

49

CONFERENZE
DELL'OSSERVATORIO ASTRONOMICO DI MILANO-MERATE

Serie I

a cura del Direttore
Prof. Francesco Zagar

N. 5

EDOARDO PROVERBIO

ETALONS DE TEMPS ET DE FREQUENCE
DU SERVICE HORAIRE
DE L'OBSERVATOIRE DE MILAN



Actes du Congrès international de chronométrie - Lausanne, juin 1964
Berichte des Internationalen Kongresses für Chronometrie - Lausanne, Juni 1964
Proceedings of the International Conference on Chronometry - Lausanne, June 1964

Société suisse de chronométrie - Neuchâtel

CONFERENZE
DELL'OSSERVATORIO ASTRONOMICO DI MILANO-MERATE

Serie I

a cura del Direttore
Prof. Francesco Zagar

N. 5

EDOARDO PROVERBIO

ETALONS DE TEMPS ET DE FREQUENCE
DU SERVICE HORAIRE
DE L'OBSERVATOIRE DE MILAN



Actes du Congrès international de chronométrie - Lausanne, juin 1964
Berichte des Internationalen Kongresses für Chronometrie - Lausanne, Juni 1964
Proceedings of the International Conference on Chronometry - Lausanne, June 1964

Société suisse de chronométrie - Neuchâtel

ETALONS DE TEMPS ET DE FREQUENCE DU SERVICE
HORAIRE DE L'OBSERVATOIRE DE MILAN

E. Proverbio
Osservatorio Astronomico di Brera, Milano



Actes du Congrès international de chronométrie - Lausanne, juin 1964
Berichte des Internationalen Kongresses für Chronometrie - Lausanne, Juni 1964
Proceedings of the International Conference on Chronometry - Lausanne, June 1964

Société suisse de chronométrie - Neuchâtel

E. PROVERBIO, Osservatorio di Brera, Milano

Etalons de temps et de fréquence du service horaire de l'Observatoire de Milan

Les oscillateurs à quartz utilisés en astronomie, en géodésie et en physique présentent en général des précisions allant de 10^{-8} à 10^{-10} . Utilisée comme moyen d'interpolation pour des horloges atomiques, l'horloge à quartz doit présenter des qualités de stabilité particulières.

L'Observatoire de Brera dispose de 4 oscillateurs à quartz dans un souterrain approprié, thermostatisé à $25 \pm 0,1$ ° C. Des recherches ont été effectuées en vue de déterminer la stabilité à court et moyen termes. A cet effet, les méthodes suivantes ont été utilisées :

- a) Comparaisons des impulsions de seconde aux signaux horaires de stations qui utilisent des étalons atomiques de fréquence (HBN, MSF et WWV);
- b) Comparaisons de fréquence en mesurant la différence de phase entre le signal des horloges à quartz et le signal des émetteurs étalons myriamétriques (GBR et NBA);
- c) Comparaisons directes entre les fréquences des horloges à quartz.

La dérive des oscillateurs a ainsi pu être mesurée. La stabilité à court terme s'est révélée être de l'ordre de 10^{-10} et la dérive inférieure à 10^{-10} par jour pour deux des étalons.

Zeit- und Frequenznormale des Zeitdienstes am Observatorium von Mailand

Quarzoszillatoren, wie sie in der Astronomie, Geodäsie und Physik verwendet werden, besitzen i. a. eine Genauigkeit von 10^{-8} bis 10^{-10} . Als Interpolationoszillatoren für Atomuhren werden jedoch an Quarzuhren besonders hohe Anforderungen gestellt.

Das Observatorium von Brera besitzt 4 Quarzoszillatoren, untergebracht in einem Kellergewölbe, dessen Temperatur auf $25 \pm 0,1$ ° C gehalten wird. Es wurden Untersuchungen angestellt mit dem Ziel, die kurz- und langfristige Stabilität zu bestimmen. Folgende Methode wurde angewendet :

- a) Vergleich der Sekundenimpulse mit den Zeitzeichen von Sendern, die durch Atomuhren gesteuert werden (HBN, MSF und WWV);
- b) Phasenvergleich zwischen den Lokaloszillatoren und den Signalen von VLF-Normalsendern (GBR und NBA);
- c) Direktvergleich zwischen den verschiedenen Quarzuhren.

Die Alterung der verschiedenen Quarzuhren wurde in dieser Weise mit Genauigkeit gemessen. Für die Kurzzeitstabilität wurde 10^{-10} gefunden und für die Alterung besser als 10^{-10} .

Standards of Time and Frequency at the Observatory of Milan

Crystal oscillators used in astronomy, geodesy and physics have usually a precision of 10^{-8} to 10^{-10} ; if used as interpolation oscillators for atomic clocks, a very outstanding stability is required.

The Observatory of Brera owns 4 quartz oscillators installed in a thermally controlled room ($25 \pm 0,1$ °C). The short term and long term stability have been investigated by the following methods :

- a) Comparisons of the seconds pulses with time signals from stations controlled by atomic frequency standards (HBN, MSF and WWV);
- b) Phase comparisons between the oscillators and the signals from VLF standard frequency transmitters (GBR and NBA);
- c) Direct frequency comparisons among the different oscillators.

The aging of the oscillators has thus been measured accurately. The short term stability was found to be of the order of 10^{-10} and the aging smaller than 10^{-10} per day.

ETALONS DE TEMPS ET DE FREQUENCE DANS LE SERVICE HORAIRE
DE L'OBSERVATOIRE DE MILAN

Edoardo Proverbio

Osservatorio Astronomico di Brera, Milano

I. Introduction

L'utilisation du temps et de la fréquence fournie par les oscillateurs à quartz pour applications scientifique et techniques en Astronomie et en Physique en général exige des précisions toujours plus élevées.

La précision actuelle dans la détermination des positions des satellites artificiels est de l'ordre de quelque seconde d'arc, ceci correspond à une précision relative d'environ 1.10^{-8} pour le temps, une telle précision est demandée actuellement aussi dans le champ de la géodésie opérative, mais elle résulte déjà insuffisante pour les besoins courants d'un service de l'heure ou pour recherches sur la propagation des radio-ondes qui demandent de disposer du temps et de la fréquence avec une précision supérieure à une unité sur 10^9 .

La détermination des variations progressives linéaires ou des accélérations de la rotation de la Terre qui résultent de l'ordre de $1-10$ μ s par jour exigent au contraire des précisions relatives correspondant à 1.10^{-10} - 1.10^{-11} . En outre ces dernières précisions sont la limite au quelle tendent les applications physiques et électrotechniques des signaux de temps et de fréquences étalons.

D'autre part l'horloge à quartz aussi comme intermédiaire direct ou indirect pour la comparaison et l'emploi des horloges à résonnance atomique ou moléculaire doit satisfaire à des particulières données de stabilité à courte et très courte période. Il en dérive par conséquent que tant pour l'utilisation et la comparaison du temps atomique (T.A.) que surtout pour ce qui concerne la conservation du temps astronomique (TU2, TE) les prestations que on demande aux horloges à quartz deviennent toujours plus nombreux et de qualité élevée.

Toutefois la précision et la stabilité des oscillateurs à quartz est tout autre que illimitée, cette limitation comme l'on sait est due au fait que la marche des horloges à quartz, même de meilleure qualité, n'est pas constante mais varie de façon progressive, périodique ou aléatoire pour des causes différentes.

L'étude de ces variations et irrégularités est de grande importance. La connaissance des causes qui perturbent la marche des horloges à quartz permet en effet de discerner des données de comparaison des temps atomiques ou astronomiques des composant dues à des causes instrumentales ou physiques locales, en outre elle peut permettre de juger si possible ou non leur emploi en recherches qui demandent des particulières caractéristiques de

stabilité.

1.1. Caractéristiques principales des oscillateurs à quartz

L'état ou la correction C d'une horloge à quartz par rapport à un système de référence peut être en général exprimé en fonction de nombreux paramètres parmi lesquels les plus importants sont la tension d'alimentation E, la température T, l'humidité U, et le temps t, l'on peut par conséquent écrire:

$$C = C (E, T, U, t).$$

Le développement en série de cette fonction peut résulter quelque fois de considérable complexité, de conséquence se présente très difficile la recherche des coefficients de développement dépendant des divers paramètres lorsque ceux-ci se manifestent de façon tout à fait casuelle. D'autre part puisque en première approximation, à exclusion du temps, l'état C peut se poser fonction linéaire des divers paramètres, il peut résulter parfois plus convenient d'étudier séparément le comportement de C en fonction des paramètres physiques connus, et successivement, en utilisant les valeurs de C réduites, du temps.

La fonction

$$C = C (t),$$

qui caractérise en théorie le comportement physique de l'oscillateur non perturbé, est exprimée généralement avec un développement en série de temps limité au quatrième terme:

$$C = C_0 + (t-t_0) \frac{dC}{dt} + \frac{(t-t_0)^2}{2} \frac{d^2C}{dt^2} + \frac{(t-t_0)^3}{6} \frac{d^3C}{dt^3} \quad (1)$$

En ce développement dC/dt représente la marche, d^2C/dt^2 l'accélération ou dérive, d^3C/dt^3 la variation de la dérive, tandis que t_0 indique un instant particulier correspondant à l'état C_0 . En pratique cependant le comportement d'un oscillateur à quartz pour des causes aléatoires ou pour perturbation d'origine encore inconnue peut donner lieu à des écarts de type périodique ou accidentel par rapport à la courbe théorique représentée par la relation (1). Le type et la période de ces écarts vérifiés sur de nombreuses horloges porte à considérer l'opportunité d'attribuer aux horloges à quartz des stabilités de fonctionnement diverses par rapport à des intervalles de temps de différente longueur.

La diverse précision d'un oscillateur à quartz en relation à des périodes de référence diverses peut être en outre mise en évidence par des particuliers critères qui permettent de caractériser les qualités de chaque oscillateur en permettant une réciproque comparaison.

Pour l'étude de la stabilité et de la précision nous pouvons prendre en considération les intervalles de temps suivants:

a) Stabilité à longue période intéressant des intervalles de l'ordre d'une année. La marche relative moyenne dans l'inter-

valle $t-t_0$, exprimé en jours est donnée en ce cas par la relation:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{(C-C_0)(t-t_0)}{86400}, \quad (2)$$

dans laquelle la différence $C-C_0$ calculée par la (1) est donnée en secondes. Comme critère de la précision peut être utilisée la moyenne des variations absolues de la dérive mensuelle comme proposé par H. SMITH [4] ou l'écart moyen de la dérive mensuelle selon E. GUYOT [2].

b) Stabilité à moyenne période pour intervalles de l'ordre du jour qui peut être relevée directement jour par jour par la détermination de l'état ou de la marche moyenne journalière.

Nous pensons de toute façon qu'un critère très significatif des variations irrégulières à brève période de l'état et de la marche d'un oscillateur à quartz est celui proposé par W.M.H.GRAVES et L.T.S.SYMMES [1] sur lesquels nous reviendrons par la suite.

c) Stabilité à très courte période de l'ordre d'une minute et moins, à être déterminée par des procédés spéciaux.

L'étude et la connaissance des susdites quantités et des critères caractéristiques résulte comme on l'a dit de grande importance pour classifier la qualité d'un oscillateur à quartz et pour son utilisation appropriée, en particulier pour la détermination et la mesure des variations saisonnières de la rotation de la terre.

II. Détermination et mesures expérimentales

Le service horaire de l'observatoire de Brera dispose actuellement de quatre horloges à quartz:

1. Horloge Q1 - Ebauchestype B-168
2. " Q2 - " " B-243
3. " P1 - " " B-239
4. " P2 - " " B-239

Les caractéristiques de chacune de ces horloges sont assez connues. Les générateurs étalons P1 et P2 sont constitués d'un oscillateur à quartz 100 Kc/s en forme de barreau, coupe Y, qui développe des oscillations longitudinales en deuxième harmonique en résonance série. La barreau de quartz des oscillateurs Q1 et Q2 présente au lieu la coupe X+5°.

Le circuit de l'oscillateur est posé en double enceinte à température d'environ $\pm 0.01^\circ\text{C}$.

La qualité des quatre oscillateurs résulte notablement diverse et la présente analyse concerne uniquement l'oscillateur Q2 et les générateurs étalons P1 et P2.

Le quartz P1 a substitué en date 30 Juillet le Q2 comme horloge fondamentale dans le service de l'heure de l'Observatoire.

Jusqu'en Juillet 1963 toutes les horloges étaient situées dans une salle spéciale non thermostatisée sujette par conséquent à une excursion thermique annuelle de plusieurs degrés. A partir

de la mi-Juillet elles furent définitivement déplacées dans un local spécial semienterré avec circulation interne d'air, maintenue à la température constante de $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$

La tension d'alimentation de tous les oscillateurs a été établie entre $\pm 1\%$ moyennant des stabilisateurs électroniques, donc l'on peut supposer en première approximation que les instabilités dépendant de la tension d'alimentation résultent négligeables.

2.1. Détermination absolue et stabilité à longue période

L'étude de la stabilité à longue période de la fréquence des étalons à quartz P1 et Q2 a été basée sur la comparaison directe des signaux horaires locaux obtenus par voie électronique d'une fréquence 100 Kc/s avec les signaux horaires de HBN (Neuchâtel) et WWV (Washington) reçus une ou deux fois par jour et corrigés avec les corrections apportées à l'émission. Puisque les signaux de HBN et de WWV sont basés sur un système de temps uniforme qui diffère à moins d'une fonction linéaire du temps de l'échelle uniforme, du temps atomique (T.A.) basée sur la valeur 9 192 631 770 Hz pour la fréquence de transition d'un résonateur au césium à champs magnétique nul, les valeurs de la dérive et de sa variation peuvent se considérer référées à cette échelle de temps atomique (T.A.).

Les valeurs de la marche, au contraire, pour être référées à cette échelle doivent être corrigées pour les corrections $\Delta f / f$ relatives à la fréquence des temps d'émission par rapport au T.A. respectivement pour HBN et WWV.

La variation moyenne mensuelle des états C déterminée avec ces étalons a été considérée comme une fonction complexe du temps, de la température T et de l'humidité U, du type:

$$C = C_0 + (t-t_0)m_1 + \frac{(t-t_0)^2}{2} a_1 + \frac{(t-t_0)^3}{6} V_1 + F(\text{T.U.}) , \quad (3)$$

où

$$F(\text{T.U.}) = (T-T_0)u_1 + (T-T_0)^2u_2 + (U-U_0)u_3 .$$

La valeur des coefficients des relations (3) calculés avec la méthode des moindres carrés respectivement pour les comparaisons Q2-HBN et P1-HBN sont donnés dans le tableau I.

L'interval du temps considéré a été de Janvier 1962 à Juillet 1963 (19 mois) pour Q2-HBN et d'Août 1963 à Avril 1964 (9 mois) pour P1-HBN.

TABLEAU I

	Q2-HBN	coef.	10^{-5} s	coef.	10^{-4} s
t_0	1962.0	m_1	$+21,0 \pm 11,0$ s/j	u_1	$-36,0 \pm 0,21$ s/°C
T_0	+ 25°C	a_1	$- 9,8 \pm 4,0$ s/j ²	u_2	$-2,24 \pm 0,11$ s/°C ²
U_0	50%	v_1	$+0,44 \pm 0,00$ s/j ³	u_3	$+7,32 \pm 0,34$ s/U%
	P1-HBN	coef.	10^{-5} s	coef.	10^{-4} s
t_0	1963.7	m_1	$+30,6 \pm 50,5$ s/j	u_1	$+20,6 \pm 25,0$ s/°C
T_0	+25°C	a_1	$- 3,7 \pm 9,1$ s/j ²	u_2	$+9,00 \pm 11,3$ s/°C ²
U_0	60%	v_1	$+0,07 \pm 0,10$ s/j ³	u_3	$+2,62 \pm 3,62$ s/U%

Nous notons avant tout que pour ce qui concerne l'influence de la température extérieure et de l'humidité sur la marche de l'oscillateur Q2 la valeur des erreurs moyennes ne laisse pas de doutes sur la réalité physique de ce phénomène. Les valeurs du Tableau I mettent en évidence une correspondance de type quadratique entre la température et la correction, il en résulte par conséquent que la correspondance entre la marche et la température $T-T_0$, selon ces résultats devrait résulter du même type.

Les perturbations sur la marche pour les variations de température et d'humidité peuvent être données directement des relations (3), l'on a en effet de celle-ci pour la marche instantanée \bar{m} à l'époque t

$$\bar{m} = m_1 + 2a_1(t-t_0) + v_1(t-t_0)^2 + \frac{dF}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{dF}{dt} = [u_1 + 2(T-T_0)u_2] \frac{dT}{dt} + u_3 \frac{dU}{dt}$$

où les quantités dT/dt et dU/dt peuvent être obtenues avec des procédés graphiques ou numériques.

L'influence de la température et de l'humidité sur la correction et sur la marche de l'oscillateur Q2 sont mises en évidence avec suffisante clarté dans la fig.1 qui montre à moins de la phase une évidente correspondance entre les maxima et minima de la température et celles des moyennes mensuelles de

la correction de l'horloge Q2 par égard aux signaux étalons de HBN et WWV.

Pour ce qui concerne l'humidité elle semble présenter de l'analyse de la fig.1 et des données du tableau I, une différence de phase et exercer une action contraire à celle de la température, une augmentation de l'humidité du 1% provoque en effet une augmentation de l'humidité d'environ 8.10^{-9} .

Cette valeur résulte de signe contraire et sans doute supérieure à celles trouvées par d'autres chercheurs (Stoyko, Herrmann) qui résultent de l'ordre de -1.10^{-9} .

L'influence des deux paramètres T et U semble extrêmement incertaine pour l'oscillateur P1 comme le démontrent les erreurs moyennes élevées données dans le tableau I. Une confirmation indirecte de cette hypothèse peut être donnée par le fait que les erreurs moyennes de la marche et de la dérive calculées par les relations (3) mettant en elles $F(T.U.)=0$ résultent beaucoup plus satisfaisants. La marche en secondes par jour de cet horloge avec ces dernières données à disposition résulte en effet:

$$P1-HBN = +2,4.10^{-4} - 0,8(t-t_0).10^{-5} + 0,5(t-t_0)^2.10^{-5} .$$
$$\pm 1,4.10^{-4} \pm 1,7.10^{-5} \pm 1,8.10^{-6}$$

Si l'on tient compte que les valeurs de la dérive et de ses variations ainsi calculées sont des valeurs moyennes intégrées sur une longue période de temps l'on peut presumiblement déduire que la stabilité actuelle à longue période de l'étalon de fréquence P1 résulte très élevée et de toute façon inférieure à 1.10^{-10} . Un ordre de grandeur en moins peut être attribué à la stabilité de l'étalon Q2.

Ces conclusions sont confirmées par le calcul du critère de précision e de H.SMITH. Nous avons trouvé pour la moyenne des valeurs absolues des variations de la dérive moyenne mensuelle:

$$e_{P1} = \pm 1,3.10^{-4} \text{ sec/jours/mois}^2,$$

et partant des valeurs des corrections de l'horloge Q2 corrigées par la température et l'humidité:

$$e_{Q2} = \pm 1,8.10^{-4} \text{ sec/jours/mois}^2.$$

Comme l'on sait valeurs du critère de précision de l'ordre de $\pm 1.10^{-4}$ caractérisent le comportement des oscillateurs d'excellente qualité.

2.2. Determinations relatives et stabilité a periode moyenne

Les valeurs de la dérive ou de sa variation déterminées pour les étalons de temps Q2 et P1 comme nous l'avons précédemment dit peuvent se retenir absolues vis à vis à l'échelle du temps atomique TA.1 de Neuchâtel.

Pour ce qui concerne l'oscillateur P2 nous disposons seulement de comparaisons relatives de fréquence entre cet étalon et le étalon P1. Les données se réfèrent aux comparaisons effectuées une ou deux fois par jour sur une période de 12 mois d'Avril à 1963 à Avril 1964.

La marche relative a été considérée fonction complexe du temps de la température et de l'humidité. Disposant de 537 comparaisons nous avons résolu avec la méthode des moindres carrés, utilisant un calculateur IBM 1620 un système d'autant d'équations du type:

$$m = m_0 + (t-t_0) a_0 + (t-t_0)^2 v_0 + F(T,U), \quad (4)$$

$$f(T,U) = (T-T_0)z_1 + (T-T_0)^2 z_2 + (U-U_0)z_3.$$

dans lesquelles $T = 27^\circ\text{C}$, $U = 50\%$. Les résultats obtenus exprimés en msec sont donnés dans le tableau II.

P1 - P2

TABLEAU II

Coeffic.	$f(T,U) \neq 0$	$f(T,U) = 0$	Coeffic.	$f(T,U) \neq 0$	$f(T,U) = 0$
m_0	+6,24 $\pm 0,6 \cdot 10^{-2}$	+6,14 $\pm 0,5 \cdot 10^{-2}$	z_1	$-2,53 \cdot 10^{-2}$ $\pm 0,29 \cdot 10^{-2}$	---
a_0	$-5,67 \cdot 10^{-3}$ $\pm 0,8 \cdot 10^{-6}$	$-6,93 \cdot 10^{-3}$ $\pm 0,7 \cdot 10^{-6}$	z_2	$-1,49 \cdot 10^{-2}$ $\pm 0,01 \cdot 10^{-2}$	---
v_0	$-2,41 \cdot 10^{-5}$ $\pm 0,2 \cdot 10^{-10}$	$-1,50 \cdot 10^{-5}$ $\pm 0,1 \cdot 10^{-10}$	z_3	$-9,87 \cdot 10^{-4}$ $\pm 0,14 \cdot 10^{-4}$	---

Dans le même tableau sont indiqués les valeurs des paramètres m , a , v , calculées avec le même procédé, en mettant (4) $f(T,U)=0$. La comparaison de ces derniers paramètres et de leurs erreurs moyennes confirme ce qui a été trouvé précédemment sur la très faible consistance d'un effet de la température et de l'humidité sur des oscillateurs de cette classe, dont les perturbations pourraient intéresser au plus quantités de l'ordre de $1 \cdot 10^{-10}$.

Sur la base de ces résultats et dans le but d'étudier plus à fond le comportement de l'oscillateur Q2 en fonction des paramètres climatologiques, les données des comparaisons journalières des oscillateurs P1 et Q2 pour la période Décembre 1962 - Juillet 1963 ont été utilisées pour calculer avec la méthode précédente les coefficients de la relation (4) dans le cas

$$f(T,U) \neq 0 .$$

P1 - Q2

TABLEAU III

Coeffic.	$f(T,U) \neq 0$	Coeffic.	$f(T,U) \neq 0$
m_0	+ 2,90 $\pm 0,87 \cdot 10^{-1}$	z_1	+ 2,64 $\pm 0,13 \cdot 10^{-1}$
a_0	+ 9,33 $\cdot 10^{-2}$ $\pm 0,46 \cdot 10^{-4}$	z_2	+ 0,45 $\pm 0,28 \cdot 10^{-3}$
v_0	- 1,37 $\cdot 10^{-4}$ $\pm 0,61 \cdot 10^{-8}$	z_3	- 0,12 $\pm 0,45 \cdot 10^{-3}$

En effet tandis que la marche et aussi l'accélération ainsi calculées ne résultent pas comparables avec celles reportées dans le tableau I relatives à périodes tout à fait différentes, au contraire les coefficients thermiques et géométriques résultent du même signe et puis pour les premiers vient confirmé aussi l'ordre de grandeur si comparés avec ceux pris des corrections Q2 - HBN. Ceci confirme donc pleinement aussi quantitativement l'influence des températures extérieures sur la marche de l'oscillateur Q2 (fig.3). L'influence de l'humidité résulte ici cependant environ 6 fois inférieure à la valeur précédemment trouvée. Nous n'avons pas trouvé une explication claire au sujet de cette différence, toutefois elle pourrait être attribuée au facteur différent de corrélation intercurrent entre les variations à longue période qui interviennent dans le calcul du coefficient du tableau I et celles à période très courte dont on a tenu compte dans le calcul du coefficient du tableau III.

Pour vérifier cette hypothèse et les résultats du tableau III l'humidité de la nouvelle salle thermostatique dans laquelle sont mis les étalons de temps a été augmentée brusquement d'environ 20%.

Avant et durant la variation d'humidité à température constante l'oscillateur Q2 a été périodiquement contrôlé moyennement un étalon atomique de fréquence à vapeurs de rubidium Varian (FRS), en essai près de l'Observatoire. Les comparaisons successives, au contraire, ont été effectuées au moyen de l'étalon P1, à son tour taré par l'oscillateur atomique. Les résultats reportés dans la fig.2 semblent confirmer pour variations brusques d'humidité un petit coefficient géométrique de l'ordre de $5 \cdot 10^{-9}$ pour variation d'humidité du 10%.

La stabilité à période moyenne de l'ordre du jour pour les éta-

lons Q2, P1 et P2 a été déterminée en recourant à le critère proposée par GREAVES et SYMMS, avec laquelle est possible séparer et calculer les valeurs moyennes de trois types caractéristiques d'erreurs:

- a) L'erreur accidentelle e_1 dûe à fluctuations casuelles de la phase durant les comparaisons des deux oscillateurs,
- b) L'erreur accidentelle e_2 dûe à fluctuations à brève période de la marche des deux oscillateurs,
- c) L'erreur accidentelle e_3 dûe à fluctuations à brève période de la dérive relative aux deux oscillateurs.

Le calcul de ces erreurs à été effectué en resolvant le système:

$$x_i^2 = 6e_1^2 + 2ie_2^2 + \frac{1}{3}i(2i^2 + 1)e_3^2, \quad (i = 1, 2, 3)$$

dans lequel $x_i^2 (i=1,2,3)$ représente respectivement la moyenne de la somme des carrés des différences,

$$\Delta_1^2 v_u = \Delta_1 v_u + \frac{1}{2} - \Delta_1 v_u - \frac{1}{2},$$

$$\Delta_2^2 v_u = \Delta_1 v_u + \frac{3}{2} + \Delta_1 v_u + \frac{1}{2} - (\Delta_1 v_u - \frac{3}{2} + \Delta_1 v_u - \frac{1}{2}),$$

$$\Delta_3^2 v_u = \Delta_1 v_u + \frac{5}{2} + \Delta_1 v_u + \frac{3}{2} + \Delta_1 v_u + \frac{1}{2} - (\Delta_1 v_u - \frac{5}{2} + \Delta_1 v_u - \frac{3}{2} + \Delta_1 v_u - \frac{1}{2}),$$

où Δ_1 représente une générique marche diurne.

Les calculs relatifs aux périodes précédemment citées pour les comparaisons P1 - Q2 ont fourni les résultats données dans le tableau IV avec lesquels on peut mettre en évidence la grande stabilité à période diurne des étalons de fréquence P1 et P2.

TABLEAU IV

	P1 - P2	P1 - Q2
e_1	$\pm 0,00 \text{ ms}$	$\pm 0,01 \text{ ms}$
e_2	$\pm 0,00 \text{ ms/j}$	$\pm 1,10 \text{ ms/j}$
e_3	$\pm 0,08 \text{ ms/j}^2$	$\pm 0,62 \text{ ms/j}^2$

2.3. Stabilité à très courte période

La connaissance de la stabilité à courte et à très courte période revête une particulière importance dans le cas de comparaison de fréquence de 1 à 10 Mc/s pour des étalons de stabilité moyenne élevée et dans l'intercomparaison d'horloges à quartz et atomiques. Nous avons étudié le comportement des oscillateurs sur des périodes diverses très courtes. En mesurant la durée T_5 des battements à l'oscilloscope entre la fréquence de 100 Kc/s du quartz P1 et la fréquence de 1 Mc/s du quartz P2 nous avons relevé les oscillations des fréquence avec période d'environ 35 secondes. La deviation standard calculée sur la base de très nombreuses données est résultée:

$\sigma = 3,2 \cdot 10^{-10}$ (fig.4) c'est à dire de l'ordre de grandeur relevé par KARTASCHOFF [3] avec comparaison de fréquence de 100 Kc/s à 8,5 Mc/s.

En utilisant au contraire les résultats de la registration continue de la différence de phase entre la fréquence 100 Kc/s des étalons P1 et P2, effectuée au moyen d'un comparateur de phase et d'un registrateur, nous avons mis en évidence les variations des fréquences des deux étalons avec des périodes d'environ 11 minutes et successivement avec période d'environ une heure.

Ces variations présentent des déviations standard respectivement de $\sigma = 1,81 \cdot 10^{-10}$ et $\sigma = 1,10 \cdot 10^{-10}$ (fig.4). La deviation σ dépendent des variations à courte et très courte période résulte par conséquent diminuer avec l'augmentation de la période. La fig. 6 montre qu'une loi de proportionalité du type logarithmique satisfait assez bien la variation de cette grandeur en fonction du période, de la même figure l'on peut déduire, extrapolant les valeurs calculées, que sur une période de 7-8 heures la déviation et par conséquent la stabilité des oscillateurs peut se réduire à un ordre de $1 \cdot 10^{-11}$.

Une recherche analogue conduite en comparant la fréquence 100 Kc/s de l'horloge à quartz Q2 avec 1 Mc/s de l'étalons P1 a fourni pour périodes d'environ 3,5 secondes une deviation $\sigma = 4,2 \cdot 10^{-9}$, c'est à dire d'un ordre de grandeur supérieur à celle relative aux oscillateurs P1 et P2.

2.4. Conclusions

Les résultats de la présente recherche ont mis en évidence intéressantes caractéristiques des oscillateurs sous examen. De ces résultats l'on peut constater la qualité élevée des oscillateurs P1 et P2 actuellement employés dans le service de l'heure de l'Observatoire et surtout le fait que ces étalons peuvent constituer pour leurs caractéristiques et pour leur stabilité élevée une échelle de temps suffisamment uniforme, susceptible, moyennant des périodiques comparaisons avec les actuelles échelles de temps atomique, de être avantageusement employées dans nombreux secteurs de la recherche astronomique et physique.

Pour approfondir certains problèmes relatifs aux petites variations à brève et longué période sont en cours actuellement

à l'Observatoire de Brera des recherches plus détaillées sur l'influence et la corrélation de l'humidité et de la pression atmosphérique, sur la marche aussi bien que sur les légères variations de la tension d'alimentation.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] W.M.H.GREAVES, L.S.T.SYMMS, M.N.R.A.S., vol.103 (4)
p.196, 1943.
- [2] E.GUYOT, Ann.Franç.de Chron.,vol.28 (3),p.143, 1958.
- [3] K.KARTASCHOFF, Berich.des VI Inter.Kongr.fur Chron. Vol.I
p.215, Munchen, 1959

- [4] M.H. SMITH, M.N.R.A.S., vol. 113 (1), p. 67, 1953

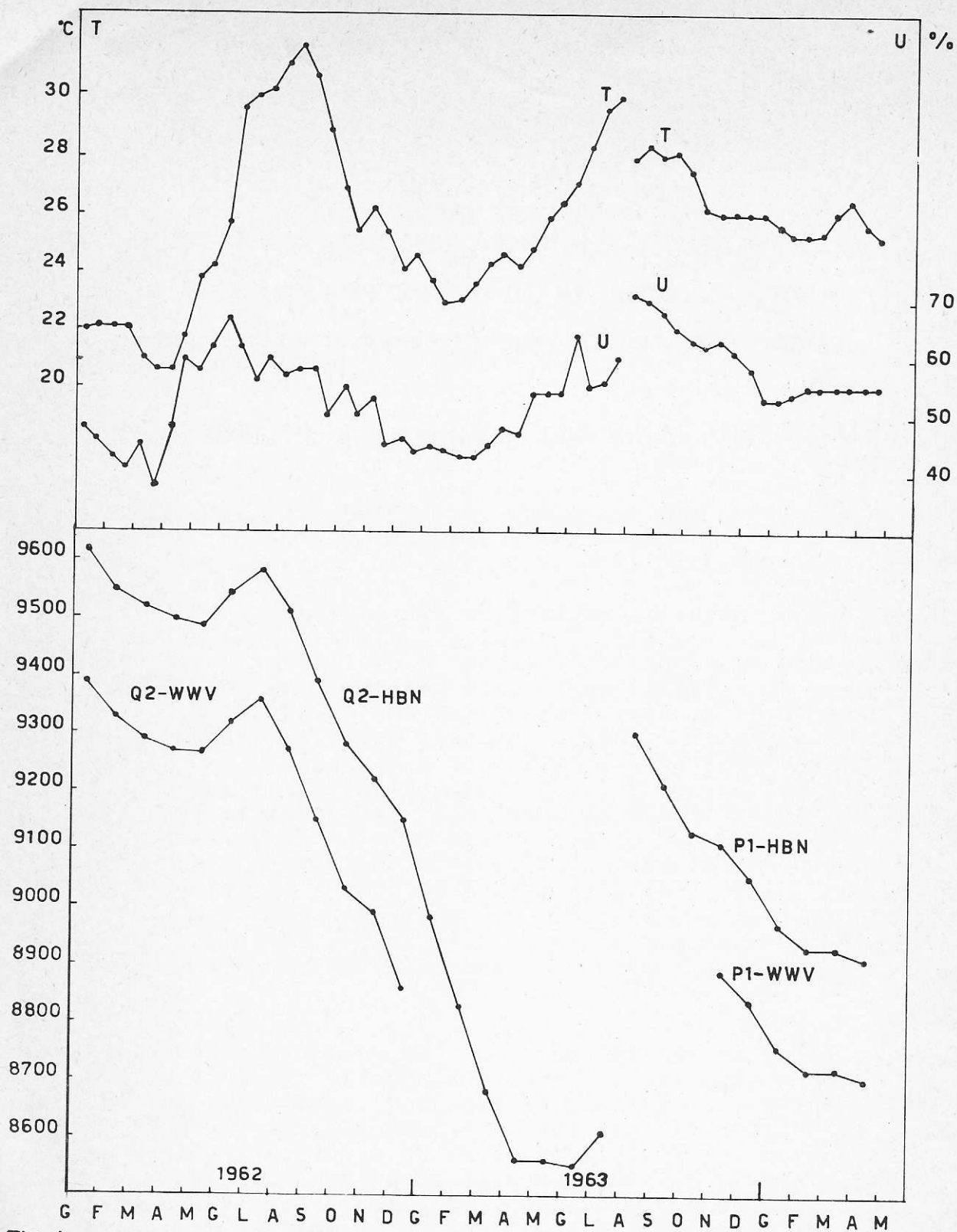


FIG. 1—variation de la correction (moyennes mensuelles) de l'horloge Q2 (P1 après août 1963) par égard aux temps uniformes TUA de HBN et de WWV. Variation de la température T et de l'humidité U dans la salle et dans la cave (après août 1963) des horloges à quartz

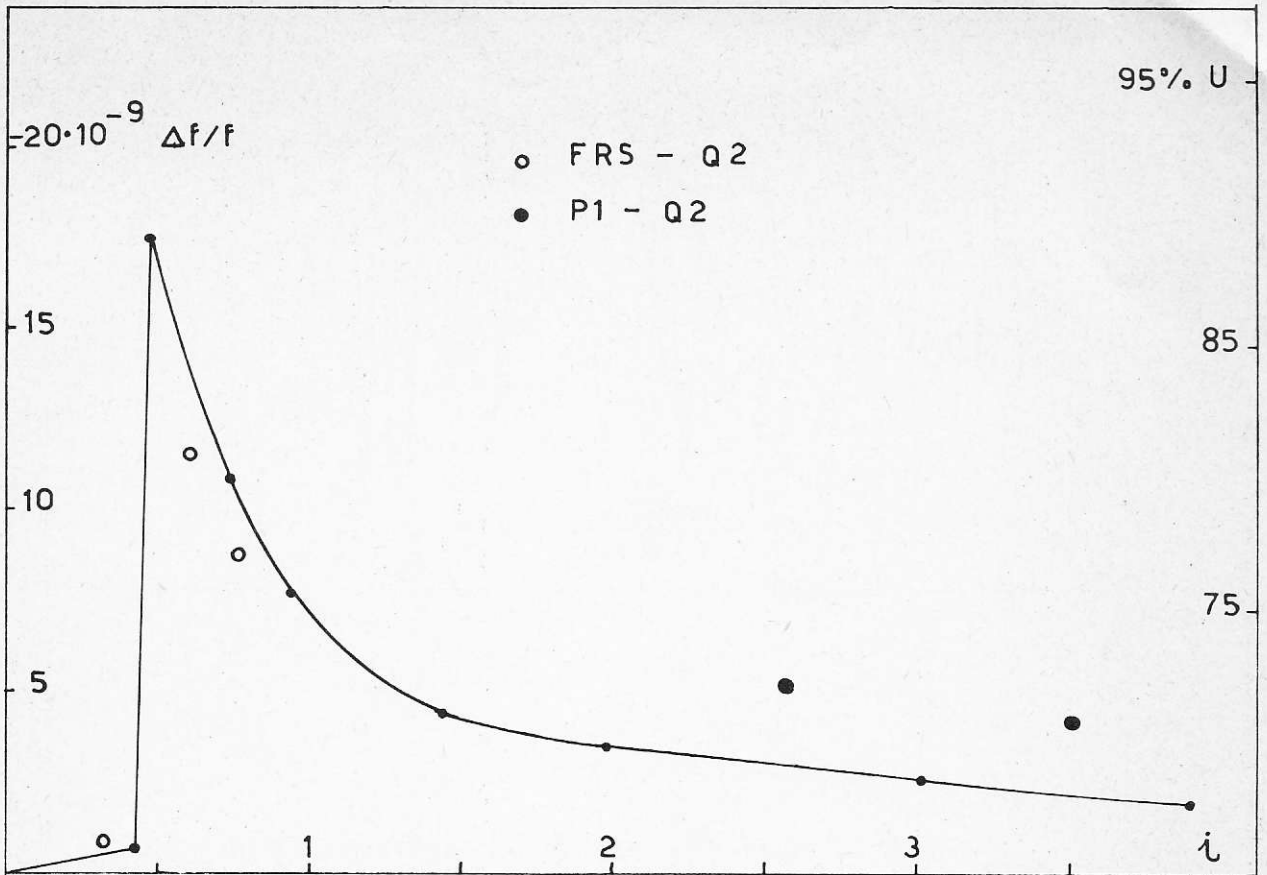


FIG.2 VARIATION DE LA MARCHE DU Q2 EN FONCTION DE LA VARIATION A COURTE PERIODE DE L'HUMIDITE

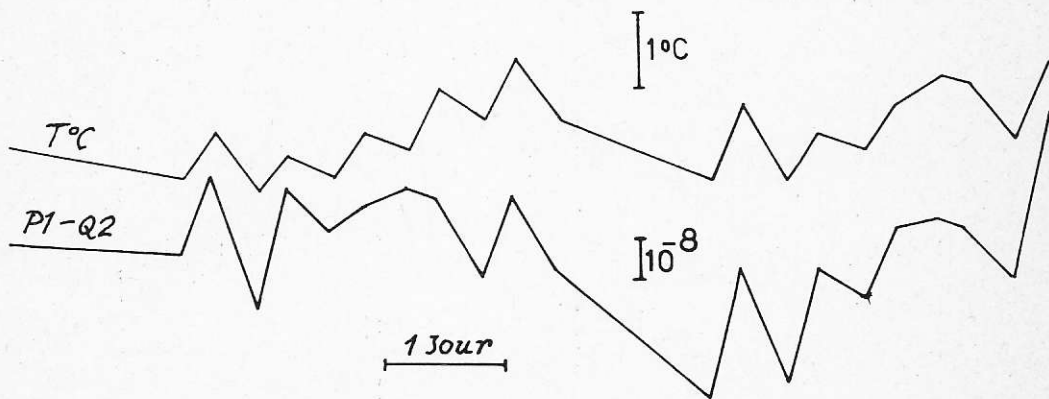


FIG.3 VARIATION DE LA MARCHE DU Q2 EN FONCTION DE LA VARIATION A COURTE PERIODE DE LA TEMPERATURE

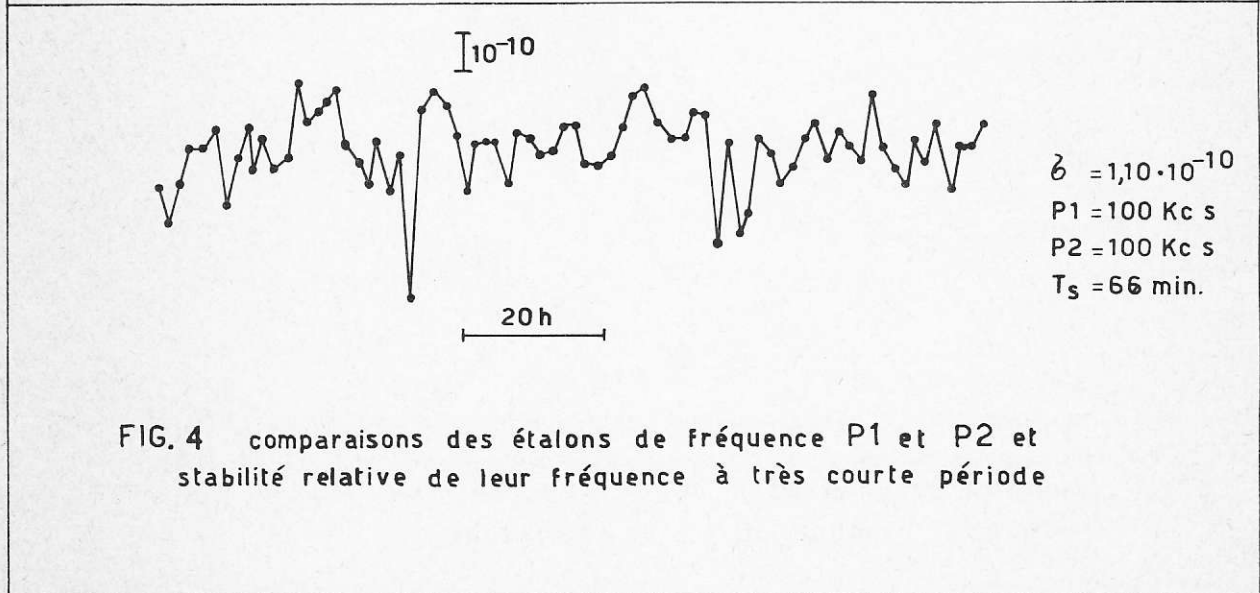
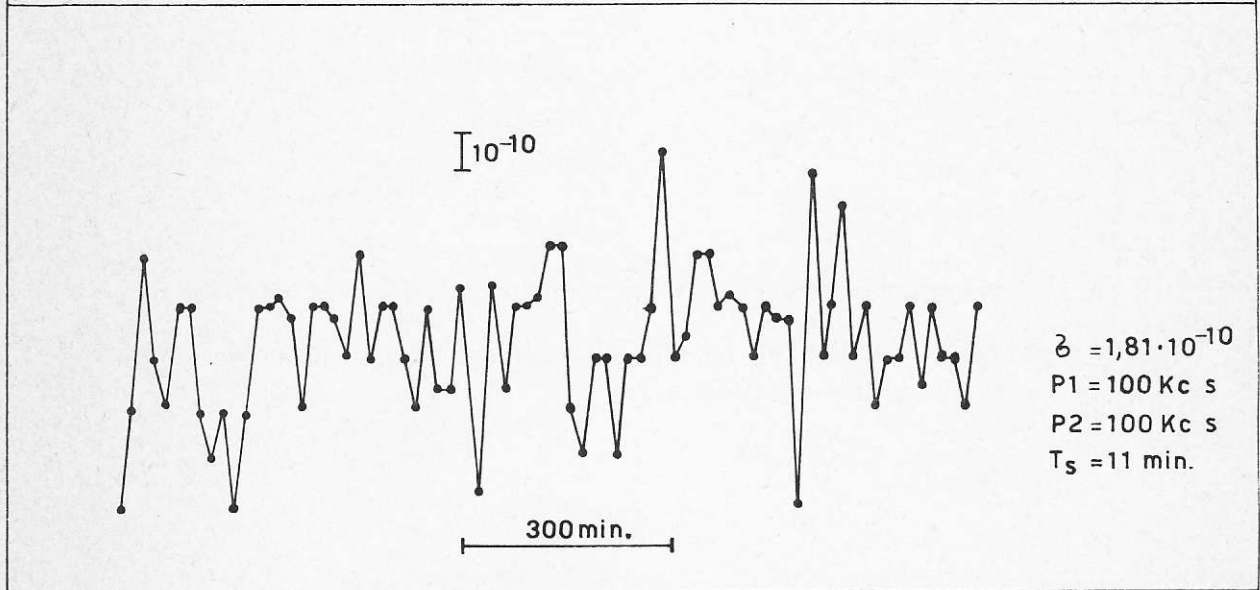
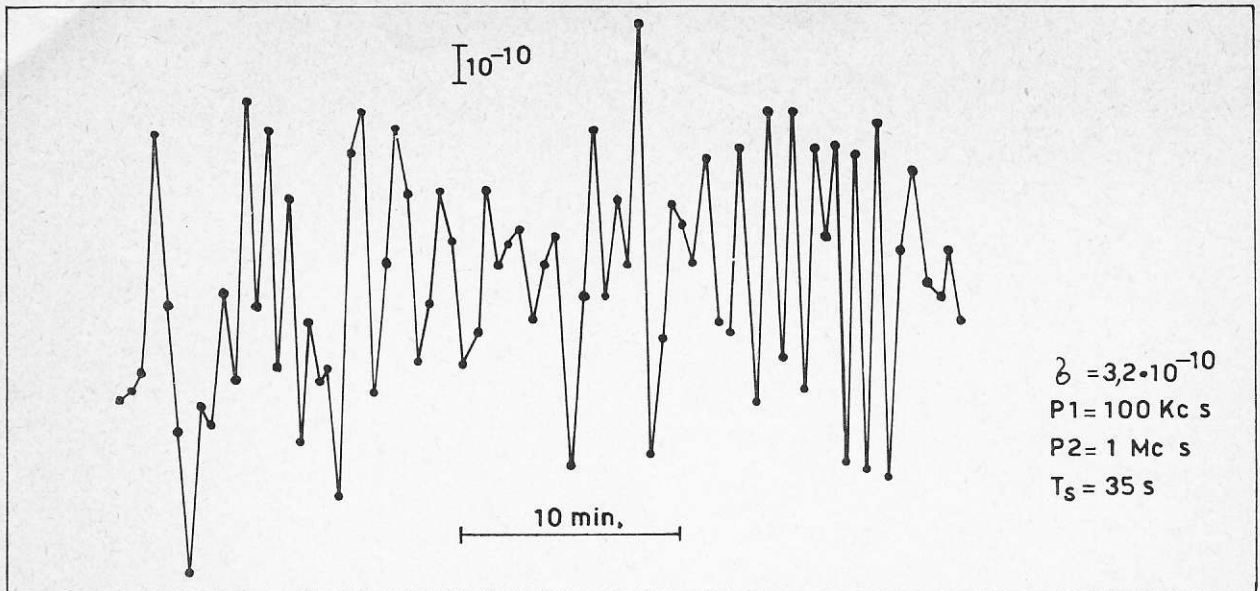


FIG. 4 comparaisons des étalons de fréquence P1 et P2 et stabilité relative de leur fréquence à très courte période

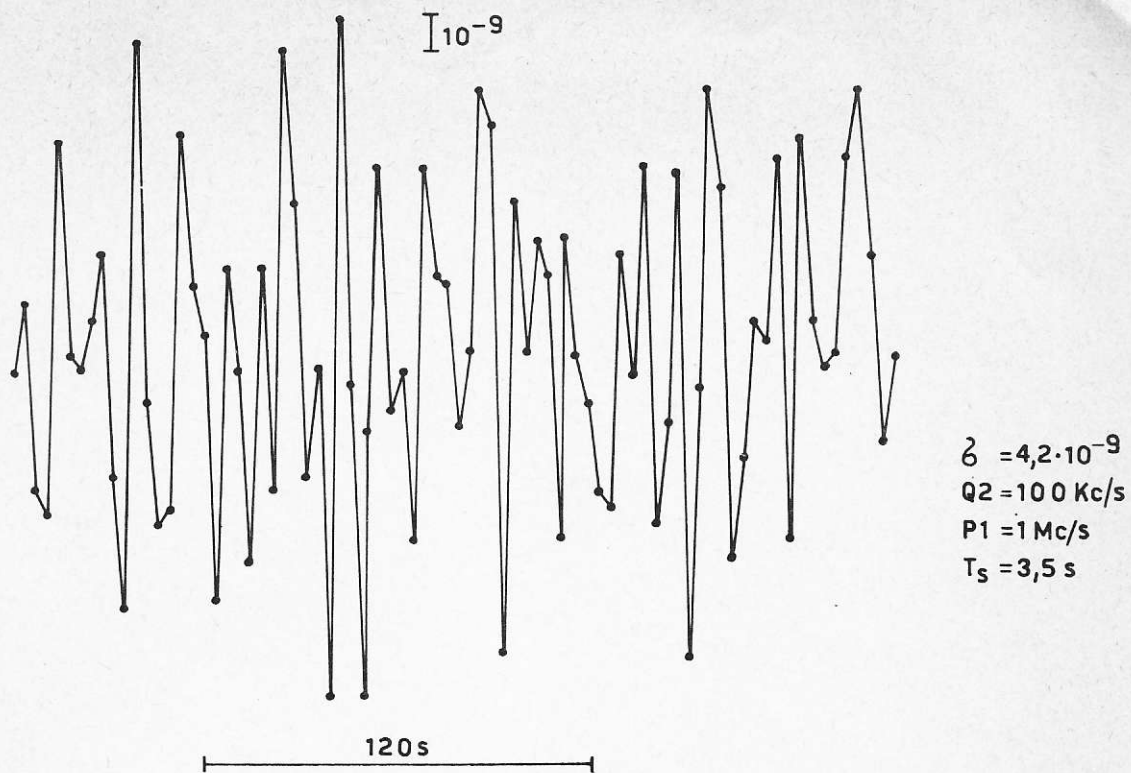


FIG.5 comparaison des étalons de fréquence Q2 et P1
et stabilité relative de leur fréquence à très courte période

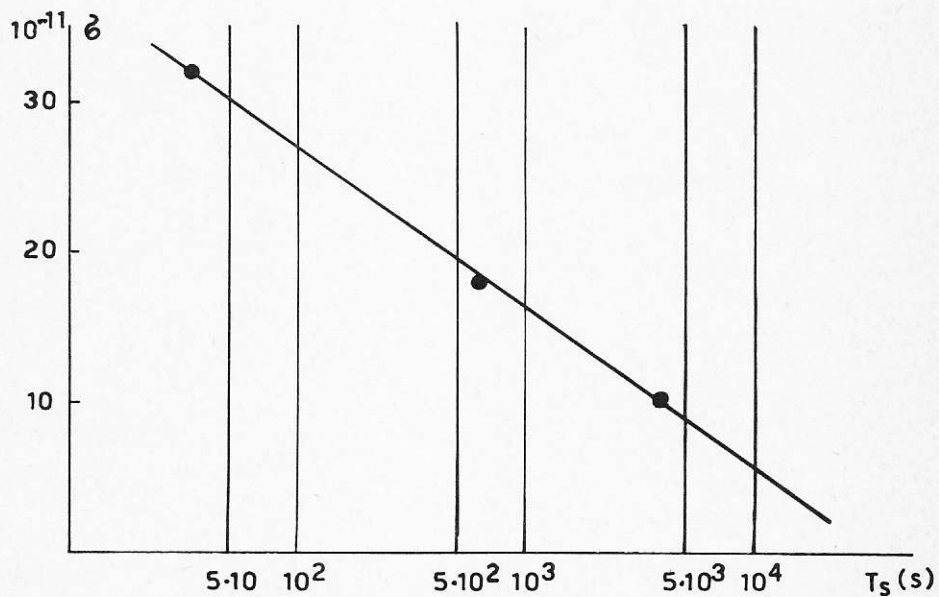


FIG.6 variation de la deviation ζ relative aux étalons P1 et P2
en fonction du periode T_s