

Janvier 1959

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

PROCÈS-VERBAUX DES SÉANCES

AVERTISSEMENT

Le tome 26 des *Procès-Verbaux* est publié en deux volumes A et B.

Le tome 26-A contient les Procès-Verbaux des sessions de 1958 :

- du Comité International des Poids et Mesures,
- du Comité Consultatif de Thermométrie.

Le tome 26-B contient les Procès-Verbaux des sessions de 1957 des Comités Consultatifs :

- pour la Définition de la Seconde (pages S 1 à S 64),
 - d'Électricité (pages E 1 à E 98),
 - pour la Définition du Mètre (pages M 1 à M 180),
 - de Photométrie (pages P 1 à P 123).
-

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

PROCÈS-VERBAUX

DES SÉANCES

2^e SÉRIE. — TOME 26-B

SESSIONS DE 1957 DES COMITÉS CONSULTATIFS

Définition de la Seconde (1^{re} Session)

Électricité (8^e Session)

Définition du Mètre (2^e Session)

Photométrie (4^e Session)



PARIS

GAUTHIER-VILLARS, ÉDITEUR-IMPRIMEUR-LIBRAIRE

55, Quai des Grands-Augustins, 55

1958

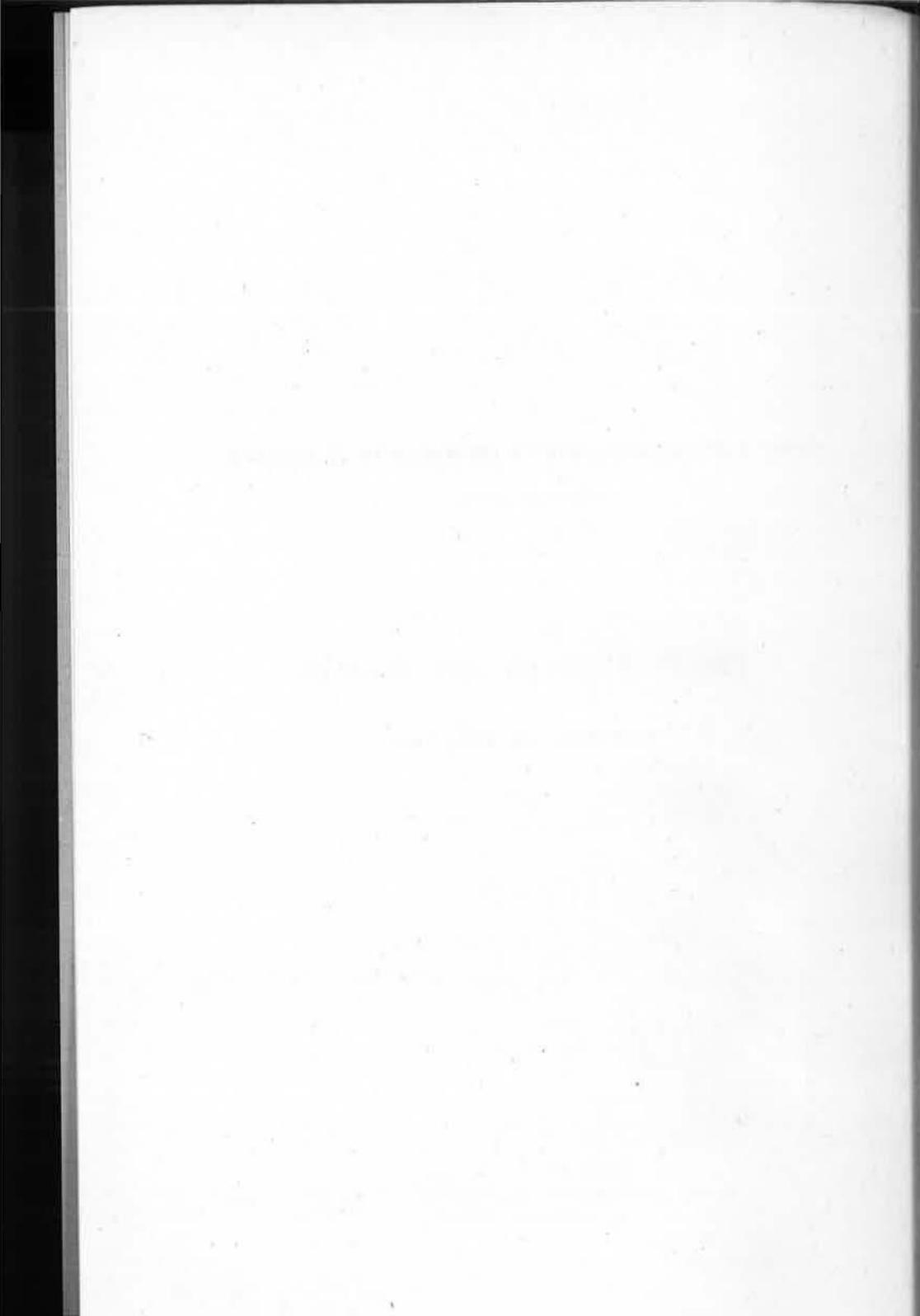
© 1958 by Gauthier-Villars.
Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation
réservés pour tous pays.

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE.

SESSION DE 1957.

PROCÈS-VERBAUX DES SÉANCES.

RAPPORT ET ANNEXES.



PRÉSIDENT
du Comité International des Poids et Mesures

A. DANJON.

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

Président

A. DANJON, Membre de l'Institut, Directeur de l'Observatoire de Paris, *Paris*.

Membres

LABORATOIRES

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, *Braunschweig* (Dr A. SCHEIBE).

National Bureau of Standards, *Washington 25, D. C.* (Dr F. W. BROWN).

National Research Council, *Ottawa* (Dr S. KALRA).

Laboratoire National de Radioélectricité, *Bagneux* (B. DECAUX).

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, *Torino* (M. BOELLA).

Central Inspection Institute of Weights and Measures, *Tokyo*
(Dr M. MIYADI).

National Physical Laboratory, *Teddington* (Dr L. ESSEN).

Institut scientifique des Mesures Physicotechniques et Radio-
techniques de l'U. R. S. S., *Moscou* (V. LOUBENTZOV).

ORGANISATIONS ET ÉTABLISSEMENTS ASTRONOMIQUES

Union Astronomique Internationale et Bureau International
de l'Heure (W. MARKOWITZ et N. STOYKO).

Astronomisches Rechen-Institut, *Heidelberg* (Dr W. FRICKE).

U. S. Naval Observatory, *Washington 25, D. C.* (C. L. FREEMAN,
Superintendent; G. M. CLEMENCE, Director U. S. Nautical
Almanac).

Commonwealth Observatory of Australia, *Canberra* (H. J. M.
ABRAHAM).

Institut d'Astronomie théorique, *Leningrad* (M. F. SUBBOTIN,
Directeur; A. MIKHAILOV, Directeur de l'Observatoire
de Poulkovo).

Observatoire astronomique de Tokyo, *Mitaka* (Dr M. MIYADI).

Nautical Almanac Office, Royal Greenwich Observatory
(D. H. SADLER).

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

Bureau des Longitudes, *Paris* (A. PÉRARD).

MEMBRES NOMINATIVEMENT DÉSIGNÉS

Sir Harold SPENCER JONES, 5 Broadwater Down, *Tunbridge
Wells, Kent.*

Prof. G. SILVA, Istituto di Geodesia e Geofisica, *Padova.*

Prof. Dr. J. FUCHS, Bundesamt für Eich-und Vermessungswesen,
Wien 107.

Ch. VOLET, Directeur du Bureau International des Poids et
Mesures, *Sèvres.*

Invités

L. RANDIĆ, Professeur à l'Université de *Zagreb*.

J. TERRIEN, Sous-Directeur du Bureau International des Poids
et Mesures.

G. WLÉRIK, Observatoire de Paris.

ORDRE DU JOUR DE LA SESSION

1. Nomination d'un Secrétaire et d'un Rapporteur.
 2. Rapports distribués.
 3. Les étalons physiques actuellement en usage.
 4. La précision des étalons actuels et les résultats qu'ils ont fournis.
 5. Intercomparaison des étalons atomiques.
 6. Les caractéristiques souhaitables d'un oscillateur atomique (ou moléculaire).
 7. Les divers étalons possibles; leurs avantages relatifs.
 8. État des recherches. Expériences à faire en vue de choisir le meilleur étalon.
 9. Valeur de l'étalon à césium en fonction de la seconde solaire et de la seconde de Temps des Éphémérides.
 10. Centralisation des résultats.
 11. L'éphéméride de la Lune. La théorie de Brown est-elle suffisante ou convient-il de l'améliorer en quelques points ?
 12. Divers.
-

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION
DE LA SECONDE.

1^{re} SESSION (1957)

PROCÈS-VERBAL

DE LA PREMIÈRE SÉANCE.

TENUE AU BUREAU INTERNATIONAL.

Lundi 3 juin 1957.

PRÉSIDENCE DE M^r A. DANJON.

La séance est ouverte à 10^h 5^m.

Sont présents : MM. DANJON, BOELLA, BROWN, CLEMENCE, DECAUX, ESSEN, FREEMAN, FRICKE, FUCHS, KALRA, LOUBENTZOV, MARKOWITZ, MIYADI, ORTE LLEDÓ, PÉRARD, SADLER, SCHEIBE, SILVA, SPENCER JONES, STOYKO, VOLET, Membres du Comité Consultatif.

Assistent à la séance : MM. BOURDOUN et CASSINIS, Membres du Comité International;

MM. RANDIĆ, TERRIEN, WLÉRICK, invités;

Mr ALIANAKI, Secrétaire scientifique-interprète; MM. A. BONHOURE et MOREAU, du Bureau International.

Excusés : MM. SUBBOTIN et ABRAHAM.

Mr le PRÉSIDENT souhaite la bienvenue aux délégués et les remercie de la collaboration qu'ils sont venus apporter. Il rappelle que la Convention du Mètre spécifie que le français est la langue officielle; les procès-verbaux et les rapports seront donc publiés en français; pendant les délibérations,

MM. Markowitz et Wlérick traduiront verbalement en ce qui concerne l'anglais.

Mr Decaux est désigné comme Rapporteur pour l'établissement du compte rendu à présenter au Comité International, et Mr Terrien comme Secrétaire pour la rédaction des procès-verbaux.

Mr le PRÉSIDENT rappelle encore que ce Comité Consultatif, dont le rôle a été fixé par le Comité International des Poids et Mesures dans sa session d'octobre 1956 (1), n'a pas de pouvoir de décision; il transmet au Comité International ses recommandations. Ses Membres sont principalement des Laboratoires et des Institutions, auxquels sont adjointes quelques personnalités nominativement désignées; son Président doit être en principe un Membre du Comité International.

Mr le PRÉSIDENT expose les motifs de la création de ce nouveau Comité Consultatif. Depuis que le problème de l'étalon de temps s'est posé, la réunion de l'Union Astronomique Internationale à Dublin en 1955 a groupé des astronomes, avec deux physiciens, et la réunion du Comité International des Poids et Mesures à Sèvres en 1956 a groupé des physiciens, avec un astronome. Le Comité International a voulu être conseillé par des physiciens et des astronomes réunis en nombre égal. Le but à atteindre est la coordination des travaux sur les étalons de fréquence, la comparaison de ces étalons entre eux, et la liaison avec les observations astronomiques. On doit éviter de se trouver en présence d'une dualité seconde *physique*-seconde *astronomique*; il ne faut pas non plus que plusieurs secondes physiques différentes entrent en usage, suivant l'exemple qui

(1) Au cours de cette session, le Comité International a adopté à l'unanimité la Résolution 2 suivante (*Procès-Verbaux C. I. P. M.*, 25, 1956, p. 78) :

« Le Comité International des Poids et Mesures,
considérant la Résolution 5 de la Dixième Conférence Générale des Poids et Mesures le chargeant de donner plus de précision à la définition de l'unité fondamentale de temps,

considérant le grand intérêt des recherches actuellement en cours en vue de fonder l'unité de temps sur l'observation de phénomènes physiques,

considérant la nécessité d'encourager et de coordonner sur le plan international les études ci-dessus mentionnées,

décide de créer un Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde, dont le rôle sera de le conseiller en vue des décisions qu'il aura à prendre pour le perfectionnement de l'étalon de temps. »

s'est produit en spectroscopie lorsque plusieurs unités de longueur d'onde existaient, avant qu'une assemblée internationale n'ait défini l'angström.

L'Ordre du Jour proposé prévoit d'abord un simple inventaire des connaissances actuelles sur les étalons physiques de temps (points 3, 4, 5), puis une discussion d'ordre général (points 6, 7, 8), ensuite l'examen des mesures de fréquence en T. U. 2 et T. E. (point 9), enfin l'établissement du programme de travail futur de ce Comité (point 10). Le point 11 concernant plus particulièrement les astronomes, une réunion spéciale, à laquelle tous les Membres sont invités, est prévue le 4 juin à 9^h 30 à l'Observatoire de Paris.

Cet Ordre du Jour est adopté sans observation.

Les étalons physiques actuellement en usage.

Mr ESSEN rappelle qu'au National Physical Laboratory, un étalon de fréquence à césium est en fonctionnement; il sert à l'établissement de l'heure qui est transmise par téléphone au Royal Observatory et au British Post Office. Deux autres étalons sont en construction; l'un sera cinq fois plus précis et en même temps plus simple d'emploi, l'autre est un modèle plus petit.

Des études sur le « maser » ⁽¹⁾ sont en cours au Royaume-Uni à l'Université de Southampton et au Signals Research and Development Establishment.

Mr BROWN n'a pas encore, au National Bureau of Standards, d'étalon de fréquence en fonctionnement; mais on travaille sur deux masers, un étalon à césium, et un « Atomichron » à césium. L'étalon à césium semble actuellement le plus prometteur.

Mr MARKOWITZ sait que, par ailleurs, aux États-Unis, deux types d'oscillateur sont ou seront employés : maser, ou à jet de césium.

Il existe six Atomichrons, fabriqués par la National Company sous la direction de Mr Zacharias, Professeur au Massachusetts Institute of Technology, fonctionnant au césium; deux de ces instruments ont été étudiés, l'un au Naval Research Laboratory,

(1) Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

l'autre à l'Air Force. Mr MARKOWITZ ne connaît aucun résultat numérique concernant les masers, pourtant assez nombreux.

Mr SCHEIBE annonce l'achèvement prévu dans six mois d'un oscillateur à césium, et plus tard d'un maser, à la Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

Mr LOUBENTZOV informe de la mise en service prévue pour septembre 1957 d'appareils à ammoniac à l'Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques de l'U. R. S. S.; plusieurs autres établissements travaillent aussi dans ce domaine.

Mr MIYADI rappelle que quatre étalons de fréquence à ammoniac existent au Japon : deux à modulation de la source, et deux à modulation Stark-Zeeman, ces derniers étant plus constants; Mr Shimoda a comparé la fréquence de la raie d'inversion 3-3 de l'ammoniac au temps universel T. U. 2.

Mr BOELLA annonce la construction, à l'Institut Électrotechnique de Turin, d'un étalon de fréquence semblable à celui de Mr Essen; l'achèvement demandera 18 mois.

Mr DECAUX recevra bientôt un Atomichron; divers autres laboratoires français étudient ou projettent la construction d'étalons à césium ou à ammoniac.

Mr ESSEN signale qu'un maser en fonctionnement en Suisse, à Neuchâtel, a été comparé au temps astronomique; un rapport a été publié sur les causes de variation de sa fréquence.

Mr KALRA pense que le National Research Council terminera cette année un étalon de fréquence à césium.

Mr le PRÉSIDENT demande que le Comité Consultatif adopte une dénomination pour les instruments dont l'inventaire vient d'être fait; dans les Procès-Verbaux qui seront publiés en français on se conformera à la dénomination choisie. Préfère-t-on horloge ou étalon de fréquence, atomique ou moléculaire ?

MM. MARKOWITZ, BROWN et SPENCER JONES préféreraient « étalon de fréquence », car ces instruments ne fonctionnent pas d'une façon continue.

Mr DECAUX voudrait que l'on fasse une distinction entre les fréquences physiques naturelles et les fréquences mécaniques d'un oscillateur à quartz.

Mr ESSEN approuve « étalon de fréquence », mais désire ajouter « et de temps » ou « et d'intervalle de temps »; l'étalon du National Physical Laboratory sert en effet pour la détermination de l'heure; il a permis d'étudier les irrégularités de la rotation de la terre. Mr KALRA remarque à ce sujet qu'un intervalle de temps résulte d'une sorte de sommation de fréquence.

Mr le PRÉSIDENT objecte que l'étalon du National Physical Laboratory ne peut, à lui seul, donner l'heure; il faut lui adjoindre une horloge à quartz qui est réglée grâce à l'étalon de fréquence.

Mr SCHEIBE considère que la dénomination « étalon de fréquence » serait impropre; notre Comité s'occupe de l'unité de temps, et d'ailleurs une horloge à pendule bat à une certaine fréquence.

Mr le PRÉSIDENT n'est pas d'accord sur ce point; une horloge est un oscillateur dont on peut numéroter les oscillations; on ne pourrait pas, en français, accepter d'appeler horloges des oscillateurs à césium ou à ammoniac.

Mr PÉRARD rappelle la définition d'une horloge : machine qui marque les heures; cette définition semble inapplicable aux étalons de fréquence actuels.

Mr CLEMENCE admet que, pour le moment, nos étalons physiques sont bien des étalons de fréquence; avant de servir à la mesure d'intervalles de temps, il faut qu'ils soient étalonnés par des comparaisons astronomiques.

Mr BROWN pense que les étalons physiques seront à l'avenir de plus en plus utilisés comme horloges, mais que pour les travaux actuels il est suffisant de les appeler étalons atomiques de fréquence.

Mr FRICKE approuve cette proposition comme étant capable d'éviter au mieux les malentendus.

Mr le PRÉSIDENT met aux voix l'expression *étalon atomique de fréquence*, qui est adoptée à la majorité de 17 voix, contre 2 voix (SCHEIBE et ESSEN) et 2 abstentions (KALRA et FREEMAN).

Comparaison des étalons de fréquence au temps astronomique.

Mr STOYKO, à la demande de Mr le PRÉSIDENT, précise que les fréquences ont été jusqu'ici comparées au T. U. 2; plus tard,

lorsque les calculs de Mr Markowitz seront achevés, on aura une première comparaison au Temps des Éphémérides (T. E.).

Mr ESSEN fait savoir qu'après avoir déterminé la fréquence de l'étalon à césium par comparaison au T. U. 2, on a ensuite conservé la valeur obtenue; les heures d'émission des signaux sont de temps en temps décalées par paliers, afin d'éviter un écart trop sensible par rapport au T. U. 2. Compte tenu de ces compensations qui ont été notées, tout intervalle de temps peut être exprimé en fonction de l'unité atomique.

D'après Mr MARKOWITZ, les signaux du National Bureau of Standards sont émis à fréquence constante, mais on ajuste la phase de façon à respecter le T. U. 2 à 20 ms près.

Aucun étalon de fréquence n'est encore actuellement rattaché au T. E.

Intercomparaison d'étalons atomiques de fréquence.

Mr ESSEN expose que les comparaisons entre les étalons atomiques de fréquence au Royaume-Uni et aux États-Unis d'Amérique sont effectuées par des comparaisons de fréquence et des mesures de temps. Les comparaisons de fréquence sont faites en coopération avec Mr Pierce, à l'Université de Harvard, et le National Physical Laboratory. La fréquence des signaux MSF est mesurée au N. P. L. par rapport à l'étalon à césium du N. P. L.; cette même fréquence est mesurée à Harvard par rapport aux étalons à quartz de Harvard. Les signaux AF2XKM sont aussi mesurés à Harvard par rapport aux mêmes étalons à quartz. La fréquence de la station AF2XKM est mesurée par rapport à l'Atomichron N° 1 à Camden, Massachusetts, et la relation entre la fréquence du césium au N. P. L. et celle de l'Atomichron N° 1 est établie. Les comparaisons à l'aide de mesures de temps sont effectuées en coopération avec l'U. S. Naval Observatory et le N. P. L.; Mr Markowitz peut donner des détails sur ces comparaisons.

Mr MARKOWITZ vient d'analyser récemment avec Mr Essen les comparaisons entre la fréquence du césium obtenue au National Physical Laboratory et les fréquences obtenues aux États-Unis. Les Atomichrons sont différents; le N° 1 est près de New-York; le N° 6, au Naval Research Laboratory près de Washington, contrôle des signaux reçus presque quotidiennement au National Bureau of Standards.

On peut comparer deux étalons éloignés, soit par une comparaison de fréquence, qui peut être affectée d'une erreur systématique, soit par des impulsions, avec une erreur qui diminue lorsque s'allonge l'intervalle de temps; sur un mois, l'erreur probable de cette deuxième méthode est de l'ordre de $3 \cdot 10^{-10}$; sur un an, elle serait $3 \cdot 10^{-11}$. Les comparaisons avec le National Physical Laboratory, échelonnées sur neuf mois, ont une erreur probable de $1 \cdot 10^{-10}$.

Mr MARKOWITZ donne au Comité la primeur d'un graphique montrant les résultats de la comparaison entre l'étalon à césium et le T. U. 2 qui est, rappelle-t-il, corrigé du mouvement des pôles et des variations saisonnières; on y remarque une variation de $5 \cdot 10^{-9}$ dans la période de rotation de la terre. La fréquence de l'étalon à césium américain est différente de celle de l'étalon du National Physical Laboratory de $9 \cdot 10^{-10}$, écart qu'il faudra expliquer.

Mr ESSEN estime prématurée toute conclusion fondée sur cet écart qui, pour ce qui concerne les comparaisons de fréquence, ne dépasse guère les erreurs de comparaison.

Mr le PRÉSIDENT conclut qu'après les nombreux travaux essentiels qui ont permis la mise en œuvre d'étalons de fréquence, il reste à confirmer et à multiplier les intercomparaisons dont le résultat sera important pour l'information du Comité International.

Les caractéristiques souhaitables d'un étalon atomique de fréquence.

Mr le PRÉSIDENT demande quelles sont les autres qualités que devrait posséder un étalon atomique de fréquence qui, évidemment, doit tout d'abord être stable, reproductible, et capable de fonctionner assez longtemps.

Mr ESSEN estime essentiel que la fréquence produite soit la fréquence naturelle dans un champ nul. Le National Physical Laboratory s'en approche à $2 \cdot 10^{-10}$; l'Atomichron, qu'il a pu examiner en détail, est un instrument très bien construit mais, à sa connaissance, aucun essai précis n'a été tenté pour contrôler que sa fréquence est exactement la fréquence de résonance naturelle.

Mr MARKOWITZ ajoute que l'étalon du National Physical

Laboratory permet en effet d'observer en permanence le profil et de contrôler sa symétrie, ce qui n'est pas le cas dans l'Atomichron qui est muni d'un servo-mécanisme.

A diverses questions de Mr WLÉRIK, MM. ESSEN et MARKOWITZ répondent que la largeur de la raie du césium doit être petite, pour que la fréquence théorique soit mieux précisée; que les trois principales exigences sont une puissance radio-électrique limitée et définie, un champ magnétique faible et défini, une parfaite concordance de phase des champs magnétiques excitateurs dans les deux cavités. L'influence de la gravité, de l'ordre de 10^{-14} , est entièrement négligeable. On utilise du césium naturel, mais les isotopes du césium ont des fréquences trop différentes pour qu'il en résulte une gêne. Il en est de même des impuretés. La recharge en césium, nécessaire après trois ou quatre mois de fonctionnement de l'étalon du National Physical Laboratory, et après 1000 heures dans l'Atomichron, ne provoque pas de changement de fréquence supérieur à 1.10^{-10} .

Mr BROWN espère comparer prochainement, au National Bureau of Standards, un étalon semblable à celui de Mr Essen et un Atomichron fonctionnant côte à côte.

Mr le PRÉSIDENT invite les Membres à présenter sur les étalons à ammoniac des renseignements analogues à ceux qui viennent d'être donnés sur le césium.

Mr MIYADI indique que l'ammoniac n'a pas fourni une précision aussi élevée que les étalons à césium; il a permis pourtant de constater que la fréquence paraît augmenter au cours des comparaisons au T. U. 2, comme dans le cas du césium. Les documents japonais distribués au Comité (voir Annexes S 6 à S 14) exposent les études en cours sur l'influence de la pression, des gaz étrangers, des parois.

Mr le PRÉSIDENT remarque une différence considérable entre la fréquence de l'ammoniac obtenue à Neuchâtel avec un maser et au Japon avec un étalon à absorption.

MM. MARKOWITZ et BROWN relatent des études poursuivies actuellement aux États-Unis, à l'International Business Machines et au National Bureau of Standards, pour améliorer les étalons à ammoniac, condition préliminaire à une comparaison aux étalons à césium.

Mr BROWN estime que les étalons de fréquence les plus précis actuellement sont ceux à césium; mais d'autres éléments sont utilisables; Mr P. Kusch, de la Columbia University, a proposé récemment le thallium.

Mr ESSEN insiste sur l'avantage d'un appareil simple, permettant une comparaison facile à la fréquence d'une horloge à quartz; à cet égard, la fréquence du césium est favorable. L'avantage théorique d'une fréquence plus élevée risquerait d'être ruiné par des difficultés techniques. La précision d'un étalon à césium peut d'ailleurs être augmentée à volonté par l'accroissement des dimensions géométriques de l'appareil.

La séance est levée à 12^h35^m.

PROCÈS-VERBAL

DE LA DEUXIÈME SÉANCE

TENUE AU BUREAU INTERNATIONAL.

Mardi 4 juin 1957.

PRÉSIDENCE DE Mr A. DANJON.

La séance est ouverte à 15^h15^m.

Sont présents : MM. DANJON, BOELLA, BROWN, CLEMENCE, DECAUX, ESSEN, FRICKE, FUCHS, KALRA, LOUBENTZOV, MARKOWITZ, MIYADI, ORTE LLEDÓ, PÉRARD, SADLER, SCHEIBE, SILVA, SPENCER JONES, STOYKO, VOLET, Membres du Comité Consultatif.

Assistent à la séance : MM. BOURDOUN et CASSINIS, Membres du Comité International;

MM. RANDIĆ, TERRIEN et WLÉRIK, invités;

Mr ALIANAKI; MM. A. BONHOURE et MOREAU, du Bureau International.

L'éphéméride de la Lune. La théorie de Brown est-elle suffisante ou convient-il de l'améliorer en quelques points ?

Une réunion restreinte, dont on trouvera le compte rendu à l'Annexe S 1, p. S 29, a eu lieu comme prévu, ce matin, à l'Observatoire de Paris.

Mr le PRÉSIDENT prie Mr SADLER de lire une brève conclusion de cette réunion, afin qu'elle soit soumise à l'approbation du Comité Consultatif.

RAPPORT DU SOUS-COMITÉ.

Le Sous-Comité du Comité Consultatif a étudié la précision de l'éphéméride de la Lune en relation avec la détermination pratique du Temps

des Éphémérides. Selon une estimation entachée de diverses incertitudes, l'éphéméride actuelle est capable de fournir en cinq ans une précision de 10^{-10} pour la détermination de la seconde de Temps des Éphémérides, mais elle donne sûrement une précision inférieure pour des intervalles de temps beaucoup plus courts ou beaucoup plus longs. Le Sous-Comité a remarqué que les termes planétaires dans la théorie de la Lune de Brown n'ont pas été vérifiés rigoureusement et aussi qu'une révision complète de la théorie serait une grande entreprise.

Le Sous-Comité a conclu qu'une plus grande précision, sur un intervalle de temps plus long, était désirable pour la comparaison avec les méthodes physiques d'étalonnage des fréquences et a suggéré que cette conclusion et la discussion qui l'a motivée soient portées à l'attention de la Commission N° 4 de l'Union Astronomique Internationale.

Mr CLEMENCE approuve cette conclusion; il pense que l'on comprendra bien que la précision indiquée du Temps des Éphémérides n'est pas la précision des observations individuelles, qui comportent de plus grandes erreurs.

Mr le PRÉSIDENT obtient, par un vote unanime, l'accord du Comité Consultatif pour que cette conclusion soit transmise au Comité International, qui pourra la présenter à l'Union Astronomique Internationale.

Les divers étalons possibles; leurs avantages relatifs.

Après le travail de documentation de la première séance, Mr le PRÉSIDENT invite le Comité à examiner les qualités actuelles des étalons atomiques de fréquence, et à chercher parmi eux ceux qui possèdent le mieux les qualités souhaitées. En réponse à une remarque de Mr CLEMENCE, il précise qu'il n'a pas l'intention de décourager les recherches dans d'autres directions, mais au contraire d'inciter les physiciens créateurs d'autres types d'étalons à faire des études et des contrôles aussi poussés que ceux de Mr Essen sur son étalon à césium.

Mr ESSEN estime que le meilleur étalon atomique de fréquence, après l'étalon à césium, serait le maser; mais celui-ci est 10 fois moins précis et son emploi est moins commode; il ne pourrait soutenir la comparaison avec l'étalon à césium qu'après avoir bénéficié d'une amélioration fondamentale qui n'est pas à envisager dans un proche avenir.

Mr BROWN confirme qu'actuellement, seul l'étalon de fréquence à césium serait assez développé pour constituer un étalon plus ou moins provisoire. Mais il serait souhaitable qu'un

travail important soit consacré aussi à l'ammoniac, sans parler des recherches qui restent à faire sur le césium. D'autre part, Mr Kusch vient de préparer un rapport détaillé sur les possibilités d'un étalon de fréquence à jet atomique de thallium.

Mr SCHEIBE est d'avis que le choix du meilleur étalon est prématuré; un ou deux ans de travaux lui paraissent encore nécessaires. Nous devrions proposer au Comité International que notre Comité Consultatif soit réuni à nouveau après ce délai.

État des recherches.

Expériences à faire en vue de choisir le meilleur étalon.

Valeur de l'étalon à césium en fonction du T. U. 2
et de la seconde de Temps des Éphémérides.

Mr le PRÉSIDENT envisage l'adoption d'une recommandation demandant que des recherches aussi poussées que possible soient faites sur les divers étalons. Dans un cas analogue, en présence de divers projets relatifs à une nouvelle définition du mètre par une longueur d'onde, on a voulu avant toute décision que toutes les radiations proposées ou envisagées soient d'abord soigneusement étudiées.

Mr BROWN prévoit, en ce qui concerne le National Bureau of Standards, que les travaux de l'année à venir seront profitables pour étayer un jugement de mérite. Mais il se demande s'il serait utile de choisir dès maintenant un étalon provisoire, ne serait-ce que pour faciliter la comparaison des résultats.

Mr le PRÉSIDENT rappelle le précédent de l'angström, unité adoptée par les spectroscopistes en 1907 pour faciliter les comparaisons de longueurs d'onde; son effet a été peut-être de retarder la définition du mètre par une longueur d'onde.

Mr ESSEN, considérant qu'il faudra cinq ans pour relier la fréquence d'un étalon atomique à la seconde de Temps des Éphémérides, admet qu'il n'est pas urgent d'adopter un étalon; pendant ce délai la question évoluera. Mais, entre temps, des mesures comparatives de fréquence seront faites à la précision de $1 \cdot 10^{-10}$, et une base commune éviterait des confusions, ce qui suggère qu'un étalon provisoire devrait être employé, qu'il soit sanctionné ou non par ce Comité.

Mr le PRÉSIDENT ne souhaiterait pas que ce Comité couvre de son autorité une deuxième définition de la seconde, même provisoire.

Mr PÉRARD souligne qu'en 1927 le Comité International des Poids et Mesures, puis la Conférence Générale, n'ont admis la longueur d'onde de la raie rouge du cadmium que comme étalon pour la spectroscopie, non pour les autres usages. D'une façon analogue, pourrait-on envisager que la fréquence du césium soit admise comme étalon sans relation avec le temps ?

Mr MARKOWITZ distingue deux façons d'exprimer le résultat de la comparaison de deux fréquences :

1° On fixe la valeur d'une des fréquences prise comme étalon et l'on donne la valeur de l'autre fréquence.

2° On donne simplement la différence de fréquence en valeur relative; cette deuxième solution évite toute définition préalable.

Mr CLEMENCE ne voit aucun avantage pour l'astronomie à la fixation de la valeur, même provisoire, d'une fréquence étalon. Mais les physiciens doivent faire face à des problèmes pratiques; par exemple, les émissions de fréquence par radio sont utilisées pour des expériences, et l'expérimentateur a besoin de connaître la valeur de ces fréquences; de plus, il serait préférable que les valeurs attribuées aux fréquences des divers émetteurs soient cohérentes, même si les valeurs numériques n'ont pas de signification physique.

Mr ESSEN appuie ces observations, mais ajoute que ces émissions sont utiles aussi aux astronomes.

Mr MARKOWITZ pense, au contraire, que les astronomes n'ont aucun besoin de connaître une valeur numérique des fréquences qu'ils reçoivent, pour étudier par exemple les irrégularités de la rotation de la Terre. Ceci n'empêche pas pratiquement un laboratoire de se fixer une valeur si cela lui semble commode.

Mr SPENCER JONES confirme que les astronomes doivent utiliser les étalons atomiques de fréquence et les émissions de fréquence : 1° pour contrôler les variations de marche des horloges; 2° pour obtenir des informations sur les changements du temps astronomique; il leur faut donc une fréquence constante, dont la valeur importe peu.

Mr PÉRARD attire l'attention sur le hasard heureux par lequel la valeur adoptée en 1927 pour la longueur d'onde de la raie rouge du cadmium, d'après les résultats des expériences de

Perot, Fabry et Benoît, s'est trouvée en accord exact avec la moyenne des déterminations ultérieures. Ce hasard se reproduirait-il si nous adoptions une valeur provisoire de la fréquence du césium ?

Mr le PRÉSIDENT est certain du contraire; la valeur adoptée par Mr Essen conduirait sans doute à un désaccord de 2.10^{-8} avec la seconde T. E.

Mr ESSEN reste d'avis qu'une tâche utile de ce Comité serait d'éviter des confusions, grâce à l'adoption d'une valeur qui servirait à coordonner les émissions de fréquence des diverses stations.

Mr KALRA se demande, en effet, si une recommandation de ce Comité ne serait pas susceptible d'éviter que les laboratoires adoptent des valeurs de fréquence différentes auxquelles ils auraient tendance à se tenir.

Mr le PRÉSIDENT ne voit pas la possibilité, pour ce Comité, de légiférer et d'imposer une valeur particulière; son rôle est de préparer des définitions d'intérêt général.

Mr SPENCER JONES ayant demandé qui choisira un étalon provisoire de fréquence si ce Comité ne le fait pas, Mr CLEMENCE suggère que les physiciens s'entendent entre eux, à l'Union Internationale de Physique Pure et Appliquée par exemple, comme les astronomes le font pour les constantes astronomiques à l'Union Astronomique Internationale.

Mr ESSEN suggère que chaque station indique la valeur exacte sur laquelle son émission est réglée, mais Mr le PRÉSIDENT rappelle qu'une tâche de ce Comité est d'éviter que plusieurs unités de temps soient en vigueur.

Mr KALRA demande s'il ne serait pas plus simple de prendre la fréquence du césium comme unité, mais Mr MARKOWITZ réplique qu'il y a autant de fréquences du césium que d'appareils à césium.

Mr le PRÉSIDENT conclut en exposant son avis de mandataire du Comité International; une seule solution apparaît, qui serait d'établir tout d'abord un programme de comparaisons d'étalons; c'est après leur achèvement que le choix de valeurs numériques pourra être envisagé. Nous avons déjà décidé d'encourager la poursuite aussi complète que possible des études sur les étalons.

atomiques de fréquence. Il faudra de plus que ces étalons soient comparés entre eux dans toutes les combinaisons possibles.

Mr BROWN confirme que de telles comparaisons systématiquement organisées répondraient à un besoin urgent.

Mr VOLET demande si les étalons de fréquence peuvent être transportés pour être comparés en un même lieu, dans les conditions les meilleures.

Mr BOELLA affirme que la comparaison à distance est possible; avec des précautions, l'erreur d'une mesure de temps à distance est 0,1 ms; une précision relative d'environ 10^{-9} est donc accessible en un jour, et 10^{-10} en une semaine.

Mr le PRÉSIDENT se demande pourtant si l'emplacement de l'étalon influe sur la fréquence, par l'action des différences de gravité par exemple ou par suite de toute autre cause.

Mr BOELLA parle de l'influence du champ magnétique.

Mr ESSEN ne voit pas que la différence de lieu explique la différence observée entre la fréquence du césium à Washington et à Teddington; d'autres causes, dans le fonctionnement des appareils, sont bien plus plausibles, comme il l'a déjà indiqué.

Mr MARKOWITZ ne croit pas que la fréquence du césium 135 dans un champ magnétique nul soit différente au National Physical Laboratory et au National Bureau of Standards. Il se propose d'engager Mr Zacharias à entreprendre des expériences en vue d'une explication des différences observées; en cas d'échec, il serait souhaitable qu'un Atomichron fût mis à la disposition de Mr Essen au National Physical Laboratory.

Mr le PRÉSIDENT conclut que l'adoption d'une valeur conventionnelle de la fréquence du césium serait prématurée; il importe que des comparaisons soient tout d'abord organisées.

Mr SCHEIBE rappelle l'existence de l'Union Radioscopique Internationale (U. R. S. I.) dont la Commission 1, présidée par Mr Decaux, est chargée depuis 30 ans des comparaisons de fréquence; elle doit se réunir cette année aux Boulder Laboratories, aux États-Unis, et pourrait peut-être prendre en charge l'organisation des comparaisons que nous souhaitons.

Mr DECAUX, appuyé par Mr BROWN, est tout à fait d'accord

pour proposer à l'U. R. S. I. d'exécuter ce programme, dans un esprit purement scientifique, sans considération des définitions qui seraient adoptées à l'avenir.

Mr le PRÉSIDENT propose que la marche à suivre pour ces comparaisons soit la suivante : Mr Decaux étant à la fois Président de la Commission 1 de l'U. R. S. I. et Rapporteur de ce Comité Consultatif, donc en liaison avec le Bureau International qui est notre organisme centralisateur permanent, serait à même d'organiser les comparaisons selon un certain programme et de centraliser les résultats. Il signalerait aux possesseurs d'étalons atomiques de fréquence la nécessité de les comparer à ceux d'autres laboratoires. Toute la correspondance reçue par le Directeur du Bureau International et concernant ce programme serait transmise au Président et au Rapporteur de notre Comité Consultatif; ce qui serait jugé intéressant pour tous serait diffusé à tous les Membres.

Cette proposition reçoit l'assentiment général.

Après une brève interruption de séance, Mr le PRÉSIDENT soumet à l'approbation du Comité les trois recommandations suivantes :

RECOMMANDATION 1.

Le Comité Consultatif pour la Définition, de la Seconde recommandation aux laboratoires engagés dans la construction d'étalons atomiques de fréquence, d'en pousser l'étude aussi loin que possible, et de fournir les données les plus complètes sur les résultats obtenus.

RECOMMANDATION 2.

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde recommandation aux laboratoires d'organiser le plus tôt possible la comparaison de leurs étalons atomiques de fréquence, qu'ils soient du même type ou de types différents. Il est souhaitable que ces comparaisons soient réalisées dans toutes les combinaisons possibles.

RECOMMANDATION 3.

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde exprime le vœu que la Commission N° 1 de l'Union Radioscopique Internationale, à l'occasion de sa Douzième Assemblée Générale, à Boulder, mette à l'étude la comparaison des étalons atomiques de fréquence, conformément à la Recommandation 2.

Ces trois recommandations sont adoptées à l'unanimité.

Au sujet de la date de la prochaine session du Comité Consultatif et des possibilités de délibération par correspondance, Mr le PRÉSIDENT donne lecture du Règlement des Comités Consultatifs institués auprès du Comité International des Poids et Mesures (voir *Procès-Verbaux C. I. P. M.*, 23 A, 1952, p. 108).

Une nouvelle session sera utile dès que les recommandations adoptées auront été suivies d'effet. D'ailleurs, le Comité International ne pourra en prendre connaissance officiellement qu'à sa session de l'automne 1958.

Mr le PRÉSIDENT, constatant qu'aucune autre question n'est soulevée par les Membres du Comité, considère que cette réunion a bien clarifié les sujets à l'étude, et a apporté à beaucoup d'entre nous des informations qui leur manquaient. Un programme existe maintenant, c'est par nos travaux que nous le développerons et que nous ferons un nouveau pas vers le progrès.

Mr le PRÉSIDENT se réjouit, en tant qu'astronome, des progrès dont bénéficient les étalons physiques de temps, qui permettront sans doute la découverte de phénomènes encore inconnus. Il forme enfin le vœu que cette réunion ait rapproché les points de vue de tous, physiciens et astronomes, pour le bénéfice de la science, et qu'elle marque une date importante de l'histoire de la métrologie.

Il remercie les organisateurs, le Secrétaire, le Rapporteur, et tous ceux qui ont contribué au succès de cette session. Il mentionne particulièrement le précieux concours de MM. Markowitz et Wlérick, qui ont bien voulu assumer les charges de traducteurs.

Mr SILVA, au nom du Comité Consultatif, félicite et remercie Mr le Président pour la maîtrise et l'efficacité avec lesquelles il a dirigé les discussions.

La séance est levée à 17^h30^m.

PREMIER RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES.

Par B. DECAUX, Rapporteur.

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde a tenu sa première session au Pavillon de Breteuil, à Sèvres, le lundi 3 juin et le mardi 4 juin 1957.

Étaient présents : Mr DANJON, Président ; MM. BOELLA, BROWN, CLEMENCE, DECAUX, ESSEN, FREEMAN, FRICKE, FUCHS, KALRA, LOUBENTZOV, MARKOWITZ, MIYADI, ORTE LLEDÓ, PÉRARD, SADLER, SCHEIBE, SILVA, SPENCER JONES, STOYKO, VOLET, Membres du Comité Consultatif ; MM. BOURDOUN et CASSINIS, Membres du Comité International ; MM. RANDIĆ, TERRIEN, WLÉRIK, invités.

Mr DECAUX fut désigné comme Rapporteur et Mr TERRIEN comme Secrétaire.

BUT DU COMITÉ CONSULTATIF ET TERMINOLOGIE.

Le Comité Consultatif a pour but d'étudier les moyens d'aboutir à une définition plus précise et unique de l'unité fondamentale de temps, en encourageant et en coordonnant les travaux sur les nouveaux étalons de fréquence basés sur l'observation de phénomènes physiques, ainsi que les comparaisons de ces étalons entre eux et avec les observations astronomiques.

Le Comité Consultatif a décidé de recommander la dénomination *étalons atomiques de fréquence* pour les appareils basés sur des résonances atomiques ou moléculaires.

CARACTÈRES SOUHAITABLES
D'UN ÉTALON ATOMIQUE DE FRÉQUENCE.

Les qualités principales d'un étalon atomique de fréquence sont celles de tous les étalons : stabilité, reproductibilité, durabilité. Les deux premières exigent que les conditions de fonctionnement soient relativement simples, et en tous cas qu'elles puissent être parfaitement définies et contrôlées. A ce point de vue, il faut donner la préférence aux appareils à mesure directe de la résonance, plutôt qu'aux appareils à servo-mécanisme dans lesquels la qualité du réglage de l'oscillateur auxiliaire peut être mal définie. Il faut également que la mise en service, ainsi que le remplacement de la partie active de l'appareil, n'exercent pas une influence perturbatrice sur la fréquence.

ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE
ACTUELLEMENT EN USAGE.

Un étalon à jet de césium est en service depuis 1955 au National Physical Laboratory (Royaume-Uni); il est comparé régulièrement aux déterminations horaires du Royal Observatory. Six appareils à césium de type commercial existent aux États-Unis d'Amérique.

Plusieurs appareils à césium sont en cours d'étude ou d'installation au Royaume-Uni (National Physical Laboratory), aux États-Unis (National Bureau of Standards), en Allemagne (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), en Italie (Istituto Elettrotecnico Nazionale), en France (Laboratoire National de Radio-électricité, École Normale Supérieure), au Canada (National Research Council).

Quatre étalons à absorption dans l'ammoniac sont en service au Japon (Electrotechnical Laboratory, Tokyo Shibaura Electric Co, Tokyo University, Kyoto University). Deux d'entre eux utilisent la modulation par effet Stark. Ils ont été comparés aux déterminations de temps de l'Observatoire de Tokyo. Un étalon à jet moléculaire d'ammoniac (maser) fonctionne depuis quelques mois au Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères (Neuchâtel); il est comparé régulièrement aux horloges à quartz de l'Observatoire de Neuchâtel.

Divers appareils du type « maser » sont à l'étude ou en construction au Royaume-Uni (Southampton University, Signals Research and Development Establishment), aux États-Unis (National Bureau of Standards), en Allemagne (Physikalisch-

Technische Bundesanstalt), en U. R. S. S. (Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques).

ÉTALONS POSSIBLES. AVANTAGES RESPECTIFS.

Les étalons actuels sont de trois types : jet atomique de césium, jet moléculaire d'ammoniac (maser), absorption dans l'ammoniac. La discussion engagée au sein du Comité Consultatif a montré que les deux premiers paraissent posséder les qualités souhaitées. Pour le moment, les études et les mesures ont été surtout poussées sur l'étalon à césium, dont la précision et la commodité d'emploi sont supérieures à celles du maser.

Les conditions requises pour le fonctionnement correct de l'étalon à césium sont principalement : la fixation du champ magnétique (préférentiellement nul), la concordance de phase dans les cavités, la symétrie de la courbe de résonance. Le degré de pureté du césium utilisé ne paraît pas critique; la recharge du four à césium (tous les trois ou quatre mois au N. P. L.) ne modifie pas la fréquence de façon appréciable. Cependant une légère discordance s'est manifestée lors de la comparaison entre les appareils britannique et américain. L'étalon à césium, sous la forme du résonateur, a l'avantage de la simplicité.

Des études analogues ont été entreprises sur les étalons à ammoniac. L'influence de la pression, des impuretés, des parois, etc., sur la fréquence d'absorption a été étudiée au Japon. Le Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères a étudié l'influence des caractéristiques de la cavité résonnante dans l'emploi des jets moléculaires. On peut constater des divergences notables entre les résultats obtenus dans les divers laboratoires.

Les travaux entrepris ne permettront pas de se prononcer avant quelques années sur les avantages respectifs de ces divers types d'étalons. D'autres types ont été également envisagés, mais les recherches sont encore au stade du laboratoire.

COMPARAISONS DES ÉTALONS AU TEMPS ASTRONOMIQUE.

Jusqu'à maintenant les fréquences des étalons atomiques ont été comparées au Temps Universel Uniforme Provisoire (T. U. 2). C'est seulement après l'achèvement des études entreprises pour relier ce temps au Temps des Éphémérides (T. E.) que la fréquence pourra être déterminée de façon définitive.

A ce propos une discussion a été ouverte sur la précision de l'éphéméride de la Lune d'après la théorie de Brown, en relation avec la détermination pratique du Temps des Éphémérides. On

a conclu que cette théorie devrait être améliorée. En cinq ans la précision qu'elle donne sur la détermination de la seconde T. E. serait de 1.10^{-10} , mais sur des intervalles plus courts ou plus longs la précision serait moindre. Il est demandé au Comité International de porter cette conclusion (*voir* p. S 16 et Annexe S 1, p. S 29) à la connaissance de l'Union Astronomique Internationale.

Des comparaisons ont été effectuées tout d'abord au National Physical Laboratory en juin 1955 entre l'étalon à césium et le temps T. U. 2 fourni par le Royal Observatory. La valeur trouvée a été conservée depuis lors; il existe maintenant une différence croissante entre cette valeur et celle que fourniraient les déterminations actuelles du temps T. U. 2.

Des comparaisons de signaux horaires effectuées en coopération par le National Physical Laboratory (Teddington) et Mr Markowitz de l'U. S. Naval Observatory (Washington), indiquent une différence de 9.10^{-10} entre l'étalon du N. P. L. et un Atomichron. Des comparaisons de fréquence effectuées en coopération par le N. P. L. et Mr Pierce à l'Université de Harvard, donnent une différence de 4.10^{-10} entre l'étalon du N. P. L. et un autre Atomichron.

La comparaison au T. U. 2 des étalons à ammoniac a été effectuée au Japon pour les appareils à absorption (la variation dans le temps a été constatée également) et en Suisse pour le « maser ». Des différences de l'ordre de 7.10^{-8} existent entre les diverses déterminations.

EXPÉRIENCES A FAIRE EN VUE DE CHOISIR LE MEILLEUR ÉTALON.

Il y a lieu tout d'abord de poursuivre activement l'étude et la réalisation d'étalons atomiques de fréquence, tant des types actuels que de nouveaux types éventuels, pour recueillir le plus de données possible sur leur fonctionnement.

De plus, il est nécessaire d'étendre les comparaisons directes des étalons entre eux, comparaisons qui n'ont encore été effectuées que dans un seul cas. Les diverses méthodes qui peuvent être adoptées sont les mesures par l'intermédiaire d'émissions de fréquences étalons (surtout sur fréquences basses) et de signaux horaires, ainsi que le transport matériel d'étalons quand il est possible. Les comparaisons devraient se faire non seulement entre divers modèles d'un même type d'appareil, mais aussi entre appareils de types différents.

L'Union Radioscientifique Internationale (U. R. S. I.) sera sollicitée, lors de sa prochaine Assemblée Générale à Boulder, de prendre en charge l'organisation pratique de telles compa-

raisons et la centralisation des résultats, dans le cadre de sa Commission 1.

En conclusion de ses travaux le Comité Consultatif a adopté à l'unanimité les trois Recommandations suivantes :

Recommandation 1.

« Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde recommande aux laboratoires engagés dans la construction d'étalons atomiques de fréquence, d'en pousser l'étude aussi loin que possible, et de fournir les données les plus complètes sur les résultats obtenus. »

Recommandation 2.

« Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde recommande aux Laboratoires d'organiser le plus tôt possible la comparaison de leurs étalons atomiques de fréquence, qu'ils soient du même type ou de types différents. Il est souhaitable que ces comparaisons soient réalisées dans toutes les combinaisons possibles. »

Recommandation 3.

« Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde exprime le vœu que la Commission N° 1 de l'Union Radioscopique Internationale, à l'occasion de sa Douzième Assemblée Générale, à Boulder, mette à l'étude la comparaison des étalons atomiques de fréquence, conformément à la Recommandation 2. »

Ce n'est qu'après avoir recueilli les résultats des études et des mesures recommandées qu'il sera possible d'envisager le choix d'une fréquence étalon et de sa valeur numérique. Il a été décidé de n'adopter actuellement aucune valeur officielle, même à titre provisoire.

L'ÉPHÉMÉRIDE DE LA LUNE.
LA THÉORIE DE BROWN EST-ELLE SUFFISANTE
OU CONVIENT-T-IL DE L'AMÉLIORER
EN QUELQUES POINTS ?

*Compte rendu de la réunion du Sous-Comité du Comité Consultatif,
tenue le 4 juin 1957.*

Mr SADLER indique qu'il est souhaitable, pour les physiciens présents, comme pour les astronomes, de connaître la précision que l'on peut obtenir pour la détermination de la seconde de temps des éphémérides à partir des observations de la Lune. Pour relier les observations lunaires au temps des éphémérides, il faut connaître théoriquement le mouvement de la Lune.

Il y a actuellement deux causes possibles d'incertitude en ce qui concerne ce mouvement.

La première cause est due aux forces de marée. Nous ne connaissons pas dans quelle mesure la lente décroissance de la vitesse de rotation de la Terre, due aux forces de marée, affectera les distances Terre-Lune, Terre-Soleil et les mouvements angulaires.

Les accélérations séculaires du Soleil et de la Lune qui en résultent ne sont pas reliées par une relation connue, comme le sont les accélérations qui résultent des variations de la quantité de mouvement angulaire de la Terre. Elles doivent donc être déterminées indépendamment à partir des observations : les valeurs adoptées sont celles qui ont été déterminées par H. Spencer Jones en 1939, en conclusion d'une discussion complète des observations faites depuis 1650 environ. Ces valeurs sont : $+ 5^{\circ}.22 T^2$ pour la Lune et $1^{\circ}.23 T^2$ pour le Soleil, où T est exprimé en siècles. Cependant, pour la détermination du temps des éphémérides, la quantité importante est

$$[(-13.37 \times 1^{\circ}.23) + 5^{\circ}.22] T^2 = -11^{\circ}.22 T^2,$$

où 13,37 est le rapport des mouvements moyens de la Lune et du Soleil, tandis que $11^{\text{e}}.22 T^2$ est le terme séculaire, tiré des observations, que l'on applique à la théorie purement gravitationnelle de la Lune. La valeur du coefficient de T^2 est une mesure de la dissipation d'énergie du système Terre-Lune-Soleil et peut ne pas être constante pour de grands intervalles de temps. Une erreur de 1^{e} , qui est tout à fait improbable actuellement, conduirait à un changement de 10^{-9} en un siècle dans la mesure de la seconde de temps des éphémérides.

La deuxième cause d'incertitude réside dans l'inexactitude possible de la théorie de la Lune de Brown. Jusqu'à ces dernières années, l'éphéméride de la Lune a été calculée en utilisant des Tables que Brown a préparées à partir de sa théorie. Mais au cours des dernières années, W. J. Eckert et ses collaborateurs, aux États-Unis, ont calculé une éphéméride améliorée, avec une précision supérieure à celle que l'on peut obtenir à partir des Tables, en évaluant directement la théorie de Brown à l'aide d'une machine à calculer électronique. L'éphéméride lunaire améliorée, calculée de cette façon, est maintenant disponible jusqu'à la fin de 1971. Au delà, la continuation de l'éphéméride doit être assurée par le Nautical Almanac Office. Comme première étape, il a été proposé de vérifier l'éphéméride lunaire améliorée, qui représente la théorie de Brown, en la comparant avec le résultat d'une intégration numérique directe faite avec une machine à calculer électronique. Mais cette comparaison ne pourrait pas révéler des désaccords de très courte période (qui sont sans importance pour la détermination du temps des éphémérides) ou de très longue période. Une nouvelle théorie serait une grande entreprise. Il est donc nécessaire d'obtenir des avis sur la précision de la théorie actuelle et sur la nécessité d'une nouvelle théorie, pour déterminer la seconde de temps des éphémérides avec une précision suffisante.

En conclusion de cet exposé d'introduction, Mr SADLER pose les trois questions suivantes :

a. Considère-t-on que la théorie de la Lune de Brown a une précision de 0,01, comme l'indique l'éphéméride lunaire améliorée ?

b. Dispose-t-on actuellement, ou disposera-t-on dans un proche avenir, de méthodes d'observations qui justifient une précision réelle de 0,01 de l'éphéméride lunaire ?

c. Est-il nécessaire d'établir une nouvelle théorie de la Lune de façon à être sûr que l'éphéméride sera systématiquement plus précise que les observations ?

A ces questions Mr CLEMENCE répond : Il y a lieu d'être prudent dans les estimations de précision. Ma réponse tiendra compte de

mon expérience générale des observations astronomiques et de mon expérience des erreurs dans la théorie des planètes. La théorie du mouvement de la Lune comprend deux parties principales : une partie solaire et une partie due aux planètes, principalement Vénus, Mars et Jupiter.

La partie solaire a été examinée avant 1939 par W. J. Eckert qui l'a trouvée satisfaisante. Quant aux termes dus aux planètes, on peut émettre l'hypothèse que le développement de Brown n'est pas meilleur que les théories actuelles des planètes elles-mêmes. Si cette hypothèse est exacte, je pense que l'éphéméride améliorée de la Lune est capable de fournir la seconde de temps des éphémérides avec une précision de 10^{-10} en cinq ans. Pendant cet intervalle de temps, les erreurs de courte période vont s'annuler et celles de longue période ne seront pas importantes.

Mr SPENCER JONES demande si la théorie de Brown pourrait être améliorée en utilisant des constantes plus précises pour l'orbite lunaire et pour les planètes (mais sans changer les constantes fondamentales adoptées).

Mr CLEMENCE répond par l'affirmative, en remarquant toutefois que cela exigerait probablement autant de travail que de faire une théorie nouvelle.

Mr SILVA demande si l'on doit faire intervenir la relativité. Mr CLEMENCE considère que la correction correspondante est trop petite pour être significative; néanmoins, on l'inclurait dans une nouvelle théorie.

Mr MARKOWITZ pense que la chambre lunaire permet de déterminer le temps des éphémérides avec une précision de 10^{-9} en un an, la limite étant fixée par des conditions pratiques dues aux erreurs d'observation. Pour se rendre compte si les échelles astronomique et atomique de temps sont différentes, les observations de la Lune doivent être poursuivies pendant un temps suffisant pour obtenir une précision de 10^{-10} environ. Une période d'observation de 10 à 20 ans conviendrait. Si l'on pouvait construire les tables d'une éphéméride lunaire avec une précision de 10^{-11} , ces tables satisferaient entièrement les besoins astronomiques. Il espère qu'une telle éphéméride sera calculée.

Mr MARKOWITZ demande quel est l'effet probable des termes non gravitationnels sur un long intervalle de temps, par exemple 50 ans. Mr CLEMENCE répond que l'erreur due à l'incertitude sur les coefficients correspondants produirait une erreur inférieure à 10^{-11} .

Mr MARKOWITZ demande également si l'éphéméride dont la construction est envisagée permettrait d'obtenir le temps des

éphémérides avec une précision de 10^{-11} , les facteurs d'observation étant mis à part.

Mr CLEMENCE pense qu'une telle éphéméride serait construite de façon à donner une précision de $0,01$ d'arc et que cette précision serait probablement valable pour une longue période, de l'ordre de 20 à 50 ans. Mr MARKOWITZ note qu'une telle éphéméride satisferait les besoins des observateurs.

Mr SPENCER JONES discute le ralentissement de la vitesse de rotation de la Terre et insiste sur les incertitudes qui accompagnent sa détermination. Il souligne que le temps des éphémérides est défini fondamentalement par le mouvement du Soleil et que l'on doit continuer à observer ce mouvement.

Mr CLEMENCE remarque que les observations des petites planètes sont les mieux appropriées pour ce but et que des observations plus nombreuses sont nécessaires. Il signale le programme du Yale Observatory sur les petites planètes. Au cours des huit derniers mois on a calculé, avec une machine I. B. M. 650, les orbites de vingt petites planètes observées à Yale de 1937 à 1950.

Mr le Président DANJON considère qu'il serait utile d'avoir des observations faites dans l'hémisphère sud. Il remarque que l'Observatoire de Quito, en Équateur, conviendrait pour ce travail. Il propose d'adresser une recommandation à l'Union Astronomique Internationale pour attirer son attention sur le besoin d'observations plus nombreuses.

Mr SADLER propose que l'on informe également l'Union Astronomique Internationale de la nécessité de disposer d'une nouvelle éphéméride de la Lune.

Ces deux suggestions sont adoptées et elles seront soumises à l'approbation du Comité Consultatif (voir p. S 16-17).

En conclusion de cette réunion, Mr ESSEN dit combien il a été intéressé par cette discussion, entre astronomes, de la précision des éphémérides présente et future de la Lune. Les physiciens ont ainsi une idée de la précision que l'on peut attendre du temps astronomique.

ÉTAT ACTUEL DES TRAVAUX
AU NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, TEDDINGTON

Par L. ESSEN.

(Traduction.)

Le résonateur étalon à césium, qui a déjà été brièvement décrit (1), a constamment été utilisé depuis juin 1955 lorsque cela était nécessaire, c'est-à-dire en moyenne deux à trois fois par semaine, pour étalonner les horloges à quartz d'usage courant. L'influence de la variation des paramètres de ce modèle a été étudiée et les résultats de ces recherches sont en cours de publication (2). Des comparaisons avec le temps astronomique ont été effectuées; leurs résultats ont été publiés dans deux courtes communications (3). Quelques commentaires sur la définition de la seconde ont été publiés et une note sur ce sujet a été présentée à la session du Comité International des Poids et Mesures, en octobre 1956 (4).

L'exactitude avec laquelle les horloges à quartz peuvent être étalonnées par rapport au résonateur étalon actuel est de $\pm 1 \cdot 10^{-10}$; compte tenu de la dérive des horloges à quartz entre les étalonnages, on peut estimer que ces dernières fournissent le temps atomique avec une exactitude de $\pm 2 \cdot 10^{-10}$. Dans l'ensemble, le fonctionnement de l'étalon a été entièrement satisfaisant, quoique quelques ennuis se soient manifestés récemment pour la mise en phase des champs excitateurs.

(1) ESSEN (L.) et PARRY (J. V. L.), *Nature*, 176, 1955, p. 280.

(2) ESSEN (L.) et PARRY (J. V. L.), *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A 250, 1957, p. 45.

(3) ESSEN (L.) et PARRY (J. V. L.), *Nature*, 177, 1956, p. 744.

STOYKO (N.), *Comptes rendus Acad. Sc.*, 244, 1957, p. 43.

(4) ESSEN (L.), *Nature*, 178, 1956, p. 34; *Procès-Verbaux C. I. P. M.*, 25, 1956, p. 95.

Des comparaisons suivies ont été faites avec l'United States Naval Observatory, afin de déterminer la relation entre l'étalon à césium et la seconde de temps des éphémérides. On espère que les résultats de ces comparaisons seront connus à temps pour être présentés à la session du Comité Consultatif.

Le projet d'un second résonateur à césium a été établi, et ce nouveau modèle est en cours de construction. On espère qu'il permettra d'obtenir une meilleure précision au moyen de simples mesures courantes.

(5 avril 1957.)

ÉTALONS ET MESURES DE FRÉQUENCE
ET D'INTERVALLE DE TEMPS
AUX ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE DE 1954 A 1957

Par W. D. GEORGE,
National Bureau of Standards, Boulder Laboratories.

(Traduction.)

Pendant les trois dernières années, des progrès marqués ont été effectués dans le domaine des étalons de fréquence et des instruments pour la mesure précise des fréquences et des intervalles de temps.

Aux hautes fréquences, les dispositifs à résonance atomique et moléculaire ont déjà atteint la plus grande stabilité de fréquence connue [1]. La construction commerciale d'un étalon de fréquence, l'« Atomichron », a été annoncée en 1956. L'étude de nouveaux projets a été commencée et celle de projets anciens a été poursuivie afin de perfectionner les dispositifs atomiques et moléculaires utilisables pour le contrôle des fréquences. Nous trouvons parmi ces derniers, dans le domaine des hyperfréquences, plusieurs modèles expérimentaux de masers à jet d'ammoniac. De tels oscillateurs peuvent trouver de nombreuses applications pratiques comme étalons de fréquence et comme générateurs de fréquence constante [2].

Une nouvelle norme I. R. E. sur les cristaux piézoélectriques a été publiée [3]. La norme spécifie la nomenclature et les méthodes pratiques de mesure des diverses grandeurs associées aux vibrateurs piézoélectriques.

Les recherches et mises au point sur les résonateurs à quartz ont continué à fournir de nouveaux perfectionnements très utiles dans le domaine du contrôle des fréquences, des mesures et des étalons. Des éléments de cristal de quartz, présentant une constance de $3 \cdot 10^{-10}$ par jour à 65°C et un Q minimum de $4 \cdot 10^6$ à cette température, ont été mis au point [4].

Des études ont été entreprises sur les vitesses de vieillissement et autres caractéristiques des cristaux de quartz lorsqu'ils fonctionnent à des températures relativement constantes dans l'intervalle d'environ 2° K jusqu'à environ 250° K. Des considérations théoriques et les mesures ont montré une nette réduction dans le vieillissement aux plus basses températures; de même, à certaines températures basses, Q a été notablement augmenté et le coefficient de température de la fréquence a été diminué [5], [6].

Les fréquences étalons émises par les stations WWV et WWVH ont été améliorées en exactitude, passant de $2 \cdot 10^{-8}$ à $1 \cdot 10^{-8}$; de même, la stabilité des fréquences émises a été augmentée jusqu'à environ $1 \cdot 10^{-9}$ pour WWV et $5 \cdot 10^{-9}$ pour WWVH. Les signaux de temps à ces deux stations ont été changés pour concorder étroitement avec le temps universel nouvellement défini (T. U. 2), déterminé par le « U. S. Naval Observatory » [7].

La mise en marche d'une station émettrice expérimentale de fréquences étalons, fonctionnant sur 60 kHz, a commencé au National Bureau of Standards, Boulder Laboratories. Une utilisation importante des émissions a été l'intercomparaison régulière, au Cruft Laboratory de l'Université de Harvard, des émissions de fréquences étalons des États-Unis d'Amérique et du Royaume-Uni [8].

Une meilleure compréhension des instruments et des techniques de mesure a été obtenue, et l'on dispose maintenant d'instruments améliorés [9], [10]. On n'a pas encore atteint une limitation pratique à la sensibilité dans l'emploi des instruments avec lesquels les oscillateurs de haute précision ont été comparés.

(28 mai 1957.)

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] The worlds most accurate timepiece, *Atoms for Peace Digest*, 2, n° 2, feb. 23, 1957.
- [2] GORDON (J. P.), A molecular microwave spectrometer, oscillator, and amplifier, *IRE-PGI-4*, oct. 1955, p. 155-160.
- [3] I.R.E. standards on piezoelectric crystals; the piezoelectric vibrator: definitions and methods of measurement, *I.R.E.*, 45, n° 3, march 1957.
- [4] WARNER (A. W.), Crystal unit design for use in a ground station frequency standard, *Proc. 10th Annual Symposium on Frequency Control*, 1956, p. 190-196.
- [5] GEORGE (W. D.), A frequency standard at low temperature, *Proc. 10th Annual Symposium on Frequency Control*, 1956, p. 197-215.
- [6] BOMMEL (H. E.), MASON (W. P.) et WARNER (A. W. jr), Experimental evidence of dislocations in crystal quartz, *Phys. Rev.*, 99, 1955, p. 1894.

- [7] Improvements in standard frequencies broadcast by radio stations WWV and WWVH, *National Bureau of Standards, Technical News Bulletin*, 40, n° 3, 1956, p. 37-38.
- [8] Experimental standard frequency broadcast on 60 kc, *National Bureau of Standards, Technical News Bulletin*, 41, n° 6, 1957.
- [9] CLAPP (J. K.), Locked oscillators in frequency standards and frequency measurements, *IRE-PGI-4*, oct. 1955, p. 128-132.
- [10] WEBER (I. J.), A versatile quadrature time base comparator for automatic frequency measurement, *I.R.E. Convention Record*, 1956.

ÉTALONS DE TEMPS ATOMIQUES ET MOLÉCULAIRES
AU NATIONAL BUREAU OF STANDARDS

Par R. C. MOCKLER,
N. B. S. Boulder Laboratories
(Traduction.)

Il est maintenant à peu près établi que les périodes naturelles du mouvement d'une molécule ou d'un atome devraient fournir un étalon de temps d'une précision exceptionnelle, particulièrement pour les mesures de courtes durées. Le problème qui subsiste alors est celui du choix de la molécule ou de l'atome présentant les caractéristiques les plus intéressantes pour un étalon de temps; ces caractéristiques seront déterminées par divers facteurs y compris les propriétés fondamentales de la substance et la technique expérimentale à utiliser.

Quelques-unes des qualités marquantes d'un système atomique ou moléculaire propre à servir comme étalon pourraient être rapidement notées. Certaines propriétés sont fondamentales et exigées de tout système atomique, quelle que soit la technique employée. La transition de résonance doit être nette et les particules du système doivent avoir une action réciproque insinifiante; cette condition implique un système gazeux. Des substances solides présentent assurément certaines transitions qui ont une réponse extrêmement nette (transitions quadropolaires pures), mais ces transitions sont sujettes aux effets de la température, des imperfections réticulaires, du vieillissement et des impuretés.

On pourrait alors probablement envisager un système gazeux avec des raies spectrales très fines et intenses de fréquence élevée, mais sans être élevée au point que la transition tombe en dehors du domaine des techniques électroniques commodes. On doit ensuite choisir une technique expérimentale permettant la plus haute résolution. On retiendra la méthode qui réduira ou élimi-

nera l'élargissement de la raie spectrale par choc et effet Doppler et qui réduira aussi la largeur naturelle de la raie. Deux techniques permettent d'atteindre ce résultat : la technique du jet atomique et la technique du jet moléculaire (maser). Ces techniques présentent des avantages marqués sur les spectromètres ordinaires à absorption gazeuse parce que les jets ordinairement employés sont composés de particules unidirectionnelles avec une densité suffisamment basse pour que les chocs soient évités. Le caractère directif du jet élimine l'élargissement Doppler et puisqu'il n'existe aucun choc dans le jet, l'élargissement par choc est virtuellement éliminé. Pour réduire la largeur naturelle de la raie, on peut simplement augmenter la longueur du jet (ou, à vrai dire, augmenter la région d'excitation). Il y a naturellement des limites à la longueur du jet étant donné que son intensité diminue lorsque sa longueur augmente. Pour le maser, les dimensions de la cavité limitent la longueur de la région d'excitation. Malgré les avantages bien définis d'un spectromètre à jet, le spectromètre à absorption d'ammoniac a été mis au point à un degré de perfection élevé, plus particulièrement au Japon.

Le National Bureau of Standards a retenu le jet atomique à césium et le jet d'ammoniac (maser) comme choix le plus avantageux ; ce sont probablement les instruments les mieux au point pour ce but, à l'époque actuelle, aux États-Unis d'Amérique. Chacun de ces instruments a ses avantages et désavantages respectifs. Le jet de césium possède une fréquence de transition plutôt élevée, 9192 MHz; les températures correspondantes du four sont basses et les signaux sont intenses. La largeur de la raie est d'environ 300 Hz pour notre propre instrument. L'oscillateur maser, d'autre part, a une fréquence de transition encore plus élevée, 23 870 MHz. Il est moins volumineux et a une largeur de raie de 5 kHz. Il possède un avantage marqué dans les techniques de comparaison des fréquences. De par son caractère auto-oscillant, on a seulement besoin de compter la différence de fréquence entre l'oscillateur maser et le signal multiplié d'un oscillateur à quartz par exemple. Les variations de fréquence peuvent être enregistrées d'une manière continue sans servomécanismes compliqués. L'horloge à césium nécessite un tracé de la forme de la raie à partir de laquelle on détermine la fréquence du centre de la raie spectrale. Les résultats peuvent être rendus continus si l'on introduit des servomécanismes compliqués. Les mesures préliminaires au maser indiquent que sa précision possible est plus élevée que celle des jets de césium existant actuellement. Le maser a toutefois le désavantage de rendre la détermination de l'exactitude plus difficile.

Il existe d'autres choix possibles de systèmes quantiques qui conviendraient pour un étalon de temps. Une possibilité, du reste

parfaitement établie, est celle du jet atomique de thallium qui ressemblerait beaucoup à l'appareil à jet de césium. Il s'en distingue toutefois par sa transition de fréquence plus élevée — 21 105,447 et 21 310,835 MHz pour les deux isotopes abondants — une technique de détection légèrement différente et, caractéristique distinctive la plus importante, une multiplicité (1) plus faible que pour le césium. Comme conséquence on devrait s'attendre à ce que la transition du thallium soit la plus intense, pourvu que l'efficacité du détecteur de thallium ne diffère pas beaucoup de celle du détecteur de césium.

Les possibilités de perfectionnement des étalons atomiques peuvent aussi être obtenues par l'extension des techniques du maser aux autres molécules, en particulier aux molécules linéaires possédant de grands moments électriques dipolaires. Les calculs indiquent qu'une transition particulière dans une molécule linéaire permettrait le mouvement linéaire des molécules séparées, au lieu des trajectoires courbes actuelles dans un maser à ammoniac. Cela permettrait une connaissance plus détaillée de la densité des particules à l'intérieur de la cavité résonnante du maser, cette connaissance détaillée étant nécessaire pour la détermination de l'exactitude d'un spectromètre du type maser. Un jet de cette sorte, suffisamment bien dirigé, a l'avantage de réduire les chocs des molécules sur les parois de la cavité résonnante et de réduire ainsi le bruit, de diminuer la largeur de la raie et d'augmenter l'intensité. Le jet dirigé offre la possibilité d'employer une technique d'excitation de Ramsey qui réduirait notablement la largeur de la raie. Les intensités pour les transitions des molécules linéaires sont quelque peu inférieures à celles de l'ammoniac; cependant, les intensités calculées sont suffisamment élevées pour obtenir un rapport signal/bruit utilisable.

Actuellement, les spectromètres du National Bureau of Standards à jet de césium et à jet d'ammoniac sont capables de fonctionner avec une précision de $1 \cdot 10^{-9}$ et $2 \cdot 10^{-9}$ respectivement (2). Les résultats relatifs à la fréquence indiquent que cette limitation de la précision est imposée par les oscillateurs à quartz associés aux deux systèmes. Une précision de $1 \cdot 10^{-10}$ devrait être atteinte sans aucun changement autre que celui des oscillateurs à quartz. L'exactitude de ces deux instruments est encore

(1) Le spin nucléaire du césium naturel est $\frac{7}{2}$ et celui du thallium $\frac{1}{2}$.

Il s'ensuit que les atomes de thallium sont distribués sur un plus petit nombre d'états que le césium et que ces états ont, par conséquent, une population plus élevée.

(2) Nos spectromètres ne sont pas encore employés comme étalons de temps.

à déterminer, et un programme étendu est prévu pour cette évaluation.

Pour évaluer l'exactitude nous utiliserons la reproductibilité, la comparaison des résonances du césium et du maser, ainsi que la comparaison des résultats expérimentaux aux prévisions calculées. Quelques-unes des informations et expériences nécessaires pour la détermination de l'exactitude sont données ci-après.

Expériences jugées nécessaires pour l'évaluation de l'exactitude de l'horloge à césium :

1. Détermination de l'importance de l'inhomogénéité du champ dans la région de l'excitation du jet et son influence sur la fréquence de transition.

2. Détermination de la précision avec laquelle la phase dans chacun des deux bras du guide d'ondes du système d'excitation de Ramsey peut être réglée. Les déplacements mesurés de la fréquence, consécutifs à des changements de phase connus, devraient être comparés avec la théorie.

3. Détermination des déplacements de fréquence provoqués par les transitions voisines.

4. Recherches du bruit et de la modulation de phase de la chaîne multiplicatrice de la fréquence excitatrice. Des déplacements de phase fonction du temps, introduits par la chaîne, peuvent donner des variations de fréquence notables conduisant à des comparaisons de fréquence incorrectes.

5. Détermination de l'influence des fluctuations de l'intensité du jet.

6. Détermination de l'influence de la largeur de bande du bruit de la chaîne excitatrice sur la forme de la raie spectrale.

Expériences nécessaires à l'évaluation de l'exactitude du maser :

1. Détermination de la fréquence du signal moléculaire en fonction de l'accord de la cavité, de Q et des modalités de construction de l'appareil.

2. Détermination de la fréquence du signal moléculaire en fonction de l'intensité du jet et du potentiel de l'électrode de focalisation. Pour ces expériences, la répartition de l'intensité du jet à l'intérieur de la cavité doit être déterminée par un sondage soigné avec une jauge de Pirani. Une théorie satisfaisante doit être établie.

3. Détermination de la valeur du bruit, des rapports signal/bruit et de la puissance de sortie.

4. Détermination de la fréquence en fonction de la température de la cavité et comparaison aux variations calculées d'après les causes connues.

5. Recherches sur les propriétés de bruit et la modulation de phase de la chaîne multiplicatrice.

6. Établissement d'une théorie appropriée pour la forme de la raie spectrale.

7. Détermination de la précision avec laquelle la cavité résonnante peut être fixée à la fréquence de Bohr.

8. L'horloge à césium et l'horloge maser doivent être comparées en fréquence avec précision.

9. Un examen attentif des fluctuations de phase dans la ligne de transmission entre les horloges atomiques et les oscillateurs à quartz étalons primaires doit être fait.

Finalement, les horloges de notre laboratoire doivent être comparées à celles des autres laboratoires et aux résultats astronomiques. Un accord satisfaisant permettrait d'attribuer une valeur numérique aux fréquences de résonance des horloges.

(28 mai 1957.)

SUR LE RATTACHEMENT
D'UNE FRÉQUENCE ATOMIQUE
A LA SECONDE DE TEMPS DES ÉPHÉMÉRIDES
AU U. S. NAVAL OBSERVATORY

Par W. MARKOWITZ.

(Traduction.)

Si l'on doit définir la seconde au moyen d'une fréquence atomique (ou moléculaire) déterminée, il faudra choisir une valeur qui corresponde aussi étroitement que possible à la seconde de Temps des Éphémérides, afin d'éviter des confusions. Cela implique deux problèmes :

- 1° l'adoption, comme étalon, d'une oscillation particulière, atomique ou moléculaire, produite dans des conditions spécifiées;
- 2° la détermination de la seconde de Temps des Éphémérides avec une haute exactitude, par observation astronomique.

Par les techniques actuelles, la fréquence peut être obtenue rapidement par un procédé atomique (césium) avec une précision de 1.10^{-10} , tandis qu'un délai d'environ un an sera nécessaire pour une précision de 1.10^{-9} par un procédé astronomique. Cependant, par certains aspects, le premier problème présente plus de difficultés que le second. Un certain nombre d'oscillateurs atomiques ou moléculaires ont été proposés pour servir d'étalons. Bien que l'oscillateur à césium ait seul été mesuré avec précision, à environ 1.10^{-10} près, il faudra bien mettre à l'épreuve d'autres oscillateurs, ce qui peut demander des années. D'autre part, il n'y a qu'une façon de déterminer le Temps des Éphémérides : par l'observation de la Lune; dans ce but, des méthodes définies ont été adoptées en 1955 à Dublin par l'Union Astronomique Internationale.

Le U. S. Naval Observatory a en service depuis juin 1952 une

chambre lunaire (dual-rate moon camera) pour déterminer le Temps des Éphémérides. Les préparatifs sont en cours pour que toutes les réductions soient effectuées dans un système homogène au moyen d'une machine à calculer électronique I. B. M. 650.

Les corrections systématiques aux catalogues de la Zone de Yale ont été obtenues pour qu'elles soient placées dans le système N 30. Les données des catalogues de Yale ont été inscrites sur cartes perforées.

On emploie l' « Improved Lunar Ephemeris » (1952-1959) pour obtenir le Temps des Éphémérides d'après les positions observées de la Lune.

Environ 600 clichés ont été mesurés. Ceux-ci seront réduits au moyen de l'I. B. M. 650 lorsque la programmation des calculs sera achevée.

Les corrections d'irrégularité du bord lunaire seront appliquées ultérieurement, lorsque seront disponibles les résultats de C. B. Watts.

Le National Physical Laboratory (Teddington) et le U. S. Naval Observatory (Washington) ont entrepris un programme commun pour la détermination de la fréquence du césium en fonction de la seconde de Temps des Éphémérides. Les signaux GBR et WWV servent à la comparaison des fréquences de Teddington et de Washington. La fréquence du césium a été comparée, une fois par mois depuis juin 1955, au T. U. 2 déterminé au moyen des lunettes zénithales photographiques de Washington et de Richmond (Floride). La fréquence par rapport au Temps des Éphémérides sera obtenue lorsque seront achevées les réductions mentionnées plus haut. Ce programme commun fournira la première détermination de la fréquence du césium en fonction du Temps des Éphémérides.

Pendant l'Année Géophysique Internationale (1957-1958), 20 chambres lunaires seront en service. Le programme à l'échelle mondiale fournira une valeur plus exacte de la seconde de Temps des Éphémérides, et donc une meilleure détermination de la fréquence des étalons atomiques.

Le Naval Research Laboratory (Washington) a mis en service un étalon à césium, Atomichron N° 6, en septembre 1956. Une comparaison préliminaire indique que, après réduction à un champ nul, la fréquence de l'étalon de Teddington est plus élevée que celle de Washington d'environ $5 \cdot 10^{-10}$. Il faudra trouver la cause de cette différence. Ces deux étalons montrent une stabilité individuelle de $1 \cdot 10^{-10}$ en valeur relative.

(Washington 25, D. C., 29 avril 1957.)

SUR LE DÉPLACEMENT
DE LA FRÉQUENCE CENTRALE
D'UN SPECTRE D'INVERSION DE L'AMMONIAC

Par I. TAKAHASHI, T. OGAWA, M. YAMANO et A. HIRAI,
Department of Physics, Faculty of Science, Kyoto University, Kyoto.

(Traduction.)

Les auteurs ont trouvé que la fréquence de l'horloge atomique à modulation Stark ⁽¹⁾ peut se déplacer en fonction de la pression de l'ammoniac dans l'enceinte à effet Stark et aussi pendant un certain temps après que le gaz a été introduit dans l'enceinte.

On a tracé la courbe donnant la fréquence de l'horloge en fonction du carré du champ électrique pour différents états du gaz et les courbes sont à peu de chose près des droites parallèles. On peut en déduire que le déplacement de fréquence est attribuable au déplacement de la fréquence centrale du spectre d'inversion utilisé de l'ammoniac, bien que ce dernier déplacement ait été estimé négligeable aux pressions suffisamment basses dans les travaux antérieurs ⁽²⁾, ⁽³⁾, ⁽⁴⁾, ⁽⁵⁾, ⁽⁶⁾.

Pour la mesure du déplacement de fréquence, le gaz ammoniac introduit était dans deux états différents : un état humide en présence de vapeur d'eau saturante et un état sec sans vapeur d'eau. On a utilisé pour ces mesures un fréquencemètre d'une précision meilleure que $2 \cdot 10^{-9}$, qui sert pour la comparaison

⁽¹⁾ TAKAHASHI (I.), OGAWA (T.), YAMANO (M.), HIRAI (A.) et TAKEYAMA (M.), *Rev. Sc. Instr.*, 27, 1956, p. 739.

⁽²⁾ MARGENAU (H.), *Phys. Rev.*, 76, 1949, p. 1423.

⁽³⁾ ANDERSON (P. W.), *Phys. Rev.*, 75, 1949, p. 1450.

⁽⁴⁾ BRINBAUM (G.) et MARYOTT (A. A.), *Phys. Rev.*, 92, 1953, p. 270.

⁽⁵⁾ BLEANY (B.) et LOUBSER (H. N.), *Proc. Phys. Soc.*, 63 A, 1950, p. 483.

⁽⁶⁾ BLEANY (B.) et PENROSE (R. P.), *Proc. Phys. Soc.*, 59 A, 1947, p. 418; 60 A, 1948, p. 83; 60 A, 1948, p. 548.

entre la fréquence du spectre d'inversion de l'ammoniac et celle de l'oscillateur à quartz de 100 kHz.

Au cours de ces mesures, les déplacements de la fréquence de l'horloge atomique correspondant au spectre d'inversion de l'ammoniac ($J = K = 3$) ont été observés à partir du moment où le gaz a été introduit dans l'enceinte à la pression de $3 \cdot 10^{-3}$ mm Hg.

Dans l'état humide, la fréquence a diminué avec le temps à partir de la valeur initiale, selon une loi exponentielle, d'une quantité voisine de 1,5 kHz pendant une heure; dans l'état sec, la fréquence a au contraire augmenté d'une façon exponentielle et d'une quantité analogue.

De plus, on a observé le déplacement de la fréquence en fonction de la pression, dans l'état humide et dans l'état sec; dans l'état humide le déplacement augmente assez rapidement en fonction de la pression totale, tandis que dans l'état sec le déplacement augmente aussi mais plus lentement.

Ces résultats expérimentaux ne nous donnent que des renseignements qualitatifs. Cependant, on peut envisager deux causes de déplacements de fréquence : 1^o effets résultant de l'absorption de l'ammoniac ou d'autres molécules gazeuses par les parois de l'enceinte; 2^o interaction entre les molécules d'ammoniac et les molécules de gaz étrangers.

Les auteurs adressent leurs remerciements au Professeur N. Sasaki pour ses précieux conseils et les moyens d'action efficaces qu'il leur a accordés; ils désirent également remercier le Dr K. Tomita pour ses utiles commentaires.

(Avril 1957.)

COMPARAISON ENTRE DES ÉTALONS
DE TEMPS ATOMIQUES ET ASTRONOMIQUE
EFFECTUÉE AU JAPON

Par M. MIYADI,
Tokyo Astronomical Observatory.

(Traduction.)

Quatre horloges atomiques sont en service actuellement au Japon; elles sont toutes contrôlées par la fréquence d'absorption de la raie de l'ammoniac $J = K = 3$. Le système par modulation de la source est utilisé dans deux de ces horloges, tandis que les systèmes de modulation Stark-Zeeman sont utilisés dans les deux autres.

Une comparaison des échelles de temps entre les étalons atomiques et astronomique a été effectuée ces dernières années. L'horloge qui a montré une relation à peu près constante avec le temps astronomique pendant toute une année est l'horloge à ammoniac Stark-Zeeman qui a été conçue et mise en œuvre par le Dr Shimoda à l'Université de Tokyo. D'après les observations faites de mars 1956 à mars 1957, nous avons obtenu pour la fréquence de la raie $3-3 \text{ NH}_3$ en T. U. 2 :

$$23\,870\,131,05 \pm 0,04 \text{ kHz};$$

l'erreur indiquée correspond au degré de confiance de 90 % et représente $\pm 2 \cdot 10^{-9}$ en valeur relative.

Les comparaisons ont été rapportées d'abord au T. U. 2 de Tokyo, qui était déterminé d'après des observations faites avec la lunette zénithale photographique (PZT) de Tokyo, et ont fourni un écart quadratique moyen de $\pm 0,11 \text{ kHz}$ pour chacun des résultats moyens de cinq déterminations effectuées à des jours différents.

Cependant, Iijima a découvert des erreurs systématiques

saisonniers dans le T. U. 2 de Tokyo, lorsqu'il l'a comparé à d'autres T. U. 2 déterminés indépendamment à Washington, Greenwich et Paris. Le caractère des erreurs qui se sont manifestées en 1955 correspond si bien à ce qui a été observé en 1956 que les erreurs systématiques paraissent impliquer des erreurs dans la détermination du temps à Tokyo, principalement des erreurs d'ascension droite des étoiles du PZT de Tokyo et partiellement des effets saisonniers sur les observations. Après avoir corrigé le T. U. 2 de Tokyo des erreurs systématiques, on obtient pour l'écart-type précédent $\pm 0,08$ kHz. Les résultats corrigés sont indiqués au tableau I.

L'écart-type des observations astronomiques de Tokyo groupées en moyennes mensuelles est maintenant estimé approximativement à ± 5 ms. Selon notre méthode habituelle pour lisser les observations sur les horloges à quartz, on estime que l'écart-type de leur marche déterminée d'après le T. U. 2 de Tokyo pourrait être $\pm 2,7 \cdot 10^{-9}$. L'écart-type pour chacun des résultats du tableau I étant $\pm 3,4 \cdot 10^{-9}$, l'écart-type propre à l'horloge atomique devient $\pm 2,1 \cdot 10^{-9}$.

TABLEAU I.

| Date (en année). | Fréquence de l'horloge atomique (moyenne de 5 résultats). |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1956, 19..... | 23 870 130,92 kHz |
| 23..... | 0,92 |
| 31..... | 1,08 |
| 37..... | 0,96 |
| 57..... | 1,14 |
| 61..... | 1,01 |
| 64..... | 1,06 |
| 70..... | 1,15 |
| 82..... | 0,99 |
| 85..... | 0,97 |
| 94..... | 1,07 |
| 97..... | 1,18 |
| 1957, 02..... | 1,15 |
| 06..... | 1,06 |
| 12..... | 0,99 |
| 16..... | 1,14 |
| 21..... | 1,09 |
| Moyenne..... | 23 870 131,05 kHz |

(Avril 1957.)

HORLOGE ATOMIQUE A AMMONIAC

Par K. SHIMODA,

Department of Physics, University of Tokyo, Tokyo.

(Traduction.)

Divers modèles d'oscillateurs contrôlés par l'ammoniac sont apparus ces dernières années. Cependant, la stabilité de fréquence de la plupart de ces modèles était limitée par les caractéristiques de fréquence des éléments guides d'ondes, plutôt que par la raie spectrale elle-même. Par conséquent, l'exactitude absolue d'une telle horloge atomique peut difficilement être meilleure que 10^{-8} , puisque la raie d'absorption de l'ammoniac dans le guide d'ondes a une largeur spectrale d'environ 200 Hz.

Une méthode de modulation par effet Stark paraissait propre à l'amélioration de l'exactitude. Un appareil d'essai à modulation Stark de l'ammoniac a été construit d'abord dans notre laboratoire en 1952, et une autre horloge plus perfectionnée est maintenant sur le point d'être achevée à l'Université de Kyoto. L'expérience a montré que ces horloges pouvaient présenter une erreur d'au moins quelques 10^{-8} . On a trouvé que l'erreur de l'horloge à modulation Stark a pour cause principale l'effet de la dispersion et de la réflexion dans l'enceinte guide d'ondes. On peut s'affranchir presque complètement de telles erreurs en utilisant l'effet Zeeman. Pour un certain champ magnétique, la résonance de l'ammoniac ne montre aucune dispersion près du centre de la raie, et l'on obtient par conséquent un étalon de fréquence très reproductible. L'horloge à absorption d'ammoniac de notre laboratoire utilise la modulation Stark et la modulation de la source, en plus de l'effet Zeeman; elle peut donc être appelée une horloge à ammoniac Stark-Zeeman.

On a commencé en 1954 une comparaison préliminaire entre le temps atomique de l'horloge à ammoniac et le temps astronomique. Beaucoup de perfectionnements étaient encore nécessaires et des

résultats assez grossiers ont seuls été obtenus à cette époque. L'amélioration de l'horloge à ammoniac a été interrompue pendant un an par l'absence de l'auteur; ce n'est que depuis mars 1956 qu'elle fournit d'une façon constante une exactitude de quelques 10^{-9} .

Quelques résultats préliminaires sont indiqués au tableau I, dans lequel le temps universel quasi uniforme T. U. 2 a été déterminé par des observatoires astronomiques. On a découvert tout d'abord des écarts significatifs dans le T. U. 2 de Tokyo en mars et avril 1956; ces écarts ont été attribués à des erreurs systématiques dans la détermination du temps par la lunette zénithale photographique (PZT) de Tokyo. Les corrections ont été confirmées après coup par comparaison avec le T. U. 2 d'autres observatoires.

TABLEAU I.

Comparaison du temps atomique au temps universel T. U. 2 de plusieurs observatoires.

(Les nombres donnés sont les valeurs de la fréquence de l'ammoniac en T. U. 2, diminuées de 23 870 MHz).

| Période. | Référence. | Fréquence (kHz). | Écart-type de chaque résultat (kHz). |
|-------------------------|------------|------------------|--------------------------------------|
| 1. Mars-avril 1956..... | Washington | 131,08 | 0,28 |
| 2. » » » | Paris | 131,02 | 0,17 |
| 3. Mars-mai 1956..... | Ottawa | 131,02 | 0,28 |
| 4. » » » | Potsdam | 131,04 | 0,28 |
| 5. » » » | Tokyo | 131,02 | 0,29 |
| 6. Juill-nov. 1956..... | Tokyo | 131,10 | 0,18 |

La moyenne des résultats montre que la fréquence de la raie 3-3 de l'ammoniac, évaluée d'après le T. U. 2 (1956), est $23\ 870\ 131,05 \pm 0,05$ kHz, l'erreur indiquée représentant une probabilité de 90 %. Dans l'erreur sont comprises les erreurs de détermination du temps uniforme et les fluctuations dans la propagation des émissions de fréquence étalon. Des résultats plus récents présentent une exactitude meilleure, d'un facteur 3 au moins, et l'exactitude de l'horloge à ammoniac Stark-Zeeman actuelle est probablement meilleure que 10^{-9} . Cette erreur est pourtant plus grande que les fluctuations de bruit du système électronique. Le surplus d'erreur est attribuable principalement à l'évaluation du déplacement de fréquence provoqué par l'élargissement propre et les impuretés gazeuses dans l'enceinte. On a trouvé que la fréquence centrale de la raie 3-3 de l'ammoniac

pur présente des déplacements vers des fréquences plus élevées, donnés par $\Delta\nu_0 = (4,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-2} \Delta\nu_p$; dans cette expression, $\Delta\nu_p$ est la demi-largeur due uniquement à l'élargissement par pression. Les valeurs de la fréquence données au tableau I ont été extrapolées à pression nulle.

Des études sur un oscillateur « maser » à ammoniac sont également en cours dans notre laboratoire. En utilisant une focalisation octupolaire et un refroidissement efficace, notre « maser » peut se mettre à osciller avec une tension de focalisation de 2 400 V, le maximum étant environ 21 000 V. Pendant que l'on préparait une comparaison précise de la fréquence du « maser » à celle de la raie d'absorption et au T. U. 2, un rapport préliminaire de J. Bonanomi a été publié.

On estime que la fréquence du « maser » est déplacée d'environ -1,2 kHz à cause de la population différente en molécules des niveaux hyperfins, et encore de -0,2 à -0,5 kHz à cause de la composante d'onde progressive dans la cavité (1). La grandeur exacte du déplacement dépend évidemment de la forme de l'appareil et des conditions de fonctionnement. Par conséquent, on peut conclure que la raie d'absorption est un meilleur étalon en ce qui concerne l'exactitude absolue, bien que chaque « maser » présente une meilleure reproductibilité. La seule cause d'erreur systématique qui n'ait pas été étudiée jusqu'ici dans le cas de la raie d'absorption est le déplacement en rapport avec les chocs des molécules sur les parois de l'enceinte. Mais ce type de déplacement ne varie pas avec les conditions de fonctionnement et peut être considéré comme une correction constante propre à l'appareil. Sa grandeur pourrait être quelques centièmes de l'élargissement dû aux chocs sur les parois, qui est lui-même 11,2 kHz dans notre horloge à ammoniac Stark-Zeeman.

L'auteur exprime sa reconnaissance au Professeur M. Miyadi, de l'Observatoire Astronomique de Tokyo, pour l'intérêt constant qu'il a porté à ces recherches et pour sa contribution dans la comparaison des étalons de temps atomiques et astronomique.

(Avril 1957.)

(1) SHIMODA (K.), à paraître dans *J. Phys. Soc. Japan*, 12, 1957.

FRÉQUENCE PRÉCISE
DE LA RAIE D'INVERSION 3-3 DE L'AMMONIAC

Par K. SHIMODA,

Department of Physics, Faculty of Science, University of Tokyo.

(Traduction.)

Des séries de mesures récentes avec l'horloge atomique à absorption du type Stark-Zeeman [1], entre mars et novembre 1956, conduisent à la valeur suivante de la fréquence de la raie 3-3 en T. U. 2 :

$$\nu_a = 23\,870\,131,05 \pm 0,05 \text{ kHz.}$$

Si l'on appelle $\Delta\nu_p$ l'élargissement dû uniquement à l'effet de pression, la fréquence centrale a montré un déplacement vers les fréquences élevées de $\Delta\nu_a = a\Delta\nu_p$; la valeur donnée ci-dessus est extrapolée à pression nulle (*).

Récemment a été publiée une Note [2] sur la fréquence d'un oscillateur « maser » à jet moléculaire indiquant la valeur suivante en T. U. 2 (septembre 1956)

$$\nu_m = 23\,870\,129,42 \pm 0,05 \pm 0,12 \text{ kHz,}$$

valeur plus petite que ν_a de 1,63 kHz ou $7 \cdot 10^{-8}$ en valeur relative.

Pour comparer ces deux valeurs, le déplacement de fréquence dû aux répartitions différentes de population dans les niveaux hyperfins quadrupolaires $F_1 = 2, 3$ et 4 , doit être considéré. Ce type de déplacement n'a pas été décrit dans la référence [3] puisqu'il avait déjà été exposé par Gordon [4]. Si l'on suppose que eqQ est plus grand de 4 ± 1 kHz dans l'état d'inversion

(*) Le coefficient a diminue sensiblement avec la quantité d'impuretés présentes dans le gaz de l'enceinte; on peut donc estimer que pour l'ammoniac pur, $a = (4 \pm 1) \cdot 10^{-2}$.

inférieur que dans l'état d'inversion supérieure, la raie centrale de la raie 3-3, correspondant à la transition $\Delta F_1 = 0$, comporte trois composantes $F_1 = 3, 4$ et 2 .

Les intensités des composantes $F_1 = 3, 4$ et 2 sont dans le rapport $7 : 9 : 5$ dans la raie d'absorption, et par conséquent la fréquence moyenne pondérée coïncide exactement avec celle de la raie non déplacée par la structure hyperfine. Les intensités relatives de ces composantes dans un « maser » sont déterminées par le nombre relatif des molécules qui sont focalisées dans les niveaux hyperfins. La force de focalisation étant à peu près proportionnelle à M^2 , le rapport d'intensité des composantes $F_1 = 3, 4$ et 2 est approximativement $45 : 37 : 2$. Dans ce dernier cas, le centre non résolu de la raie d'émission est déplacé de $\Delta\nu_l = -0,48 \pm 0,12$ kHz.

Les conditions dans un oscillateur « maser » sont encore plus différentes. A cause de l'amplification régénérative, l'oscillation dans une longue cavité doit s'amorcer à une fréquence plus voisine de celle de la raie d'émission la plus intense $F_1 = 3$. Ainsi le déplacement de fréquence de l'oscillation près du seuil serait $-1,24 \pm 0,31$ kHz. A mesure qu'on augmente la tension de focalisation, l'amplitude haute fréquence dans la cavité augmente et la saturation de la composante $F_1 = 3$ tend à introduire une contribution plus importante des composantes $F_1 = 4$ et 2 , ce qui provoque un déplacement qui tend vers $\Delta\nu_c$.

De plus, le déplacement de fréquence provoqué par la présence d'une onde progressive est relativement grand pour une longue cavité, ainsi qu'il est montré dans (57) dans la référence [3] ci-dessous. L'énergie haute fréquence dissipée par le jet étant proportionnelle à l^2 ou z^2 dans des champs haute fréquence faibles, tandis que la perte d'énergie haute fréquence est répartie symétriquement sur la longueur de la cavité, le flux résultant d'énergie haute fréquence est opposé à la direction du jet, de sorte que le déplacement de fréquence est négatif. Si l'on prend $Q_l = 1$ à $2 \cdot 10^4$, $L = 30$ cm, et $Q_c = 10^7$, le déplacement dû à l'onde progressive est $\Delta\nu_l = -(0,48 \text{ à } 0,24)$ kHz.

Par conséquent, le déplacement de fréquence de l'oscillateur « maser » est estimé à $-1,7$ kHz au voisinage du seuil et il est $-0,7$ kHz au voisinage de la limite de saturation. On peut en conclure que la raie d'absorption pourrait être un étalon meilleur en ce qui concerne l'exactitude absolue, bien que chaque « maser » présente une meilleure reproductibilité. La seule cause d'erreur systématique de la fréquence d'absorption qui n'ait pas encore été étudiée jusqu'ici est le déplacement provoqué par les chocs sur les parois, mais ce déplacement ne varie pas avec les conditions de fonctionnement. Une comparaison exacte de la raie d'absorption au « maser » est en projet dans notre labo-

ratoire. Notre « maser » étant capable d'entrer en oscillation avec une tension de focalisation de 2,4 kV seulement, et permettant un maximum de 21 kV, les déplacements mentionnés ci-dessus seront étudiés en détail.

(Avril 1957.)

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] SHIMODA (K.), *J. Phys. Soc. Japan*, 9, 1954, p. 567.
- [2] BONANOMI (J.) et HERRMANN (J.), *Helv. Phys. Acta*, 29, 1956, p. 451.
- [3] SHIMODA (K.), WANG (T. C.) et TOWNES (C. H.), *Phys. Rev.*, 102, 1956, p. 1308.
- [4] GORDON (J. P.), *Phys. Rev.*, 99, 1955, p. 1253.

NOTE SUR L'HORLOGE ATOMIQUE
EN FONCTIONNEMENT
A L'ELECTROTECHNICAL LABORATORY, TOKYO

Par M. HATOYAMA.

(Traduction.)

Méthode. — Absorption de la raie 3-3 de l'ammoniac.

Principe. — Modulation de la source; on imprime à l'oscillateur à 8 000 MHz une modulation de fréquence par une onde carrée à 200 Hz. La profondeur de la modulation de fréquence est variable et peut atteindre 300 kHz.

Enceinte d'absorption. — Guide d'ondes à bande K d'une longueur d'environ 23 m. Le gaz ammoniac (NH_3) est introduit jusqu'à donner une largeur totale d'environ 150 kHz ($\Delta\nu_p \simeq 70\text{kHz}$) et une absorption de $3,5 \cdot 10^{-4}$ par cm.

Résultats. — 1° On a observé la variation de la fréquence du centre apparent de la raie d'absorption en fonction de la pression de NH_3 et de la teneur en gaz étranger, et l'on a obtenu les valeurs suivantes du coefficient de déplacement par pression :

| | |
|--------------------------|------------------------------|
| $a = +1,8 \cdot 10^{-2}$ | pour NH_3 |
| $-6,0 \cdot 10^{-3}$ | » A |
| $-7 \cdot 10^{-3}$ | » O_2 |
| $-7 \cdot 10^{-3}$ | » CH_4 |
| $-1,8 \cdot 10^{-2}$ | » N_2 |
| $-3,5 \cdot 10^{-2}$ | » CO_2 |
| $-1,14 \cdot 10^{-1}$ | » CH_3COCH_3 |

2° La fréquence de la raie a été comparée aux signaux JJY entre le 8 décembre 1956 et le 1^{er} février 1957.

Après correction de l'effet de pression, on a obtenu pour la fréquence de la raie d'absorption d'une molécule libre NH_3 et par comparaison au T. U. 2, la valeur

$$\nu = 23\,870\,129\,310 \pm 50 \pm 80 \text{ Hz};$$

le premier terme d'erreur représente l'écart-type et le second terme d'erreur les incertitudes provenant de la comparaison au T. U. 2.

(Avril 1957.)

NOUVEAUX PROGRÈS DES RECHERCHES
SUR LES DÉPLACEMENTS DE FRÉQUENCE
DANS LE SPECTRE D'INVERSION DE L'AMMONIAC

Par I. TAKAHASHI, M. YAMANO et H. HIRAI,

Department of Physics, Faculty of Science, Kyoto University, Kyoto.

(Traduction.)

On a effectué des mesures de déplacement de fréquence de la raie d'inversion de l'ammoniac ($J = K = 3$) en fonction de la pression totale et en fonction de la demie demi-largeur.

On a déterminé la valeur de a dans l'expression

$$\gamma = \frac{\gamma_0 (\Delta\nu)^2}{[\nu - \nu_0 \pm a(\Delta\nu)]^2 + (\Delta\nu)^2},$$

où

γ est le coefficient d'absorption;

γ_0 le coefficient d'absorption pour $\nu = \nu_0$;

$\Delta\nu$ la demie demi-largeur;

ν_0 la fréquence centrale de la raie d'absorption.

On a trouvé pour a la valeur $2,7 \pm 0,1 \cdot 10^{-2}$ pour $\Delta\nu = 350$ kHz et lorsque la pureté de l'ammoniac est 94 %. Le déplacement de fréquence en relation avec la pression de l'ammoniac a été aussi obtenu, le résultat est $0,8 \pm 0,1$ MHz/mm Hg.

L'analyse au spectromètre de masse de l'échantillon d'ammoniac qui a été enfermé dans une enceinte à effet Stark pendant sept jours a montré une diminution de la pression partielle du gaz ammoniac de 94 à 20 %. Ce fait correspond au remplacement de molécules d'ammoniac par des molécules de gaz étrangers qui étaient contenues dans les parois de l'enceinte. En conséquence, pour réaliser un étalon de fréquence précis dont l'exactitude soit meilleure que $5 \cdot 10^{-9}$ en utilisant le spectre d'absorption

de l'ammoniac, il est absolument nécessaire d'utiliser une enceinte à effet Stark complètement dégazée. Le déplacement de fréquence du spectre d'inversion de l'ammoniac a aussi été mesuré lorsqu'un gaz étranger est introduit délibérément dans la proportion de 1/1. La valeur de a est alors devenue négative.

Pour obtenir un étalon de fréquence exact, il faudra contrôler plus sévèrement qu'on ne le croyait nécessaire jusqu'à présent l'influence de la pression sur la fréquence du spectre de l'ammoniac.

(Avril 1957.)

HORLOGE A AMMONIAC EN FONCTIONNEMENT
A LA « TOKYO SHIBAURA ELECTRIC Co »

Par N. SAWAZAKI et T. HONMA.

(Traduction.)

L'horloge a été construite pour un fonctionnement continu sur de longues durées, sans aucun autre réglage, avec une exactitude de 10^{-8} , ce qui a entraîné un certain nombre de caractéristiques qui sont exposées ci-après :

1° Le système par modulation de la source a été employé pour commander l'instrument. La raison en est que la construction de l'enceinte d'absorption et du servomécanisme est plus simple que dans le cas des autres systèmes. Une autre raison est que l'on peut diminuer l'erreur due aux caractéristiques de fréquence du circuit en ondes courtes par l'emploi d'un appareil correcteur d'erreur et de tubes à ondes progressives.

2° L'appareil est prévu pour un fonctionnement automatique par l'emploi de tubes à ondes progressives et d'un multiplicateur de fréquence à cristal fonctionnant aux fréquences des micro-ondes, notre tube à ondes progressives nous donnant de bons espoirs pour ce but.

3° En utilisant le système asservi de correction d'erreur, il est possible de compenser automatiquement l'erreur provoquée dans le circuit à basse fréquence par les caractéristiques de fréquence dans le circuit à micro-ondes au voisinage de la fréquence d'absorption; on espère donc une exactitude plus élevée.

4° L'enceinte à absorption du gaz NH_3 est hermétiquement scellée, afin de simplifier le système de pompage et aussi pour obtenir un fonctionnement continu pendant de longues périodes.

5° Un oscillateur de micro-ondes dans la bande 24 000 MHz est utilisé pour éviter l'introduction d'erreurs qui seraient dues aux incertitudes sur les caractéristiques de fréquence de l'enceinte et à un défaut d'adaptation à l'extrémité réceptrice.

Le résultat de nos essais a montré que la stabilité de la fréquence obtenue est meilleure que $2 \cdot 10^{-8}$ environ par comparaison à la fréquence étalon des signaux JJY.

(Avril 1957.)

MODULATION PAR EFFET STARK
D'UNE HORLOGE ATOMIQUE

Par I. TAKAHASHI, T. OGAWA, M. YAMANO, A. HIRAI
et M. TAKEYAMA,

Department of Physics and Abuyama Seismological Observatory,
Faculty of Science, Kyoto University, Kyoto.

(Traduction.)

Une horloge atomique utilisant l'effet Stark a été conçue et construite. Dans cette horloge, les erreurs provoquées par les réflexions dans les circuits à micro-ondes ont été diminuées avec succès jusqu'au niveau des bruits de fluctuation et les auteurs sont certains des possibilités de fonctionnement continu sur de longues périodes. D'après l'observation des fréquences reçues de la station JJY, et par comparaison à la fréquence d'une horloge à quartz, l'exactitude de l'horloge atomique a été estimée à environ $5 \cdot 10^{-9}$.

La fréquence de l'oscillateur à cristal est multipliée par la chaîne multiplicatrice de fréquence jusqu'à la fréquence d'absorption de la raie 3-3 NH_3 et la puissance à cette fréquence est appliquée à l'enceinte à effet Stark. Une onde de tension carrée à la fréquence stabilisée ν_m , d'amplitude contrôlée, est appliquée à une électrode de l'enceinte à effet Stark. La fréquence ν_s au point de croisement des deux courbes d'absorption, avec et sans champ électrique d'effet Stark, constitue l'étalon.

Lorsque la fréquence de l'onde appliquée à l'enceinte est différente de la valeur étalon ν_s , la puissance en micro-ondes qui sort de l'enceinte à effet Stark est modulée en amplitude à la fréquence de la modulation par effet Stark, et la tension délivrée par le détecteur à cristal est une composante à la fréquence de modulation. Cette tension, qui est appelée le signal d'erreur, est amplifiée puis détectée par un détecteur de phase. La tension de sortie est ensuite modulée à 60 Hz et amplifiée pour com-

mander le servomoteur qui ajuste la fréquence de l'oscillateur à cristal jusqu'à la valeur étalon.

Dans ce système, les erreurs dues aux réflexions dans les circuits à micro-ondes et aux variations de la puissance en micro-ondes appliquée à l'enceinte par suite de changements de fréquence, erreurs qui étaient des obstacles sérieux dans les horloges atomiques de types plus anciens, sont fortement réduites.

(Avril 1957.)

UN ÉTALON DE FRÉQUENCE
AU CENTRAL INSPECTION INSTITUTE
OF WEIGHTS AND MEASURES, TOKYO

(Traduction.)

Depuis le 18 septembre 1956, une horloge à quartz type 1100 AP, fabriquée par General Radio Co, Mass., U. S. A., est en service au C. I. I. W. M., comme étalon de fréquence pour la Section de Chronométrie.

Grâce à une source d'énergie de secours spécialement étudiée, l'horloge reste en service normal d'une façon très suffisante, même dans le cas d'une défaillance de la source d'énergie.

Comme il ne s'est écoulé que 200 jours depuis sa mise en fonctionnement, le quartz est encore dans une période de vieillissement, d'où il résulte qu'une dérive relativement grande de la fréquence est observée par rapport aux signaux étalons japonais de temps et de fréquence (JJY).

La dérive moyenne de la fréquence observée pendant les cinquante premiers jours a été de l'ordre de $5 \cdot 10^{-9}$ par jour; pour les jours 50 à 140, elle était voisine de zéro (1); pour les jours 140 à 200 elle a atteint $3 \cdot 10^{-9}$ par jour.

Naturellement, la dérive de la fréquence pendant une courte période ne peut pas être déduite directement de la dérive pendant une longue période, car il existe des dérives de nature oscillatoire pendant de courts intervalles de temps qui peuvent être provoquées par des changements de conditions extérieures (température, pression atmosphérique, tension du réseau, etc.).

Mais dans les expériences pratiques d'une durée d'environ

(1) Ceci semble être dû à quelque augmentation de l'amplitude de vibration du quartz.

une heure, il n'est pas difficile de maintenir la précision de l'horloge à mieux que 1 à 3.10^{-9} par rapport aux signaux JJY ou WWVH.

(Avril 1957.)