur différentes périodes de 100 jours, on peut déduire des valeurs du TAI qui diffèrent de plus de 2×10^{-13} . Si la variation saisonnière existe vraiment, il est évident qu'un fonctionnement

sur un an au moins est nécessaire pour déterminer le TAI avec une exactitude de 1×10^{-13} .

Il est peut-être inutile de préciser que l'échelle de temps la plus stable sera produite par l'horloge la plus stable ou par l'ensemble le plus stable d'horloges. Si une horloge ou un ensemble est plus stable que l'étalon primaire, il faut alors utiliser ce "volant" pour conserver l'échelle de temps pendant et entre les évaluations. D'un autre côté, si l'étalon primaire à césium est de loin le plus stable, il faut utiliser le "volant" pour conserver l'échelle de temps seulement pendant les évaluations, et non entre celles-ci. Comme on estime que le fonctionnement de CsV pendant les neuf premiers mois a été bien supérieur à celui des meilleures horloges commerciales et équivalent à celui d'un très grand ensemble de telles horloges, on a donné à CsV un poids de 100 % dans l'établissement des échelles de temps du NRC.

On a conservé un groupe de trois horloges commerciales à césium, par mesure de prudence en cas de défaillance de CsV. Le contrôle de ces horloges au moyen de CsV a montré qu'elles sont sujettes à de lentes dérives de fréquence ainsi qu'à des sauts de fréquence. On sait que ces dérives proviennent de variations progressives de la tension du multiplicateur d'électrons et aussi, éventuellement, de variations du gain dans la boucle d'asservissement. Il serait difficile, sinon impossible, de déceler de telles dérives dans un ensemble d'horloges équivalentes.

Le fonctionnement d'un seul instrument d'excellente qualité est confronté au risque très réel de défaillance et à la difficulté de son contrôle (sauf au moyen de TAI). Pour ces raisons, et pour des raisons d'économie, on a décidé en janvier 1976 de construire trois autres étalons primaires à césium.

Le projet de CsVI a été pour l'essentiel achevé en avril 1976. Sa conception suit étroitement celle de CsV, mais la plupart des dimensions ont été réduites d'environ moitié pour CsVI. La longueur de la cavité est de 101,6 cm. CsVI aura les mêmes possibilités d'évaluation que CsV avec un four à césium et un détecteur à chaque extrémité. On a apporté à la conception de l'ensemble four et détecteur des modifications destinées à réduire la contamination du détecteur et par conséquent à permettre un renversement plus rapide du jet. On a nettement amélioré l'efficacité de la production et de la détection du jet.

On pense que le montage des horloges CsVI commencera en avril 1977 et on espère que les trois étalons seront en état de marche en avril 1978. L'évaluation devrait être terminée en avril 1979.

2. MASERS À HYDROGÈNE

L'adjonction d'un système d'accord automatique constitue l'amélioration essentielle apportée aux deux masers à hydrogène du NRC au cours des trois dernières années. Dans une série programmée d'opérations, chaque maser sert à tour de rôle de référence pendant que le flux d'atomes de l'autre est modulé de façon à déceler toute erreur d'accord de sa cavité. A la fin de la série, on apporte les corrections nécessaires aux fréquences des cavités des masers. Bien que l'utilisation de l'accord automatique entraîne une légère dégradation de la stabilité de la fréquence sur des durées jusqu'à environ 1000 secondes, la stabilité a long terme est améliorée ; elle est de $\sigma(2, \tau) = 1,5 \times 10^{-14}$ pour des périodes allant jusqu'à une semaine. On a apporté des améliorations mineures : meilleur blindage magnétique et réduction de la sensibilité des cavités des masers aux variations de la pression atmosphérique.

Les masers à hydrogène ont joué un rôle essentiel dans les évaluations périodiques de CsV. De plus, ces évaluations ont permis de rattacher au TAI la fréquence des masers à hydrogène et ont fait apparaître que cette fréquence avait diminué d'environ 6×10^{-13} par an au cours des cinq dernières années. Il est très vraisemblable que cela est dû à un accroissement de l'effet de paroi d'environ 3 % par an. Les masers du NRC ont plus de 12 ans et on en connaît certains points faibles ; on espère que ces résultats ne sont pas caractéristiques de ce type d'appareils. Il est regrettable qu'il n'existe pas davantage de renseignements sur la relation entre le TAI et la fréquence des masers à hydrogène d'autres laboratoires.

3. TRANSMISSION DU TEMPS PAR SATELLITES

Dans les deux années à venir, le NRC fera un effort particulier pour prendre part aux expériences de transmission du temps par satellites en collaboration avec le Communications Research Center (CRC), qui est situé à environ 30 km à l'ouest du Laboratoire du Temps du NRC. Cette proximité relative

devrait permettre d'obtenir, au moyen des émissions de télévision reçues directement par les deux laboratoires, un accord de l'ordre de la nanoseconde entre le NRC et le CRC. Cette première étape de transmission du temps entre le NRC et le CRC commencera dès que l'on aura acquis le matériel nécessaire, qui comportera une horloge transportable et deux récepteurs pour l'impulsion de la ligne 10 de la télévision.

Le CRC possède de vastes possibilités et une très grande expérience dans l'utilisation des satellites. Dans le cadre d'une expérience (CENSAR) qui utilise Hermes (U.S.-Canadian Communications Technology Satellite), expérience dirigée par P.P. Nuspl, un réseau ("Time Division Multiple Access") de cinq stations sur une base de 2000 km est synchronisé sur la station maîtresse du CRC avec une précision de 1 ns. Les discussions préliminaires entre le CRC, le NBS et le NRC ont surtout porté sur la possibilité d'utiliser le réseau CENSAR, ou une version plus simple à deux stations, pour réaliser une transmission du temps à 1 ns près du NRC au NBS (Boulder).

Au cours d'autres discussions, on a également proposé que l'expérience PTB-BIH qui utilise le satellite Symphonie soit suivie d'une transmission du temps entre le NRC et le BIH.

Toutes ces expériences reposent sur la collaboration et la participation des services nationaux correspondants ; la promesse de cette collaboration rend les perspectives très encourageantes.

On pense que le premier objectif de la transmission du temps par satellites devrait être la liaison NBS-NRC-BIH-PTB pour effectuer des comparaisons d'étalons primaires à césium avec une précision de 1×10^{-14} . L'expérience devrait aussi être utile comme étude de la possibilité de réaliser dans l'avenir des systèmes mondiaux de synchronisation du temps à la nanoseconde près.

(25 mars 1977)

ANNEXE S 9

Propositions à discuter à la 8^e session du CCDS

par G. BECKER

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Rép. Féd. d'Allemagne)

(Traduction du Document CCDS/77-8)

1. *Qualité du TAI*

A la fin de 1976, on a une fois de plus introduit des sauts de temps dans TAI-TA(i). Le saut de 0,4 μ s introduit dans l'échelle de la PTB est en fait justifié non pas par des variations dues aux installations de la PTB, mais plutôt par des variations de durée de transmission qui sont intervenues ailleurs. Par suite, la détermination de la fréquence du TAI par la PTB est entachée d'une incertitude de quelques 10^{-14} et cela limite l'efficacité des efforts de la PTB pour mettre au point des étalons primaires et mesurer la fréquence du TAI.

Que peut-on faire pour réduire les changements de durée de transmission ? Est-il possible d'éviter les importantes corrections nécessitées par ces changements pour les laboratoires qui mesurent le TAI avec des étalons primaires ?

A-t-on envisagé de réduire le poids des horloges contributives des laboratoires qui éprouvent des difficultés à conserver constante la durée de transmission ?

2. *Incertainitude des étalons primaires*

Nous faisons les propositions suivantes :

2.1 On devrait essayer de déterminer d'une façon comparable l'incertitude des étalons primaires. Nous ne considérons pas

que σ' (racine carrée de la somme des carrés des incertitudes qui entrent en jeu) constitue la mesure la plus appropriée de l'incertitude.

2.2 En même temps que les résultats de mesure de la fréquence du TAI, on devrait communiquer au BIH l'incertitude des mesures, sans faire la distinction entre l'incertitude systématique et l'incertitude aléatoire.

2.3 Le BIH devrait utiliser les valeurs de l'incertitude des laboratoires d'étalonnage et ne pas essayer de les scinder en différentes composantes, ni les remplacer par des valeurs publiées antérieurement ou par des valeurs calculées au BIH.

2.4 La stabilité à long terme de la fréquence du TAI est suffisamment bonne pour justifier un intervalle supérieur à 100 jours entre étalonnages pour la comparaison de TAI-TA(i). En raison des fluctuations à court terme de TAI-TA(i), un intervalle de 60 jours entre étalonnages est trop bref pour tirer pleinement profit des étalons primaires.

3. *Futurs étalons primaires*

Il est souhaitable que le CCDS exprime son avis sur les besoins futurs en ce qui concerne les étalons primaires. Cela est particulièrement important, car il devient de plus en plus difficile de justifier les moyens et le personnel nécessaires à la mise au point des étalons.

3.1 Y a-t-il suffisamment d'étalons primaires à césium ou en faut-il davantage ?

3.2 Vaut-il la peine de continuer à faire des recherches sur les étalons à césium pour obtenir, par exemple, une incertitude d'environ 1×10^{-14} ?

3.3 Vaut-il la peine de construire et de faire fonctionner des étalons primaires à césium conçus pour un fonctionnement continu ?

3.4 Compte tenu du coût des étalons à césium à performances élevées, vaut-il la peine de construire des étalons à césium ou estime-t-on qu'ils seront remplacés dans un futur prévisible par d'autres appareils moins onéreux ou d'une plus grande exactitude ?

4. *Pilotage du TAI avec des étalons primaires*

Ainsi qu'il est exposé dans un autre document de la PTB (Annexe S 11), deux types légèrement différents de pilotage

du TAI avec des étalons primaires sont possibles : un "pilotage en exactitude" et un "pilotage en stabilité". La PTB recommande que l'on s'en tienne au problème du pilotage en exactitude.

5. *Problèmes d'organisation*

Pourquoi les membres du CCDS n'ont-ils pas été informés que le pilotage du TAI selon la Recommandation S 4 (1974) avait été différé ?

Il aurait été souhaitable d'informer les membres du CCDS que le CIPM n'avait pas approuvé la proposition du CCDS (Recommandation S 1 (1974), Note explicative 1) d'utiliser la désignation Temps Universel (Coordonné) au lieu de Temps Universel Coordonné.

(30 mars 1977)

ANNEXE S 10

Progrès des travaux sur l'unité de temps et les échelles de temps à la PTB

par G. BECKER

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Rép. Féd. d'Allemagne)

(Traduction du Document CCDS/77-9)

1. PROGRÈS DES RECHERCHES SUR LES ÉTALONS PRIMAIRES À JET DE CÉSIMUM

En 1974, on a procédé à une réévaluation de l'incertitude de l'étalon primaire à jet de césium CS1 de la PTB et on a obtenu une incertitude relative de $0,26 \times 10^{-14}$ en tenant compte de toutes les contributions connues à cette incertitude [1]. Pour des raisons exposées au point 2, l'incertitude a été évaluée à $1,5 \times 10^{-13}$. En 1975, on a procédé à un réalignement de CS1 en utilisant le rayonnement d'un laser, afin de réduire l'effet Doppler du premier ordre dû à un gradient de phase à l'intérieur des résonateurs des extrémités ; de nouvelles améliorations apportées à l'optique du faisceau et à l'électronique ont permis de ramener l'incertitude de CS1 à 1×10^{-13} .

On a fait une étude théorique de l'optique du faisceau en utilisant des aimants quadrupolaires et hexapolaires ou des combinaisons de ces deux types [2]. On a montré que leur efficacité est indépendante de la vitesse des atomes du faisceau ; ils permettent de sélectionner des atomes relativement lents dans un faisceau présentant une distribution des vitesses du type de Maxwell-Boltzmann. La combinaison convenable d'un aimant quadrupolaire et d'un aimant hexapolaire ("tandem") comme système de déviation et de polarisation devrait permettre

de réduire à quelques pour cent la largeur à mi-hauteur relative $\Delta v/v$ de la courbe de distribution des vitesses dans le faisceau.

Une faible vitesse moyenne v est favorable car les effets les plus importants de déplacement de fréquence diminuent lorsque la vitesse du faisceau décroît. La compréhension des déplacements de fréquence liés à la puissance et l'évaluation de l'effet Doppler du second ordre sont considérablement simplifiés dans le cas où $\Delta v/v$ est faible. Actuellement, en utilisant un système hexapolaire de déflexion du faisceau, CS1 fonctionne avec environ $v = 100$ m/s et $\Delta v/v = 16$ %. La distribution des vitesses, évaluée par analyse de Fourier de la courbe de résonance de Ramsey, est donnée dans [2]. Si l'on considère cette distribution des vitesses, la contribution de l'incertitude sur l'effet Doppler du second ordre à l'incertitude totale de CS1 est inférieure à 1×10^{-15} . Il y a quelques années (CCDS, 5^e session, 1970), on croyait que ce type d'effet limiterait peut-être l'exactitude accessible avec les étalons primaires à césium. Maintenant, il apparaît que l'effet Doppler du premier ordre, dû aux gradients de phase dans les résonateurs des extrémités, puisse limiter cette exactitude.

On a étudié le problème des champs différents dans les deux résonateurs des extrémités [3] ; on en a conclu que cela n'occasionne pas de déplacement de fréquence. Une pente négative du pic central de la résonance de Ramsey peut apparaître pour des champs forts et différents.

La résonance de Rabi, à laquelle se superpose la résonance de Ramsey, peut être déplacée par suite d'un gradient de phase dans la direction du faisceau. Cet effet, qui n'a pas été discuté auparavant, déplacerait la résonance de Ramsey, par suite de la pente de la courbe de résonance de Rabi au voisinage de son centre. Une recherche théorique [4] montre que la résonance de Rabi et la résonance de Ramsey dépendent toutes deux et de la même façon, de la vitesse du faisceau, de telle sorte qu'une réduction de cette vitesse ne modifierait pas l'effet d'entraînement de la résonance de Rabi sur la résonance de Ramsey. Le problème de l'effet d'entraînement a été souligné à deux reprises [5,6].

On a mis au point une "méthode de multi-modulation" qui utilise une modulation rectangulaire de largeur égale à un multiple impair N de la largeur de raie w [7,2]. Dans le cas d'une pente de la base de la courbe de Ramsey, due par exemple à un résonateur

désaccordé ou à des transitions voisines, on peut déterminer de façon très exacte l'effet de déplacement de fréquence au moyen de cette méthode de modulation. On pourrait montrer que cela s'applique aussi à l'effet d'entraînement par la résonance de Rabi [4]. Une étude de l'effet Millman a montré [19] que la transition utilisée dans les étalons à jet de césium ne devrait pas être influencée par cet effet.

2. PROBLÈMES LIÉS À L'INCERTITUDE DES ÉTALONS À JET DE CÉSIUM

La "liste d'erreurs" habituelle, résumant les différentes contributions à l'incertitude totale, est fondée sur un modèle assez idéal d'étalon à jet de césium. Elle ne comporte pas encore l'effet d'entraînement par la résonance de Rabi et ne tient pas compte non plus de certaines autres imperfections des appareils réels. Il y a quelques années, on avait observé sur l'étalon CS1 de la PTB une résonance asymétrique et un déplacement de fréquence assez fort fonction de la puissance, dus à une irradiation additionnelle du faisceau. Comme cela est décrit en [8], il était possible d'estimer assez bien l'incertitude due à cet effet, bien qu'à l'époque on ne le comprit pas encore. La même chose se manifesta à une autre occasion [8]. De ces expériences, on a déduit qu'il convenait de faire la distinction entre l'incertitude σ et la racine carrée σ' de la somme des carrés des contributions des effets connus. D'après des mesures de déplacement en fonction de la puissance, on peut obtenir des indications qui permettent de faire une estimation réaliste de σ , en particulier lorsqu'on utilise des largeurs de modulation correspondant aux facteurs $N = 3, 5$ ou 7 . La méthode de modulation rectangulaire permet de déterminer facilement le centre de la résonance de Rabi.

L'article traite aussi du problème de l'incertitude systématique et de l'incertitude aléatoire. Une distinction nette entre ces deux composantes de l'incertitude est possible lorsqu'on peut supposer qu'à un écart systématique et constant par rapport à la vraie valeur se superposent des écarts aléatoires (à court terme et non corrélés). En réalité, il faut supposer qu'il existe des variations corrélées avec des constantes de temps très différentes atteignant un an et plus. Entre autres choses, les constantes de temps dépendent de la périodicité des réglages propres à l'étalon. Dans le domaine du temps et des

fréquences, on ne peut décrire le comportement de la fréquence d'un générateur de fréquence en supposant qu'à une valeur moyenne fixe se superposent des fluctuations aléatoires non corrélées. Il a été nécessaire de mettre au point différents critères, comme la "variance de deux échantillons". Le même problème se pose avec les étalons primaires à jet de césium. Si l'on désire conserver les notions d'incertitudes systématique et aléatoire, la difficulté suivante survient : la mesure de la fréquence du TAI est un processus continu comportant, par exemple, n mesures individuelles par an. Comme la variation de la fréquence du TAI au cours d'une année est petite par rapport à l'incertitude des mesures individuelles, on peut dire que la durée de la mesure complète de la fréquence du TAI est de un an. Des changements lents dans les composants de l'étalon (par exemple avec des constantes de temps de un mois) contribuent alors à l'incertitude aléatoire. Si, toutefois, on devait examiner seulement une mesure individuelle, qui dure quelques jours, l'écart de fréquence dû au même composant devrait être décrit comme une erreur systématique.

Pour les mesures faites actuellement à la PTB, une durée de mesure de plusieurs jours est suffisante pour supprimer les fluctuations à court terme. On ne communique au BIH que l'incertitude totale σ des mesures. On a demandé au BIH de ne pas essayer de scinder σ en deux composantes.

3. PROJETS CONCERNANT LE DÉVELOPPEMENT DES HORLOGES ATOMIQUES

Comme on l'avait dit à la 7^e session du CCDS (1974), on améliorerait alors l'un des deux masers à hydrogène de la PTB afin qu'il puisse contribuer à la formation de TA(PTB) et de TAI. Par manque de personnel, on a fait peu de progrès depuis lors. Il en est de même pour la poursuite des travaux sur la construction de CS2.

Dans une "discussion sur les étalons primaires", fondée sur l'expérience acquise à la PTB, on a exprimé l'opinion que les étalons à jet de césium pourraient être améliorés pour atteindre une incertitude relative limite d'environ 1×10^{-14} [6].

4. MESURES DE FRÉQUENCE EN INFRAROUGE *

On a poursuivi les recherches sur la synthèse de fréquences dans l'infrarouge, essentiellement dans les deux directions suivantes :

4.1 *Multiplification de fréquence*

On a fait des recherches sur les propriétés des diodes métalliques à pointe ; cela a permis d'améliorer l'efficacité du mélange d'harmoniques. Par battements des harmoniques d'un klystron en ondes millimétriques et des différences entre les fréquences de raies de lasers à CO_2 , on a mesuré la diminution de l'efficacité du mélange d'harmoniques au moyen de diodes métalliques, lorsque le rang de l'harmonique augmente. On a étudié les caractéristiques de redressement à 100 MHz, 10 GHz, 760 GHz et 30 THz en fonction de la résistance et de la polarisation des diodes. On explique les résultats, même à la fréquence la plus élevée, par la caractéristique des diodes en courant continu. On a constaté que le cobalt est meilleur que le nickel comme matériau pour le plot de contact [11]. Dans le domaine de 500 à 760 GHz, on a mesuré avec ces diodes les fréquences de lasers à fonctionnement continu dans l'infrarouge lointain, pour des puissances de l'ordre du milliwatt [12].

Dès mesures récentes [13] ont montré que les diodes Schottky au GaAs que l'on trouve dans le commerce sont meilleures que les diodes métalliques pour les fréquences inférieures à 1 THz.

4.2 *Oscillateurs*

On a travaillé sur des lasers à pompage optique pour les utiliser comme oscillateurs intermédiaires dans la région de l'infrarouge lointain et des ondes submillimétriques. On a effectué des études sur le comportement à saturation de pompage de lasers à pompage optique dans l'infrarouge lointain, en vue d'améliorer l'efficacité de ces lasers [16,17]. On a pu conclure d'une part à l'apparition dans le cycle du laser d'un goulet d'étranglement dû à la relaxation vibrationnelle, et d'autre part à l'importance de la diffusion des molécules vers les parois. On a fait des mesures de gain dans l'infrarouge lointain ; elles ont montré que les effets de mécanique quantique sont importants dans ces lasers [16]. On a comparé

* Le point 4 a été rédigé par C.O. Weiss (PTB).

diverses géométries de résonateurs (résonateur ouvert, guide d'ondes métallique et résonateurs à guide d'ondes diélectrique de différents diamètres) afin d'améliorer la puissance de sortie à 4 THz. On a obtenu 40 mW dans un laser de 80 cm à guide d'ondes diélectrique de 40 mm de diamètre. On a résolu le problème du "couplage optimal" pour les lasers dans l'infrarouge lointain en mettant au point un coupleur à grille métallique du type Perot-Fabry variable [17]. On est en train de construire un laser à CH_3OH de 100 mW à 4 THz. Lorsqu'il sera achevé, les mesures de fréquence s'étendront jusqu'aux fréquences des lasers à CO_2 .

On a encore amélioré l'efficacité du doublement de fréquence, dans des cristaux de tellure, du rayonnement d'un laser à CO_2 .

Dans le cadre de la poursuite des travaux sur la stabilisation de la fréquence des lasers [18] on fait des expériences sur la résonance de Ramsey d'un jet de méthane.

5. ÉCHELLES DE TEMPS

5.1 $TA(PTB)$, $A(PTB)$

Jusqu'à la fin de 1976, $TA(PTB)$ était une échelle de temps fondée sur des horloges atomiques commerciales comparées de temps en temps à CS1. Depuis mars 1969, on a effectué 22 mesures de ce type et on a obtenu finalement des mesures de la fréquence du TAI.

Pour des raisons qui ne sont pas exactement connues, les horloges atomiques commerciales de la PTB ont, en moyenne, le poids le plus élevé par horloge dans le calcul du TAI selon l'algorithme ALGOS du BIH.

Depuis le début de 1977, l'ancienne échelle de temps $TA(PTB)$ continue à être utilisée sous l'appellation $A(PTB)$ comme échelle de temps interne. On a donné le nom $TA(PTB)$ à une échelle de temps fondée sur l'étalon CS1. On obtient $TA(PTB)$ en appliquant des corrections à $A(PTB)$ et en utilisant une méthode de filtrage pour les mesures de fréquence de $A(PTB)$ avec CS1. Les détails de cette méthode seront publiés ultérieurement.

5.2 $UTC(PTB)$

On a mis au point un algorithme [10] pour déterminer $UTC(PTB)$ à partir de $TA(PTB)$, en utilisant une méthode appropriée de filtrage pour les différences $\text{TAI} - \text{TA}(PTB)$ qui sont

publiées dans la Circulaire D du BIH. Avec cette méthode de pilotage utilisée depuis 1975, l'écart-type de la différence UT(PTB) — UTC était d'environ 0,5 μ s. On considère toutefois qu'il est très décevant qu'à la fin de 1976 un saut artificiel de 0,4 μ s ait été introduit par le BIH dans la différence UTC — UTC(PTB).

5.3 Moyenne des échelles de temps

A la PTB, les échelles de temps des horloges individuelles sont encore combinées en leur attribuant le poids maximal (un) si leur comportement semble normal ou le poids zéro s'il semble anormal. On a publié une étude [9] sur les méthodes de pondération fondées sur les variations de la marche des échelles de temps.

5.4 Temps légal

La Résolution 5 de la 15^e CGPM recommandant UTC comme base de "temps civil" a été très importante pour la rédaction de la nouvelle "Loi sur l'heure" de la Rép. Féd. d'Allemagne. Cette rédaction définit UTC + 1 h (ou + 2 h l'été) comme heure légale et confie la réalisation et la diffusion de celle-ci à la PTB.

(30 mars 1977)

BIBLIOGRAPHIE

1. BECKER (G.), Das primäre Zeit- und Frequenznormal der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, *Jb. Deutsche Ges. Chronom.*, 25, 1974, DGC-A1.
2. BECKER (G.), Recent Progress in Primary Cs Beam Standards at the PTB, *IEEE Trans. Instr. Meas.*, IM-25, 1976, p. 458.
3. FISCHER (B.), Der Einfluss ungleicher Bestrahlung bei der Atomstrahlresonanzapparatur in Ramsey-Anordnung, *PTB-Jahresbericht 1975*, p. 153, 3.1.17.
4. BECKER (G.), Frequenzverschiebung beim Cäsiumstrahl-Frequenznormal durch die Rabi-Resonanz, *PTB-Mitt.*, 87, 1977, p. 288.
5. BECKER (G.), Primary Standards, *Proc. 16th General Assembly IAU*, Grenoble, 1976 (Comm. 31).
6. BECKER (G.), Performance of the Primary Cs-Standard of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt, *Proc. 2nd Frequency Standards and Metrology Symposium*, Copper Mountain, Colorado 80302, USA, 1976, p. 3, edited by NBS, Boulder; *Metrologia*, 13, 1977, p. 99.
7. BECKER (G.), Methode für den Nachweis einer Verschiebung der Cäsiumresonanz im Zeit- und Frequenznormal CS1, *PTB-Jahresbericht 1975*, p. 155, 3.1.21.
8. BECKER (G.), Über die Unsicherheit von primären Cäsiumstrahlnormalen für Zeit und Frequenz, *PTB-Mitt.*, 87, 1977, p. 131.
9. HUBNER (U.) und BECKER (G.), Eine Alternative zum international gültigen Mittelungsverfahren, *Jb. Deutsche Ges. Chronom.*, 25, 1974, DGC-A4.

10. HUBNER (U.), Der Algorithmus zur Berechnung der Amtlichen Zeitskala der PTB, *PTB-Mitt.*, 87, 1977 (à paraître).
 11. KRAMER (G.), Characteristics of W-Ni and W-Co point contacts, precise frequencies of some FIR laser lines, Proc. 2nd Symposium on Frequency Standards and Metrology, Copper Mountain, Colorado, USA, 1976, p. 469, edited by NBS, Boulder.
 12. KRAMER (G.) and WEISS (C.O.), Frequencies of some optically pumped submillimeter laser lines, *Appl. Phys.*, 10, 1976, p. 187.
 13. KRAMER (G.) und WEISS (C.O.), Messung der Frequenzen einiger optisch gepumpter Fern-Infrarot-Laser-Übergänge, *PTB-Jahresbericht 1976*, p. 113, 3.1.4.
 14. WEISS (C.O.) and KRAMER (G.), Vibrational relaxation in the HCOOH-far-infrared-laser, *Appl. Phys.*, 9, 1975, p. 175.
 15. WEISS (C.O.), Pump saturation in molecular far-infrared-lasers, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-12, 1976, p. 580.
 16. HEPPNER (J.) and WEISS (C.O.), Anisotropic gain in an optically pumped cw FIR-laser, *Opt. Comm.*, 21, 1977, p. 324.
 17. WEISS (C.O.), Optically pumped FIR-laser with variable Fabry-Perot output coupler, *Appl. Phys.*, 1977 (à paraître).
 18. KRAMER (G.), WEISS (C.O.) and HELMCKE (J.), Laser frequency stabilization by means of saturation dispersion, *Z. Naturforsch.*, 30a, 1975, p. 1128.
 19. KRAMER (G.) und FISCHER (B.), Der Millman-Effekt in einem primären Zeit- und Frequenznormal, *PTB-Jahresbericht 1975*, p. 154, 3.1.19.
-

ANNEXE S 11

Problèmes liés au pilotage du TAI avec des étalons primaires

par G. BECKER

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Rép. Féd. d'Allemagne)

(Traduction du Document CCDS/77-10)

Les étalons primaires sont nécessaires pour garantir l'exactitude de l'intervalle unitaire du TAI par rapport à sa définition. On peut appeler "pilotage en exactitude" la méthode qui consiste à agir sur la fréquence du TAI afin de conserver l'intervalle unitaire correct. Par ailleurs, les étalons primaires, ainsi que tout autre étalon, peuvent contribuer à la stabilité de la fréquence du TAI. On peut appeler "pilotage en stabilité (de fréquence)" une méthode appropriée reposant sur la stabilité des étalons primaires.

1. PILOTAGE EN EXACTITUDE

1.1 *Écart de fréquence significatif*

D'après la "Mise en pratique du Temps Atomique International" (CCDS, 5^e session, 1970) on ne peut modifier intentionnellement la fréquence du TAI que lorsqu'il existe un écart "significatif" par rapport à la valeur correcte. Lors de cette session du CCDS, on avait indiqué, au cours de la discussion, que "significatif" voulait dire supérieur à 1σ , σ étant l'incertitude du résultat de la mesure.

Selon la Recommandation S 4 (1974), on devait mettre en oeuvre un algorithme mis au point par le BIH pour piloter la

fréquence du TAI. A la suite d'objections faites par la PTB et appuyées par d'autres membres du CCDS, on a différé la mise en oeuvre de l'algorithme de pilotage du BIH afin de permettre de corriger d'abord la fréquence du TAI en introduisant un saut de fréquence pour éliminer l'écart assez important, de l'ordre de 10^{-12} .

Si l'on ne modifie pas la "Mise en pratique ...", le pilotage ne deviendra effectif que lorsque la fréquence du TAI dépassera la limite significative que le CCDS doit définir. Si l'on tient compte du fait que, pour les étalons primaires, il peut exister, par rapport à la valeur réelle, des écarts systématiques qui sont supérieurs à ce qu'en attendent ceux qui se servent de ces étalons, la limite significative suivante σ_L pourrait convenir :

$$\sigma_L^2 = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta F_i}{\sigma_i} \right)^2 + 1 \right] \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}$$

où ΔF_i est l'écart relatif de fréquence mesuré et σ_i est l'incertitude de mesure telle qu'elle est déterminée par le laboratoire i ; n est le nombre d'étalons primaires considérés.

Si les valeurs de ΔF_i sont cohérentes avec celles des σ_i estimés, le résultat est :

$$\sigma_L^2 = \frac{2}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}$$

Cela veut dire que l'on a $\sigma_L = \sqrt{2} \cdot \sigma$, où σ est l'incertitude totale de mesure fondée sur les incertitudes individuelles de mesure.

1.2 Périodicité nécessaire des mesures de la fréquence du TAI

A l'heure actuelle, la modification spontanée de la fréquence du TAI sur un an est inférieure à σ_L . On propose de combiner en un seul résultat toutes les déterminations de fréquence du TAI au cours d'une année.

La question qui se pose est celle de la périodicité nécessaire et souhaitable des mesure de la fréquence du TAI avec un étalon primaire, dans un laboratoire.

D'abord, si on néglige l'incertitude des comparaisons de fréquence entre TA(i) et TAI, une seule mesure par an avec

L'étalon primaire du laboratoire est suffisante si l'incertitude aléatoire de la mesure est petite par rapport à l'écart systématique que, dans cet exemple, on suppose constant. Toutefois, si l'écart systématique varie, cela a un sens de faire des mesures plus fréquemment. Le poids final de ces mesures devrait dépendre de l'écart systématique de la moyenne des résultats par rapport à la valeur vraie, et non du nombre de mesures par an. Un étalon soigneusement réglé à chaque mesure individuelle aura probablement sur un an un écart plus petit qu'un autre étalon de mêmes caractéristiques mais maintenu inchangé. Il s'ensuit qu'un étalon fonctionnant de façon continue et donnant donc un grand nombre de résultats individuels de mesure aurait un poids total pour un an plus faible qu'un autre étalon comparable qui serait moins souvent réglé.

A cause des fluctuations à moyen terme (par exemple 60 jours) du TAI, on conseille d'effectuer plus d'une mesure par an. Le nombre N_i de mesures par an, nécessaire pour maîtriser l'incertitude de la comparaison $TA(i) - TAI$ diffère selon les laboratoires concernés. Si on fait plus de N_i mesures par an, cela ne devrait pas conduire à un poids total pour un an plus grand. A la PTB, on a trouvé avantageux de faire la comparaison de fréquence entre $TA(PTB)$ et TAI à des intervalles supérieurs à 100 jours. Cela limiterait N_i à environ 6, si l'on suppose que les intervalles se chevauchent à 50 %.

D'après ce que l'on a déjà souligné, il ressort que le nombre de mesures significatives par an dépend de la corrélation entre les mesures individuelles, de la stabilité à moyen terme de la fréquence du TAI et de l'incertitude de la comparaison de fréquence entre $TA(i)$ et TAI. En ce qui concerne la corrélation, le BIH ne peut tirer aucun renseignement des valeurs des incertitudes d'une mesure individuelle de la fréquence du TAI avec un étalon primaire, même si on lui communique des renseignements sur l'incertitude systématique et l'incertitude aléatoire : une valeur constante pour l'incertitude systématique ne signifie pas que l'erreur systématique de l'étalon puisse être considérée comme constante.

De plus, le laboratoire qui fait fonctionner l'étalon primaire aura de la peine à déterminer la corrélation entre les mesures individuelles. A la PTB, on a décidé d'indiquer si la mesure est "cohérente" ou non avec le précédent résultat, en plus des résultats de mesure qui sont communiqués au BIH. La mesure est non cohérente si des changements ou des réglages

importants sont intervenus entre les mesures. On s'attend à ce que des mesures cohérentes aient une plus faible dispersion, ce qui correspond à une corrélation plus forte.

En étudiant toutes les raisons pour effectuer une mesure de la fréquence du TAI plus d'une fois par an, on est conduit à estimer que pas plus de 6 mesures par an (à intervalles approximativement réguliers) sont nécessaires pour tout laboratoire qui fait fonctionner un étalon primaire.

1.3 Méthode de pilotage

En accord avec la "Mise en pratique ..." il ne faut pas modifier le TAI si le résultat annuel de la mesure de la fréquence selon 1.2 fait apparaître que l'écart relatif de fréquence ΔF est inférieur à σ_L . Si, toutefois, il arrive que $|\Delta F| > \sigma_L$, la fréquence du TAI doit alors être pilotée avec une dérive intentionnelle constante déterminée de telle sorte que, théoriquement, on atteint $\Delta F = 0$ au bout d'un certain nombre d'années. Il faudra que le CCDS définisse ce nombre, par exemple 2 ans. Le pilotage avec dérive doit être arrêté avant que $\Delta F = 0$ ne soit atteint, par exemple pour $|\Delta F| = \sigma_L/2$. En d'autres termes, le pilotage ne durera qu'un an et ramènera la fréquence du TAI dans les limites de $\pm \sigma_L$.

La méthode proposée est fondée sur les deux notions suivantes :

- a. Dans toute la mesure du possible, il faut réduire les manipulations de la fréquence du TAI.
- b. On ne peut spécifier de façon convaincante aucun écart de fréquence dans les limites de $\pm \sigma_L/2$ (c'est-à-dire $\pm \sigma/\sqrt{2}$) ; la courbe de distribution gaussienne est assez plate dans cette région.

2. PILOTAGE EN STABILITÉ

Pour le pilotage en stabilité, contrairement à ce qu'il en est avec le pilotage en exactitude, l'incertitude d'un étalon primaire participant est sans importance, puisque des résultats de mesure fortement corrélés sont souhaitables. Il semble par conséquent que c'est comme si le fonctionnement des étalons primaires ne pouvait être optimal à la fois pour le pilotage en exactitude et pour le pilotage en stabilité.

La question se pose de savoir si, à l'heure actuelle, il est nécessaire d'avoir un pilotage en stabilité qui utilise des

étalons primaires. A la PTB, on considère que les variations de fréquence, regrettables et assez fortes, à court terme (par exemple 10 jours) et à moyen terme (par exemple 60 jours) ne sont pas dues au manque d'horloges stables participantes, mais au problème de la variation des durées de transmission.

Avec le système actuel de comparaisons de temps au moyen du LORAN-C et le problème des retards variables dans les récepteurs locaux, il semble impossible d'obtenir une amélioration de la stabilité de fréquence à court et à moyen terme.

Quelle serait la conséquence de la mise au point par un laboratoire d'un certain nombre d'horloges particulièrement bonnes ? Ces horloges devraient avoir et auraient un poids très fort ; il en résulterait que les variations de durée de transmission survenant dans ce laboratoire se traduiraient par des variations de la fréquence du TAI pour tous les autres laboratoires participant à l'établissement du TAI. En conséquence, pour de nombreux utilisateurs, le TAI, tel qu'il est disponible dans leur laboratoire, deviendrait plus mauvais.

Le pilotage en stabilité au moyen d'étalons primaires deviendra certainement important quand les transmissions de l'heure à l'aide des satellites deviendront plus courantes. Comme le problème du pilotage en exactitude est plus important, le CCDS doit en premier lieu porter toute son attention sur ce problème.

(30 mars 1977)

ANNEXE S 12

Rapport pour la 8^e session du CCDS

National Research Laboratory of Metrology

et

Radio Research Laboratories (Japon)

(Traduction du Document CCDS/77-11)

Ce rapport concerne l'ordre du jour de la 8^e session du CCDS et expose un certain nombre de points de vue des membres du sous-comité Temps et Fréquence du Comité National Japonais de Métrologie.

1. TRAVAUX SUR LES ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE

Au NRLM, on effectue depuis 1971 des recherches sur le résonateur à césium du type laboratoire. On a amélioré le premier résonateur, NRLM-I, en l'équipant d'un guide d'ondes souple dans le système d'alimentation en micro-ondes et en réalisant un vide plus poussé. En 1975, on a construit le nouveau résonateur, NRLM-II ; il a une longueur d'interaction de 1,2 m et un blindage magnétique à trois couches.

La stabilité des deux résonateurs est caractérisée par $\sigma_y(\tau) = 8 \times 10^{-12} \tau^{-\frac{1}{2}}$ pour une durée d'intégration τ inférieure à 10^3 s. Le palier de bruit de scintillation atteignait $1,5 \times 10^{-13}$ pour NRLM-I ; on l'estime à 5×10^{-14} pour NRLM-II.

A la suite des résultats expérimentaux sur les déplacements de fréquence dus à la phase dans la cavité, à la puissance et à la modulation, on a apporté des améliorations à l'uniformité du champ C et à la méthode de modulation des micro-ondes. De plus, on construit une nouvelle cavité du type Ramsey pour supprimer la différence de phase dans la cavité.

Aux Radio Research Laboratories, on a construit en 1976 deux autres masers à hydrogène ; on les a conçus essentiellement de façon à obtenir une meilleure stabilité à long terme, d'après l'expérience acquise avec le premier type. On procède actuellement à des réglages de précision sur ces masers qui serviront d'étalons de travail.

De plus, on construit actuellement un tube à jet de césium du type laboratoire qui sera utilisé à titre expérimental comme étalon de travail. Pour l'optique du faisceau on a adopté la méthode "flop-out" avec deux aimants hexapolaires. Le champ C, parallèle à l'axe du faisceau, est produit par un solénoïde monté à l'intérieur d'un blindage magnétique cylindrique à trois couches. La cavité du type Ramsey, constituée d'un guide d'ondes rectangulaire, est un résonateur en H à modes d'ordres pairs ; elle est couplée à une source de micro-ondes par une jonction en T dans le plan E. On en est actuellement à la mesure précise de la phase sur le premier modèle de la cavité (52 cm de longueur) ; on a observé la transition à basse fréquence entre composantes Zeeman afin d'effectuer l'alignement du faisceau et de vérifier l'uniformité du champ C.

On donne certains détails techniques dans un autre document (voir Annexe S 13).

2. COMPARAISON INTERNATIONALE D'HORLOGES PAR SATELLITES

Il est extrêmement urgent qu'un bon nombre d'horloges atomiques au Japon, ainsi qu'en Extrême-Orient, contribuent effectivement à l'élaboration du TAI grâce à des comparaisons plus directes et plus fréquentes d'horloges avec les autres échelles de temps conservées par le BIH et les autres laboratoires intéressés ; toutefois, des efforts continus et appréciables ont été faits jusqu'ici par les organismes américains pour le fonctionnement des systèmes Loran-C et OMEGA et en particulier pour les transports d'horloges. En conséquence, dans la situation actuelle d'isolement où se trouve le Japon à l'égard des comparaisons intercontinentales d'horloges, nous sommes en fait intéressés par la réalisation de comparaisons d'horloges au moyen des satellites.

En tant que méthode bidirectionnelle perfectionnée, une expérience utilisant ATS-1 a été réalisée en 1975 entre les RRL et la NASA avec l'aimable coopération de la NASA et de l'USNO. La précision et l'exactitude atteintes dans cette comparaison

d'horloges ont été de l'ordre de 1 ns et 10 ns respectivement. Comme cette expérience a montré les possibilités de cette technique pour une comparaison intercontinentale de grande précision, on souhaite mettre en oeuvre cette méthode de façon régulière grâce à des accords internationaux.

En temps que méthode unidirectionnelle prometteuse déjà utilisée, le "Global Positioning System" (GPS) des États-Unis a fait de tels progrès que l'on atteint une exactitude meilleure que 100 ns dans les comparaisons d'horloges. Il convient de noter que, dans l'état actuel des choses, l'exactitude de 100 ns, bien que modeste, a une grande importance pour notre problème des comparaisons d'horloges entre continents, car un grand nombre de résultats peuvent être fournis de façon continue.

Il s'ensuit que nous souhaitons établir, aussi rapidement que possible, un réseau complet pour les comparaisons d'horloges au moyen des satellites du GPS, parallèlement avec les transports courants d'horloges faisant l'objet d'accords internationaux.

(28 mars 1977)

Étude d'un étalon à jet de césium

par M. KOBAYASHI, K. NAKAGIRI, S. URABE, M. SHIBUKI et Y. SABURI

Radio Research Laboratories (Japon)

(Traduction du Document CCDS/77-12)

Aux Radio Research Laboratories, on est en train de construire un tube à jet de césium du type laboratoire pour une utilisation expérimentale comme étalon de travail. On a observé la raie de Zeeman à basse fréquence afin de réaliser l'alignement du faisceau et de vérifier l'uniformité du champ C. Le réglage précis de la phase dans la cavité de Ramsey, dont la longueur d'interaction est d'environ 52 cm, est en cours ainsi que la préparation de la partie électronique nécessaire.

Les caractéristiques de ce tube sont les suivantes :

1. *Optique du jet*

La disposition de l'optique du jet est donnée à la figure 1. L'aimant sélecteur d'états est hexapolaire ; il a 6 cm de longueur, 3,0 mm de diamètre et il produit un champ magnétique d'intensité 8000 Oe aux pièces polaires. L'intensité du champ a été mesurée avec une sonde à effet Hall à couche mince, de 0,3 mm de largeur ; sa répartition s'est révélée satisfaisante. Dans l'optique du jet, on utilise la méthode "flop-out" avec une surface de détection de 1,5 mm de diamètre.

A l'aide d'un ordinateur, on a calculé la trajectoire du jet en tenant compte :

a) de l'aire finie du collimateur du jet (source non ponctuelle) ;

- b) de la relation entre le moment dipolaire effectif et la position dans l'aimant ;
- c) de la composante transversale du mouvement des atomes.

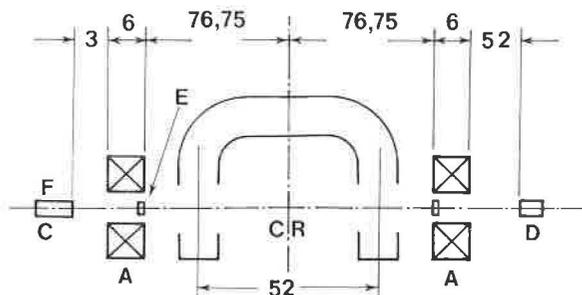


Fig. 1.- Optique du jet de l'étalon à césium (cotes en centimètres).
F,C, four et collimateur ; E, écran (diamètre 1,0 mm) ; A, aimant ; CR, cavité de Ramsey ; D, détecteur.

D'après les résultats, les conditions optimales apparaissent clairement pour les différents paramètres de l'optique du jet tels que la position et l'aire de détection du jet, la distance entre le four et l'aimant, la dimension du collimateur, etc. A titre d'exemple, la figure 2 donne la distribution des

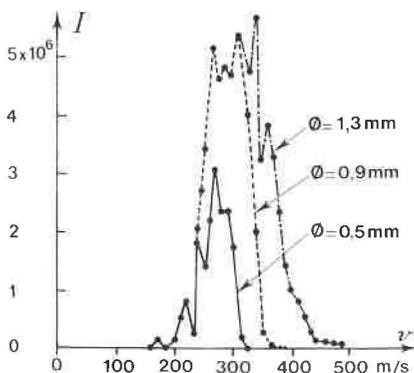


Fig. 2.- Distribution des vitesses pour différents diamètres du collimateur.

En ordonnées : I , intensité (nombre d'atomes détectés) ; en abscisses : v , vitesse des atomes.

La fréquence est décalée de $\Delta f = 125$ Hz par rapport à la résonance.

vitesses calculée pour différents diamètres du collimateur à une fréquence décalée de $\Delta f = 125$ Hz par rapport à la résonance. Comme il y a un bon accord entre l'intensité du jet mesurée et l'intensité calculée, on pense que, en raison du bruit de grenaille du jet, la stabilité de la fréquence se situera à environ

1×10^{-11} pour $\tau = 1$ s en utilisant la méthode "flop-out".

2. Blindage magnétique et champ C

La figure 3 donne les dimensions du blindage magnétique à trois couches et du solénoïde pour le champ C. La désaimantation du blindage peut être effectuée en faisant passer directement dans le matériau du blindage le courant maximal (40 A) d'une alimentation commerciale. On a mesuré un facteur de protection d'environ 7000.

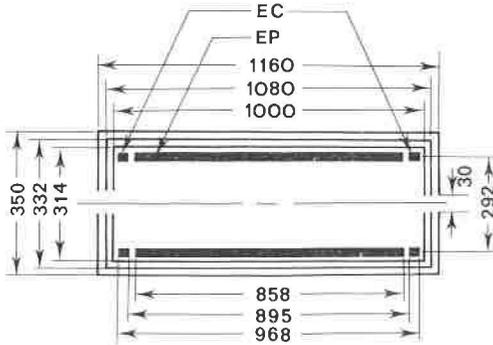


Fig. 3.- Blindage magnétique et solénoïde pour le champ C
(cotes en millimètres).

EP, enroulement principal ; EC, enroulement de correction.

L'effet de miroir produit par le blindage sur la répartition du champ C a été calculé en supposant infinie la perméabilité du matériau du blindage et en négligeant l'effet des ouvertures aux extrémités.

La figure 4 montre la répartition mesurée (I) pour le courant dans les enroulements de correction ainsi que deux répartitions calculées (II, III). Le léger désaccord qui existe entre I et III est probablement dû à l'effet des ouvertures ainsi qu'au décalage du zéro du fluxmètre. La variation crête à creux du champ magnétique dans la région d'interaction est d'environ 0,07 %, ce qui entraînera une inexactitude inférieure à 5×10^{-14} sur la fréquence.

3. Cavité

La figure 5 représente la structure de la cavité, dont la conception tient compte de la direction du champ C et du mode désiré pour la cavité. Celle-ci fonctionne sur des modes de résonance d'ordre pair excités au moyen d'une jonction en T dans le plan E. Les longueurs des deux bras sont égales à partir du centre de la jonction en T, mais les ouvertures pour le

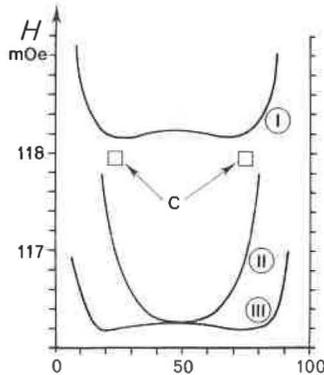


Fig. 4.- Répartition du champ magnétique le long de l'axe du solénoïde.

En ordonnées : H, champ magnétique ; en abscisses : distance, en centimètres, mesurée le long de l'axe du solénoïde.

I, répartition mesurée : courant dans l'enroulement principal $I_0 = 100$ mA, dans l'enroulement de correction $I_C = 225$ mA ;

II, répartition calculée : $I_0 = 100$ mA, $I_C = 200$ mA ;

III, répartition calculée : $I_0 = 100$ mA, $I_C = 225$ mA.

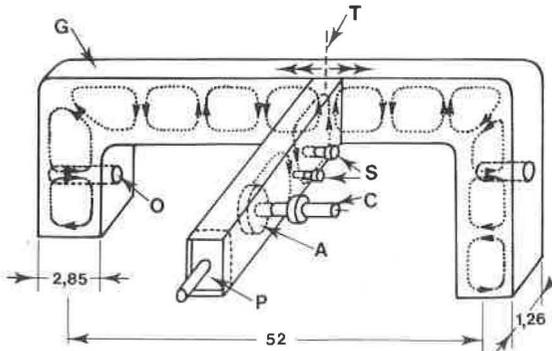


Fig. 5.- Cavité en H, à modes d'ordre pair et jonction en T dans le plan E (cotes en centimètres).

G, guide d'ondes WRJ-9 ; T, point d'alimentation par la jonction en T ; O, ouverture pour le passage du jet de césium ; S, "stub" ; C, coaxial ; A, adaptateur coaxial - guide d'ondes ; P, piston de court-circuit.

passage du jet ne sont pas disposées symétriquement. L'une est située à une demi-longueur d'onde de l'extrémité de la cavité et l'autre à une longueur d'onde. La précision sur la position de l'ouverture doit être d'environ 0,35 mm afin que le déplacement de fréquence dû à la différence de phase soit inférieur à 1×10^{-13} .

La méthode de réglage de la phase dans la cavité est dans

son principe semblable à celle qui a été mise au point par A.G. Mungall *et al.* au NRC. Dans notre cas, le réglage, qui utilise les modes d'ordre impair, est réalisé en effectuant un décalage de fréquence, ainsi qu'en déplaçant la jonction en T. La figure 6 donne, pour le premier modèle de cavité, un

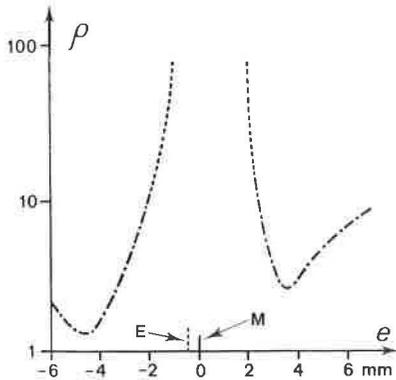


Fig. 6.- Mesure du taux d'ondes stationnaires à l'entrée pour le réglage de la phase (Mode : $N = 33$; $f = 8,942\ 812$ GHz).

En ordonnées : ρ , taux d'ondes stationnaires à l'entrée ; en abscisses : e , défaut de centrage mécanique du point d'alimentation ; E, centre électrique ; M, centre mécanique.

exemple de la valeur mesurée du taux d'ondes stationnaires à l'entrée pour un mode d'ordre impair ($N = 33$). On peut faire un réglage fin en observant le degré de symétrie des diagrammes des taux d'ondes stationnaires ; il dépend de la différence entre la longueur électrique et la longueur mécanique. Comme le résultat expérimental concorde bien avec le résultat calculé, le déplacement de fréquence dû à la différence de phase sera réduit à quelques 10^{-13} grâce à cette méthode de réglage.

(28 mars 1977)

ANNEXE S 14

**Rapport de l'ASMW (Rép. Dém. Allemande)
pour la 8^e session du CCDS**

(Document CCDS/77-13)

Ce rapport concerne les activités et les opinions de l'ASMW au sujet des points prévus à l'ordre du jour de la 8^e session du CCDS.

Point 1

L'ASMW a commencé la mise au point d'un résonateur à jet de césium en tant qu'étalon primaire de fréquence.

Actuellement, deux horloges atomiques commerciales sont utilisées comme étalons de référence pour les échelles de temps de l'ASMW ainsi que pour les signaux horaires et les fréquences étalons de l'ASMW.

Point 2

Une prise de position sur ce point sera remise, le cas échéant, après avoir reçu le rapport prévu du BIH.

Point 3

Pour les comparaisons nationales, on utilise les signaux de la Télévision de la RDA, stabilisés depuis le début de l'année 1976 par une des deux horloges atomiques de l'ASMW. Des comparaisons régulières sont effectuées avec le Zentralinstitut Physik der Erde, Potsdam (ZIPE), qui dispose également d'une horloge atomique (12 979). Sur la base des trois horloges atomiques, une échelle de Temps Atomique provisoire TA(DDR) est calculée.

Pour les comparaisons internationales, l'ASMW utilise des signaux de télévision et aussi, depuis le milieu de l'année 1976, les signaux du LORAN-C.

En particulier, on réalise quotidiennement des comparaisons par signaux de télévision entre l'UTC(ASMW) et

- l'Ustav Radiotechniky a Elektroniky, Praha, Tchécoslovaquie (UTC(TP)),
 - le Polski Komitet Normalizacji i Miar, Warszawa, Pologne (UTC(PKNIIM)),
- ainsi qu'entre le ZIPE et le Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg, Rép. Féd. d'Allemagne (UTC(DHI)).

On reçoit l'émetteur 7970-W-Sylt pour les comparaisons aux signaux du LORAN-C. D'ailleurs, des essais en cours visent à effectuer des comparaisons avec les signaux du système de radionavigation soviétique, l'UTC(PKNIIM) et l'UTC(SU).

Au cours de l'année 1976, l'ASMW a réalisé trois comparaisons par transport d'horloges atomiques avec UTC(TP), UTC(PKNIIM) et UTC(SU). Les résultats en ont été publiés par le BIH (Circulaire D).

Nos expériences démontrent que les comparaisons par télévision sont de qualité égale ou supérieure à celle des comparaisons effectuées par le LORAN-C, lorsqu'il s'agit de distances pas trop importantes et surtout lorsque deux instituts peuvent recevoir des émetteurs d'un même réseau de télévision, tandis que pour des distances plus importantes seuls les signaux du LORAN-C sont utilisables. Il est d'ailleurs nécessaire de vérifier les durées de propagation des signaux par les transports d'horloges atomiques.

Pour ces transports, il faut utiliser la voiture de préférence à l'avion.

Point 4

L'heure officielle de la RDA est pratiquement basée sur l'échelle de temps UTC(ASMW), puisque les signaux horaires servant à la diffusion de l'heure officielle (signaux horaires de la radiodiffusion, émetteur de signaux horaires DIZ, etc.) sont dérivés de cette échelle de temps. À l'aide des horloges atomiques existantes, l'échelle de temps UTC(ASMW) est rendue aussi proche que possible de l'UTC. La relation entre l'échelle de temps officielle de la RDA et l'UTC(ASMW) sera légalisée à partir de 1978 par une norme.

Point 5

Depuis le 1^{er} janvier 1977, l'ASMW tient compte de la recommandation de l'UAI au sujet de la modification de la durée de l'intervalle unitaire du TAI.

Pour l'avenir, il serait souhaitable de fixer les compétences des différentes organisations internationales concernant l'adoption de recommandations générales au sujet des différentes échelles de temps (UT, UTC, TAI, etc.) et des émissions de signaux horaires et de fréquences étalons.

(24 mars 1977)

ANNEXE S 15

Contribution du NPL (Royaume-Uni) pour la 8^e session du CCDS

(Traduction du Document CCDS/77-14)

1. PROGRÈS DES ÉTALONS ATOMIQUES DE TEMPS ET DE FRÉQUENCE

On a poursuivi la mise au point et l'étude de l'étalon primaire à césium NPL III ; cela a duré nettement plus longtemps que prévu. Un certain nombre de modifications, tant dans la construction que dans le fonctionnement, ont été introduites au cours des deux dernières années et nous en sommes actuellement au stade final de l'étude. En l'absence de maser à hydrogène, la référence de fréquence de travail est constituée par deux étalons commerciaux à césium équipés de tubes à hautes performances ; cela impose nécessairement une limite inférieure de quelques 10^{-14} à l'incertitude sur l'évaluation de certains décalages significatifs dans l'étalon primaire. Nous résumons ci-après les principaux paramètres de fonctionnement de l'appareil modifié.

Pour la commodité des mesures, la différence de fréquence entre les composantes Zeeman du niveau hyperfin a été fixée à 60 kHz exactement, ce qui correspond à un champ d'environ 6,8 A/m et à un décalage de fréquence de 3,143 Hz. Le champ C est maintenant obtenu au moyen de deux bobinages en hélices de sens inverse pour annuler la composante axiale du courant ; les

enroulements d'ajustage à chaque extrémité sont bobinés de la même façon. Le champ est échantillonné au moyen de sept bobines disposées transversalement le long du jet ; les variations maximales trouvées sont de $\pm 0,25 \%$, ce qui peut entraîner une erreur de 2×10^{-14} , essentiellement due aux fluctuations du champ au voisinage de l'une des cavités. Au cours d'essais répétés, on n'a observé, avec la résolution des étalons de travail, aucune variation de fréquence consécutive au renversement de la direction du champ C.

L'erreur de phase dans la cavité pour une excitation de Ramsey constitue un facteur essentiel dans l'ensemble des erreurs et l'on a essayé pour NPL III plusieurs cavités de conceptions différentes. Celle que l'on a finalement adoptée est une version très simplifiée de la configuration à section torse ("twisted") utilisée antérieurement. Elle consiste en une cavité en U, électriquement symétrique mais physiquement un peu dissymétrique, le jet traversant les bras de la cavité en deux points dont les distances par rapport au point d'alimentation diffèrent entre elles de $\lambda_g/2$. Cela assure la relation de phase correcte au prix d'un accroissement du décalage de phase différentiel pour les atomes aux niveaux énergétiques supérieur et inférieur ; cela exige aussi une précision un peu plus grande dans l'usinage des ouvertures pour le passage du jet. La cavité, dans sa nouvelle version entièrement réalisée par électroformage, devrait permettre de réduire le décalage de phase (actuellement de l'ordre de 10^{-4} rad) à environ 10^{-5} rad.

Bien que l'étalon NPL III comporte un ensemble four et détecteur à chaque extrémité afin de déterminer, par renversement du jet, l'erreur due à l'écart de phase dans la cavité, cette méthode ne convient pas actuellement, le signal de fond étant trop élevé pour l'une des deux directions du jet. On utilise maintenant l'autre méthode qui consiste à retourner la cavité : toute la partie centrale de l'appareil est enlevée et retournée bout pour bout. On a utilisé cette technique plusieurs fois et on a trouvé qu'il était possible de remettre le jet en fonctionnement moins de 48 heures après avoir effectué le changement.

Le système d'excitation de NPL III repose maintenant sur un oscillateur Gunn asservi par injection ; la fréquence d'asservissement est obtenue en mélangeant les fréquences 9 180 MHz et $(12\ 631\ 773,14 \pm 90)$ Hz, cette dernière fréquence étant obtenue à l'aide d'un synthétiseur numérique et commutée à la fréquence de 0,25 Hz avec un temps de commutation inférieur

à 20 μ s. L'amplitude de résonance se situe généralement dans le domaine de 3 à 6 pA avec des courants de jet de 10 à 15 pA, bien que l'on ait produit des courants atteignant 30 pA pendant des durées limitées. On a récemment installé un spectromètre de masse de conception semblable à celui que l'on utilise avec NPL II pour éliminer les pointes de courant indésirables dans le jet.

2. TRANSMISSION DE LA FRÉQUENCE ET DU TEMPS

En accord avec la Recommandation S 3 (1974) et la Résolution I.1 (1975) de l'URSI, l'attention a été portée sur les diverses façons de réaliser des transmissions précises de fréquence et de temps aussi bien sur des distances moyennes que sur de longues distances. En particulier, on cherche ainsi à compléter les comparaisons qui se font actuellement au moyen du Loran-C dans la zone européenne, et aussi à étendre les transmissions de temps vers l'hémisphère sud sur une base plus régulière.

En collaboration avec le Van Swinden Laboratorium (VSL), La Haye, on fait des recherches sur les possibilités d'une liaison troposphérique pour les transmissions de temps au-dessus de la Mer du Nord, en utilisant les émissions de télévision de la station de Sudbury, proche de la côte britannique. On reçoit ces émissions quotidiennement à Teddington et la référence choisie sur la ligne 1 est reliée à UTC(NPL) ; compte tenu de la distance d'environ 240 km on s'attend à une réception intermittente au VSL. On est en train de rassembler des résultats qui, joints aux résultats des ballons-sondes dans la basse atmosphère à l'extrémité occidentale du trajet, permettront de faire des calculs préliminaires de la durée de propagation entre Sudbury et La Haye. Les positions relatives de UTC(NPL) et UTC(VSL) peuvent être déduites de la Circulaire D du BIH mais elles seront confirmées par une comparaison indépendante au moyen d'horloges transportables entre les deux laboratoires.

Une coordination précise de l'heure a été maintenue avec la station de Chilbolton Field (Appleton Laboratory), qui constitue l'une des extrémités d'un interféromètre à très longue base, l'autre extrémité étant l'Algonquin Radio Observatory, Ontario ; la longueur de la base est de 5 260 km. Une nouvelle série d'observations commencera en mai 1977 : elles seront

combinées à d'autres expériences utilisant les satellites pour établir de façon indépendante les coordonnées de la base ; celles-ci étant alors bien définies, il sera possible de relier avec une bonne certitude la vitesse de défilement des franges observées à la différence entre les fréquences des oscillateurs de référence à chaque extrémité de la base ; on espère atteindre une incertitude de 1×10^{-13} .

En coopération avec le Post Office, on étudie la possibilité d'une comparaison de temps à l'aide du satellite de communications INTELSAT-IV A, pour réaliser la liaison entre les horloges du Royaume-Uni et d'Afrique du Sud. L'initiative de cette comparaison est venue du National Physical Research Laboratory, Pretoria, et le NPL a proposé que les méthodes de synchronisation propres au système de "Time Division Multiple Access" (TDMA) constituent la base d'une telle transmission, non seulement dans ce cas mais aussi sur des zones bien plus grandes, compte tenu du fait que 165 stations terrestres, réparties dans 80 pays, participent déjà aux télécommunications mondiales.

Dans le TDMA tel qu'il a été prévu pour être utilisé avec les satellites pour les communications commerciales, chaque station terrestre transmet ses messages à des instants spécifiés à l'intérieur d'un système de "fenêtres" (en général de 750 μ s). Une impulsion émise par une station de référence définit le début de la fenêtre ; cette impulsion est reçue par toutes les autres stations qui règlent les instants de leur propre émission de façon que celle-ci arrive au satellite dans les limites de temps prescrites. Au cours des années récentes, divers équipements expérimentaux fonctionnant de cette façon ont été essayés ; ils pourraient être adaptés pour réaliser des transmissions de temps avec une incertitude de quelques dizaines de nanosecondes. Toutefois, l'équipement terminal est très coûteux et la méthode nécessite l'utilisation de la totalité du répondeur du satellite et de puissants émetteurs dans les stations terrestres.

En conséquence, le Post Office a conçu un système de synchronisation⁽¹⁾ qui substitue aux impulsions numériques une sinusoïde de référence à la fréquence de répétition de la fenêtre et remplace, à chaque émetteur, la comparaison impulsion à impulsion par une comparaison fine de phase entre la référence

(1) JEFFERIS (A.K.), HODSON (K.), New synchronisation scheme for communication satellites time division multiple access systems, *Electronics Lett.*, 9, 1973, p. 566.

et le signal local correspondant. Des essais récents avec le satellite atlantique INTELSAT-IV A ont donné de bons résultats qui correspondent à une précision de synchronisation de ± 67 ns pendant 98 % du temps ; toutefois, d'après la théorie, cette précision pourrait atteindre ± 30 ns. On envisage d'autres essais à la station terrestre du Royaume-Uni, avec un signal en circuit fermé de Goonhilly à Goonhilly, pour vérifier l'exactitude de la méthode en comparant les durées de transmissions mesurées aux valeurs calculées à partir des paramètres orbitaux du satellite. L'expérience pourra alors être étendue à partir de Goonhilly au terminal au sol de Hartebeesthoek en Afrique du Sud.

(14 avril 1977)

Commentaires de J. Kovalevsky

Bureau des Longitudes (France)

(Document CCDS/77-15)

...

J'ai été frappé par les résultats décrits par D.W. Allan et ses collaborateurs et j'estime qu'il serait bon que, d'une manière ou d'une autre, les résultats de transports d'horloges soient introduits dans l'algorithme de pilotage du TAI. De même, il semble apparaître dans certains rapports que l'incertitude sur la comparaison d'horloges due aux erreurs de transmission soit plus importante que celle qui est due aux fluctuations internes de l'étalon. Ne faudrait-il pas que, dans l'analyse, les deux causes d'erreur soient séparées et qu'on en tienne compte indépendamment ? Ainsi, un étalon donné aurait un σ fixé pour la durée de sa vie, mais le σ dû aux transmissions pourrait évoluer en fonction des améliorations des techniques de transmission et de rattachement des horloges au BIH (techniques qui vont évoluer grâce aux satellites).

Par ailleurs, j'ai été destinataire pour information d'échanges de lettres entre des membres de l'UAI au sujet de la résolution n° 1 de l'UAI, et plus particulièrement au sujet de la dénomination GMT. J'ai eu aussi l'occasion d'en parler à Mlle E. MÜLLER, secrétaire générale de l'UAI. Je suis d'avis, de même que E. Müller, que cette affaire doit pour l'instant rester strictement interne à l'UAI et qu'il n'y a aucune raison de revenir sur le texte adopté à Grenoble.

...

(22 avril 1977)

ANNEXE S 17

Contribution de l'IEN (Italie) pour la 8^e session du CCDS

(Traduction du Document CCDS/77-16)

ÉTALONS DE FRÉQUENCE

Il y a quelques années, on a proposé un nouvel étalon à jet d'atomes de magnésium ou de calcium [1]. Un appareil expérimental a été construit à l'Université de Pise [2,3], avec l'aide de l'IEN.

Un second appareil à jet de magnésium a été construit dans le nouveau laboratoire de l'IEN ; des essais ont été faits sur la formation du jet et la sélection des états. Des travaux sont en cours pour améliorer l'efficacité de la décharge et la sélection de la vitesse des atomes.

L'effort essentiel a porté sur la synthèse et la mesure de quelques sources d'ondes millimétriques destinées à exciter la transition des atomes de magnésium.

Cet effort a été fait afin d'accroître :

- la pureté spectrale des sources,
- la puissance disponible à 601 GHz.

Pureté spectrale des sources

Quelques recherches théoriques et expérimentales ont été faites pour étudier le comportement général d'une chaîne de multiplication de fréquence du point de vue du rapport signal/

bruit à l'extrémité de la chaîne [4,5]. Ces recherches ont conduit à une théorie simplifiée qui donne le facteur de multiplication de fréquence maximal que l'on peut obtenir en utilisant les sources disponibles.

Cette étude a permis de mieux comprendre les diverses raisons de l'instabilité de fréquence qui affecte les chaînes de multiplication [6,7,8] ; elle a permis des mesures de pureté spectrale dans les régions millimétrique et submillimétrique [9,10]. A l'heure actuelle, on peut utiliser les chaînes de multiplication jusqu'à une fréquence de 30 THz.

Accessoirement, on étudie l'utilisation de résonateurs froids comme référence de fréquence pour les oscillateurs.

Accroissement de puissance des sources submillimétriques

La puissance disponible à la sortie des chaînes de multiplication de fréquence ne convient pas en spectrométrie des micro-ondes sur des jets atomiques dans la région submillimétrique. En conséquence, des recherches ont été faites à l'Université de Pise et à l'IEN, sur un laser infrarouge lointain. Dans ce domaine, on a construit, à Pise, deux lasers à CH_3F fonctionnant dans l'infrarouge lointain [11], on a mesuré leurs fréquences de sortie [12] et on a étudié [13] et vérifié [14] la possibilité d'accord par effet Stark.

Deux autres lasers fonctionnant dans l'infrarouge lointain sont en construction à l'IEN.

(Avril 1977)

BIBLIOGRAPHIE

1. STRUMIA (F.), A proposal for a new absolute frequency standard, using a Mg or Ca Atomic Beam, *Metrologia*, 8, 1972, pp. 85-90.
2. STRUMIA (F.), MINGUZZI (P.), FRANCESCONI (M.) and BENEDETTI (R.), Mg frequency standard : optimization of the metastable atomic beam, *Proc. Freq. Contr. Symp.*, 1974, pp. 350-354.
3. STRUMIA (F.) and MINGUZZI (P.), Recent progress towards a sub-millimeter frequency standard, *Proc. 2nd Frequency Standards and Metrology Symposium*, 1966, pp. 65-81.
4. BAVA (E.), BAVA (G.P.), Misure di purezza spettrale in catene di moltiplicazione di frequenza, *Alta Frequenza*, July 1975.
5. DE MARCHI (A.) and WALLS (F.), RF spectrum of a signal after frequency multiplication : measurement and comparison with a simple calculation, *IEEE Trans.*, IM-24, Sept. 1975.
6. BAVA (E.), BAVA (G.P.), DE MARCHI (A.) and GODONE (A.), Measurements of static AM-PM conversion in frequency multipliers, *IEEE Trans.*, IM-26, March 1977.

7. BAVA (E.), BAVA (G.P.), GODONE (A.) and RIETTO (G.), Analysis of varactor frequency multipliers : non linear behaviour and hysteresis phenomena (à paraître).
 8. BAVA (E.), BAVA (G.P.), GODONE (A.) and RIETTO (G.), Amplitude and phase fluctuations in varactor doubler (à paraître).
 9. BAVA (E.) and GODONE (A.), Frequency multiplication up to the sub-millimeter wave region, *Alta Frequenza*, Oct. 1975.
 10. BAVA (E.), DE MARCHI (A.) and GODONE (A.), Spectral analysis of synthesized signals in the mm wavelength region, *IEEE Trans.*, *IM-26*, June 1977.
 11. MINGUZZI (P.) and TONELLI (M.), Recent progress in the development of CH_3F optically pumped FIR lasers (à paraître dans *Alta Frequenza*).
 12. BAVA (E.), DE MARCHI (A.), GODONE (A.), BENEDETTI (R.), INGUSCIO (M.), MINGUZZI (P.), STRUMIA (F.) and TONELLI (M.), Frequency measurement of the $496 \mu\text{m}$ line of CH_3F FIR laser, *Optics Communication*, *21*, 1977, pp. 46-48.
 13. INGUSCIO (M.), MINGUZZI (P.) and STRUMIA (F.), Stark tunability of a CH_3F far infrared laser, *Infrared Physics*, 1976, pp. 453-456.
 14. INGUSCIO (M.), MINGUZZI (P.) and TONELLI (M.), Evidence for Stark induced frequency shifts in a CH_3F FIR laser, *Optics Communication*, *21*, 1977, pp. 208-210.
-

L'étalon national primaire de temps et de fréquence de l'U.R.S.S. en 1976

par S. B. POUCHKINE et V. SAGINE

Gosstandart (U.R.S.S.)

(Traduction du Document CCDS/77-17)

L'étalon national primaire de temps et de fréquence de l'U.R.S.S. est la base de toutes les mesures de ce type dans notre pays. L'étalon comporte des systèmes (fig. 1) qui fournissent les unités de fréquence et d'intervalle de temps, qui constituent une horloge à fonctionnement continu dans les

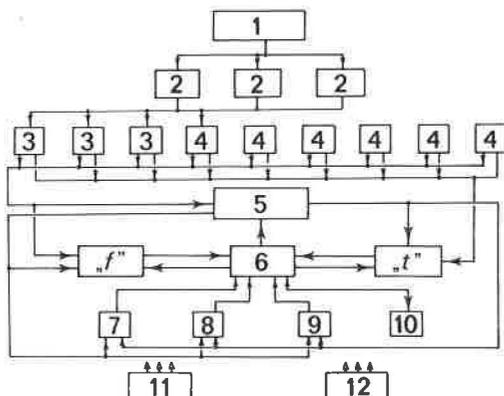


Fig. 1.

1, étalon de fréquence à jet de césium ; 2, étalon de fréquence à hydrogène ; 3,4, horloges à césium et à hydrogène ; 5, échelle de travail UTC(SU)_w ; 6, appareillage de comparaison interne ; 7,8,9, appareils de comparaison externe ; 10, horloge transportable ; 11,12, appareils de contrôle.

échelles de temps atomique et de temps universel coordonné de l'U.R.S.S. et qui permettent de faire des comparaisons externes et internes d'étalons. Les dispositifs auxiliaires de l'étalon garantissent une alimentation ininterrompue et la mesure continue des principaux paramètres de l'étalon et de son environnement. Les systèmes qui assurent la reproductibilité et le fonctionnement en horloge, et sur lesquels repose la réalisation des unités de fréquence et d'intervalle de temps ainsi que la formation des échelles de temps TA(SU) et UTC(SU), constituent la base de l'étalon national. L'étalon de fréquence de laboratoire à jet de césium assure indépendamment la reproductibilité de la valeur de la seconde du SI.

L'étalon de fréquence à jet de césium a été mis au point en 1975. D'après les résultats des recherches, le défaut de reproductibilité de la fréquence de la transition entre les niveaux non perturbés des atomes de césium 133 est de l'ordre de 3 à 4 x 10⁻¹³. La figure 2 donne les résultats des comparaisons entre la fréquence de l'étalon à césium et celle de l'étalon à hydrogène inclus dans l'étalon national. Chaque point

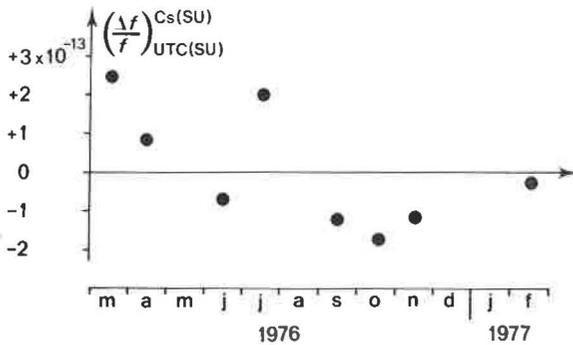


Fig. 2.

correspond aux résultats de sept séries de mesures. Une caractéristique importante de l'étalon national est qu'il comporte des étalons de fréquence à hydrogène qui fournissent, en tant qu'horloges, l'intervalle unitaire.

Les étalons de fréquence à hydrogène offrent une stabilité et une reproductibilité de la valeur réelle de la fréquence plus grandes que les étalons de fréquence à césium ; ils permettent ainsi de réduire de presque un demi-ordre de grandeur l'incertitude sur l'intervalle unitaire donné par l'étalon national. C'est en 1967 que les étalons de fréquence à hydro-

gène ont été inclus pour la première fois dans l'étalon national.

En 1976, on a utilisé dans l'étalon national des étalons de fréquence à hydrogène d'un nouveau modèle ; ils sont caractérisés par un défaut de reproductibilité de la valeur réelle de la fréquence de l'ordre de $0,6$ à $1,2 \times 10^{-13}$. L'étalon national comporte trois étalons à hydrogène dont les valeurs réelles de fréquence sont périodiquement déterminées par comparaison à l'étalon de fréquence à césium. Un tel mode opératoire permet d'inclure dans l'étalon national un seul étalon de fréquence à césium et de procéder sur celui-ci à une longue étude expérimentale sans modifier le fonctionnement de l'étalon dans son ensemble.

Le système d'horloges des échelles de temps est constitué d'un ensemble de trois horloges à hydrogène et six horloges à césium. Les horloges à hydrogène présentant des variations de fréquence moindres que les horloges à césium, en particulier à court terme, on compte beaucoup sur elles pour le passage progressif des horloges à césium aux horloges à hydrogène (d'autant plus que la fiabilité de leur fonctionnement s'améliore).

A l'aide d'un ordinateur, on calcule analytiquement les échelles de temps TA(SU) et UTC(SU) d'après les résultats des comparaisons de tous les étalons. Pour la commodité des mesures, l'échelle de travail UTC(SU)_w est formée à partir de l'étalon national ; cette échelle est maintenue à $\pm 0,2 \mu\text{s}$ de l'échelle UTC(SU).

Le système de comparaison interne comprend les appareils d'analyse et de commande et les appareils de mesure du temps et de la fréquence. Toutes les mesures sont faites automatiquement selon le programme donné, enregistrées sur bande magnétique et traitées par l'ordinateur. L'erreur sur les comparaisons de signaux horaires est de $\pm 1 \text{ ns}$; elle est de l'ordre de $\pm 1 \times 10^{-14}$ sur 1000 s et davantage pour les comparaisons de fréquence.

Le système de comparaison externe comporte :

1) l'équipement récepteur de fréquences étalons et de signaux horaires émis dans le domaine des ondes kilométriques et myriamétriques (l'incertitude sur la comparaison est plus petite que $0,5$ à $3 \mu\text{s}$) ;

2) l'équipement de réception des signaux de télévision (l'incertitude sur la comparaison est inférieure à $0,5 \mu\text{s}$ pour un faisceau hertzien de 500 km) ;

3) l'équipement de comparaison utilisant les réflexions sur

les trainées de météorites (l'incertitude de la comparaison est de 0,2 à 0,3 μ s) ;

4) le transfert du temps au moyen d'horloges transportables, ce qui constitue la méthode la plus exacte pour comparer des étalons (l'incertitude de la comparaison est de 0,05 à 0,1 μ s).

D'après les résultats de comparaisons entre les échelles de temps UTC(SU) et UTC(BIH) obtenus en utilisant les signaux du Loran-C et les horloges transportables (fig. 3), les intervalles unitaires de l'étalon national de l'U.R.S.S. et de l'étalon du BIH concordent à mieux que $\pm 1 \times 10^{-13}$.

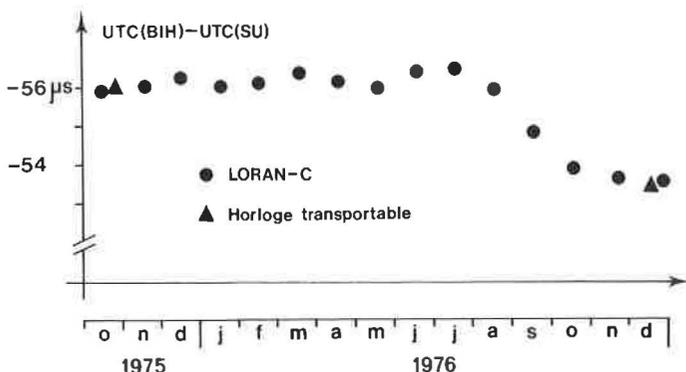


Fig. 3.

Dans l'ensemble, l'étalon primaire national présente les caractéristiques métrologiques principales suivantes :

- une erreur systématique probablement inférieure à 4×10^{-13} ;
- une erreur de reproductibilité des intervalles de temps et de la fréquence inférieure à 1×10^{-13} .

Des recherches sont actuellement en cours pour réduire à 1×10^{-13} l'erreur de reproductibilité de la fréquence de la transition entre les niveaux non perturbés des atomes de césium 133, et à 2 ou 3×10^{-14} l'erreur de reproductibilité de la valeur réelle de la fréquence donnée par les étalons à hydrogène ; on poursuit aussi la mise au point de nouveaux modèles d'horloges, ainsi que les recherches sur l'automatisation des comparaisons faites sur l'étalon primaire. Les travaux de mise au point des lasers sont actuellement en cours. Le laser à He-Ne ($\lambda = 3,39 \mu$ m) est caractérisé par un défaut de reproductibilité de la fréquence de l'ordre de 6×10^{-13} . On fait des comparaisons directes entre les fréquences de lasers (jusqu'à la fréquence du laser à D_2O , $\lambda = 84 \mu$ m) et l'étalon national

primaire (l'incertitude sur la comparaison est d'environ 1×10^{-13}). On poursuit les travaux de recherche sur les façons d'améliorer l'exactitude des lasers.

(Remis en séance le 26 avril 1977)

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

8^e Session (1977)

	Pages
Notice historique 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 B. Guinot	S 1
Introduction	2
Progrès des étalons atomiques de fréquence et des horloges atomiques : travaux effectués dans les laboratoires (NBS, NRC, IEN, ASMW, PTB, NPL, U.R.S.S., France)	3
État actuel du Temps Atomique International (Présentation d'un rapport du Bureau International de l'Heure)	5
Limitations dans l'établissement et la diffusion du TAI (Précision et exactitude obtenues dans les comparaisons d'horloges à grande distance par Loran-C, transports d'horloges, satellites artificiels)	5
État et utilisation du Temps Universel Coordonné	6
Le CCDS est informé des résolutions relatives au temps adoptées par l'Union Astronomique Internationale à sa 16 ^e Assemblée générale (1976)	7
Mise en œuvre des techniques de pilotage du TAI : Travaux du BIH; discussion sur les méthodes de pilotage à employer; création d'un Groupe de travail chargé de conseiller le BIH; adoption de la Recommandation S 1	7
Questions diverses :	
--- Proposition d'une réunion entre les membres du CCDS et des spécialistes de la Relativité.	9
--- Faut-il tenir compte des termes dus à la rotation terrestre dans le champ gravitationnel solaire?	10
--- Question de l'unification des heures d'été	10
--- Projet de proposition pour un système de synchronisation par satellites utilisant des lasers	10
Recommandation présentée au Comité International des Poids et Mesures :	
<i>Recommandation S 1 (1977) (Pilotage du Temps Atomique International; constitution d'un Groupe de travail)</i>	11

Annexes

S 1.	<i>Documents de travail présentés à la 8^e session du CCDS</i>	13
S 2.	<i>Contribution du NBS (États-Unis d'Amérique) pour la 8^e session du CCDS</i>	15
S 3.	NBS (États-Unis d'Amérique). — <i>Cohérence des récentes mesures de la marche du Temps Atomique International</i> , par D. W. Allan, D. J. Wine-land et H. Hellwig	22
S 4.	BIH. — <i>État actuel du Temps Atomique International</i> , par B. Guinot	27
S 5.	NRLM (Japon). — <i>Les étalons de fréquence à césium du NRLM</i> , par Y. Nakadan, J. Yoda et Y. Koga	32
S 6.	LHA et CNH (France). — <i>Rapport pour la 8^e session du CCDS</i> , par C. Audoin et B. Guinot	35
S 7.	BIH et BIPM. — <i>Étude du pilotage du TAI</i> , par M. Granveaud et J. Azou- bib	40
S 8.	<i>Contribution du NRC (Canada) pour la 8^e session du CCDS</i>	47
S 9.	PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — <i>Propositions à discuter à la 8^e session du CCDS</i> , par G. Becker	53
S 10.	PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — <i>Progrès des travaux sur l'unité de temps et les échelles de temps à la PTB</i> , par G. Becker	56
S 11.	PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — <i>Problèmes liés au pilotage du TAI avec des étalons primaires</i> , par G. Becker	64
S 12.	NRLM et RRL (Japon). — <i>Rapport pour la 8^e session du CCDS</i>	69
S 13.	RRL (Japon). — <i>Étude d'un étalon à jet de césium</i> , par M. Kobayashi, N. Nakagiri, S. Urabe, M. Shibuki et Y. Saburi	72
S 14.	<i>Rapport de l'ASMW (Rép. Dém. Allemande) pour la 8^e session du CCDS</i>	77
S 15.	<i>Contribution du NPL (Royaume-Uni) pour la 8^e session du CCDS</i>	80
S 16.	Bureau des Longitudes (France). — <i>Commentaires de J. Kovalevsky</i>	85
S 17.	<i>Contribution de l'IEN (Italie) pour la 8^e session du CCDS</i>	86
S 18.	Gosstandart (U.R.S.S.). — <i>L'étalon national primaire de temps et de fréquence de l'U.R.S.S. en 1976</i> , par S. B. Pouchkine et V. Sagine	89

IMPRIMERIE DURAND
28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1978, n° 2966
ISBN : 92-822-2048-6

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 1978-01-25

Imprimé en France

