

50376  
1960  
34

UNIVERSITÉ DE LILLE

50376  
1960  
34

Faculté des Sciences de Lille

**DIPLOME D'ÉTUDES SUPÉRIEURES**  
**de Sciences Physiques**



**CONSTRUCTION D'UN APPAREIL DE MESURE**  
**DES COEFFICIENTS DE QUALITÉ DES QUARTZ**

COMMISSION D'EXAMEN :

*Président :* M. ROIG

*Examineurs :* M. PEREZ

M. WERTHEIMER

**Soutenu à Lille en Mai 1960**

**par Guy CABARET**

Le sujet a été effectué sous la direction de Monsieur PEREZ, dans les Laboratoires de la Faculté des Sciences Physiques de Lille.

Je remercie Messieurs ROIG, PEREZ et WERTHEIMER de la bienveillance avec laquelle ils ont suivi ce travail et accepté de former le jury.

Je remercie également tous les Professeurs de l'Institut de Physique et d'Electronique de Lille, ainsi que tout le personnel du Laboratoire, pour l'aide qu'ils ont apportée au cours de ce diplôme.

## I N T R O D U C T I O N

---

Au cours de ces pages, nous définissons et étudions le coefficient de qualité des cristaux de quartz.

L'appareil construit permet une mesure rapide de ce coefficient par l'étude d'une figure à l'oscillographe.

Pour contrôler cette méthode, les mêmes échantillons ont été, par ailleurs, étudiés par une autre méthode, plus longue et plus précise (méthode de la crevasse).

## CHAPITRE I

### GENERALITES

---

Le quartz est de la silice ( $\text{SiO}_2$ ) cristallisée dans le système rhomboédrique. Les monocristaux naturels peuvent atteindre des dimensions très importantes. L'axe d'ordre trois et l'axe optique Oz ; trois axes linéaires joignent les arêtes opposées et ces axes ont une polarité électrique que l'on peut relier à l'apparition des troncatures du polyèdre. La configuration macroscopique ressemble à celle du réseau cristallin (Fig. 1). Nous voyons, d'une part, un cristal et d'autre part, un aspect du réseau cristallin tridimensionnel d'un quartz gauche.

Ce schéma nous fait comprendre la propriété d'activité rotatoire optique. En même temps que la polarité des axes électriques, il va nous permettre d'interpréter le phénomène de piézoélectricité.

Si nous considérons un plan perpendiculaire à l'axe optique, en simplifiant la représentation (Fig. 2), nous avons à chaque sommet de l'hexagone, trois atomes de silicium porteurs de charges positives et



- 3 -

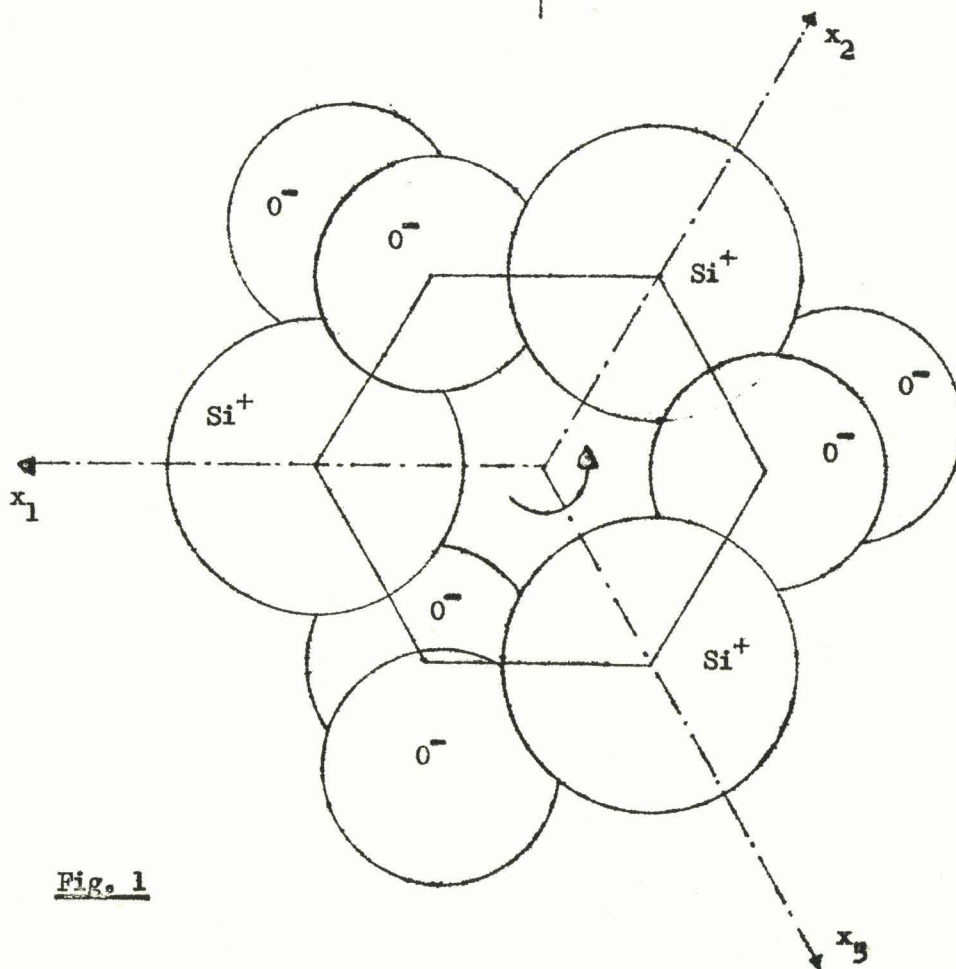
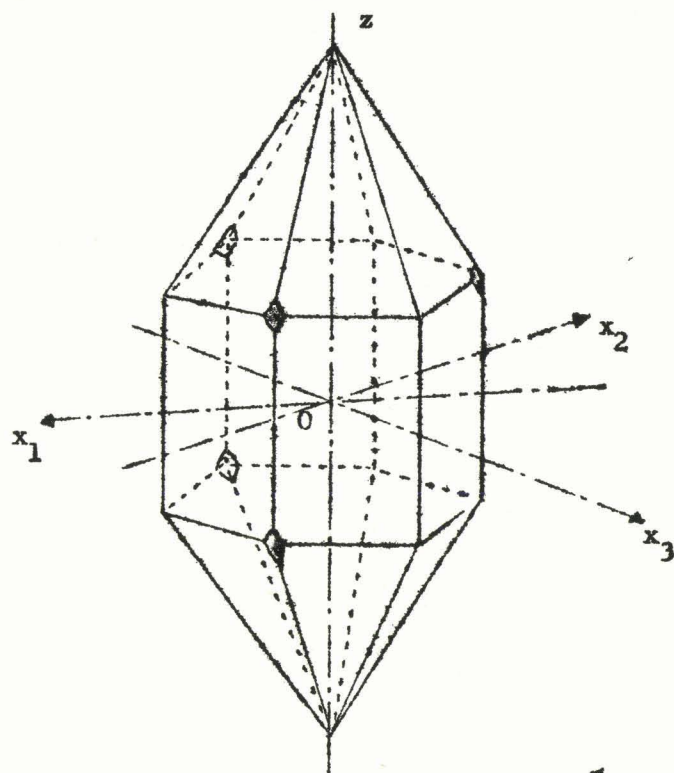


Fig. 1

trois atomes d'oxygène porteurs de charges négatives. Au repos, l'ensemble est électriquement neutre.

Une force suivant l'axe optique est d'effet nul car elle conserve la symétrie de la répartition des charges. Au contraire, une pression suivant  $Ox$  provoque l'apparition d'une polarisation électrique car les centres de gravité ( $G_-$  et  $G_+$ ) des charges positives et négatives ne coïncident plus.

C'est l'effet piézoélectrique direct qui peut encore être provoqué par une pression suivant  $Oy$ , perpendiculaire à  $Ox$ . La polarisation est contraire à la précédente (Fig. 2).

Ce phénomène a été découvert par Pierre et Jacques Curie, en 1880. Une lame de quartz, taillée perpendiculairement à l'un des axes électriques, se polarise si on agit mécaniquement sur son épaisseur. Les charges qui se développent sont telles que :

$$q = Kp \qquad q : \text{Cb/m}^2$$
$$K. \text{Cte de Curie } 2,12 \cdot 10^{-12} \text{ Cb/N} \qquad p : \text{Pascal}$$

D'autre part, les phénomènes électromagnétiques sont réversibles, ce qui laisse prévoir un effet piézoélectrique inverse : c'est la déformation d'un cristal soumis à l'effet d'un champ électrique. Lipman a prévu ce phénomène en 1881 par des considérations thermodynamiques et la vérification expérimentale fut réalisée l'année suivante par les frères Curie.

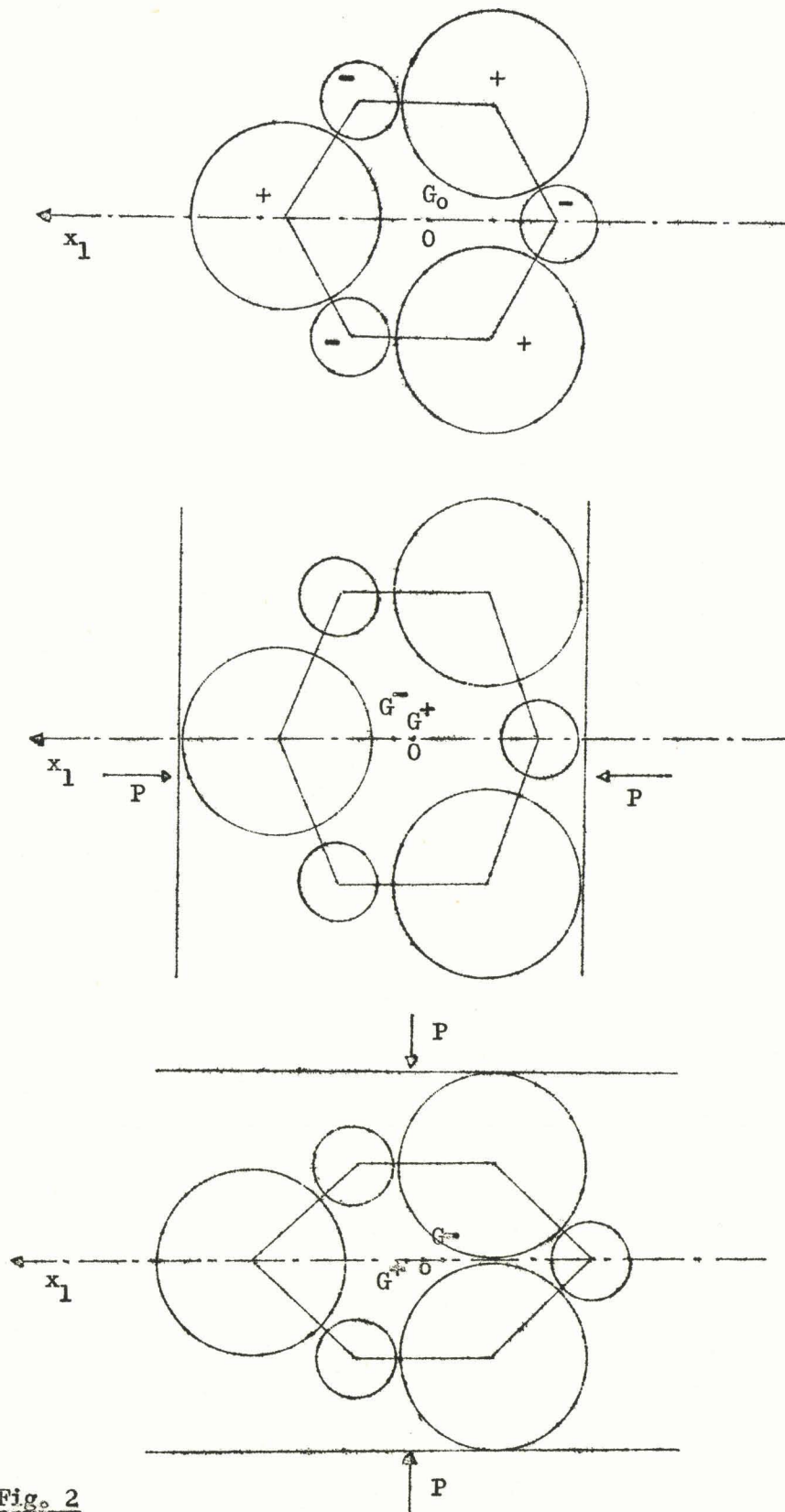


Fig. 2

En considérant la Figure 2, nous voyons que l'action d'un champ électrique produit les déformations du cristal en exerçant sur les porteurs de charges (Si et O) des forces opposées.

$$\frac{\Delta a}{a} = K E$$

E : champ électrique

$$\Delta a = K V$$

$\frac{\Delta a}{a}$  : variation relative

Pour une tension  $V = 300$  volts,  $\Delta a = 6,36 \text{ \AA}$ , variation faible de l'épaisseur, qui montre la difficulté de l'étude de cet effet. La formule reste valable jusqu'à  $V = 3.000$  volts.

#### Constante de Curie

L'étude expérimentale de l'effet piézoélectrique (piézomètre et électromètre) (Fig. 3) montre que K n'est constante qu'en moyenne - moyenne étendue à une surface supérieure à un centimètre carré et à un grand nombre d'échantillons.

Une étude locale permet de constater que cette constante varie quelquefois dans un rapport de 1 à 10. Il y a même des inversions de polarisation dues au maclage des cristaux qui ne peut être décelable par des moyens optiques.

De nombreux cristaux sont piézoélectriques. Les principaux sont :

|                                      |   |                       |      |
|--------------------------------------|---|-----------------------|------|
| le quartz                            | K | $2,12 \cdot 10^{-12}$ | Cb/N |
| la tourmaline                        |   | $1,93 \cdot 10^{-12}$ |      |
| le sel de seignette                  |   | $330 \cdot 10^{-12}$  |      |
| le phosphate d'ammonium              |   | $50 \cdot 10^{-12}$   |      |
| et de nombreux cristaux synthétiques |   |                       |      |



Piézomètre (1)

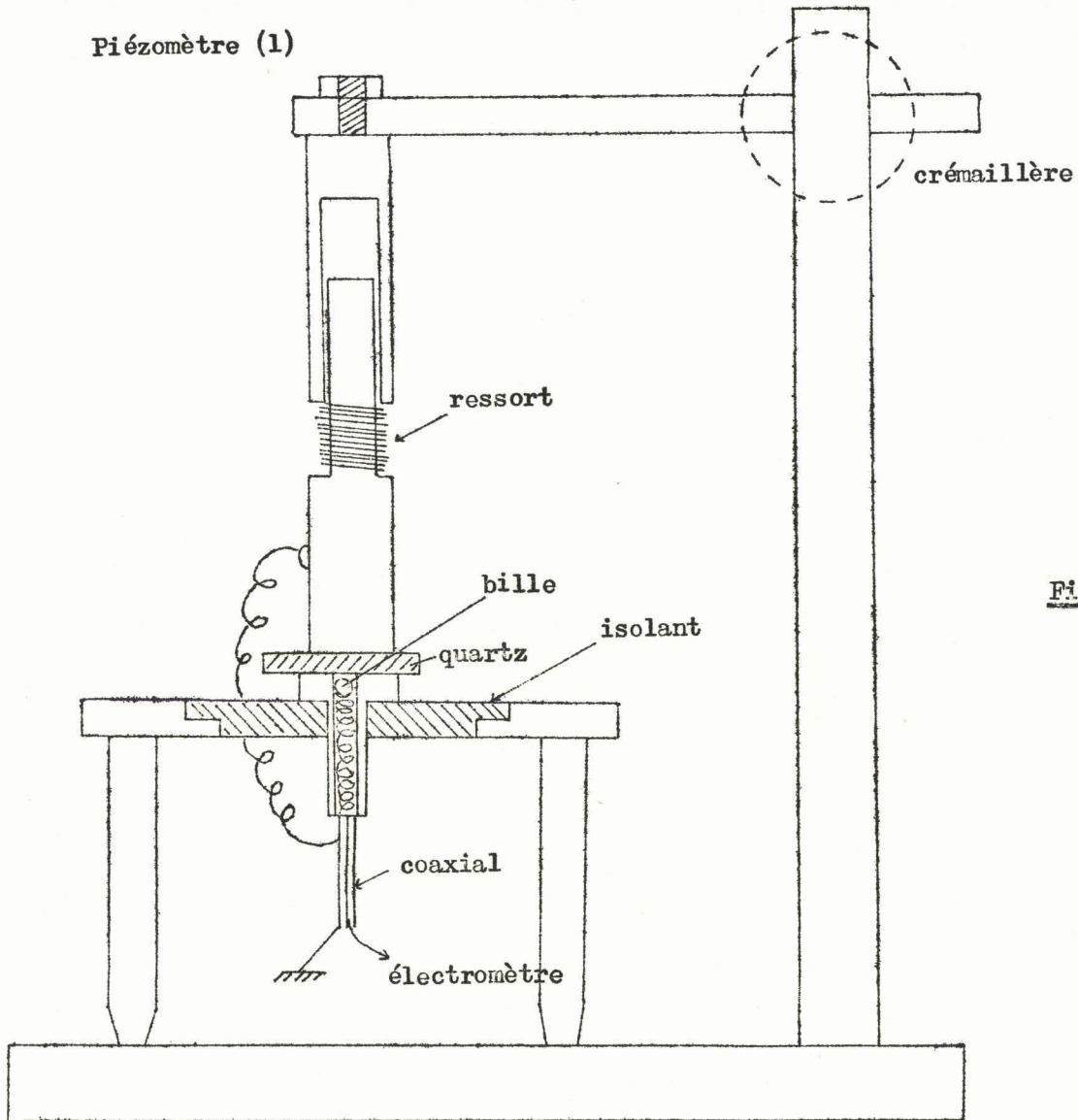
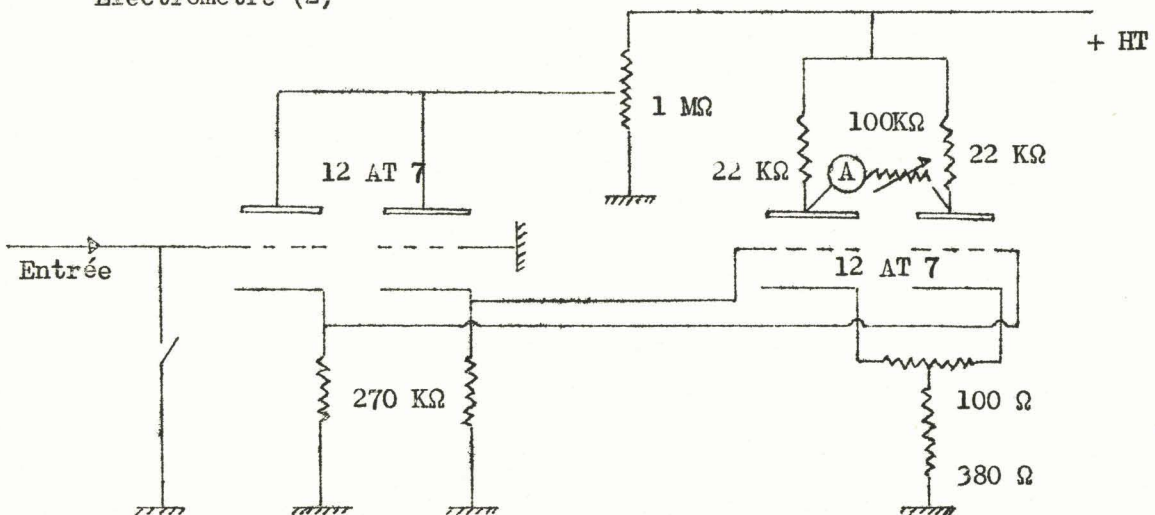


Fig. 3



Electromètre (2)



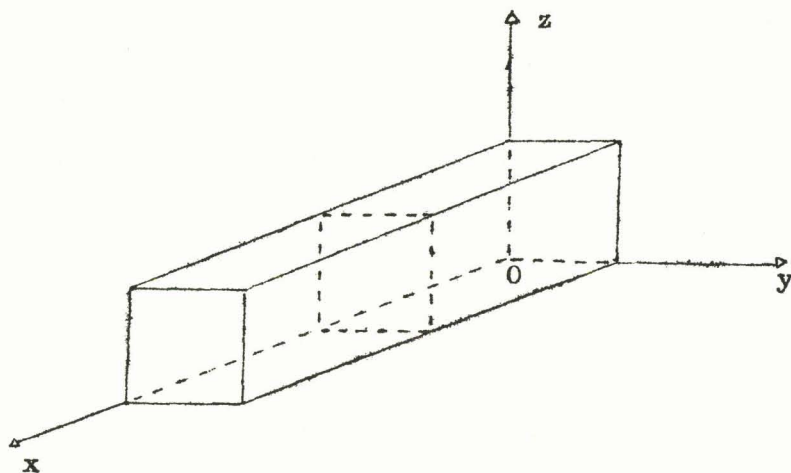


Les applications de cet effet piézoélectrique sont nombreuses, en particulier tout ce qui concerne les transformations électriques - mécaniques et inverses -, les oscillateurs, les filtres de haute qualité, les mesures de pression, la production des ultrasons.

Le plus utilisé des cristaux est le quartz, car c'est le moins fragile ( $K$  cependant est assez faible). Toutes les applications exigent une connaissance approfondie de ses propriétés. Généralement, les quartz de bonne qualité optique sont aussi de bonne qualité piézoélectrique, mais la pureté optique n'est cependant pas suffisante. La détermination du coefficient de qualité est un renseignement précis, déterminant lors du choix d'un quartz pour telle ou telle utilisation électrique. C'est la détermination de ce coefficient que nous allons envisager dans les chapitres suivants.

CHAPITRE II  
QUARTZ OSCILLANT. CIRCUIT EQUIVALENT

---



Considérons un barreau de quartz de un  $\text{cm}^2$  de section et de longueur  $x$ , suivant l'axe électrique  $Ox$ . Nous nous proposons d'étudier une onde se propageant suivant  $Ox$  lorsque l'on applique une tension  $V$  de fréquence voisine de celle du barreau.

Soit  $P(x, y, z)$  à  $\frac{x}{2}$  de l'origine  $O$  ;  $u$  la composante du vecteur déplacement suivant  $Ox$  au point  $P$ .

Au point P ( $x + dx$ ,  $y$   $z$ ), le vecteur est  $u + du$ . La variation de  $u$  par unité de longueur est :

$$\frac{du}{dx} = \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_t$$

Si  $E$  est le module de Young suivant la direction  $x$ , la loi de Hooke nous donne :

$$F_x = E \frac{\partial u}{\partial x}$$

Au point P ( $x + dx$ ,  $y$   $z$ ), nous avons  $F_x + dF$

$$\text{et } dF = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx$$

D'après la relation fondamentale de la dynamique :

$$F = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \text{ (si } \rho \text{ est la masse volumique du quartz)}$$

$$dF = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dx = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

C'est le cas particulier de la propagation d'une onde de d'Alembert, non compte tenu des différents amortissements. Sa vitesse est :

$$v = \left( \frac{E}{\rho} \right)^{1/2}$$

#### Fréquence d'oscillation du quartz

Pour une lame d'épaisseur  $x$ , la fréquence  $f$  du  $n^{\text{ième}}$  harmonique est définie par :

$$x = n \frac{\lambda}{2}$$

$$\lambda = v T = \frac{v}{f}$$

$$x = n \frac{v}{2f}$$

$$xf = \frac{n}{2} \left( \frac{E}{\rho} \right)^{1/2}$$

$$f = \frac{2905 \, n}{x}$$

$$v = \left( \frac{E}{\rho} \right)^{1/2}$$

$$E = 8,55 \cdot 10^{10} \, \text{N/m}^2$$

$$\rho = 2,654 \cdot 10^4 \, \text{kg/m}^3$$

Les mesures directes fournissent un coefficient un peutdifférent :

$$f = \frac{2870 \, n}{x}$$

(KHz) (mm)

La longueur d'onde correspondante est :

$$\lambda = \frac{104,5}{n} \, \text{a}$$

(m) (mm)

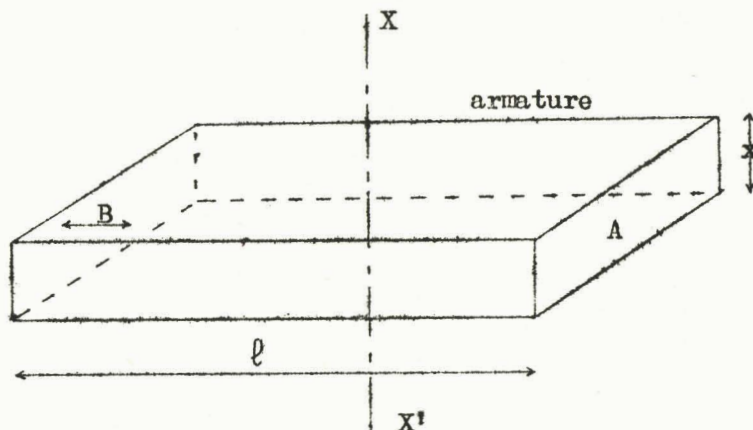
Ref. (3)

Pour une lame de 1 mm d'épaisseur :  $f = 2,87 \, \text{KHz}$  et  $\lambda = 104,5 \, \text{m}$ .  
Aux basses fréquences, les armatures sont placées perpendiculairement à  $XX'$ .

En général, il y a couplage de ces vibrations parallèles à cet axe avec des vibrations perpendiculaires : les faces A et B vibrent et peuvent être utilisées comme source dont la fréquence pour l'harmonique n est :

$$f = \frac{2730}{\ell} \, n$$

(KHz) (mm)





La gamme des fréquences obtenues avec les quartz est très étendue :

pour  $x = 0,4 \text{ mm}$

$f = 6,8 \text{ MHz}$

$x = 10 \text{ cm}$

$f = 27 \text{ KHz}$

### Circuit équivalent du quartz

"Un système mécanique, capable d'osciller lorsqu'il est couplé à un circuit électrique (dont la source de tension est sinusoïdale), est équivalent à une self, une capacité et une résistance en série..."

(Butterworth)

Il en est de même pour un quartz.

La charge d'un condensateur  $C_0$ , dont les armatures sont à une différence de potentiel  $V$  est :  $q = C_0 V$ ; si le diélectrique est en quartz, il faut fournir une charge supplémentaire pour compenser l'effet piézoélectrique :  $q = C_0 V + q_1$  ( $q_1 = Kp$ ).

Si la différence de potentiel est sinusoïdale :

$$i = \frac{dq}{dt} = C_0 \frac{dv}{dt} + \frac{dq_1}{dt} = i_0 + i_1$$

Nous avons donc deux circuits en parallèle, contenant une capacité fixe  $C_0$  et une capacité à diélectrique déformable.

L'équation du mouvement d'un point du barreau est connue (d'Alembert) non compte tenu des amortissements.

Ceux-ci sont dus aux frottements internes, aux supports, à la condensation et à la raréfaction de l'air aux extrémités du barreau. On admet que les forces d'amortissement sont proportionnelles à la vitesse.



Les oscillations sont produites par une force de la forme :

$$F = Av \quad (v \text{ fonction sinusoïdale}).$$

L'équation du mouvement amorti d'élongation  $u$  est de la forme :

$$M \frac{d^2 u}{dt^2} + N \frac{du}{dt} + Pu = Av$$

D'autre part,  $q_1$  est proportionnelle à la déformation (lois de Curie) :

$$q_1 = Bu$$

$$i_1 = \frac{dq_1}{dt} = B \frac{du}{dt}$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{i_1}{B}$$

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{di_1}{dt} \frac{1}{B}$$

$$\frac{d^3 u}{dt^3} = d^2 \frac{i_1}{dt} \frac{1}{B}$$

$$M \frac{d^3 u}{dt^3} + N \frac{d^2 u}{dt^2} + P \frac{du}{dt} = A \frac{dv}{dt}$$

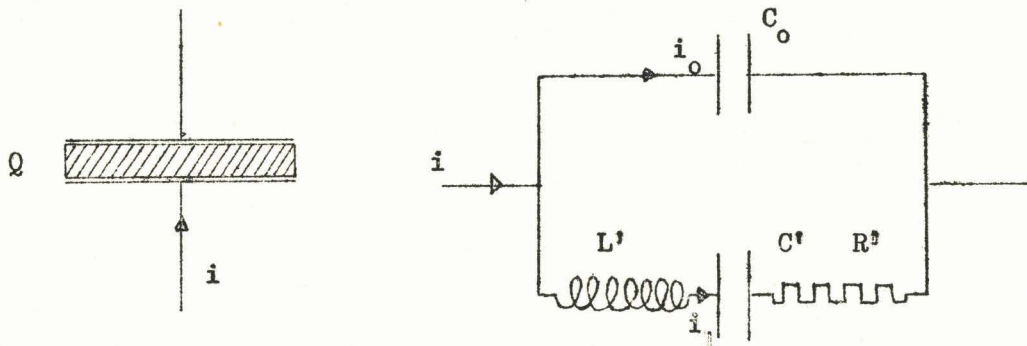
D'où :

$$\frac{M}{A B} \frac{d^2 i_1}{dt^2} + \frac{N}{A B} \frac{di_1}{dt} + \frac{P}{A B} i_1 = \frac{dv}{dt}$$

Equation comparable à celle d'un circuit  $R'L'C'$  :

$$L' \frac{d^2 i_1}{dt^2} + R' \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C'} i_1 = \frac{dv}{dt}$$

Par comparaison, on en déduit les valeurs de  $L'R'C'$ .



### Facteur de qualité : amortissement

Le facteur de qualité, de surtension ou de sélectivité donne une idée des pertes d'énergie d'un système oscillant. On définit  $Q$  comme suit :

$$Q = 2 \pi \frac{\text{énergie totale accumulée dans le système}}{\text{énergie perdue dans un cycle d'oscillation}}$$

$$Q = \frac{2 \pi f}{f} \frac{E_t}{E_p} = \frac{\omega E_t}{\text{puissance moyenne perdue}}$$

$$Q = \omega_0 \frac{W}{\frac{dW}{dt}}$$

L'amplitude des oscillations amorties du quartz est de la forme :

$$A = A_0 e^{-t/\tau} \quad W = A^2 = A_0^2 e^{-2t/\tau}$$

$$\frac{\omega_0}{Q} = -\frac{1}{W} \frac{dW}{dt} = \frac{2}{\tau}$$

$$Q = \frac{\omega_0 \tau}{2} = \pi f \tau$$

On définit également l'angle de perte  $\varphi = \frac{1}{Q}$ .

### Analyse de l'amortissement

L'équation caractéristique est  $L^2 \alpha^2 + R^2 \alpha + \frac{1}{C^2} = 0$ .

$$\alpha = -\frac{R^2}{2L^2} \pm j \left( \frac{1}{L^2 C^2} \right)^{1/2} \left( 1 - \frac{C^2 R^2}{4L^2} \right)^{1/2}$$

Généralement, nous avons des oscillations amorties :

$$CR^2 \ll 4L$$

$$\alpha = -\frac{R^2}{2L^2} \pm j \left( \frac{1}{L^2 C^2} \right)^{1/2}$$

$$\tau = \frac{2L^2}{R^2} \quad \text{et} \quad \omega = \frac{1}{(L^2 C^2)^{1/2}}$$

Or : 
$$Q = \pi f \tau = \frac{\omega \tau}{2} = \left( \frac{L^*}{C^*} \right)^{1/2} \frac{1}{R^*}$$

En reprenant les valeurs de  $R^* C^* L^*$  :  $Q = \frac{(P M)^{1/2}}{N}$ . Nous voyons, d'après la signification de ces coefficients que  $Q$  ne dépend pas des dimensions du cristal (utilisation de petits grains) mais uniquement de l'orientation du cristal ; ceci est dû à la variation du module piézoélectrique et de la compliance avec la direction.

L'amortissement est dû à trois sortes de phénomènes : le travail produit contre le milieu extérieur, l'énergie dissipée par le support et les frottements internes. Les énergies dissipées sont  $W_1, W_2, W_3$ .

$$\frac{2 \pi}{Q} = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{W} \quad \text{et} \quad \frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} + \frac{1}{Q_3}$$

en posant  $\frac{2 \pi}{Q_1} = \frac{W_1}{W} \dots \dots \text{etc, le}$

$$\delta = \frac{\pi}{Q}$$

$$= \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$$

Ordre de grandeur : pour un quartz de 1 mm environ, qui vibre selon son épaisseur :

$$Q_3 = 65.000$$

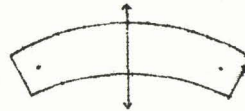
$$Q_2 \neq 1$$

$$Q_1 = 27.000$$

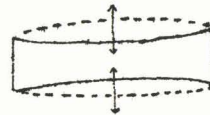
En général, l'amortissement dû au support reste négligeable. Celui de l'air est souvent important, ce qui justifie l'intérêt de monter les quartz sous vide.

L'amortissement dépend également du mode de vibration des quartz : ces modes de vibration sont favorisés pour certaines coupes du cristal et la fréquence propre varie avec les coupes.

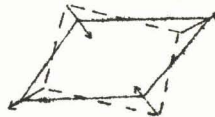
Vibrations de flexion



Vibrations transversales



vibrations de cisaillement



L'amortissement est, en première approximation, indépendant de l'harmonique, ce qui nous montre que le coefficient de qualité sera différent.

$$\text{Pour un cristal : } Q = \pi f \tau = \frac{L}{R} \omega .$$

Si  $L$  et  $R$  sont indépendants de la fréquence, nous voyons que le coefficient de l'harmonique  $n$  sera :  $Q_n = n Q_1$ .

### CHAPITRE III

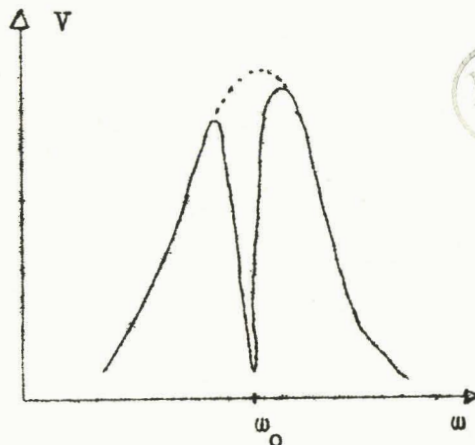
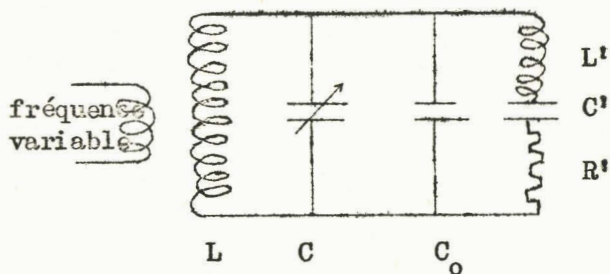
#### METHODE DE MESURE DITE DE LA "CREVASSE"

---

Avant d'étudier la méthode qui nous intéresse, il est nécessaire de rappeler une méthode ancienne mais sûre afin de comparer les résultats obtenus par l'une et l'autre.

La courbe de résonance  $V$  en fonction de  $\omega$  présente une crevasse profonde et étroite qui correspond à la fréquence mécanique du quartz.

#### Etude de la résonance





Considérons le circuit ci-dessus, comprenant une self L couplée inductivement, une capacité C et un quartz ( $C_0 C' L' R'$ ). Si  $\omega_0$  est la pulsation propre du quartz, à la résonance de celui-ci, LC n'est shunté que par  $R'$ .

$$(1) \quad L (C + C_0) \omega_0^2 = 1$$

$$(2) \quad L' C' \omega_0^2 = 1$$

En enlevant le quartz, on peut avoir  $\omega_0$  tel que :

$$(3) \quad LC_1 \omega_0^2 = 1$$

d'où :  $C_0 = C_1 - C$

#### Calcul de l'impédance

Si  $\omega_1$  et  $\omega_2$ , pulsations de résonance et d'antirésonance, sont proches de  $\omega_0$ , on peut négliger les résistances dans les calculs de l'impédance :

$$Z = j L \omega + \frac{1}{j \left[ (C + C_0) \omega - \frac{1}{L' \omega - \frac{1}{C' \omega}} \right]}$$

$$Z = L \omega - \frac{L' C' \omega^2 - 1}{(C + C_0) \omega (L' C' \omega^2 - 1) - C' \omega}$$

$$Z = \frac{L \omega \left[ (C + C_0) \omega (L' C' \omega^2 - 1) - C' \omega \right] - (L' C' \omega^2 - 1)}{\omega (L' C' \omega^2 - 1) (C + C_0) - C' \omega}$$

Nous obtenons  $\omega_1$  et  $\omega_2$  (résonance et antirésonance) pour  $Z = 0$ . Soit

$$L \omega \left[ (C + C_0) \omega (L' C' \omega^2 - 1) - C' \omega \right] = L' C' \omega^2 - 1$$

Or :  $L' C' = L (C + C_0) = \frac{1}{\omega_0^2}$  d'après (1) et (2)

$$\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \left[ \frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1 - \frac{C^2}{C + C_0} \right] = \frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1$$

$$\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1 = \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{L}{L^2}$$

$$\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} = \pm \left( \frac{L}{L^2} \right)^{1/2} = \pm \left( \frac{C}{C_1} \right)^{1/2}$$

$$\frac{2 \Delta \omega}{\omega_0} = \pm \left( \frac{L}{L^2} \right)^{1/2}$$

Soit, finalement,  $L^2 = L \left( \frac{f_0}{\Delta f} \right)^2$  et  $C^2 = C_1 \left( \frac{\Delta f}{f_0} \right)^2$  et  $Q = \frac{L^2 \omega}{R^2}$  après avoir mesuré  $R^2$  à la résonance.

#### Résultats obtenus pour un quartz de 306 KHz

Choix de C pour obtenir deux maxima à peu près identiques :

$$C = 199,1 \text{ pF}$$

$$f_0 = 306,2 \text{ kHz}$$

$$f_1 = 305,6 \text{ kHz}$$

$$f_2 = 307,1 \text{ kHz}$$

$$C_1 = 212 \text{ pF}$$

D'où :

$$C_0 = 12,9 \text{ pF}$$

Remarque : Les fréquences  $f_1$  et  $f_2$  sont mesurées par double battement (Cf. T.P. Electronique).

$$L^2 = 51,5 \text{ H}$$

$$C^2 = 90052 \text{ pF}$$

$$R^2 = 4500 \Omega$$

D'où la mesure de

$$Q = 22.000$$

Nous aurons, par la suite, l'occasion de comparer ce résultat et la méthode avec ce qui suit.

## CHAPITRE IV

### REALISATION DE L'APPAREIL. FONCTIONNEMENT.

#### METHODES DE MESURES. (4)

---

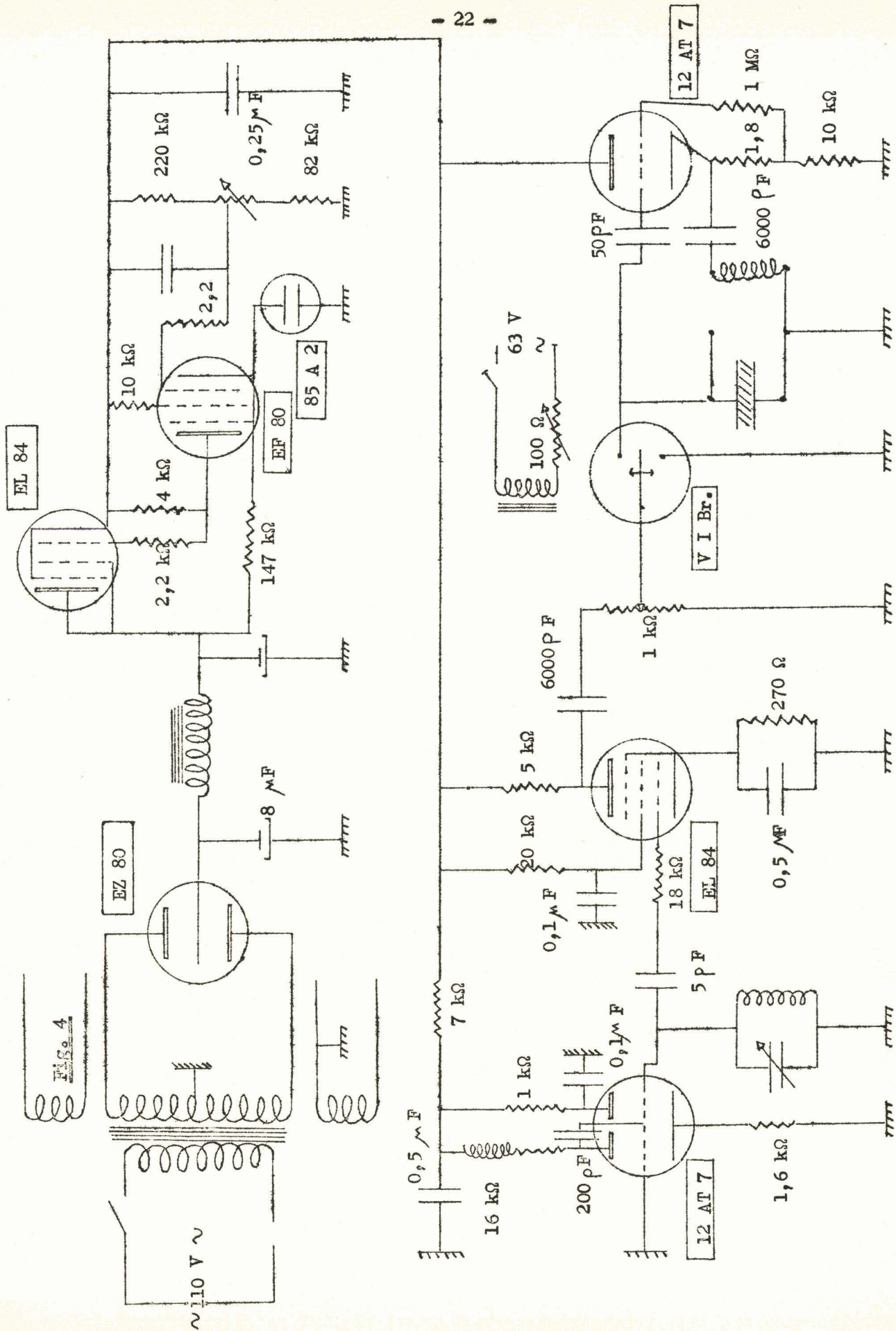
#### Principe

Un oscillateur Franklin, suivi d'une pentode, met en oscillation forcée un cristal sur sa fréquence de résonance. On interrompt l'excitation et, pendant l'interruption, nous étudions le retour au repos du quartz, sous forme d'oscillation libre amortie.

#### Alimentation

Elle est constituée d'un transformateur dont le primaire est alimenté par le secteur ; le secondaire comporte un enroulement 6,3 v pour l'alimentation de la diode redresseuse et un enroulement pour l'alimentation (chauffage) des différents tubes. L'enroulement principal nous donne deux fois 350 volts.

La double diode redresseuse est une (EZ80). Elle est suivie d'un filtre en  $\pi$ . Enfin, la tension est stabilisée par un montage à





centre réaction composé d'une (EL 84), une (EF 80) et un néon stabilisateur (Fig. 4).

#### L'oscillateur

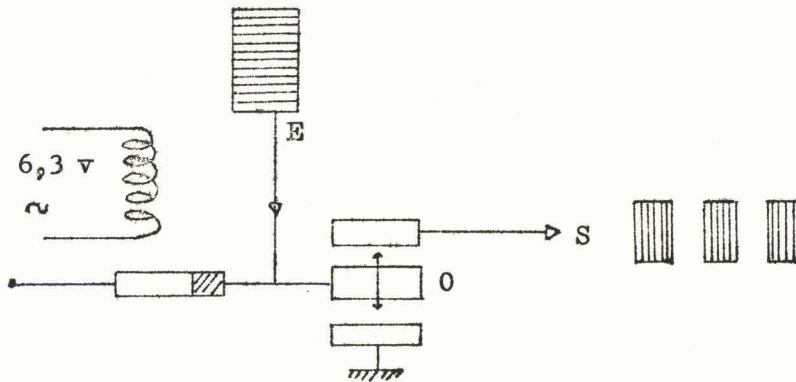
Il est du type Franklin dû à Létienne. Il est constitué d'une double triode (12 AT 7). Le CO est sur la grille du tube I, la grille de II est à la masse, les deux triodes sont liées cathodiquement et la réaction est transmise par capacité de la plaque de II sur la grille de I (Fig. 4).

La stabilité de cet oscillateur est excellente et l'amplitude grande sur une large étendue, le taux d'harmonique est faible et la fréquence est indépendante de la charge du CO.

Pour éviter les perturbations dues à cette charge de l'oscillateur, on amplifie le signal à l'aide d'une pentode qui nous permet d'obtenir un signal plus puissant par la même occasion.

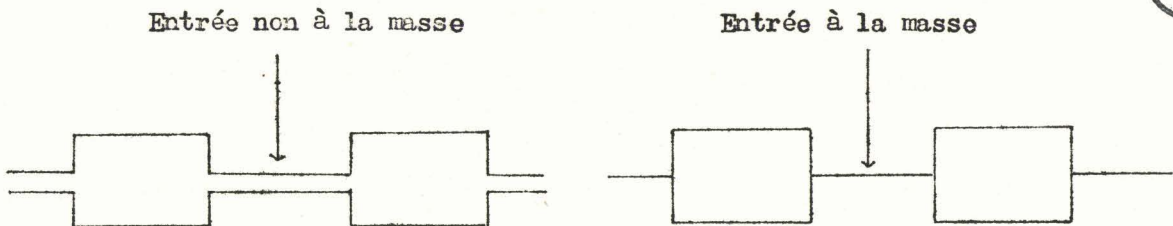
#### Excitation interrompue

L'excitation du quartz est interrompue à une fréquence suffisante pour que l'oscillation libre qu'il effectue entre deux excitations puisse être observée à l'oscillographe cathodique. On utilise, pour cela, un vibreur mécanique, alimenté par du 6 volts alternatif ; nous avons donc 100 interruptions par seconde. L'avantage de cette alimentation est d'avoir une bonne stabilité, d'éviter les étincelles de ruptures et de pouvoir synchroniser avec l'oscillographe.



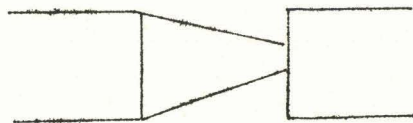
Pendant une interruption

La borne d'entrée du signal HF est à la masse.



La rupture de contact entre l'excitation et la mise à la masse n'est pas instantanée ; les figures de l'oscillographe ne sont donc pas nettement séparées.

Entre deux excitations, nous avons la décroissance exponentielle de l'amplitude des oscillations libres du quartz.



Nous observons, à l'oscillographe, ce phénomène par l'intermédiaire d'un montage à charge cathodique qui le stabilise ;

tout en épargnant, grâce à sa grande impédance d'entrée, un amortissement supplémentaire au quartz.

### Détermination de Q à l'aide de l'exponentielle (5)

L'amplitude des oscillations du quartz est de la forme  $e^{-t/\tau}$  et  $Q = \pi f \tau$ . Nous pouvons donc déterminer Q.

#### 1. A partir du rapport d'amplitudes

$$A_1 = A(t) = A_0 e^{-t/\tau}$$

$$A_2 = A(t + \Delta t) = A_0 e^{-(t + \Delta t)/\tau}$$

$$\frac{\Delta t}{\tau} = \text{Log} \frac{A_1}{A_2} \quad \text{et} \quad Q = \pi f \tau$$

$$Q = \frac{\pi f \Delta t}{\text{Log} \frac{A_1}{A_2}}$$

Cette mesure est rapide et simple, surtout pour les quartz faiblement amortis, pour lesquels  $A_1$  et  $A_2$  sont relativement importants.

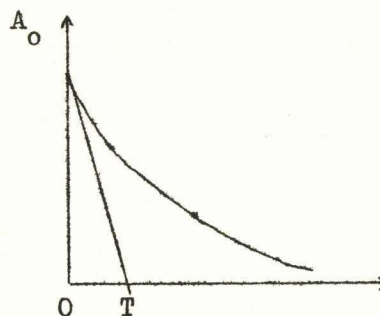
#### 2. Evaluation à l'aide de la tangente à l'origine

$$A = A_0 e^{-t/\tau}$$

$$\frac{dA}{dt} = -\frac{A_0}{\tau} e^{-t/\tau}$$

Pour  $t = 0$ , nous voyons que  $OT = \tau$  qu'il faut évaluer en unités de temps.

$$Q = \pi f \tau$$



Cette méthode est intéressante lorsqu'on dispose de photos ; elle permet d'avoir une meilleure précision. Cependant, l'instant 0 est mal défini,

ce qui présente des difficultés pour tracer la tangente.

### 3. Evaluation de la pente en ordonnées logarithmiques

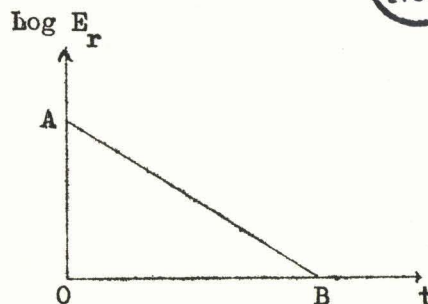


$$A = A_0 e^{-t/\tau}$$

$$Ar = \frac{A}{A_0} = e^{-t/\tau}$$

$$\text{Log } Er = -\frac{t}{\tau}$$

$$-\frac{1}{\tau} = \frac{OA}{OB} \quad \tau = -\frac{OB}{OA}$$



$$Q = \pi F \tau$$

Cette méthode est la plus précise, mais elle nécessite plusieurs mesures et assez de temps ; elle est cependant préférable pour les quartz fortement amortis.

### 4. Calcul à l'aide de la surface

$$A(t) = A_0 e^{-t/\tau} \quad \text{l'aire entre } t = 0 \text{ et } t = t_1$$

$$Q = \int_0^{t_1} A dt = A_0 \int_0^{t_1} e^{-t/\tau} dt = A_0 \tau (1 - e^{-t_1/\tau})$$

$$A_0 e^{-t_1/\tau} = A_1$$

$$Q = \tau (A_0 - A_1) \quad \tau = \frac{Q}{A_0 - A_1} \quad Q = \pi f \tau$$

Ces mesures d'aires sont également assez longues.

### Autres méthodes possibles

Tolstoï et Feofilov : le balayage de l'oscillographe est exponentiel réglable.

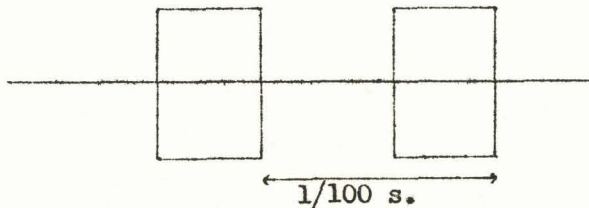


.Comparaison (avec un oscillographe bicourbe) avec une constante de temps réglable d'un circuit RC.

Mesure du temps qui sépare deux amplitudes. Etalonnage de temps

Il existe plusieurs possibilités :

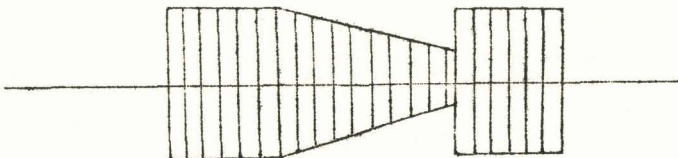
1. On connaît la fréquence des interruptions du vibreur alimenté par le 50 Hz du secteur :



2. On compare le signal amorti avec un signal de fréquence connue en injectant l'un et l'autre simultanément sur les deux voies du bicourbe.

3. Nous pouvons moduler le welmelt de l'oscillographe à l'aide d'une tension de fréquence connue.

L'écran de l'oscillographe est alors strié de bandes alternativement claires et sombres. Entre deux raies, nous avons la période du signal modulateur connu.



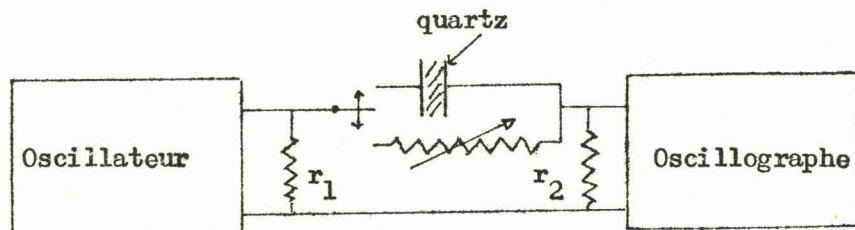
La mesure du coefficient de qualité  $Q$  nous permet de déterminer la plupart des éléments du circuit équivalent d'un quartz. Il nous



suffit de connaître sa résistance à la résonance.

### Principe

On excite le quartz à la fréquence de résonance et on observe la tension à l'oscillographe ; on remplace le quartz par une résistance qui, à l'oscillographe, donne la même déviation du spot.



On peut donc déduire de  $Q$  et  $R$ ,  $L'$  et  $C'$ .

## CHAPITRE V

### MESURES EFFECTUEES

---

Nous allons d'abord déterminer la précision de ces mesures :

$$Q = \frac{\pi f \Delta t}{\text{Log } \frac{A_1}{A_2}}$$

Précision obtenue sur la mesure de  $\Delta t$  :

On utilise le quadrillage de l'écran fluorescent ; entre deux interruptions du vibreur, il s'écoule  $\frac{1}{100}$  s, auquel correspondent 8,5 o du quadrillage. L'oscillation amortie dure 6 c, déterminées à  $\frac{1}{4}$  de carreau près. La précision sur  $\Delta t$  est donc d'environ 4 % . Lorsqu'on module le wehnelt avec une fréquence de 2 KHz par exemple, on obtient une précision qui est aussi de 4 % .

Précision obtenue sur la mesure des amplitudes, c'est-à-dire sur :

$$\frac{1}{\text{Log } \frac{A_1}{A_2}}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta \text{Log } A_1/A_2}{\text{Log } A_1/A_2} &= \frac{\Delta \text{Log } A_1}{\text{Log } A_1/A_2} + \frac{\Delta \text{Log } A_2}{\text{Log } A_1/A_2} \\
 &= \frac{\Delta A_1}{A_1 \text{Log } A_1/A_2} + \frac{\Delta A_2}{A_2 \text{Log } A_1/A_2} \\
 &= \frac{\Delta A}{\text{Log } A_1/A_2} \left[ \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right] \\
 &= \frac{\Delta A (A_1 + A_2)}{A_1 A_2 \text{Log } A_1/A_2}
 \end{aligned}$$

En utilisant l'écran de l'oscillographe dans les meilleures conditions,

$\Delta A = \frac{1}{4} c$  et la précision est de l'ordre de 3 ‰.

La précision sur la mesure de  $Q$  sera donc de 7 ‰ environ.

Plusieurs mesures faites dans des conditions sensiblement différentes de fonctionnement (puissance, vibreur, gain de l'oscillographe) montrent que l'incertitude relative sur  $Q$  n'est pas supérieure à 7 ‰.

## Résultats

### Quartz monté

$$f = 306 \text{ KHz}$$

$$\Delta t = 5 \text{ c } 3/4$$

$$9 \text{ c } 3/4 = \frac{1}{100} \text{ s}$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{14}{11}$$

$$Q = 23.000$$

Aux erreurs expérimentales près, nous avons un résultat comparable à celui obtenu avec le même quartz par la méthode de la crevasse. Nous pouvons affirmer que les mesures sont valables.

Quartz US monté - Coupe AT

$$f = 1070 \text{ KHz}$$

$$\Delta t = 6,5 \text{ c}$$

$$11 \text{ c} = \frac{1}{100} \text{ s}$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{14}{10}$$

$$Q = 59.200$$

Quartz US monté - Coupe AT

$$f = 3600 \text{ KHz}$$

$$Q = 43.200$$

Quartz de coupe X non métallisé circulaire

le cristal est placé entre deux armatures non serrées.

1. Méthode des amplitudes

$$f = 999 \text{ KHz}$$

$$\gamma = \frac{10^{-2} \times 5}{8,5}$$

$$\frac{A_1}{A_2} = 7$$

$$Q = 9.510$$

2. Tangente à l'origine

Intéressant, ici, car le quartz est très amorti :  $s = 2,0 \text{ c}$

Précision :  $6 \text{ ‰}$

$$Q = 9.300$$

3. Evaluation de la pente en ordonnées logarithmiques

| E cm             | Er    | Log Er  | t en carreaux |
|------------------|-------|---------|---------------|
| 6 E <sub>0</sub> |       |         | 0             |
| 3,4              | 0,566 | - 0,568 | 1             |



| E cm | Er    | Log Er  | t en carreaux |
|------|-------|---------|---------------|
| 2,3  | 0,384 | - 0,955 | 2             |
| 1,5  | 0,250 | - 1,45  | 3             |
| 1,0  | 0,167 | - 1,86  | 4             |
| 0,80 | 0,133 | - 2,10  | 5             |

Pente :  $-\frac{1}{s}$

$$Q = 9.360$$

Cette dernière méthode est plus longue, mais certainement la plus sûre.

La précision est de 6 %.

Quartz coupe X carré métallisé

$$f = 3580 \text{ KHz}$$

$$\frac{A_1}{A_2} = 2,2$$

$$Q = 73.000$$

Tableau récapitulatif

|          |             |              |
|----------|-------------|--------------|
| 306 KHz  | Monté       | $Q = 23.000$ |
| 1070 KHz | Monté AT    | $Q = 59.200$ |
| 3600 KHz | Monté AT    | $Q = 43.200$ |
| 999 KHz  | X           | $Q = 9.400$  |
| 3580 KHz | X métallisé | $Q = 73.000$ |

## CHAPITRE VI

### CONCLUSION

---

#### Appareil

Il est relativement peu compliqué et assez facile à construire. Les améliorations ultérieures sont principalement d'ordre électronique. Elles consistent d'abord à améliorer la stabilité de l'oscillateur ; obtenir des fréquences plus élevées et améliorer la démultiplication. On pourrait également augmenter la puissance du signal excitateur afin de pouvoir étudier des résonances autres que la plus intense. Naturellement, il serait possible de remplacer le vibreur mécanique par un système de commutations électronique de fonctionnement plus stable. Les conditions d'observation peuvent être facilement améliorées en utilisant un oscillographe à grand écran et en réalisant des photos ; la précision relative des mesures s'en trouverait du même coup améliorée.

Tel que nous l'avons construit, l'appareil est facilement maniable et permet de mesurer assez rapidement les coefficients de qualité avec une précision acceptable.

## Mesures

Lorsque nous comparons les coefficients de qualité des différents cristaux, nous remarquons que, pour des fréquences comparables, les coupes X sont beaucoup plus amorties que les coupes AT. Ceci est dû au mode de vibration, comme nous l'avons précédemment vu.

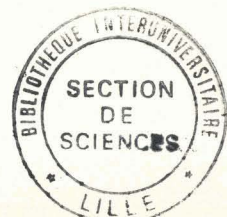
Pour la plupart des quartz, il est facile de pointer les pulsations  $\omega_1$  et  $\omega_2$  de résonance et d'antirésonance ; l'une d'elles est souvent plus intense, mais l'amortissement est sensiblement le même à la précision des mesures effectuées avec l'appareil.

Avec le quartz de 306 KHz, la constante de temps  $\tau$  est sensiblement la même pour les harmoniques d'ordre impair : pour l'harmonique 3, le coefficient de qualité est trois fois plus grand ; la résonance est cependant nettement moins intense.

Lors de la recherche de la résonance, il est possible "d'accrocher" des résonances, en général très faibles. Les fréquences de ces résonances ne sont pas des harmoniques de la fondamentale et l'amortissement est très important (difficile à mesurer cependant).

Ces résonances sont certainement l'indication de vibrations secondaires dues aux différents couplages. Elles dépendent également de la configuration géométrique du quartz et sont plus nombreuses pour une lame parallélépipédique que pour une lame circulaire.

Comme nous l'avons déjà vu, la valeur du coefficient de qualité dépend également de la configuration du réseau cristallin et particulièrement de sa régularité.



Pour terminer, nous voyons que la méthode donne des renseignements assez précis sur les quartz et permet de déterminer leurs différentes constantes. Un appareil plus perfectionné permettrait certainement de faire de nombreuses mesures sur un quartz donné et d'interpréter son comportement sur telle ou telle fréquence de son spectre.

\*  
\*\*  
\*\*

# B I B L I O G R A P H I E

---

- (1) Piézomètre - (Laboratoire de M. PEREZ)
  - (2) Electromètre - J. Physique, T.17, Nov. 1956
  - (3) Electronique Industrielle - GOUDET
  - (4) J. Physique et le Radium - T. 17, Juin 1956  
(H. MAYER)
  - (5) Thèse H. MAYER - Nancy 1955
- Einführung in die piezoelektrische Messtechnik -  
W. GOLKE
- Propriétés des Ultrasons - N. MARINESCO
- Cristallographie Géométrique - J. WYART
- Electronique - R. GUILLIEN
- T.P. sur le Quartz - Institut Radiotechnique de  
Lille



## TABLE DES MATIERES

---

|                                                | <u>Pages</u> |
|------------------------------------------------|--------------|
| Introduction .....                             | 1            |
| I. Généralités .....                           | 2            |
| II. Quartz oscillant, circuit équivalent ..... | 9            |
| III. Méthode de la "crevasse" .....            | 17           |
| IV. Appareil - Fonctionnement - Mesures .....  | 21           |
| V. Mesures effectuées .....                    | 29           |
| VI. Conclusion .....                           | 33           |
| Bibliographie .....                            | 36           |

