

Etude de garde-temps à quartz

Autor(en): **Payot, R. / Berger, F. / Steinemann, S.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **80 (1957)**

PDF erstellt am: **09.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-88875>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

ÉTUDE DE GARDE-TEMPS A QUARTZ

par

R. PAYOT¹, F. BERGER², S. STEINEMANN³

AVEC 6 FIGURES

Trois institutions de Neuchâtel se sont attachées à l'étude des horloges à quartz : l'Observatoire, qui les utilise ; le département Oscilloquartz d'Ebauches S. A., qui les construit ; le Laboratoire suisse de recherches horlogères, qui participe à leur développement.

Le présent travail, dont les divers chapitres ont été rédigés par un collaborateur de chacun des trois établissements précités, se propose d'esquisser quelques-uns des problèmes suscités par le souci d'améliorer la précision de ces garde-temps, et de donner par là un reflet de la fructueuse collaboration qui s'est établie dans ce domaine entre l'astronome, l'ingénieur et le physicien. En voici le sommaire :

1. *Le rôle des horloges à quartz dans la définition du temps.*
Anomalies de la vitesse de rotation de la terre.
Temps des éphémérides.
Temps uniforme.
2. *Les horloges à quartz de l'Observatoire de Neuchâtel.*
3. *Fluctuations dues à des causes extérieures au quartz.*
Pression.
Température.
Amplitude.
Circuit électrique.
4. *Fluctuations et vieillissement dus au quartz oscillant.*
5. *Remarques sur le développement futur des horloges à quartz.*
Bibliographie.

¹ Observatoire de Neuchâtel.

² Département Oscilloquartz d'Ebauches S. A.

³ Laboratoire suisse de recherches horlogères.

I. Le rôle des horloges à quartz dans la définition du temps

La définition classique de l'unité de temps (la seconde est la 86 400^e partie du jour solaire moyen) a été modifiée par l'assemblée de l'Union astronomique internationale (U. A. I.) de Dublin en septembre 1955.

Les progrès rapides réalisés dans la construction des horloges à quartz et plus récemment dans le domaine des horloges moléculaires et atomiques, où la stabilité de la fréquence atteint 10^{-9} , voire 10^{-10} , ont provoqué cette urgente révision de la définition de la seconde déterminée à une précision de 10^{-7} seulement par le jour solaire moyen. Le doute sur l'invariabilité de la vitesse de rotation de la terre existait depuis longtemps puisque Képler, Newton et Lalande y faisaient déjà allusion. Il manquait toutefois une confirmation expérimentale, et c'est précisément l'horloge à quartz qui a permis de mettre en évidence ces fluctuations lorsque sa précision provoqua la disparition des pendules garde-temps des observatoires.

Anomalies de la vitesse de rotation de la terre

Il y a peu de temps que les découvertes de Halley sur l'accélération séculaire de la lune ont été interprétées dans leur sens exact. Une accélération proportionnelle dans le mouvement des planètes inférieures et du soleil donna la preuve aux astronomes actuels qu'il s'agissait en partie d'un ralentissement séculaire de la rotation de la terre. Il est, en effet, facile de concevoir qu'un ralentissement de la rotation entraînera un retard des horloges réglées sur le temps défini par le jour solaire moyen et par conséquent une accélération dans les mouvements planétaires. Les variations fictives se distinguent des variations réelles causées par des perturbations lorsqu'elles sont simultanées pour plusieurs planètes et proportionnelles aux moyens mouvements. Ce retard de la rotation de la terre, dont l'ordre de grandeur n'est que de 0,0016 sec par siècle, se traduit pourtant par un retard de « l'heure terrestre » de 0,003 sec par an et 30 sec en un siècle.

L'étude d'occultations d'étoiles par la lune a, d'autre part, mis en évidence des fluctuations irrégulières de la rotation de la terre (1). Elles provoquent une variation du temps terrestre d'amplitude maximum de 60 sec pour les trois derniers siècles.

Il existe enfin des fluctuations saisonnières que STOYKO, du Bureau international de l'heure, a décelées le premier en étudiant les variations de marche des horloges de précision (2). Les excellentes horloges à quartz des Observatoires de Greenwich et Washington permirent ces dernières années de confirmer pleinement les premières estimations de STOYKO. La prévision des fluctuations saisonnières pour l'année 1957 donne un retard maximum de la terre de 35 millisecondes à la fin du mois de mai et une avance maximum de 28 millisecondes au début d'octobre.

Temps des éphémérides

Les variations séculaires de la vitesse de rotation de la terre se traduisant par une lente dérive de l'échelle astronomique des temps par rapport à l'échelle des mouvements planétaires, il en résulte que les mouvements orbitaux constituent des horloges plus stables que la rotation de la terre.

Le Temps Universel est déduit du temps civil local corrigé de la longitude conventionnelle du lieu d'observation par rapport à Greenwich.

La nouvelle définition de l'unité de temps, adoptée par l'U. A. I., est la suivante (3) : la seconde est une fraction de 1 : 31 556 925,975 de la longueur de l'année tropique pour l'année 1900,0.

Ce temps est appelé le Temps des Ephémérides. Basé sur les lois du mouvement des corps célestes, il est indépendant des variations de la rotation de la terre. La définition du Temps Universel n'ayant pas changé, les différences

$$\Delta T = \text{Temps des Ephémérides moins Temps Universel}$$

correspondant au milieu de chaque année, déduites d'occultations d'étoiles par la lune et par des mesures au « dual-rate Moon position Camera » (développé par MARKOWITZ), seront régulièrement publiées. Elles s'obtiennent par la formule :

$$\Delta T = + 24^s349 + 72^s3165 T + 29^s949 T^2 + 1^s821 B$$

où T est compté en siècles juliens à partir de 1900,0 à midi moyen de Greenwich et B déterminé d'après les observations de la lune dès 1850.

Enfin la fréquence V_E qui correspond à la nouvelle définition de la seconde est donnée par

$$V_E = V_U \left(1 - \frac{D\Delta t}{31\,556\,925,975} \right) = V_U (1 - 3,1689 \times 10^{-8} D\Delta t)$$

où V_U : fréquence obtenue avec la seconde de Temps Universel,
 $D\Delta t$: variation annuelle de Δt déduite d'une suite de valeurs annuelles de Δt .

Lorsque la fréquence d'un étalon atomique aura été rapportée avec une précision suffisante à la seconde nouvellement définie, l'étalon pourra fournir immédiatement la seconde.

Temps uniforme

Le Temps Universel utilisé jusqu'ici et que l'on désignera par TU_0 n'est pas uniforme pour les deux raisons suivantes :

- 1° le mouvement du pôle ;
- 2° l'irrégularité de la rotation de la terre.

Le mouvement du pôle provoque des variations de longitude et de latitude différentes d'un point de la terre à l'autre. Le Bureau central des latitudes à Turin a été chargé de calculer les coordonnées du pôle

instantané à l'aide des résultats d'observations communiqués par les stations internationales spécialisées.

La variation en longitude vaut

$$\Delta\lambda = \lambda_i - \lambda_m = \frac{1}{15} (x \sin \lambda_m - y \cos \lambda_m) \operatorname{tg} \varphi_m$$

où i : valeurs instantanées,
 m : valeurs moyennes,
 x, y : coordonnées du pôle instantané.

En appliquant cette correction au Temps Universel TU_0 , on obtient le Temps Universel TU_1 :

$$TU_1 = TU_0 + \Delta\lambda$$

qui est le même pour différents lieux de la terre.

Ce temps n'est cependant pas uniforme à cause de l'irrégularité de la rotation de la terre. Pour arriver à une précision de l'ordre de 10^{-9} , on le corrige des fluctuations saisonnières de la rotation de la terre en négligeant celles à évolution lente, difficilement prévisibles et n'influençant pas l'uniformité de l'échelle du temps pour la majeure partie des travaux s'étendant sur moins d'un an.

Les études d'horloges à quartz de précision, faites principalement à Greenwich et Washington, ont permis d'établir une formule d'extrapolation de la variation saisonnière de la rotation de la terre. (Les erreurs ne semblent pas dépasser quelques unités de 10^{-9} .)

Ainsi en appelant ΔTs la correction calculée, on obtiendra le Temps Universel uniforme provisoire TU_2 :

$$TU_2 = TU_1 + \Delta Ts = TU_0 + \Delta\lambda + \Delta Ts .$$

On utilise ce temps uniforme dans tous les observatoires depuis le 1^{er} janvier 1956.

2. Les horloges à quartz de l'Observatoire de Neuchâtel

L'Observatoire de Neuchâtel dispose de sept horloges à quartz construites par le département Oscilloquartz d'Ebauches S. A. L'une, qui se trouve au Laboratoire suisse de recherches horlogères (LH), est reliée par fil ; une autre, à la station réceptrice de Châtonnaye, est reliée par câble hertzien sur 140 Mc/s.

Les états et les marches (fréquences) de ces générateurs sont soigneusement contrôlés à l'Observatoire par des comparateurs de fréquences permettant une lecture meilleure que 0,01 milliseconde par jour.

Chaque détermination de l'heure donne les corrections (états) de chaque horloge, et il est par conséquent possible de collaborer au service de la détermination de l'irrégularité saisonnière de la rotation de la terre.

En appliquant à l'ensemble des corrections d'horloges obtenues par

les déterminations de l'heure les prévisions du B. I. H. pour le mouvement du pôle et l'irrégularité de la rotation de la terre, l'Observatoire définit une heure uniforme provisoire. Il étalonne ainsi ses fréquences fondamentales à quelques unités de 10^{-9} près et en fait bénéficier tous ceux qui s'y intéressent. (Emissions de signaux horaires et de fréquences-étalon par fil et par radio.)

Les états successifs d'une horloge peuvent être représentés très convenablement par une fonction parabolique du temps

$$E = at^2 + bt + c$$

où

$2a$: dérive,

b : marche de l'horloge au temps $t = 0$,

c : correction de l'horloge au temps $t = 0$.

La détermination exacte de ces trois constantes est rendue délicate par l'existence des quatre constantes des deux termes périodiques des fluctuations saisonnières de la rotation de la terre (ces dernières pouvant être représentées en première approximation par deux termes sinusoïdaux dont les périodes sont respectivement de six et douze mois). L'évaluation de ces sept inconnues est encore sujette aux erreurs suivantes :

1° L'observation astronomique du temps (constantes de l'instrument, équations personnelles de l'observateur, conditions météorologiques et erreurs des catalogues d'étoiles) ;

2° Variations séculaires et irrégulières de la vitesse de rotation de la terre.

On comprendra dès lors que l'étude de la vitesse de rotation de la terre ne peut se faire qu'à l'aide d'horloges à quartz très stables, où les coefficients a , b et c définis plus haut varient le moins possible. Le vieillissement $2a$ (dérive du quartz) doit être faible et très stable sur de longs intervalles. Il faut surtout que l'horloge fonctionne sans arrêt pendant plusieurs années.

On commence donc par s'assurer de la précision et de la stabilité de marche d'une horloge d'observatoire avant de l'utiliser pour l'étude de la rotation de la terre. Les étalons de fréquence de l'Observatoire de Neuchâtel, dont les premiers ont été installés en 1950, sont encore soumis, pour la plupart, à des tests sur leur stabilité de marche.

Le moyen de contrôle le plus sûr consiste à comparer les marches entre elles. La figure 1 représente une telle comparaison, où l'on a éliminé le terme du second degré de la dérive déterminé préalablement sur un intervalle de plusieurs mois par les corrections astronomiques du temps. Ces dérives (ou vieillissement) valent :

HQ1	— 3×10^{-10}	par jour		
Q4	— 9		Ch	— 3
Q5	+ 7		LH	— 2
Q6	— 27		HQ2	< 10^{-10}

Le signe — indique conventionnellement de l'avance.

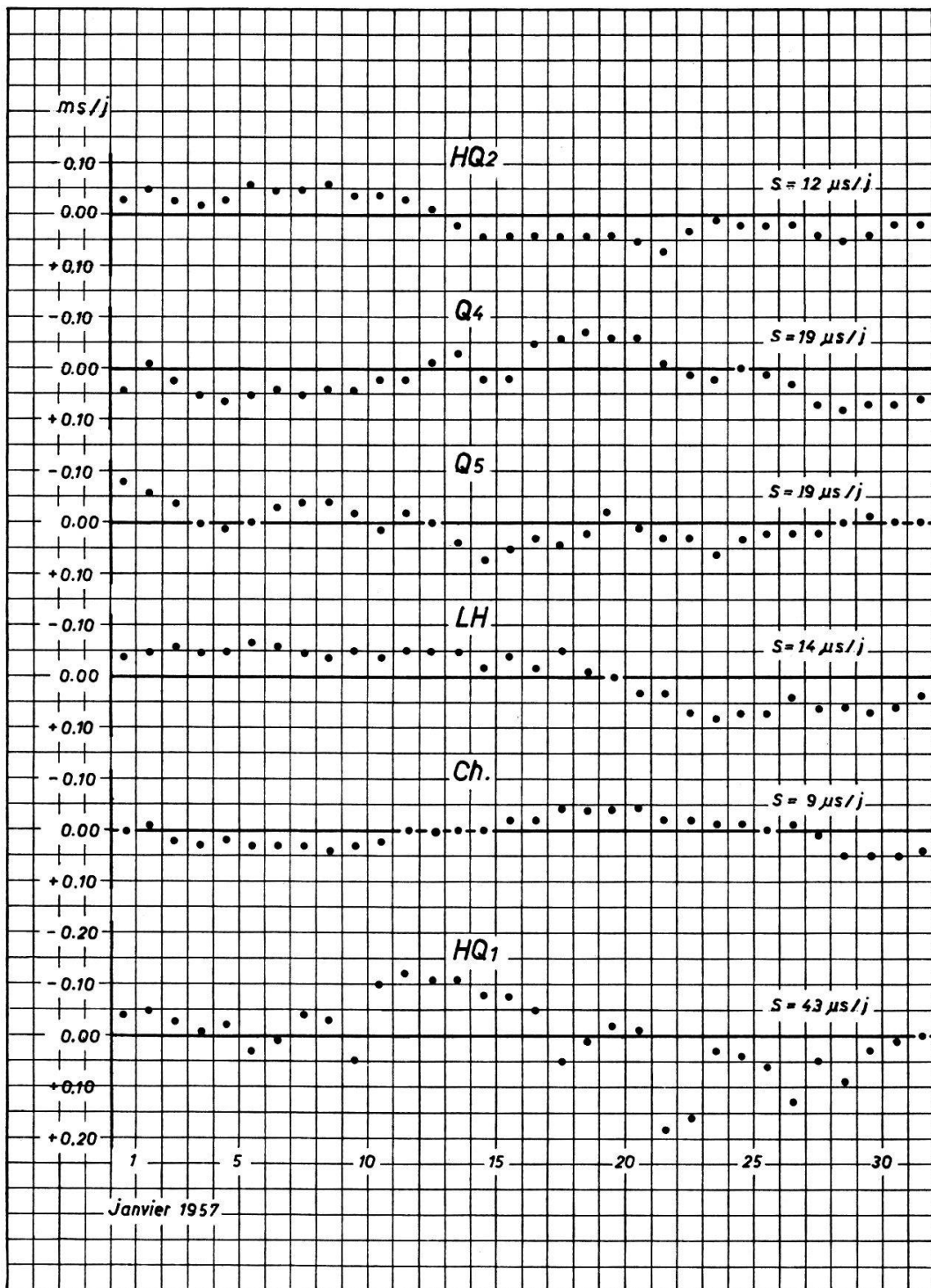


Fig. 1. Variations des marches relatives (référence : Q₆).

Il faut souligner les deux cas très rares de vieillissements positif (Q5) et inférieur à 10^{-10} (HQ2). Ces deux horloges ne présentaient pas ces particularités avant leur revision.

Les marches de chaque horloge sont comparées à celles de Q₆ pour le mois de janvier 1957.

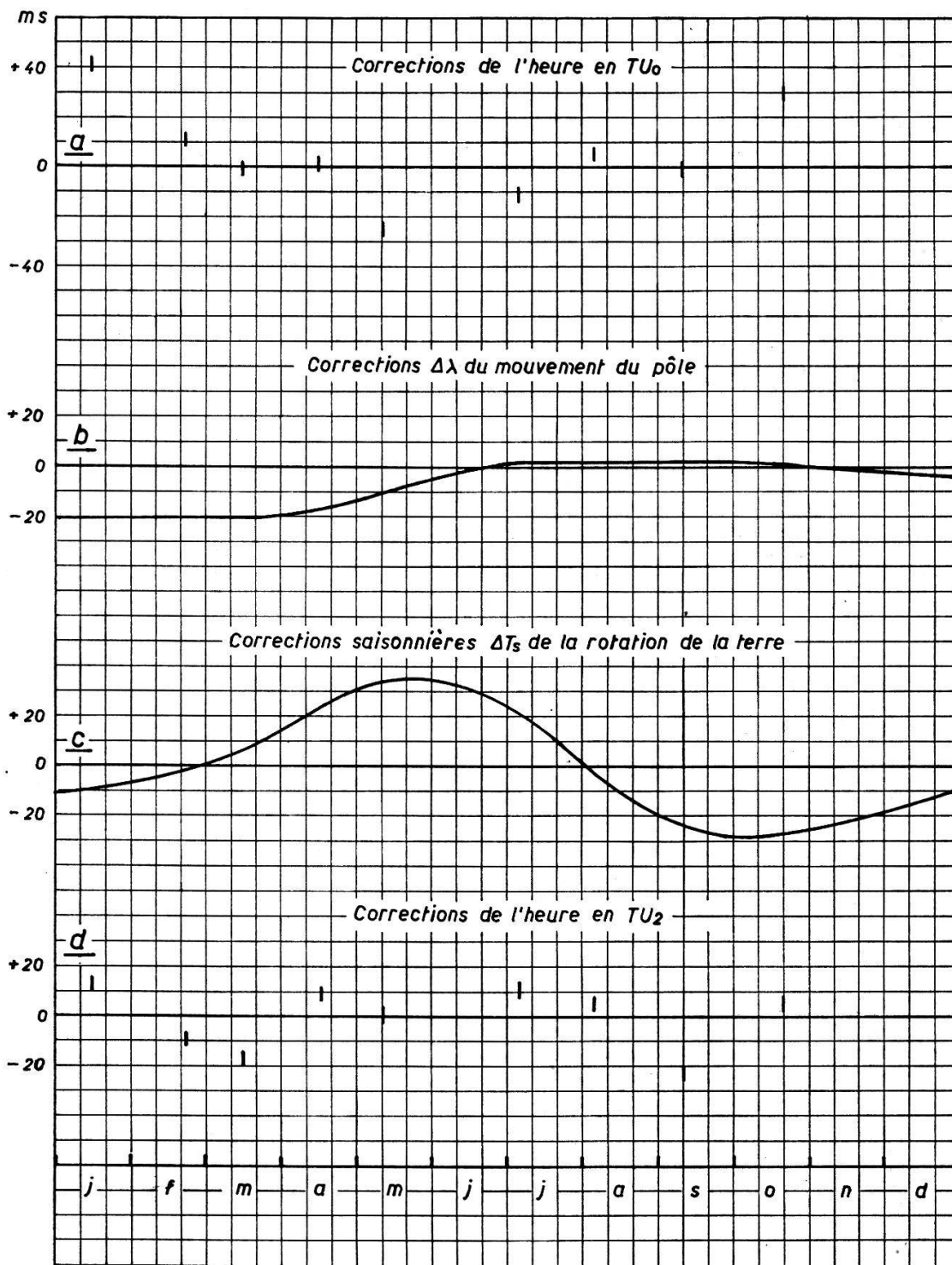


Fig. 2. Horloge L. S. R. H. (1956).

On remarque immédiatement que, mis à part HQ1, la stabilité de marche est telle qu'en un mois les fréquences s'écartent à peine de un dix millième de seconde par jour.

La stabilité (s) d'un jour à l'autre est habituellement donnée par la valeur de la moyenne absolue des troisièmes différences des états

quotidiens, ou ce qui revient au même, par les deuxièmes différences des marches diurnes. Dans notre graphique, il s'agit des différences d'ordonnées des points successifs. D'après SMITH, de l'Observatoire de Greenwich, cette moyenne représente la divergence moyenne d'une marche diurne observée par rapport à la marche diurne extrapolée de ce jour, tirées des valeurs observées pendant les deux jours précédents (4). Ce critère vaut 9 microsecondes pour Q6 et Ch, soit celle signalée par SMITH pour les meilleures horloges anglaises.

Nous n'avons jusqu'ici jamais disposé de plus d'une horloge à quartz fonctionnant à une telle précision pendant plus d'une année. Il est donc difficile de vouloir tirer des conclusions définitives sur la rotation de la terre à l'aide des seuls résultats de Neuchâtel, d'autant plus que les nouveaux instruments servant à la détermination de l'heure (tube zénithal photographique et astrolabe à prisme Danjon) n'entreront définitivement en service qu'au cours de l'année 1957.

Nous avons cependant essayé de représenter sur la figure 2 les moyennes mensuelles des corrections de l'heure obtenues par l'instrument méridien en 1956 (graphique *a*). Chaque point est la moyenne d'une dizaine de déterminations de l'heure. Ils représentent une probabilité d'erreur d'environ 6 millisecondes. Les points sont la différence d'ordonnée entre les corrections de l'horloge LH observées et la courbe $E = at^2 + bt + c$ calculée en TU_2 par la méthode des moindres carrés. Les valeurs sont données en Temps Universel TU_0 non corrigé. Le signe + indique que la correction observée est en retard sur la correction calculée (avance de la terre).

Les graphiques *b* et *c* représentent respectivement les corrections du mouvement du pôle pour Neuchâtel ($\Delta\lambda$) et les corrections saisonnières ΔT_s de la rotation de la terre, communiquées par le B. I. H. Ces dernières résultent de mesures faites à Greenwich, Paris et Washington et valent :

$$\Delta T_s = + 0^s022 \sin 2\pi t - 0^s017 \cos 2\pi t - 0^s007 \sin 4\pi t + 0^s006 \cos 4\pi t$$

où t est la fraction de l'année.

Le graphique *d* donne les valeurs du graphique *a* corrigées de celles des graphiques *b* et *c*. On obtient ainsi les corrections en TU_2 . On devrait donc théoriquement trouver des points répartis le long de l'axe des ox .

Que peut-on en conclure ? Les points qui divergent le plus sont ceux des mois de mars et septembre (environ 20 ms de retard pour l'état de la terre). Il est difficile d'affirmer qu'il s'agit essentiellement d'erreurs des courbes *b* et *c* car, comme déjà dit plus haut, il faudrait pour s'en assurer trouver des courbes analogues à celles-ci pour d'autres horloges. Il n'est pas impossible d'autre part que l'instrument méridien que nous utilisons soit sensible aux variations de la température moyenne, qui se produisent au printemps et en automne. Là encore, pour le confirmer, il faudra attendre les résultats de 1957, où l'on établira des courbes analogues pour les deux nouveaux instruments qui vont être mis en service pour la détermination de l'heure.

3. Fluctuations dues à des causes extérieures au quartz

Les causes extérieures les plus importantes paraissent être les suivantes : pression, température, amplitude et circuit électrique.

Pression

Il est certain que des changements de la pression atmosphérique exercent une influence sur la fréquence des oscillations.

On constate que le coefficient de surtension d'un barreau de quartz oscillant dans le vide est deux fois plus élevé que lorsqu'il oscille dans l'air.

Le barreau de quartz est monté dans une ampoule de verre à l'intérieur de laquelle l'air a été évacué et remplacé par de l'H à la pression de 10^{-3} mm Hg (fig. 3).

Dans ces conditions, on est en droit de supposer que les variations de la pression atmosphérique n'ont pas de répercussions appréciables sur la fréquence.

Température

Le rapport de la longueur sur le côté de ce barreau de coupe Y a été choisi de manière à obtenir une courbe fréquence-température présentant un sommet vers 55° C.

La courbe de température du quartz qui équipe l'oscillateur N° 15 est donnée sur la figure 4. On constate qu'il faut un changement de température de $\pm 0,15^{\circ}$ C pour entraîner un changement de fréquence de $1 \cdot 10^{-9}$.

Le thermostat électronique de cet oscillateur permet de maintenir à environ $0,01^{\circ}$ C la température de l'enceinte.

Pour des raisons de construction (sortie des conducteurs, etc.), l'enceinte à température constante n'est pas continue. D'autre part, la conductibilité thermique du métal qui la constitue n'est pas infinie.

Il en résulte que si le quartz est fortement lié à un cylindre à température constante ($55^{\circ} \pm 0,01^{\circ}$ C), il est aussi faiblement lié à la température extérieure.

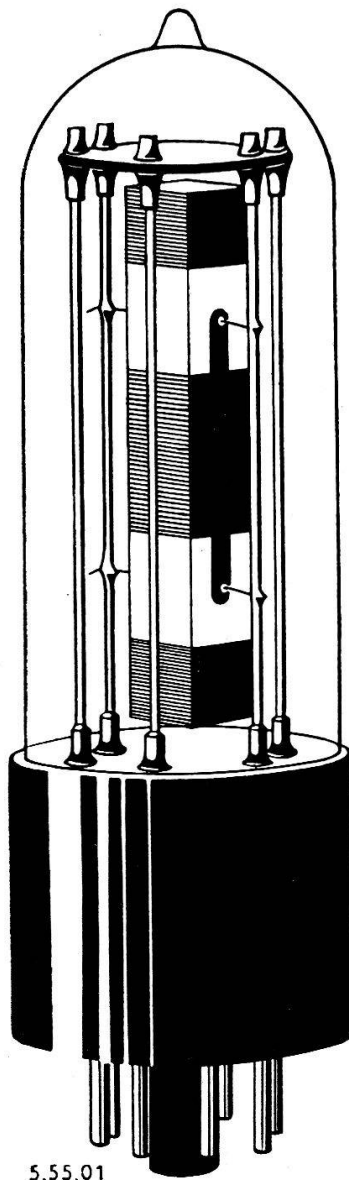


Fig. 3. Barreau de quartz.

Coupe Y
Fréquence 100 kc/s
 $Q \geq 10^6$
 $L = 600$ H
 $C \cong 4 \cdot 10^{-15}$ F
 $R \cong 300$ Ω

Oscillateur 100 kc/s type B-184 n°15

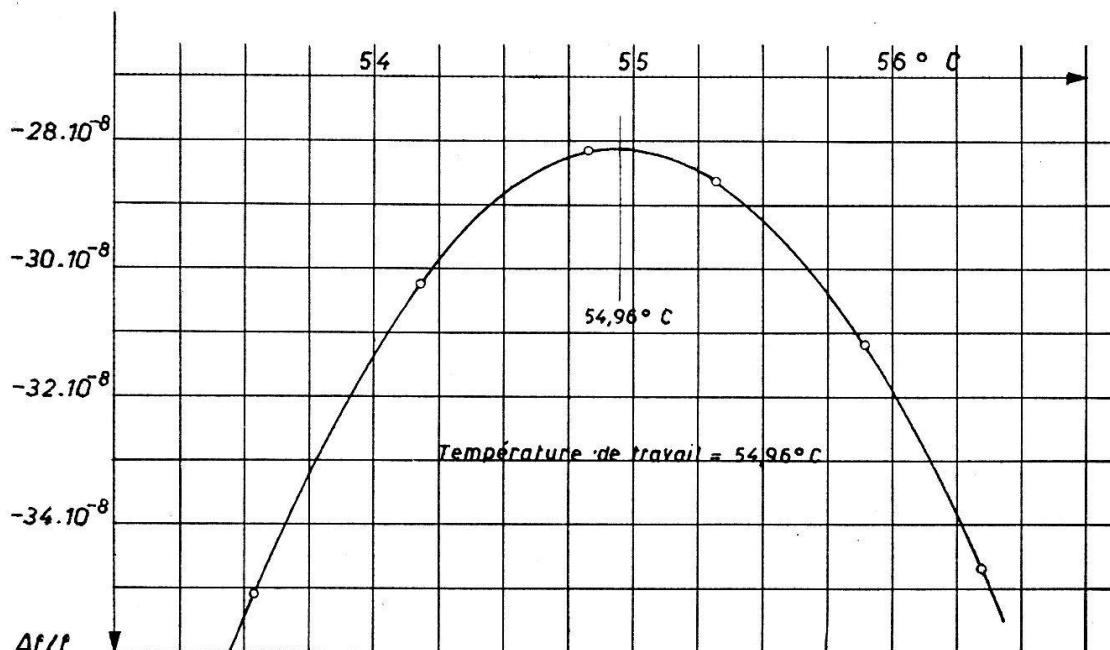


Fig. 4.

On peut considérer qu'un thermostat est un réducteur des variations externes de température.

Pour le thermostat des oscillateurs de l'Observatoire, on a constaté que le facteur de réduction était de 1000 environ.

On a cherché à produire une compensation de cet effet en introduisant dans le pont sensible à la température une petite résistance influencée par la température extérieure.

Amplitude

Comme tous les résonateurs élastiques, le quartz est affecté d'un défaut d'isochronisme. Pour de très petites amplitudes, l'isochronisme paraît réalisé et la loi de Hooke satisfaite.

Dans ces oscillateurs, on a cherché à maintenir l'amplitude très petite et très constante.

Circuit électrique

Il est certain que les modifications des caractéristiques du circuit électrique d'entretien affectent le résonateur.

Le moyen le plus commode de vérifier cet effet consiste à changer la tension d'alimentation de l'oscillateur.

Les courbes ci-contre montrent l'importance de la phase du dispositif d'entretien.

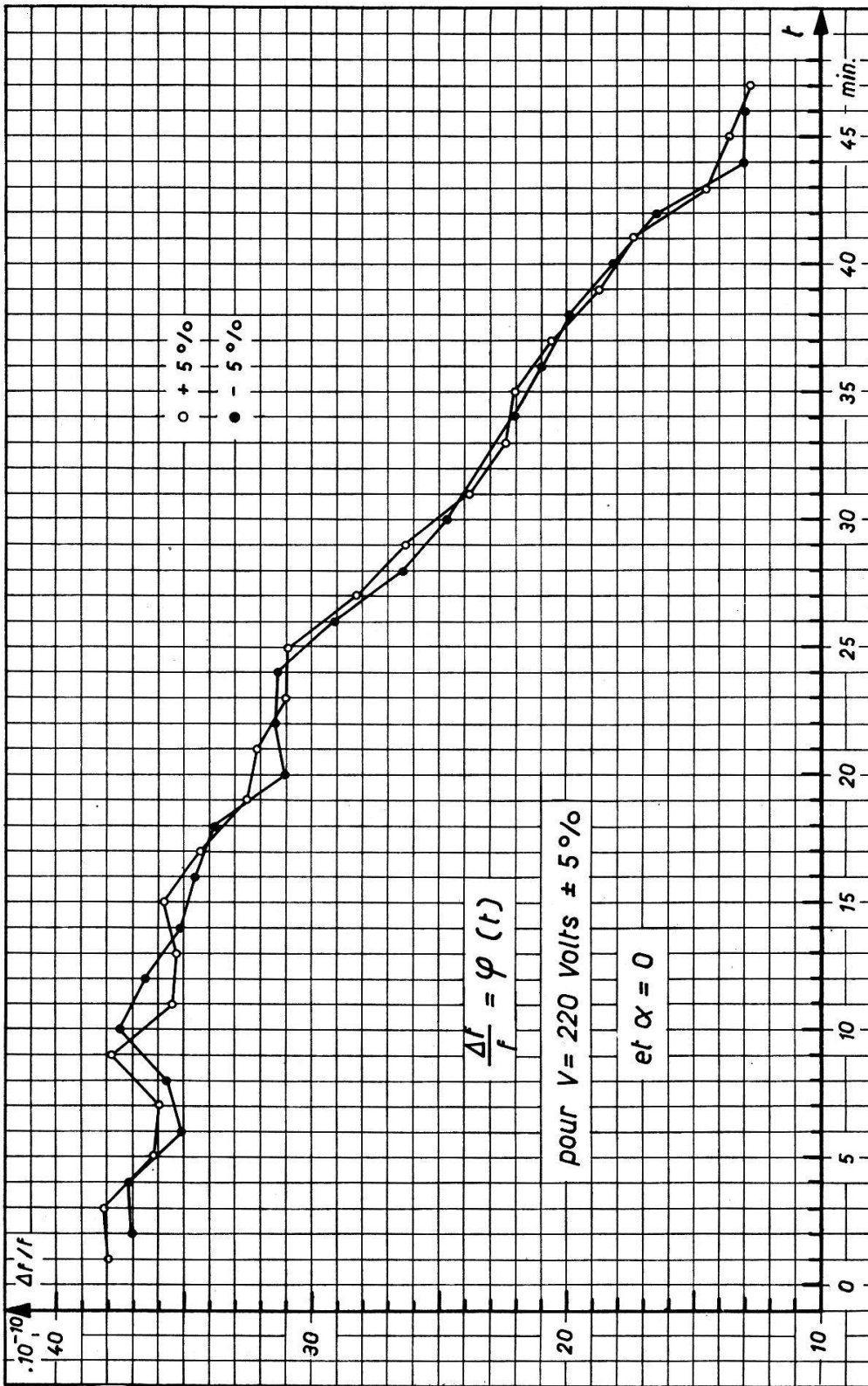


Fig. 5. Essai d'un oscillateur.

La phase optimum est trouvée indirectement en mesurant l'effet des variations de tension sur la fréquence

$$\frac{\Delta f}{f} = \varphi(V) \quad V = \text{tension d'alimentation}$$

pour $\alpha = \text{const.}$ $V_0 = 220 \text{ volts } \sim$

La courbe de $\frac{\Delta f}{f} = \varphi(t)$ comprend 46 mesures (fig. 5).

Le vieillissement relativement élevé s'explique par le fait que le quartz n'avait oscillé que pendant peu de temps.

En admettant que cette valeur correspond à un déphasage nul ($\alpha = 0$), on a reporté dans le diagramme (fig. 6) les résultats de mesure en fonction de $\text{tg } \alpha$:

$$\frac{\Delta f}{f} = \varphi(\alpha) \quad \text{pour } \Delta V = \pm 5\%.$$

On constate que l'instabilité de l'oscillateur est directement proportionnelle à la tangente de l'angle de déphasage.

Sur la base des résultats de mesure, on peut écrire pour cet oscillateur :

$$\frac{\Delta f}{f} = m \cdot \text{tg } \alpha = 37,5 \cdot 10^{-10} \cdot \text{tg } \alpha.$$

4. Fluctuations et vieillissement dus au quartz oscillant

La marche d'une horloge à quartz est déterminée essentiellement par le comportement du cristal de quartz lui-même. Elle l'est aussi non seulement par les facteurs bien déterminés énumérés au chapitre 3, mais encore par d'autres, plus ou moins imprévisibles et insaisissables, tels qu'une suspension instable des quartz, des conséquences de petits accidents presque inévitables survenus en cours de fabrication, des interactions des électrodes avec le quartz, des contaminations de la surface, ainsi que des effets du gaz résiduel dans l'ampoule (6, 7).

Les connaissances récentes de la structure microscopique des cristaux et du comportement de leurs défauts chimiques et structuraux autorisent l'espoir que la nature et l'intensité des phénomènes de vieillissement et de stabilité restreinte à courte durée des oscillateurs à quartz seront bientôt explicables.

Il ressort des travaux de ZENER (8) et de KÖHLER (9) que l'interaction des défauts chimiques avec les dislocations dans les cristaux est responsable de frottements internes et d'écarts du module d'élasticité par rapport à celui du cristal idéal. La dissipation d'énergie dans le quartz est provoquée par quatre processus : autour de 350° C, une relaxation d'une fréquence de $4 \cdot 10^{13} \text{ sec}^{-1}$ due à une migration de vacances ou à une diffusion des ions provenant des électrodes (10) ; autour de

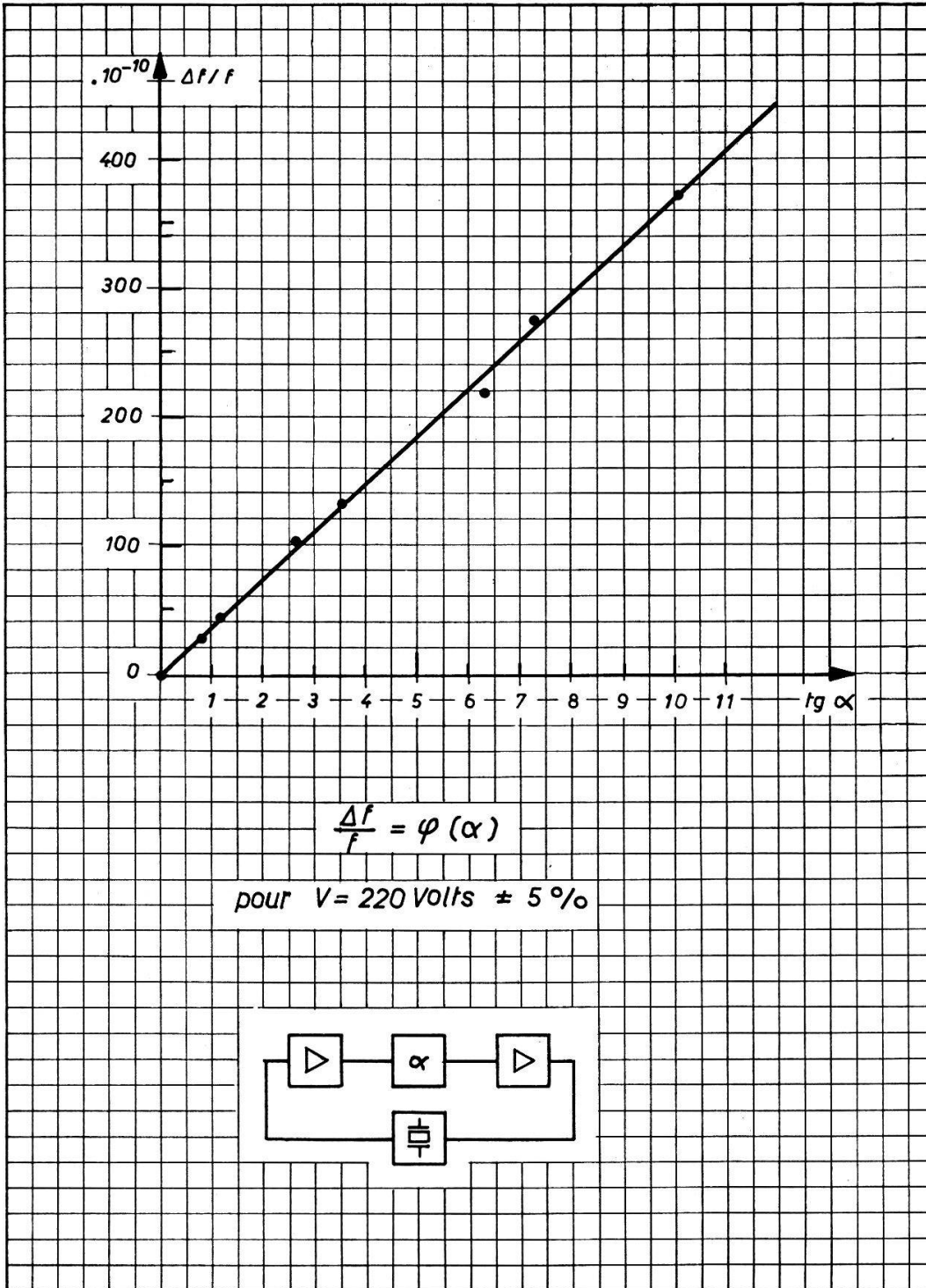


Fig. 6. Effet de la phase sur la stabilité de l'oscillateur.

50° K, une relaxation d'une fréquence de $1,3 \cdot 10^9 \text{ sec}^{-1}$ due aux déformations des dislocations ancrées; et autour de 20° K une autre de 10^{13} sec^{-1} due à des déformations du réseau par les impuretés (II). A la température habituelle de fonctionnement d'un quartz, ces phénomènes d'anélasticité sont négligeables. Par contre une dissipation

apériodique d'énergie (énergie d'activation $5 \text{ kcal} \cdot \text{mol}^{-1}$) est produite par l'arrachement de dislocations et leur re-capture par les défauts chimiques du cristal (12, 11). MITCHELL (13) a mesuré une diminution du vieillissement des quartz dans la proportion de 5 à 1 en abaissant la température de 50°C à -10°C . A conditions égales, les énergies d'activation d'une part du vieillissement, d'autre part du dernier processus mentionné ci-dessus sont sensiblement les mêmes. BÖMMEL, MASON et WARNER avancent l'hypothèse que le vieillissement serait imputable à la capture des dislocations libres (introduites dans le cristal par l'usinage) par les atomes étrangers, provenant par exemple des électrodes, qui diffusent vers l'intérieur du cristal. Ce phénomène correspond bien à un déplacement irréversible de l'équilibre thermodynamique (14). Le moyen efficace pour diminuer le vieillissement consistera donc à baisser la température de fonctionnement. Malheureusement des coupes du quartz à coefficient thermoélastique nul à de basses températures ne sont pas encore connues.

5. Remarques sur le développement futur des horloges à quartz

Les horloges à quartz ne constituent pas un standard de temps physique proprement dit, étant donné que leur marche dépend de grandeurs intensives comme la géométrie, la température et d'autres effets de l'entourage. Ces influences se manifestent de façon indépendantes les unes des autres et varient d'un oscillateur à l'autre. Les horloges moléculaires, par contre, dont la mise au point se poursuit dans plusieurs laboratoires (15), constituent un vrai standard de fréquence, dont la reproductibilité atteint $\Delta F/F = 5 \cdot 10^{-10}$. De tels dispositifs nécessitent un oscillateur d'interpolation qui, en l'occurrence, doit avoir une stabilité équivalente ou supérieure. La fréquence de cet oscillateur est multipliée et comparée à la fréquence moléculaire. En outre, il doit servir de garde-temps, parce que les horloges moléculaires ne peuvent encore fonctionner continuellement.

La conception actuelle de l'emploi des horloges à quartz exige que le vieillissement soit faible — ce qui implique que a et b soient petits (voir chap. 2) — tandis qu'elle n'attache qu'une importance secondaire à la stabilité de courte durée (stabilité de fréquence, stabilité de phase, grande pureté des signaux). Une (première) évolution doit donc tendre à améliorer cette stabilité, afin que l'horloge à quartz devienne effectivement contrôlable au moyen de la fréquence standard de l'horloge moléculaire.

BIBLIOGRAPHIE

- 1** BROWN, E. — (1926). *Transactions of the Astronomical Observatory of Yale University*, V. 3, part VI.
- 2** STOYKO, N. — (1936). *C.-R. Acad. Sc. Paris*, 203.
- 3** *Bull. horaire du B. I. H.*, 1955, N° 3, série 4.
- 4** SMITH, H. — (1955). *La Suisse horlogère*, N° 1, p. 38.
- 5** *Bull. horaire, B. I. H.*, 1955, N° 4, série 4.
- 6** WARNER, A. W. — (1955). *Proc. IRE* **43** : 490.
- 7** STEINEMANN, S. et DINICHERT, P. — (1956). *Procès-verbaux et Mémoires du V^e Congrès internat. de chronométrie*, vol. III, p. 929.
- 8** ZENER, C. — (1948). *Elasticity and Anelasticity of Metals*.
- 9** KÖHLER, J. S. — (1952). *Imperfections in nearly perfect Solids*, p. 197.
- 10** COOK, R. K. et BRECKENRIDGE, R. G. — (1953). *Phys. Rev.* **92** : 1419.
- 11** BÖMMEL, H. E., MASON, W. P. et WARNER, A. W. — (1956). *Phys. Rev.* **102** : 64.
- 12** BOSSHARD, W. et BUSCH, G. — (1938). *ZS. Phys.* **108** : 195.
- 13** MITCHELL, H. T. — (1954). *Nature* **174** : 41.
- 14** STEINEMANN, S. — (1956). *Journal suisse d'Horlogerie*, N° 3/4, p. 54.
- 15** BONANOMI, J. et HERRMANN, J. — (1956). *Journal suisse d'Horlogerie*, N° 9/10, p. 191.