

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60679-2

Première édition
First edition
1981-01

Oscillateurs pilotés par quartz

**Deuxième partie:
Guide pour l'utilisation des oscillateurs
pilotés par quartz**

Quartz crystal controlled oscillators

**Part 2:
Guide to the use of quartz crystal
controlled oscillators**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60679-2: 1981

Numéros des publications

Depuis le 1^{er} janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement
(Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates
(On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60679-2

Première édition
First edition
1981-01

Oscillateurs pilotés par quartz

**Deuxième partie:
Guide pour l'utilisation des oscillateurs
pilotés par quartz**

Quartz crystal controlled oscillators

**Part 2:
Guide to the use of quartz crystal
controlled oscillators**

© IEC 1981 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

U

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4

CHAPITRE III: GUIDE POUR L'UTILISATION DES OSCILLATEURS PILOTÉS PAR QUARTZ

Articles

1. Domaine d'application	6
2. Termes et définitions	6
3. Caractéristiques des oscillateurs pilotés par quartz	8
3.1 Considérations générales	8
3.2 Types des oscillateurs pilotés par quartz	10
3.2.1 Oscillateur à quartz en boîtier (PXO)	10
3.2.2 Oscillateur à quartz à compensation de température (TCXO)	12
3.2.3 Oscillateur à quartz commandé par une tension (VCXO)	20
3.2.4 Oscillateur à quartz à enceinte à température régulée (OCXO)	22
4. Spécification et mesures des caractéristiques de fonctionnement d'un oscillateur	30
4.1 Influence de l'environnement	30
4.2 Variations de fréquence aléatoires	34
5. Spécification des paramètres d'oscillateur	38
5.1 Temps de stabilisation	38
5.1.1 Oscillateur à quartz en boîtier (PXO)	40
5.1.2 Oscillateur à quartz à compensation de température (TCXO)	40
5.1.3 Oscillateur à quartz à enceinte à température régulée (OCXO) (enceinte à un étage)	40
5.1.4 Oscillateur à quartz à enceinte à température régulée (OCXO) (enceinte à deux étages)	42
5.2 Gamme d'ajustage de la fréquence	42
5.2.1 Oscillateur à quartz en boîtier (PXO)	42
5.2.2 Oscillateur à quartz à compensation de température (TCXO)	44
5.2.3 Oscillateur à quartz à enceinte à température régulée (OCXO) (enceinte à un étage)	44
5.2.4 Oscillateur à quartz à enceinte à température régulée (OCXO) (enceinte à deux étages)	44
5.3 Stabilité de fréquence dans les conditions de température en régime permanent	44
6. Liste de contrôle des caractéristiques des oscillateurs pilotés par quartz à spécifier dans les feuilles particulières	48
BIBLIOGRAPHIE	56

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
 CHAPTER III: GUIDE TO THE USE OF QUARTZ CRYSTAL CONTROLLED OSCILLATORS	
Clause	
1. Scope	7
2. Terms and definitions	7
3. Characteristics of crystal controlled oscillators	9
3.1 General considerations	9
3.2 Types of crystal controlled oscillators	11
3.2.1 Packaged crystal oscillator (PXO)	11
3.2.2 Temperature compensated crystal oscillator (TCXO)	13
3.2.3 Voltage-controlled crystal oscillator (VCXO)	21
3.2.4 Oven-controlled crystal oscillator (OCXO)	23
4. Specification and measurement of oscillator performance	31
4.1 Environmental effects	31
4.2 Random frequency variations	35
5. Specification of oscillator parameters	39
5.1 Stabilization time	39
5.1.1 Packaged crystal oscillator (PXO)	41
5.1.2 Temperature compensated crystal oscillator (TCXO)	41
5.1.3 Oven-controlled crystal oscillator (OCXO) (single-stage oven)	41
5.1.4 Oven-controlled crystal oscillator (OCXO) (two-stage oven)	43
5.2 Frequency adjustment range	43
5.2.1 Packaged crystal oscillator (PXO)	43
5.2.2 Temperature compensated crystal oscillator (TCXO)	45
5.2.3 Oven-controlled crystal oscillator (OCXO) (single-stage oven)	45
5.2.4 Oven-controlled crystal oscillator (OCXO) (two-stage oven)	45
5.3 Frequency stability under steady-state temperature conditions	45
6. Check list of crystal-controlled oscillator characteristics to be specified in article sheets	49
 BIBLIOGRAPHY	 56

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

OSCILLATEURS PILOTÉS PAR QUARTZ

Deuxième partie: Guide pour l'utilisation des oscillateurs pilotés par quartz

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

La présente norme a été établie par le Comité d'Etudes N° 49 de la CEI: Dispositifs piézoélectriques pour la commande et le choix de la fréquence.

Elle constitue la deuxième partie qui comprend le chapitre III de la norme de la CEI concernant les oscillateurs pilotés par quartz.

La première partie, comprenant les chapitres I et II: Informations générales, conditions et méthodes d'essai, est parue comme Publication 679-1 de la CEI.

La troisième partie, comprenant le chapitre IV: Encombrements normalisés, paraîtra comme Publication 679-3 de la CEI.

Un projet fut discuté lors de la réunion tenue à Tokyo en 1975. A la suite de cette réunion, un projet révisé, document 49(Bureau Central)116, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en octobre 1978.

Les Comités nationaux des pays ci-après se sont prononcés explicitement en faveur de la publication des articles 1 à 5:

Afrique du Sud (République d')	Etats-Unis d'Amérique
Allemagne	France
Belgique	Royaume-Uni
Canada	Suède
Danemark	Suisse
Egypte	Turquie
Espagne	Yugoslavie

Un projet de l'article 6 fut discuté lors de la réunion tenue à Zurich en 1979. A la suite de cette réunion, un projet révisé, document 49(Bureau Central)139, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en juin 1980.

Les Comités nationaux des pays ci-après se sont prononcés explicitement en faveur de la publication de cet article:

Afrique du Sud (République d')	Italie
Allemagne	Nouvelle-Zélande
Belgique	Royaume-Uni
Bulgarie	Suède
Canada	Suisse
Egypte	Turquie
Espagne	Union des Républiques Socialistes
France	Soviétiques

Autres publications de la CEI citées dans la présente norme:

- Publications n°s 314: Enceintes à température régulée pour les quartz.
 679-1: Oscillateurs pilotés par quartz,
 Première partie: Information générales, conditions et méthodes d'essai.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

QUARTZ CRYSTAL CONTROLLED OSCILLATORS**Part 2: Guide to the use of quartz crystal controlled oscillators**

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This standard has been prepared by IEC Technical Committee No. 49: Piezoelectric Devices for Frequency Control and Selection.

It forms Part 2 which contains Chapter III of the IEC standard for quartz crystal controlled oscillators.

Part 1, containing Chapters I and II: General Information, Test Conditions and Methods, has been issued as IEC Publication 679-1.

Part 3, containing Chapter IV: Standard Outlines, will be issued as IEC Publication 679-3.

A draft was discussed at the meeting held in Tokyo in 1975. As a result of this meeting, a revised draft, Document 49(Central Office)116, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in October 1978.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of publication of Clauses 1 to 5:

Belgium	Spain
Canada	Sweden
Denmark	Switzerland
Egypt	Turkey
France	United Kingdom
Germany	United States of America
South Africa (Republic of)	Yugoslavia

A draft of Clause 6 was discussed at the meeting held in Zurich in 1979. As a result of this meeting, a revised draft, Document 49(Central Office)139, was circulated to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in June 1980.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of publication of this clause:

Belgium	South Africa (Republic of)
Bulgaria	Spain
Canada	Sweden
Egypt	Switzerland
France	Turkey
Germany	Union of Soviet Socialist
Italy	Republics
New Zealand	United Kingdom

Other IEC publications quoted in this standard:

- Publications Nos: 314: Temperature Control Devices for Quartz Crystal Units.
 679-1: Quartz Crystal Controlled Oscillators,
 Part 1: General Information, Test Conditions and Methods.

OSCILLATEURS PILOTÉS PAR QUARTZ

Deuxième partie: Guide pour l'utilisation des oscillateurs pilotés par quartz

CHAPITRE III: GUIDE POUR L'UTILISATION DES OSCILLATEURS PILOTÉS PAR QUARTZ

1. Domaine d'application

Les oscillateurs pilotés par quartz sont généralement utilisés pour fournir les fréquences stables requises pour les télécommunications et les systèmes de navigation et de traitement de l'information. La stabilité de fréquence procurée par les oscillateurs pilotés par quartz varie d'environ 1×10^{-4} à 1×10^{-10} en fonction de la fréquence de fonctionnement, des conditions ambiantes et de la façon particulière dont l'oscillateur est conçu. La spécification et/ou la description des caractéristiques de fonctionnement des oscillateurs à quartz restent une source de malentendu et d'insatisfaction non seulement pour le fabricant, mais aussi pour l'utilisateur. L'objectif de ce guide, conjointement avec la Publication 679-1 de la CEI: Première partie: Informations générales, conditions et méthodes d'essai, est de résumer quelques-unes des caractéristiques de fonctionnement des oscillateurs à quartz et de suggérer les paramètres importants qu'il convient d'introduire dans chaque spécification couvrant ces dispositifs.

Ce guide décrit les propriétés générales des oscillateurs à quartz et les caractéristiques de fonctionnement qui peuvent être obtenues avec ces dispositifs. Par commodité, les oscillateurs à quartz ont été classés de façon plutôt arbitraire en quatre groupes généraux: oscillateurs à quartz en boîtier (PXO), oscillateurs à quartz à compensation de température (TCXO), oscillateurs à quartz commandés par la tension (VCXO) et oscillateurs à quartz à enceinte à température régulée (OCXO).

Note. — Certains acronymes communément utilisés, comme VCXO, sont indiqués dans cet article et utilisés dans le reste de la présente norme par souci de concision. Cela s'applique aussi à l'utilisation du terme «oscillateur» à la place de «oscillateur piloté par quartz».

Il est évident que les variations possibles de l'importance des moyens de commande et de la combinaison de ces moyens sont presque illimitées; c'est pourquoi il peut être difficile de faire entrer des dispositifs particuliers dans ces catégories. Il est utile, cependant, d'examiner les principes de fonctionnement des dispositifs dans ces catégories générales afin d'estimer les caractéristiques qui peuvent être obtenues avec différentes combinaisons.

Cette norme comporte aussi un exposé général des spécifications et des mesures de la stabilité de fréquence utiles pour évaluer le fonctionnement d'un oscillateur et également un exposé de certaines conditions de fonctionnement qui sont souvent mal comprises et même incorrectement spécifiées.

2. Termes et définitions

Les termes spéciaux utilisés dans cette norme sont définis dans la Publication 679-1 de la CEI.

QUARTZ CRYSTAL CONTROLLED OSCILLATORS

Part 2: Guide to the use of quartz crystal controlled oscillators

CHAPTER III: GUIDE TO THE USE OF QUARTZ CRYSTAL CONTROLLED OSCILLATORS

1. Scope

Crystal controlled oscillators are commonly used to provide the stable frequencies required for telecommunications, navigation and data processing systems. Depending upon the frequency of operation, ambient conditions and specific oscillator design, crystal controlled oscillators are capable of providing frequency stability varying from about 1×10^{-4} to 1×10^{-10} . The specification and/or description of the performance characteristics of crystal controlled oscillators has remained a source of misunderstanding and dissatisfaction for both manufacturer and user. It is the objective of this guide, in conjunction with IEC Publication 679-1: Part 1: General Information, Test Conditions and Methods, to summarize some of the performance characteristics of crystal controlled oscillators and to suggest the important parameters which should be included in any crystal oscillator specification.

This guide describes the general properties of, and performance characteristics to be obtained with quartz crystal controlled oscillators. For convenience, crystal controlled oscillators have been rather arbitrarily categorized in four general groups: packaged crystal oscillators (PXO), temperature compensated crystal oscillators (TCXO), voltage-controlled crystal oscillators (VCXO) and oven-controlled crystal oscillators (OCXO).

Note. — Certain commonly used acronyms such as VCXO, are noted in this clause and used elsewhere in this standard for purposes of brevity. This also applies to the use of the term "oscillator" instead of "crystal controlled oscillator".

Clearly, almost unlimited variation in both degree and combination of design is possible, so that it may be difficult to fit particular devices into these categories. However, it is useful to consider the principles of operation and performance capabilities of devices in these general categories in order to estimate the characteristics which may be possible with various combinations.

Also included is a general discussion of the specification and measurement of frequency stability which is useful in evaluating oscillator performance, as well as a discussion of some of the important performance factors which are often misunderstood and even incorrectly specified.

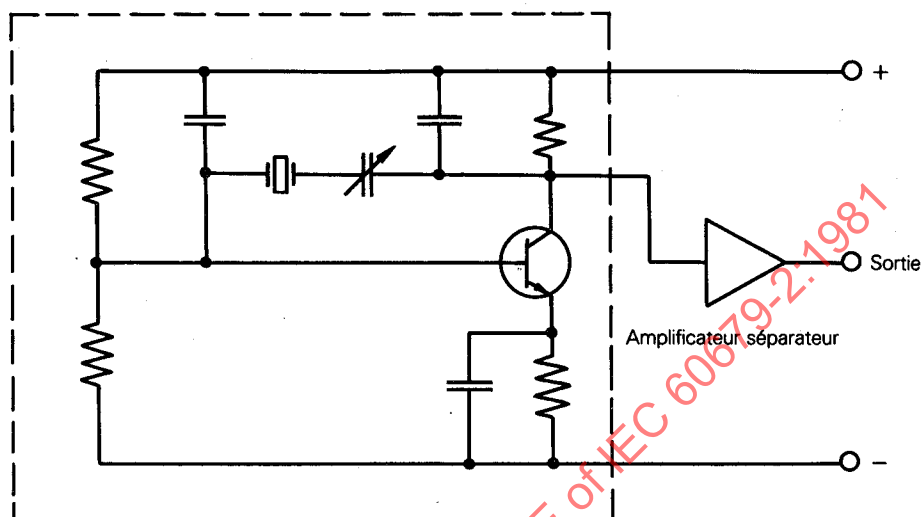
2. Terms and definitions

Special terms used in this standard are defined in IEC Publication 679-1.

3. Caractéristiques des oscillateurs pilotés par quartz

3.1 Considérations générales

En termes très généraux, un oscillateur piloté par quartz peut être décrit comme consistant en un amplificateur ou circuit de gain, avec un circuit à réaction positive. Un circuit typique d'oscillateur est représenté à la figure 1.



222/81

FIG. 1. – Schéma de base d'un oscillateur piloté par quartz.

L'oscillation propre d'un tel circuit se produira à condition que le gain de boucle soit supérieur à l'unité, à une fréquence pour laquelle la phase totale de boucle est égale à $2n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$). Le niveau du signal d'oscillation dépendra des caractéristiques du circuit de gain, alors que la fréquence d'oscillation sera déterminée par des considérations de phase. Le spectre du signal de sortie dépendra du niveau d'oscillation, du bruit électrique introduit par les éléments de circuit et des largeurs de bande des circuits. En général, la largeur du spectre est extrêmement faible et, pour la plupart des applications, on ne considère que l'allure de la fréquence centrale ou de la fréquence moyenne. Si l'on néglige l'altération de la pureté du signal par le bruit électrique, on peut dire que la fréquence moyenne d'oscillation est toujours déterminée par les conditions requises par la phase de boucle. Toute perturbation dans la phase de boucle entraîne une déviation de fréquence. On considère généralement que ces perturbations sont de deux classes, soit:

- a) les écarts dans les paramètres du circuit électrique;
- b) les écarts dans les caractéristiques du quartz.

La classe a) comprend des facteurs tels que les coefficients de température des condensateurs, inductances, 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, la perturbation de phase ($\Delta\theta_N$) dans le circuit de transfert de phase provoquera une variation de la fréquence moyenne d'oscillation:

$$\Delta f = f_0 \frac{\Delta\theta_N}{2Q_x}$$

où:

f_0 est la fréquence nominale d'oscillation et Q_x est le Q effectif du quartz à bande étroite

3. Characteristics of crystal controlled oscillators

3.1 General considerations

In very general terms, a crystal controlled oscillator may be described as consisting of an amplifier, or gain circuit, together with a positive feedback network. A typical oscillator circuit is shown in Figure 1.

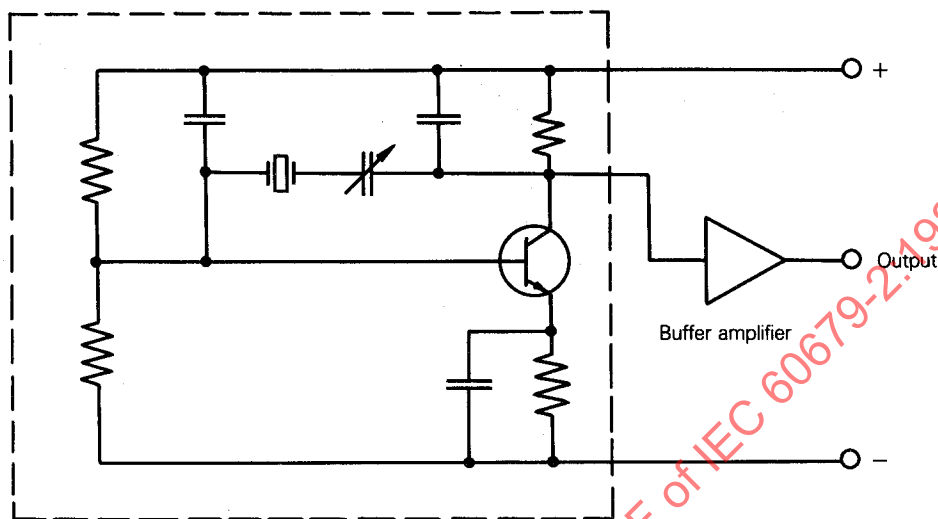


FIG. 1. - Basic crystal controlled oscillator circuit.

Self-oscillation of such a circuit will occur provided the loop gain exceeds unity at some frequency for which the total loop phase is $2n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$). The level of the oscillating signal will depend on circuit gain characteristics, while the frequency of oscillation will be determined by phase considerations. The output signal spectrum will depend upon the level of oscillation, the electrical noise introduced by circuit elements and the bandwidths of the circuits. Generally, the spectral width is extremely small and, for a majority of applications, only the centre or average frequency behaviour need be considered. Disregarding for the moment the degradation of a signal purity by electrical noise, the average frequency of oscillation will always be determined by the loop phase requirement. Deviations in frequency will result whenever any perturbation of loop phase occurs. These perturbations may be generally considered to be of two classes, namely:

- a) deviations in electrical circuit parameters;
- b) deviations in the crystal unit.

In class *a*) are included such factors as the temperature coefficients of capacitors, inductors, resistors and transistors; the ageing of these devices; their voltage and current characteristics and their susceptibility to mechanical disturbance. Whatever the cause, a phase perturbation ($\Delta\phi_N$) in the circuit transfer phase will cause a change in the average frequency of oscillation:

$$\Delta f = f_0 \frac{\Delta\phi_N}{2Q_X}$$

where:

f_0 is the nominal frequency of oscillation and Q_X is the effective Q of the narrow-band crystal network

Les écarts de la classe *b*) comprennent les variations des caractéristiques du quartz provoquées par la température, le gradient de température, le niveau d'excitation, «le vieillissement de fréquence» et l'environnement mécanique (chocs, accélération et vibrations).

Le circuit de l'oscillateur à quartz est généralement réalisé de manière que la bande de son circuit de gain soit aussi large que le permet la technique afin de réduire autant que possible la sensibilité de phase du réseau. D'autre part, le circuit de réaction est généralement conçu de telle façon que la bande de transmission soit aussi étroite que possible afin que la fréquence d'oscillation ne dépende essentiellement que des caractéristiques du quartz. Lorsque l'ajustage de la fréquence est nécessaire, il est réalisé de préférence en introduisant une réactance variable qui modifie la fréquence de transmission du circuit du quartz sans élargir la bande de transmission. Lorsque l'on suit ces règles générales, la stabilité de fréquence de l'oscillateur dépend principalement des caractéristiques du quartz; il convient de le choisir de façon que:

- a) il possède un facteur de surtension élevé;
- b) il présente une faible variation de la fréquence dans la gamme de fonctionnement prévue;
- c) il ait une faible variation de la fréquence en fonction du niveau d'excitation;
- d) sa sensibilité aux chocs mécaniques, à l'accélération et aux vibrations soit faible, et
- e) il présente un faible «vieillissement de la fréquence».

3.2 Types des oscillateurs pilotés par quartz

3.2.1 Oscillateur à quartz en boîtier (PXO)

La plupart des équipements électroniques doivent fonctionner dans une certaine gamme de températures ambiantes, c'est-à-dire de 0°C à 60°C, ou de -40°C à +80°C. Par conséquent, la caractéristique fréquence-température d'un quartz est habituellement le facteur le plus important pour déterminer la stabilité de la fréquence des oscillateurs à quartz en boîtier.

On peut s'attendre à des écarts de l'ordre de $\pm 1 \times 10^{-4}$ pour les quartz basse fréquence vibrant en mode de flexion ou d'extension, tandis que pour les quartz vibrant en cisaillement d'épaisseur (fréquences supérieures à 1 MHz environ) les écarts peuvent être de l'ordre de $\pm 2 \times 10^{-5}$ dans une gamme de températures de -40°C à +90°C.

Lorsqu'une meilleure stabilité de fréquence est requise, il est nécessaire de fournir un circuit de compensation de la température, ou de placer le quartz dans un environnement à température stable au moyen d'un système régulateur de température.

Les caractéristiques particulières des oscillateurs de ces types sont considérées dans les articles suivants.

La tenue en fréquence d'un quartz en fonction de la température est caractérisée par les dimensions de la lame de quartz, le mode de vibration, le métal et l'épaisseur des électrodes, les modes de suspension utilisés et, principalement, l'orientation de la lame par rapport aux axes cristallographiques. Les caractéristiques qui peuvent être obtenues pour des orientations différentes d'un résonateur à quartz de coupe AT sont présentées à la figure 2, page 12 [1]*. Un exposé plus complet des caractéristiques des quartz en fonction de la température peut être trouvé dans [2]*.

* [1] et [2], voir la bibliographie, page 56.

Class *b*) deviations include changes in crystal unit characteristics caused by temperature, temperature gradient, drive level, “frequency ageing” and mechanical environment (shock, acceleration and vibration).

The crystal oscillator circuit is generally designed to use a gain circuit having as broad a band as practicable, in order to reduce the network phase sensitivity as much as possible. The crystal feedback network, on the other hand, is usually designed to have as narrow a transmission band as can be obtained so as to make the frequency of oscillation depend essentially only on the crystal unit characteristics. When frequency adjustment is required, it is preferably accomplished by introducing a variable reactance which changes the transmission frequency of the crystal network without widening the transmission band. When these general practices are followed, the oscillator frequency stability will depend primarily upon the characteristics of the crystal unit, which should be chosen so as to:

- a) have a high Q -factor;
- b) exhibit a small change of frequency over the intended operating temperature range;
- c) have a low drive-level coefficient of frequency;
- d) provide low sensitivity to mechanical shock, acceleration and vibration, and
- e) exhibit a small frequency drift due to ageing.

3.2 *Types of crystal controlled oscillators*

3.2.1 *Packaged crystal oscillator (PXO)*

Most electronic equipment is required to operate over a range of ambient temperatures, i.e. 0 °C to 60 °C, or –40 °C to +80 °C. Consequently, the frequency-temperature characteristic of the crystal unit is usually the most important factor in determining the frequency stability of packaged crystal oscillators.

For low-frequency crystal units vibrating in flexural or extensional modes, deviations as great as $\pm 1 \times 10^{-4}$ might be expected, while the thickness shear types (frequencies above about 1 MHz) could be expected to deviate by about $\pm 2 \times 10^{-5}$ over a temperature range of –40 °C to +90 °C.

When better frequency stability is required, it is necessary to provide temperature compensating circuitry, or to provide a temperature-stabilized environment for the crystal unit by means of a temperature control device.

Special characteristics of oscillators of these types are considered in later clauses.

The temperature behaviour of frequency of crystal units is dependent upon the dimensions of the quartz plate, the mode of vibration, the material and thickness of electrodes, the mounting methods employed and, mainly, the orientation of the plate with respect to the crystallographic axes. Figure 2, page 13, shows the characteristics which may be obtained for various orientations of an AT-cut quartz resonator [1]*. A more complete discussion of temperature characteristics of crystal units may be found in [2]*.

* [1] and [2], see the Bibliography, page 56.

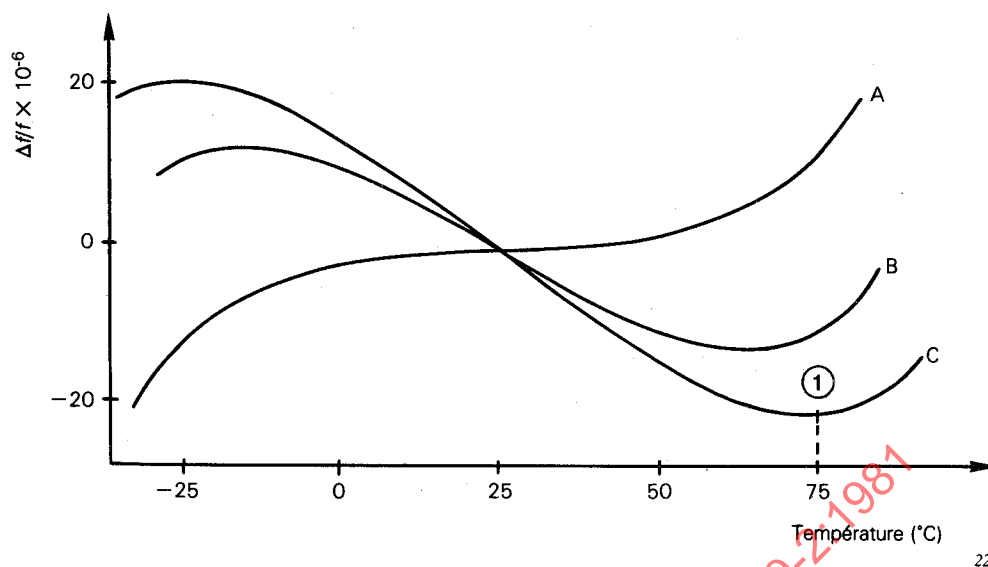


FIG. 2. - Caractéristique fréquence-température des quartz typiques de coupe AT en fonction de différents angles de coupe.

La variation de fréquence en fonction du temps, communément désignée sous le terme de «vieillessement», est déterminée en premier lieu par le cristal de quartz [2]. Le vieillissement typique pour les quartz à 10 MHz sur le mode fondamental est de 1×10^{-7} par semaine, tandis que les quartz fonctionnant en modes partiels et les quartz bien vieillis présentent des valeurs inférieures à celui-ci. Le vieillissement ne présente généralement pas d'importance dans les applications où de simples oscillateurs en boîtier sont utilisés, car il est faible en comparaison des écarts de fréquence causés par les variations de la température.

3.2.2 Oscillateur à quartz à compensation de température (TCXO)

On peut utiliser un oscillateur à compensation de température (TCXO) pour obtenir une stabilité meilleure que celle qui est possible avec un simple oscillateur en boîtier. Cette meilleure stabilité peut être obtenue au prix d'une complexité accrue des circuits d'un format plus important, d'une consommation plus grande de puissance et d'un coût plus élevé.

Un circuit additionnel requis pour une compensation analogique de température est représenté en trait gras sur la figure 3, page 14. Une diode à capacité variable et un réseau thermistance-résistance ont été ajoutés à l'oscillateur de base (figure 1, page 8). Un régulateur de tension a été aussi introduit pour fournir la tension de référence de grande stabilité requise pour le circuit de compensation. Afin de réduire les effets des charges extérieures sur la fréquence d'oscillateur, un amplificateur séparateur plus complexe est aussi requis habituellement.

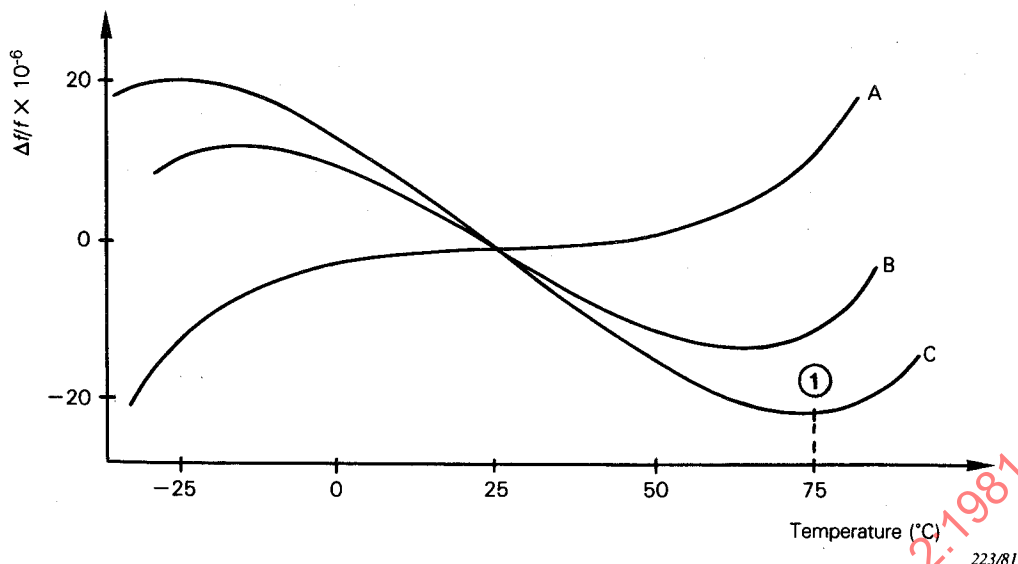


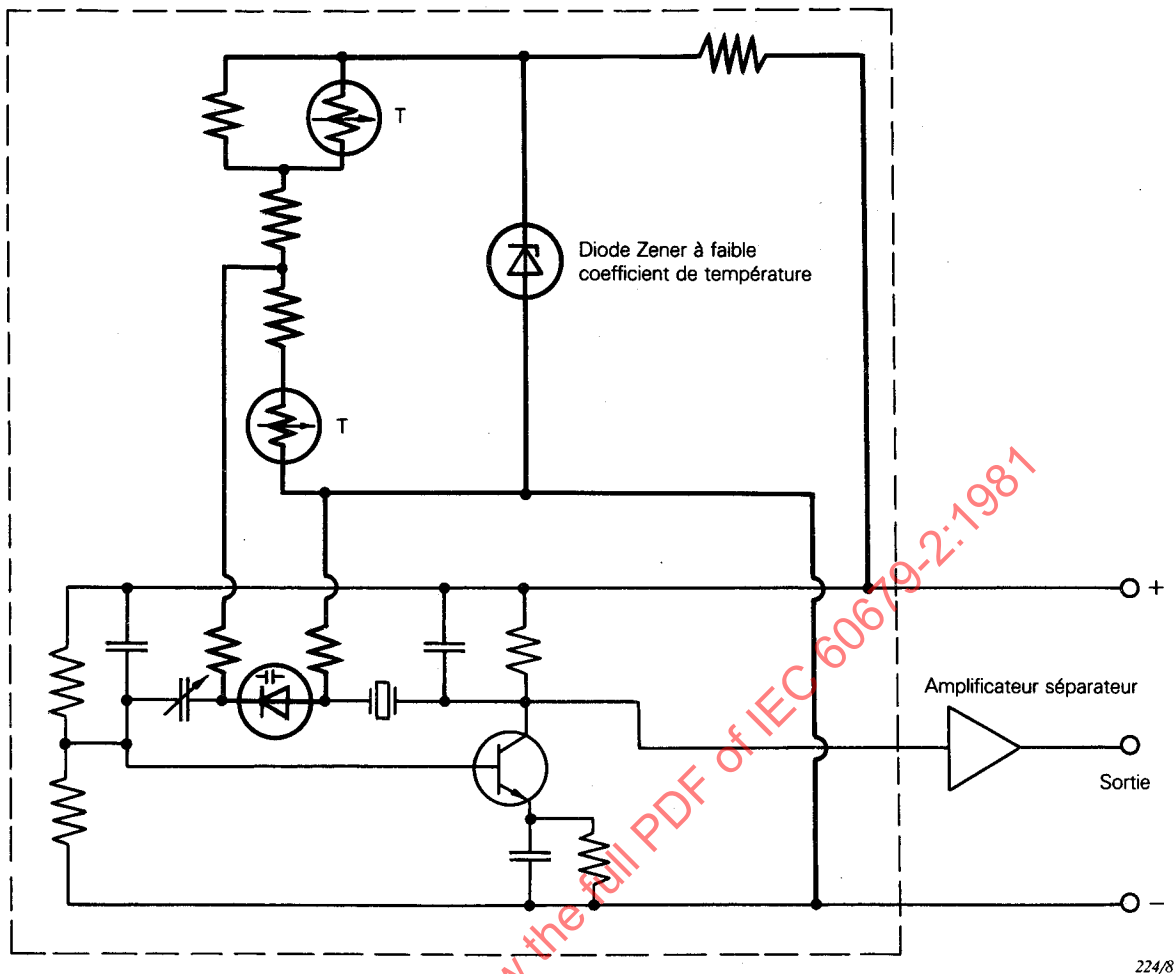
FIG. 2. – Frequency-temperature characteristics of typical AT-cut crystals with different orientation angles.

The frequency change as a function of time, usually referred to as “ageing”, is primarily determined by the quartz crystal used [2]. A typical ageing rate for 10 MHz fundamental mode crystals is 1×10^{-7} per week while overtone units and well-aged units exhibit values lower than this. The ageing is usually unimportant in applications using simple packaged oscillators, since it is small compared with the frequency deviations caused by temperature variations.

3.2.2 Temperature compensated crystal oscillator (TCXO)

To obtain better stability than that possible with the simple packaged crystal oscillator, a temperature compensated crystal oscillator (TCXO) can be used. This improved stability will be obtained at the expense of added circuit complexity, increased size, higher power consumption and increased cost.

Added circuitry required for analogue temperature compensation is shown by the heavy lines in Figure 3, page 15. A varactor diode and a thermistor-resistor network have been added to the basic oscillator (Figure 1, page 9). A voltage regulator has also been added to provide the highly stable reference voltage required for the compensation network. A more sophisticated output buffer amplifier will usually be required as well, in order to reduce the effects of external loading on the oscillator frequency.

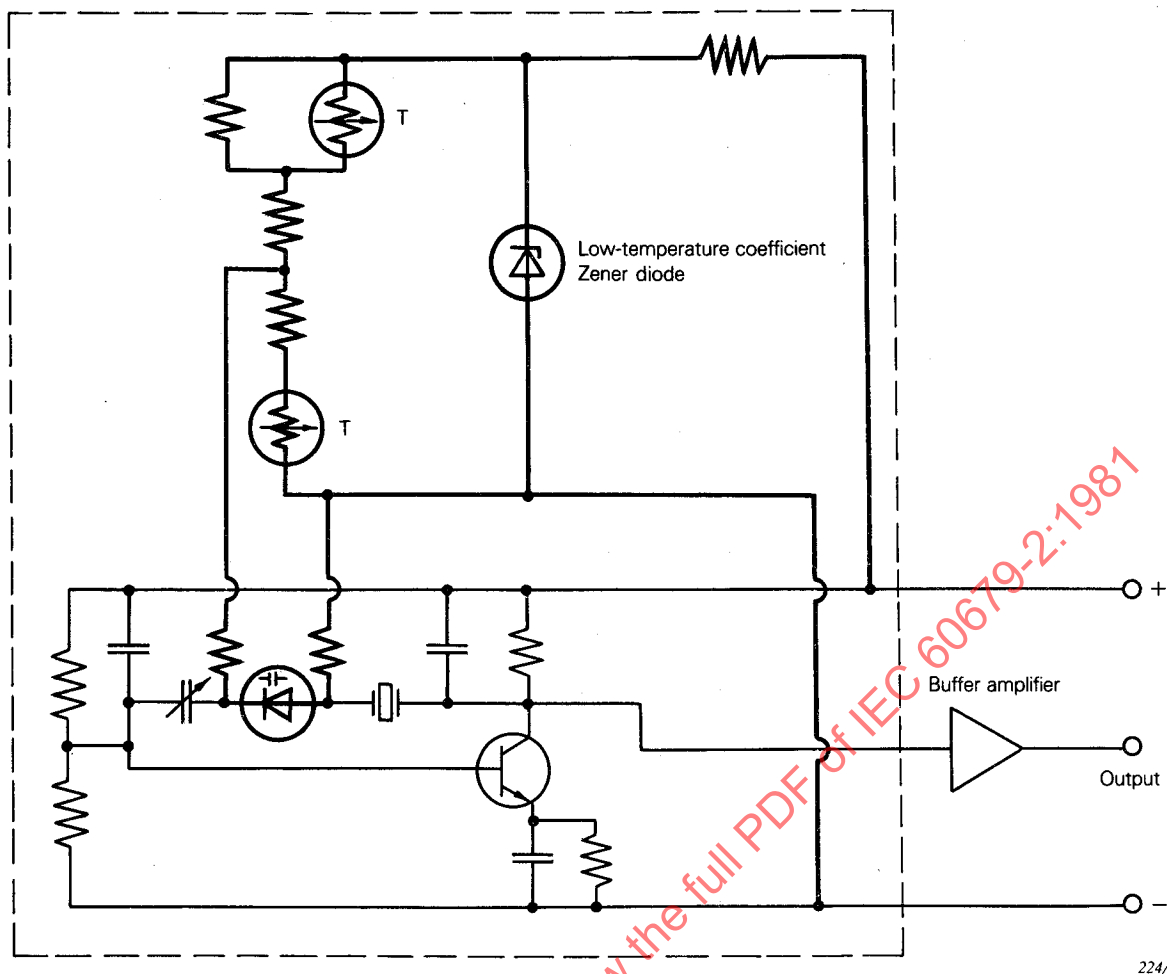


224/81

FIG. 3. – Oscillateur à quartz à compensation de température (TCXO) dans lequel la méthode analogique est utilisée.

La résistance de la thermistance dépend fortement de la température et le réseau est soigneusement conçu pour définir en fonction de la température la tension à appliquer à la diode à capacité variable. Cette tension modifie la valeur de la capacité de la diode à capacité variable et, par suite, la capacité de charge du quartz. Cette modification de la capacité de charge fait varier de façon prédéterminée la fréquence de l'oscillateur à quartz pour compenser la caractéristique fréquence-température du quartz aussi bien que toute autre variation du régulateur de tension, des composants actifs, éléments de circuit et amplificateurs séparateurs, provoquée par la température. Le choix des valeurs du réseau thermistance-résistance est difficile à faire et le calcul des paramètres du réseau exige souvent l'utilisation des techniques d'optimisation informatique.

Dans la plupart des applications, le quartz utilisé a une caractéristique fréquence-température semblable à la courbe B de la figure 2, page 12. Le choix du meilleur angle de coupe d'un quartz dépend de la stabilité exigée et de la gamme de températures. Un compromis doit être atteint entre, d'une part, le quartz ayant une pente fréquence-température d'une bonne linéarité entre points d'inversion pour une variation de fréquence d'une certaine importance et, d'autre part, le quartz ayant une variation de fréquence plus faible mais une pente de linéarité moins bonne. La pente la plus linéaire est plus facile à compenser, mais la compensation doit être plus précise en raison d'une variation plus grande de la fréquence. La localisation des points d'inversion doit aussi être prise en considération car la réalisation de la réactance de compensation est simplifiée lorsqu'un seul point d'inversion est situé dans la gamme de températures considérée.



224/81

FIG. 3. - Temperature compensated crystal oscillator (TCXO) using analogue method.

The resistance of the thermistor is strongly temperature-dependent, and the network is carefully designed to synthesize a voltage, which is a function of temperature, to be applied to the varactor. This voltage changes the capacitance value of the varactor and thus the load capacitance of the crystal. This load capacitance change varies the crystal oscillator frequency in a predetermined manner to compensate for the crystal frequency-temperature characteristic, as well as any other temperature-induced changes of the voltage regulator, active device, circuit elements and buffer amplifiers. The choice of values in the thermistor-resistor network is quite complicated and often requires computer optimization techniques to determine the network parameters.

The crystal used in most applications has a frequency-temperature characteristic similar to curve B in Figure 2, page 13. The best angle of cut for the crystal depends on the stability needed and the temperature range. A compromise must be reached between the crystal with a more linear frequency-temperature slope between turning points with its greater frequency change and the crystal with a smaller frequency change but a more non-linear slope. The more linear slope is easier to compensate, but it must be compensated more precisely because of the larger frequency change. Another consideration is the location of the turnover points, since synthesis of the compensating reactance is simplified when only one turnover occurs in the temperature range of interest.

Une autre méthode, désignée sous le terme de «compensation numérique», est parfois utilisée pour les TCXO. Dans cette méthode, la température du quartz est déterminée à l'aide d'un dispositif sensible et convertie en une représentation numérique. D'après cette valeur de température, une tension de valeur binaire est envoyée à un convertisseur numérique/analogique, où elle est convertie en une tension analogique qui est appliquée à la diode à capacité variable d'ajustage. Plusieurs mises en application de cette technique sont possibles, depuis une simple recherche tabulaire des valeurs de tension accumulées dans une mémoire numérique, effectuée en permanence par l'élément thermosensible, jusqu'à l'utilisation d'un microprocesseur pour résoudre une équation de la tension en fonction de la température, équation que ce dernier conserve en mémoire. En tout cas, l'approche numérique permet de résoudre par des moyens détournés la difficulté due à une forme particulière de la caractéristique fréquence-température, car elle peut en principe s'adapter à des fonctions de tous types. La limite théorique ne réside que dans la quantification des accroissements de température et celle de la tension analogique effectuée dans le convertisseur numérique/analogique. La figure 4. présente une méthode de compensation numérique.

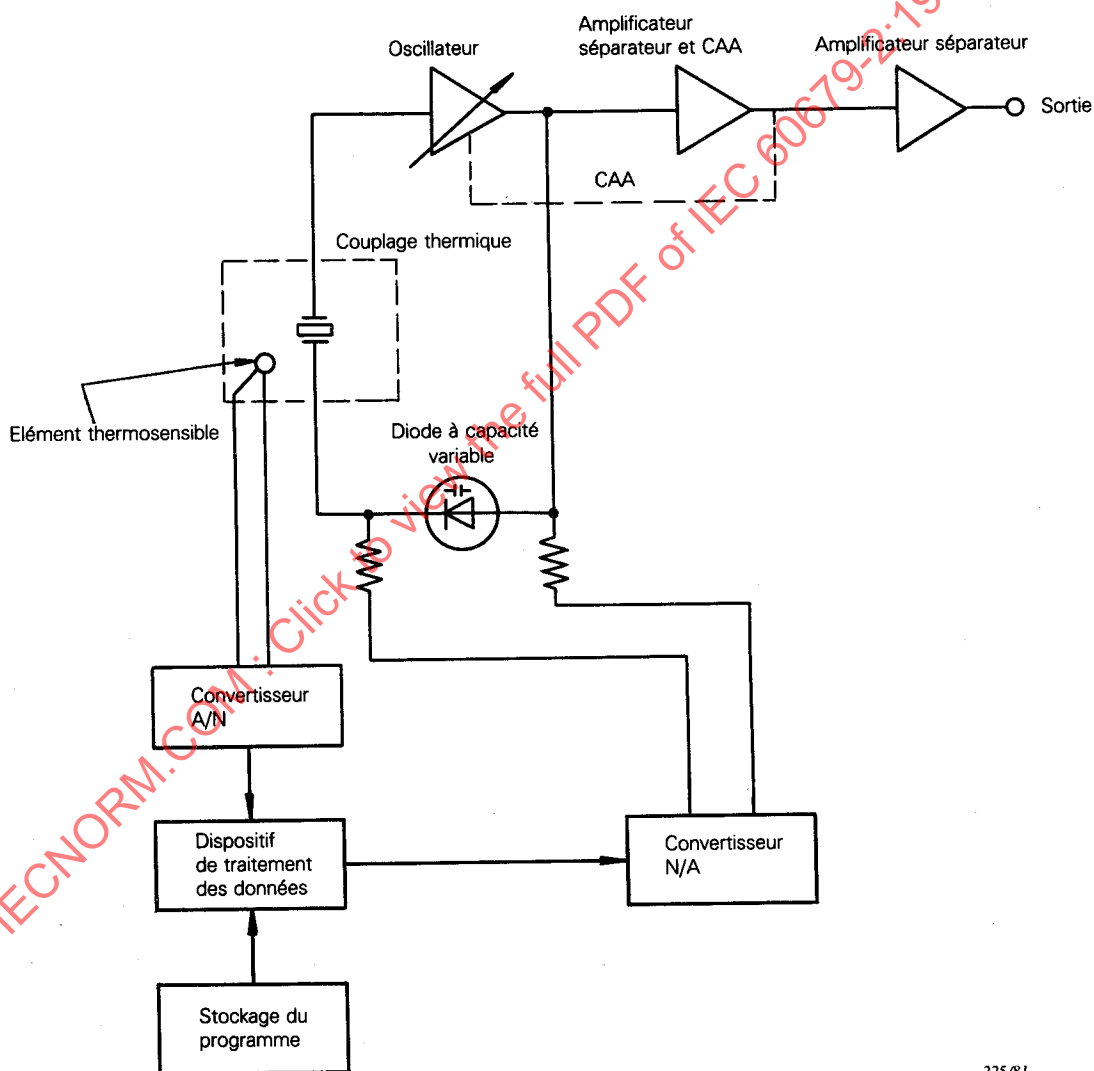


FIG. 4. - TCXO utilisant la méthode de compensation numérique.

Il est aussi possible d'utiliser une méthode hybride, dans laquelle un circuit analogique est utilisé pour obtenir une compensation approchée (soit un rapport d'amélioration de l'ordre de 10 à 20) et où ensuite la caractéristique de stabilité en fréquence est améliorée à l'aide d'une technique numé-

Another method sometimes used for TCXO's is the so-called "digital compensation method". In this method, the temperature of the crystal unit is determined with a sensing device and converted to a digital representation. Based upon this value of temperature, a calculated binary voltage value is sent to a digital-analogue converter, where it is converted to an analogue voltage, and applied to the varactor tuning element. Several implementations of this technique are possible, ranging from a simple reference table of voltage values stored in a digital memory, and indexed by the temperature sensor, to the use of a microprocessor to solve a stored equation of voltage as a function of temperature. In any case, the digital approach circumvents the problem of requiring a particular kind of frequency-temperature characteristic for the crystal unit, as any sort of function can in principle be accommodated. The theoretical limitation is only the quantization of temperature increments and of the analogue voltage produced by the digital-analogue converter. Figure 4 shows one method for digital compensation.

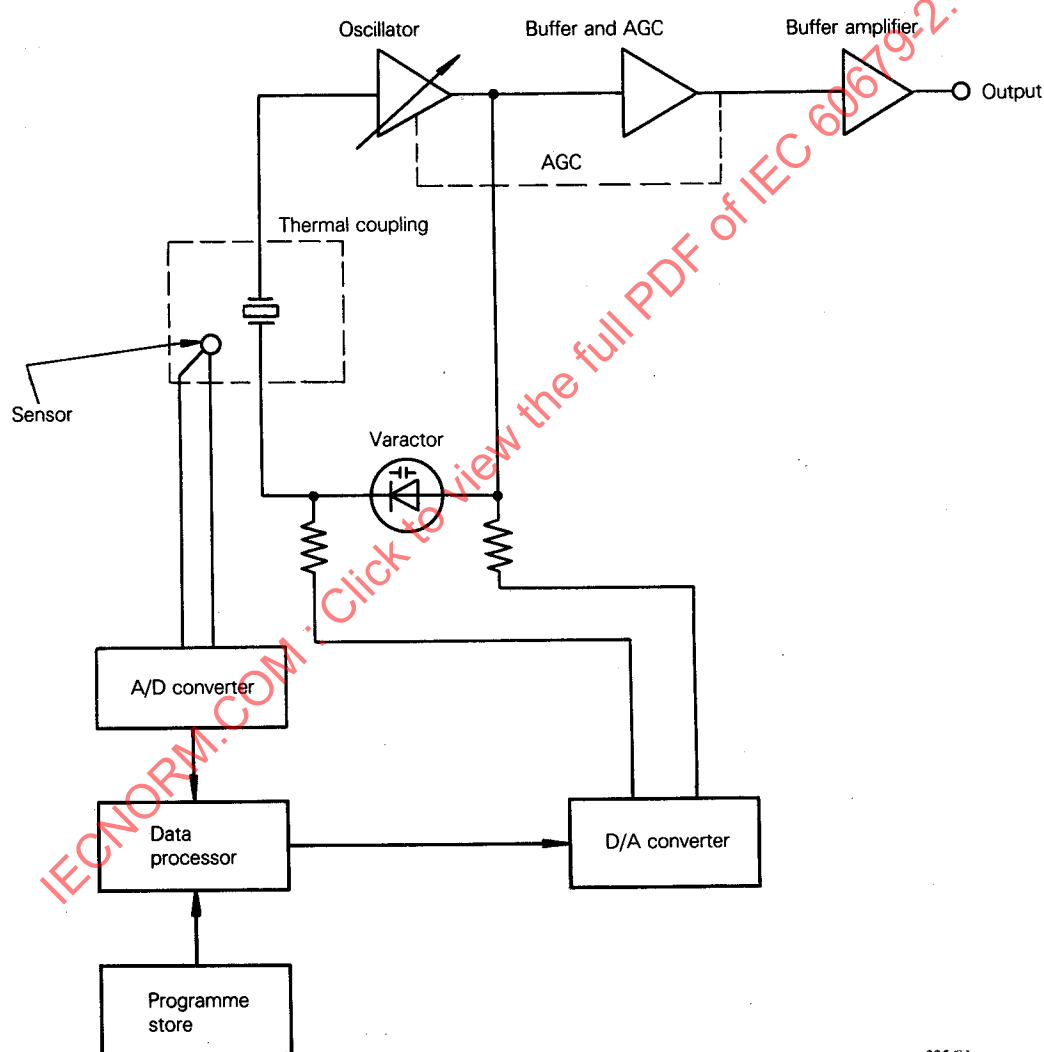
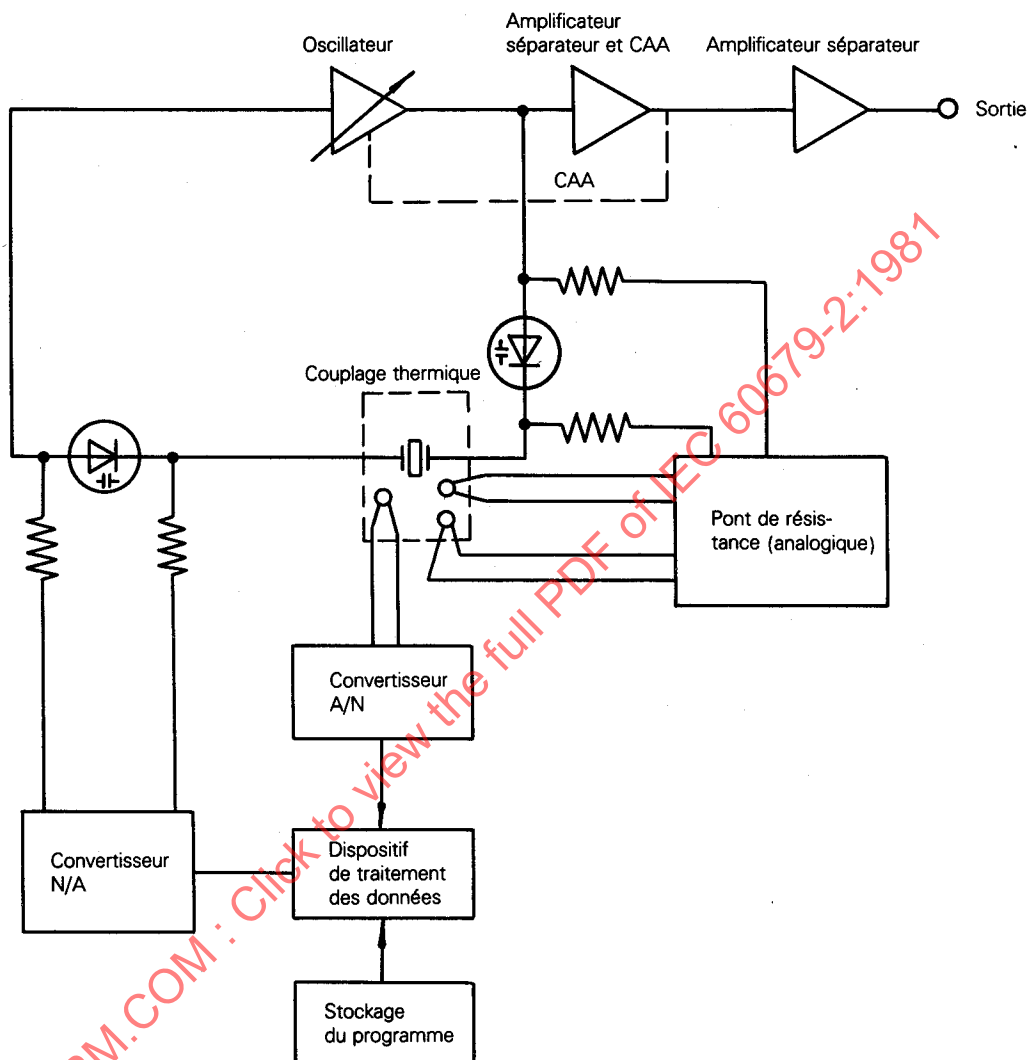


FIG. 4. - TCXO using digital compensation method.

It is also possible to use a hybrid method, in which an analogue circuit is used to obtain an approximate compensation (say, an improvement ratio of about 10 to 20), and then a digital technique of smaller dynamic voltage range is used to refine the frequency stability performance.

rique dans une gamme plus étroite de tension dynamique. Cette méthode, présentée à la figure 5 permet d'utiliser des circuits numériques ayant un nombre de chiffres binaires (bits) plus faible et, évidemment, de réduire le nombre de points de mémoire nécessités par la méthode de recherche tabulaire. Cependant, elle nécessite aussi l'introduction de composants tant analogiques que numériques dans l'oscillateur et requiert d'effectuer un plus grand nombre de mesures afin de déterminer à la fois les composantes des éléments analogiques et les coefficients numériques.



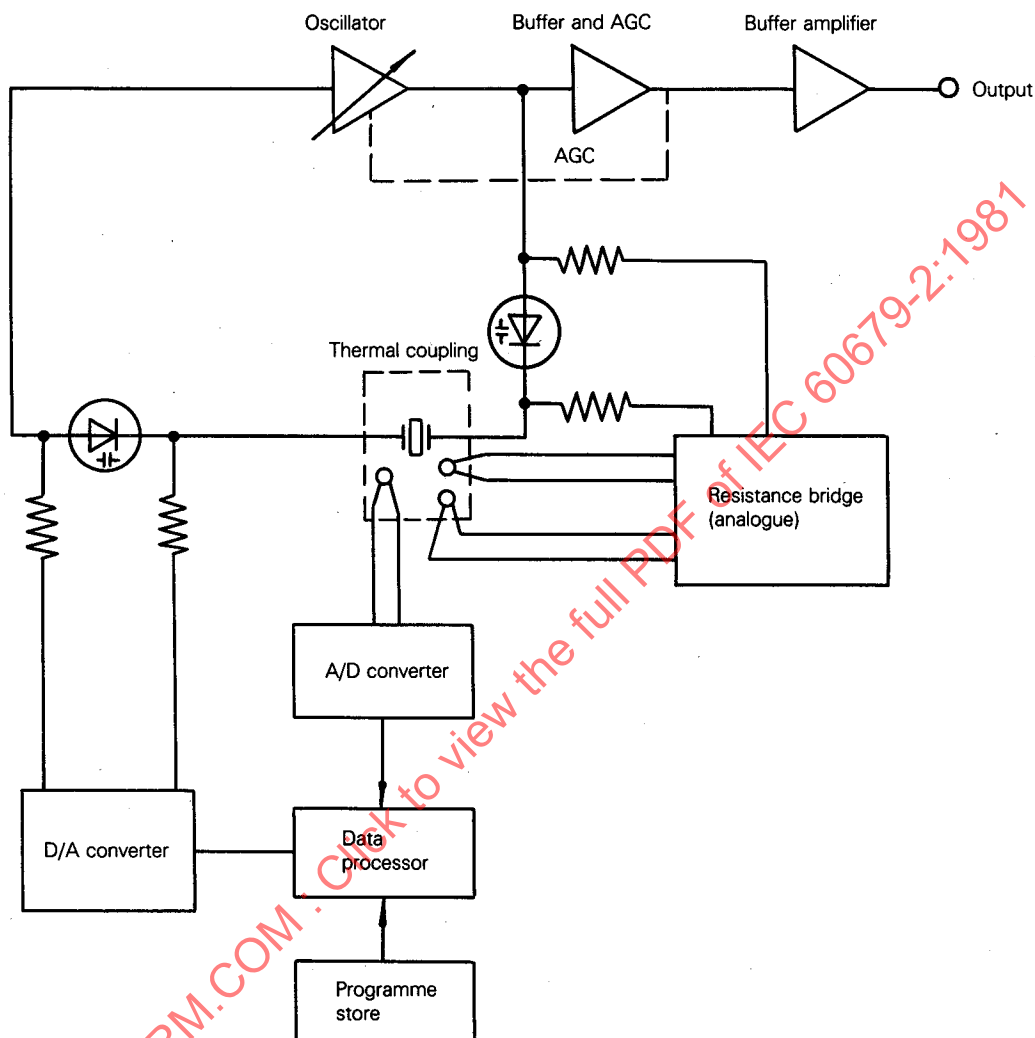
226/81

FIG. 5. - TCXO utilisant la méthode de compensation hybride.

En général, les techniques analogiques permettent de respecter facilement les tolérances relatives de fréquence s'étendant de $\pm 0,5 \times 10^{-6}$ à $\pm 2 \times 10^{-6}$ dans une gamme de températures de 0°C à 60°C ou même plus. L'utilisation des techniques numériques à 10 bits ou à 12 bits permet d'obtenir des stabilités de $\pm 1 \times 10^{-7}$ dans la même gamme de températures à condition qu'une isolation adéquate soit utilisée pour éviter au quartz les effets de gradients thermiques appréciables et à condition que la caractéristique de retraçabilité du quartz soit suffisamment bonne.

Il est nécessaire que le quartz, la diode à capacité variable et la thermistance subissent un alignement exact du point de vue thermique pour obtenir une bonne stabilité de fréquence en fonction de la température, particulièrement dans les conditions thermiques transitoires. Si des gradients thermiques existent entre ces composants, une variation de fréquence importante (de l'ordre de plusieurs millièmes) peut se produire dans les conditions transitoires.

This method, shown in Figure 5 allows the use of digital circuits using fewer binary bits and, of course, reduces the number of memory locations required by a look-up-table method. However, it also requires that both analogue and digital components be included in the oscillator, and requires that a greater number of measurements be made in order to determine both the analogue circuit components and the digital coefficients.



226/81

FIG. 5. – TCXO using hybrid compensation method.

Generally, analogue techniques can readily provide relative frequency tolerances in the range from $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ to $\pm 2 \times 10^{-6}$ over a temperature range from 0°C to 60°C , or even wider. Using 10 bit or 12 bit digital methods, stabilities of $\pm 1 \times 10^{-7}$ can be obtained over this same temperature range, provided adequate insulation is used to prevent appreciable thermal gradients at the crystal unit and that the retrace characteristic of the crystal unit is sufficiently good.

To obtain good frequency stability as a function of temperature, especially under transient temperature conditions, it is necessary that good thermal tracking exists among the crystal, varactor and thermistor. If thermal gradients exist between these components, a large frequency change (of the order of a few parts per million) can take place under transient conditions.

Le quartz présente, lui aussi, un comportement transitoire pendant les variations de température, dû aux gradients thermiques dans la lame de quartz, dont l'importance peut atteindre plusieurs millièmes pendant des variations rapides de température. En conséquence, l'isolation thermique de ces composants critiques par rapport à l'ambiance est habituellement nécessaire. La gamme de températures la plus commune pour l'application des TCXO, dans laquelle la stabilité de $\pm 5 \times 10^{-7}$ est à la fois possible et pratique, est -20°C à $+70^{\circ}\text{C}$.

Le TCXO fonctionne avec une bonne précision de fréquence dès la mise en route, car tous les composants sont à la même température, que la puissance soit appliquée ou non. La faible élévation de température due à la mise en circuit n'a pratiquement pas d'effet sur la fréquence. Comme l'impédance du réseau de compensation utilisé pour la réalisation du TCXO analogique peut être élevée, cette technique n'exige qu'un faible supplément de puissance. (Cependant, la méthode numérique nécessite évidemment une puissance supplémentaire pour faire fonctionner les circuits logiques.) Dans certaines applications, ces caractéristiques peuvent être d'importance primordiale.

Le vieillissement d'un TCXO dépend principalement du quartz, quoique la diode à capacité variable utilisée doit être choisie de telle façon que ses courants de fuite soient négligeables pour éviter une dégradation à long terme du fonctionnement. Des taux de vieillissement de l'ordre de 1×10^{-8} par semaine peuvent être atteints pour les quartz fonctionnant sur le mode fondamental. Dans le cas des TCXO, comme dans celui des oscillateurs à quartz à enceinte à température régulée dont il sera question plus bas, la déviation de fréquence globale à laquelle on peut s'attendre s'obtient en additionnant le vieillissement, dans la période de temps concernée, et la variation fréquence-température. Par exemple, une variation fréquence-température de 5×10^{-7} avec un vieillissement de 1×10^{-8} par semaine donne une déviation de fréquence globale de 1×10^{-6} pendant une année.

3.2.3 Oscillateur à quartz commandé par une tension (VCXO)

Dans beaucoup d'applications, il est commode de pouvoir commander la fréquence d'un oscillateur piloté par quartz à l'aide d'une tension variable appliquée au dispositif, par exemple pour la génération de signaux de télécommunication à modulation de fréquence à bande étroite ou la manipulation par déplacement de fréquence (f.s.k.) pour la transmission continue des données. Cette commande est réalisée, dans une grande mesure, de la même façon que la fréquence du TCXO est ajustée en fonction de la tension définie par le réseau de thermistance à partir de la température. Les différences principales sont que les sorties de tension à la diode à capacité variable sont accessibles à l'utilisateur, qu'aucun réseau de thermistance n'est nécessaire et que la gamme dans laquelle la fréquence de l'oscillateur peut être ajustée est relativement large.

La largeur de bande des signaux de modulation auxquels le VCXO doit répondre dépend autant de la largeur de bande du circuit de réaction du quartz que de la largeur de la bande de base du circuit d'excitation de la diode à capacité variable. La linéarité de modulation (c'est-à-dire Δf en fonction de la tension de modulation) dépend de la combinaison des caractéristiques de la diode à capacité variable et des paramètres du quartz. Pour obtenir une bonne linéarité et/ou pour augmenter la gamme de variations de la fréquence, il est souvent nécessaire d'utiliser un circuit de réaction plus élaboré, comme le montre, par exemple, la figure 6, page 22.

Also, the crystal unit exhibits transient behaviour during temperature change, due to thermal gradients within the quartz plate, which can be as large as a few parts per million for rapid temperature changes. Consequently, thermal insulation of these critical components from their surroundings is usually necessary. The most common temperature range for TCXO application is $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, where a stability of $\pm 5 \times 10^{-7}$ is both feasible and practical.

The TCXO exhibits good frequency accuracy from switching on, because all components are at the same temperature whether power is being supplied or not. The slight temperature rise due to switching on has practically no effect on frequency. Since the impedance of the compensating network used for analogue operation of the TCXO can be made high, little additional power is needed. (The digital method will, however, require additional power to operate the logic circuits.) In certain applications these features may be of major importance.

The ageing of a TCXO is dependent primarily on the crystal, although the varactor used shall be selected to have negligible leakage currents to prevent degradation of long-term performance. Ageing rates of about 1×10^{-8} per week may be achieved for the fundamental mode units used. When dealing with the TCXO, as with the oven crystal oscillator discussed later, the overall frequency deviation that can be expected is obtained by adding the ageing, over whatever time period is applicable, to the frequency-temperature variation. For instance, a 5×10^{-7} frequency-temperature variation coupled with an ageing of 1×10^{-8} per week gives an overall frequency deviation of 1×10^{-6} for one year.

3.2.3 Voltage-controlled crystal oscillator (VCXO)

In many applications, it is convenient to be able to control the frequency of a crystal-controlled oscillator by means of a variable voltage applied to the device, such as for the generation of narrow-band frequency modulation telecommunication signals or frequency shift-keying (f.s.k.) data streams. This function is accomplished in much the same fashion as the frequency of the TCXO is adjusted by the temperature-dependent voltage function generated with the thermistor network. The principle differences are that the varactor voltage leads are accessible to the user, no thermistor network is required and the range over which the oscillator frequency can be tuned is made relatively large.

The bandwidth of modulating signals to which the VCXO will respond will depend upon the radio-frequency bandwidth of the crystal feedback network as well as upon the base bandwidth of the varactor driving circuit. Modulation linearity (i.e. Δf as a function of modulation voltage) is dependent upon the combination of varactor characteristics and crystal unit parameters. To achieve good linearity and/or to increase the frequency deviation range, it is often necessary to use a more sophisticated feedback network, as shown in Figure 6, page 23, for example.

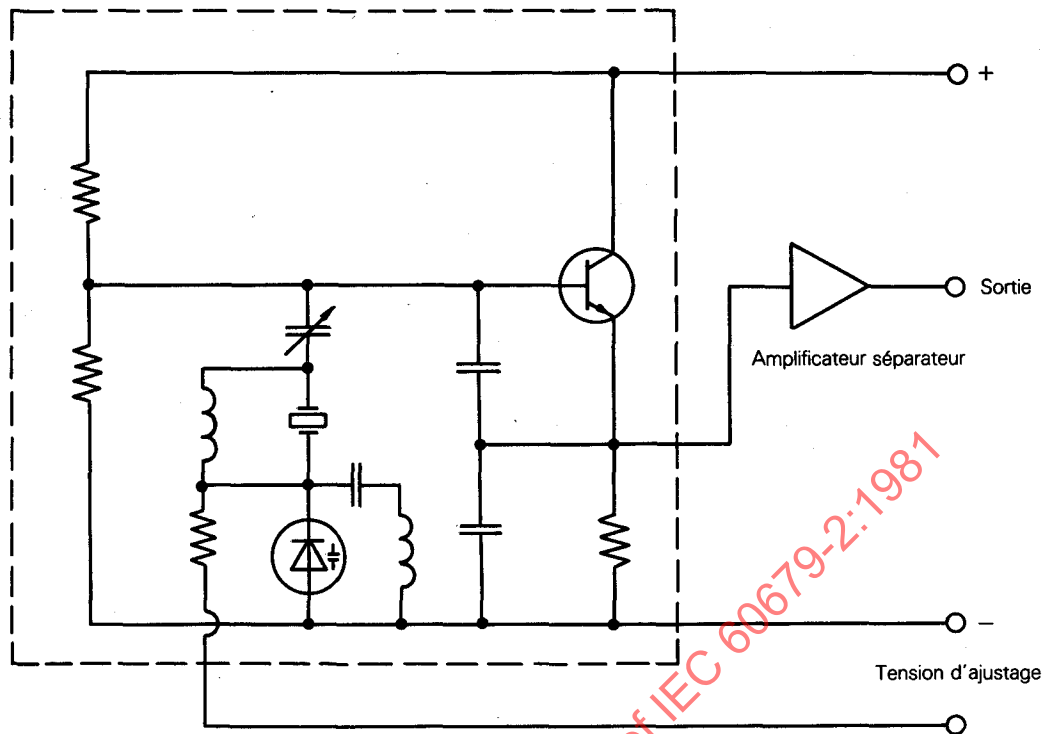


FIG. 6. – Oscillateur à quartz commandé par la tension (VCXO) avec circuits additifs pour une largeur de bande et une linéarité améliorées.

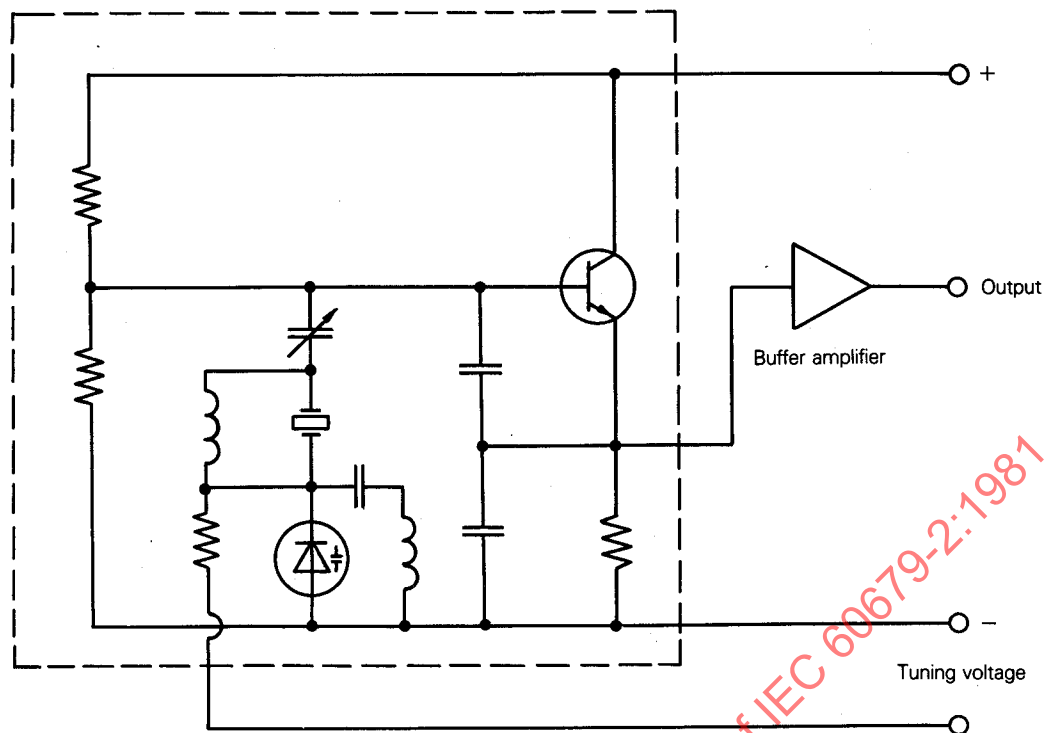
3.2.4 Oscillateur à quartz à enceinte à température régulée (OCXO)

Le TCXO dont il a été question au paragraphe 3.2.2 peut donner une stabilité de fréquence-température de quelque 10^{-7} dans une large gamme de températures ambiantes. Pour les applications réclamant une stabilité meilleure, on doit utiliser un oscillateur à quartz à température régulée (OCXO). La Publication 314 de la CEI: Enceintes à température régulée pour les quartz, en donne une description détaillée.

L'amélioration de la stabilité des TCXO est obtenue au prix d'un accroissement de leur volume et d'une consommation de puissance beaucoup plus élevée. De plus, comparé à l'oscillateur à quartz de base de la figure 1, page 8, s'y ajoute un circuit complexe comme le montrent les figures 7 et 8, pages 24 et 28. Les enceintes utilisées sont de deux types généraux, soit du type à commande proportionnelle, soit du type tout-ou-rien. Ce dernier emploie un élément sensible bimétallique ou à mercure et commande la puissance de chauffage de l'enceinte par passage ou coupure du courant. Ce système de commande est simple, mais l'emploi en est normalement limité aux contrôles de fréquence les moins précis, et de ce fait ne trouve pas sa place dans cette norme. Le type à commande proportionnelle utilise une résistance thermosensible et, par l'intermédiaire d'un circuit en pont, commande le chauffage d'une façon continue. Il en résulte un meilleur contrôle de la température donnant une meilleure stabilité de la fréquence.

3.2.4.1 Enceinte à un étage

Pour la plupart des applications, une enceinte à un étage (comme indiqué à la figure 7) est suffisante. Le montage de l'enceinte se compose du pont de résistance, de l'amplificateur, du régulateur à transistor et de l'élément chauffant représenté à la partie inférieure de la figure 7. Les lignes pointillées indiquent quels sont les circuits supplémentaires et les composants de l'oscillateur



227/81

FIG. 6. - Voltage-controlled crystal oscillator (VCXO) with added circuits for improved bandwidth and linearity.

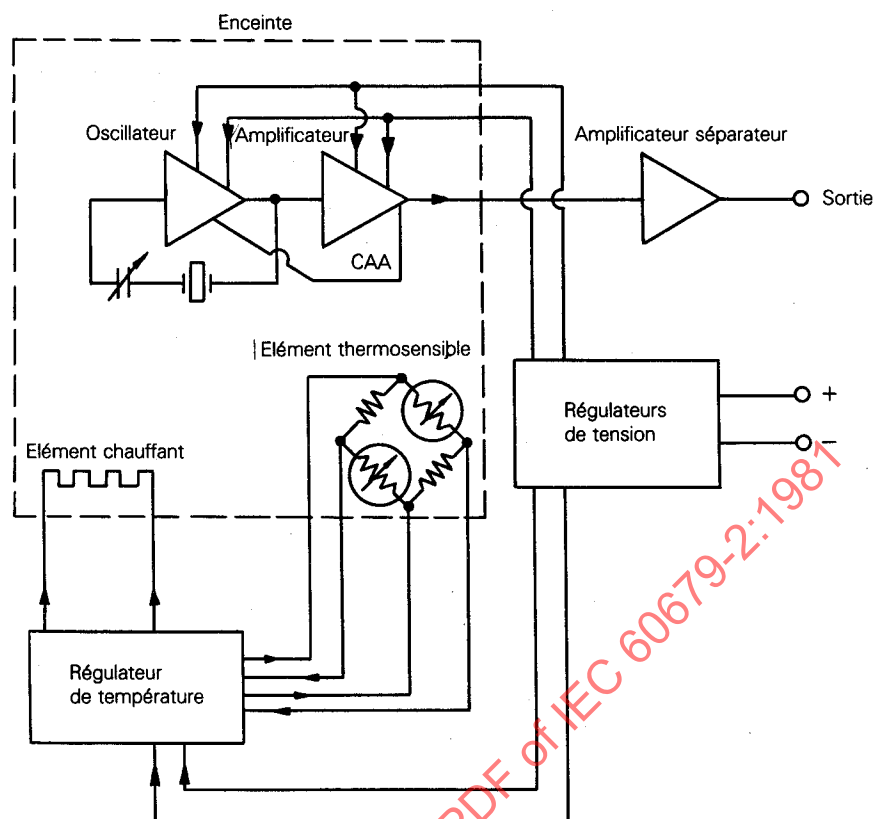
3.2.4 Oven-controlled crystal oscillator (OCXO)

The TCXO discussed in Sub-clause 3.2.2 is capable of giving a frequency-temperature stability of a few parts in 10^{-7} over a wide ambient temperature range. For applications calling for a better stability, an oven-controlled crystal oscillator (OCXO) shall be used. A detailed description is given in IEC Publication 314: Temperature Control Devices for Quartz Crystal Units.

The improved stability over the TCXO is achieved at the expense of increased volume and considerably higher power consumption. In addition, there is added circuit complexity compared with the basic crystal oscillator (Figure 1, page 9), as shown in Figures 7 and 8, pages 25 and 29. The ovens used are of two general types, proportional and "on/off" controlled. The latter uses a bi-metallic or mercury temperature sensor and supplies heat to the oven on an "on/off" basis. This gives simple control but is normally restricted to less precise frequency control and therefore will not be covered in this standard. The proportional controlled type uses a resistance temperature sensor and by bridge circuitry supplies heat on a continuous basis. This results in better temperature control, giving higher precision frequency control.

3.2.4.1 Single-stage oven

For most applications a single-stage oven as shown in Figure 7 is sufficient. The oven circuitry is composed of the resistance bridge, amplifier, transistor controller and heater winding shown at the bottom of the figure. The dotted lines indicate the additional circuitry and oscillator components placed in the oven. A voltage regulator and multi-stage buffer amplifier are used and an automatic



228/81

FIG. 7. - Oscillateur stabilisé par enceinte à un étage (OCXO).

logés dans l'enceinte. On utilise un régulateur de tension et un amplificateur séparateur à plusieurs étages, et un circuit de contrôle automatique d'amplification (CAA) est nécessaire pour maintenir constant le niveau d'excitation du quartz. L'enceinte est du type à étage unique avec régulation proportionnelle. Deux bras du pont de résistance sont des thermistances ou des résistances à coefficient de température particulièrement élevé dont les valeurs sont fonction de la température.

Toute variation de température dans l'enceinte est détectée par ces éléments thermosensibles qui provoquent un déséquilibre du pont. La tension de sortie du pont est amplifiée et fait fonctionner le régulateur à transistor qui délivre dans l'enroulement chauffant un courant plus ou moins fort, régulant ainsi la température. Il convient d'attribuer un bon couplage thermique entre l'élément thermosensible et l'enroulement chauffant sur l'enveloppe de l'enceinte de façon qu'un gain de boucle élevé puisse être utilisé. En principe, la structure de l'enceinte doit être bien isolée et posséder une grande capacité thermique pour maintenir à une valeur minimale le taux de variation de la température. Sans un bon couplage thermique, la température de l'oscillateur à quartz va varier de façon importante par suite de l'élévation de température du circuit de contrôle, entraînant une mauvaise stabilité de la fréquence. La température de fonctionnement de l'enceinte peut être modifiée par la variation de la valeur d'une résistance dans le circuit du pont. Cela va modifier la position du point d'équilibre du pont et donc la température de fonctionnement. Une enceinte à un étage bien conçue donnera une stabilité de température de 0,1 °C à 1 °C dans une large gamme de températures ambiantes.

Pour maintenir les pertes thermiques à un niveau faible et réduire à une valeur minimale les gradients de température dans la chambre, on établit une isolation autour des composants. En général, ces gradients sont proportionnels à la puissance de l'élément chauffant. Le vide est la

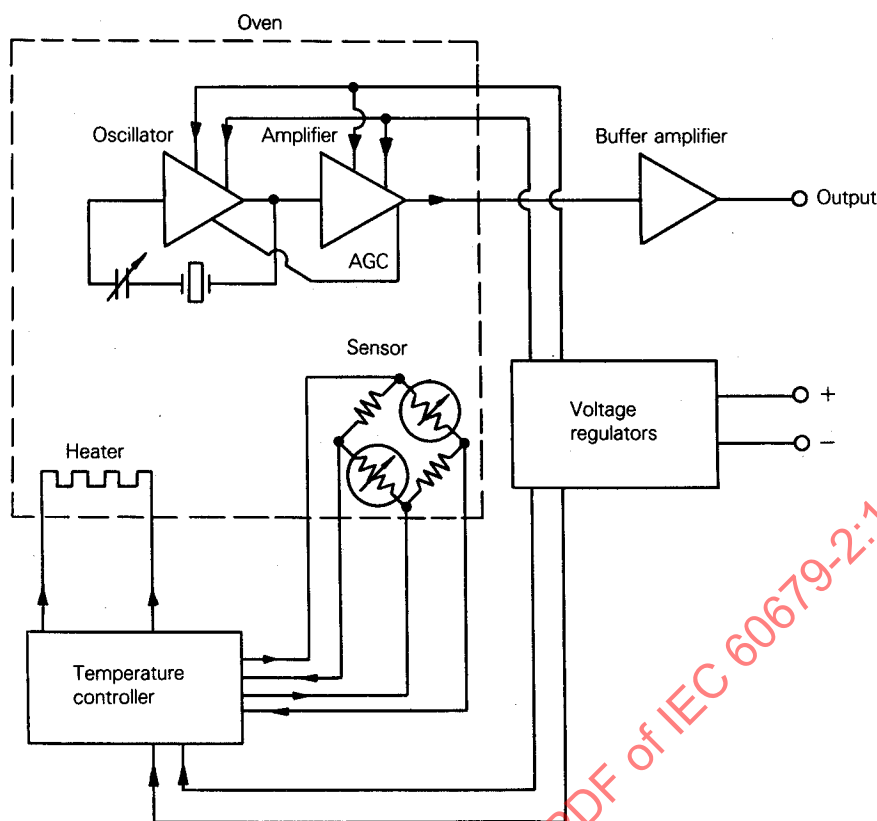


FIG. 7. - Single-stage oven-stabilized oscillator (OCXO).

gain control (AGC) circuit is needed to keep crystal drive constant. The oven is a single-stage type with proportional control. Two arms of the resistance bridge are thermistors, or special high temperature coefficient resistors whose values are a function of temperature.

Any temperature change in the oven is sensed by these sensors, resulting in bridge unbalance. The bridge voltage output is amplified and operates on the transistor controller causing more or less current to flow through the heater winding, thus regulating the temperature. There should be good thermal coupling between the sensor and the heater winding on the oven shell so that high loop gain may be employed. The oven structure should be well-insulated and possess large heat capacity to keep the rate of change of temperature to a minimum. Without good thermal coupling the temperature at the crystal oscillator will vary considerably due to heating of the control circuit, resulting in poor frequency stability. The operating temperature of the oven can be changed by varying the value of one resistor in the bridge circuit. This changes the balance point and thus the operating temperature. A well-designed single-stage oven will give 0.1 °C to 1 °C temperature stability over a wide ambient range.

Insulation is used in the oven around the components to keep heat loss low and to minimize temperature gradients within the chamber. Generally, the gradients are proportional to the power used in the heater. The best insulation is a vacuum and the normal way to achieve this is through

meilleure isolation et le moyen habituel pour obtenir cette isolation est l'utilisation d'un vase de Dewar à deux parois. Une autre méthode, moins chère et moins délicate, consiste dans l'utilisation d'un matériau cellulaire; cependant, les pertes thermiques sont plus élevées.

La température de fonctionnement de l'enceinte doit être plus élevée, habituellement de 10°C à 15°C, que la température ambiante la plus élevée à laquelle on puisse s'attendre. Il convient d'utiliser un quartz dont la caractéristique fréquence-température est semblable à celle qui est représentée par la courbe C de la figure 2, page 12. La température de fonctionnement est au point d'inversion supérieur, point ① de la courbe, où la variation de fréquence est très faible pour de faibles variations de température avec pour résultat une bonne stabilité de fréquence. Cette courbe situe le point d'inversion à environ 75°C; ainsi la température ambiante la plus élevée, dans ce cas, devrait être de 60°C à 65°C. Comme les quartz fabriqués selon les mêmes procédés n'ont pas de points d'inversion identiques par suite de faibles différences dans l'orientation et/ou dans la métallisation des électrodes, la température de fonctionnement réelle de l'enceinte doit être ajustée avec précision pour le quartz à utiliser dans cette dernière.

Un oscillateur à enceinte à température régulée n'atteint pas sa fréquence de fonctionnement immédiatement après la mise en circuit car l'enceinte doit être chauffée pour atteindre sa température de fonctionnement avant que la fréquence du quartz puisse être stabilisée au point d'inversion. Pour obtenir une caractéristique de mise en température rapide, on peut utiliser un élément chauffant séparé et associé à un thermostat fonctionnant par «tout-ou-rien». L'élément chauffant utilisant une grande puissance pendant une courte durée, l'enceinte est mise rapidement en température. Le thermostat sera mis hors circuit à quelques degrés au-dessous de la température de fonctionnement désirée à partir de laquelle la régulation proportionnelle est mise en œuvre. Une durée de 5 min à 30 min est une durée de chauffage normale pour la plus basse température ambiante avec une dissipation de 4 W à 40 W pendant ce temps.

Le temps de mise en température peut aussi être réduit si les structures de l'enceinte ont la capacité thermique la plus faible possible. Cependant, les paramètres du circuit de régulation doivent être maintenus dans des tolérances étroites pour garantir une bonne stabilité dans les conditions de fonctionnement normales lorsqu'on utilise une telle approche.

Une enceinte à un étage soigneusement conçue peut maintenir le rapport de stabilisation de la température ambiante à une valeur de 500 : 1 (c'est-à-dire une variation de la température interne de 0,1°C pour un changement de la température ambiante de 50°C). Cela suffira pour réduire le coefficient de température de l'oscillateur de l'ordre de $1 \times 10^{-10}/^{\circ}\text{C}$ dans une large gamme de températures.

3.2.4.2 Enceinte double (à deux étages)

Pour certaines applications, de plus hautes stabilités de fréquence peuvent nécessiter une isolation plus importante des influences de l'environnement. Comme le montre schématiquement la figure 8, page 28, une régulation par double enceinte peut être utilisée pour atteindre des rapports de stabilisation approchant de $5 \times 10^4 : 1$. Les quartz et les circuits à haute fréquence sont logés dans la cavité interne de l'enceinte, cavité qui, à son tour, est placée à l'intérieur du premier étage de plus grande dimension de l'enceinte, avec les circuits de température, le régulateur de tension, etc. De cette manière, tous les circuits de régulation électroniques sont protégés des variations de température ambiante et la température de la chambre de l'enceinte interne peut être stabilisée avec une précision d'environ 0,001°C pour des variations de température ambiante de 25°C ou davantage. Dans les conditions de fonctionnement normales, les oscillateurs pilotés par quartz de ce type sont capables de maintenir une stabilité de fréquence de l'ordre de $1 \text{ à } 2 \times 10^{-11}$ par jour et présentent des coefficients de température globaux inférieurs à $10^{-12}/^{\circ}\text{C}$.

use of a double wall Dewar flask. Another less expensive and more robust method is the use of foam material; however, heat loss is greater.

The operating temperature of the oven shall be higher, usually by 10 °C to 15 °C, than the highest ambient temperature expected. The crystal used has a frequency-temperature characteristic similar to that of curve C in Figure 2, page 13. The operating temperature is at the upper turnover, point ① on the curve, where the frequency change with small changes of temperature is very small, resulting in good frequency stability. This curve shows the turnover at about 75 °C, so the highest ambient temperature in this case would be 60 °C to 65 °C. Since crystals made by the same processes will not have exactly the same turnover point, due to small differences in orientation and/or plate-back, the actual operating temperature of the oven shall be finely adjusted for the crystal being used in that oven.

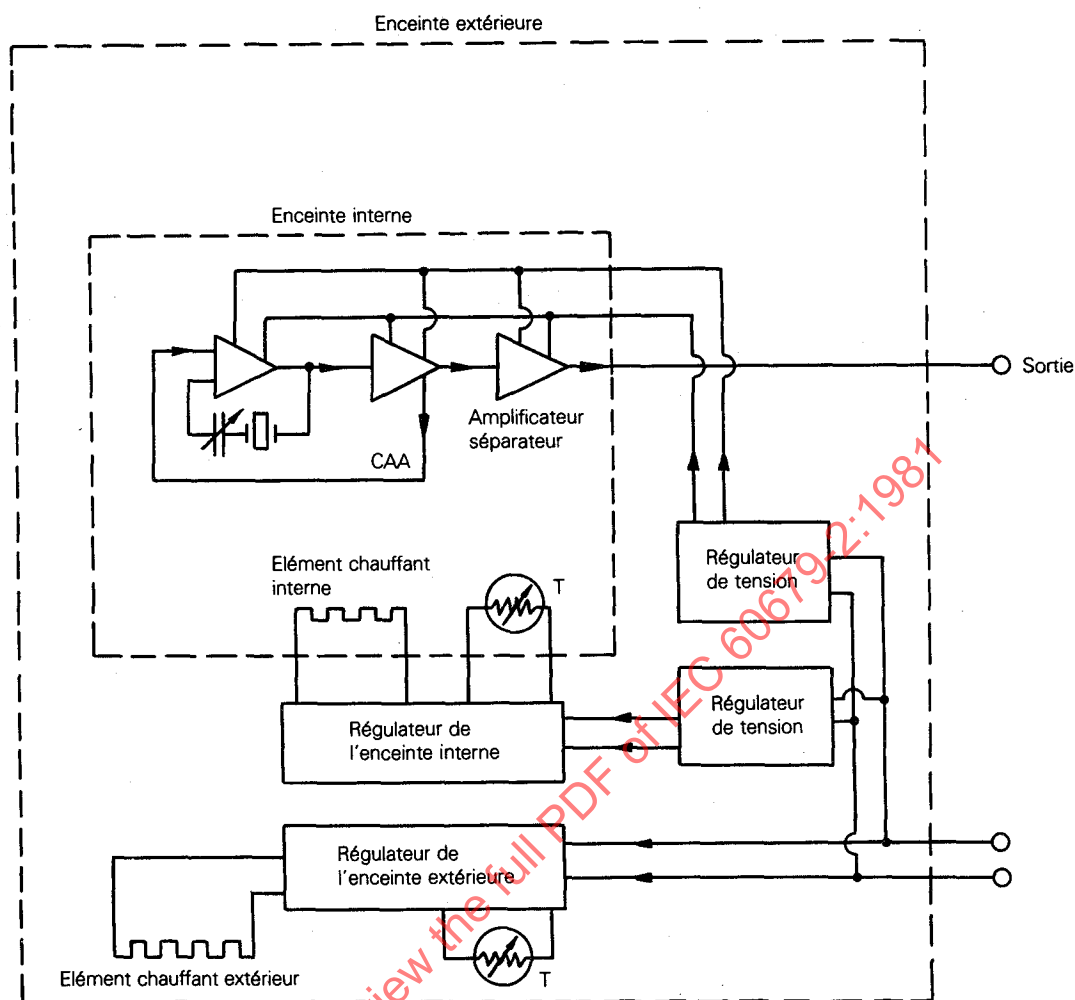
An oven-controlled crystal oscillator is not on frequency immediately after switching on since the oven must warm up to its operating temperature before the crystal frequency can be stabilized at the turnover point. To obtain a fast warm-up characteristic, a separate warm-up heater and associated “on-off” thermostat may be used. A large amount of power is used for a short time in the warm-up heater, thus heating up the chamber quickly. The thermostat will cut off a few degrees below the desired operating temperature where the proportional control takes over. Warm-up times of 5 min to 30 min, from the lowest ambient temperature, are normal with a power dissipation of 4 W to 40 W during this warm-up time.

Warm-up time may also be reduced by using oven structures having minimum thermal heat capacity. However, parameters of the control circuit shall be held to close tolerances to ensure good stability under normal operating conditions when this approach is used.

A carefully designed single-stage oven can maintain an ambient stabilization ratio of about 500:1 (i.e. an internal temperature change of 0.1 °C for an ambient temperature change of 50 °C). This will be sufficient to reduce the temperature coefficient of the oscillator to the order of $1 \times 10^{-10}/^{\circ}\text{C}$ over a wide temperature range.

3.2.4.2 Double (two-stage) oven

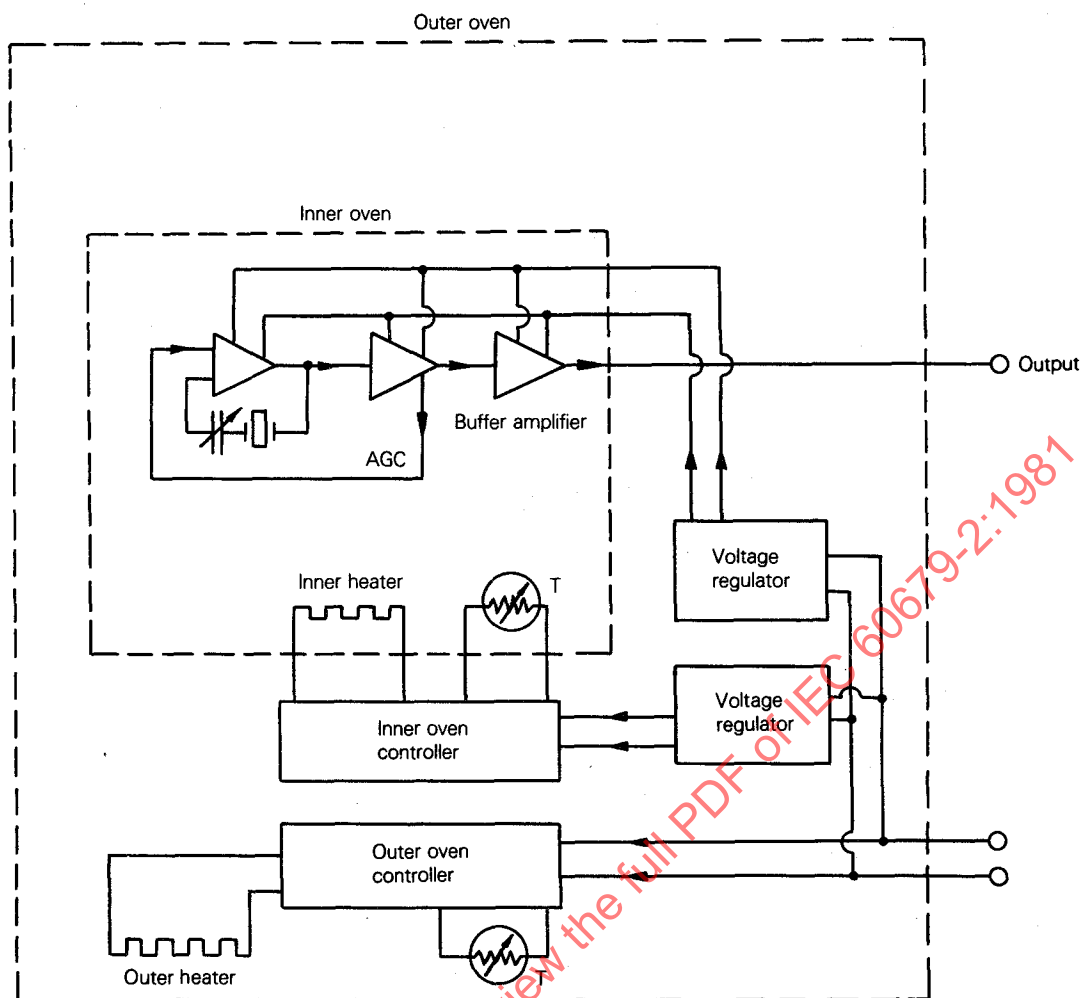
For some applications, when the highest frequency stability is needed, further isolation from ambient effects may be required. To achieve stabilization ratios approaching $5 \times 10^4:1$, double oven controls may be used, as shown schematically in Figure 8, page 29. The crystal unit and radio-frequency circuits are housed in the inner oven cavity, which in turn is placed inside the larger first-stage oven, along with the temperature circuitry, voltage regulator, etc. In this way, all the electronic regulator circuits are protected from ambient temperature variations, and the temperature of the inner oven chamber can be stabilized to about 0.001 °C for ambient temperature variations of 25 °C or more. Under normal operating conditions, crystal-controlled oscillators of this type are capable of maintaining frequency stability of the order of 1 to 2×10^{-11} per day and exhibit overall temperature coefficients of less than $10^{-12}/^{\circ}\text{C}$.



229/81

FIG. 8. — Oscillateur stabilisé par enceinte à deux étages (OCXO).

Les enceintes à deux étages exigent généralement un temps de mise en température et un temps de stabilisation plus longs que les enceintes à un étage et requièrent aussi une puissance plus élevée et un volume plus important. Pour atteindre la stabilité à long terme compatible avec sa caractéristique de température améliorée, l'oscillateur de précision à double enceinte est habituellement conçu pour fonctionner avec le meilleur quartz utilisable en mode partiel (c'est-à-dire en 5^e partiel à 2,5 MHz ou à 5 MHz). La figure 9, page 30, résume sous forme tabulaire quelques caractéristiques relatives aux différents types d'oscillateurs.



229/81

FIG. 8. - Two-stage oven-stabilized oscillator (OCXO).

The double oven structure generally requires longer warm-up and stabilization time than does the single-stage oven and also requires increased power and greater volume. In order to achieve long-term stability consistent with its improved temperature characteristic, the precision double oven oscillator is usually designed to operate with the best available overtone-mode crystal units (i.e. fifth overtone, 2.5 MHz or 5 MHz units). Figure 9, page 31, summarizes, in tabular form, some of the relevant characteristics of the different types of oscillators.

Type d'oscillateur	Gamme de températures	Ecart de fréquence dans la gamme de températures	Puissance d'entrée	Dimensions approximatives (cm ³)
Oscillateur à quartz en boîtier (PXO)	−55 °C à 105 °C −40 °C à 90 °C	$\pm 25 \times 10^{-6}$ $\pm 15 \times 10^{-6}$	5 mW à	2 à 80
Oscillateur à quartz commandé par la tension (VCXO)	−20 °C à 70 °C 0 °C à 50 °C	$\pm 10 \times 10^{-6}$ $\pm 4 \times 10^{-6}$	100 mW	
Oscillateur à quartz à compensation de température (TCXO)	−55 °C à 105 °C −40 °C à 90 °C −20 °C à 70 °C 0 °C à 50 °C	$\pm 0,5 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-6}$ $\pm 0,3 \times 10^{-6} - 3 \times 10^{-6}$ $\pm 0,2 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-6}$ $\pm 0,1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-6}$	15 mW à 200 mW	2 à 80
Oscillateur à quartz à enceinte à température régulée (OCXO) (enceinte à un étage)	−55 °C à 105 °C −40 °C à 90 °C −20 °C à 70 °C 0 °C à 50 °C	$\pm 0,1 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-7}$ $\pm 0,1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-7}$ $\pm 0,5 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-7}$ $\pm 0,5 \times 10^{-8} - 5 \times 10^{-8}$	1 W à 10 W	100 à 200
Oscillateur à quartz à enceinte à température régulée (OCXO) (enceinte à deux étages)	−55 °C à 105 °C −40 °C à 90 °C −20 °C à 70 °C 0 °C à 50 °C	$\pm 3 \times 10^{-9}$ $\pm 1 \times 10^{-9}$ $\pm 5 \times 10^{-10}$ $\pm 1 \times 10^{-10}$	5 W à 40 W	1 000 à 5 000

Fig. 9. – Caractéristiques obtenues avec différents types d'oscillateurs pilotés par quartz.

4. Spécification et mesures des caractéristiques de fonctionnement d'un oscillateur

Dans la plupart des applications d'oscillateur piloté par quartz, la caractéristique principale est la stabilité de la fréquence de sortie. D'autres paramètres, tels que le niveau de sortie, les conditions requises de la source d'alimentation, le montage, etc. (dont tous doivent être spécifiés) sont cependant de moindre importance dans beaucoup de cas. Ce sont la spécification et la mesure de la caractéristique de stabilité de la fréquence qui sont souvent la cause de malentendus et d'insatisfaction entre fabricants d'oscillateurs pilotés par quartz et utilisateurs.

Le signal produit par un oscillateur consiste en une ligne spectrale de largeur finie plutôt qu'en une tonalité monochromatique. La répartition spectrale aura normalement la forme générale représentée à la figure 10, page 32, avec une ligne accusée, très étroite mais de largeur finie, une large bande de bruit de fond presque «blanc» et une remontée du niveau de bruit au voisinage immédiat de la ligne principale ainsi que d'éventuelles petites raies dues à des harmoniques et des réponses parasites (non indiquées sur la figure). La fréquence moyenne (ou centrale) de la ligne principale sera déplacée en fonction des différents facteurs de l'environnement tels que la température, la tension d'alimentation, l'accélération et les chocs, la charge électrique, etc. Toutes ces caractéristiques doivent être prises en considération lorsque l'on établit la spécification ou lorsque l'on mesure le fonctionnement d'un oscillateur. Par commodité, les écarts par rapport à une fréquence constante seront classés arbitrairement en deux types, ceux qui sont causés par les conditions d'environnement et ceux qui sont aléatoires par nature. Il convient, cependant, de garder à l'esprit que ces deux types d'écart sont toujours présents à un degré plus ou moins grand et ne peuvent être séparés expérimentalement.

4.1 Influence de l'environnement

Les influences de toutes perturbations telles que celles de la tension de sortie, de la température, de la charge électrique, des vibrations et des chocs mécaniques sont comprises dans cette catégorie, aussi bien que les effets des mécanismes connus comprenant le «vieillessement de fréquence» des quartz et le vieillissement à long terme des composants du circuit électrique. Un exposé plus détaillé des méthodes de mesure de ces influences figure dans la Publication 679-1 de la CEI; c'est pourquoi

Oscillator type	Temperature range	Frequency deviation over temperature range	Input power	Approximate size (cm ³)
Packaged crystal oscillator (PXO)	−55 °C to 105 °C	$\pm 25 \times 10^{-6}$	5 mW	2 to 80
Voltage-controlled crystal oscillator (VCXO)	−40 °C to 90 °C	$\pm 15 \times 10^{-6}$	to 100 mW	
Temperature compensated crystal oscillator (TCXO)	−20 °C to 70 °C	$\pm 10 \times 10^{-6}$		
	0 °C to 50 °C	$\pm 4 \times 10^{-6}$		
	−55 °C to 105 °C	$\pm 0.5 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-6}$	15 mW	2 to 80
	−40 °C to 90 °C	$\pm 0.3 \times 10^{-6} - 3 \times 10^{-6}$	to 200 mW	
	−20 °C to 70 °C	$\pm 0.2 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-6}$		
	0 °C to 50 °C	$\pm 0.1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-6}$		
Oven-controlled crystal oscillator (OCXO) (Single-stage oven)	−55 °C to 105 °C	$\pm 0.1 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-7}$	1 W	100
	−40 °C to 90 °C	$\pm 0.1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-7}$	to 10 W	to 200
	−20 °C to 70 °C	$\pm 0.5 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-7}$		
	0 °C to 50 °C	$\pm 0.5 \times 10^{-8} - 5 \times 10^{-8}$		
Oven-controlled crystal oscillator (OCXO) (Two-stage oven)	−55 °C to 105 °C	$\pm 3 \times 10^{-9}$	5 W	1 000
	−40 °C to 90 °C	$\pm 1 \times 10^{-9}$	to 40 W	to 5 000
	−20 °C to 70 °C	$\pm 5 \times 10^{-10}$		
	0 °C to 50 °C	$\pm 1 \times 10^{-10}$		

FIG. 9. – Characteristics that can be obtained with different types of crystal-controlled oscillators.

4. Specification and measurement of oscillator performance

In most applications of crystal-controlled oscillators, the characteristic of principal concern is the stability of output frequency. Other parameters such as output level, power supply requirements, mounting arrangements, etc. (all of which shall be specified) are, however, of lesser importance in most situations. It is the specification and measurement of frequency stability performance which has often caused misunderstanding and dissatisfaction for suppliers and users of crystal-controlled oscillators.

The signal generated by any oscillator will consist of a finite width spectral line, rather than a single pure tone. The spectral distribution will normally be of the general shape shown in Figure 10, page 33, with a strong, very narrow but finite bandwidth line, a nearly “white” wide-band background noise spectra and enhanced noise signal in the near vicinity of the principle line. In addition, weak lines (not shown in the figure) produced by harmonics and spurious responses may occur. The average (or central) frequency of the principle line will be found to shift as a function of various environmental factors such as temperature, supply voltage, acceleration and shock, electrical loading, etc. All of these properties shall be considered when specification or measurement of oscillator performance are considered. For convenience, we shall categorize arbitrarily the deviations from constant frequency into two types, those caused by environmental conditions and those which are random in nature. It should be kept in mind, however, that both types are always present to a greater or lesser degree and cannot be experimentally separated.

4.1 Environmental effects

In this category are included the influence of all disturbances such as supply voltage, temperature, electrical loading, mechanical vibration and shock, as well as contributions of known mechanisms including frequency ageing of crystal units and long-term ageing of electrical circuit components. A more detailed discussion of the methods of measurement of these effects may be found in IEC Publication 679-1 and will not be considered here. In general terms, the coefficient of frequency

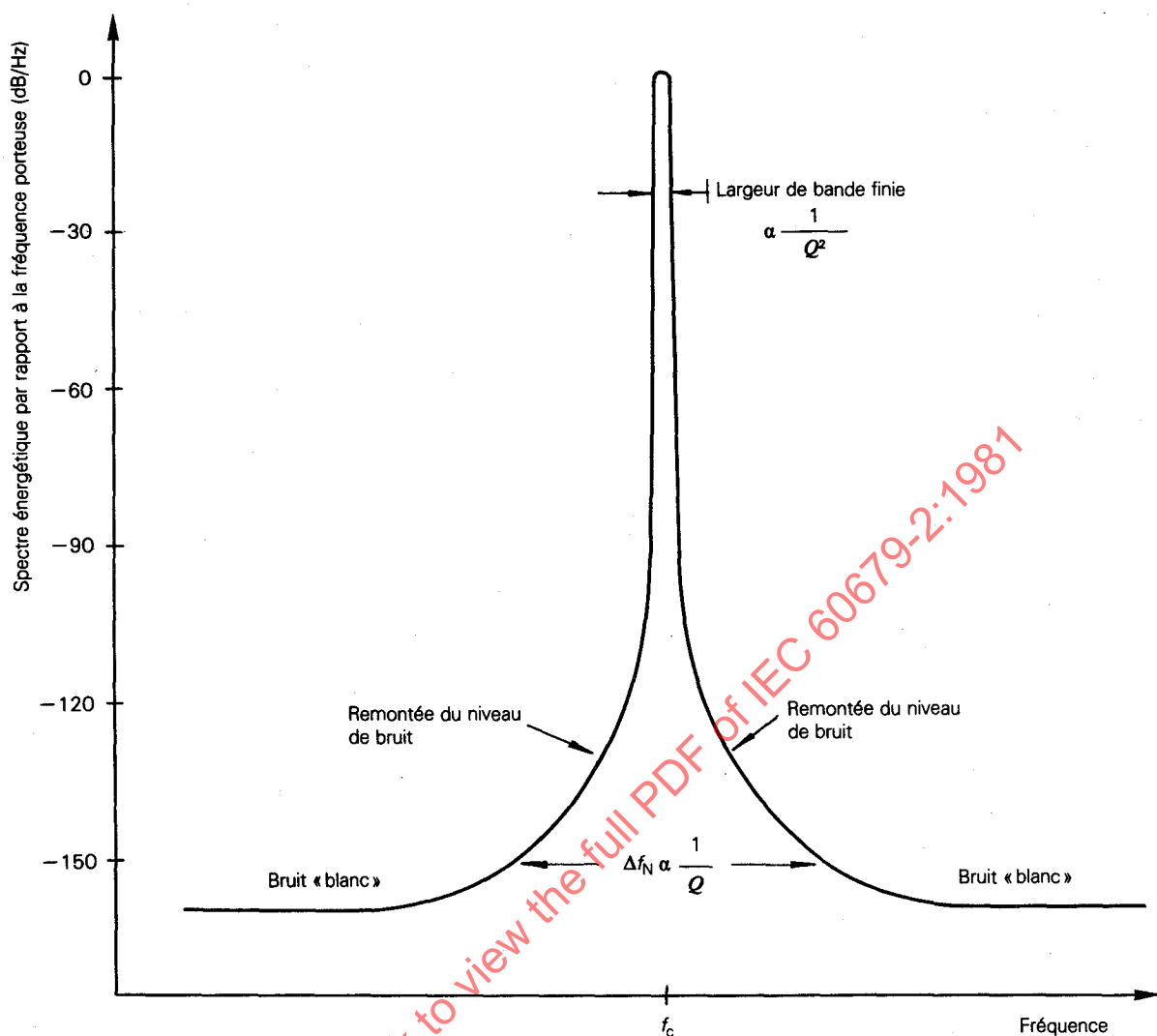


FIG. 10. – Spectre énergétique typique de sortie d'un oscillateur piloté par quartz.

ces méthodes ne sont pas examinées ici. D'une façon générale, le coefficient de variation de la fréquence dû à un facteur est habituellement déterminé en contrôlant soigneusement tous les autres facteurs au cours de l'essai et en introduisant des variations relativement grandes de la valeur du facteur en question. Ce coefficient est alors déterminé à partir de la variation de la valeur moyenne de la fréquence de sortie après stabilisation aux nouvelles conditions de fonctionnement. Il convient d'effectuer un nombre suffisant de mesures de fréquence avant et après l'application de la variation intentionnelle afin d'être assuré que la fréquence moyenne a été obtenue avec le degré d'exactitude désiré.

Après qu'une variation de ce facteur a été appliquée, il est généralement intéressant de mesurer la fréquence de l'oscillateur au cours d'une période de temps relativement longue pour pouvoir déterminer les effets transitoires aussi bien que ceux du régime permanent. Dans certains cas (par exemple lorsque l'on considère les effets de la température ambiante sur la fréquence des TCXO ou OCXO), les effets transitoires peuvent être un grand nombre de fois plus grands que l'écart en régime permanent. Si le comportement en régime transitoire (aussi bien qu'en régime permanent) présente de l'importance pour l'utilisation, il convient de le spécifier. Cependant, dans ce dernier cas, il convient de garder à l'esprit que la méthode d'essai exacte doit être spécifiée, car les phénomènes transitoires sont fortement influencés par le caractère de la perturbation.

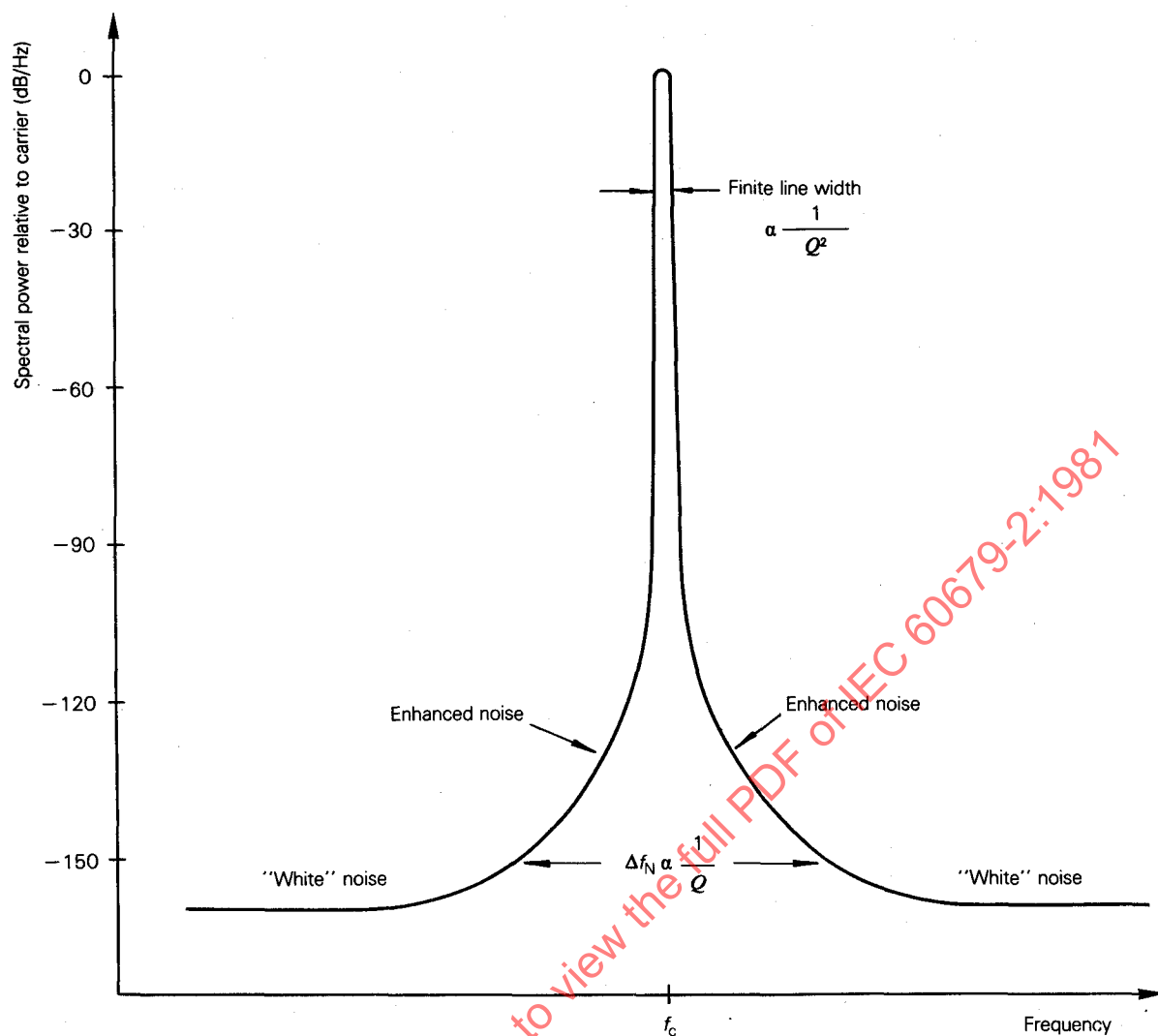


FIG. 10. - Typical output power spectrum of a crystal-controlled oscillator.

230/81

change due to one factor is usually determined by carefully controlling all other factors during the test and then introducing relatively large variations in the value of the factor in question. The coefficient in question is then determined from the change in the mean value of the output frequency after stabilization at the new operating condition. A sufficient number of measurements of frequency should be made both before and after the deliberate change is introduced, to assure determination of the mean frequency to the desired degree of accuracy.

After introducing a variation in this factor, it is usually instructive to measure the oscillator frequency over a relatively long period of time, so that transient as well as steady-state effects may be determined. In some instances (for example, when considering the effects of ambient temperature on the frequency of TCXO's or OCXO's) the transient effects may be many times greater than the steady-state deviation. If important for the application, transient (as well as steady-state) behaviour should be specified. If this is done, however, it should be kept in mind that the exact method of test shall also be specified, as transient phenomena are strongly influenced by the character of the disturbance.

Le vieillissement de fréquence ou dérive à long terme de la fréquence est dû principalement à des variations dans le quartz utilisé pour la stabilisation de la fréquence de l'oscillateur. Cependant, des variations à long terme dans les composants électriques peuvent aussi se produire et contribuer au vieillissement de l'oscillateur. Il est habituellement impossible de séparer ces deux effets, et le vieillissement se rapporte généralement à la caractéristique de dérive globale de la fréquence de l'oscillateur considéré comme un tout, tous les facteurs d'environnement étant maintenus à une valeur constante.

Les perturbations mécaniques telles que la vibration et les chocs vont réellement moduler les paramètres d'élasticité de la lame de quartz, produisant ainsi une modulation de la fréquence du signal de l'oscillateur. Une construction soignée du quartz peut réduire la sensibilité aux perturbations mécaniques et des procédés particuliers de conditionnement peuvent isoler le quartz et l'oscillateur de conditions d'environnement mécanique sévères [7]*, mais les effets ne peuvent être entièrement éliminés et doivent être pris en considération, en particulier pour l'environnement aérospatial.

4.2 Variations de fréquence aléatoires

Outre les variations de la fréquence dues à l'influence de l'environnement, mentionnées ci-dessus, la fréquence de sortie d'oscillateur peut être affectée par le bruit électrique produit par les dispositifs actifs du circuit, par le bruit électrique excessif produit par les composants électriques et par le bruit émanant du quartz.

«Le bruit» du quartz résulte habituellement de défauts dans la structure du résonateur, tels qu'une mauvaise adhérence des électrodes à la surface de la lame de quartz, une fixation imparfaite des structures du support, etc. Ces défauts donnent lieu souvent à une forte sujétion de la fréquence au niveau d'excitation aussi bien qu'aux variations des paramètres du schéma électrique équivalent (résistance, inductance) en fonction de l'amplitude de l'excitation. Les mesures de ces caractéristiques permettent généralement de choisir, pour des applications particulières, des quartz qui ne seront pas affectés par des effets de bruit de fréquence excessifs.

Les effets du bruit électrique peuvent apparaître lorsque l'on considère que le signal de sortie d'un oscillateur consiste en une composante unique de fréquence, déterminée par la caractéristique de l'amplificateur à bande étroite du réseau de l'oscillateur, se superposant à un spectre de bruit thermique à large bande et de bruit de grenaille, liés à l'étage oscillateur. Bien que l'interaction exacte du bruit de signal avec la boucle de réaction soit un problème extrêmement complexe, sortant du cadre de cette norme, on peut aboutir facilement à quelques conclusions d'ordre général.

Premièrement, il est évident qu'une amélioration du rapport signal à bruit de l'étage oscillateur et du premier amplificateur séparateur améliore le spectre des fluctuations aléatoires de phase du signal. Cela peut être atteint par un fonctionnement à niveau élevé de l'oscillateur et par le choix de composants actifs à faible bruit. Un meilleur facteur de surtension Q du quartz rendra possible la construction du circuit de réaction à bande plus étroite afin que la remontée du niveau de bruit au voisinage de la fréquence de sortie soit plus étroite. La forme générale d'un spectre de signal de sortie d'oscillateur est représentée à la figure 10, page 32. Le niveau du bruit blanc sera déterminé par l'apport de bruit des étages de l'amplificateur; la remontée du niveau de bruit au voisinage de la fréquence porteuse est déterminée par le circuit de sélectivité de l'oscillateur; et la largeur finie de la ligne de fréquence porteuse elle-même est liée au facteur de surtension du quartz Q , à la configuration du réseau et aux caractéristiques de bruit de basse fréquence (c'est-à-dire la région basse fréquence) des étages à faible niveau. Toute perturbation systématique, telle que la modulation introduite par l'ondulation de la source d'alimentation ou des vibrations mécaniques, produira des raies parasites dans les bandes latérales.

* [7], voir la bibliographie, page 56.

Frequency ageing, or long-term frequency drift, is mainly due to changes in the crystal unit used to stabilize the oscillator frequency. However, long-term changes in electrical components may also occur and will contribute to oscillator ageing. It is usually impossible to separate the two effects, and ageing generally refers to the overall frequency drift characteristic of the complete oscillator unit, with all ambient factors held at a constant value.

Mechanical disturbances such as vibration and shock will effectively modulate the elastic parameters of the quartz plate, thus producing a frequency modulation of the oscillator signal. Careful design of the crystal unit can minimize susceptibility to mechanical disturbance, and special packaging techniques can provide mechanical isolation of the crystal and oscillator from severe mechanical environments, [7]*, but the effects cannot be completely eliminated and shall be considered, particularly for aerospace environments.

4.2 *Random frequency variations*

In addition to the environmental effects on frequency referred to above, the oscillator output frequency may be corrupted by electrical noise generated by the active devices in the circuit, by excess electrical noise produced by the electrical components and by noise originating in the crystal unit.

Crystal unit “noise” usually results from some defect in the resonator structure, such as poor adherence of electrodes to the quartz surface, imperfect attachment of supporting structures, etc. These defects often result in strong dependence of resonator frequency on drive level, as well as variations of the equivalent electrical parameters (resistance, inductance) with changes in excitation amplitude. Measurements of these characteristics will usually make it possible to select crystal units for special applications which will be free of excess “frequency noise” effects.

The effects of electrical noise may be envisaged by considering the output signal of the oscillator to consist of a single frequency component superimposed upon a noise spectrum of the wideband thermal and shot noise associated with the oscillator stage, shaped by the narrow-band amplifier characteristic of the oscillator network. While the exact interaction of the noise signal with the oscillating loop is an extremely complex problem beyond the scope of this standard, some general conclusions may be readily drawn.

First, it is clear that improved signal-to-noise operation of the oscillator stage and the first buffer amplifier will improve the random phase-fluctuation spectrum of the signal. This may be achieved by high-level operation of the oscillator and by the choice of low-noise active devices. Improved crystal unit Q will make possible the design of narrower bandwidth feedback networks so that the band of enhanced noise in the vicinity of the output frequency will be narrower. The general shape of the output signal spectrum of an oscillator is shown in Figure 10, page 33. The white noise level will be determined by the noise contribution of the amplifier stages; the enhanced noise near the carrier frequency is shaped by the oscillator selective network; and the finite width of the carrier line itself is related to the crystal unit Q , the network configuration and the low frequency (i.e. “ $1/f$ ” region) noise characteristics of the low-level stages. Any systematic disturbance, such as power supply ripple modulation or mechanical vibration, will produce discrete sideband spurious lines.

* [7], see the Bibliography, page 56.

Comme la tension de sortie instantanée est la somme vectorielle de la fréquence porteuse et des composants de bruit à l'instant d'échantillonnage, il apparaît que la fréquence angulaire moyenne mesurée pendant chaque intervalle fini

$$\omega_{\text{moyen}} = \frac{\Delta\theta(t_1) - \Delta\theta(t_0)}{t_1 - t_0}$$

dépend de la phase des vecteurs de la tension instantanée au début et à la fin de l'intervalle d'échantillonnage et n'est donc pas la même d'un intervalle à l'autre. L'écart type d'un certain nombre de mesures est en général fonction de l'intervalle d'échantillonnage et sa courbe aura une forme semblable à celle de la figure 11, qui donne un exemple représentatif d'écarts types de groupes de mesures en fonction du temps d'échantillonnage, relatives à un oscillateur de précision de 5 MHz. Les grandeurs de l'écart et sa variation par rapport à τ seront différentes d'un oscillateur à l'autre; mais le relevé $\delta - \tau$ présentera cette forme générale à moins que des variations systématiques (telles que variations cycliques de température, etc.) ne se produisent.

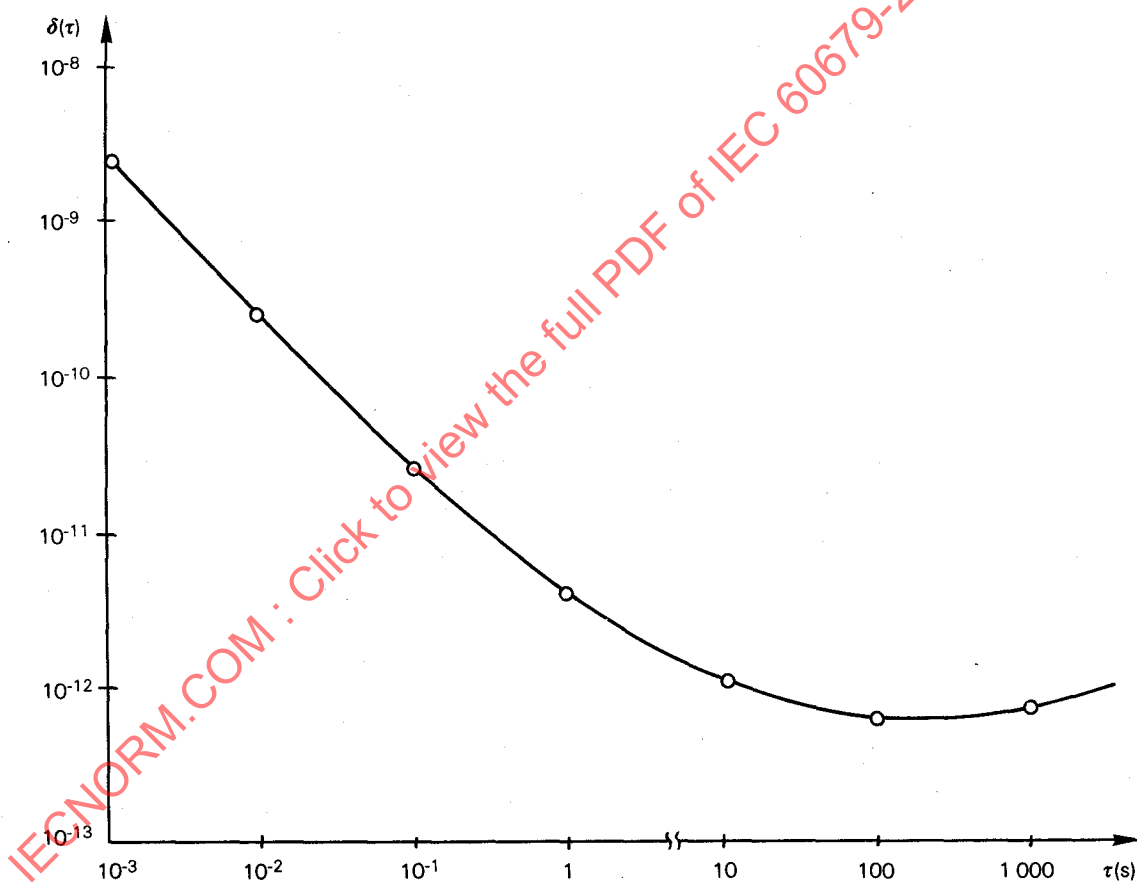


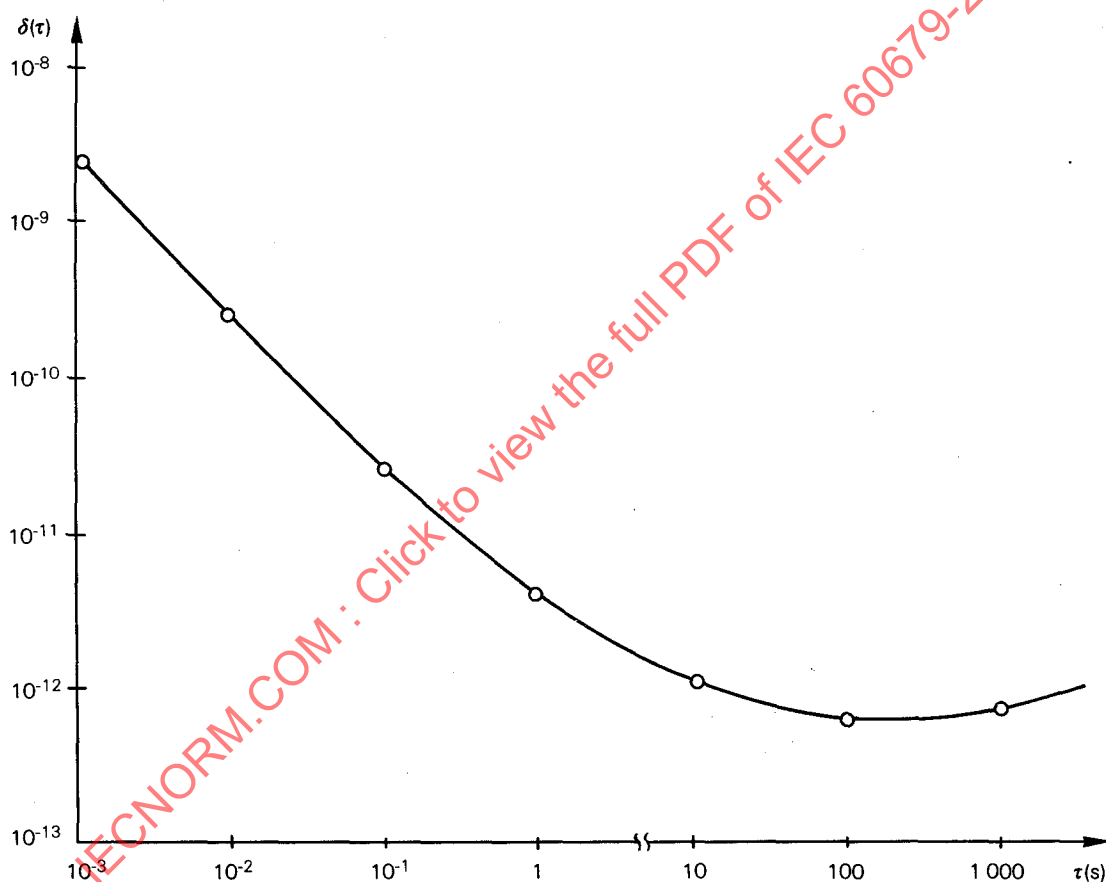
FIG. 11. - Variation des écarts types des mesures de fréquence par rapport au temps d'intégration par échantillon pour un oscillateur de précision typique piloté par quartz.

Lorsque la stabilité à court terme de fréquence ou de phase du signal de sortie d'un oscillateur présente de l'importance pour des applications particulières, la stabilité requise doit être spécifiée et une méthode de mesure acceptable doit être définie. A l'heure actuelle, il n'existe pas de normes acceptées qui soient applicables à ce domaine, mais un exposé des méthodes et techniques de mesure recommandées figure dans la Publication 679-1 de la CEI.

Since the instantaneous output voltage is the vector sum of carrier and noise components at the sampling instant, it is clear that the average angular frequency measured during any finite interval

$$\omega_{\text{ave}} = \frac{\Delta\theta(t_1) - \Delta\theta(t_0)}{(t_1 - t_0)}$$

will depend upon the phase of the instantaneous voltage vectors at the beginning and end of the sampling interval and will, therefore, not be exactly the same from one interval to the next. The standard deviation of a number of frequency measurements will, in general, be a function of the length of the sampling interval and will be found to have a dependence on the sampling interval similar to that shown in Figure 11, which shows a typical plot of the standard deviation of groups of frequency measurements as a function of sampling time for a precision 5 MHz oscillator. Magnitudes of deviation and exact dependence on τ will vary from oscillator to oscillator, but $\delta - \tau$ plots will be of this general shape unless systematic variations (such as cyclic temperature, etc.) are present.



231/81

FIG. 11. - Dependence of the standard deviation of frequency measurements on the sample averaging time for a typical precision crystal-controlled oscillator.

If the short-term frequency or phase stability of an oscillator output signal is important in particular applications, then the required stability must be specified and an acceptable method of measurement defined. At present there are no accepted standards applicable to this area, but recommended measures and techniques of measurement are discussed in IEC Publication 679-1.

5. Spécification des paramètres d'oscillateur

L'article précédent décrit brièvement les caractéristiques de fonctionnement présentées par plusieurs catégories générales d'oscillateurs pilotés par quartz. La spécification d'un oscillateur particulier destiné à une application particulière peut définir l'une quelconque de ces caractéristiques ou toutes en fonction des tolérances imposées par le système de fonctionnement. En outre, l'interface électrique entre le système et l'oscillateur doit être complètement définie pour garantir la compatibilité. Le tableau I résume les paramètres les plus importants qui doivent être pris en considération. Il convient d'énoncer clairement, dans toute spécification, les tolérances pour les paramètres applicables.

Beaucoup de paramètres inscrits sur la liste s'expliquent d'eux-mêmes, tandis que beaucoup d'autres ont été expliqués dans l'article précédent. Trois de ces paramètres, à savoir le temps de stabilisation, l'ajustage de la fréquence et la stabilité en régime permanent, sont examinés plus en détail dans le présent article, car la spécification précise de ces paramètres peut influencer sensiblement le prix et la complexité de l'oscillateur entier.

5.1 Temps de stabilisation

Ce paramètre, difficile à spécifier si l'on n'entre pas suffisamment dans les détails, n'est pas souvent spécifié de façon adéquate. Un malentendu se produit fréquemment sur la question de savoir si la fréquence de référence est la fréquence qu'avait l'oscillateur avant sa mise hors circuit ou après sa stabilisation. Le fait que le temps de stabilisation soit fonction de la durée pendant laquelle l'oscillateur a été arrêté constitue un autre problème. La température ambiante à l'instant de la mise en circuit de l'oscillateur est encore un autre facteur.

TABLEAU I
Liste des paramètres typiques de l'oscillateur

1.	Fréquence nominale
2.	Coefficients dus aux conditions extérieures a) Fréquence en fonction du temps b) Fréquence en fonction de la charge – Comprend la grandeur et l'angle de phase c) Fréquence en fonction de la tension – Comprend la modulation par bruit sur les bornes à courant continu d) Fréquence en fonction de la température – Comprend les variations de la fréquence en fonction des changements de la température en régime permanent et en régime transitoire e) Effets tolérables des environnements mécaniques spécifiés
3.	Conditions requises pour la source d'alimentation de l'oscillateur a) Tension – Comprend la tension normale, la régulation et l'ondulation, et les exigences relatives au brouillage électromagnétique b) Courant ou puissance c) Conditions de mise à la masse du système – Courant continu, haute fréquence, blindage
4.	Caractéristiques de sortie a) Forme d'onde – Comprend la première durée de transition et la dernière durée de transition, si applicable b) Amplitude c) Impédance de charge d) Distorsion harmonique e) Oscillations parasites f) Rapport signal/bruit
5.	Caractéristiques de fréquence a) Temps de stabilisation b) Fidélité c) Gamme d'ajustage de la fréquence d) Précision de réglage e) Modulation fortuite de la fréquence dans des conditions spécifiées
6.	Caractéristiques d'environnement a) Gamme de températures – Stockage et fonctionnement b) Vibrations, chocs, accélération – Survivance et fonctionnement

5. Specification of oscillator parameters

The preceding clause describes briefly the performance characteristics exhibited by several general categories of crystal-controlled oscillators. The specification of a particular oscillator for a particular application may define any or all of these characteristics, depending upon the tolerances imposed by the operating system. In addition, the electrical interface between the system and the oscillator shall be completely defined in order to assure compatibility. Table I summarizes the more important parameters which need to be considered. Required tolerances on applicable parameters should be clearly stated in any specification.

Many of the listed parameters are self-explanatory, while many others have been explained in the preceding clause. Three of these parameters, namely, stabilization time, frequency adjustment and steady-state stability, are discussed in more detail in this clause, as the precise specification of these parameters can materially affect the cost and complexity of the entire oscillator package.

5.1 Stabilization time

This parameter is difficult to specify without going into considerable detail and, hence, is often not specified adequately. Frequently, misunderstanding occurs as to whether the reference frequency is the oscillator frequency before it was switched off or after it has stabilized. Another problem is that the stabilization time is a function of how long the oscillator has been switched off. Still another factor is the ambient temperature at the moment of switching on.

TABLE I
List of typical oscillator parameters

1.	<i>Nominal frequency</i>
2.	<i>Ambient coefficients</i>
	a) Frequency vs time
	b) Frequency vs load—Includes magnitude and phase angle
	c) Frequency vs voltage—Includes modulation by noise on d.c. busses
	d) Frequency vs temperature—Includes frequency changes as a function of steady-state and transient temperature variation
	e) Tolerable effects of specified mechanical environment
3.	<i>Oscillator power supply requirements</i>
	a) Voltage—Includes normal voltage, regulation and ripple, electromagnetic interference requirements
	b) Current or power
	c) System grounding conditions—Direct-current, high-frequency, screening
4.	<i>Output characteristics</i>
	a) Wave-shape—Includes rise and fall times if applicable
	b) Amplitude
	c) Load impedance
	d) Harmonic distortion
	e) Spurious oscillations
	f) Signal-to-noise ratio
5.	<i>Frequency characteristics</i>
	a) Stabilization time
	b) Repeatability
	c) Frequency adjustment range
	d) Setting resolution
	e) Incidental frequency modulation under specified conditions
6.	<i>Environment</i>
	a) Temperature range—Storage and operating
	b) Vibration, shock, acceleration—Survival and operating.

Evidemment, toutes les conditions possibles ne peuvent pas être prévues dans la spécification; ainsi, la meilleure solution est-elle de choisir une condition typique qui devrait vraisemblablement se présenter dans l'application à laquelle l'oscillateur est destiné, et de la stipuler dans la spécification.

Il convient, toutefois, de veiller à ne pas spécifier plus qu'il n'est nécessaire car le coût est directement proportionnel à la performance. Si le temps de mise en route n'est pas critique, comme dans le cas d'une application en régime continu, une économie importante peut être réalisée en établissant moins strictement cette partie de la spécification ou en la supprimant. On parvient à un temps de stabilisation plus court par une ou plusieurs des approches suivantes:

- 1) Puissance d'entrée plus élevée. Ce moyen peut comprendre un élément de chauffage rapide séparé et peut aussi exiger que l'alimentation soit prévue pour une puissance de sortie plus élevée.
- 2) Masse réduite. Ce moyen pourrait aussi entraîner un format plus faible, le recours à des composants miniaturisés et un coût sensiblement plus élevé.
- 3) Meilleure isolation. Ce moyen aussi pourrait avoir pour résultat un coût plus élevé, particulièrement lorsqu'on a l'intention d'utiliser un vase de Dewar au lieu d'une isolation de type cellulaire.

Les caractéristiques de temps de stabilisation des différentes classes d'oscillateurs sont brièvement décrites ci-dessous.

5.1.1 Oscillateur à quartz en boîtier (PXO)

Cet oscillateur ne nécessite pas de temps de stabilisation. Toute dérive de la fréquence après la mise sous tension du circuit est causée principalement par la variation de température due à l'échauffement de l'équipement. L'importance de cette dérive de fréquence dépend en principe des températures initiale et finale et des caractéristiques de température de l'oscillateur, comme il est exposé au paragraphe 3.2.1.

5.1.2 Oscillateur à quartz à compensation de température (TCXO)

Cet oscillateur ne nécessite normalement pas de temps de stabilisation. La légère dérive de fréquence due à l'échauffement interne est supposée comprise dans les spécifications sur la stabilité de la température. Cependant, un temps de stabilisation peut être nécessaire si la température de l'oscillateur varie rapidement. Des variations rapides de la température établissent un gradient de température entre le quartz et le réseau de compensation. Il est, en principe, répondu à cette caractéristique particulière aux TCXO dans la spécification de l'oscillateur si l'on a prévu des variations nettement rapides de température. Ces excursions transitoires de fréquence, dépendant de la configuration mécanique de l'oscillateur, peuvent être de 1×10^{-6} ou plus avec des variations de température de $1^\circ\text{C}/\text{min}$ seulement.

5.1.3 Oscillateur à quartz à enceinte à température régulée (OCXO) (enceinte à un étage)

Le temps de stabilisation est probablement plus critique dans cette classe d'oscillateurs que dans les autres classes, car cette application exige souvent non seulement une stabilité assez élevée mais aussi un fonctionnement par intermittence. Les paramètres typiques de stabilisation d'un tel oscillateur à la température de -40°C après mise hors circuit pendant 8 h sont, en principe, les suivants:

<i>Temps après la mise sous tension du circuit</i>	<i>Ecart de fréquence</i>
10 min	$\pm 1 \times 10^{-6}$
30 min	$\pm 1 \times 10^{-7}$
2 h	0 (référence)

Obviously all possible conditions cannot be covered in the specification, so the best alternative is to choose a typical condition that would be likely to occur in the application for which the oscillator is intended and cover it explicitly in the specification.

One should be careful not to overspecify, however, since cost is directly proportional to performance. If stabilization time is not critical, as, for instance, in a continuous duty application, then considerable saving can be realized by relaxing or omitting this portion of the specification. Shorter stabilization time is achieved by utilizing one or more of the following approaches:

- 1) Higher power input. This may include a separate, fast warm-up heater and could also require designing the power supply for higher output.
- 2) Lower mass. This could also entail smaller size, requiring miniature components and appreciably greater cost.
- 3) Better insulation. This, too, would result in greater cost, particularly if it meant using a Dewar flask instead of foam insulation.

The stabilization characteristics of different classes of oscillators are briefly described below.

5.1.1 *Packaged crystal oscillator (PXO)*

No stabilization time is required. Any frequency drift after switching on would be primarily caused by temperature change due to equipment warm-up. The magnitude of this frequency drift would be dependent on the initial and final temperature and on the temperature characteristics of the oscillator, as discussed in Sub-clause 3.2.1.

5.1.2 *Temperature compensated crystal oscillator (TCXO)*

No stabilization time is normally required after switching on. The small frequency drift due to internal heating is assumed to be included in the temperature stability specifications. A stabilization time may be required if the temperature of the unit is changed rapidly, however. Rapid temperature changes establish a temperature gradient between the crystal and the compensating network. This characteristic is peculiar to TCXO's and should be covered in the oscillator specification if fairly rapid temperature changes are anticipated. Depending on the mechanical configuration of the oscillator, these transient frequency excursions can be 1×10^{-6} or more with temperature changes as low as $1^\circ\text{C}/\text{min}$.

5.1.3 *Oven-controlled crystal oscillator (OCXO) (single-stage oven)*

Stabilization time is probably more critical in this class of oscillators than any other, because the application frequently requires both fairly high stability and intermittent operation. Typical stabilization parameters of such an oscillator at -40°C after being off for 8 h, would be as follows:

<i>Time after switching on</i>	<i>Frequency error</i>
10 min	$\pm 1 \times 10^{-6}$
30 min	$\pm 1 \times 10^{-7}$
2 h	0 (reference)

5.1.4 Oscillateur à quartz à enceinte à température régulée (OCXO) (enceinte à deux étages)

Le temps de stabilisation est de faible importance pour beaucoup d'utilisations d'oscillateurs de haute qualité tels que celui-ci (souvent désigné comme étalon de fréquence) car l'utilisation requiert un service permanent. Quelquefois, cependant, le temps de stabilisation prend de l'importance quand un fonctionnement intermittent est requis ou lorsqu'une reprise rapide après une panne d'alimentation est indispensable. D'une façon générale, le temps de stabilisation est plus long pour une enceinte à deux étages pour plusieurs raisons:

- 1) une masse plus importante est impliquée;
- 2) des stabilités plus élevées sont spécifiées;
- 3) on utilisera un quartz fonctionnant sur partiel plus vraisemblablement que dans une enceinte à un étage.

Le temps de stabilisation pour cette classe d'oscillateurs, à -40°C après 24 h de mise hors circuit, est en principe le suivant:

Temps après la mise sous tension du circuit	Ecart de fréquence
30 min	$\pm 1 \times 10^{-8}$
4 h	$\pm 5 \times 10^{-10}$
24 h	0 (référence)

5.2 Gamme d'ajustage de la fréquence

Il convient évidemment que la gamme d'ajustage de la fréquence de l'oscillateur soit suffisante de façon à permettre le calage de la fréquence à sa valeur nominale durant toute la vie de l'oscillateur. Théoriquement, cela signifierait qu'il faille multiplier le taux de vieillissement par la durée de vie prévue, doubler le nombre obtenu pour tenir compte du fait que le vieillissement peut être positif ou négatif et ajouter une marge suffisante pour prendre en considération la tolérance de finition initiale du quartz, la capacité parasite et la tolérance sur la capacité de charge. Pratiquement, cette gamme peut être quelque peu inférieure à cela car le vieillissement n'est pas linéaire mais décroît généralement avec le temps et, au moins pour les quartz oscillateurs de précision, la tolérance de finition est corrigée habituellement au moyen d'un choix convenable de la capacité de charge. Il y a encore une possibilité d'incompatibilité entre les prescriptions de la gamme d'ajustage et de précision de l'ajustage. Si un degré élevé de précision est requis pour l'ajustage de fréquence, il peut ne pas être pratique de rechercher cette précision et en même temps la gamme souhaitée d'ajustage avec le même organe de commande.

Par exemple, il peut être difficile d'obtenir un ajustement de fréquence de 1×10^{-6} et une précision de 1×10^{-10} sans recourir à un ajustage de fréquence à la fois large et précis, et c'est parfois nécessaire. Les caractéristiques d'ajustage pour les types différents d'oscillateurs sont décrites ci-dessous.

5.2.1 Oscillateur à quartz en boîtier (PXO)

La gamme d'ajustage de la fréquence requise pour les oscillateurs à quartz en boîtier dépend de la qualité du quartz utilisé. Il convient de ménager une gamme adéquate, appropriée au vieillissement prévu du dispositif. Pour les types à basse fréquence (modes d'extension, de flexion et de cisaillement plan), elle peut aller jusqu'à $\pm 100 \times 10^{-6}$, tandis que pour les quartz hermétiquement scellés à cisaillement d'épaisseur (types AT, BT) une gamme d'ajustage de $\pm 25 \times 10^{-6}$ ou $\pm 50 \times 10^{-6}$ conviendrait. Comme la stabilité de la fréquence de l'oscillateur à quartz en boîtier sera limitée par le coefficient de température du quartz, qui est habituellement d'au moins de 10×10^{-6} à 20×10^{-6} , il n'est généralement pas nécessaire que la précision d'ajustage de la fréquence soit meilleure que 1×10^{-6} environ.

5.1.4 Oven-controlled crystal oscillator (OCXO) (two-stage oven)

In many of the applications for a high quality oscillator such as this (often referred to as a frequency standard) stabilization time is of minor importance because the application requires continuous duty. There are times, however, where intermittent duty is required, or where fast recovery after a power failure is necessary, and then the stabilization time becomes important. Generally speaking, stabilization time will be longer for a two-stage oven for several reasons:

- 1) more mass is involved;
- 2) higher stabilities are specified;
- 3) an overtone crystal will more likely be used than in a single-stage oven.

Typical stabilization time for this class of oscillators, at -40°C after 24 h shutdown, would be as follows:

Time after switching on	Frequency error
30 min	$\pm 1 \times 10^{-8}$
4 h	$\pm 5 \times 10^{-10}$
24 h	0 (reference)

5.2 Frequency adjustment range

Obviously, the frequency adjustment range of the oscillator should be sufficient to permit setting the frequency to its nominal value throughout the life of the oscillator. Theoretically, this would mean multiplying the ageing rate by the expected life, doubling that number to cover either positive or negative ageing, and adding sufficient margin to take care of the initial finishing tolerance, stray capacitance and tolerance of the load capacitance. In practice, it can be somewhat less than this because the frequency ageing is not linear but normally decreases with time and, at least in precision crystal oscillators, the finishing tolerance of the crystal is usually corrected by selecting the proper load capacitance. There is still the possibility of conflict between the adjustment range requirement and the adjustment resolution requirement. If a high degree of resolution is required in the frequency adjustment, it may not be practical to attain this resolution and also the desired adjustment range with the same control.

It would be difficult, for instance, to provide 1×10^{-6} frequency adjustment and 1×10^{-10} resolution without resorting to both a coarse and a fine frequency adjustment, and this is sometimes necessary. The adjustment characteristics of different types of oscillators are described below.

5.2.1 Packaged crystal oscillator (PXO)

The frequency adjustment range required for packaged crystal oscillators depends upon the quality of the crystal unit used. Adequate range should be provided to accommodate the anticipated lifetime ageing of the unit. For low-frequency types (extensional, flexure, and face-shear modes) this may be as much as $\pm 100 \times 10^{-6}$, while for hermetically sealed thickness-shear crystals (AT, BT types) an adjustment range of $\pm 25 \times 10^{-6}$ or $\pm 50 \times 10^{-6}$ should be adequate. Since the frequency stability of the packaged oscillator will be limited by the temperature coefficient of the crystal unit, usually at least 10×10^{-6} to 20×10^{-6} , the resolution of the frequency adjustment need be no better than about 1×10^{-6} .

5.2.2 *Oscillateur à quartz à compensation de température (TCXO)*

Tandis que les stabilités s'améliorent, le taux de vieillissement diminue et l'ajustage nécessaire de fréquence est sensiblement moindre. Le taux de vieillissement initial pour les quartz TCXO en boîtiers de type DA est de 5×10^{-9} par jour. En extrapolant de façon linéaire, on aboutirait à environ 9×10^{-6} pour cinq ans de durée de vie. Il convient donc d'attribuer à la gamme d'ajustage une valeur minimale de 18×10^{-6} si l'on tient compte de ce que le vieillissement peut être positif ou négatif. En pratique, en raison de la diminution du taux de vieillissement avec le temps, la gamme d'ajustage devrait être de l'ordre de $\pm 4 \times 10^{-6}$.

5.2.3 *Oscillateur à quartz à enceinte à température régulée (OCXO) (enceinte à un étage)*

La gamme d'ajustage d'un oscillateur à température régulée dépend en principe du mode de fonctionnement, mode fondamental ou mode partiel du quartz. Le taux de vieillissement d'un quartz en mode partiel devrait être un peu plus faible que celui d'un quartz en mode fondamental et devrait aussi avoir une pente un peu plus raide, si bien que la gamme d'ajustage serait plus étroite. Si l'on suppose qu'un quartz en mode fondamental sera utilisé dans une enceinte à un étage, la gamme d'ajustage sera semblable à celle du TCXO dont il a été question précédemment. La température de fonctionnement d'un quartz pour enceinte, plus élevée que celle d'un quartz dans un TCXO, a pour résultat en principe un taux de vieillissement initial un peu plus élevé; ainsi la gamme d'ajustage de fréquence typique devrait être de $\pm 5 \times 10^{-6}$.

5.2.4 *Oscillateur à quartz à enceinte à température régulée (OCXO) (enceinte à deux étages)*

Habituellement, pour cette classe d'oscillateurs, on utilise un quartz fonctionnant en mode partiel afin de parvenir à la meilleure stabilité possible. Initialement, le taux de vieillissement est de l'ordre de 5×10^{-10} par jour ou meilleur et s'améliore avec le temps. En supposant que la tolérance de finition du quartz est corrigée grâce au choix d'un condensateur fixe, l'ajustage de fréquence ne sera nécessaire que pour la correction du vieillissement, et une gamme de $\pm 0,5 \times 10^{-6}$ devrait convenir.

5.3 *Stabilité de fréquence dans les conditions de température en régime permanent*

Comme il a été indiqué au paragraphe 5.1, les caractéristiques de fréquence d'un oscillateur à quartz en fonction du temps après la mise sous tension du circuit peuvent être représentées par une courbe qui doit être située dans la zone hachurée de la figure 12, page 46.

Pendant la stabilisation, la fréquence peut suivre une courbe semblable à A ou B selon les conditions à la mise sous tension du circuit. La non-linéarité de ces courbes est due aux tensions thermiques dans la lame de quartz et aux gradients thermiques qui existent à travers l'oscillateur tout entier.

5.2.2 *Temperature compensated crystal oscillator (TCXO)*

As stabilities become better, ageing rates become lower and the necessary frequency adjustment is appreciably less. A typical initial ageing rate for TCXO crystals in type DA enclosures is 5×10^{-9} per day. If extrapolated linearly, this would amount to about 9×10^{-6} over a five-year lifetime. Allowing for either positive or negative ageing would then require a minimum adjustment range of 18×10^{-6} . In practice, because of the reduction in ageing rate with time, the typical adjustment range for a TCXO would be of the order of $\pm 4 \times 10^{-6}$.

5.2.3 *Oven-controlled crystal oscillator (OCXO) (single-stage oven)*

The adjustment range of a temperature-controlled oscillator would depend on whether the crystal used is a fundamental mode crystal or an overtone. An overtone crystal would probably have a somewhat lower ageing rate and also be somewhat stiffer than a fundamental crystal, so the adjustment range would be less. Assuming that a fundamental mode crystal would be used in a single-stage oven, the adjustment range would be similar to that of the TCXO discussed previously. The higher operating temperature of an oven crystal as compared to the crystal in the TCXO would result in a slightly higher initial ageing rate, so a typical frequency adjustment range would be $\pm 5 \times 10^{-6}$.

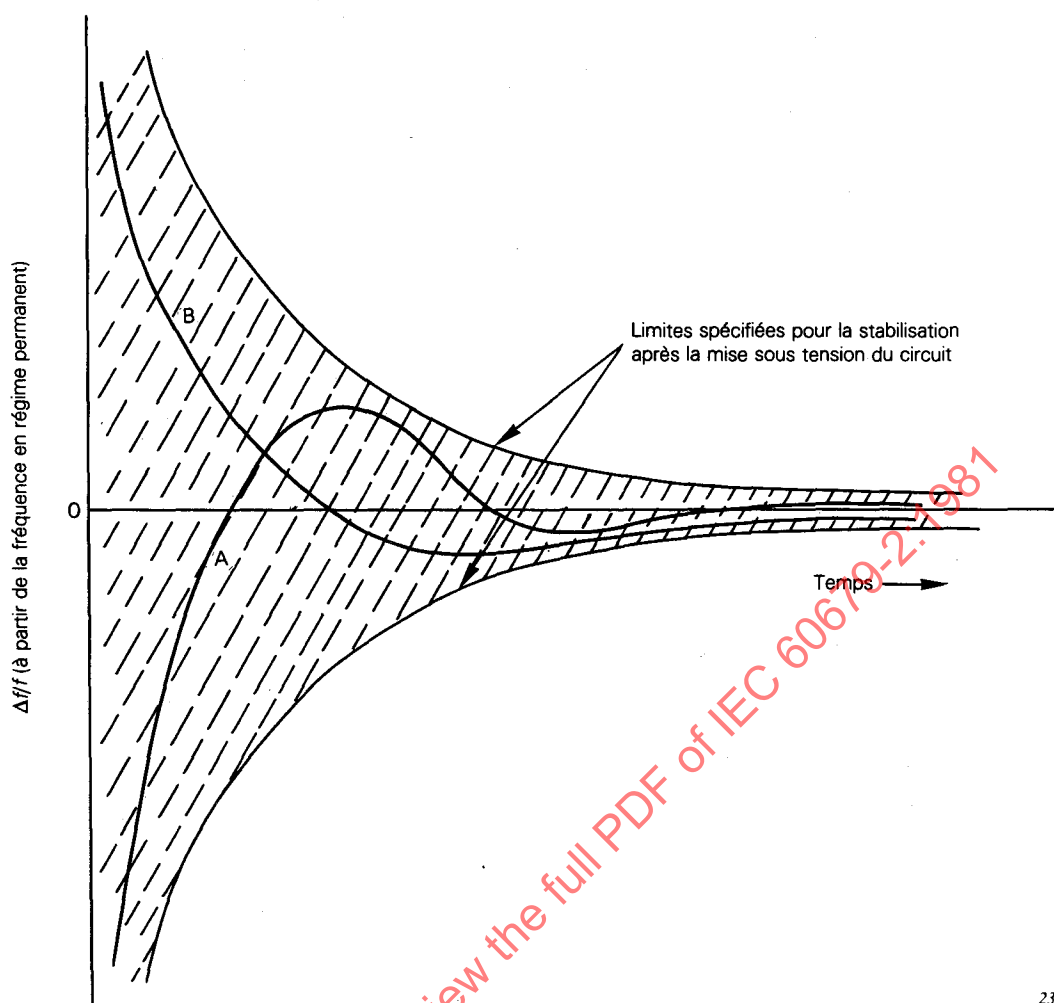
5.2.4 *Oven-controlled crystal oscillator (OCXO) (two-stage oven)*

Normally, this class of oscillator would use an overtone crystal in order to achieve the best possible stability. Ageing rate would be of the order of 5×10^{-10} per day or better, initially, and would improve with time. Assuming that the finishing tolerance of the crystal is corrected by selecting a fixed capacitor, frequency adjustment would only be required to correct for ageing and a range of $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ would be adequate.

5.3 *Frequency stability under steady-state temperature conditions*

The frequency versus time characteristics of a crystal oscillator after switching on can be shown to follow a curve that must lie in the cross-hatched area shown in Figure 12, page 47, as discussed in Sub-clause 5.1.

During stabilization, the frequency may follow a curve similar to A or B, depending on the conditions when switching on. These non-linear curves are generated by thermal stresses in the quartz plate and thermal gradients that exist throughout the entire oscillator.



232/81

FIG. 12. – Comportement typique de la stabilisation de la fréquence d'un OCXO après la mise sous tension initiale du circuit.

En régime permanent, on suppose que tous les gradients de température sont nuls et que la totalité de l'oscillateur est dans un environnement de température homogène. En conséquence, seuls les effets de température du premier ordre seront observés:

Dans un oscillateur sans compensation de température ni enceinte (PXO), la courbe de la fréquence en fonction de la température en régime permanent correspondra de très près à la courbe température-fréquence du quartz.

Si on trace la courbe de la fréquence de sortie d'un TCXO en fonction de la température ambiante, on obtient la courbe température-fréquence compensée de l'oscillateur.

Si on trace la courbe de la fréquence d'un OCXO (à un étage ou à deux étages) en fonction de la température ambiante, on obtient la déviation due aux variations de température de l'enceinte dans la gamme de températures.

Théoriquement, il y aura toujours des gradients thermiques à travers l'oscillateur, sauf s'il est maintenu à température constante pendant un temps infini. Cependant, les gradients diminuent exponentiellement, et faire fonctionner un dispositif pendant 45 min à température constante les réduit habituellement à un point tel qu'ils peuvent être négligés.