

PART III. ATOMIC STANDARDS OF FREQUENCY

ETALONS DE FREQUENCE

PAR B. DECAUX

Centre National d'Etudes des Télécommunications, Paris, France

Résumé. De récents progrès ont été obtenus sur les horloges à quartz et les étalons atomique de fréquence.

L'amortissement des cristaux a pu être notablement diminué par le choix de tailles spéciales et également par l'emploi de températures voisines du zéro absolu; le vieillissement se trouve en même temps très réduit. L'asservissement d'un oscillateur par un cristal fonctionnant comme résonateur permet d'obtenir une stabilité accrue.

Le résonateur à jet atomique de césium a fourni de remarquables résultats dans divers pays, et a permis d'affectuer des comparaisons internationales montrant un accord à quelques 10^{-10} près. Des mesures régulières sont effectuées par rapport aux déterminations horaires. Un de ces appareils est réalisé sous forme industrielle.

Le Maser à jet moléculaire d'ammoniac constitue un générateur de courant. Il a donné lieu à de nombreuses réalisations. Certains de ces étalons sont comparés aux horloges d'observatoires, et par l'intermédiaire de signaux horaires, aux étalons à césium. Certaines différences ont été constatées.

Les étalons atomiques de fréquence permettent d'améliorer considérablement la conservation du temps par les horloges à quartz.

Les étalons utilisés actuellement sont basés soit sur la résonance mécanique du quartz piézo-électrique, soit sur la résonance atomique du césium ou moléculaire de l'ammoniac. Les cavités résonantes en supraconductivité ne paraissent pas être sorties des laboratoires de recherches.

Pour obtenir la précision la meilleure, il faut évidemment que la résonance soit aussi aigüe que possible, ce qui se chiffre par le coefficient de qualité Q (égal au rapport de la fréquence de résonance à la largeur de la courbe pour les points d'amplitude égale à $\sqrt{2}/2$ du maximum). Il faut également éviter les influences perturbatrices extérieures, dont la plus grave dans le cas des quartz est la température, ainsi que les phénomènes pouvant faire glisser lentement la fréquence dans le temps.

Diverses améliorations ont été apportées, au cours des dernières années, aux différents appareils utilisés, en vue d'obtenir une meilleure définition de la résonance et une plus grande constance de la fréquence. On a pu également réaliser, sous forme industrielle, des étalons qui jusqu'ici avaient gardé l'allure d'appareils de recherche.

Rappelons que trois méthodes se présentent pour utiliser la résonance, aussi bien d'un quartz que d'une raie spectrale:

1. *résonateur.* Un générateur auxiliaire est réglé manuellement à la résonance, et l'on compare sa fréquence à celle que l'on veut mesurer.

2. *oscillateur asservi.* Le générateur auxiliaire est réglé automatiquement par un servo-mécanisme, sur la fréquence (ou un sous-multiple) de la résonance.

3. *générateur.* L'appareil fournit directement un courant à la fréquence de résonance.

QUARTZ

Les étalons à quartz n'ont pas été, comme on pourrait le penser, périmés par les étalons atomiques. Ces derniers ne constituent en effet, généralement, que des résonateurs, des repères de fréquence, et ne peuvent fournir, tels quels, la durée. Il faut donc posséder un garde temps auxiliaire capable d'assurer la continuité entre les mesures effectuées sur les étalons atomiques. Etant donné l'extrême précision de ceux-ci, il est nécessaire que les étalons à quartz présentent une stabilité aussi élevée que possible, spécialement s'ils ne sont pas asservis au résonateur atomique.

Loin de ralentir les recherches sur les quartz, les étalons atomiques ont donc, au contraire, accentué leur nécessité. Elles ont porté principalement sur trois points: le cristal, la température, la production des oscillations.

Parmi les tailles du cristal, le type GT et l'anneau semblent avoir atteint leur maximum de qualité; le barreau et la plaque AT ont au contraire fait l'objet de perfectionnements récents.

Les barreaux, étudiés à l'origine par A. Scheibe, ont été améliorés récemment dans son Institut, d'abord par une meilleure finition et aussi par l'emploi d'une suspension par ficelage au centre d'une ampoule cylindrique portant les électrodes déposées par métallisation. Les lignes de forces du champ électrique étant assez épanouies, on a disposé, aux extrémités, des électrodes de garde; réunies à la masse par un condensateur réglable, elles permettent l'ajustement fin de la fréquence. On a évité l'amortissement qui serait dû à une métallisation du cristal lui-même, ainsi que les variations dans le temps causées par l'évaporation, la migration des métaux dans la soudure, etc. Le coefficient de qualité atteint $5 \text{ à } 6 \times 10^6$.

La fréquence (100 ou 200/3 kHz) dépend assez peu de la densité d'énergie appliquée pour entretenir les oscillations, et le vieillissement reste faible.

Une tendance se dessine actuellement à la réalisation de cristaux à fréquence plus élevée, de 1 à 5 MHz par exemple, fonctionnant sur partiels, la fréquence fondamentale étant 5 ou 7 fois plus faible. La taille AT a été ainsi utilisée, généralement sous forme d'un disque circulaire, le plus souvent biseauté pour lui donner un aspect lenticulaire. Les électrodes peuvent être déposées au centre des faces, ou se trouver sur le support extérieur rigide; la fixation s'opère soit par pincage du bord de la lentille, soit par de véritables encastresments. Ces divers procédés fournissent à la fois un très haut coefficient de qualité (plus de 10×10^6) et un faible coefficient de température.

Nous citerons principalement dans cet ordre d'idées les cristaux du National Bureau of Standards (N.B.S.), ceux de la Compagnie Marconi, et ceux qui ont été étudiés en U.R.S.S. Parmi ces derniers a été décrite une lentille non métallisée atteignant un coefficient de qualité de 17×10^6 . Mais une stabilité mécanique meilleure a été obtenue avec métallisation du cristal et fixation par des soudures situées sur les bords. Un tel cristal de 1 MHz, présente après polissage un coefficient de 9×10^6 dans une atmosphère raréfiée d'hélium facilitant les échanges thermiques. Pour obtenir un faible coefficient de température (aux environs de 70°C), il est nécessaire d'assurer l'orientation de la taille à $1'$ près. La résistance équivalente n'est que de quelques ohms et le vieillissement au bout de la première année de fonctionnement n'a pas dépassé 1×10^{-7} . La forme carrée peut aussi être utilisée.

Les cristaux classiques fonctionnent à des températures comprises entre $+50^\circ$ et 70°C . Des études entreprises au General Post Office, au National Physical Laboratory (N.P.L.) et au N.B.S. ont montré que la qualité des cristaux se trouvait grandement améliorée pour des températures bien inférieures. En particulier le vieillissement et l'amortissement se trouvent réduits, déjà à -10°C . L'emploi d'azote liquide (78°K), et surtout l'hélium liquide (2°K), a montré un très grand intérêt; le fonctionnement dans l'hélium, actuellement en service régulier au N.B.S., a fourni d'excellents résultats, justifiant la complication matérielle de cette méthode. L'étude de tailles spécialement adaptées à de

telles températures est en cours. On peut aussi rappeler les quartz résonateurs du N.B.S. simplement placés au fond de tubes d'une quinzaine de mètres forés dans le sol, utilisant la constance de la température naturelle.

L'obtention d'un courant à la fréquence de résonance du quartz se heurte à quelques difficultés lorsque l'on cherche la précision maximum. Tout d'abord il faut éviter que les circuits de couplage viennent augmenter l'amortissement que l'on a réussi à réduire, à si grands frais. Les capacités internes des tubes à vide risquent de se modifier avec le temps et avec les tensions d'alimentation. Enfin, il faut que l'amplitude du cristal reste à la valeur minimum, compatible avec le niveau de bruit des circuits, pour éviter les défauts d'isochronisme et divers autres inconvénients. C'est dans ce but que le N.B.S. avait utilisé des résonateurs libres; mais ceux-ci ne constituaient évidemment que des repères de fréquence. On a donc cherché à asservir, par la résonance du cristal, un oscillateur auxiliaire; le N.B.S. et la Compagnie Marconi ont réussi à obtenir ce résultat sans cristal auxiliaire. La Compagnie Marconi vient même de mettre sur le marché un modèle de ce système. Le cristal (à 5 MHz) est monté dans un pont dont un des bras est légèrement modifié 75 fois par seconde pour faire varier l'équilibre du pont. On recueille ainsi à la sortie du pont un signal d'erreur à la même fréquence, dont la comparaison de phase au courant produisant la variation du pont commande un petit moteur; celui-ci entraîne un condensateur variable de rattrapage connecté à l'oscillateur, l'asservissant ainsi, en moyenne, sur la fréquence du résonateur. L'étalon Marconi est prévu pour rester stable à 2×10^{-10} près, la dérive étant compensée automatiquement.

A. Scheibe et ses collaborateurs ont conservé le montage Pierce, dans lequel le cristal est branché entre grille et anode d'un tube, en parallèle sur un pont de capacités. La stabilité a été très poussée, grâce à l'emploi de tensions d'alimentation très réduites (la puissance appliquée à l'anode est d'une dizaine de microwatts). Monté dans un double thermostat à contacts thermométriques et dans un local climatisé, cet oscillateur présente un vieillissement de l'ordre de 1×10^{-9} ; les irrégularités journalières, après déduction de cette dérive, ne sont que de quelques 10^{-10} , les fluctuations rapides restant dix fois plus faibles.

Des résultats assez analogues sont obtenus en France, au Laboratoire National de Radioélectri-

cité, avec des barreaux, des thermostats électroniques à réglage continu, et des oscillateurs en pont. Le Laboratoire National de Radioélectricité (L.N.R.) a également réalisé un oscillateur expérimental à quartz utilisant exclusivement des transistors, y compris pour le fonctionnement du thermostat.

ETALONS ATOMIQUES

Deux corps sont actuellement utilisés dans ces étalons: le césium, par sa fréquence de précision d'un électron dans le champ magnétique du noyau; l'ammoniac, par sa fréquence d'inversion. L'un et l'autre ont donné lieu, au cours des récentes années, à un développement considérable des recherches et des réalisations. De nombreux appareils sont maintenant en service régulier, et comparés aux déterminations horaires.

Voici maintenant trois ans que le résonateur au césium de L. Essen et J. V. L. Parry est en fonctionnement au N.P.L.; il a été décrit en détail dans un mémoire de l'an dernier (Essen et Parry 1957). Rappelons seulement que les atomes issus d'un petit four passent successivement dans deux entrefers d'aimants puissants, qui les trient d'après leur moment magnétique. Dans l'espace séparant ces deux entrefers, se trouvent deux cavités résonantes que traversent les atomes, et qui sont excitées en phase par un courant à haute fréquence réglé au voisinage de la résonance. Un champ magnétique continu très faible, perpendiculaire au jet d'atomes, règne entre les cavités. Seuls les atomes en résonance atteignent le fil chaud détecteur à ionisation, dont le courant décrit la courbe de résonance quand on règle le générateur d'excitation. La fréquence dépendant du champ, des précautions sont prises pour maintenir celui-ci constant et mesurable. Le vide est entretenu par des pompes, et l'appareil ne sert que par intermittence. Des modèles nouveaux ont, depuis, été étudiés.

La fréquence de transition $F_m (3,0) \leftrightarrow (4,0)$ utilisée, a été trouvée par les auteurs égale à 9.192.631.803 Hz, pour le champ nul, par rapport à la seconde de TU₂ déterminée par l'Observatoire Royal en juin 1955; N. Stoyko a signalé comment cette valeur doit être corrigée pour tenir compte de l'évolution du TU₂. Le Dr. Essen va nous dire lui-même les résultats qui ont été obtenus et la précision que l'on atteint avec ce résonateur.

La National Company Inc, de Maldon (Mass.) construit industriellement l'"Atomichron," comportant un oscillateur à quartz à 5 MHz asservi à la résonance d'un jet atomique de césium. Le résonateur atomique diffère de celui du Dr. Essen par quelques particularités. La plus importante du point de vue pratique est la suppression des pompes; le tube (en acier imagétique) est scellé et muni d'un système complexe d'adsorption et d'absorption de gaz résiduels, maintenant le vide pendant un millier d'heures. Les aimants sont extérieurs au tube; par contre, la partie centrale de celui-ci forme guide d'ondes, et alimente en énergie haute fréquence les deux cavités résonantes; les champs magnétiques extérieurs sont éliminés par des blindages. L'asservissement de l'oscillateur à quartz s'obtient par un procédé un peu analogue à celui de l'étalon à quartz Marconi et qui avait déjà été appliqué à la première "horloge" à ammoniac de H. Lyons. La fréquence d'excitation du tube à césium, produite par multiplication de celle du quartz (en réalité 9.192.631.840 Hz) est modulé à 100 Hz; le courant ionique à la sortie du tube se trouve ainsi modulé, et sa phase est comparée à celle du courant modulant. Le signal d'erreur résultant commande un servomoteur corrigeant la fréquence du quartz. C'est donc un appareil qui, dans la limite de durée du tube à césium, peut constituer un générateur à fonctionnement continu; en pratique il est surtout utilisé pour des comparaisons intermittentes. De nombreux exemplaires de cet étalon sont en service aux Etats-Unis, d'autres se trouvent actuellement au N.P.L. pour les comparaisons dont nous parlera le Dr. Essen. N. Stoyko et B. Decaux ont réalisé depuis dix mois la comparaison des étalons du B.I.H. et de l'"Atomichron" en service au L.N.R.

Divers facteurs peuvent influencer la précision des étalons à césium, en particulier la symétrie de la courbe de résonance, l'énergie introduite dans les cavités résonantes, les champs magnétiques, etc. Les mesures les plus précises exigent donc des précautions relatives à la constance de ces diverses influences.

Ne quittons pas le problème du césium sans signaler les recherches effectuées pour exploiter sa résonance par le procédé du "pompage optique." De telles études sont poursuivies, entre autres, par A. Kastler à l'Ecole Normale Supérieure de Paris.

Depuis quelques années un développement prodigieux s'est manifesté dans l'étude des am-

plificateurs quantiques, auxquels Townes et Gordon ont donné le nom de Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Sous certaines conditions, des molécules excitées à la résonance par une onde électrique restituent plus d'énergie qu'elles n'en reçoivent, réalisant ainsi une amplification extraordinairement sélective et exempte de bruit. Comme tous les amplificateurs, ceux-ci peuvent, par un montage convenable, engendrer des oscillations qui se maintiennent sans excitation extérieure. Parmi les divers corps utilisables (dont beaucoup sont à l'état solide), l'ammoniac a permis de réaliser des générateurs d'oscillations particulièrement stables. Les travaux de Basov et Prokhorov en U.R.S.S., de Townes et Gordon aux Etats-Unis, de Bonanomi, de Prins, Herrmann et Kartaschoff (1957) en Suisse, de Shimoda au Japon, ont amené ce Maser à un haut degré de précision.

Il comprend en principe une source d'ammoniac émettant un jet de molécules qui sont concentrées et triées (par une longue lentille électrostatique); elles pénètrent dans une cavité résonante de forme allongée, où elles cèdent de l'énergie en s'inversant. Les ondes qui s'entretiennent dans la cavité pour la résonance de la raie (3,3) ont la fréquence 23.870.127 kHz; leur spectre est très pur et contient très peu de bruit; leur puissance est de l'ordre de 5×10^{-10} W.

La lentille de concentration a une forme spéciale pour éliminer les molécules qui se trouvent dans l'état inférieur d'inversion; elle comprend plusieurs paires d'électrodes cylindriques parallèles entre lesquelles est établie une différence de potentiel de plusieurs milliers de volts. La valeur de cette différence de potentiel réagit, au second ordre, sur la fréquence obtenue et doit donc être maintenue constante; il en est de même de l'intensité du jet moléculaire. La cause la plus grande de déviation de la fréquence réside dans le désaccord de la cavité résonante; il intervient habituellement pour 1/1000 dans la stabilité générale. La cavité doit donc être particulièrement stable, tant au point de vue mécanique qu'au point de vue thermique. L'équipe de Neuchâtel a réduit très considérablement l'inconvénient des dérèglages accidentels, en utilisant un système de deux cavités résonantes couplées; comme dans le cas des circuits électriques couplés, le sommet de la courbe de résonance de ce système présente une partie horizontale plate dans un petit domaine, et par

conséquent les variations de réglage de toute sorte modifient beaucoup moins la fréquence obtenue. Signalons que les mêmes chercheurs ont réussi à utiliser, au lieu de la résonance de la raie (3,3), celle de la raie (3,2), plus faible mais plus indépendante des conditions extérieures.

De très nombreux Maser ont été réalisés, mais il semble que peu d'entre eux aient été utilisés pour des comparaisons horaires. Cependant, depuis deux ans les horloges de l'Observatoire de Neuchâtel sont périodiquement mesurées en fonction des Maser du Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères, et grâce aux émissions de fréquences étalons HBN la comparaison est assurée avec les étalons anglais et français. Citons qu'un modèle industriel de ces appareils fonctionne à l'Exposition de Bruxelles. D'une façon générale il semble que les Maser, plus sensibles aux causes extérieures de variations de fréquence, n'aient pas encore atteint un degré de stabilité et de reproductibilité aussi élevé que les résonateurs à césium.

En résumé: les divers étalons atomiques de fréquence, s'ils ne constituent pas de véritables garde-temps, fournissent cependant des repères de fréquence d'une stabilité remarquable, permettant de suivre, avec une précision instantanée de l'ordre de 10^{-10} ou mieux, la marche des horloges à quartz. Baser sur eux seuls une nouvelle définition de la seconde serait certainement prématuré, mais ils assurent une connaissance bien meilleure de l'évolution des garde-temps actuels.

BIBLIOGRAPHIE

Quartz

- Becker, G. 1958, *Arch. Elektrotech.* (janvier), 15.
 Scheibe, A., Adelsberger, U., Becker, G., Ohl, G. et Süß, R. 1956, *Z. angew. Physik* 8, 175.
 Vassine, J., Pozdniakov, P. and Jaroslavskii, M. 1958, *Dokl. Acad. Sci. U.S.S.R.* n° 3, 481.
 (Marconi). 1957, *British Communications and Electronics* (novembre), 681.

Césium

- Daly, R. T. et Holloway, J. H. 1957, *Trans. I.R.E.*, CS-5, 25.
 Essen, L. et Parry, J. V. L. 1957, *Phil. Trans. Roy. Soc. London* 250, 45.
 "A Caesium Clock." 1957, *Nature* 179, 701

Maser

- Bonanomi, J., Prins, J. de, Herrmann, J. et Kartaschoff, P. 1957, *J. suisse Horlog.* (août-septembre), 196.
 —. 1957, *Helv. phys. Acta* 30, 288.
 —. 1957, *Ibid.* 492.
 —. 1957, *Rev. Sci. Instr.* 28, 879.
 Shimoda, K. 1957, *J. phys. Soc. Japan* 12, 1006.