

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 92 (1966)
Heft: 1

Artikel: Les quartz piézo-électriques et leurs applications
Autor: Engdahl, J. / Demairé, J.-F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-68338>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 26.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (SVIA)
de la Section genevoise de la SIA
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique
de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'EPF (Ecole poly-
technique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE

Président: E. Martin, arch. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Groscurin, arch.; J.-C. Ott, ing.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.;
M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: D. Bonnard, ing.
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; J. Favre.
arch.; A. Robert, ing.; J.-P. Stucky, ing.
Adresse: Avenue de la Gare 10, 1000 Lausanne

RÉDACTION

D. Bonnard, E. Schnitzler, S. Rieben, ingénieurs; M. Bevilacqua,
architecte
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, 1000 Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 40.—	Etranger	Fr. 44.—
Sociétaires	»	» 33.—	»	» 37.—
Prix du numéro	»	» 2.—	»	» 2.50

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »,
N° 10 - 8775, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au
numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie
La Concorde, Terreaux 29, 1000 Lausanne

ANNONCES

Tarif des annonces:
1/1 page Fr. 385.—
1/2 » » 200.—
1/4 » » 102.—
1/8 » » 52.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. 1000 Lausanne et succursales



SOMMAIRE

Les quartz piézo-électriques et leurs applications, par J. Engdahl et J.-F. Demairé, Ebauches S.A., Neuchâtel.
Le tirant S.I.F. type « T.M. » pour terrains meubles, par R. Barbedette (S.I.F.-Groutbor, Bussigny-Lausanne).
Bibliographies. — Les congrès.
Documentation générale. — Nouveautés, informations diverses.

LES QUARTZ PIÉZO-ÉLECTRIQUES ET LEURS APPLICATIONS

par J. ENGDAHL et J.-F. DEMAIRÉ, Ebauches, S.A. Département Oscilloquartz, Neuchâtel¹

Introduction¹

Le quartz est l'un des composants de l'électronique. Sous cette simple définition se cache en réalité une foule de problèmes complexes ressortissant à la physique des solides, à la cristallographie, à la technique des couches minces, à la mécanique des vibrations... et un tout petit peu à l'électronique.

Aussi est-il illusoire de prétendre faire en un seul exposé le tour d'un domaine aussi vaste. Nous nous bornerons donc ici à expliquer quelques-uns des phénomènes qui paraissent les plus importants, puis à montrer comment on peut, à partir de ces données, arriver à fabriquer, utiliser et comprendre le résonateur piézo-électrique.

PREMIÈRE PARTIE

Théorie des résonateurs, le quartz et ses applications

par J. ENGDAHL

Mesure du temps et vibrations

Essayons tout d'abord de définir le résonateur :

- son but est de fournir ou de mesurer une fréquence ou un temps ;
- sa caractéristique est d'avoir une fréquence propre sur laquelle il résonne de préférence à toute autre ;
- sa qualité essentielle est d'avoir une fréquence propre indépendante de tout paramètre extérieur.

¹ Conférence donnée le 28 avril 1965 à l'Ecole polytechnique de Lausanne sous les auspices de l'Association suisse de microtechnique.

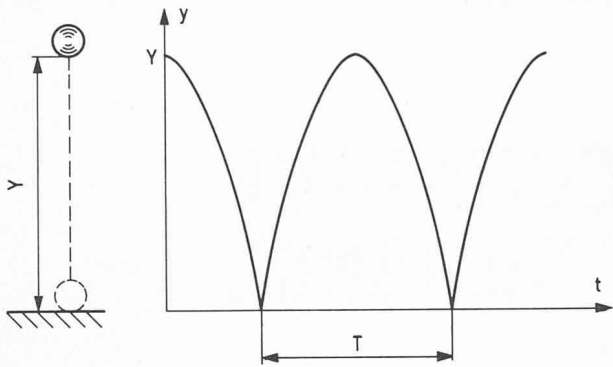


Fig. 1. — Mouvement d'une bille rebondissant sur un plan élastique.

Illustrons cela par quelques exemples :

- a) Une bille est lâchée sur un plan élastique (fig. 1). Elle rebondit, si les pertes sont faibles, à une hauteur voisine de celle à laquelle elle a été lâchée. Le temps de chute vaut :

$$t = \sqrt{\frac{2Y}{g}} \quad \text{et la période ou intervalle entre deux bonds : } T = \sqrt{\frac{8Y}{g}}$$

g étant l'accélération de la pesanteur et Y la hauteur de chute.

La période dépend donc de la hauteur de chute. Le système est anisochrone, c'est un mauvais résonateur.

- b) Un pendule

a une durée d'oscillation¹ donnée par $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ (fig. 2), pour autant que l'amplitude soit faible (domaine où l'on peut confondre sinus et arc). Aux faibles amplitudes, le pendule est isochrone. C'est un bon résonateur. La fonction amplitude-temps est sinusoïdale.

On pourrait donner bien d'autres exemples d'oscillations mécaniques sinusoïdales et isochrones qui pourraient être utilisables comme résonateurs. Mais des oscillations électriques peuvent se comporter de la même manière :

- c) Le circuit oscillant électrique se compose d'une capacité, initialement chargée, qui se décharge à travers une bobine et une résistance, cette dernière figurant en général les pertes inévitables du circuit (fig. 3). L'équation du système s'écrit :

$$L \frac{d^2u}{dt^2} + R \frac{du}{dt} + \frac{u}{C} = 0.$$

L étant l'inductivité de la bobine, R la résistance de perte et C la capacité.

Cette équation est analogue à celle décrivant une vibration mécanique, le premier terme rappelant l'inertie (proportionnelle à l'accélération), le deuxième un frottement (proportionnel à la vitesse), le troisième l'élasticité (force de rappel proportionnelle à l'amplitude).

¹ Demi-période.

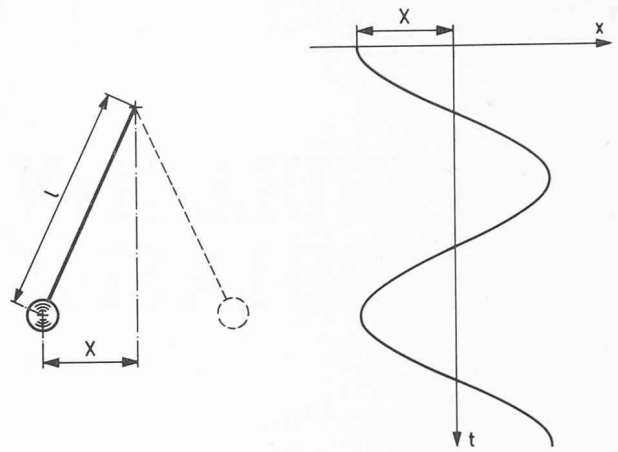


Fig. 2. — Oscillations d'un pendule.

La solution de l'équation est :

$$u = e^{-at} (U_0 \cos bt + M \cdot U_0 \sin bt)$$

En posant $Q = \frac{\omega_0 L}{R}$ et $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}}$

on aurait : $a = \frac{\omega_0}{2Q}$ $b = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$

et $M = \frac{1}{\sqrt{4Q^2 - 1}}$.

En général, $Q \gg 1$, de sorte que le terme de droite de la parenthèse est petit. On a donc affaire à une oscillation cosinusoidale dont l'amplitude décroît exponentiellement. On remarquera que :

1. La décroissance est d'autant plus lente que Q est grand et donc que les pertes sont faibles (fig. 4).
2. La fréquence est égale à celle d'un circuit sans pertes, à un facteur $\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$ près. Elle est donc légèrement influencée par les pertes.

Entretien des oscillations

Un résonateur réel, donc avec pertes, peut être entretenu, c'est-à-dire qu'on peut lui fournir, au rythme voulu, une petite quantité d'énergie compensant

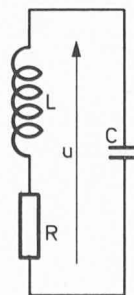


Fig. 3. Circuit oscillant avec pertes.

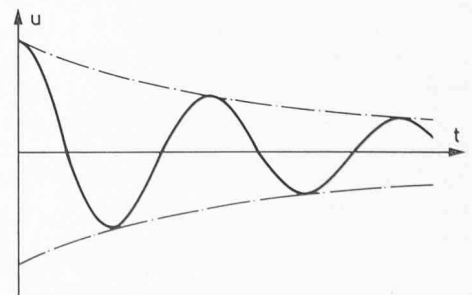


Fig. 4. — Oscillation amortie.

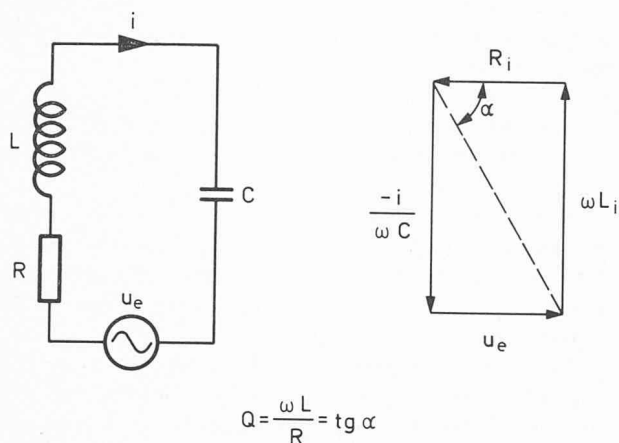


Fig. 5. — Entretien des oscillations d'un circuit électrique.

ses pertes et empêchant l'amortissement des oscillations (fig. 5).

Dans le circuit électrique, on peut entretenir l'oscillation en plaçant en série avec les autres éléments une source de tension dont la fréquence coïncide avec celle de la résonance propre. Le diagramme vectoriel montre que cette tension doit être déphasée de 90_0 par rapport à la tension aux bornes de la self et que son amplitude doit être égale à la chute de tension aux bornes de la résistance de pertes.

Dans un système mécanique (fig. 6), composé par exemple d'une masse suspendue à un ressort imparfait, on peut animer le point de fixation d'un mouvement à fréquence et phase convenables. L'analogie est parfaite. Remarquons qu'un changement de phase modifie la fréquence et réciproquement :

$$\operatorname{tg} \varphi = 2Q \frac{\Delta \omega}{\omega_0} \quad \text{et} \quad \frac{\Delta \omega}{\omega_0} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{2Q}.$$

Ces relations s'obtiennent à partir de l'équation de l'impédance du résonateur en fonction de la fréquence.

Nous avons jusqu'ici analysé en parallèle des systèmes oscillants mécaniques et électriques, en utilisant les mêmes méthodes de raisonnement. En fait, on pourrait pousser jusqu'aux détails la dualité qui existe entre ces deux domaines (voir appendice). Ceci est important dans notre cas, car le quartz est un transducteur mécanique-électrique qu'il peut être utile de considérer aussi bien sous l'une ou l'autre de ses formes en utilisant la correspondance entre :

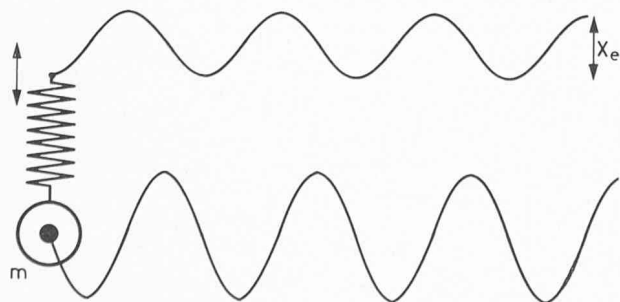


Fig. 6. — Entretien des oscillations d'un système mécanique.

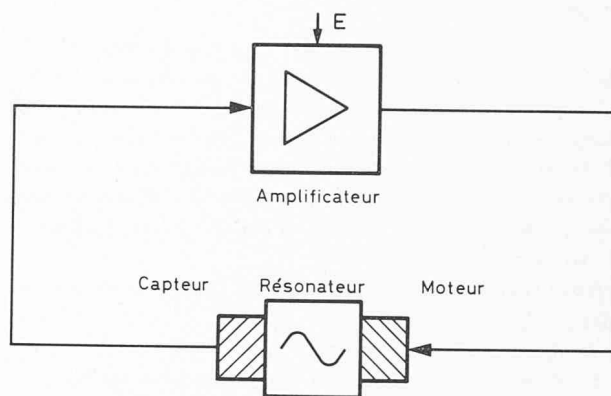


Fig. 7. — Oscillateur, configuration générale.

charge	et	élongation
courant	et	vitesse
self	et	masse
résistance	et	frottement
capacité	et	inverse de l'élasticité.

Oscillateur

C'est un dispositif destiné à maintenir un résonateur en vibration sur sa fréquence propre. Il doit compenser les pertes, c'est-à-dire fournir l'énergie d'entretien sans amener de perturbation au résonateur. En vertu de ce qui précède, cela signifie qu'il ne doit pas introduire de défaut d'isochronisme ni d'erreur de phase.

En pratique (fig. 7), l'oscillateur se compose d'un capteur chargé de détecter le mouvement du résonateur, d'un amplificateur devant fournir l'appoint d'énergie et d'un organe moteur appliquant l'énergie d'entretien au résonateur. Celle-ci doit évidemment être dérivée d'une source extérieure.

L'énergie d'entretien peut aussi être appliquée sous forme d'impulsions brèves au moment du passage du résonateur à son point d'équilibre. C'est le cas de la montre et de la pendule. Dans celles-ci, c'est l'échappement qui définit le moment de l'impulsion et c'est lui qui la fournit. Il travaille donc en capteur et en moteur.

Dans l'oscillateur à quartz, celui-ci joue simultanément le rôle de capteur, de résonateur et de moteur.

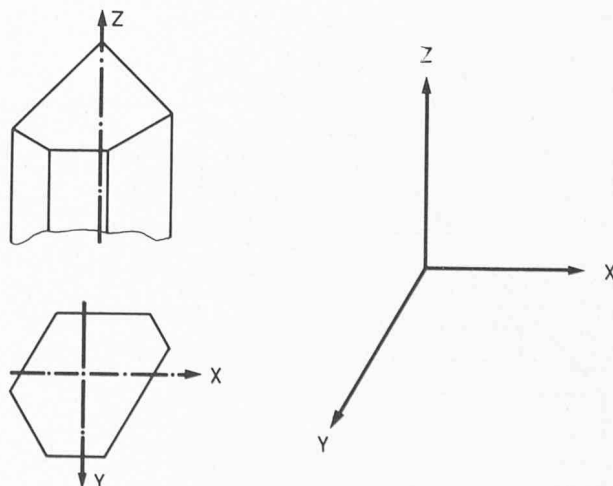


Fig. 8. — Le quartz et ses axes.

Le quartz (fig. 8)

C'est la forme cristalline hexagonale, du bioxyde de silicium, bien connue sous le nom de cristal de roche. Celui que l'on trouve dans nos régions étant imparfait, on utilise généralement du quartz en provenance du Brésil. Il est transparent, parfois légèrement teinté ou fumé. Il a une dureté de 7 dans l'échelle de Mohrs et une densité de 2,65. Son module d'élasticité est de l'ordre de 10^6 kg/cm^2 .

Son utilisation comme résonateur tient surtout à deux faits :

- a) il est piézo-électrique ;
- b) il est dur, élastique et chimiquement stable.

Du fait de son anisotropie, ses caractéristiques physiques dépendent de la direction considérée. Cela complique considérablement l'étude de ses propriétés et il faut par exemple un système de 6 équations linéaires à 6 inconnues pour traduire la relation entre contrainte et déformation.

$$y_i = \sum_{j=1}^6 a_{ij} \cdot x_j \quad (i = 1, 2 \dots 6) \quad \text{ou} \quad \{y\} = [a] \{x\}$$

$[a]$ étant une matrice à 36 éléments, dont certains sont fort heureusement nuls.

Le quartz jouit par ailleurs de propriétés particulières vis-à-vis de la lumière, dont il fait tourner le plan de polarisation lorsqu'elle le traverse selon un certain axe. Ceci est mis à profit pour l'orientation des cristaux lors de la fabrication.

Afin de pouvoir situer un plan ou une direction par rapport au réseau cristallin, on a défini un système de trois axes rectangulaires baptisés d'ordinaire X, Y et Z.

L'effet piézo-électrique

La piézo-électricité est une propriété que possèdent certains cristaux de développer des charges électriques sous l'effet d'une contrainte mécanique.

Soit une lame de quartz taillée perpendiculairement à l'axe X et dont les faces sont recouvertes d'électrodes. En reliant ces surfaces conductrices à un électroscope sensible, on pourra constater l'apparition d'une tension électrique si l'on soumet la lame à une compression. Le même phénomène se produirait pour une traction, mais la polarité s'inverserait (fig. 9).

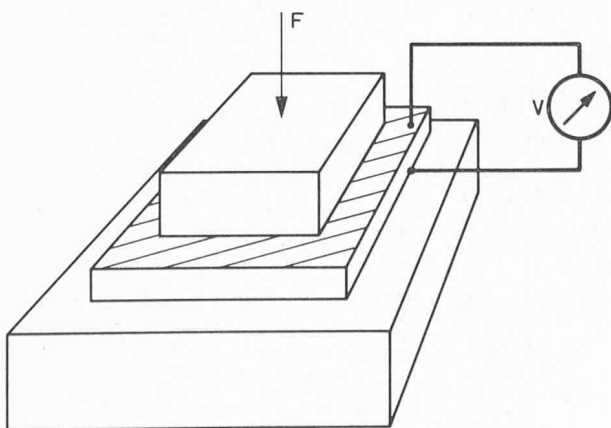


Fig. 9. — L'effet piézo-électrique.

C'est cette propriété qui est mise à profit dans le pick-up à cristal pour convertir le mouvement de l'aiguille en tension.

L'effet piézo-électrique est réversible et on peut, en appliquant une tension entre les électrodes de la lame de quartz, provoquer une contraction ou une elongation, selon la polarité.

Si la tension appliquée est alternative, la déformation le sera également. En modifiant la fréquence d'excitation de manière qu'elle corresponde à une fréquence propre du cristal, celui-ci va entrer en résonance et l'amplitude croîtra rapidement.

Au point de vue statique, l'effet piézo-électrique n'est pas très marqué, c'est-à-dire qu'une déformation sensible nécessite une tension très grande (pour le quartz, environ 50 kV pour un allongement de $1 \text{ } \text{‰}$). En résonance, par contre, les pertes sont très faibles, car le facteur de qualité Q est grand et une tension de quelques volts peut provoquer la rupture du quartz.

Si, au lieu d'utiliser une lame perpendiculaire à l'axe X, on la choisit perpendiculaire à Y, une tension provoquera une contrainte de cisaillement. Par contre, une lame perpendiculaire à Z ne subirait aucune déformation.

Ainsi, en choisissant convenablement la forme et l'orientation du quartz, on pourra obtenir différents modes d'oscillation.

Oscillations en mode fondamental

a) Allongement

C'est le mode le plus simple (fig. 10). Il est utilisé pour des barreaux de section rectangulaire munis d'électrodes sur les faces perpendiculaires à X. Le mouvement étant symétrique par rapport au centre de la barre, celui-ci constitue ce que l'on nomme un point nodal où l'amplitude est nulle et où l'on peut fixer le cristal sans en modifier la vibration.

La fréquence est donnée par :

$$f = \frac{k}{L} \quad (\text{kHz})$$

dans laquelle L est la longueur de la barre et k une constante dépendant de l'orientation de la coupe et qui vaut à peu près 2800 kHz·mm. Ainsi, un quartz de 28 mm de long vibrera à 100 kHz.

b) Flexion

Un tel mode s'obtient en produisant, à l'aide d'électrodes convenables, des contraintes opposées dans deux régions d'un cristal. La figure 11 indique deux possibilités nommées respectivement flexion XY et YZ, ces symboles définissant le plan

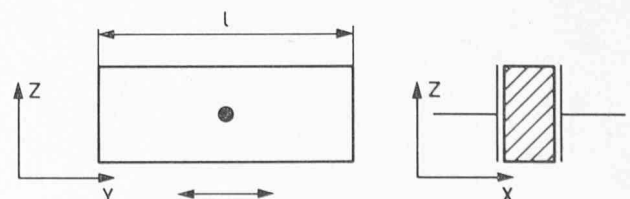


Fig. 10. — Mode d'allongement.

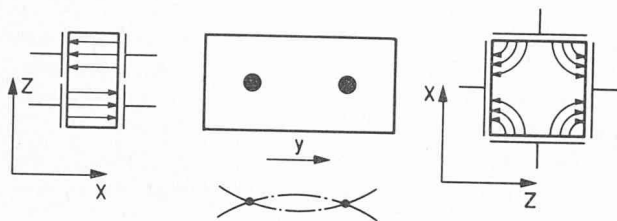


Fig. 11. — Mode de flexion.

du mouvement. Dans le cas d'un barreau libre aux deux extrémités, c'est-à-dire sans encastrement, on trouve deux points nodaux situés à peu près au quart de la longueur à partir de chaque extrémité. La fréquence vaut :

$$f = k \frac{e}{L^2} \quad (\text{kHz})$$

e étant l'épaisseur du barreau dans le plan du mouvement. Pour une flexion XY , k vaut environ 5800 kHz·mm. Un quartz de 1,5 mm d'épaisseur et de 29,5 mm de long vibrerait à 10 kHz.

c) Cisaillement de surface

On utilise ici la propriété d'une composante du champ dirigée selon l'axe Y pour produire une déformation en cisaillement plan d'une mince lame de quartz généralement ronde ou carrée. L'expression de la fréquence est :

$$f = \frac{k}{L} \quad (\text{kHz}) \quad \text{ou} \quad f = \frac{k}{d} \quad (\text{kHz})$$

L étant ici le côté de la plaquette ou d son diamètre, selon sa forme. k dépend fortement de la coupe mais se situe d'ordinaire entre 2000 et 3000. Le point nodal est au centre de la plaquette (fig. 12).

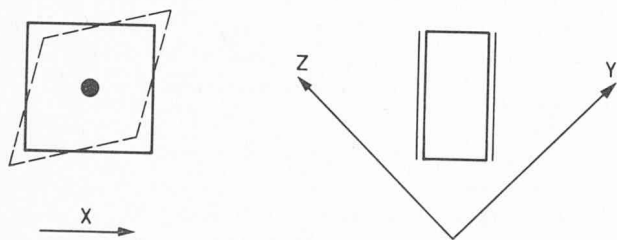


Fig. 12. — Cisaillement de surface.

d) Cisaillement d'épaisseur

Le procédé utilisé est le même que dans le cas précédent, mais le mouvement est dans un plan perpendiculaire, de sorte que le quartz se déforme un peu (fig. 13), à la manière d'un jeu de cartes

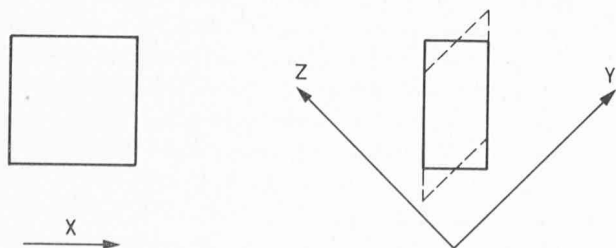


Fig. 13. — Cisaillement d'épaisseur.

que l'on ferait glisser les unes sur les autres. La fréquence ne dépend que de l'épaisseur :

$$f = \frac{k}{e} \quad (\text{kHz}).$$

Pour une coupe dite AT , k vaut à peu près 1600 kHz·mm. Il n'y a pas ici de point nodal à proprement parler, mais la tranche de la plaquette constitue une zone de moindre activité.

Les valeurs des constantes de fréquence k données ci-dessus concernent le mode fondamental des différents modes cités. Mais il est aussi possible, en modifiant l'excitation et la fixation, de produire des vibrations harmoniques qui seront un multiple entier, pair ou impair du fondamental (fig. 14).



Fig. 14. — Vibrations en harmonique.

Oscillateur à quartz, schéma équivalent

Comme nous l'avons vu précédemment, l'oscillateur doit entretenir l'oscillation du résonateur. Dans le cas de l'oscillateur à quartz, c'est l'effet piézo-électrique qui est utilisé pour transformer l'énergie électrique d'entretien en énergie mécanique et pour traduire le mouvement obtenu sous forme d'un signal électrique. L'oscillateur proprement dit peut donc être un simple amplificateur (fig. 15) dont l'entrée et la sortie sont reliées au quartz. Il est plus pratique de pouvoir traiter toutes les grandeurs sous une forme électriquement commune, ce qui peut se faire grâce à la dualité dont il a été question. Le quartz apparaît alors sous forme d'un circuit résonnant série (fig. 16) composé des éléments R_1 , L_1 et C_1

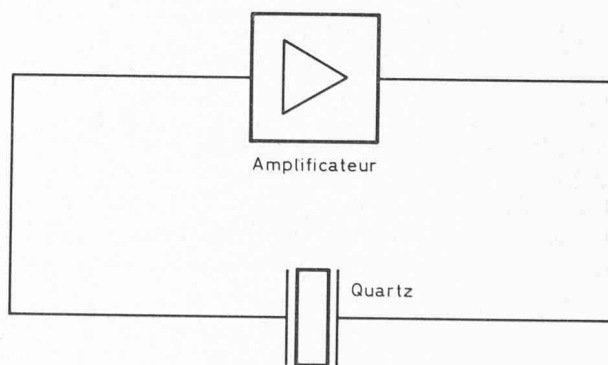


Fig. 15. — Oscillateur à quartz.

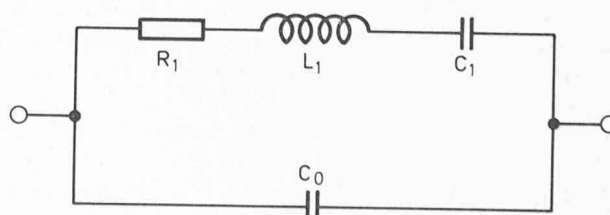


Fig. 16. — Schéma équivalent d'un quartz.

(traduisant respectivement les pertes mécaniques, et les propriétés d'inertie et d'élasticité) et d'une capacité parallèle C_0 qui est la capacité statique entre les électrodes. On peut montrer que ce circuit possède en fait deux résonances propres :

- a) *Le quartz est alimenté par un générateur d'impédance interne nulle*

La capacité statique C_0 est alors court-circuitée par la source et seule la branche série intervient dans le calcul de la résonance :

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}}$$

C'est la résonance série, à laquelle l'impédance du cristal passe par un minimum et devient égale à R_1 .

- b) *Le quartz est alimenté par un générateur d'impédance interne infinie*

Dans ce cas, les capacités C_0 et C_1 sont en série et la résonance sera :

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{C_0 + C_1}{L_1 C_1 C_0}}}$$

C'est la résonance parallèle, l'impédance du cristal passe par un maximum. C_1 étant beaucoup plus petit que C_0 , ces deux résonances sont très voisines et ne diffèrent guère de quelques pour-mille.

A titre d'exemple, voici les valeurs des éléments du circuit équivalent d'un quartz 100 kHz en coupe $X + 5_0$:

$$\begin{aligned} f &= 100 \text{ kHz} & L_1 &= 200 \text{ Henry} \\ R_1 &= 400 \text{ } \Omega & C_1 &= 0,013 \text{ pF} \\ Q &= 420 \text{ 000} & C_0 &= 2,65 \text{ pF} \end{aligned}$$

La valeur très élevée du facteur de qualité Q implique une grande stabilité de fréquence et une faible énergie d'excitation. Stabilité et Q sont liés, comme on peut le voir ci-dessous pour divers résonateurs :

Résonateur	Q	Stabilité journalière soit	
Balancier	50	2.10 ⁻⁵	600 s/an
Pendule	10 ⁴	1.10 ⁻⁷	3 s/an
Quartz dans l'air	10 ⁴	1.10 ⁻⁷	3 s/an
Quartz sous vide	10 ⁶	1.10 ⁻⁹	1 s/30 ans
Horloge atomique	10 ⁹	1.10 ⁻¹²	1 s/30 000 ans

On remarquera que, dans tous les cas, le produit : Q fois stabilité journalière vaut 10⁻³. Notons aussi qu'une précision de 10⁻⁹ reviendrait à déterminer à 30 cm près la distance de la Terre à la Lune.

Les pertes dans le quartz

Au cours de ce qui précède, nous avons pu nous rendre compte de l'importance de ce facteur de qualité dont dépendent la stabilité et le degré d'influence de perturbations extérieures. Q est lié aux éléments du circuit équivalent de la façon suivante :

$$Q = \frac{\omega \cdot L_1}{R_1}$$

Or, pour un quartz de fréquence et de dimensions données, L_1 est une valeur absolument déterminée qu'on ne peut modifier. C'est donc sur la résistance R_1 qu'il

faudra agir, de manière à la rendre aussi faible que possible. De ce fait, la recherche d'une résistance minimale conditionne, comme nous le verrons, tous les procédés de fabrication des quartz piézo-électriques.

La résistance de perte R_1 représente les pertes totales du résonateur. Elles peuvent se décomposer comme suit :

1. Pertes électriques.
2. Frottements internes.
3. Pertes de surface.
4. Suspension.

Examinons dans l'ordre ces divers points :

1. Pertes électriques

Si une partie de l'énergie électrique peut s'écouler à travers une résistance de fuite, elle ne participera pas à la vibration et représentera une perte. Il faut donc que l'isolation entre électrodes soit aussi parfaite que possible. Le quartz est un isolant remarquable, de sorte que ces pertes seront négligeables dans le résonateur lui-même. Par contre, il faudra vouer le plus grand soin à l'isolation des liaisons électriques entre les électrodes et le circuit d'utilisation. Pour cette raison, les sorties des connexions à travers l'encapsulation du quartz se font à l'aide de traversées à isolation verre et on utilise des entretoises en mica pour assurer la rigidité du support à l'intérieur de l'enveloppe. Des isolants tels que la bakélite ou des plastiques pouvant absorber une certaine quantité d'humidité sont à éviter.

2. Frottements internes

Le quartz est un monocristal dans lequel les molécules sont liées élastiquement. Les frottements internes d'un cristal parfait sont très faibles et constants. Ainsi, il sera suffisant d'utiliser un cristal sans défaut pour limiter ces pertes. On fera subir à la matière première un examen permettant de déceler toute fissure, inclusion ou impureté et toute irrégularité du réseau cristallin.

3. Pertes de surface

Ce sont les plus importantes. Nous verrons, au chapitre de la fabrication, toutes les précautions nécessaires pour limiter ces pertes.

Tout d'abord, l'usinage du quartz provoque à sa surface une couche perturbée, qui n'est plus monocristalline. On l'élimine par une attaque chimique. Mais, aussi parfaite que soit la surface finalement obtenue, on l'influence à nouveau lors du dépôt des électrodes. La couche métallique qui les constitue, polycristalline, est le siège de frottements internes importants et il faut d'une part lui donner une épaisseur aussi faible que possible et, d'autre part, choisir les métaux et leurs traitements en vue d'obtenir les caractéristiques optimales au point de vue pertes. Enfin, l'air provoque un freinage considérable sur la vibration du quartz. C'est pourquoi les résonateurs de précision sont en général montés dans une ampoule de verre évacuée.

4. Suspension

Bien que la fixation se fasse en principe sur des points nodaux, il se produit des pertes mécaniques

non négligeables par transmission d'énergie entre le résonateur et le support. Une première cause à cela est que même s'il existe un point nodal parfait, le point de fixation n'est pas un point au sens géométrique du mot, mais une petite surface dont tous les points ne sont pas rigoureusement immobiles. De plus, l'anisotropie du quartz entraîne un couplage entre différents mouvements, de sorte qu'il peut ne plus y avoir de point nodal proprement dit, mais simplement une zone de moindre amplitude. Les précautions à prendre pour la suspension sont alors les suivantes :

- a) réduire dans la mesure du possible la surface du point de fixation des fils de connexion, ainsi que le diamètre de ceux-ci ;
- b) si possible, déterminer expérimentalement la zone de moindre amplitude ;
- c) si cela est insuffisant, choisir le diamètre et la longueur des connexions de manière qu'elles résonnent en quart d'onde sur la fréquence de travail et constituent ainsi un isolateur mécanique.

Stabilité à long terme

Il n'est pas suffisant de rechercher une résistance faible, il faut aussi qu'elle soit stable dans le temps, ainsi d'ailleurs que toutes les grandeurs pouvant influencer la fréquence.

Il faut tout d'abord éliminer toute éventualité de modification mécanique. Pour cela, les états de surface devront être aussi parfaits que possible. Des microfissures superficielles peuvent se propager ; des impuretés peuvent se déplacer ; des couches métallisées sur des surfaces insuffisamment préparées peuvent se décoller petit à petit. Dans les électrodes, il peut aussi se produire des phénomènes de diffusion, des tensions internes, des dégazages, etc. Tous ces défauts doivent faire l'objet de précautions particulières lors de la fabrication. Enfin, les suspensions peuvent jouer un rôle dans la stabilité à long terme, en particulier si elles sont le siège de contraintes mécaniques résiduelles ou si les métaux utilisés sont susceptibles de se modifier avec le temps, dans leur structure ou leur composition.

L'atmosphère ambiante peut évidemment jouer un rôle important sur la stabilité des surfaces et c'est pourquoi les quartz sont en général montés dans une enveloppe hermétique qui sera vidée d'air ou remplie d'un gaz protecteur neutre.

Toutefois, même lorsque toutes les précautions ont été prises, la fréquence du quartz présente un certain vieillissement, en général positif, c'est-à-dire qu'elle s'accroît avec le temps. Pour de bons quartz, la pente de vieillissement diminue et se stabilise, après quelques semaines ou quelques mois, à une valeur constante qui peut être inférieure à 10^{-9} par jour (fig. 17).

Influence de l'orientation, coefficient thermique

Du fait de l'anisotropie du quartz, l'orientation d'un résonateur joue un rôle important. Nous avons vu que le module d'élasticité prenait des valeurs diverses, selon la direction considérée. Ceci a pour effet que, si une lame de quartz est soumise à une force, il se produira une réaction modifiant la ligne d'action de cette force. Tout se passe comme si le quartz était composé de

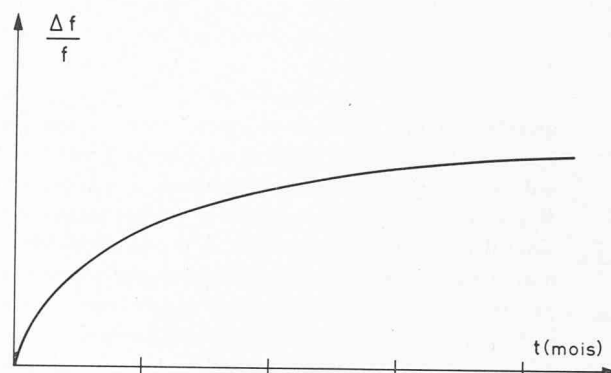


Fig. 17. — Vieillissement du quartz.

feuillet obliques pouvant glisser les uns sur les autres. C'est ce qu'on appelle le couplage mécanique. Il y a aussi un couplage électrique. En effet, un champ électrique pourra toujours se réduire à trois composantes dirigées selon les axes X, Y et Z du quartz. Mais nous avons vu que l'effet d'un champ était différent selon qu'il était parallèle à l'un ou l'autre de ces axes. Il s'ensuit que le choix de l'angle de coupe et de la disposition des électrodes pourra influencer fortement la vibration de l'élément et son comportement.

Ces particularités sont utilisées en premier lieu pour modifier le coefficient thermique du quartz. Grâce à son orientation convenable, on pourra obtenir une compensation partielle entre les coefficients thermiques des diverses variables intervenant dans le coefficient total du résonateur.

Pour les quartz en flexion, en allongement et en cisaillement de surface, ceci conduit en général à une courbe de température telle que celle de la figure 18. C'est une parabole dont on peut déplacer le sommet en agissant sur les rapports dimensionnels du cristal et sur son angle de coupe. On fait en sorte que ce sommet se trouve à la température de travail du quartz, ce qui assure un effet minimum de la température. Dans la figure 18, il s'agit d'un quartz destiné à être utilisé en thermostat.

Application des quartz piézo-électriques

Il n'est pas possible ici de faire un inventaire complet des applications possibles du quartz. Nous nous contenterons d'une énumération sommaire des cas les plus courants.

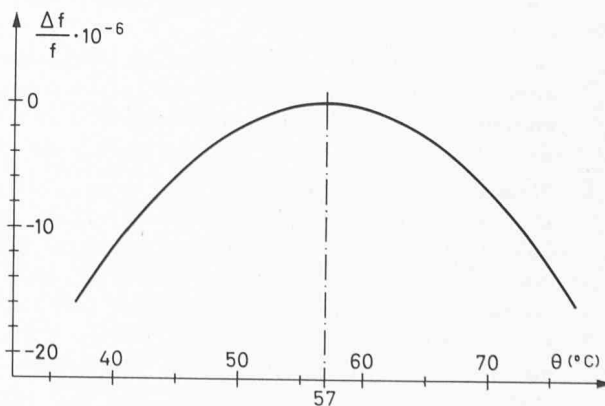


Fig. 18. — Courbe de température d'un quartz à 100 kHz pour thermostat.

1. *Mesure du temps, conservation de l'heure, longitudes*
Pendant longtemps, on s'est basé sur la rotation de la terre ou sur le mouvement des étoiles pour définir le temps. Dès que les premières horloges à quartz ont été mises en service, on s'est aperçu que la rotation de la terre était sujette à des irrégularités, certaines étant périodiques, d'autres non. Il y a donc discordance entre le temps solaire ou sidéral et le temps physique. L'étude de ce phénomène a nécessité des garde-temps extrêmement précis et c'est ainsi que l'on a pu réaliser des horloges à quartz dont la stabilité journalière atteignait 10^{-10} . A l'heure actuelle, on a abandonné le temps astronomique comme étalon primaire au profit du temps atomique ou moléculaire. Dans l'horloge atomique, la fréquence d'un quartz est asservie à celle d'une raie spectrale d'un corps tel que le césium, par exemple.

C'est aussi grâce à un temps précis qu'il est possible de mesurer très exactement les longitudes. En effet, la longitude d'un lieu est déterminée si on connaît l'écart existant entre l'heure locale et l'heure du méridien de référence.

2. *Télécommunications*

L'encombrement des fréquences radio nécessite l'attribution d'une tolérance étroite à la fréquence porteuse d'un émetteur. C'est pourquoi, pratiquement tous les émetteurs sont pilotés par un oscillateur à quartz. Du côté récepteur, il importe que l'accord coïncide parfaitement avec la fréquence d'émission, et l'on a souvent recours à un pilotage à quartz de l'oscillateur local.

En plus du rôle de résonateur actif, le quartz peut aussi travailler comme filtre dans un circuit où il ne laisse passer que la fréquence correspondant à sa résonance. Ceci est de nouveau utilisé en réception pour sélectionner de manière précise une fréquence parmi d'autres, ainsi que dans des systèmes de recherche sans fil de personne et divers ensembles de transmissions d'informations.

En téléphonie, on tend actuellement à remplacer le système traditionnel de transport des communications par câbles à paires multiples au profit du câble coaxial. Dans celui-ci, plusieurs milliers de communications peuvent être acheminées simultanément dans un seul conducteur, chacune étant « portée » par une fréquence différente. A la réception, des filtres à quartz séparent les diverses communications, leur fréquence porteuse permettant de les identifier.

Des principes analogues sont utilisés en télémessure et en télécommande, à la différence que les informations sont le plus souvent transmises sous forme digitale.

3. *Mesures industrielles*

D'après ce qui précède, on aura pu se convaincre qu'il était possible d'atteindre, dans le domaine des temps et des fréquences, des précisions remarquables avec des moyens simples. C'est pourquoi bien des grandeurs physiques ont avantage à être mesurées si possible sous forme de durée ou de fréquence.

Le compteur électronique est un instrument maintenant très répandu, dans lequel un oscillateur à

quartz définit une unité de temps (par exemple, microseconde). La durée ou l'intervalle à mesurer est alors comparé à cette unité et l'on peut déterminer de façon extrêmement précise soit le nombre d'unités de temps composant la durée à mesurer, soit le nombre d'événements qui se sont produits pendant un temps donné. On peut ainsi mesurer des vitesses d'obturation, des durées d'impulsions diverses, faire du chronométrage de précision, déterminer des vitesses linéaires ou de rotation, etc. Un oscillateur à quartz peut aussi piloter un moteur synchrone pour obtenir une vitesse rigoureusement constante (cinéma, enregistrement magnétique) ou engendrer une fréquence constante dans une installation mobile non raccordée au secteur. On peut enfin, par divers artifices, mesurer des températures en mettant à profit le coefficient thermique très précisément connu de certaines coupes de quartz ou mesurer l'épaisseur de couches ultra-minces.

DEUXIÈME PARTIE

Fabrication des résonateurs à quartz

par J.-F. DEMAIRE

Généralités

Jusqu'ici, les ateliers de fabrication de quartz piézo-électriques faisaient appel à des opticiens de précision



Fig. 19. — Vue de l'atelier d'ébauchage.

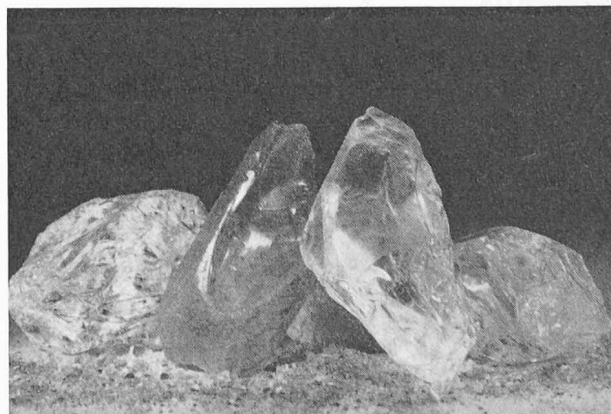


Fig. 20. — Quartz naturels.

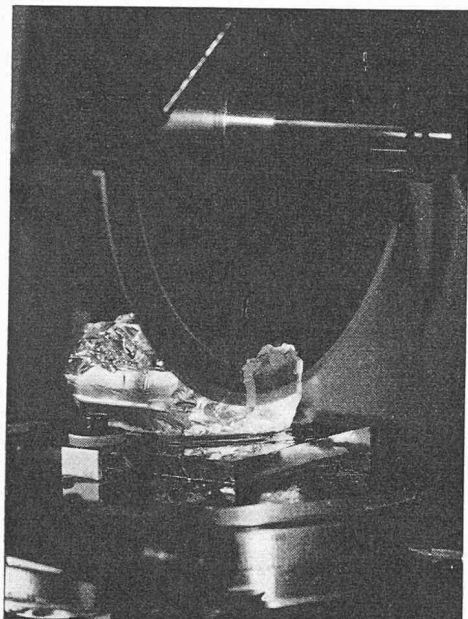


Fig. 21.
Sciage d'un
bloc à la scie
diamantée.

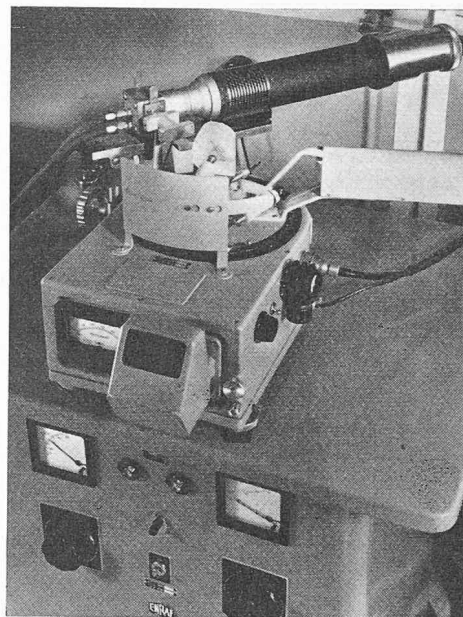


Fig. 23.
Goniomètre à
rayons X.

pour l'usinage des cristaux, les techniques s'apparentant fortement à celles des prismes optiques.

A l'heure actuelle, grâce à l'emploi de machines modernes semi-automatiques pour le tronçonnage et le rodage, un personnel formé sur place, sans spécialisation préalable, peut se charger de la plupart des opérations (fig. 19).

La fabrication des cristaux piézo-électriques se divise en trois parties distinctes :

1. L'ébauchage.
2. La préparation.
3. La finition.

1. L'ébauchage

On utilise des blocs de quartz naturel provenant en général du Brésil (fig. 20). Ils se présentent sous différents aspects, soit avec des faces naturelles, soit éclatés lors de l'extraction, parfois encore roulés lorsqu'ils se trouvent dans le lit d'anciennes rivières. Dans le cas de blocs ne présentant pas de face naturelle, une cuve d'inspection remplie d'un liquide dont l'indice de réfraction est égal à celui du quartz est nécessaire pour déterminer l'axe optique du cristal qui servira de référence lors du taillage.

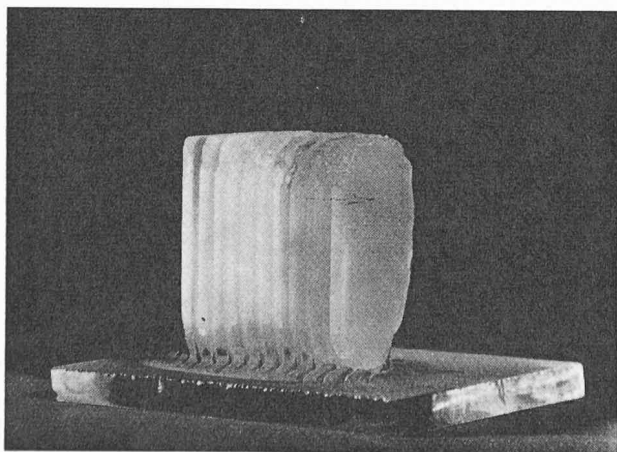


Fig. 22. — Bloc scié en peigne.



Fig. 24.
Rodage au
tour
d'opticien.



Fig. 25.
Collage des
lames.

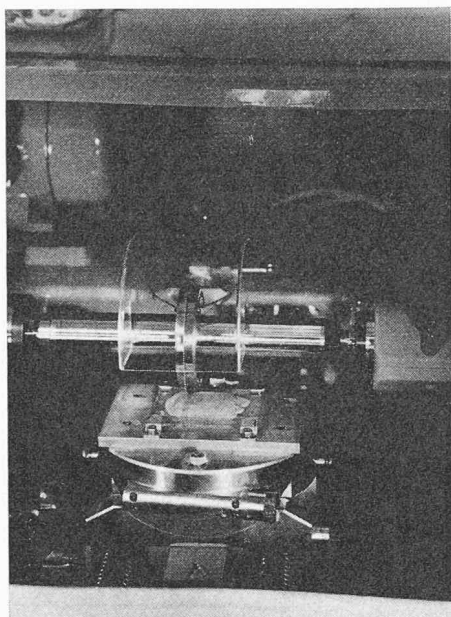


Fig. 26.
Tronçonnage
des barreaux.

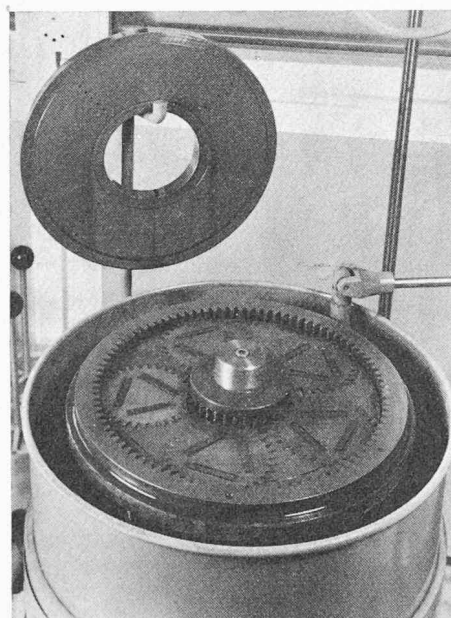


Fig. 27.
Machine à
roder les
surfaces.

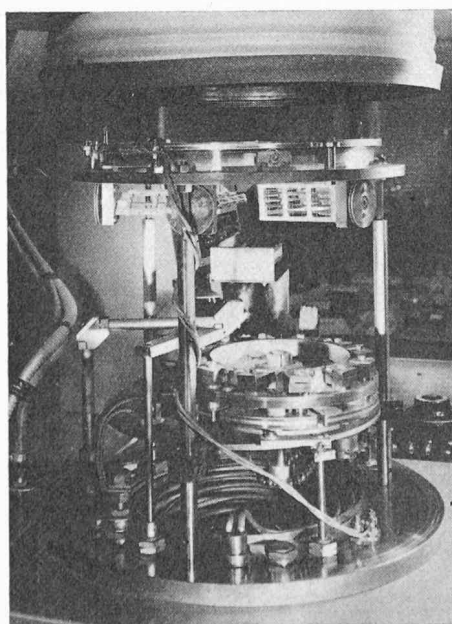


Fig. 28.
Machine à
évaporer sous
vide.

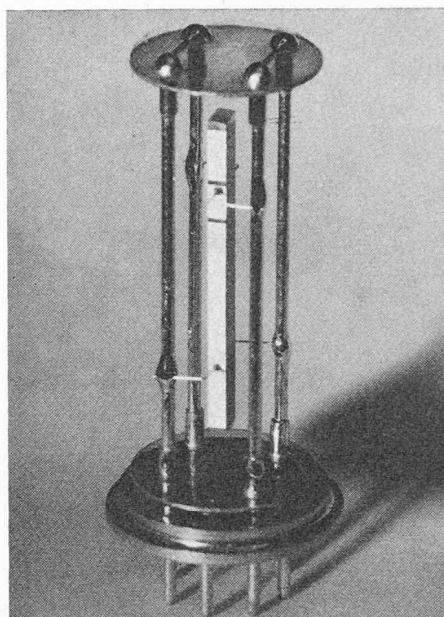


Fig. 30.
Quartz monté
dans sa cage.

Le bloc est alors cimenté sur une plaque de verre et une première lame est coupée à l'aide d'une scie diamantée (fig. 21).

Cette première lame est contrôlée au goniomètre à rayons X afin de déterminer l'exactitude du sciage par rapport à l'angle de coupe choisi. La scie est ensuite réglée définitivement et le bloc est débité en une seule fois, sans contrôle intermédiaire de chaque lame. Cette méthode s'appelle « sciage en peigne » (fig. 22). Elle augmente la rapidité d'usinage en faisant abstraction des petites erreurs d'angle qui peuvent se produire d'une lame à l'autre.

Ces lames sont ensuite décollées et vérifiées sur le goniomètre à rayons X (fig. 23). Si nécessaire, un rodage de correction sera fait au tour d'opticien (fig. 24) pour obtenir l'angle de coupe exact avec une tolérance normale de $\pm 2'$.

L'ébaucheur colle alors ces lames sur des plaques de verre à l'aide d'un ciment résistant aux huiles de coupe (fig. 25) et on effectue le dernier sciage sur une scie à avance automatique (fig. 26), qui effectue un tronçonnage en petits parallélépipèdes rectangles préfigurant la forme définitive des cristaux (cas des quartz flexion).

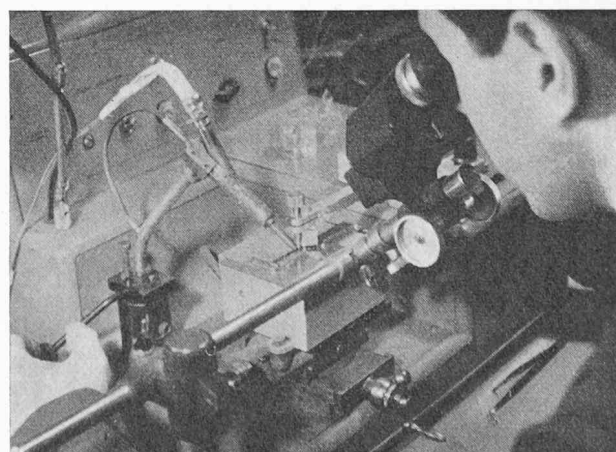


Fig. 29. — Soudure des connexions sur le quartz.

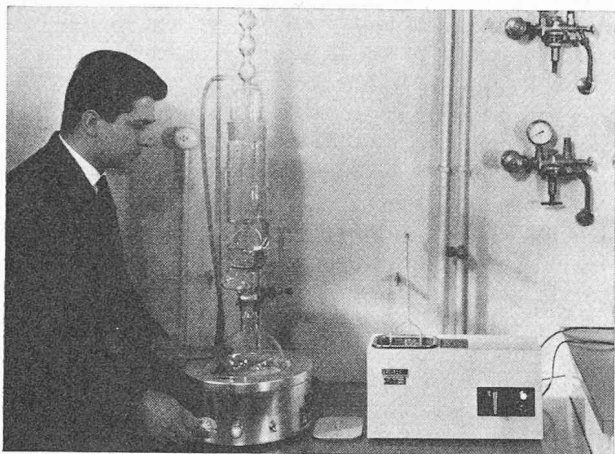


Fig. 31. — Nettoyage des quartz ; à gauche : appareils à distillation continue ; à droite : bac à ultra-sons.

Après décollage et nettoyage, les quartz sont placés dans les alvéoles de satellites d'une machine à roder les surfaces (fig. 27). Cette machine usine deux faces à la fois, grâce à deux plateaux de fonte entre lesquels tournent les porte-objet, ce qui permet d'obtenir une grande précision dans les cotes, la planéité et le parallélisme. Cette opération est la dernière de l'ébauchage.

2. La préparation

Après l'ébauchage, la surface des quartz n'est plus monocristalline, mais consiste en une couche amorphe de quartz concassé par l'usinage. On retire cette couche par une attaque à l'acide fluorhydrique précédée et suivie de nettoyages poussés. Les cristaux sont ensuite placés dans des supports et on procède au dépôt des électrodes dans une machine à métalliser par évaporation sous vide (fig. 28). La couche de métal déposée a une épaisseur de l'ordre de $0,1 \mu$.

Les quatre faces du cristal étant métallisées, il importe de séparer chacune de celles-ci afin de constituer les électrodes voulues. Cette opération se fait en biseautant légèrement les arêtes du quartz à l'aide d'une meule diamantée.

L'opération suivante est la soudure des fils de connexion. Ceux-ci sont de petits clous en bronze phosphoreux munis à leur extrémité d'un globule de soudure calibré. Le quartz est posé sur une table de préchauf-



Fig. 32. — Mise à la fréquence.

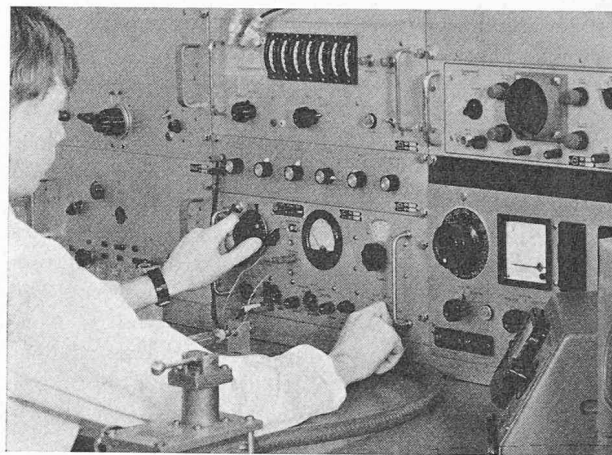


Fig. 33. — Poste de mesure.

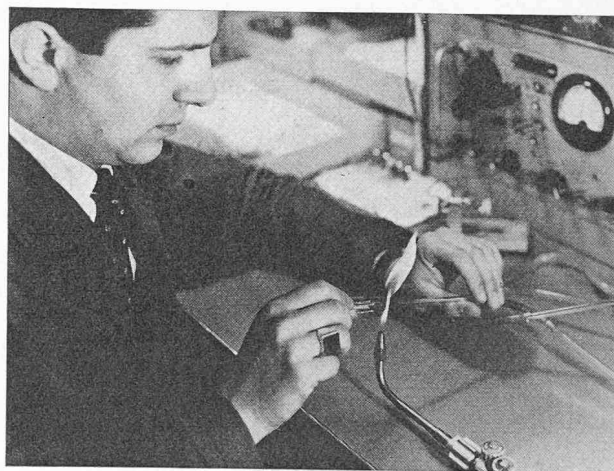


Fig. 34. — Scellement des ampoules.

fage (fig. 29) afin d'éviter un choc thermique au moment de la soudure. Le fil, muni de son globule, est placé à l'endroit précis de la soudure et un jet d'azote chauffé provoque la fusion et joue en même temps le rôle de gaz protecteur.

3. La finition

C'est le dernier stade de la fabrication. Lors de l'ébauchage, la longueur des quartz a été choisie inten-

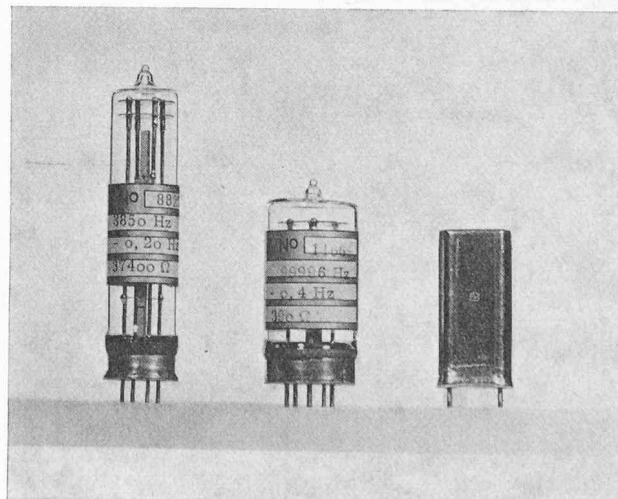


Fig. 35. — Quelques quartz terminés.

tionnellement trop grande, ce qui permet d'effectuer la mise à la fréquence grossière en usant l'extrémité des quartz sur un papier abrasif jusqu'à ce qu'ils soient à environ 1 ‰ au-dessous de leur fréquence nominale.

Les quartz sont alors soudés dans leur support définitif (cage), qui sert à la fois de fixation et d'amenée de courant (fig. 30).

Après un nettoyage poussé, faisant intervenir des ultra-sons et un séjour dans un appareil à distillation continue (fig. 31) permettant d'éliminer toute trace de décapant et toute particule étrangère pouvant se trouver sur les faces du quartz, on procède à l'ajustage définitif de la fréquence. Ceci se fait en polissant les extrémités du barreau à l'aide d'une bande de papier abrasif

très fin (fig. 32). Il faut procéder par légères touches, afin de ne pas dépasser la fréquence prescrite.

Pour les quartz devant travailler sous ampoule évacuée, les dernières mesures se feront sous vide pour être dans les conditions d'utilisation définitive (fig. 33).

Si la mesure est satisfaisante et que le quartz est trouvé dans les tolérances, il est mis sous ampoule. On effectue dans celle-ci un vide poussé et on la scelle à la flamme (fig. 34).

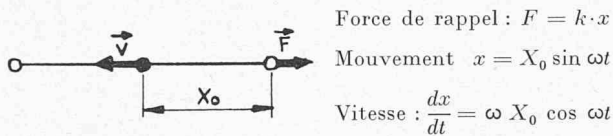
Après quelques jours de stockage, on procède à un nouveau contrôle avant livraison.

La figure 35 montre quelques exemples de quartz terminés en ampoule de verre évacuée et sous capot métallique en atmosphère neutre.

APPENDICE

Oscillations sans pertes, mécaniques et électriques

a) POINT MATÉRIEL

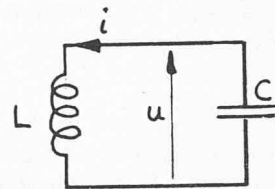


Energie potentielle

$$E_{\text{pot}} = \int F \cdot dx = k \int x \cdot dx = k \omega X_0^2 \int \sin \omega t \cos \omega t dt$$

$$E_{\text{pot}} = \frac{k \cdot X_0^2}{2} \sin^2 \omega t.$$

b) CIRCUIT OSCILLANT



$$\text{Tension : } u = \frac{1}{C} \cdot q$$

$$\text{Charge : } q = Q_0 \sin \omega t$$

$$\text{Courant : } \frac{dq}{dt} = \omega Q_0 \cos \omega t$$

Energie potentielle

$$E_{\text{pot}} = \int u \cdot dq = \frac{1}{C} \int q \cdot dq = \frac{\omega Q_0^2}{C} \int \sin \omega t \cos \omega t dt$$

$$E_{\text{pot}} = \frac{Q_0^2}{2C} \sin^2 \omega t.$$

Cette énergie passe par un maximum à chaque demi-alternance :

$$E_{\text{max}} = \frac{k X_0^2}{2}$$

Energie cinétique

$$E_{\text{cin}} = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{m \omega^2 X_0^2}{2} \cos^2 \omega t$$

Energie totale

$$E = \frac{k X_0^2}{2} \sin^2 \omega t + \frac{m \omega^2 X_0^2}{2} \cos^2 \omega t = \text{cste.}$$

$$\frac{d(E)}{dt} = 0 \quad \text{d'où} \quad \frac{k X_0^2}{2} - \frac{m \omega^2 X_0^2}{2} = 0$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$E_{\text{max}} = \frac{C U_0^2}{2}$$

Energie cinétique

$$E_{\text{cin}} = \frac{L \cdot i^2}{2} = \frac{L \omega^2 C^2 U_0^2}{2} \cos^2 \omega t$$

Energie totale

$$E = \frac{C U_0^2}{2} \sin^2 \omega t + \frac{L \omega^2 C^2 U_0^2}{2} \cos^2 \omega t = \text{cste.}$$

$$\frac{d(E)}{dt} = 0 \quad \text{d'où} \quad \frac{C U_0^2}{2} - \frac{L \omega^2 C^2 U_0^2}{2} = 0$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$