

# NORME INTERNATIONALE

**Oscillateurs piézoélectriques, diélectriques et électrostatiques sous assurance  
de la qualité -  
Partie 2: Lignes directrices pour l'utilisation des oscillateurs**

get full document from [standards.iteh.ai](https://standards.iteh.ai)



## THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2026 IEC, Geneva, Switzerland

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Secretariat  
3, rue de Varembe  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11

[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)

### A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

### A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

### Recherche de publications IEC -

[webstore.iec.ch/advsearchform](http://webstore.iec.ch/advsearchform)

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études, ...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

### IEC Just Published - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

### Service Clients - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: [sales@iec.ch](mailto:sales@iec.ch).

### IEC Products & Services Portal - [products.iec.ch](http://products.iec.ch)

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications, symboles graphiques et le glossaire. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

### Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 500 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 25 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

**Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

## SOMMAIRE

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| AVANT-PROPOS .....                                                                     | 4  |
| INTRODUCTION .....                                                                     | 6  |
| 1    Domaine d'application .....                                                       | 7  |
| 2    Références normatives.....                                                        | 7  |
| 3    Termes et définitions.....                                                        | 7  |
| 4    Principe de fonctionnement des oscillateurs à quartz .....                        | 7  |
| 5    Classification des oscillateurs à quartz .....                                    | 10 |
| 5.1    Généralités .....                                                               | 10 |
| 5.2    SPXO (oscillateur d'horloge).....                                               | 11 |
| 5.3    TCXO .....                                                                      | 13 |
| 5.4    VCXO.....                                                                       | 15 |
| 5.5    Oscillateur à quartz à enceinte à température régulée .....                     | 17 |
| 5.6    DCXO (Disciplining Control Crystal Oscillator) .....                            | 18 |
| 5.7    PLXO .....                                                                      | 20 |
| 6    Tenue de la fréquence des oscillateurs à quartz .....                             | 21 |
| 7    Spécification et mesure des performances de l'oscillateur.....                    | 22 |
| 7.1    Généralités .....                                                               | 22 |
| 7.2    Effets environnementaux .....                                                   | 22 |
| 7.3    Variations de la fréquence aléatoire.....                                       | 23 |
| 7.4    Bruit de phase.....                                                             | 26 |
| 7.5    Sortie différentielle des oscillateurs à quartz.....                            | 27 |
| 8    Paramètres de spécification clés .....                                            | 27 |
| 8.1    Généralités .....                                                               | 27 |
| 8.2    Durée de conditionnement.....                                                   | 28 |
| 8.2.1    Généralités .....                                                             | 28 |
| 8.2.2    SPXO .....                                                                    | 29 |
| 8.2.3    TCXO .....                                                                    | 29 |
| 8.2.4    OCXO.....                                                                     | 29 |
| 8.2.5    DCXO .....                                                                    | 30 |
| 8.2.6    PLXO.....                                                                     | 30 |
| 8.3    Plage d'ajustage de la fréquence.....                                           | 30 |
| 8.3.1    Généralités .....                                                             | 30 |
| 8.3.2    Oscillateur à quartz simple en boîtier .....                                  | 30 |
| 8.3.3    Pilote compensé en température .....                                          | 31 |
| 8.3.4    Oscillateur à quartz à enceinte à température régulée .....                   | 31 |
| 8.3.5    DCXO et PLXO.....                                                             | 31 |
| 8.4    Tenue de la fréquence dans les conditions de température en régime établi ..... | 31 |
| 9    Caractéristiques à spécifier dans les fiches article .....                        | 32 |
| 10    Précautions d'utilisation des oscillateurs à quartz .....                        | 36 |
| 10.1    Généralités .....                                                              | 36 |
| 10.2    Alimentation électrique.....                                                   | 36 |
| 10.2.1    Résistance interne de l'alimentation.....                                    | 36 |
| 10.2.2    Bruit provenant de l'alimentation.....                                       | 36 |
| 10.3    Tension de commande d'entrée .....                                             | 37 |
| 10.3.1    Linéarité de la variation de fréquence .....                                 | 37 |
| 10.3.2    Polarité de la tension de commande .....                                     | 38 |

|                                                                             |                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 10.4                                                                        | CEM (Compatibilité électromagnétique) .....                                                                                                               | 39 |
| 10.5                                                                        | Sélection des condensateurs de dérivation.....                                                                                                            | 39 |
| 10.6                                                                        | Oscillateurs à boucle à verrouillage de phase .....                                                                                                       | 40 |
| 10.7                                                                        | DES (Décharge électrostatique) .....                                                                                                                      | 41 |
| Annexe A (informative) Sortie différentielle des oscillateurs à quartz..... |                                                                                                                                                           | 42 |
| A.1                                                                         | Fréquence d'horloge et niveau du signal .....                                                                                                             | 42 |
| A.2                                                                         | Caractéristiques de l'onde de sortie différentielle .....                                                                                                 | 43 |
| A.3                                                                         | Avantage et précaution du signal différentiel .....                                                                                                       | 44 |
| A.4                                                                         | Avantage de l'oscillateur à sortie différentielle .....                                                                                                   | 45 |
| A.5                                                                         | Evaluation du signal de sortie différentiel .....                                                                                                         | 45 |
| Bibliographie.....                                                          |                                                                                                                                                           | 46 |
|                                                                             |                                                                                                                                                           |    |
| Figure 1                                                                    | – Mouvement du pendule oscillant.....                                                                                                                     | 8  |
| Figure 2                                                                    | – Circuit de l'oscillateur de Colpitts.....                                                                                                               | 9  |
| Figure 3                                                                    | – Circuit équivalent d'un circuit oscillant de Colpitts .....                                                                                             | 9  |
| Figure 4                                                                    | – Schéma de base d'un oscillateur à quartz.....                                                                                                           | 10 |
| Figure 5                                                                    | – Caractéristiques fréquence-température de cristaux de coupe AT selon<br>différents angles d'orientation .....                                           | 12 |
| Figure 6                                                                    | – Caractéristiques fréquence-température d'un cristal type de diapason.....                                                                               | 12 |
| Figure 7                                                                    | – Circuit oscillant CMOS et circuit équivalent.....                                                                                                       | 13 |
| Figure 8                                                                    | – Schémas fonctionnels de différents pilotes compensés en température .....                                                                               | 14 |
| Figure 9                                                                    | – Circuit oscillant VCXO et circuit équivalent .....                                                                                                      | 15 |
| Figure 10                                                                   | – Oscillateur à quartz commandé par une tension avec circuits ajoutés pour<br>améliorer la largeur de bande et la linéarité.....                          | 16 |
| Figure 11                                                                   | – Diagramme de l'oscillateur à quartz à contrôle disciplinant .....                                                                                       | 18 |
| Figure 12                                                                   | – Diagramme de transition d'état de fonctionnement de DCXO .....                                                                                          | 20 |
| Figure 13                                                                   | – Type d'oscillateur à quartz et tenue de la fréquence .....                                                                                              | 21 |
| Figure 14                                                                   | – Spectre de puissance de sortie classique d'un oscillateur à quartz.....                                                                                 | 23 |
| Figure 15                                                                   | – Dépendance de la stabilité à court terme (variance d'Allan) sur le temps<br>de moyennage de l'échantillon pour un oscillateur à quartz typique .....    | 26 |
| Figure 16                                                                   | – Comportement classique de tenue de la fréquence d'un oscillateur à<br>quartz à enceinte à température régulée après la mise sous tension initiale ..... | 32 |
| Figure 17                                                                   | – Forme d'onde de sortie .....                                                                                                                            | 37 |
| Figure 18                                                                   | – Caractéristiques de bruit de phase.....                                                                                                                 | 37 |
| Figure 19                                                                   | – Exemple de circuit d'entrée d'un oscillateur à quartz commandé par<br>une tension à polarité positive .....                                             | 37 |
| Figure 20                                                                   | – Caractéristiques de tension de commande-variation de fréquence<br>(polarité positive).....                                                              | 38 |
| Figure 21                                                                   | – Caractéristiques de tension de commande-variation de fréquence<br>(polarité négative) .....                                                             | 38 |
| Figure 22                                                                   | – Exemple de circuit d'entrée pour oscillateur à quartz commandé par une<br>tension à polarité négative.....                                              | 38 |
| Figure 23                                                                   | – Simulation de la réponse en fréquence d'un condensateur de dérivation.....                                                                              | 39 |
| Figure 24                                                                   | – Distance entre l'oscillateur à quartz et le condensateur de dérivation .....                                                                            | 40 |
| Figure 25                                                                   | – Image d'amplification de gigue par montage en cascade de boucle<br>à verrouillage de phase.....                                                         | 41 |

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure A.1 – Fréquence d'horloge en fonction du niveau du signal (fréquence de front constante) .....    | 42 |
| Figure A.2 – Formes d'onde d'horloge et spécifications .....                                             | 43 |
| Figure A.3 – Effet du bruit (sortie unique).....                                                         | 43 |
| Figure A.4 – Effet du bruit (sortie différentielle).....                                                 | 44 |
| Figure A.5 – Bruit en mode commun.....                                                                   | 44 |
| Figure A.6 – Diagramme de l'œil .....                                                                    | 45 |
| Tableau 1 – Liste des paramètres classiques de l'oscillateur.....                                        | 28 |
| Tableau 2 – Paramètres de stabilisation de l'oscillateur à quartz à enceinte à température régulée ..... | 29 |
| Tableau 3 – Liste de contrôle des paramètres recommandés .....                                           | 33 |

# Sample Document

get full document from [standards.iteh.ai](https://standards.iteh.ai)

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### **Oscillateurs piézoélectriques, diélectriques et électrostatiques sous assurance de la qualité - Partie 2: Lignes directrices pour l'utilisation des oscillateurs**

#### AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. À cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'IEC attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de brevet revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'IEC n'avait pas reçu notification qu'un brevet pouvait être exigé à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

L'IEC 60679-2 a été établie par le comité d'études 49 de l'IEC: Dispositifs piézoélectriques, diélectriques et électrostatiques et matériaux associés pour la détection, le choix et la commande de la fréquence. Il s'agit d'une Norme internationale.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 1981. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) quelques nouveaux contenus qui reflètent les dernières technologies de fabrication;
- b) ajout de contenu sur le principe de fonctionnement des oscillateurs à quartz;
- c) ajout de contenu sur les précautions d'utilisation des oscillateurs à quartz.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

| Projet       | Rapport de vote |
|--------------|-----------------|
| 49/1540/FDIS | 49/1544/RVD     |

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à son approbation.

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous [www.iec.ch/members\\_experts/refdocs](http://www.iec.ch/members_experts/refdocs). Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous [www.iec.ch/publications](http://www.iec.ch/publications).

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60679, publiées sous le titre général *Oscillateurs piézoélectriques, diélectriques et électrostatiques de qualité contrôlée*, se trouve sur le site Web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous [webstore.iec.ch](http://webstore.iec.ch) dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé, ou
- révisé.

## INTRODUCTION

Les oscillateurs à quartz sont souvent utilisés pour fournir les fréquences stables requises pour les télécommunications, les navigations et les systèmes de traitement de données. En fonction de la fréquence de fonctionnement, des conditions ambiantes et de la conception spécifique de l'oscillateur, les oscillateurs à quartz sont capables d'assurer une stabilité de fréquence variant de  $1 \times 10^{-4}$  à  $1 \times 10^{-10}$ .

Le présent document propose les lignes directrices décrivant les propriétés générales, les caractéristiques de performance et les précautions d'utilisation des oscillateurs à quartz.

# Sample Document

get full document from [standards.iteh.ai](https://standards.iteh.ai)

## 1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60679 décrit les propriétés générales, les caractéristiques de performance et les précautions d'utilisation des oscillateurs à quartz. Le présent document décrit principalement les oscillateurs à quartz, mais certaines descriptions s'appliquent également aux oscillateurs autres que les unités de cristal (les résonateurs MEMS, par exemple).

## 2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60679-1, *Oscillateurs piézoélectriques, diélectriques et électrostatiques sous assurance de la qualité - Partie 1: Spécification générique*

## 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et les définitions de l'IEC 60679-1 s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>

## 4 Principe de fonctionnement des oscillateurs à quartz

Le principe de fonctionnement des oscillateurs à quartz est plus facile à comprendre que celui d'un pendule. Pour maintenir le balancement d'un pendule, il convient de détecter la position et le point temporel de l'amplitude maximale du pendule, et il convient de répéter l'opération consistant à repousser le pendule de manière à maintenir le point temporel et la position. Le pendule correspond à une unité de cristal qui comprend un amplificateur avec un circuit de rétroaction qui fournit la force de détection et de refoulement (voir Figure 1).

Un amplificateur de rétroaction classique (circuit de Colpitts) est représenté à la Figure 2, où les signaux aux deux bornes de l'unité de cristal sont divisés au niveau des condensateurs  $C_A$  et  $C_B$ , l'un connecté côté entrée et l'autre côté sortie. Il peut être considéré que, dans le cas du pendule, la "détection" est donnée côté entrée de l'amplificateur de rétroaction et que la "force de refoulement" est donnée côté sortie. Ici,  $R_A$  et  $R_B$  sont des résistances de décharge assurant une polarisation invariable à la borne de base du transistor d'oscillation,  $R_E$  est une résistance de rétroaction négative connectée à l'émetteur et  $R_C$  est une résistance de charge connectée au collecteur.

Ensuite, dans l'état d'oscillation (voir la Figure 3), le côté du circuit de l'oscillateur qui est vu depuis les bornes de l'unité de cristal peut être représenté par un circuit en série de capacité d'entrée équivalente  $C_i$  et de résistance d'entrée équivalente  $R_i$ . Dans ce cas, le côté unité de cristal équivaut à une inductance effective inductive  $L_e$  et une résistance effective  $R_e$ , les conditions d'oscillation du cristal étant les suivantes:

Condition de fréquence:

$$\omega L_e - \frac{1}{\omega C_i} = 0 \quad (1)$$

où

$\omega L_e$  est l'inductance effective inductive, et

$\omega C_i$  est la capacité d'entrée équivalente.

Condition d'amplitude:

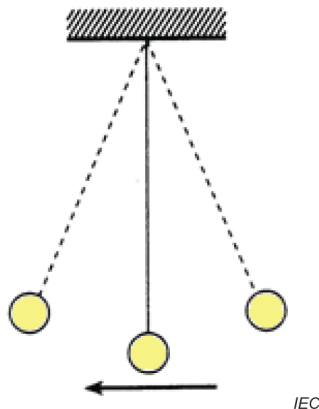
$$R_e \leq |R_i| \quad (2)$$

où

$R_e$  est la résistance effective;

$R_i$  est la résistance d'entrée équivalente.

La condition de fréquence détermine la fréquence d'oscillation. Pour la condition d'amplitude, la résistance d'entrée équivalente côté circuit doit avoir une valeur négative au voisinage de la fréquence d'oscillation et au niveau du petit signal au démarrage, cette valeur étant appelée résistance négative. Cette résistance négative peut être obtenue avec des circuits actifs tels que transistors et amplificateurs opérationnels.  $|R_i|$  doit être conçue pour être supérieure à  $R_e$  afin d'assurer une oscillation au démarrage de l'oscillateur, c'est-à-dire qu'  $R_e = |R_i|$  en régime établi suivant la fin du démarrage et l'oscillation devient l'amplitude en régime établi.



**Figure 1 – Mouvement du pendule oscillant**

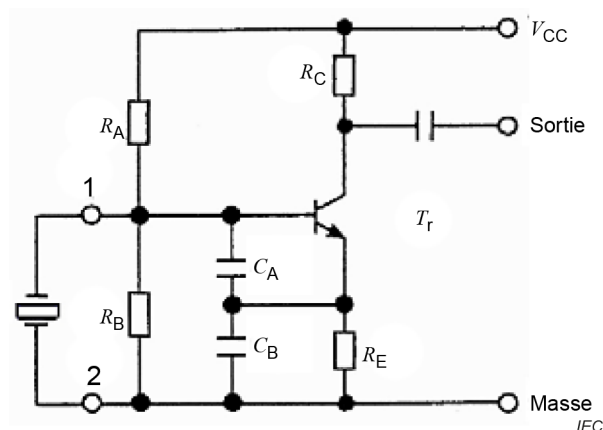


Figure 2 – Circuit de l'oscillateur de Colpitts

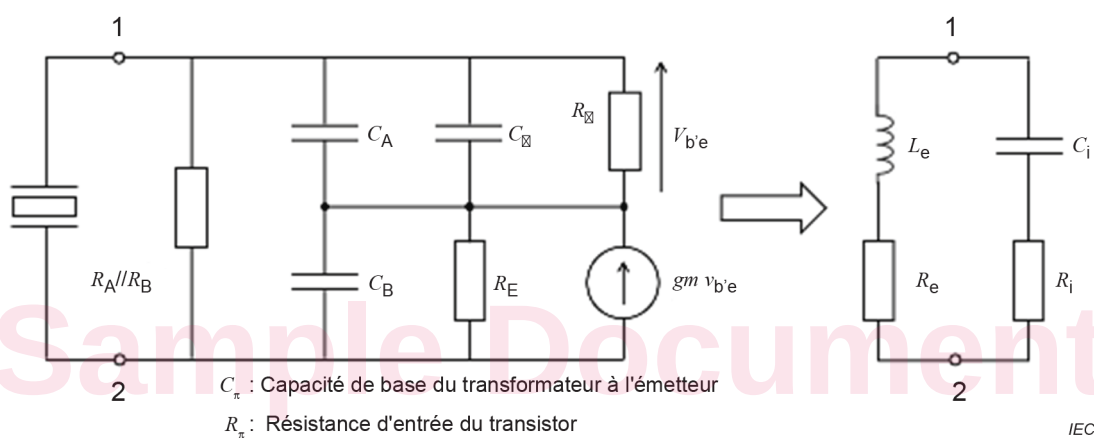


Figure 3 – Circuit équivalent d'un circuit oscillant de Colpitts

La capacité côté circuit  $C_i$  est appelée capacité de charge ( $C_L$ ) par rapport à l'unité et est un paramètre important qui détermine la quantité de variation de fréquence à partir de la fréquence de résonance en série, de la sensibilité variable et de la stabilité de fréquence, etc. L'équation relationnelle est la suivante:

Décalage de fréquence de résonance avec capacité de charge relative

$$D_L = \frac{f_L - f_r}{f_r} \approx \frac{1}{2r \left( 1 + \frac{C_L}{C_0} \right)} \quad (3)$$

où

$f_L$  est la fréquence de résonance de charge;

$f_r$  est la fréquence de résonance série.

Sensibilité de tirage

$$S = \frac{dD_L}{dC_L} \approx \frac{-1}{2rC_0 \left(1 + \frac{C_L}{C_0}\right)^2} \quad (4)$$

où

$C_0$  est la capacité parallèle de l'unité de cristal;

$C_1$  est la capacité dynamique de l'unité de cristal;

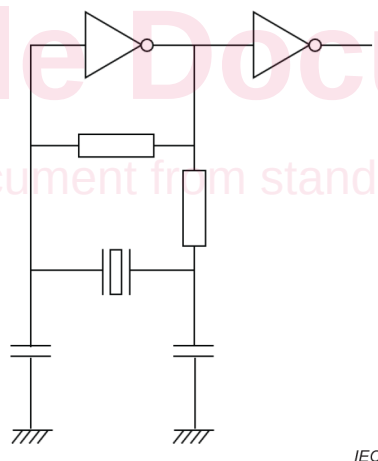
$C_L$  est la capacité de charge ( $C_L$  côté circuit);

$r$  est le rapport de capacité de l'unité de cristal ( $C_0/C_1$ ).

## 5 Classification des oscillateurs à quartz

### 5.1 Généralités

En termes très généraux, un oscillateur à quartz peut être décrit comme étant constitué d'un amplificateur ou d'un circuit de gain, associé à un circuit de réaction positive. Un circuit oscillant classique est représenté à la Figure 4.



IEC

**Figure 4 – Schéma de base d'un oscillateur à quartz**

L'auto-oscillation de ce type de circuit se produit à condition que le gain en boucle ouverte dépasse l'unité à une certaine fréquence pour laquelle la phase totale en boucle ouverte est de  $2n\pi$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ). Le niveau du signal d'oscillation dépend des caractéristiques de gain du circuit, tandis que la fréquence d'oscillation est déterminée par des considérations de phase. Le spectre du signal de sortie dépend du niveau d'oscillation, du bruit électrique des éléments du circuit et des bandes passantes des circuits. En règle générale, la largeur spectrale est extrêmement faible et, pour la plupart des applications, il convient que seul le comportement en fréquence centrale ou moyenne soit pris en compte. Sans tenir compte pour l'instant de la dégradation de la pureté d'un signal par le bruit électrique, la fréquence moyenne d'oscillation est toujours déterminée par l'exigence de phase en boucle ouverte. Des écarts de fréquence se produisent à chaque perturbation de la phase en boucle ouverte. Ces perturbations peuvent généralement être considérées comme étant de deux types, à savoir:

- écarts dans les paramètres de circuit électrique;
- écarts dans l'unité de cristal.

Les écarts de type a) incluent des facteurs tels que les coefficients de température des condensateurs, bobines d'inductance, résistances et transistors; le vieillissement de ces dispositifs; leurs caractéristiques de tension et de courant et leur sensibilité aux perturbations mécaniques. Quelle qu'en soit la cause, une perturbation de phase ( $\Delta\phi_N$ ) dans la phase de transfert du circuit provoque une variation de la fréquence moyenne d'oscillation:

$$\Delta f = f_0 \frac{\Delta\phi_N}{2Q_X} \quad (5)$$

où

$f_0$  désigne la fréquence d'oscillation nominale et

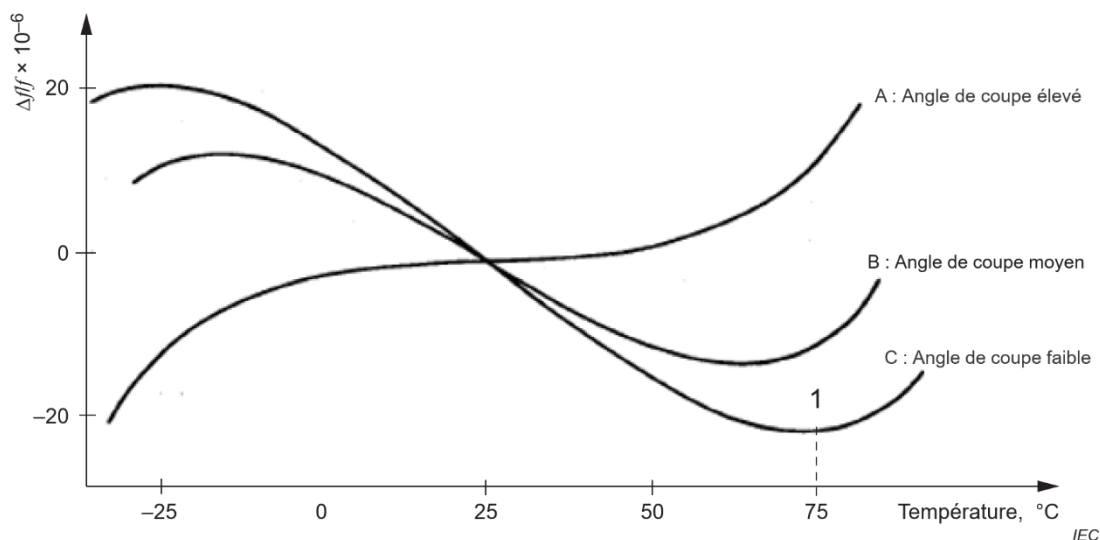
$Q_X$  est l'efficacité  $Q$  du réseau de cristal à bande étroite.

Les écarts de type b) incluent les variations des caractéristiques des unités de cristal dues à la température, au gradient de température, au niveau d'excitation, au "vieillissement de fréquence" et à l'environnement mécanique (chocs, accélération et vibrations). Le circuit d'oscillation du cristal est généralement conçu pour utiliser un circuit de gain dont la bande est aussi large que possible, afin de réduire autant que possible la sensibilité de phase du réseau. Le réseau de rétroaction du cristal, d'autre part, est généralement conçu pour avoir une bande de transmission aussi étroite que possible, de sorte que la fréquence d'oscillation ne dépend essentiellement que des caractéristiques de l'unité de cristal. Lorsqu'un ajustage de la fréquence est nécessaire, il est de préférence réalisé en introduisant une réactance variable qui modifie la fréquence du réseau de cristal sans élargir la bande de transmission. Si ces pratiques générales sont respectées, la tenue de la fréquence de l'oscillateur dépend principalement des caractéristiques de l'unité de cristal, qu'il convient de choisir de manière à:

- c) obtenir un facteur  $Q$  élevé;
- d) présenter une faible variation de fréquence sur la plage de températures de fonctionnement prévue;
- e) obtenir une faible dépendance du niveau d'excitation (DLD, Drive Level Dependence) de la fréquence et de la résistance de résonance;
- f) assurer une faible sensibilité aux chocs mécaniques, à l'accélération et aux vibrations;
- g) présenter une faible dérive de fréquence due au vieillissement.

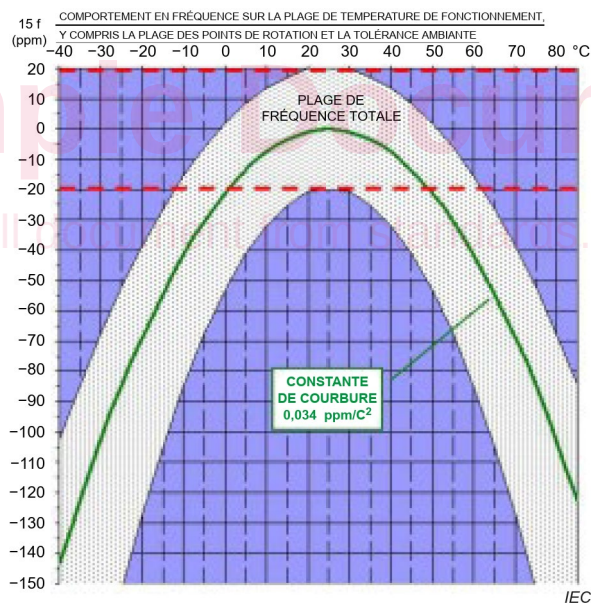
## 5.2 SPXO (oscillateur d'horloge)

La plupart des équipements électroniques doivent fonctionner sur une plage de températures ambiantes, c'est-à-dire  $-10\text{ °C}$  à  $+60\text{ °C}$ , ou  $-40\text{ °C}$  à  $+85\text{ °C}$ . Par conséquent, la caractéristique fréquence/température de l'unité de cristal est généralement le facteur le plus important pour déterminer la tenue de la fréquence des oscillateurs à quartz simple en boîtier (SPXO - Simple Packaged Crystal Oscillator). Pour les unités de cristal basse fréquence qui vibrent en modes de flexion ou d'extension, des écarts allant jusqu'à  $\pm 1 \times 10^{-4}$  peuvent être attendus, tandis que les types de cisaillement d'épaisseur (fréquences supérieures à environ 1 MHz) peuvent varier d'environ  $\pm 2 \times 10^{-5}$  sur une plage de température comprise entre  $-40\text{ °C}$  et  $+90\text{ °C}$ . Lorsqu'une meilleure stabilité de fréquence est exigée, il est nécessaire de fournir un circuit de compensation de température ou de fournir un environnement stabilisé à la température pour l'unité de cristal au moyen d'un dispositif de régulation de température. Les caractéristiques spéciales des oscillateurs de ces types sont examinées en 5.3. Le comportement thermique de la fréquence des unités de cristal dépend des dimensions de la lame de quartz, du mode de vibration, du matériau et de l'épaisseur des électrodes, des méthodes de montage utilisées et, principalement, de l'orientation de la lame par rapport aux axes cristallographiques. Figure 5 montre les caractéristiques qui peuvent être obtenues pour différentes orientations d'une unité de cristal coupée en AT.



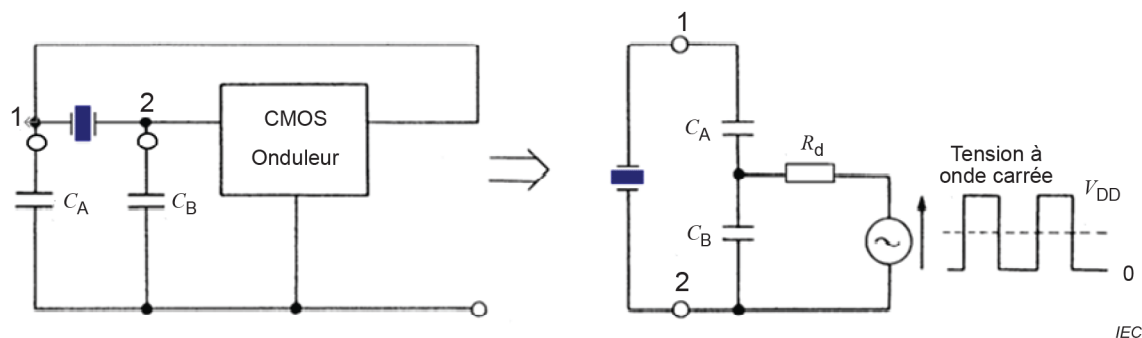
**Figure 5 – Caractéristiques fréquence-température de cristaux de coupe AT selon différents angles d'orientation**

Figure 6 représente les caractéristiques qui sont obtenues avec des cristaux de diapason, par exemple à la fréquence d'horloge commune 32,768 kHz.



**Figure 6 – Caractéristiques fréquence-température d'un cristal type de diapason**

La variation de fréquence en fonction du temps, généralement appelée "vieillessement de fréquence", est principalement fonction du cristal utilisé. Un taux de vieillissement classique des cristaux en mode fondamental de 10 MHz est de  $2 \text{ à } 5 \times 10^{-6}$  par an, alors que les unités en mode partiel et les unités bien vieilles présentent des valeurs inférieures. En règle générale, le vieillissement n'est pas important dans les applications utilisant un oscillateur à quartz simple en boîtier, car il est faible par rapport aux écarts de fréquence causés par les variations de température. Le circuit d'oscillation de l'oscillateur à quartz simple en boîtier est un amplificateur de rétroaction permettant de faire fonctionner l'unité de cristal, et le circuit oscillant CMOS utilisé dans les oscillateurs à quartz pour les horloges, etc., est essentiellement un circuit équivalent à celui présenté à la Figure 7, le côté circuit pouvant être représenté par une résistance interne  $R_d$  et une alimentation en tension à onde carrée qui varie de 0 V à  $V_{DD}$ .



$C_A$  et  $C_B$  sont des capacités;

$R_d$  est la résistance d'amortissement.

**Figure 7 – Circuit oscillant CMOS et circuit équivalent**

Pour la tenue de la fréquence de l'oscillateur à quartz simple en boîtier, les caractéristiques de l'unité de cristal utilisée sont pratiquement les mêmes que celles de l'oscillateur. La tenue de la fréquence est déterminée par les caractéristiques de l'unité de cristal, parmi lesquelles les caractéristiques fréquence/température et le vieillissement sont généralement prédominants.

### 5.3 TCXO

Pour obtenir une meilleure stabilité que celle possible avec l'oscillateur à quartz simple en boîtier, des pilotes compensés en température (TCXO - Temperature Compensated Crystal Oscillator) peuvent être utilisés. La stabilité du pilote compensé en température est améliorée au détriment d'une plus grande complexité du circuit et d'un coût plus élevé.

Les pilotes compensés en température sont des oscillateurs qui assurent une compensation de température pour les caractéristiques fréquence/température, lesquelles fluctuent le plus dans les caractéristiques de tenue de la fréquence, de sorte que les fluctuations de fréquence sont encore inférieures à celles des caractéristiques fréquence/température théoriques des unités de cristal. Les nouveaux systèmes de communication permettant le passage à des bandes de fréquences élevées et l'utilisation efficace des fréquences nécessitent une importante tenue de la fréquence sur une large plage de températures. Les pilotes compensés en température sont utilisés dans de nombreux systèmes de communication mobiles en tant qu'oscillateurs de référence adaptés à cet effet. Ils peuvent généralement être classés dans les trois catégories suivantes en fonction de la méthode de compensation fréquence-température et des performances exigées.

#### a) Type analogique direct [Figure 8 a)]

Le circuit de compensation de température étant directement connecté à l'unité de cristal, une composante de résistance du circuit est ajoutée au circuit de résonance à quartz, ce qui entraîne une diminution de  $Q$  effective et une variation importante de  $Q$  effective en fonction de la température. La section de circuit de compensation de température exige une conception du circuit de compensation permettant d'aplanir les caractéristiques de fréquence de l'unité de cristal. En règle générale, une tenue de la fréquence d'environ  $\pm 1,5$  à  $\pm 3,0 \times 10^{-6}$  ( $-40^\circ\text{C}$  à  $+85^\circ\text{C}$ ) peut être obtenue.