

# Epreuve Commune de TIPE : Partie D

## TITRE : Les oscillateurs en électronique

Temps de préparation : ..... 2h15

Temps de présentation devant le jury : ..... 10 minutes

Entretien avec le jury : ..... 10 minutes

### GUIDE POUR LE CANDIDAT

Le dossier ci-joint comporte au total : ..... 10 pages

- Guide candidat : 1 page
- Document principal : 9 pages

Travail suggéré au candidat :

Le candidat pourra par exemple :

- présenter le principe de naissance des oscillations et la contre réaction assurant leur stabilité,
- proposer une synthèse des améliorations que l'on peut apporter pour augmenter la stabilité,
- détailler une des améliorations de son choix.

### CONSEILS GENERAUX POUR LA PREPARATION DE L'EPREUVE :

- Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable.
- Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury.
  - Vous pouvez écrire sur le présent dossier, le surligner, le découper... Mais tout sera à remettre au jury en fin d'oral.
  - En fin de préparation, rassemblez et ordonnez soigneusement TOUS les documents (transparents, *etc.*) dont vous comptez vous servir pendant l'oral, ainsi que le dossier, les transparents et les brouillons utilisés pendant la préparation. En entrant dans la salle d'oral, vous devez être prêt à débiter votre exposé.
  - A la fin de l'oral, vous devez remettre au jury le présent dossier, les transparents et les brouillons utilisés pour cette partie de l'oral, ainsi que TOUS les transparents et autres documents présentés pendant votre présentation.

## Les oscillateurs en électronique

La mesure du temps en électronique est fondamentale. Que ce soit pour cadencer un microprocesseur, mesurer la vitesse d'un véhicule, transférer des données ou simplement connaître l'heure, il faut une référence de temps aux systèmes électroniques. La précision demandée peut surprendre, et nous allons l'illustrer par deux exemples :

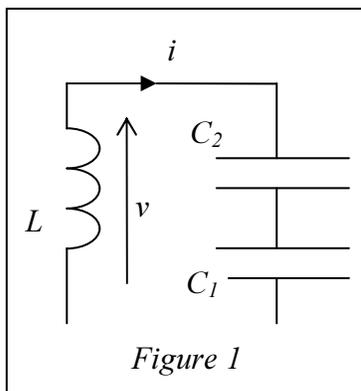
- Prenons une montre à quartz ; quelle doit être sa précision sachant que son mécanisme bat au rythme de la seconde, pour que la montre ne soit pas décalée de plus d'une seconde au bout d'un an ?
- Plus actuel : l'exemple des télécommunications téléphoniques entre centraux, où les données sont transmises au rythme de 622Mbps, soit 1 bit (1 élément binaire dont la valeur est 0 ou 1) toutes les 1,6ns. Les données sont envoyées par paquets de 77760 bits. Il ne faut évidemment pas que le récepteur ne se décale de plus d'1 bit à la fin du paquet, soit un décalage maximum admissible de 0,02 ps à chaque bit...

Ces systèmes permettant de donner une référence temporelle précise sont basés sur des oscillateurs dont la fréquence est très stable. Nous allons montrer leurs principes.

### 1 Principe

Il existe deux grandes familles d'oscillateurs. Les premiers, les oscillateurs à relaxation, sont basés sur la charge et la décharge d'un condensateur, mais ne sont pas très précis à cause des incertitudes sur les valeurs des résistances et des condensateurs. Les seconds, les oscillateurs à boucle de réaction sont basés sur l'instabilité des systèmes bouclés.

Commençons par une compréhension physique des principes utilisés en électronique. Tout comme le pendule en mécanique qui oscille entre 2 états, dont l'un possède une énergie cinétique nulle et une énergie potentielle maximale et l'autre état d'énergie cinétique maximale et d'énergie potentielle minimale, le système électronique oscillera entre 2 états par transfert d'énergie.

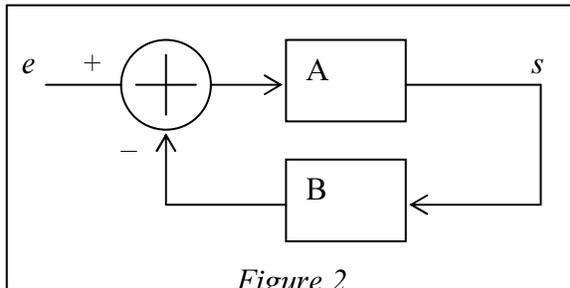


Ici, les transferts ont lieu entre les 2 condensateurs et la bobine. L'énergie accumulée dans la bobine est maximale quand le courant est maximal et la tension nulle. Elle devient maximale dans les condensateurs pour un courant nul et une tension maximale.

Bien sûr, un tel système ne peut fonctionner sans apport d'énergie à cause de la dissipation d'énergie par effet joule dans les composants.

## 1.1 Condition de Barkhausen

30 Regardons ce qui se passe pour un système bouclé.



La fonction de transfert est  $s/e = A/(1+AB)$ .

Figure 2

Pour un système du deuxième ordre la sortie sera de la forme :  $s(t) = e^{at} \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi)$

35 Si  $a < 0$  ( $|A \cdot B| < 1$ ), le système est oscillant amorti.

Si  $a > 0$  ( $|A \cdot B| > 1$ ) le système est oscillant instable et tend à la saturation.

Si  $a = 0$  le système est un oscillateur pur. Le système est instable et  $A \cdot B = -1$ . C'est à dire

$$|A(j\omega) \cdot B(j\omega)| = 1 \text{ et } \arg(A(j\omega)) + \arg(B(j\omega)) = (2k+1) \cdot \pi$$

C'est la condition de Barkhausen.

40

Cette condition paraît difficile à maintenir puisque la moindre imperfection sur A ou B ne permettra pas d'assurer strictement  $|A(j\omega) \cdot B(j\omega)| = 1$ . Dans la pratique A est un gain pur assuré par un amplificateur. La sortie ne peut dépasser une valeur limite de saturation. Donc si on réalise un système où  $|A \cdot B|$  est très légèrement supérieur à 1, au fur et à mesure que l'amplitude des oscillations grandit et s'approche de la valeur de saturation, la valeur maximale des oscillations stagne et le gain A résultant va diminuer. En effet, la tension de sortie de l'amplificateur ne peut plus croître alors que la tension à l'entrée continue de croître.

45

## 1.2 L'oscillateur de Colpitts

50 Nous l'avons vu, le système nécessite un amplificateur pur. Nous prendrons pour cela (cf. figure 3) une simple porte NON-ET rebouclée par une résistance de forte valeur afin de polariser la sortie au milieu de la caractéristique  $v_s = f(v_e)$ . Comme le courant qui entre sur une porte NON-ET est très faible, nous pouvons dire que  $v_s = v_e = V_o$ . De plus, si nous considérons de petites variations  $dv_e$  autour de  $V_o$  nous pouvons définir un gain  $dv_s / dv_e = -A < 0$ .

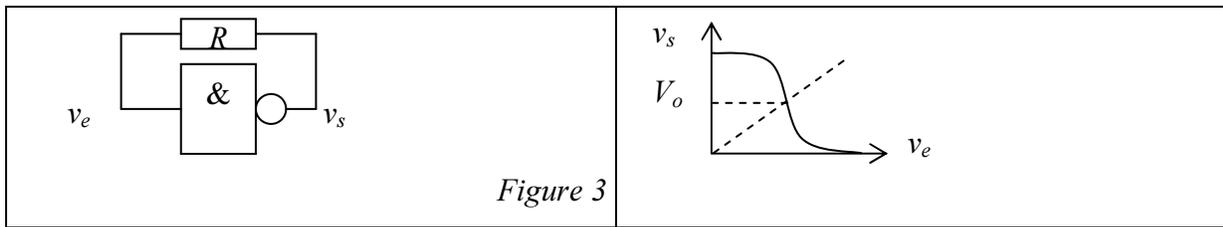


Figure 3

55

Nous allons ajouter maintenant une réaction à notre système, qui rencontrera les conditions de Barkhausen pour une fréquence précise. La résistance  $r$  a été ajoutée pour modéliser le fait que l'amplificateur possède une résistance de sortie non nulle. Elle est nécessaire à la modélisation car elle sera l'élément qui dissipe l'énergie que l'amplificateur va compenser.

60 Cette résistance assurera aussi par la suite une chute de tension à ses bornes qui sera à déduire de la chute de tension aux bornes de la bobine, empêchant cette dernière de chauffer.

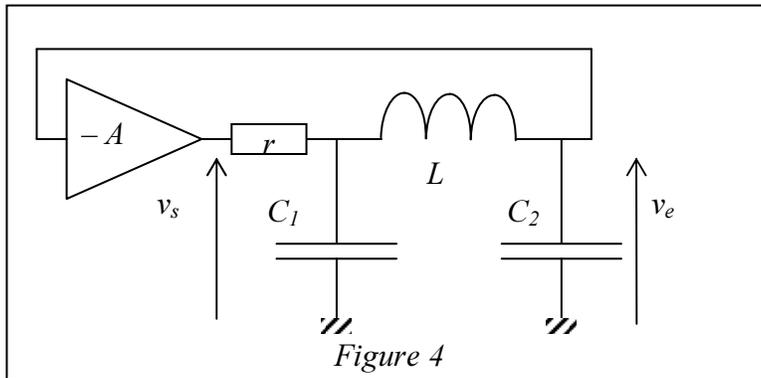


Figure 4

65

70

La condition de Barkhausen amène à :

$$1 - LC^2\omega^2 + j(r(C_1 + C_2)\omega - rC_1C_2L\omega^3) = -A$$

Ceci conduit à une condition sur la fréquence des oscillations à la pulsation  $\omega_o$  et une autre condition sur le gain que nous n'exploiterons pas ici.

$$\omega_o = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1C_2}}$$

75 Nous pouvons remarquer qu'il existe un autre point de repos. Si  $v_e = 0$ ,  $v_s = 0$ , et l'oscillateur ne démarre pas. En pratique les composants présentent des défauts. Même si la tension  $v_e$  est nulle, la tension  $v_s$  ne le sera pas rigoureusement. De plus, il existe un bruit dit thermique dû à l'agitation des électrons à températures ambiante qui créent un courant désordonné dans les composants. Ces imperfections éloignent le système de la méta-stabilité précédemment décrite pour le conduire vers l'instabilité recherchée.

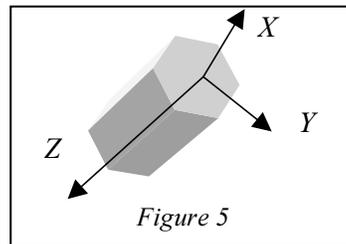
80

Il est cependant difficile de régler parfaitement la pulsation  $\omega_o$ . Les composants étant fabriqués avec de grosses marges d'erreur sur leur valeur nominale. Nous remplacerons donc la bobine par un quartz et montrerons que sous certaines conditions le quartz peut avoir un comportement inductif et assurer une meilleur précision de la fréquence.

## 85 2 Le Quartz

Le quartz est la forme cristalline de l'oxyde de silicium. On trouve communément ce matériau sous forme amorphe sur les plages. La forme cristalline, quant à elle, présente des caractéristiques piézo-électriques et mécaniques intéressantes. C'est un milieu qui peut être le siège de résonances acoustiques de quelques dizaines de mégahertz. Le facteur de qualité de cette résonance est très élevé. Bien que le quartz soit un matériau très répandu à l'état naturel, peu de cristaux présentent des tailles ou des puretés suffisantes pour en faire de bons oscillateurs. Les quartz utilisés en électronique sont donc synthétiques.

La maille cristalline du quartz ( $\text{SiO}_2$ ) est un prisme rectangle à base hexagonale terminé par une pyramide à chacune des 2 extrémités. On distingue 3 axes (cf. figure 5). L'axe optique Z qui passe par le sommet des 2 pyramides, l'axe X, qui passe par 2 sommets opposés de l'hexagone, et l'axe Y, normal aux faces du prisme rectangle à base hexagonale.



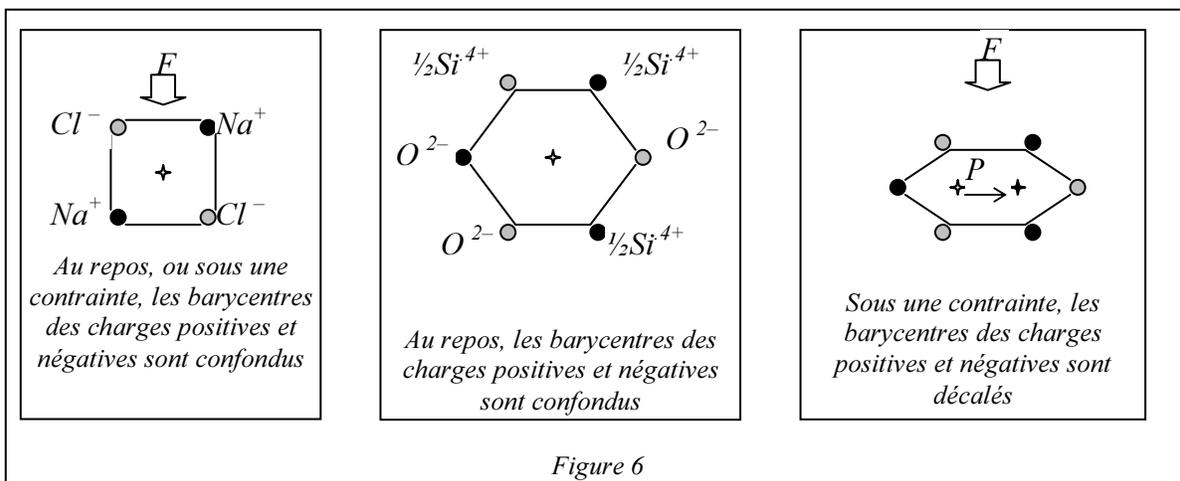
100

Le quartz est découpé en tranches cylindriques de faibles épaisseurs selon des axes de coupe inclinés par rapport aux axes géométriques de la maille. Ces différentes coupes font apparaître des modes de vibrations différents. Par exemple, en coupe AT, le quartz travaille en cisaillement d'épaisseur. Ce mode permet d'obtenir des fréquences de vibrations élevées et relativement indépendantes de la température.

105

La figure 6 montre l'effet d'une pression sur un cristal de sel ( $\text{NaCl}$ ) et sur un quartz. Pour le quartz, les vues sont selon une coupe dans le plan défini par les axes X et Y.

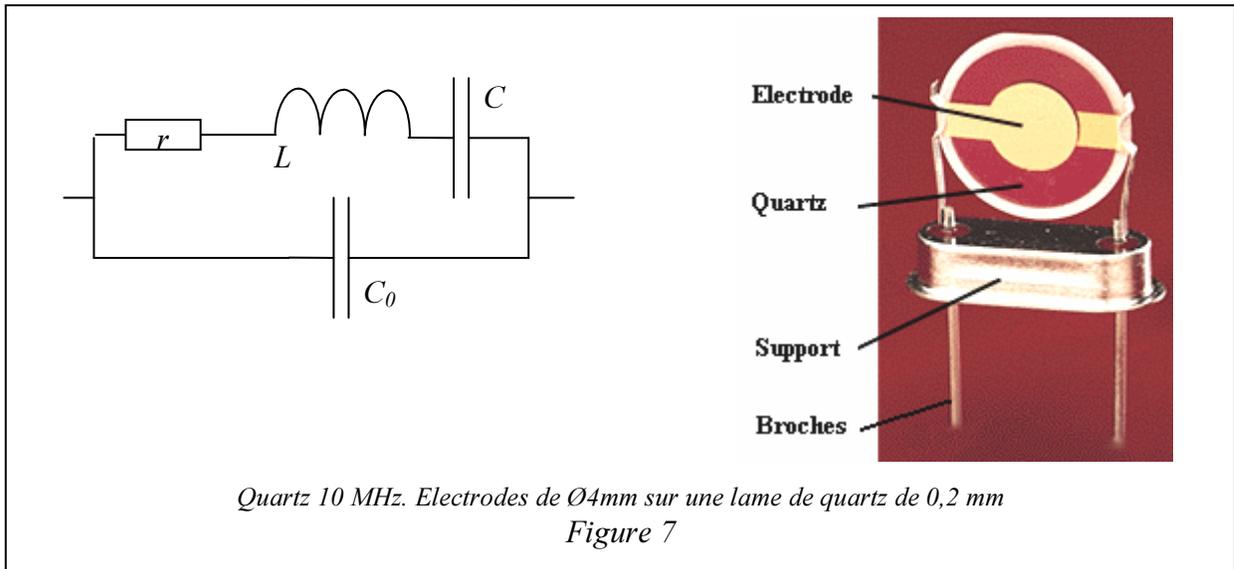
110



115

Lorsqu'une pression est exercée sur la maille du quartz, le réseau cristallin se déforme. Les barycentres des charges positives et négatives ne sont plus confondus et ceci fait apparaître une polarisation électrique. C'est l'effet piézo-électrique. Il existe aussi l'effet piézo-électrique inverse. Un champ électrique appliqué au cristal tend à déformer son réseau. Lorsque l'on cesse d'appliquer ce champ, le cristal retrouve son état initial par déplacement des atomes. Cette force de rappel agit comme un ressort et les atomes en mouvements interagissent entre eux à la manière d'un frottement visqueux. On a alors un système mécanique ressort/amortisseur du second ordre qui ne retrouve son état d'équilibre qu'à la suite d'oscillations autour de son état initial.

Par une analogie classique mécanique/électrique, ce système peut être modélisé par un ensemble RLC série. Comme les contacts électriques sur un quartz sont faits par vaporisation d'or ou d'aluminium sur les faces opposées du disque de quartz, les 2 dépôts opposés (électrodes) se comportent comme un condensateur  $C_0$  en parallèle sur le circuit précédent. Ceci conduit au schéma équivalent de la figure 7.



Si nous calculons l'impédance de ce dipôle nous trouvons :

$$Z_{eq} = (1 - LC\omega^2 + jrC\omega) / (-rCC_0\omega^2 + j\omega(C + C_0 - LCC_0\omega^2))$$

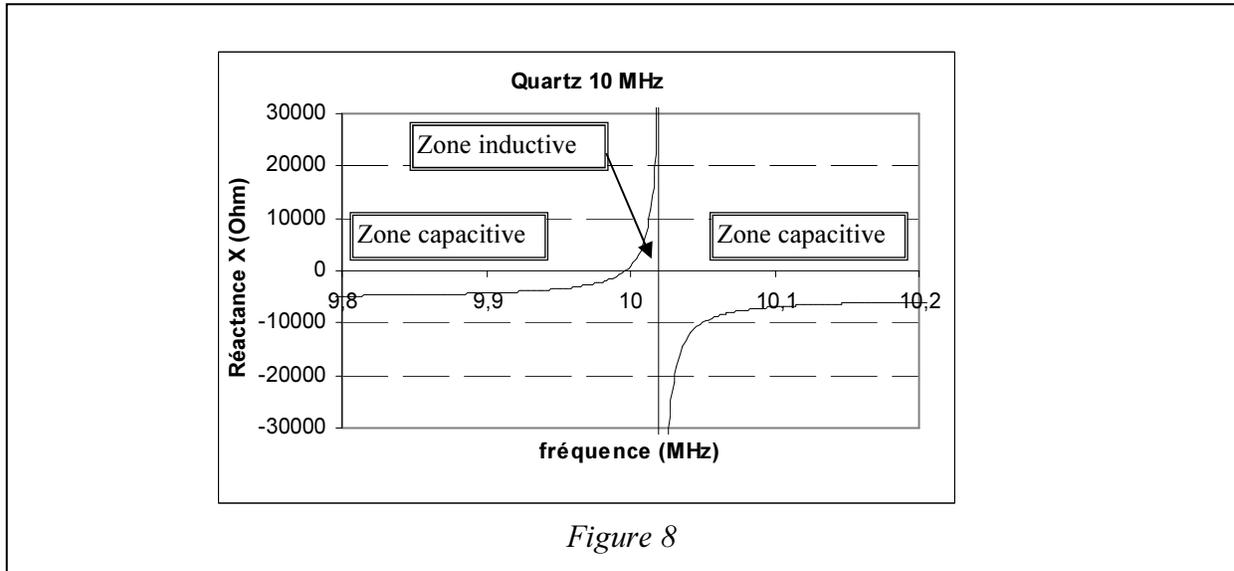
Dans la pratique, la résistance  $r$  est faible et nous pouvons réécrire cette relation qui devient alors un nombre imaginaire pur :

$$Z_{eq} = jX = -j(1 - LC\omega^2) / (\omega(C + C_0 - LCC_0\omega^2))$$

Pour un quartz de 10MHz,  $r = 11,9 \Omega$  ;  $L = 18,72 \text{ mH}$  ;  $C = 13,54 \text{ fF}$  ;  $C_0 = 2,4 \text{ pF}$

Le tracé de la réactance  $X$ , fait apparaître une pulsation  $\omega_s$  pour laquelle  $X=0$  et une pulsation  $\omega_p$  pour laquelle  $X$  tend vers l'infini. Entre  $\omega_s$  et  $\omega_p$  le quartz se comporte comme une bobine. Le facteur de qualité défini par  $Q=L\omega/r$  est beaucoup plus élevé que celui du système

145 bobine/condensateur précédent. Il traduit la qualité des échanges énergétiques rapportés aux pertes par échauffement.



### 2.1.1 Les résonateurs céramiques.

150 Contrairement aux quartz qui sont obtenus par croissance cristalline, les résonateurs céramiques sont obtenus par frittage de poudres comme le titanate de baryum. Les propriétés piézoélectriques sont obtenues de façon artificielle en faisant refroidir très lentement le matériau dans un champ électrique de grande intensité. Comme ce type de matériau est  
155 électrique, les grains s'alignent et restent alignés une fois refroidis, faisant apparaître des propriétés piézoélectriques.

En plus de présenter une moins grande élasticité que le quartz, ces céramiques possèdent une résistivité électrique naturelle plus forte que celle du quartz ce qui diminue sensiblement le facteur de qualité. Aussi, la fréquence de résonance des céramiques varie beaucoup plus en  
160 fonction de la température que celle du quartz.

Néanmoins, les résonateurs céramiques sont toutefois très utilisés car ils sont moins chers puisqu'ils ne sont pas obtenus avec les mêmes conditions de températures et de pressions extrêmes nécessaires à l'élaboration des quartz.

## 2.2 L'oscillateur Colpitts à quartz

165 Nous allons faire fonctionner le quartz dans sa zone inductive afin qu'il puisse remplacer la bobine dans le schéma de l'oscillateur Colpitts. A la pulsation  $\omega_s$  le quartz résonne comme un circuit LC série. Par analogie avec la figure 1, nous pouvons expliquer le fonctionnement de

ce nouveau circuit en ajoutant à la figure 1 la capacité C du quartz. Le circuit équivalent résonne alors à la pulsation

170  $\omega_o = 1/\sqrt{LC_{eq}}$  avec  $C_{eq} = 1/C + 1/C_1 + 1/C_2$ .

$\omega_o$  devra être choisi très légèrement supérieure à la résonance série pour avoir le comportement inductif voulu. La capacité C du quartz est donnée par le fabricant et il ne reste plus qu'à choisir les capacités  $C_1$  et  $C_2$  que l'on prendra égales pour plus de facilité. Le choix de  $\omega_o$  est cependant limité et il faudra choisir un quartz qui résonne exactement à la

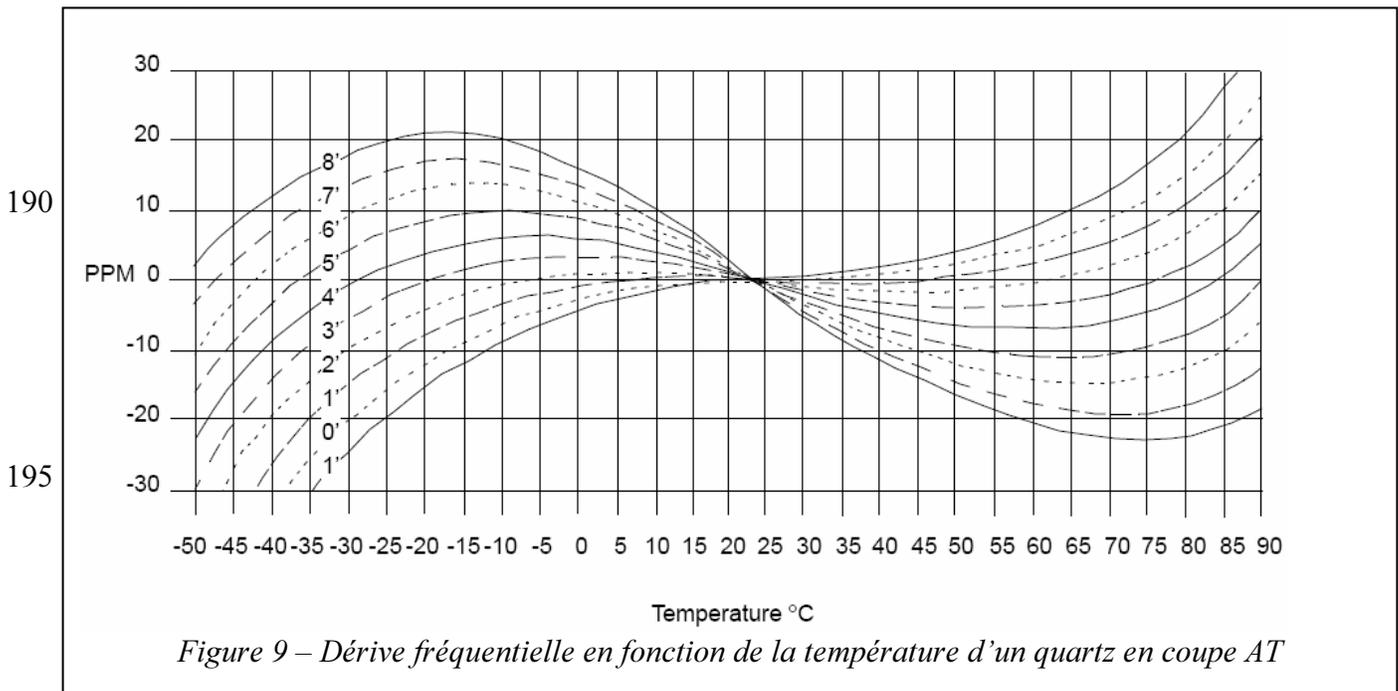
175 fréquence désirée. Dans le cas des résonateurs céramiques, puisque  $\omega_p$  et  $\omega_s$  sont plus éloignés, le concepteur en électronique a davantage de souplesse puisqu'il peut régler la fréquence désirée sur une plus grande plage par l'ajustement de C1 et C2.

### 3 Stabilité en fréquence

La dérive en fréquence par rapport à la fréquence nominale est mesurée par le rapport de

180 l'écart à la fréquence nominale de fonctionnement sur la fréquence nominale. C'est un nombre sans dimension qui est exprimé en partie par million (ppm). Plusieurs facteurs influencent cette dérive : la température de fonctionnement, l'écart entre la fréquence nominale et la valeur réelle (appelée tolérance de fabrication), le vieillissement sur une longue période de fonctionnement et l'influence des éléments extérieurs. Les quartz standards

185 présentent des dérives fréquentielles de l'ordre de  $\pm 40$  ppm sur une plage de fonctionnement en température de 0 à 60°C.



200 Le vieillissement se mesure en ppm/an et il est le résultat des divers frottements du quartz avec le boîtier, les poussières et autres résidus de soudure. D'autres phénomènes tels que des chocs thermiques ou mécaniques subis par le quartz peuvent accélérer son vieillissement. La qualité de fabrication atteinte par certains fabricants leur permet de garantir un vieillissement de 1ppm/an.

205 La coupe AT des quartz est très prisées des fabricants car la forme de la courbe décrivant la dérive fréquentielle en fonction de la température de fonctionnement est intéressante. C'est une courbe en S (cf. figure 9) symétrique par rapport à 27°C. Chaque courbe représente un profile de dérive fréquentielle pour un angle de coupe particulier par rapport à la coupe AT.

### *Les oscillateurs à quartz régulés en température (OCXO).*

210 Les OCXO (Oven Controlled Crystal Oscillators) sont des enceintes confinées dans laquelle le quartz est maintenu à une température constante. Ce mini four est régulé par un correcteur proportionnel associé à une résistance de chauffage et une thermistance permettant de mesurer la température désirée. Cette température est choisie de manière à offrir, non pas une dérive fréquentielle minimum, mais une variation de dérive fréquentielle minimum. Par exemple, sur  
215 la figure 9, on peut voir que si le quartz est coupé à 7° selon le plan AT, on obtient une variation de la dérive fréquentielle très faible vers 70°C. Avec de tels systèmes, la dérive fréquentielle peut atteindre 0,01 ppm et un vieillissement de  $10^{-10}$  / par jour. Cependant, les OCXO sont encombrants (cf figure 10) et énergivores ce qui les rend peu utilisables pour les applications portables. Enfin, un système possédant un OCXO ne peut être immédiatement  
220 opérationnel après allumage puisqu'il faut attendre que l'OCXO atteigne sa température optimale de fonctionnement. Ce temps est d'environ 10 minutes.



*Figure 10 – OCXO*

### Les oscillateurs à quartz compensés en température (TCXO)

225 Pour un quartz donné, puisque son profil de température est connu, on peut essayer de le compenser. Ces systèmes sont appelés TCXO (Temperature Compensated Crystal Oscillators). On fera varier la valeur d'une capacité du circuit afin de contrôler les oscillations du quartz.

230 Dans le circuit décrit figure 11,  $C_3$  est une capacité variable que l'on peut contrôler par une tension. Ce circuit résonne à la fréquence  $\omega_o = 1/\sqrt{LC_{eq}}$  avec  $C_{eq} = 1/C + 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3$ . Un circuit numérique additionnel composé d'une mémoire comprenant le profil de température du quartz, d'un capteur de température et d'un microprocesseur, calcule et ajuste en permanence la valeur de tension à appliquer à  $C_3$  afin de compenser les variations de température. Les TCXO permettent d'atteindre des variations fréquentielles de quelques ppm.

235

240

245

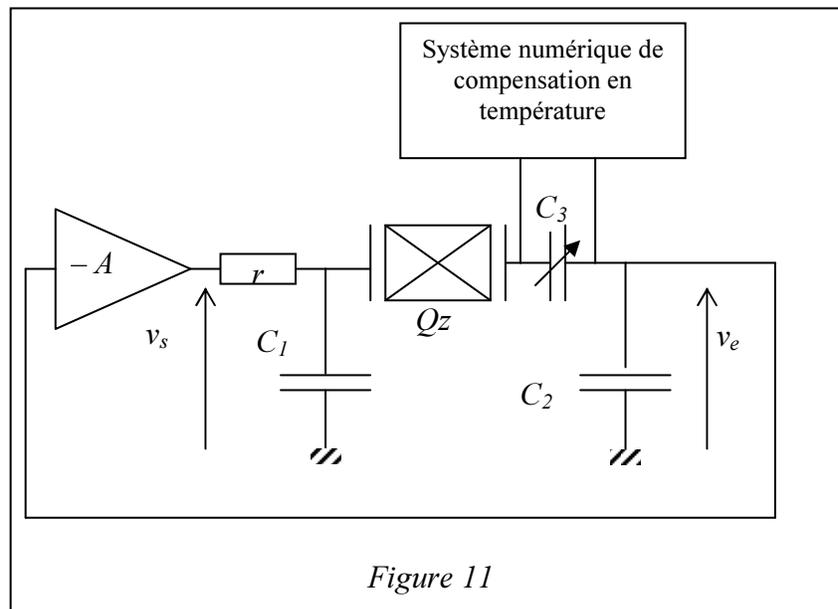


Figure 11