

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC**

**60122-2**

Deuxième édition  
Second edition  
1983-01

---

---

**Quartz pour le contrôle et la sélection  
de la fréquence**

**Deuxième partie:  
Guide pour l'emploi des résonateurs à quartz  
pour le contrôle et la sélection de la fréquence**

**Quartz crystal units for frequency control  
and selection**

**Part 2:  
Guide to the use of quartz crystal units  
for frequency control and selection**



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC 60122-2: 1983

## Numéros des publications

Depuis le 1er 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**

**60122-2**

Deuxième édition  
Second edition  
1983-01

---

---

**Quartz pour le contrôle et la sélection  
de la fréquence**

**Deuxième partie:  
Guide pour l'emploi des résonateurs à quartz  
pour le contrôle et la sélection de la fréquence**

**Quartz crystal units for frequency control  
and selection**

**Part 2:  
Guide to the use of quartz crystal units  
for frequency control and selection**

© IEC 1983 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](mailto:inmail@iec.ch) IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale  
International Electrotechnical Commission  
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX  
PRICE CODE

**X**

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

## SOMMAIRE

|                                                                                                                            | Pages |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| PRÉAMBULE . . . . .                                                                                                        | 6     |
| PRÉFACE . . . . .                                                                                                          | 6     |
| <br>CHAPITRE III: GUIDE POUR L'EMPLOI DES RÉSONATEURS À QUARTZ POUR LE CONTRÔLE<br>ET LA SÉLECTION DE LA FRÉQUENCE<br><br> |       |
| Articles                                                                                                                   |       |
| 1. Introduction . . . . .                                                                                                  | 8     |
| 2. Le résonateur à quartz en tant que composant électronique . . . . .                                                     | 8     |
| 2.1 Généralités . . . . .                                                                                                  | 8     |
| 2.2 Circuit électrique équivalent d'un résonateur à quartz . . . . .                                                       | 12    |
| 2.3 Modes de vibration en fonction de la fréquence . . . . .                                                               | 16    |
| 2.4 Caractéristiques de fréquence en fonction de la température . . . . .                                                  | 16    |
| 2.5 Paramètres des résonateurs à quartz . . . . .                                                                          | 24    |
| 2.6 Boîtiers de résonateurs à quartz . . . . .                                                                             | 44    |
| 3. Le résonateur à quartz en tant que composant d'un circuit . . . . .                                                     | 46    |
| 3.1 Généralités . . . . .                                                                                                  | 46    |
| 3.2 Oscillateurs, notion de base . . . . .                                                                                 | 60    |
| 3.3 Considérations pratiques sur les oscillateurs . . . . .                                                                | 66    |
| 3.4 Stabilité de fréquence . . . . .                                                                                       | 68    |
| 3.5 Utilisation pour le filtrage . . . . .                                                                                 | 68    |
| 4. Facteurs affectant le coût et la disponibilité commerciale des résonateurs à quartz . . . . .                           | 70    |
| 4.1 Introduction . . . . .                                                                                                 | 70    |
| 4.2 Fréquence du résonateur à quartz . . . . .                                                                             | 70    |
| 4.3 Boîtiers de résonateur à quartz . . . . .                                                                              | 70    |
| 4.4 Tolérances de fréquence . . . . .                                                                                      | 70    |
| 4.5 Coupe AT. Aspects économiques du coefficient de température . . . . .                                                  | 72    |
| 4.6 Vieillessement . . . . .                                                                                               | 72    |
| 4.7 Conditions climatiques et mécaniques . . . . .                                                                         | 74    |
| 4.8 Considérations générales sur les essais . . . . .                                                                      | 74    |
| 5. Données techniques destinées à accompagner une commande . . . . .                                                       | 76    |
| 5.1 Liste de vérification des paramètres à prescrire dans une spécification particulière . . . . .                         | 76    |
| 5.2 Prescriptions obligatoires . . . . .                                                                                   | 76    |
| 5.3 Prescriptions facultatives . . . . .                                                                                   | 78    |

## CONTENTS

|                                                                                               | Page |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| FOREWORD . . . . .                                                                            | 7    |
| PREFACE . . . . .                                                                             | 7    |
| <br>CHAPTER III: GUIDE TO THE USE OF QUARTZ CRYSTAL UNITS FOR FREQUENCY CONTROL AND SELECTION |      |
| Clause                                                                                        |      |
| 1. Introduction . . . . .                                                                     | 9    |
| 2. The quartz crystal unit as an electronic component . . . . .                               | 9    |
| 2.1 General . . . . .                                                                         | 9    |
| 2.2 The equivalent electrical circuit of a quartz crystal unit . . . . .                      | 13   |
| 2.3 Modes of vibration as a function of frequency . . . . .                                   | 17   |
| 2.4 Frequency versus temperature characteristics . . . . .                                    | 17   |
| 2.5 Crystal unit parameters . . . . .                                                         | 25   |
| 2.6 Crystal unit enclosures . . . . .                                                         | 45   |
| 3. The crystal unit as a circuit component . . . . .                                          | 47   |
| 3.1 General . . . . .                                                                         | 47   |
| 3.2 Oscillators, basic concept . . . . .                                                      | 61   |
| 3.3 Oscillators, practical considerations . . . . .                                           | 67   |
| 3.4 Frequency stability . . . . .                                                             | 69   |
| 3.5 Use in filter applications . . . . .                                                      | 69   |
| 4. Factors affecting cost and availability of quartz crystal units . . . . .                  | 71   |
| 4.1 Introduction . . . . .                                                                    | 71   |
| 4.2 Crystal unit frequency . . . . .                                                          | 71   |
| 4.3 Crystal unit enclosures . . . . .                                                         | 71   |
| 4.4 Frequency tolerances . . . . .                                                            | 71   |
| 4.5 AT-cut. Temperature coefficient cost aspects . . . . .                                    | 73   |
| 4.6 Ageing . . . . .                                                                          | 73   |
| 4.7 Environmental . . . . .                                                                   | 75   |
| 4.8 General testing considerations . . . . .                                                  | 75   |
| 5. Technical data to accompany order form . . . . .                                           | 77   |
| 5.1 Check list of crystal unit parameters to be specified in article sheet . . . . .          | 77   |
| 5.2 Mandatory requirements . . . . .                                                          | 77   |
| 5.3 Optional requirements . . . . .                                                           | 79   |

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 6. Termes et définitions . . . . .                              | 80 |
| 6.1 Termes généraux . . . . .                                   | 80 |
| 6.2 Propriétés électriques . . . . .                            | 82 |
| 6.3 Définitions relatives au quartz en fonctionnement . . . . . | 84 |
| 7. Bibliographie . . . . .                                      | 88 |

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60122-2:1983

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 6. Terms and definitions . . . . .   | 81 |
| 6.1 General terms . . . . .          | 81 |
| 6.2 Electrical properties . . . . .  | 83 |
| 6.3 Operational properties . . . . . | 85 |
| 7. Bibliography . . . . .            | 88 |

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60122-2:1983

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**QUARTZ POUR LE CONTRÔLE ET LA SÉLECTION DE LA FRÉQUENCE****Deuxième partie: Guide pour l'emploi des résonateurs à quartz  
pour le contrôle et la sélection de la fréquence**

## 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 quartz pour le contrôle et la sélection de la fréquence.

La première partie, comprenant le chapitre I: Valeurs normalisées, et le chapitre II: Conditions de mesures et d'essais, est publiée comme Publication 122-1 de la CEI.

La troisième partie comprenant le chapitre IV: Encombrements normalisés, et le chapitre V: Connexions des broches, est publiée comme Publication 122-3 de la CEI.

Un projet fut discuté lors de la réunion tenue à Zurich en 1979. A la suite de cette réunion, un projet révisé, document 49(Bureau Central)140, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en octobre 1980.

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

|                 |                       |                         |
|-----------------|-----------------------|-------------------------|
| Afrique du Sud  | Egypte                | Royaume-Uni             |
| (République d') | Espagne               | Suède                   |
| Allemagne       | Etats-Unis d'Amérique | Suisse                  |
| Belgique        | Italie                | Turquie                 |
| Brésil          | Japon                 | Union des Républiques   |
| Canada          | Nouvelle-Zélande      | Socialistes Soviétiques |

*Autres publications de la CEI citées dans la présente norme:*

- Publications n°s 68: Essais fondamentaux climatiques et de robustesse mécanique.
- 122-1: Quartz pour le contrôle et la sélection de la fréquence, Première partie: Valeurs normalisées et conditions de mesures et d'essais.
- 302: Définitions normalisées et méthodes de mesures pour les résonateurs piézoélectriques de fréquences inférieures à 30 MHz.
- 314: Enceintes à température régulée pour les quartz.
- 444: Mesure des paramètres des quartz piézoélectriques par la technique de phase nulle dans le circuit en  $\pi$ .
- 679-2: Oscillateurs pilotés par quartz, Deuxième partie: Guide pour l'utilisation des oscillateurs pilotés par quartz.

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**QUARTZ CRYSTAL UNITS FOR FREQUENCY CONTROL AND SELECTION****Part 2: Guide to the use of quartz crystal units  
for frequency control and selection**

## 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 units for frequency control and selection.

Part 1, containing Chapter I: Standard values, and Chapter II: Test conditions, is issued as IEC Publication 122-1.

Part 3, containing Chapter IV: Standard outlines, and Chapter V: Pin connections, is issued as IEC Publication 122-3.

A draft was discussed at the meeting held in Zurich in 1979. As a result of this meeting, a revised draft, Document 49(Central Office)140, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in October 1980.

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

|         |               |                          |
|---------|---------------|--------------------------|
| Belgium | Japan         | Switzerland              |
| Brazil  | New Zealand   | Turkey                   |
| Canada  | South Africa  | Union of Soviet          |
| Egypt   | (Republic of) | Socialist Republics      |
| Germany | Spain         | United Kingdom           |
| Italy   | Sweden        | United States of America |

*Other IEC publications quoted in this standard:*

Publications n<sup>os</sup> 68: Basic Environmental Testing Procedures.

122-1: Quartz Crystal Units for Frequency Control and Selection, Part 1: Standard Values and Test Conditions.

302: Standard Definitions and Methods of Measurement for Piezoelectric Vibrators Operating over the Frequency Range up to 30 MHz.

314: Temperature Control Devices for Quartz Crystal Units.

444: Measurement of Quartz Crystal Unit Parameters by Zero Phase Technique in a  $\pi$ -network.

679-2: Quartz Crystal Controlled Oscillators, Part 2: Guide to the Use of Quartz Crystal Controlled Oscillators.

## QUARTZ POUR LE CONTRÔLE ET LA SÉLECTION DE LA FRÉQUENCE

### Deuxième partie: Guide pour l'emploi des résonateurs à quartz pour le contrôle et la sélection de la fréquence

#### CHAPITRE III: GUIDE POUR L'EMPLOI DES RÉSONATEURS À QUARTZ POUR LE CONTRÔLE ET LA SÉLECTION DE LA FRÉQUENCE

##### 1. Introduction

La présente norme a été établie pour répondre à un désir généralement exprimé, tant par les utilisateurs que par les fabricants, de disposer d'un guide pour l'emploi des résonateurs à quartz destinés aux oscillateurs et aux filtres, afin qu'ils puissent être utilisés au mieux.

Elle attire l'attention sur quelques-unes des questions fondamentales que l'utilisateur devrait examiner avant de commander un résonateur pour une application nouvelle; on espère que, ce faisant, il contribuera à garantir un fonctionnement satisfaisant, un coût et une disponibilité commerciale favorables. Elle n'a pas pour but de développer des notions théoriques ni de couvrir tous les cas qui se posent en pratique; enfin, elle ne peut se substituer à une liaison étroite entre fabricant et utilisateur.

##### 2. Le résonateur à quartz en tant que composant électronique

###### 2.1 Généralités

L'élément de cristal de quartz est une structure vibrant en résonance dont l'orientation et les dimensions déterminent sa fréquence pour le mode de vibration donné et dont le couplage à un circuit électrique est réalisé par effet piézoélectrique. Les propriétés intrinsèques du cristal de quartz en font, en raison de son facteur de qualité  $Q$  élevé, un dispositif unique pour une commande de fréquence et un filtrage très stables et très exacts. Les résonateurs à quartz ne sont pas des étalons primaires de fréquence mais, définis avec précision, ils procurent une stabilité excédant de beaucoup la plupart des exigences de l'industrie électronique.

Le cristal de quartz est taillé dans un monocristal de quartz selon une orientation précise par rapport aux axes cristallographiques, comme le montre la figure 1, page 10.

*Note.* — Ce dessin ne présente que des exemples généralisés des coupes le plus communément utilisées.

## QUARTZ CRYSTAL UNITS FOR FREQUENCY CONTROL AND SELECTION

### Part 2: Guide to the use of quartz crystal units for frequency control and selection

#### CHAPTER III: GUIDE TO THE USE OF QUARTZ CRYSTAL UNITS FOR FREQUENCY CONTROL AND SELECTION

##### 1. Introduction

This standard has been compiled in response to a generally expressed desire on the part of both users and manufacturers for a guide to the use of quartz crystal units for filters and oscillators so that the crystal units may be used to their best advantage.

It draws attention to some of the more fundamental questions which should be considered by the user before he places his order for a unit for a new application, and in so doing will, it is hoped, help ensure against unsatisfactory performance, unfavourable cost and non-availability. It is not the function of this standard to explain theory, nor to attempt to cover all the eventualities that may arise in practical circumstances. Lastly, it should not be considered as a substitute for close liaison between manufacturer and user.

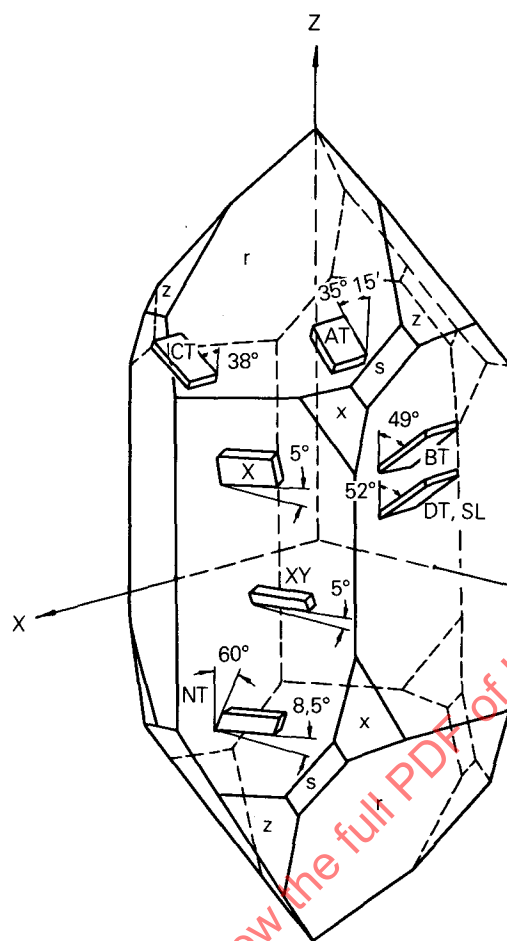
##### 2. The quartz crystal unit as an electronic component

###### 2.1 General

The quartz crystal element is a vibrating resonant structure whose orientation and dimensions determine its frequency for a given mode of vibration and which relies on the piezoelectric effect to couple it to an electrical circuit. The intrinsic properties of quartz make it a unique device for highly accurate and stable frequency control and selection because of its high “quality factor”  $Q$ . Crystal units are not a primary frequency standard, but when precisely defined can provide stabilization far in excess of most requirements in the electronic industry.

The crystal element is cut from monocrystalline quartz with precise orientation to the crystallographic axes as shown in Figure 1, page 11.

*Note.* – This illustration shows only generalized examples of the most commonly used crystal cuts.



043/83

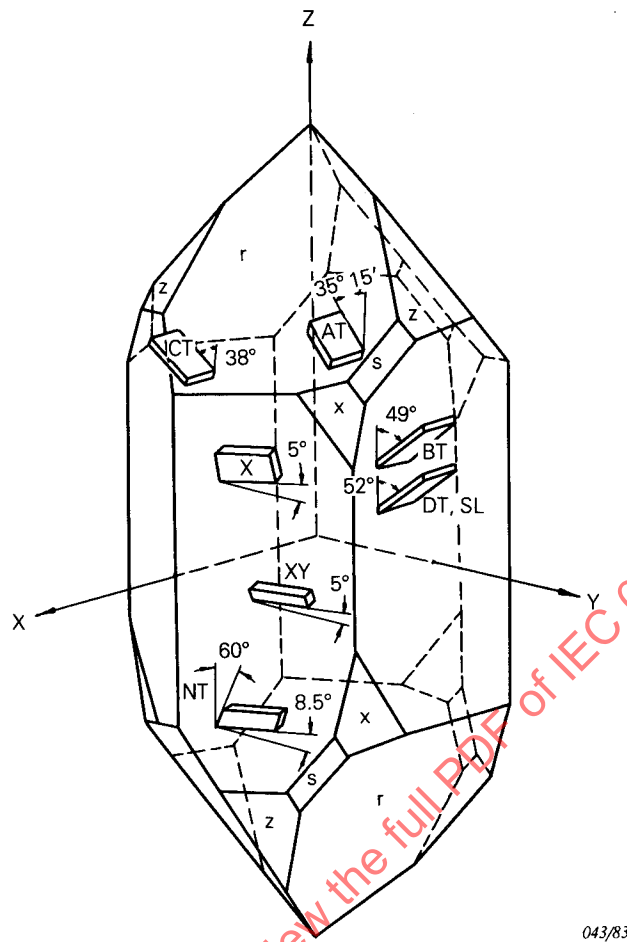
Note. — Cristal de quartz droit.

FIG. 1. — Désignation des coupes le plus communément utilisées.

Cette figure représente un cristal de quartz naturel; cependant, à l'heure actuelle, de nombreux fabricants utilisent du matériau synthétique; la technique a fait de tels progrès que les différences du point de vue électrique, entre le matériau synthétique et le matériau naturel, sont presque indiscernables.

Bien que les caractéristiques du quartz soient très stables, le fonctionnement ultime du résonateur dépend de la façon dont il est utilisé. Ce fonctionnement étant très largement influencé par les conditions d'environnement et par les conditions électriques associées, chaque utilisateur a le plus grand intérêt à consulter le fabricant au sujet de son application particulière au stade le moins avancé de son étude.

Il existe un grand nombre de coupes et de modes de vibration différents permettant de fabriquer des résonateurs à quartz de coefficient de température voisin de zéro dans une large gamme de fréquences.



043/83

Note. — Example shown is right-handed quartz.

FIG. 1. — Designation of the most commonly used crystal cuts.

This figure shows a natural quartz crystal. However, most manufacturers now use synthetic material. Techniques have advanced to a point where synthetic quartz is almost indistinguishable from natural material with regard to electrical performance.

Although the properties of quartz are very stable, the ultimate performance of the element is dependent on the way in which it is used. Its performance is influenced by the environment and the associated electrical circuits. All customers should discuss their particular application with the crystal manufacturer at the earliest stage in any design.

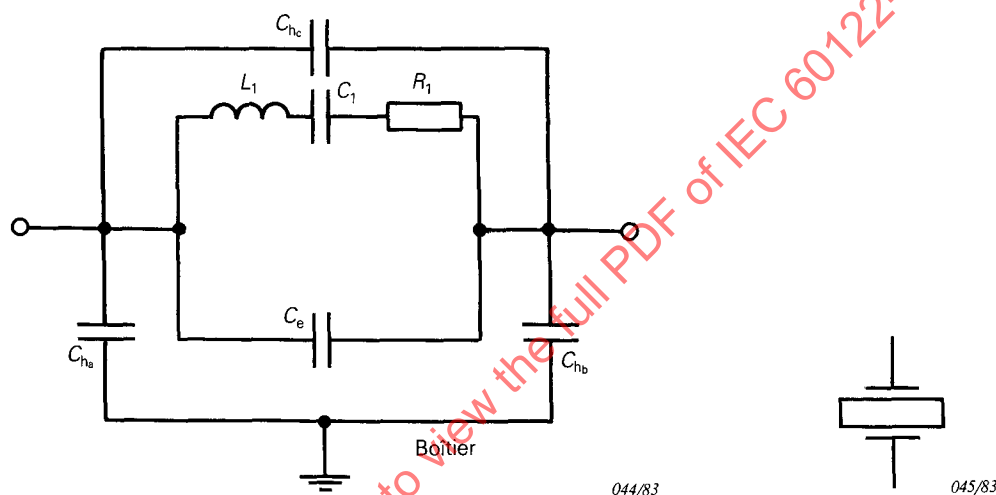
There are a number of different cuts and modes of vibration which will produce crystal units of near zero temperature coefficients over a wide frequency range.

Le résonateur à quartz, en tant que composant électrique, se compose d'un cristal déterminé, ou plaque, associé à des électrodes conductrices pour former un champ électrique à travers le quartz, et d'un montage adapté dans un boîtier de protection sans interférence significative sur le mode désiré de vibration mécanique. Le circuit électrique équivalent de cet ensemble est représenté sur la figure 2. Les valeurs des paramètres de ce circuit équivalent dépendent essentiellement de la coupe et du mode de vibration du cristal ainsi que de la fréquence de fonctionnement et des choix spécifiques de conception déterminés par le fabricant.

## 2.2 Circuit électrique équivalent d'un résonateur à quartz

Tout résonateur piézoélectrique faiblement amorti, vibrant mécaniquement et excité par l'intermédiaire d'électrodes, peut être représenté, au voisinage de la résonance, par un circuit électrique équivalent qui comprend une capacité ( $C_1$ ), une inductance ( $L_1$ ) et une résistance ( $R_1$ ) en série shuntées par une deuxième capacité ( $C_0$ ).

Le circuit équivalent du résonateur à quartz est représenté sur la figure 2.



- $L_1$  = inductance dynamique (henry)
- $C_1$  = capacité dynamique (farad)
- $C_h$  = capacité de boîtier (farad)
- $C_e$  = capacité d'électrode (farad)
- $C_0 = C_e + C_h$  = capacité effective parallèle (farad)
- $R_1$  = résistance dynamique (ohm)

FIG. 2. — Circuit équivalent d'un résonateur à quartz.

FIG. 2a. — Symbole du résonateur à quartz dans le circuit.

Cette représentation d'un résonateur à quartz n'est exacte que si les paramètres sont constants et indépendants de la fréquence et de l'amplitude. Les paramètres sont indépendants de la fréquence si le résonateur ne possède pas d'autre mode de vibration au voisinage de la résonance particulière. Généralement, le mode principal est suffisamment isolé des autres modes pour justifier cette hypothèse. Si tel n'est pas le cas, les équations et les méthodes de mesure que l'on utilise normalement ne s'appliquent pas. On peut déterminer la validité de la représentation du circuit en mesurant et en représentant graphiquement l'impédance ou l'admittance du résonateur en fonction de la fréquence.

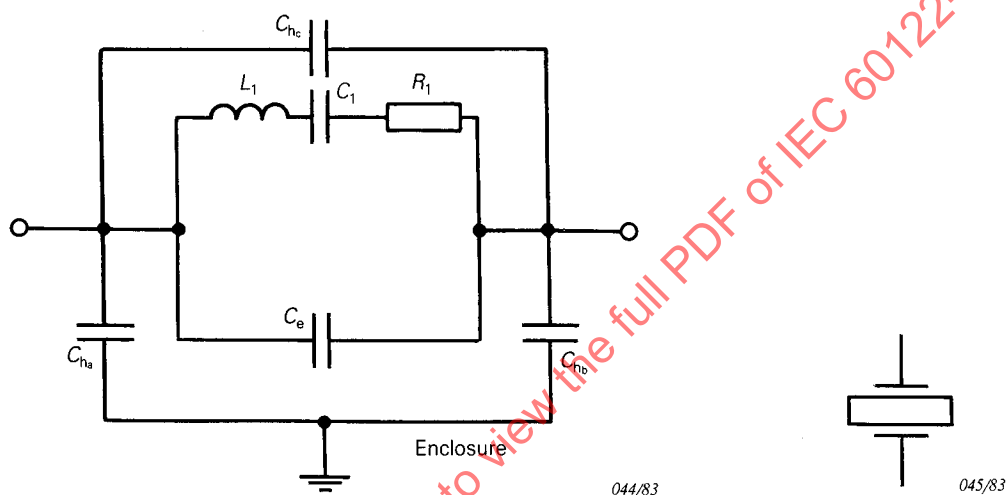
Il convient de remarquer sur la figure 2, ci-dessus, que la capacité parallèle totale est déterminée par divers paramètres dépendant des sorties du résonateur et de la mise à la masse du boîtier. On ne doit pas oublier que, dans un circuit à haute impédance, le boîtier doit être mis à la masse.

The crystal unit as an electrical component consists of the chosen element, or plate, together with conducting electrodes to establish an electric field through the quartz, and some means of mounting in a protective enclosure which will not significantly interfere with the desired mode of mechanical vibration. This complete crystal unit has an equivalent electrical circuit as shown in Figure 2. The values of the parameters of this equivalent circuit depend strongly on the cut and mode of vibration of the crystal element, as well as on the frequency of operation and the specific design options exercised by the manufacturer.

## 2.2 The equivalent electrical circuit of a quartz crystal unit

The properties of any mode of a lightly damped mechanical vibrator piezoelectrically excited through electrodes can be represented, in the region of the resonance frequency, by an equivalent electrical circuit which consists of a capacitance ( $C_1$ ), inductance ( $L_1$ ) and resistance ( $R_1$ ) in series, shunted by a second capacitance ( $C_0$ ).

A representation of the quartz crystal unit equivalent circuit is shown in Figure 2.



- $L_1$  = motional inductance (henry)
- $C_1$  = motional capacitance (farad)
- $C_h$  = enclosure capacitance (farad)
- $C_e$  = electrode capacitance (farad)
- $C_0 = C_e + C_h$  effective shunt capacitance (farad)
- $R_1$  = motional resistance (ohm)

FIG. 2a. – Crystal unit circuit symbol.

FIG. 2. – Equivalent circuit of a quartz crystal unit.

This representation of a quartz crystal unit is true only if the parameters are constant and independent of frequency and amplitude. The parameters are independent of frequency if the vibrator has no other mode of motion near the particular resonance. Generally, the mode in question is sufficiently isolated from other modes to permit this assumption. When this is not true, the equations and measuring methods normally used do not apply. The validity of the circuit representation can be determined by measuring and plotting the impedance or admittance of the vibrator as a function of frequency.

It should be noted from Figure 2 above that the total crystal parallel capacitance is determined by varying conditions of crystal terminations and earthing the enclosure. It should be borne in mind that with a high-impedance circuit, the enclosure should be earthed.

Un circuit équivalent simplifié, communément utilisé, est représenté sur la figure 3.

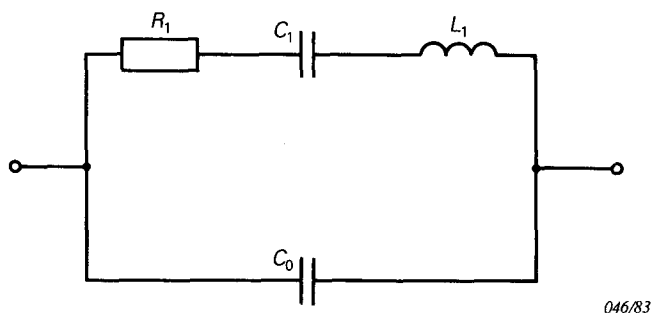


FIG.3. – Circuit équivalent simplifié d'un résonateur à quartz.

L'inductance représente la masse vibrante, la capacité série, l'élasticité de l'élément de quartz et la résistance, les frottements internes, les pertes mécaniques dans le système de montage et les pertes acoustiques dans l'espace environnant. La capacité parallèle est composée de la capacité statique entre les électrodes et des capacités parasites du système de montage.

Ce circuit simple a deux fréquences à phase nulle, l'une à la résonance ( $f_r$ ) et l'autre à l'antirésonance ( $f_a$ ).

Utilisé dans un oscillateur, le résonateur fonctionne à une fréquence quelconque déterminée par la phase et une réactance effective du circuit d'entretien et comprise entre les lignes interrompues de la figure 4.

En faisant varier cette condition de réaction, on peut ajuster la fréquence dans une certaine mesure. La quantité dont la fréquence peut varier (glissement de fréquence) est inversement proportionnelle au rapport de capacité

$$r = \frac{C_0}{C_1} = \text{(habituellement une constante pour une coupe et une réalisation données).}$$

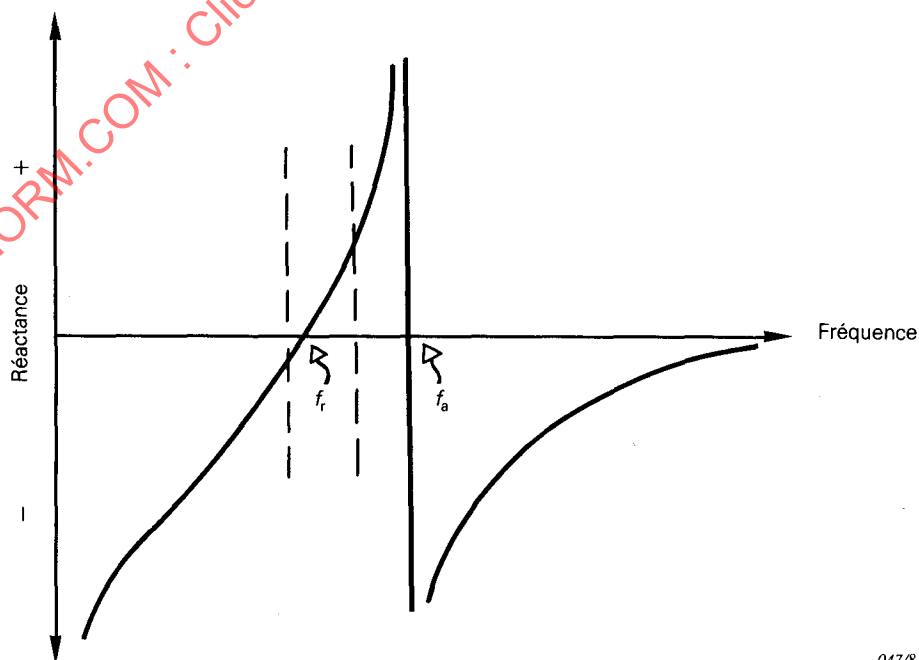


FIG.4. – Courbe caractéristique de la variation réactance/fréquence au voisinage de la résonance.

A commonly used simplified equivalent circuit is shown in Figure 3.

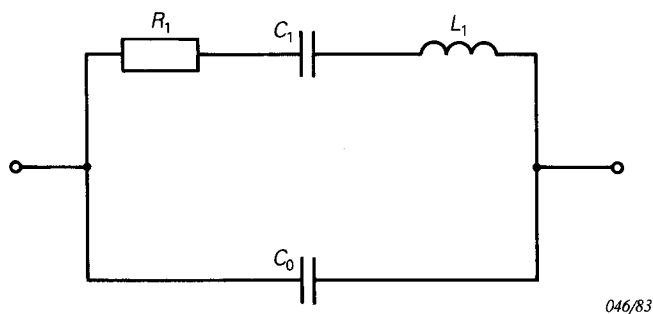


FIG. 3. – Simplified equivalent circuit of a quartz crystal unit.

The inductance represents the vibrating mass, the series capacitance, the compliance of the quartz element and the resistance, the internal friction of the element, mechanical losses in the mounting system and acoustical losses to the surrounding environment. The shunt capacitance is made up of the static capacitance between the electrodes, together with stray capacitances of the mounting system.

There are two zero-phase frequencies associated with this simple circuit, one is at resonance ( $f_r$ ), another at anti-resonance ( $f_a$ ).

When used in an oscillator, quartz crystal units will operate at any frequency within the broken lines of Figure 4, as determined by the phase and effective reactance of the maintaining circuit.

By variation of this reactive condition, the crystal frequency may be trimmed to a limited extent. The degree to which this frequency may be varied (frequency pulling) is inversely proportional to the capacitance ratio

$$r = \frac{C_0}{C_1} = (\text{usually a constant for a given cut and design}).$$

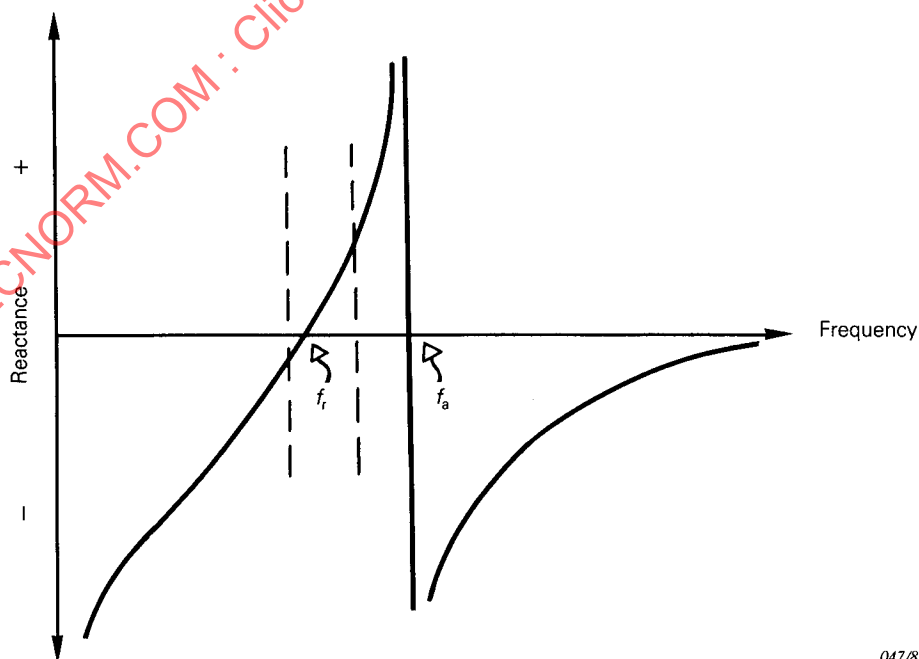


FIG. 4. – Reactance/frequency variation characteristic in the vicinity of resonance.

Des valeurs typiques du rapport de capacité pour des gammes de fréquences et des coupes différentes sont données dans le tableau I. Des renseignements détaillés sont présentés avec les figures 14 et 15, pages 54 et 58.

La largeur de bande, lorsqu'il s'agit de résonateur pour filtre, peut être affectée par ce rapport. Généralement, plus le rapport est élevé, plus la bande est étroite.

### 2.3 Modes de vibration en fonction de la fréquence

La gamme de fréquences couverte par l'ensemble des résonateurs à quartz trouvés dans le commerce peut être considérée comme s'étendant de quelques centaines de hertz à 200 MHz. Pour couvrir cette gamme, on utilise différentes coupes et différents modes de vibration; un résumé des types les plus courants est donné, ci-dessous, dans le tableau I.

TABLEAU I  
Modes de vibration en fonction de la fréquence

| Désignation de la coupe | Mode de vibration                      | Gamme de fréquences usuelle (kHz)                                             | $C_0/C_1$ approximatif       |
|-------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| XY                      | Flexion                                | 1 à 80                                                                        | 600                          |
| NT                      | Flexion                                | 4 à 100                                                                       | 900                          |
| Barreau X, 5°           | Elongation                             | 40 à 200                                                                      | 130                          |
| CT                      | Cisaillement plan                      | 150 à 850                                                                     | 350                          |
| DT                      | Cisaillement plan                      | 100 à 500                                                                     | 400                          |
| SL                      | Cisaillement plan                      | 180 à 700                                                                     | 400                          |
| BT                      | Cisaillement d'épaisseur (fondamental) | 3 000 à 30 000                                                                | 650                          |
| AT                      | Cisaillement d'épaisseur (fondamental) | 800 à 5 000<br>5 000 à 30 000                                                 | 450-300<br>220               |
| AT                      | Cisaillement d'épaisseur               | 10 000 à 75 000<br>50 000 à 150 000<br>100 000 à 200 000<br>150 000 à 200 000 | } Environ $n^2 \times 250^*$ |
|                         | Partiel 3                              |                                                                               |                              |
|                         | Partiel 5                              |                                                                               |                              |
|                         | Partiel 7                              |                                                                               |                              |
|                         | Partiel 9                              |                                                                               |                              |

\*  $n$  = rang du partiel.

On peut aussi fabriquer des résonateurs à quartz de coupe AT dans la gamme de 400 kHz à 800 kHz, mais cela exige généralement l'utilisation d'un boîtier de plus grande dimension.

Le choix du mode de vibration ou de la coupe peut être affecté par les dimensions du boîtier ou des paramètres autres que la fréquence elle-même.

Les rapports  $C_0/C_1$ , ci-dessus, sont des valeurs typiques. Cependant, les techniques diverses adoptées par différents fabricants pour la réalisation des résonateurs à quartz peuvent conduire à des variations importantes des rapports de capacité;  $C_0$  est la capacité parallèle et  $C_1$  est la capacité dynamique (voir la figure 2, page 12).

Pour les coupes AT et BT, le rapport  $C_0/C_1$  tend à augmenter quand les dimensions du boîtier diminuent, particulièrement à la limite inférieure de la gamme de fréquences.

### 2.4 Caractéristiques de fréquence en fonction de la température

Les caractéristiques fréquence/température sont déterminées en première approximation par les coefficients de température de la masse spécifique, des dimensions et du module d'élasticité de la lame

Typical values of capacitance ratio for various frequency ranges and cuts are given in Table I. Detailed information is shown in Figures 14 and 15, pages 55 and 59.

In filter applications, the bandwidth may be affected by this ratio. In general, the higher the ratio the narrower the bandwidth.

### 2.3 Modes of vibration as a function of frequency

The frequency range covered commercially by quartz crystal units may be taken as a few hundred hertz to 200 MHz. Use is made of many cuts and modes of vibration to cover this range and crystals of the common types are summarized in Table I.

TABLE I  
Modes of vibration as a function of frequency

| Designation of cut | Mode of vibration             | Usual frequency range (kHz) | Approximate $C_0/C_1$              |
|--------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| XY                 | Flexural                      | 1 to 80                     | 600                                |
| NT                 | Flexural                      | 4 to 100                    | 900                                |
| 5° X bar           | Extensional                   | 40 to 200                   | 130                                |
| CT                 | Face shear                    | 150 to 850                  | 350                                |
| DT                 | Face shear                    | 100 to 500                  | 400                                |
| SL                 | Face shear                    | 180 to 700                  | 400                                |
| BT                 | Thickness shear (fundamental) | 3 000 to 30 000             | 650                                |
| AT                 | Thickness shear (fundamental) | 800 to 5 000                | 450–300                            |
| AT                 | Thickness shear (fundamental) | 5 000 to 30 000             | 220                                |
|                    | 3rd overtone                  | 10 000 to 75 000            | } Approximately $n^2 \times 250^*$ |
|                    | 5th overtone                  | 50 000 to 150 000           |                                    |
|                    | 7th overtone                  | 100 000 to 200 000          |                                    |
|                    | 9th overtone                  | 150 000 to 200 000          |                                    |

\*  $n$  = order of overtone.

AT-cut crystal units can also be produced in the range from 400 kHz to 800 kHz, but they usually require larger enclosures.

The choice of mode or cut may be affected by the enclosure size or parameters other than the frequency itself.

The  $C_0/C_1$  ratios quoted are typical values. However, various techniques adopted by individual manufacturers in the design of quartz crystal units may lead to quite wide variations;  $C_0$  is the shunt capacitance and  $C_1$  is the motional capacitance (see Figure 2, page 13).

For AT and BT-cuts, the  $C_0/C_1$  ratio will tend to increase with smaller enclosures, particularly at the lower end of the frequency range.

### 2.4 Frequency versus temperature characteristics

These are, to a first approximation, determined by the temperature coefficients of density, dimensions and elastic modulus of the quartz plate. When the resultant of these three properties becomes

de quartz. Lorsque la résultante de ces trois caractéristiques devient nulle, on obtient la stabilité optimale en fonction de la température. L'approximation de cette condition optimale constitue une part importante de la conception du résonateur dans la gamme spécifiée de températures.

Ces caractéristiques varient énormément avec la fréquence et le mode de vibration utilisé. Des exemples typiques en sont donnés à la figure 5, page 20, qui représente la forme des courbes fréquence/température de différentes coupes sur des bases comparables. Il est important de noter que, lorsque la gamme spécifiée de températures dépasse 30°C, le mode AT est d'au moins un ordre de grandeur meilleur que les autres modes communément utilisés.

Les courbes fréquence/température de forme parabolique suivent avec une bonne approximation la loi suivante:

$$\frac{\Delta f}{f} = -a_2(T_0 - T)^2$$

où:

$\frac{\Delta f}{f}$  = différence de fréquence relative, exprimée en  $1 \times 10^{-6}$  entre les températures  $T$  et  $T_0$   
 $T_0$  = température pour laquelle la fréquence est maximale (température d'inversion)  
 $T$  = température quelconque dans la gamme de fonctionnement  
 $a_2$  = constante de la parabole

TABLEAU II

| Coupe    | Valeur de $a_2$<br>(dimension $10^{-9}/K^2$ ) |
|----------|-----------------------------------------------|
| BT       | 40                                            |
| CT       | 58                                            |
| DT et SL | 17                                            |
| NT et XY | 35                                            |

K = kelvin.

Note. – Ces constantes sont basées sur la théorie de Voigt [1]\*.

Le fabricant peut accepter des spécifications prescrivant un point d'inversion déterminé à l'intérieur d'une grande gamme de températures. Des valeurs de 25°C à 75°C sont courantes et il peut compter placer le point d'inversion à  $\pm 10^\circ\text{C}$  approximativement, cette incertitude provenant des tolérances de fabrication.

Dans le cas des résonateurs de coupes NT et 5° X, le fabricant n'a pas une liberté complète dans la disposition de la parabole et les résonateurs peuvent différer selon le choix particulier qu'il fait des dimensions.

Une série plus complète de courbes théoriques pour la coupe AT est représentée sur la figure 6, page 22. Ces courbes indiquent que l'on peut choisir l'angle de coupe dans une certaine plage de façon à limiter la dispersion des caractéristiques dans une gamme particulière de températures. Il convient, cependant, de n'utiliser ces courbes théoriques que pour information en raison des diverses servitudes dues aux différences de fabrication et de conception. Le fabricant conseille utilement sur les tolérances qui peuvent être obtenues en pratique pour les fréquences que l'on spécifie.

\*Les chiffres entre crochets se rapportent à la bibliographie (article 7), page 88.

zero, the stability of the frequency with respect to temperature will be optimum. A major part of design consists of approximating this optimum condition over a specified range of temperature.

These characteristics will vary considerably with the frequency and mode of vibration used. Typical examples are given in Figure 5, page 21, which shows the form of representative frequency/temperature curves of the cuts on a comparative basis. It is of significance to note that the AT mode is at least an order better than other modes commonly used once the temperature range specified exceeds 30°C.

The parabolic frequency/temperature curves conform fairly closely to the form:

$$\frac{\Delta f}{f} = -a_2(T_0 - T)^2$$

where:

$\frac{\Delta f}{f}$  = fractional frequency difference, expressed in  $1 \times 10^{-6}$  between temperatures  $T$  and  $T_0$

$T_0$  = temperature at which maximum frequency occurs (turnover temperature)

$T$  = any temperature in the operating range

$a_2$  = constant of the parabola

TABLE II

| Cut       | Value of $a_2$<br>(dimension $10^{-9}/K^2$ ) |
|-----------|----------------------------------------------|
| BT        | 40                                           |
| CT        | 58                                           |
| DT and SL | 17                                           |
| NT and XY | 35                                           |

K = kelvin.

Note. — These constants are based on the Voigt's theory [1]\*.

The manufacturer may accept a specification calling for a specific turnover point over a wide range of temperatures. Common values are between 25°C and 75°C and he will expect to place the turnover point within approximately  $\pm 10^\circ\text{C}$ , this uncertainty arising from manufacturing tolerances.

In the case of NT-cut and 5° X cut units, the manufacturer does not have complete freedom in positioning the parabola and crystal units may differ according to the individual manufacturer's choice of dimensions.

A more complete series of theoretical curves for the AT-cut is shown in Figure 6, page 23. These curves indicate that specific angular ranges may be selected to give a limited performance spread over a particular range of temperatures. However, due to various manufacturing and design limitations, the theoretical curves should be used for guidance only. The manufacturer will advise on the tolerances obtainable in practice for the frequencies required.

\* Figures in square brackets refer to the Bibliography (Clause 7), page 88.

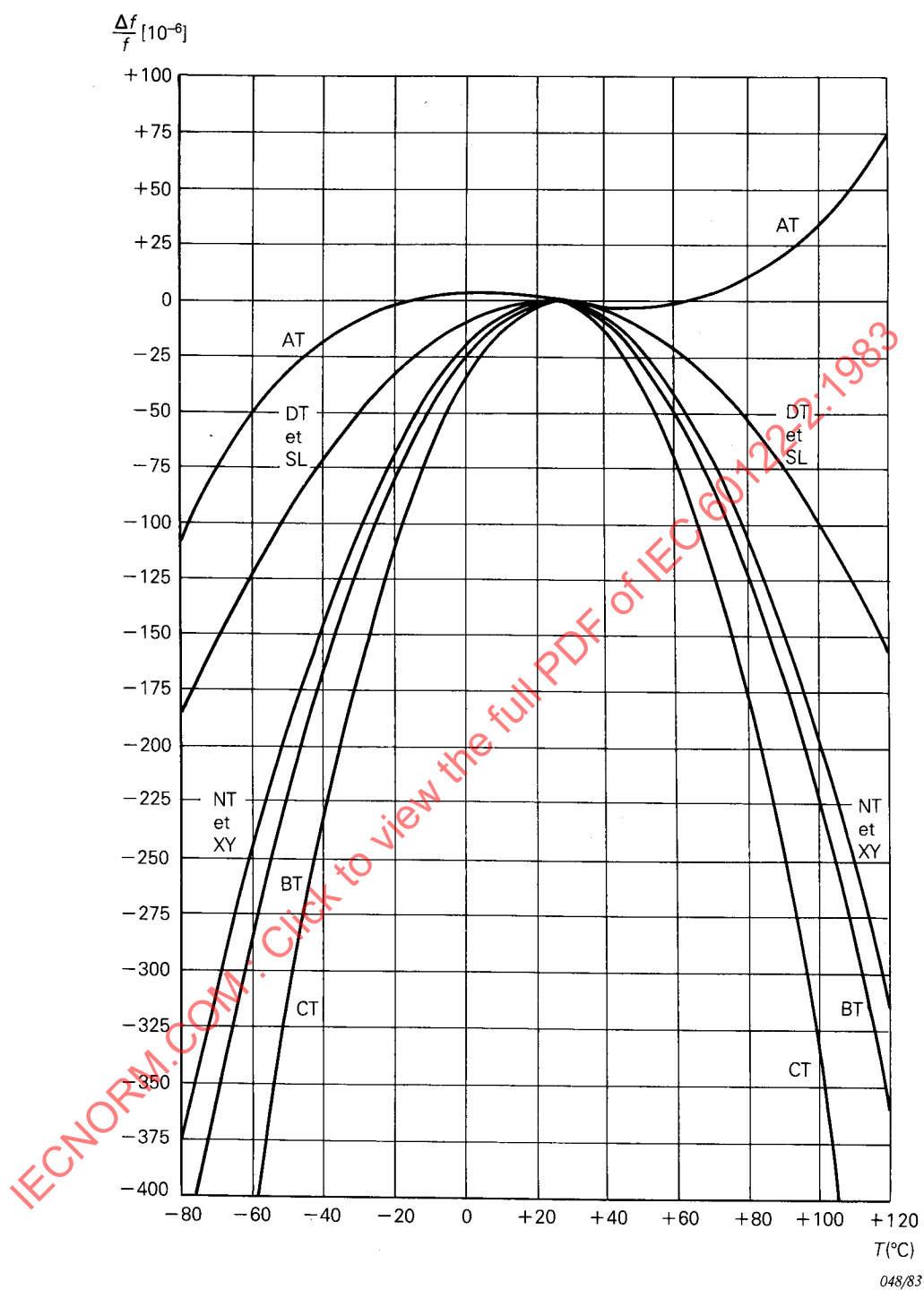


FIG. 5. – Courbes température/fréquence théoriques pour certaines coupes de quartz habituellement utilisées.

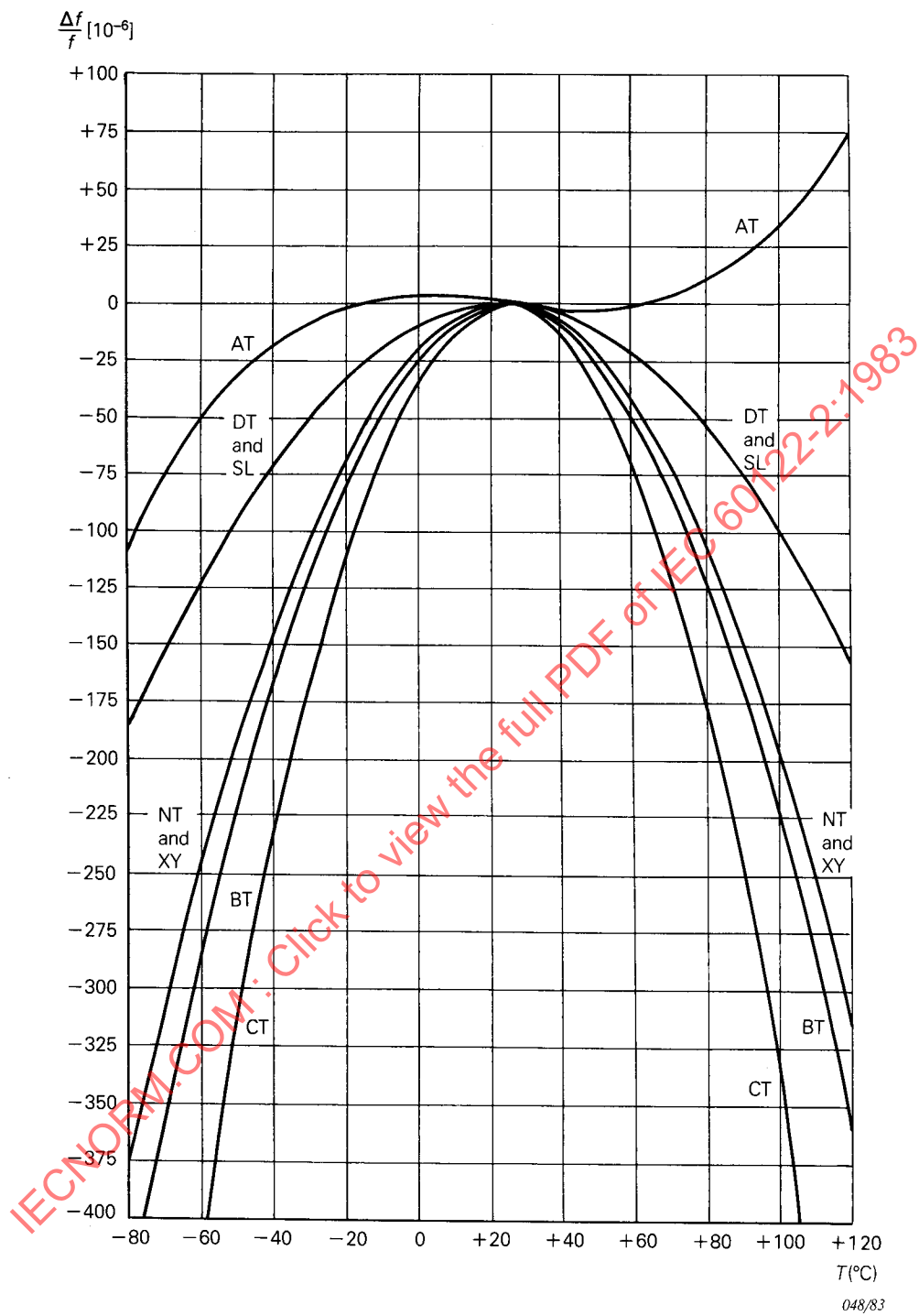
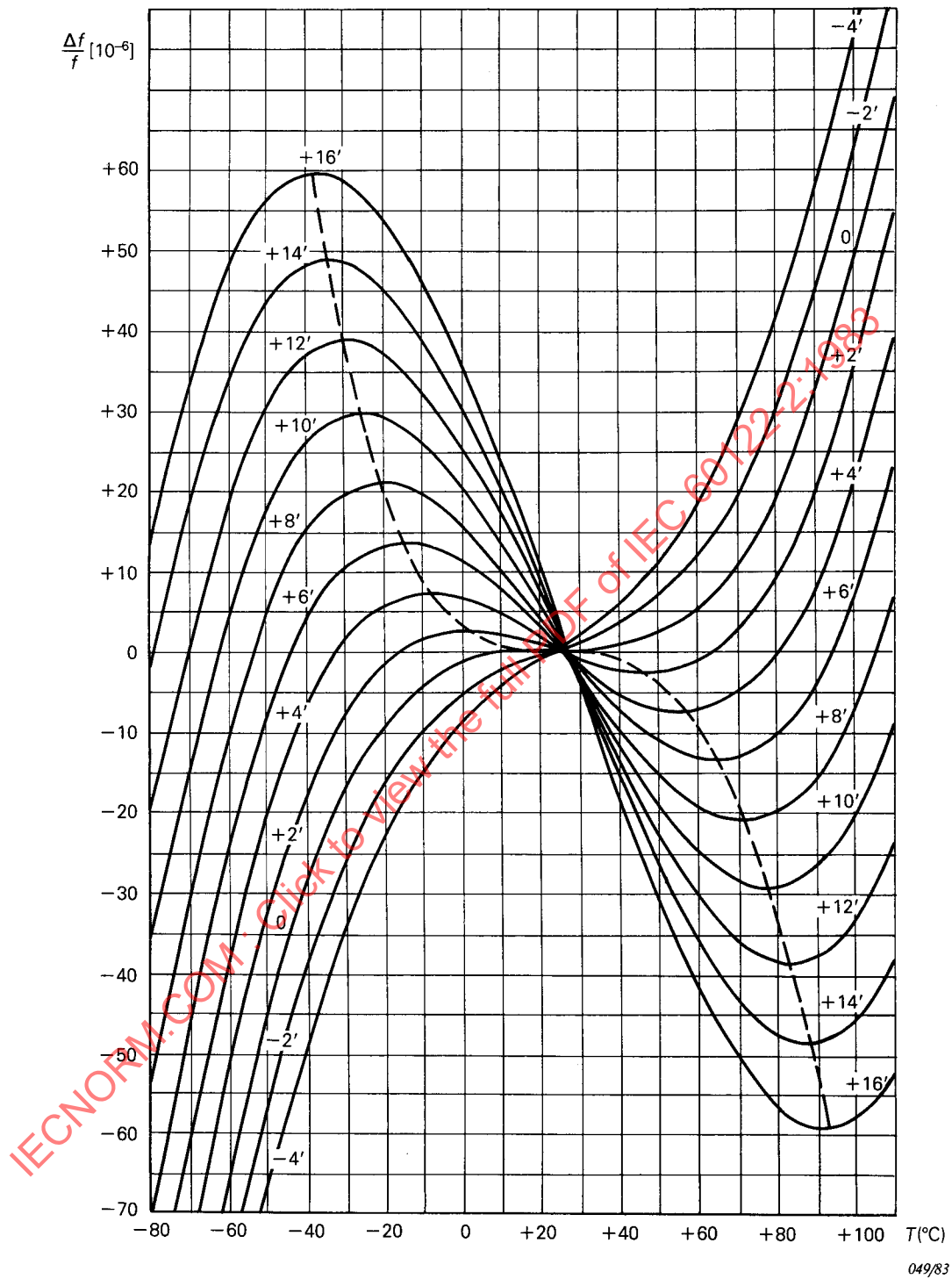


FIG.5. — Theoretical frequency/temperature curves of some common crystal cuts.



Note. — La ligne tiretée représente les points de températures pour lesquels  $\Delta f/\Delta T = 0$ .

FIG. 6. — Courbes fréquence/température généralisées (coupe AT).

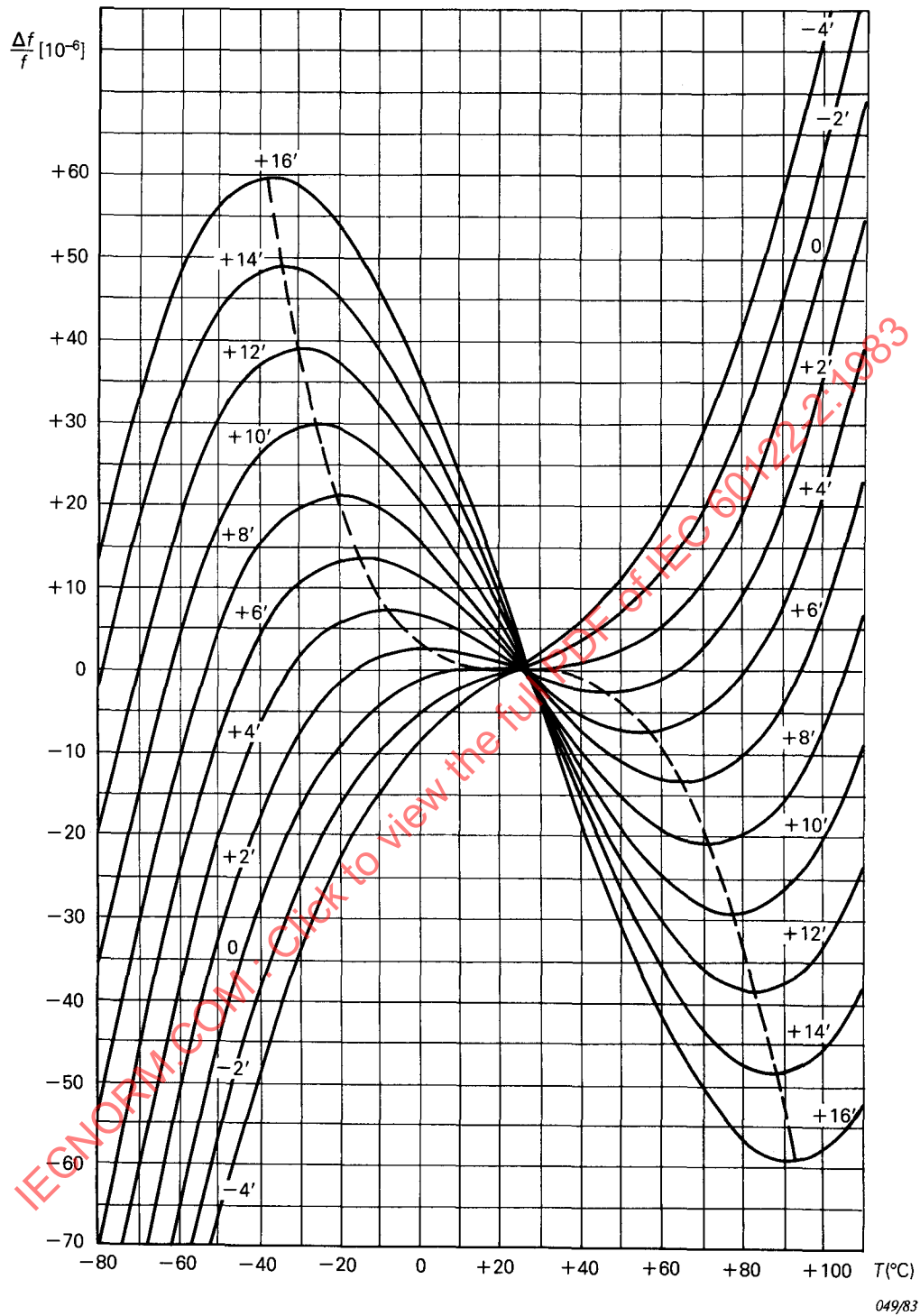


FIG. 6. – Frequency/temperature curves generalized (AT-cut).

## 2.5 Paramètres des résonateurs à quartz

### 2.5.1 Renseignements détaillés sur les paramètres du résonateur à quartz

Le circuit électrique équivalent se compose des paramètres dynamiques  $L_1$ ,  $C_1$ ,  $R_1$  et de la capacité parallèle  $C_0$ . Tous ces paramètres sont étroitement liés entre eux et une variation de l'un peut entraîner une variation de tous les autres. Les relations entre ces paramètres apparaissent dans les équations suivantes qui sont toutes deux des approximations communément acceptées utilisées dans l'industrie:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$
$$Q = \frac{\omega L_1}{R_1}$$

*Note.* – On peut trouver les équations exactes dans la Publication 302 de la CEI: Définitions normalisées et méthodes de mesures pour les résonateurs piézoélectriques de fréquences inférieures à 30 MHz.

Les figures 7, 8, 9a et 9b, pages 26 à 32, donnent la variation des valeurs des paramètres qui peuvent être réalisés pour des gammes de fréquences et des coupes différentes.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60122-2:1983

## 2.5 Crystal unit parameters

### 2.5.1 Detailed information on crystal unit parameters

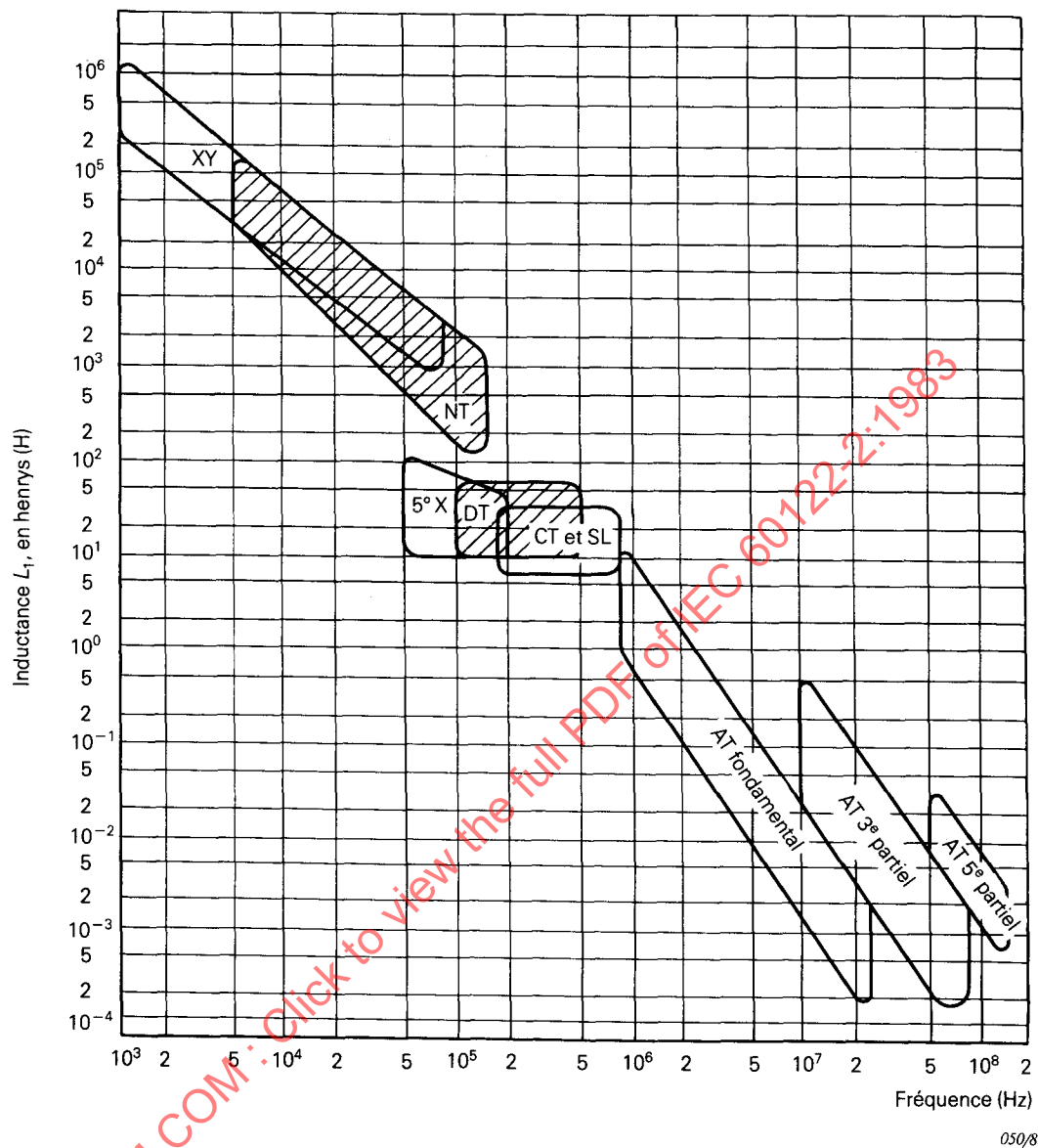
The equivalent electrical circuit consists of the motional parameters  $L_1$ ,  $C_1$ ,  $R_1$  and the shunt capacitance  $C_0$ . These are all interrelated and a change of one may result in a change in all the others. The relationship between these parameters can be seen by the following equations, both of which are commonly accepted approximations used in industry:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$
$$Q = \frac{\omega L_1}{R_1}$$

*Note.* – The exact equations can be found in IEC Publication 302: Standard Definitions and Methods of Measurement for Piezoelectric Vibrators Operating over the Frequency Range up to 30 MHz.

Figures 7, 8, 9a and 9b, pages 27 to 33, give a range of realizable parameter values for various frequency ranges and cuts.

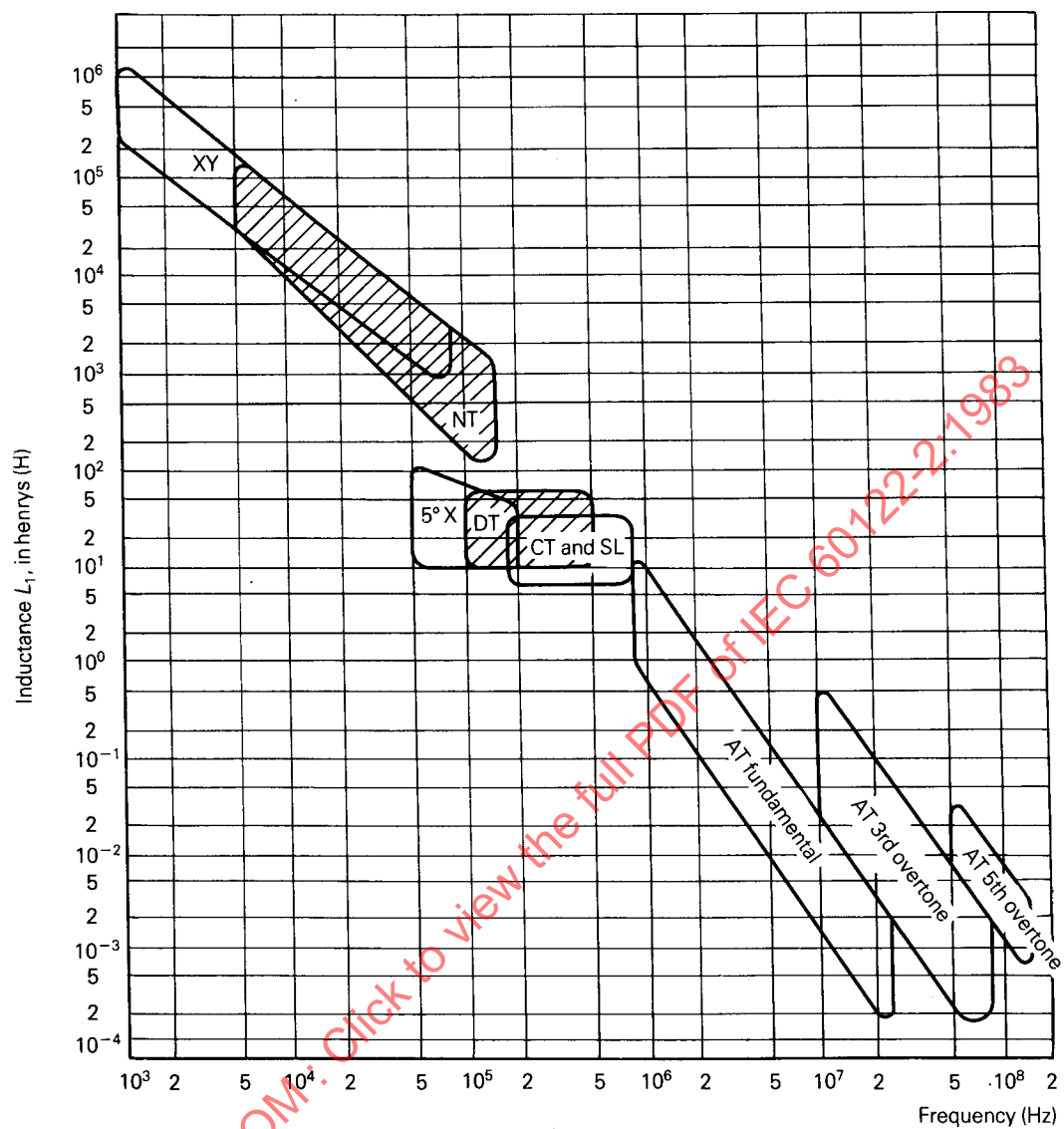
IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60122-2:1983



Notes 1. — Pour des applications spéciales, on peut obtenir des valeurs doubles ou triples de celles-ci à l'aide de techniques particulières.

2. — Les faibles valeurs ne peuvent être obtenues que dans des boîtiers de grand format.

FIG. 7. — Gammes d'inductances pour différentes coupes courantes.

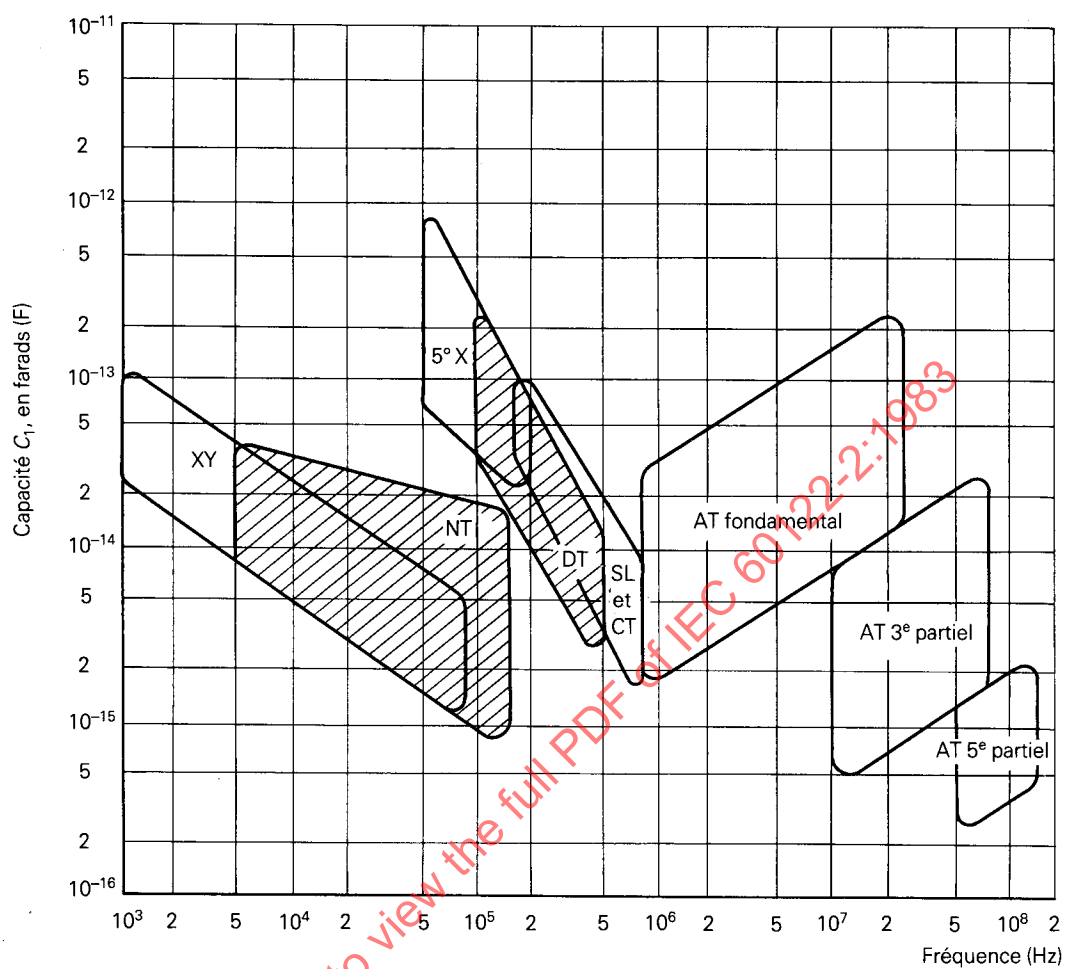


050/83

Notes 1. – Values as high as two or three times those shown can be obtained by special techniques for unusual applications.

2. – The lower values can only be obtained in larger enclosures.

FIG. 7. – Inductance ranges for various common cuts.

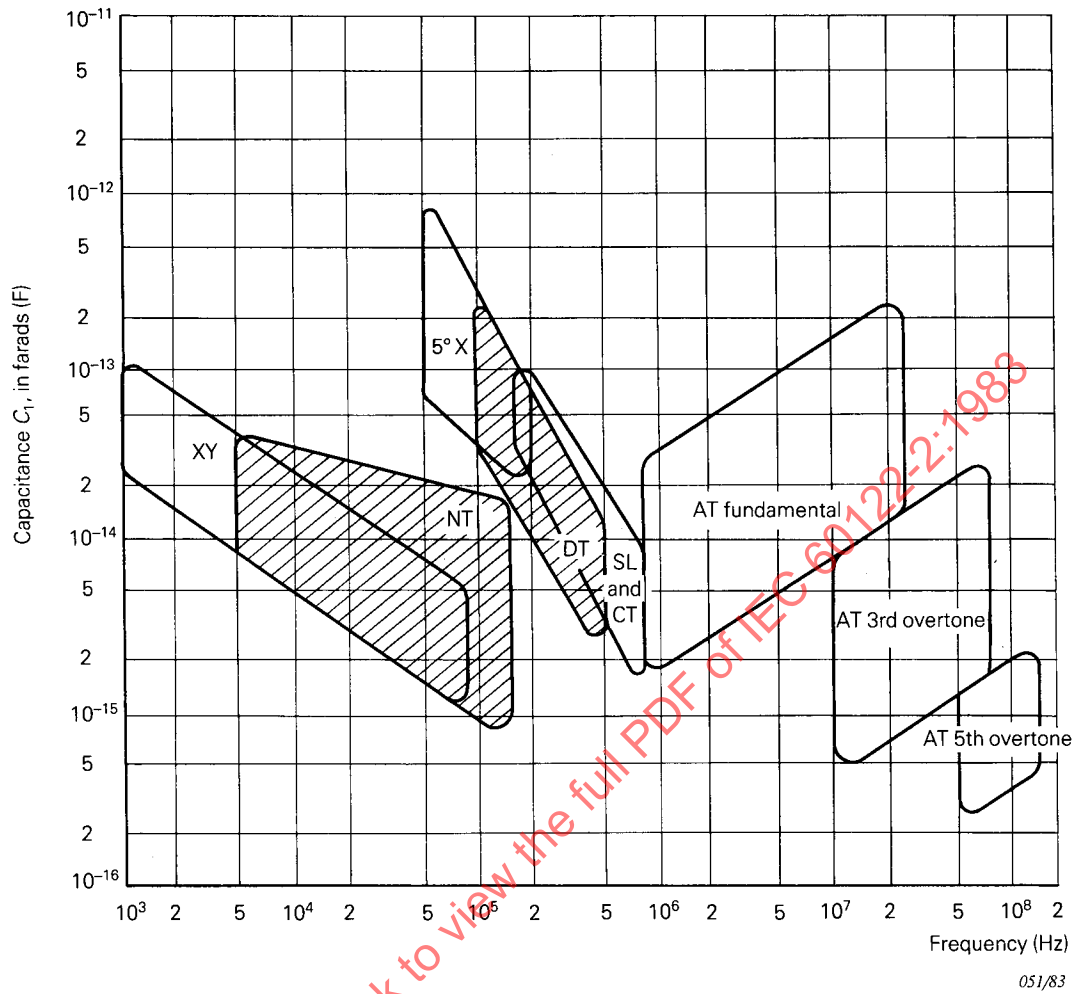


051/83

Notes 1. – Pour des applications spéciales, on peut obtenir des valeurs de  $1/2$  à  $1/3$  de celles-ci à l'aide de techniques particulières.

2. – Les valeurs supérieures ne peuvent être obtenues que dans des boîtiers de grand format.

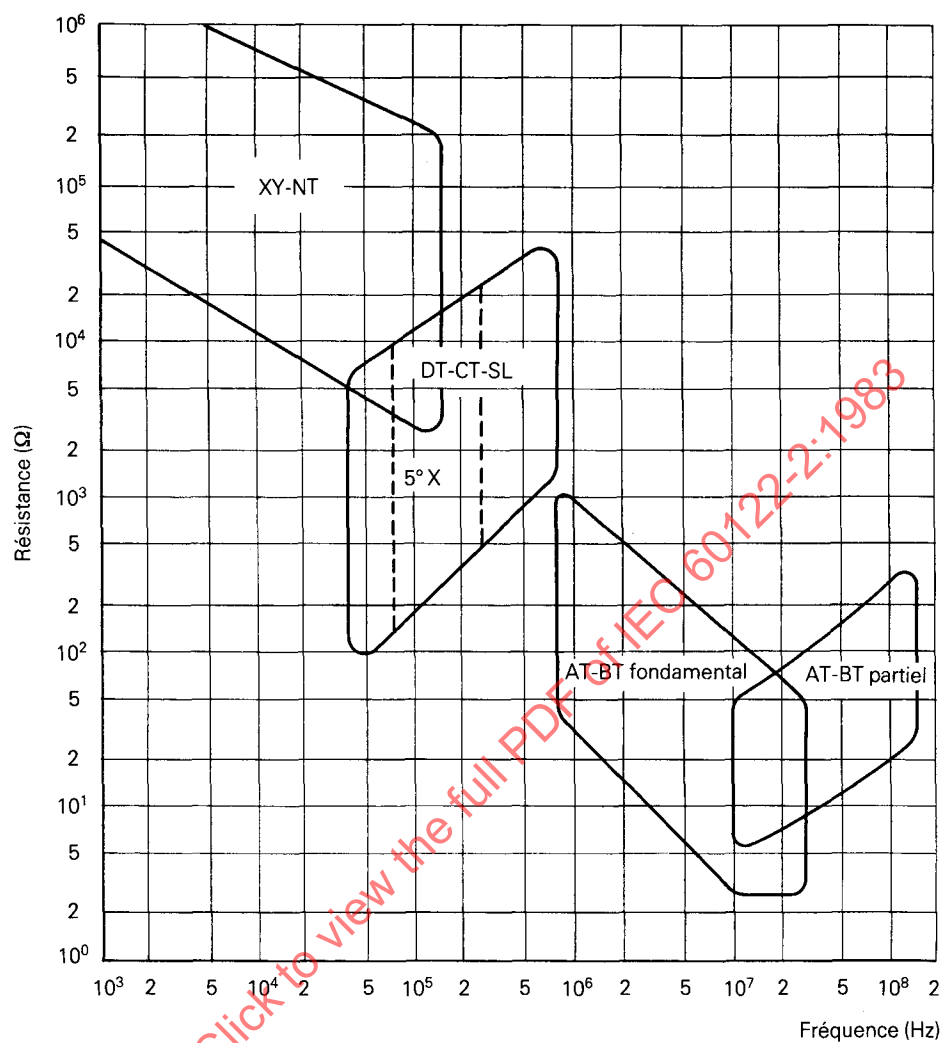
FIG. 8. – Gamme de capacités pour différentes coupes courantes.



Notes 1. – Values as low as  $\frac{1}{2}$  to  $\frac{1}{3}$  those shown can be obtained by special techniques for unusual applications.

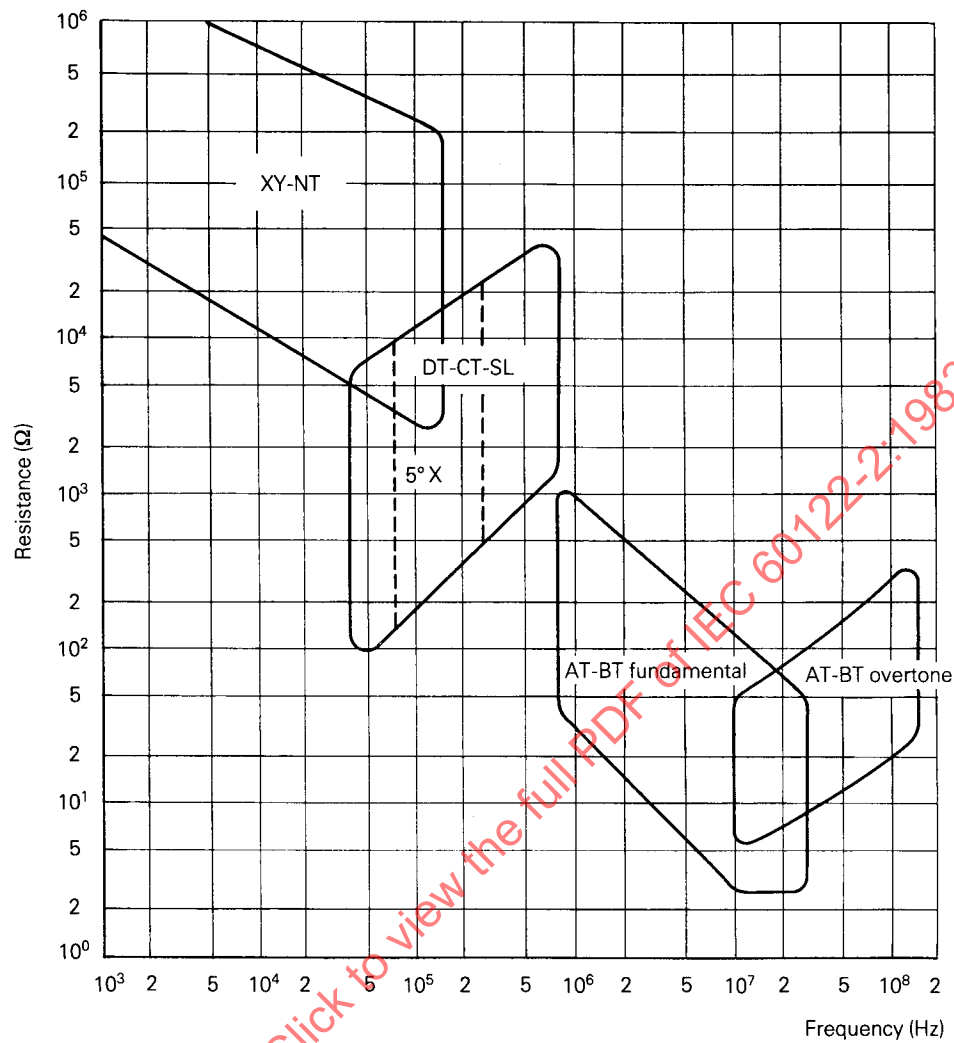
2. – The larger values can only be obtained in larger enclosures.

FIG. 8. – Capacitance range for various common cuts.



052/83

FIG. 9a. — Gamme de résistances en fonction de la coupe et de la fréquence pour des résonateurs à quartz en boîtiers hermétiques. Remplis à raison de 90% d'azote et 10% d'hélium sous une pression de 1 atmosphère.



052/83

FIG.9a. — Frequency, cut and resistance range of hermetically sealed crystal units. Backfilled with approximately 1 atmosphere of 90% nitrogen and 10% helium.

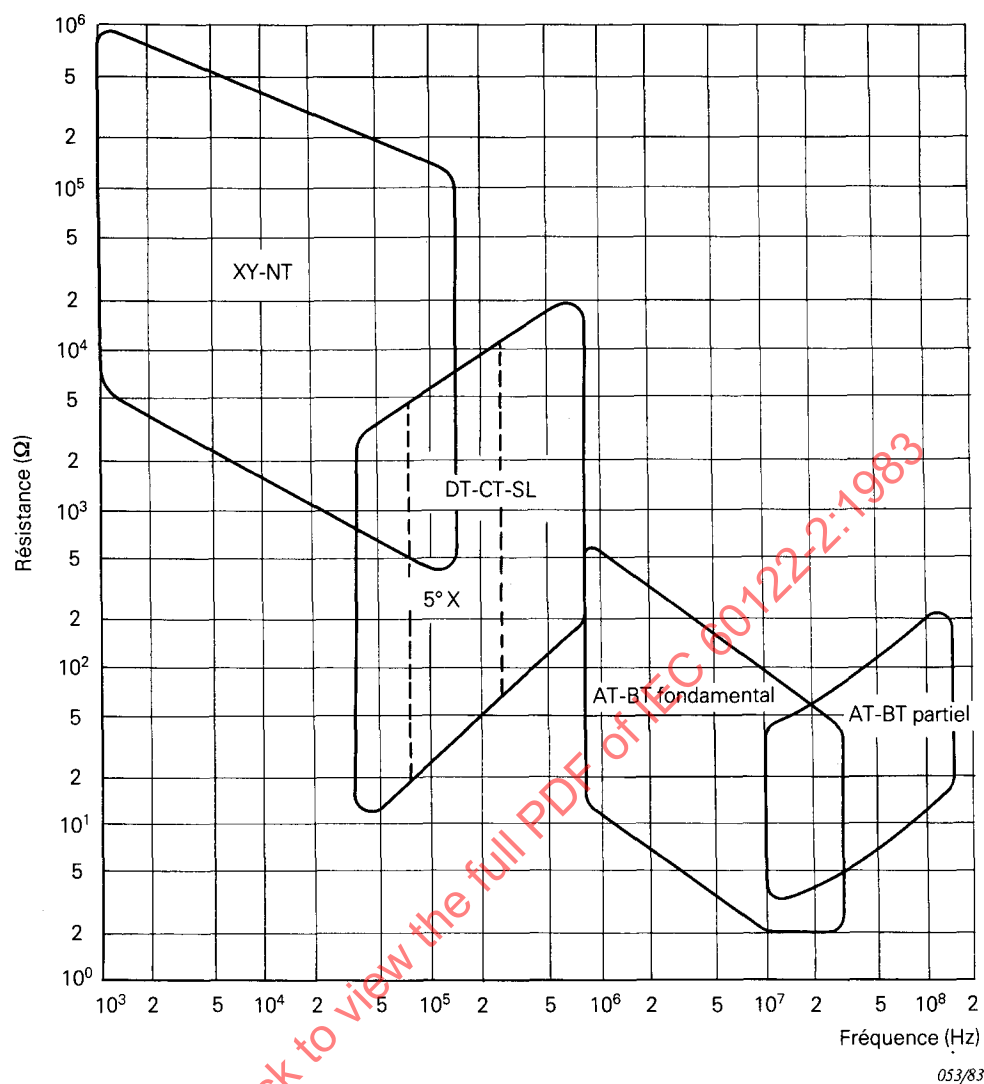


FIG. 9b. – Gamme de résistances en fonction de la coupe et de la fréquence pour des résonateurs à quartz en boîtiers sous vide.

### 2.5.2 Résistance du résonateur à quartz

Il convient de noter ce qui suit sur la variation des paramètres de résistance:

- Les résonateurs en boîtier sous vide présentent les plus faibles valeurs de variation.
- Le contrôle de la résistance par le fabricant est tel que l'on peut trouver en tout lot particulier pour quelques types une variation de 3:1 et les variations lot à lot peuvent même être plus grandes.
- Pour une fréquence déterminée, plus faibles sont les dimensions du boîtier, plus élevées sont les valeurs moyennes de  $R_1$  et  $L_1$ .
- D'une façon générale, la croissance de la résistance avec la température est importante pour les coupes pour basse fréquence. Par exemple, pour les résonateurs des coupes CT ou DT, la résistance à 85°C peut être le double de la résistance à 25°C.

### 2.5.3 Effets du niveau d'excitation

La fréquence de tous les résonateurs à quartz est modifiée, dans une certaine mesure, par les variations du niveau d'excitation. C'est pourquoi, il est essentiel que le niveau d'excitation choisi soit réellement celui qui a été spécifié dans l'équipement.

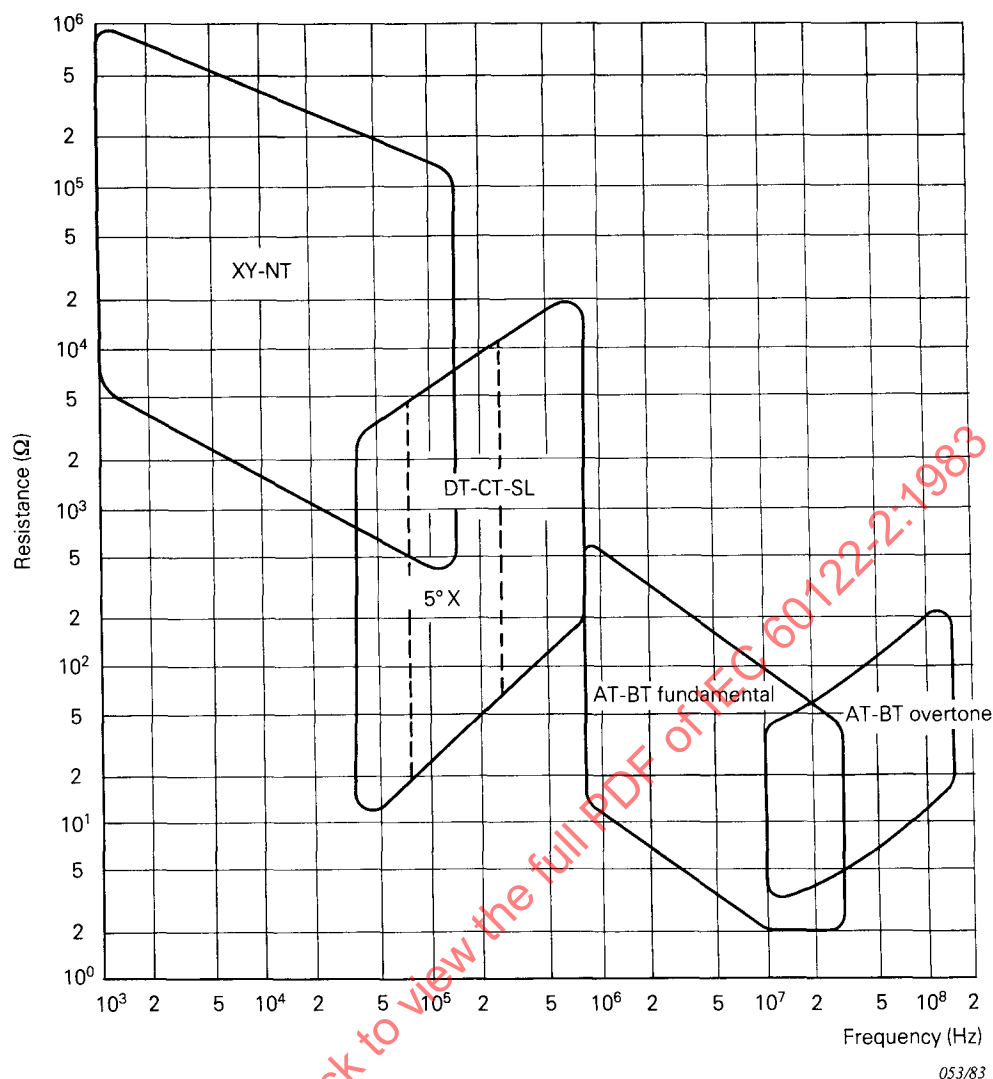


FIG. 9b. – Frequency, cut and resistance range of evacuated crystal units.

### 2.5.2 Crystal resistance

The following points on the resistance parameters should be noted:

- The lowest values will be found under vacuum.
- The control of resistance by manufacturers is such that a variation of 3:1 may be found in any particular lot for some types, and lot-to-lot variations may be even larger.
- The smaller the enclosure chosen for a given frequency the higher the average values of  $R_1$  and  $L_1$  are likely to be.
- In general, the resistance of low frequency cuts rises appreciably with temperature. For example, crystal units employing CT or DT-cuts may have twice the resistance at 85 °C that they have at 25 °C.

### 2.5.3 Effects of drive level

The frequency of all crystal units will change to some degree with variations of drive level. Therefore, it is necessary that the drive level specified is that actually being used in the equipment.

Un niveau d'excitation excessif peut avoir également comme conséquence une modification irréversible de la fréquence du résonateur et il est capital que l'équipement soit conçu pour que cette éventualité ne puisse se produire.

En général, quand le niveau augmente, la variation de fréquence est positive pour les résonateurs à quartz de coupe AT, et négative pour les coupes pour basse fréquence.

Certains des principaux effets du niveau d'excitation sont résumés ci-après:

#### *Niveau d'excitation élevé*

Les niveaux d'excitation élevés causent des effets non linéaires qui provoquent:

- a) une excitation de modes indésirables provoquant d'importantes déformations des caractéristiques fréquence/température et résistance/température;
- b) des déplacements de fréquence causés par un échauffement du cristal (généralement réversibles);
- c) des déplacements de fréquence causés par une surcharge (généralement irréversibles);
- d) des changements brusques de la résistance;
- e) dans les cas extrêmes, il peut aussi en résulter des fluctuations périodiques de l'amplitude et de la fréquence ou un arrêt de fonctionnement irréversible.

#### *Faible niveau d'excitation*

Pour de très faibles niveaux d'excitation (quelques microwatts ou moins), la résistance de résonance du résonateur à quartz peut être beaucoup plus élevée qu'aux niveaux normaux, entraînant des difficultés d'accrochage de l'oscillateur. Des résonateurs ayant des valeurs de résistance de même ordre aux niveaux normaux d'excitation peuvent être tout à fait différents à de très faibles niveaux. Cet effet, qui peut être aggravé par une période de stockage hors fonctionnement, est communément désigné par l'expression «effet de deuxième niveau d'excitation» ou «dépendance du niveau d'excitation». Lorsque cet effet n'est pas admissible, il peut être habituellement éliminé par un soin particulier dans le procédé de fabrication.

*Note.* – Les mesures des résonateurs à quartz utilisant la méthode spécifiée dans la Publication 444 de la CEI : Mesure des paramètres des quartz piézoélectriques par la technique de phase nulle dans le circuit en  $\pi$ , sont habituellement effectuées à un faible niveau d'excitation et les effets du niveau d'excitation élevé décrits ci-dessus sont minimisés pendant la mesure.

### 2.5.4 *Commutation, manipulation et modulation*

Pour certaines applications, l'oscillateur à quartz doit être modulé ou «manipulé» soit en fréquence, soit en amplitude. Cependant, les résonateurs à quartz ayant des facteurs de qualité ( $Q$ ) très élevés (très faibles décréments), on doit leur reconnaître certaines limitations; comme le facteur de qualité ( $Q$ ) peut se situer entre  $10^4$  et  $10^6$ , il est évident que les durées d'établissement et d'extinction des oscillations d'un tel résonateur ne seront pas négligeables.

Le temps nécessaire pour que les oscillations passent de zéro à 99% de l'amplitude en régime permanent est donné d'une manière approximative par:

$$t \approx \frac{2 L_1 \ln k}{|R_N| - R_1}$$

où:

$t$  en millisecondes

$L_1$  en millihenrys

$k$  = facteur d'amplitude (par exemple 10 000 pour un accroissement de l'amplitude de 10  $\mu$ V à 100 mV)

$|R_N|$  = résistance négative effective en ohms du circuit de l'oscillateur

$R_1$  en ohms

The effect of excessive drive on the crystal unit could also cause an irreversible frequency change and it is essential that the equipment designer ensures that this condition will not occur.

In general, the frequency change with increase of drive level will be positive on AT-cut crystals and negative on low frequency cuts.

The following summarizes some of the major effects of drive level:

#### *High level of drive*

High level of drive causes non-linear effects resulting in:

- a) excitation of unwanted modes causing serious deformation of the frequency/temperature and resistance/temperature characteristics;
- b) frequency shifts due to crystal heating (usually reversible);
- c) frequency shifts due to overstress (usually irreversible);
- d) abrupt resistance changes;
- e) in extreme cases, it can also result in recurring fluctuation of amplitude and frequency or catastrophic failure.

#### *Low level of drive*

At very low levels of drive (a few microwatts or less), the resonance resistance of the crystal unit can be much higher than at more normal levels, resulting in oscillator starting problems. Units with similar resistance values at normal drive levels may be quite different at very low levels. This effect may be aggravated by a period of non-operating storage and is commonly known as “second level of drive effect” or “drive level dependence”. When this effect cannot be tolerated, it can usually be eliminated by special care in processing and fabrication.

*Note.* – Crystal unit measurements performed using the method specified in IEC Publication 444: Measurement of Quartz Crystal Unit Parameters by Zero Phase Technique in a  $\pi$ -network, are normally made at a low drive level and the above high drive level effects are minimized during the measurement.

### 2.5.4 *Switching, keying and modulation*

Some applications require the crystal oscillator to be modulated or “keyed” in either frequency or amplitude. Certain limitations shall, however, be recognized since quartz crystals have a very high  $Q$  (very low decrements). The range of  $Q$  to be expected is from  $10^4$  to  $10^6$  and it is clear that build-up and decay times for crystal oscillations will be appreciable.

The time required for an oscillator to build up from zero to 99% of steady-state amplitude is approximately given by:

$$t \approx \frac{2 L_1 \ln k}{|R_N| - R_1}$$

where:

- $t$  in milliseconds
- $L_1$  in millihenrys
- $k$  = amplitude factor (e.g. 10 000 for an amplitude rise from 10  $\mu$ V to 100 mV)
- $|R_N|$  = effective negative resistance of the oscillator circuit in ohms
- $R_1$  in ohms

### 2.5.5 Effets de vieillissement

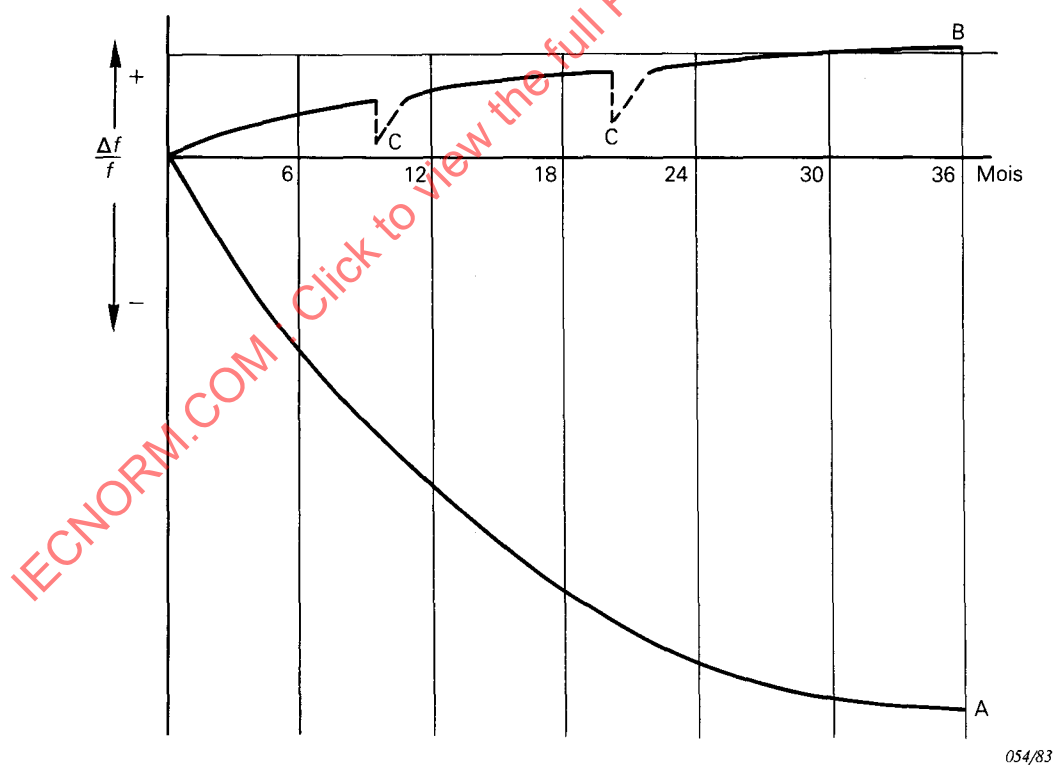
Les résonateurs à quartz présentent des variations de la fréquence de résonance et de la résistance de résonance en fonction du temps. Ces effets sont désignés par le terme de «vieillissement». La variation de fréquence de résonance est l'effet le plus important pour la plupart des applications.

Le vieillissement est un phénomène complexe mettant en jeu maints facteurs et l'on ne peut, en conséquence, traiter de ce sujet qu'en termes généraux dans une publication de cette nature. Il convient de consulter le fabricant pour avoir des éléments d'information relatifs au vieillissement de types particuliers de résonateur à quartz.

Fondamentalement, tous les résonateurs à quartz présentent un vieillissement de fréquence d'allure quasi logarithmique dans des conditions statiques. Cette allure peut être perturbée par suite de fuites de boîtier, contamination, surexcitation, choc sévère ou hautes températures. Le vieillissement intervient, que le résonateur à quartz soit utilisé ou non (voir figure 10).

On admet généralement que les résonateurs en boîtiers en verre et en boîtiers soudés offrent les meilleures caractéristiques de vieillissement; mais les résonateurs en boîtiers scellés par brasage sont acceptables pour beaucoup d'applications. Les boîtiers en plastique ou en métal clos par sertissage ne doivent, en principe, être utilisés que pour des réalisations pour lesquelles le vieillissement ne présente pas d'importance.

Il convient de noter que pour des résonateurs soumis à des températures élevées, le taux de vieillissement et la sensibilité au choc augmentent plus rapidement pour les résonateurs à quartz pour basse fréquence que pour les résonateurs de coupe AT.



054/83

FIG. 10. – Courbes de vieillissement typiques.

La courbe A est celle d'un vieillissement typique de fréquence, provoqué par une contamination qui peut être due à la fuite du boîtier. La valeur réelle est fonction des variations de température et de pression de l'air ainsi que d'autres conditions climatiques.

### 2.5.5 Effects of ageing

Quartz crystal units exhibit changes in the resonance frequency and resistance as a function of time. These effects are known as ageing. The change of resonance frequency is the more important effect in most applications.

The phenomena of ageing is a complex matter involving many factors and, therefore, the subject can be dealt with only in general terms in a publication of this nature. For ageing data on a particular type of crystal unit, the manufacturer should be consulted.

Basically, all crystal units exhibit frequency ageing which is quasi-logarithmic under static conditions. This trend can be disturbed by enclosure leakage, contamination, overdrive, severe shock or higher temperatures. This ageing will take place whether or not the crystal unit is being used (see Figure 10).

It is generally accepted that glass encapsulated and metal welded units offer the best ageing performance, but solder sealed metal units are acceptable for many applications. Plastic or unsealed "crimped" metal enclosures shall only be used in applications where ageing is unimportant.

It should be noted that when low frequency crystal units are subjected to high temperatures, the ageing rate and shock sensitivity increase to a greater extent than with AT-cuts.

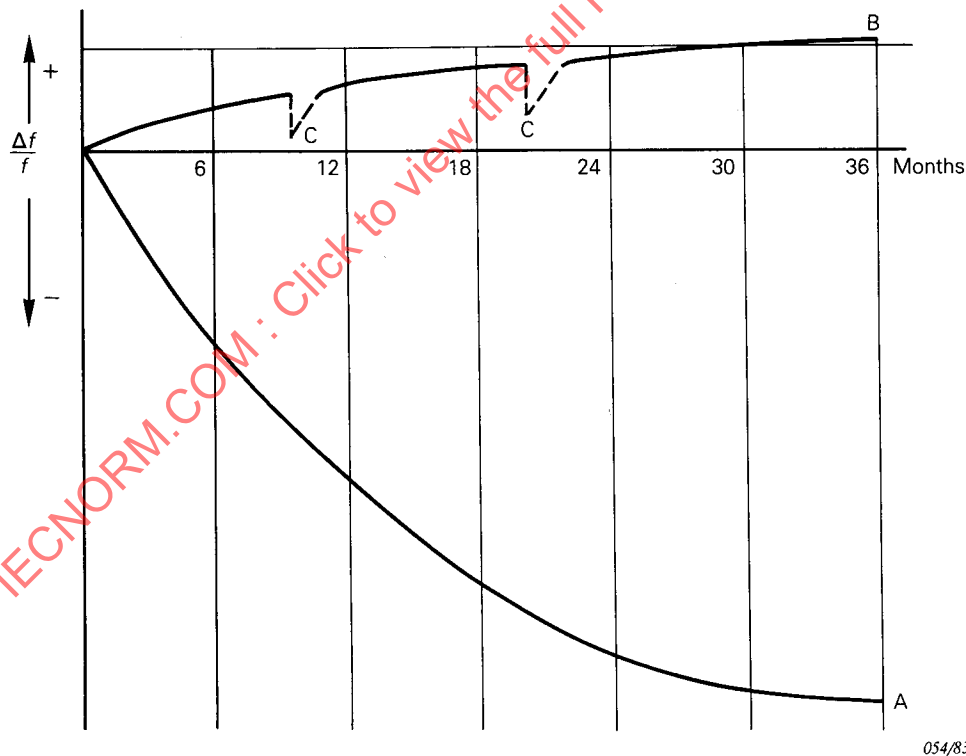


FIG. 10. – Typical ageing curves.

Curve A shows the typical frequency ageing caused by contamination which may be due to leakage of the enclosure. The actual value depends on the changes of temperature and air pressure and also other climatic conditions.

La courbe B présente l'effet typique sur la fréquence dû à des variations des électrodes et à des relâchements de contrainte dans la monture du cristal.

Les courbes secondaires C présentent l'allure que prennent les courbes de vieillissement par suite de l'arrêt des oscillations pendant de courtes périodes.

Il convient, en outre, de noter que la variation de fréquence peut être positive ou négative pour les coupes AT alors qu'elle est généralement positive pour les coupes pour basses fréquences.

La mesure du vieillissement de fréquence des résonateurs à quartz requiert un soin particulier. Les effets des variations de température, de niveau d'excitation, de capacité de charge, etc., doivent être pris en considération. L'utilisation des méthodes de mesure «passives», décrites dans les Publications 302 et 444 de la CEI, est généralement recommandée.

#### 2.5.6 Résonances indésirables

Tous les vibreurs en cristal ont des résonances à des fréquences différentes de celles de la résonance principale ou de la résonance qu'on souhaite utiliser, comme les lois de l'acoustique l'expliquent.

Les plus évidentes sont produites à des modes partiels de la résonance principale et, pour les résonateurs à quartz fonctionnant sur un mode partiel par construction, aux autres partiels et à la résonance de fréquence fondamentale elle-même.

Dans un oscillateur correctement conçu, ces résonances entraînent peu de difficultés car, pour la fréquence de fonctionnement, la phase ou le gain de boucle de l'oscillateur est plus favorable à la fréquence de construction qu'à celle des autres partiels ou qu'à la fréquence fondamentale. Cependant, s'il se produisait des résonances indésirables près du mode utilisé ou des résonances d'amplitude relativement grande, des difficultés d'oscillations pourraient apparaître aux fréquences indésirables de ces résonances.

La figure 11, pages 40 et 42, représente cinq exemples de plage de mesure des résonances indésirables dans le spectre contigu à la résonance utilisée, c'est-à-dire beaucoup plus près de cette résonance qu'aucun des autres modes.

Ces exemples montrent que les difficultés causées par les résonances indésirables se compliquent à mesure que le mode de vibration devient plus complexe.

Curve B shows the typical effect on the frequency due to electrode changes and stress relief in the crystal mounting.

Sub-curves C show the behaviour of the ageing curves due to oscillations being switched off for a short time.

It should additionally be noted that the direction of the frequency change found is such that with AT-cuts it may be positive or negative whilst with the low-frequency cuts it will be generally positive.

The measurement of frequency ageing of quartz crystal units needs very careful consideration. The effects of temperature changes, drive level variation, load capacitance changes, etc., shall be considered. In general, the use of “passive” measuring methods described in IEC Publications 302 and 444 are recommended.

#### 2.5.6 *Unwanted responses*

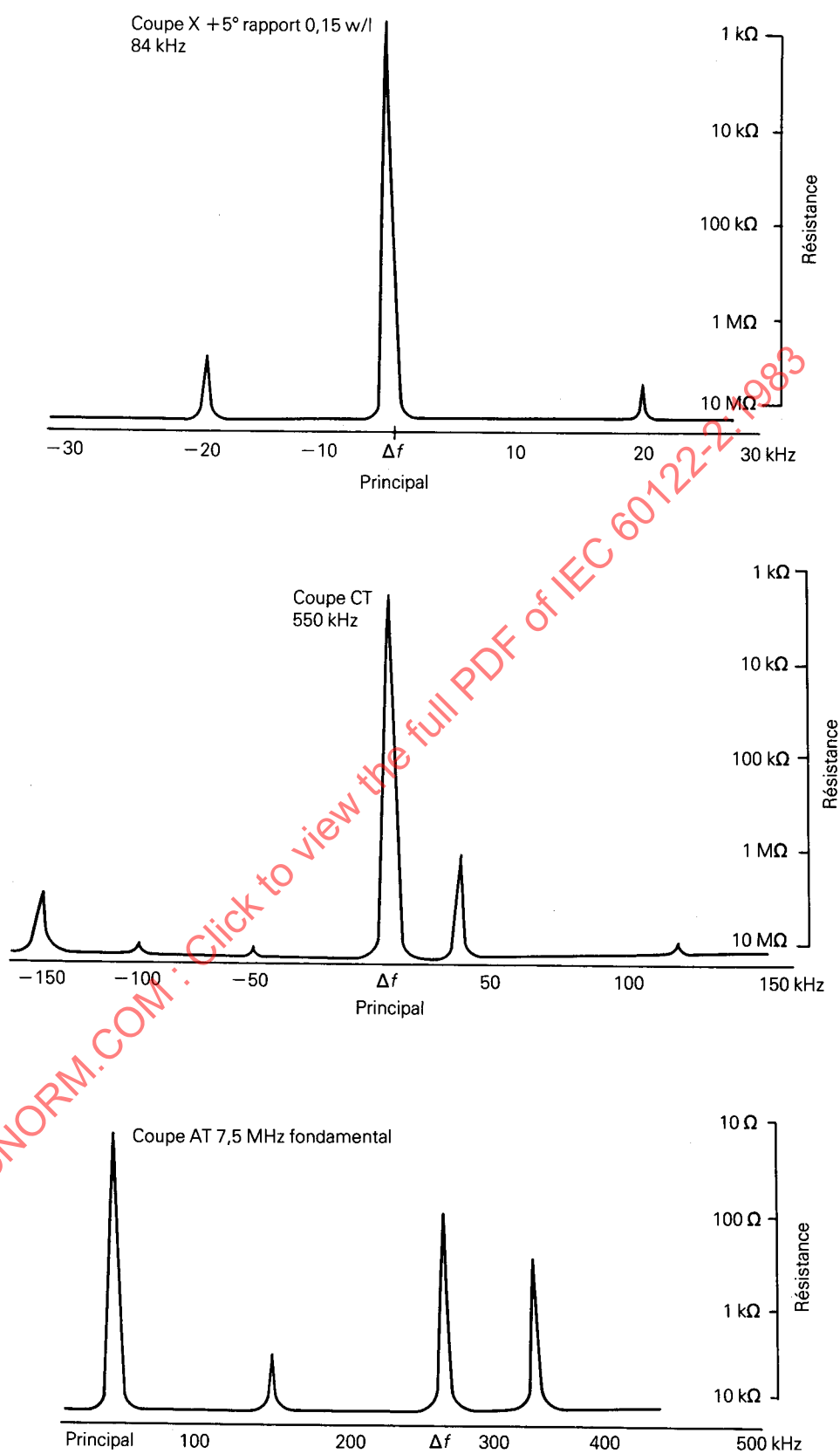
All crystal elements have frequency responses other than the main, or desired, response as explained by the laws of acoustics.

The more obvious ones are the overtones of the main response and, for crystal units operating at their overtone by design, other overtones and the fundamental frequency itself.

In properly designed oscillators, these responses rarely cause problems, due to the loop phase or gain of the oscillator being more favourable at the design frequency than at other overtones or the fundamental. However, should there be unwanted responses near to the main mode or responses with relatively large amplitude, problems of oscillation at those unwanted frequencies could occur.

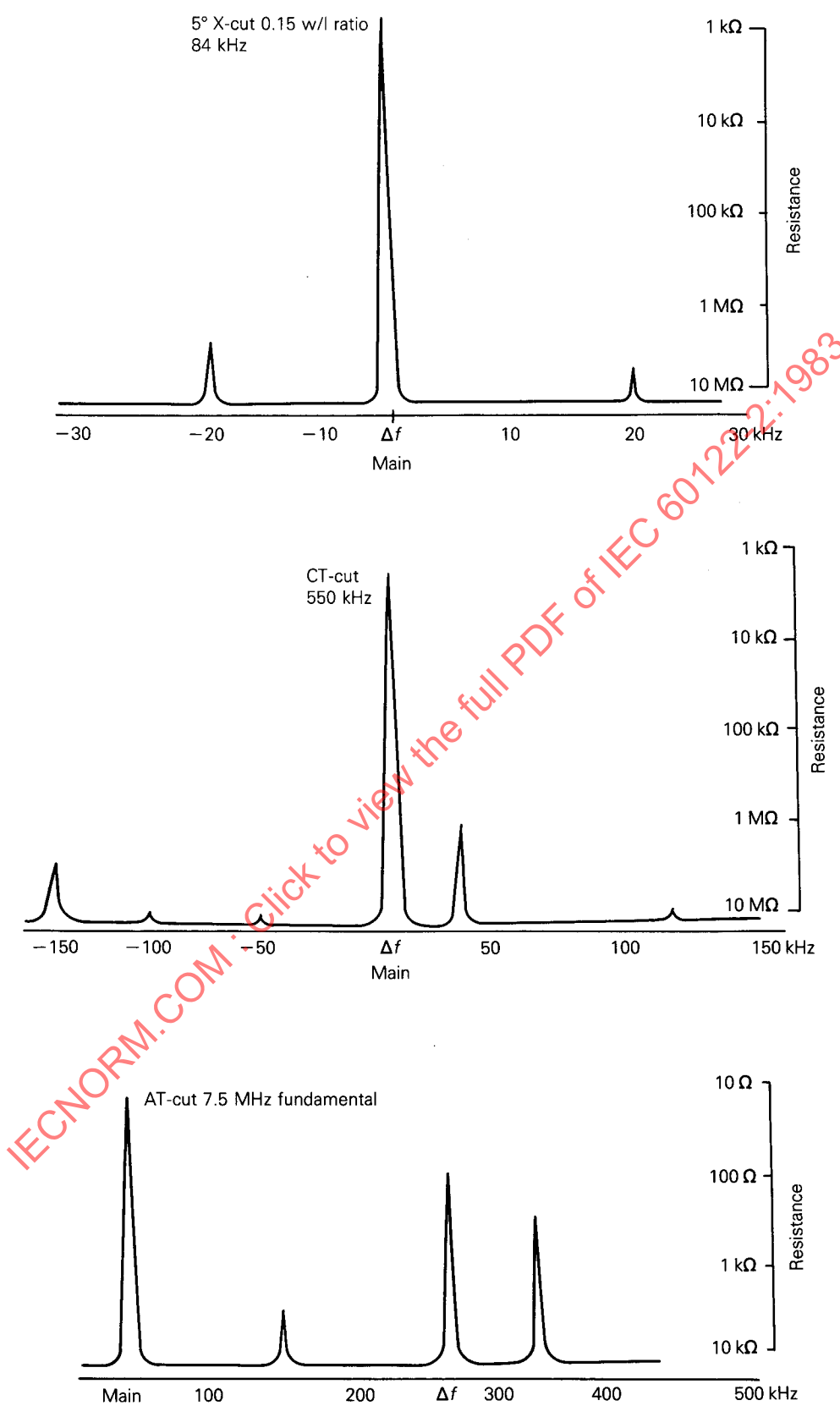
Figure 11, pages 41 and 43, shows five examples across the frequency range of unwanted crystal responses measured over the spectrum adjacent to the main response, i.e. much closer than any of the overtones.

These examples reflect the fact that, as the mode of vibration becomes more complex, so do the unwanted response problems.



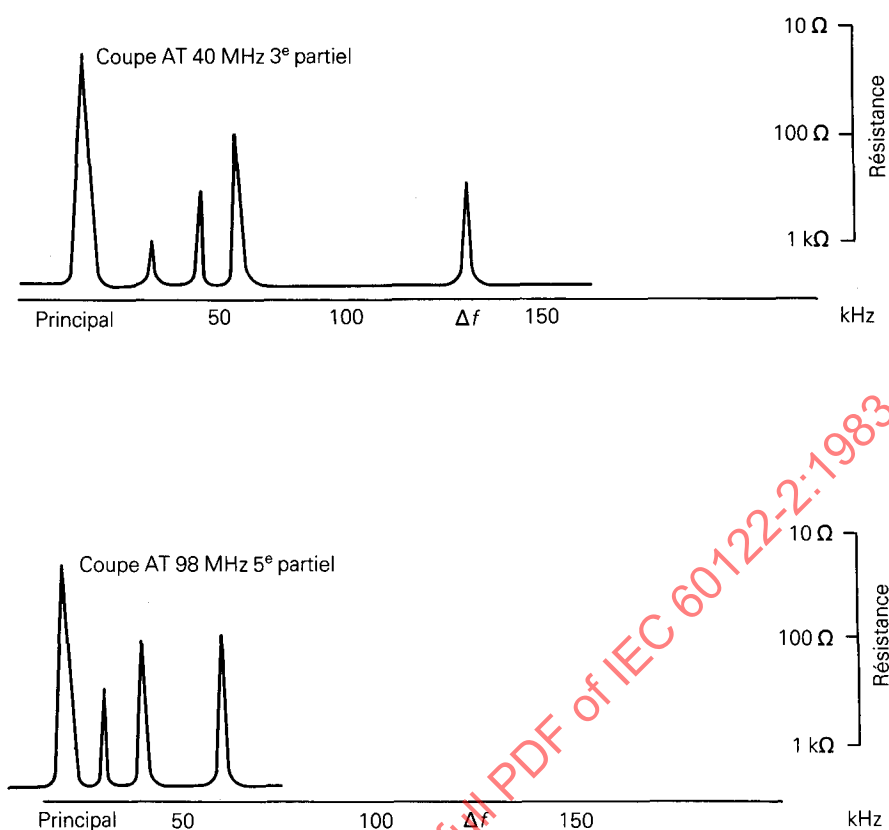
055/83

FIGURE 11 (suite à la page 42).



055/83

FIGURE 11 (continued on page 43).

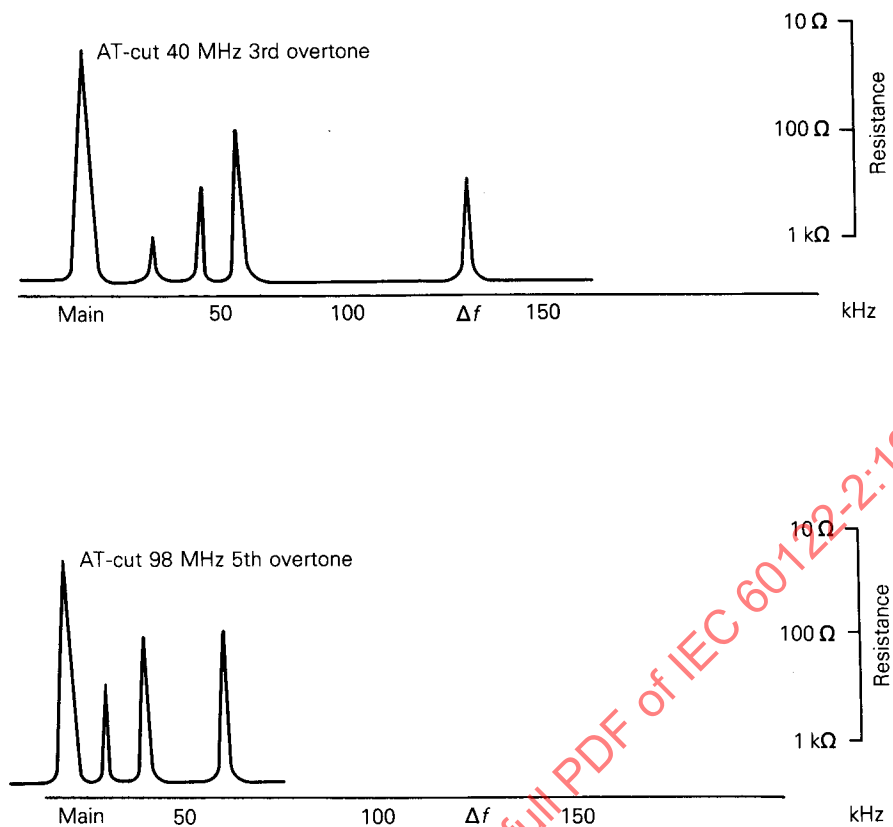


056/83

FIG. 11. – Cinq exemples de plage de mesure des résonances indésirables dans le spectre contigu.

Ces résonances indésirables peuvent être maîtrisées dans une mesure limitée. C'est plus facile vers la limite inférieure de fréquence pour un mode longitudinal (5° X), et plus difficile pour les vibrateurs à cisaillement d'épaisseur (coupes AT et BT). La technique pour modifier la position et l'amplitude des résonances indésirables est fondée sur des modifications de géométrie et d'électrode. Malheureusement, de telles modifications vont affecter les autres paramètres  $C_1$ ,  $L_1$ ,  $R_1$ , etc., et, dans les cas extrêmes, le format du boîtier pourrait devenir un facteur limitatif. La mise sous vide du boîtier augmente l'amplitude de la résonance indésirable. Ces résonances indésirables peuvent aussi, à des températures et niveaux d'excitation particuliers, se coupler mécaniquement à la résonance choisie, ce qui a pour résultat des caractéristiques température/fréquence, température/résistance et glissement de fréquence anormales. Même de très petites perturbations de ce type peuvent avoir des effets néfastes pour l'application en TCXO.

Les productions normalisées des fabricants comportent des éléments de construction qui minimisent ces effets, et, dans la pratique, ces produits, lorsqu'ils sont couplés avec des oscillateurs convenablement conçus, procurent rarement des ennuis. Cependant, on doit admettre que les résonances indésirables peuvent empirer si l'on impose des valeurs particulières de  $C_1$  ou, de façon moins directe, si l'on spécifie des caractéristiques particulières de glissement de fréquence ou des niveaux d'excitation très élevés.



056/83

FIG. 11. — Five examples across the frequency range of unwanted crystal responses measured over the spectrum adjacent to the main response.

To a limited extent these unwanted responses can be controlled. This is most feasible for the lower frequency, longitudinal mode (5° X), and most difficult for the thickness shear crystal elements (AT and BT-cuts). The technique for modifying the position and magnitude of these unwanted responses is based on changes of geometry and plating area. Unfortunately, such changes will affect the other parameters  $C_1$ ,  $L_1$ ,  $R_1$ , etc., and, in an extreme case, the enclosure size could be a limiting factor. Evacuation of the enclosure increases the unwanted response magnitude. These unwanted responses may also be mechanically coupled to the desired response at particular temperatures and drive levels, resulting in anomalous frequency/temperature, resistance/temperature and frequency pulling characteristics. Even very small perturbations of this type can have very deleterious effects for TCXO applications.

Manufacturers' standard products involve element designs which minimize these effects and, in practice, coupled with reasonable oscillator design, seldom give trouble. However, it should be accepted that where specific  $C_1$  values are imposed, or, less directly, where particular frequency pulling characteristics are demanded or where high levels of drive are specified, then the unwanted responses could become worse.

Il est courant de prescrire un essai visant les résonances indésirables même si l'on pense que l'oscillateur peut les éliminer. Les spécifications pour les résonateurs de coupe AT en mode partiel, pour lesquels la résonance indésirable sera très certainement relativement proche et de grande amplitude, prescrivent souvent un tel essai. Habituellement on spécifie, dans une gamme de fréquences de part et d'autre de la résonance utilisée, soit le rapport:

$$\frac{\text{résistance de résonance à la résonance indésirable}}{\text{résistance de résonance à la résonance utilisée}},$$

soit la résistance minimale que la résonance indésirable peut avoir dans cette gamme de fréquences (voir Publication 122-1 de la CEI: Quartz pour le contrôle et la sélection de la fréquence, Première partie: Valeurs normalisées et conditions de mesures et d'essais, paragraphe 12.5).

Finalement, il convient de consulter le fabricant de résonateurs à quartz pour toute application pour laquelle les résonances indésirables constituent une difficulté potentielle, afin de s'assurer que l'on fait des prescriptions réalistes. Dans cet ordre d'idée, il convient de se rendre compte que toute prescription relative à toute résonance indésirable n'a de signification que si la gamme de fréquences dans laquelle cette prescription s'applique est spécifiée. Cette spécification devient même plus importante lorsqu'il s'agit de résonateurs à quartz pour applications dans des filtres.

#### 2.5.7 Robustesse mécanique

On estime généralement que les résonateurs à quartz les plus robustes sont les résonateurs à haute fréquence de coupe AT car ils peuvent être montés de façon parfaitement rigide sans effet particulièrement gênant pour leurs caractéristiques de vibration.

Les résonateurs à quartz de coupe CT, DT, X, etc., sont en général moins robustes car leur système de monture est plus faible.

Indépendamment du type de résonateur, on ne peut établir de prescription rigoureuse de robustesse mécanique sans adoucir dans une certaine mesure les prescriptions relatives au fonctionnement électrique.

On doit se souvenir que tous les résonateurs à quartz soumis à des contraintes physiques sont l'objet de variations de fréquence et de résistance longtemps avant d'atteindre la rupture; il importe donc d'indiquer les variations maximales acceptables lorsqu'on spécifie le niveau de robustesse mécanique.

En raison des servitudes de construction des résonateurs à quartz, il peut être nécessaire d'incorporer des amortisseurs élastiques additionnels dans le dispositif de fixation du résonateur dans l'appareil, destinés à assurer une protection éventuelle supplémentaire contre les chocs et les vibrations.

#### 2.6 Boîtiers de résonateurs à quartz

Ils peuvent être groupés en trois catégories principales:

- boîtiers en verre;
- boîtiers métalliques;
- boîtiers en plastique.

Les boîtiers en verre sont généralement sous vide, cependant que les boîtiers métalliques sont souvent remplis d'azote.

Les boîtiers en verre pour résonateurs à quartz de fréquence inférieure à 600 kHz sont généralement en verre au plomb ou à la soude, du type utilisé dans la construction des tubes électroniques. Lorsqu'il s'agit de quartz de coupe AT, les boîtiers sont le plus souvent des versions, en verre dur au borosilicate, des boîtiers métalliques de petit format.

It is common to include a test for unwanted responses should it be thought that there is a possibility of the oscillator starting at the unwanted response. Overtone AT-cut specifications where the unwanted responses will certainly be relatively close and large in amplitude often include such a test. It is usual to specify over a frequency range about the main response either the ratio:

$$\frac{\text{unwanted response resonance resistance}}{\text{main resonance resistance}},$$

or to specify the minimum resistance that the unwanted response may have in that frequency range. (See IEC Publication 122-1: Quartz Crystal Units for Frequency Control and Selection, Part 1: Standard Values and Test Conditions, Sub-clause 12.5).

Finally, in any application where unwanted responses are considered to be a potential problem, it is essential that the crystal manufacturer should be consulted to ensure that realistic requirements are specified. In this connection, it should be realized that any unwanted response requirement is meaningless unless the frequency range over which it applies is specified. This specification becomes even more important when crystal units for filter applications are involved.

#### 2.5.7 Mechanical reliability

Generally, it is found that the most rugged units are the high-frequency AT-cuts as they can be mounted quite rigidly without severe effect on their vibrating qualities.

Crystal units with CT, DT, X-cuts, etc., are usually less robust as their mounting systems are weaker.

Regardless of the type of unit used, it may not be possible to meet very severe environmental requirements without some relaxation of the electrical performance.

It should be remembered that all crystal units exhibit changes in frequency and resistance under physical stress long before they break and therefore when specifying the environment level, it is important to give the maximum changes that are acceptable.

Due to crystal unit design limitations, it may be necessary to include additional protection against shock and vibration such as resilient cushions in the crystal fixing arrangements of the equipment.

#### 2.6 Crystal unit enclosures

These fall into three main categories:

- glass;
- metal;
- plastic.

The glass units are usually evacuated whilst the metal units are often nitrogen filled.

The glass units for crystals below 600 kHz are usually of “soft” lead or soda glass of the type used for electronic tubes. Where AT-cut crystal units are concerned, they are more often hard borosilicate glass versions of the smaller commonly used metal enclosures.

Lorsque les fils de sortie doivent être mis en forme, il est indispensable de s'assurer que l'on n'impose qu'une fatigue minimale au scellement verre/métal; sinon le scellement peut ne plus être hermétique.

Il est déconseillé de pratiquer un brasage sur un boîtier métallique après l'exécution de l'essai d'étanchéité.

La fermeture des boîtiers métalliques se fait de plus en plus par joints soudés facilitant l'obtention du vide et offrant une meilleure herméticité à long terme.

Lorsque les exigences pour le vieillissement sont assouplies, l'utilisation de boîtiers en plastique (ou non hermétiquement fermés) peut être considérée comme un moyen de diminuer le prix.

### 3. Le résonateur à quartz en tant que composant d'un circuit

#### 3.1 Généralités

##### 3.1.1 Spécification de la tolérance de fréquence et de la gamme de températures de fonctionnement

L'ingénieur peut spécifier la tolérance de la fréquence uniquement pour la température ambiante. Dans les applications exigeant une tolérance donnée dans la gamme de températures de fonctionnement spécifiée, cela doit être aussi spécifié. Ce faisant, on doit tenir compte de l'élévation de température causée par l'appareillage.

Les tolérances de fréquence dans toute la gamme de températures de fonctionnement peuvent être spécifiées selon les deux principales méthodes suivantes:

*Exemple 1:* spécifier la tolérance totale de fréquence dans la gamme de températures de fonctionnement, par exemple  $\pm 50 \times 10^{-6}$  de  $-55^\circ\text{C}$  à  $+90^\circ\text{C}$ . Cette méthode est utilisée en général lorsqu'il s'agit de tolérances relativement larges visant des applications pour lesquelles on ne pratique pas l'ajustage de fréquence.

*Exemple 2:* spécifier les tolérances séparément comme suit:

a) Tolérance à la température de référence  $\pm 10 \times 10^{-6}$ .

b) Tolérance dans la gamme de températures de  $-30^\circ\text{C}$  à  $+60^\circ\text{C}$   $\pm 20 \times 10^{-6}$  par rapport à la fréquence réelle à la température de référence.

Cette méthode est généralement utilisée dans le cas de tolérances de fréquence étroites lorsqu'on pratique le glissement de fréquence pour éliminer la tolérance de fréquence à la température de référence.

Pour les résonateurs à quartz ayant une courbe fréquence/température parabolique, la tolérance de fréquence à la température de référence peut être spécifiée comme  $0$  à  $+\text{«X»} \times 10^{-6}$ . On peut employer cette méthode pour améliorer la caractéristique dans la gamme de températures de fonctionnement sans avoir recours au glissement de fréquence.

Lorsqu'on écrit la spécification, il convient aussi de prévoir la tolérance de vieillissement du quartz.

En ce qui concerne les combinaisons de gamme de températures/tolérance de fréquence à utiliser de préférence, faire référence aux spécifications internationales ou nationales, ou bien consulter le fabricant.

Lorsqu'on exige une stabilité maximale de la fréquence et que l'on dispose d'espace et de puissance, il convient d'envisager le fonctionnement à température contrôlée. Pour plus de renseignements à ce sujet, voir la Publication 314 de la CEI: Enceintes à température régulée pour les quartz. Lorsque les conditions ci-dessus ne peuvent pas être remplies, des méthodes de compensation de température peuvent être utilisées.

Where leads are to be formed it is essential to ensure that the minimum strain is placed on the glass/metal seal otherwise the enclosure may not remain hermetically sealed.

It is inadvisable to solder onto the metal enclosures after the sealed unit has been tested.

Metal crystal units increasingly use welded seals which facilitate evacuation and offer better long-term air tightness.

When ageing requirements can be relaxed, plastic (or non-hermetic) enclosures may be considered as a means of reducing cost.

### 3. The crystal unit as a circuit component

#### 3.1 General

##### 3.1.1 Specifying frequency tolerance and operating temperature range

The engineer may specify a frequency tolerance only at room temperature. In applications that require a given tolerance over a specified operating temperature range this shall also be specified. In so doing, allowance should be made for temperature rise caused by the equipment.

There are two principal methods of specifying frequency tolerances over the operating temperature range:

*Example 1:* specify an overall frequency tolerance over the operating temperature range such as  $\pm 50 \times 10^{-6}$  from  $-55^{\circ}\text{C}$  to  $+90^{\circ}\text{C}$ . This method is generally used with relatively wide tolerances in applications where frequency trimming is not employed.

*Example 2:* specify “partial” tolerances as follows:

- a) Tolerance at reference temperature  $\pm 10 \times 10^{-6}$ .
- b) Tolerance over the temperature range  $-30^{\circ}\text{C}$  to  $+60^{\circ}\text{C} \pm 20 \times 10^{-6}$  referred to the actual frequency at the reference temperature.

This method is generally used with tighter frequency tolerances where frequency pulling is used to eliminate the frequency tolerance at the reference temperature.

For crystal units having parabolic frequency/temperature curves, the frequency tolerance at the reference temperature may be specified as 0 to  $+“X” \times 10^{-6}$ . This method can be used to give an improved performance over the operating temperature range without employing frequency pulling.

When the specification is being written, allowance should also be made for the ageing of the crystal unit.

Reference should be made to the international or national specifications for “preferred” combinations of temperature range and frequency tolerance, or the manufacturer should be consulted.

Where maximum frequency stability is required and power and space are available, controlled temperature operation should be considered. For further information see IEC Publication 314: Temperature Control Devices for Quartz Crystal Units. Where the above conditions cannot be satisfied, temperature compensation techniques may be used.

### 3.1.2 Capacité de charge et glissement de fréquence

Dans de nombreuses applications, il est nécessaire de faire glisser la fréquence du résonateur à quartz en agissant sur un élément réactif de charge. Par exemple pour compenser la tolérance de fabrication ou asservir la boucle de phase et en modulation de fréquence.

Dans la plupart des applications, l'élément réactif de charge est capacitif; pour cette raison, seul ce cas sera exposé ci-après.

Les formules de transformation pour les éléments inductifs ou les combinaisons peuvent être trouvées dans la Publication 302 de la CEI.

Les figures 12a, 12b et 12c, page 50, représentent respectivement:

- un résonateur à quartz seul;
- un résonateur à quartz connecté en série avec une capacité de charge  $C_L$ , et
- un résonateur à quartz connecté en parallèle avec une capacité de charge  $C_L$ . Tous trois avec les courbes réactance équivalente/fréquence associées.

Par exemple dans un circuit oscillateur la combinaison d'un résonateur et d'un condensateur (figure 12b) fonctionne comme un résonateur avec une fréquence de résonance en charge  $f_L$  dans les mêmes conditions de faible impédance que celles de la figure 12a.

La différence relative de fréquence entre la fréquence de résonance en charge ( $f_L$ ) et la fréquence de résonance ( $f_r$ ) est appelée «décalage relatif de fréquence en charge ( $D_L$ )».

Dans la figure 12c, la capacité de charge  $C_L$  est en parallèle avec le résonateur à quartz; cette combinaison fonctionne comme un résonateur avec une fréquence de résonance en charge  $f_L$ . Pour un  $C_L$  de même valeur que celui de la figure 12b, le  $D_L$  est identique, mais dans ce cas il faut noter que l'impédance du circuit est élevée.

Cette combinaison est utilisée dans les circuits de filtres et souvent par commodité dans les circuits oscillateurs, bien que cette disposition ne soit pas recommandée pour les montages oscillateur, parce que le  $Q$  de l'ensemble est alors très diminué. Il faut noter qu'une équivalence exacte des figures 12b et 12c est valable seulement dans un cas idéal:  $Q = \infty$  et/ou  $C_0 = 0$ . Cela n'est pas le cas dans les circuits oscillateur pratiques et, en raison des exigences de phase pour l'oscillateur, la fréquence d'oscillation sera un peu différente du  $f_L$  de la figure 12c.

### 3.1.2 Load capacitance and frequency pulling

For many applications, there are requirements to pull the crystal frequency by using a load reactive element. This may be necessary in order to trim out the manufacturing tolerance or in phase locked loop and frequency modulation applications.

In most applications the load reactive element is capacitive and, therefore, only this case is now considered.

The transforming formulae for inductive elements or combinations may be found in IEC Publication 302.

Figures 12a, 12b and 12c, page 51, show respectively:

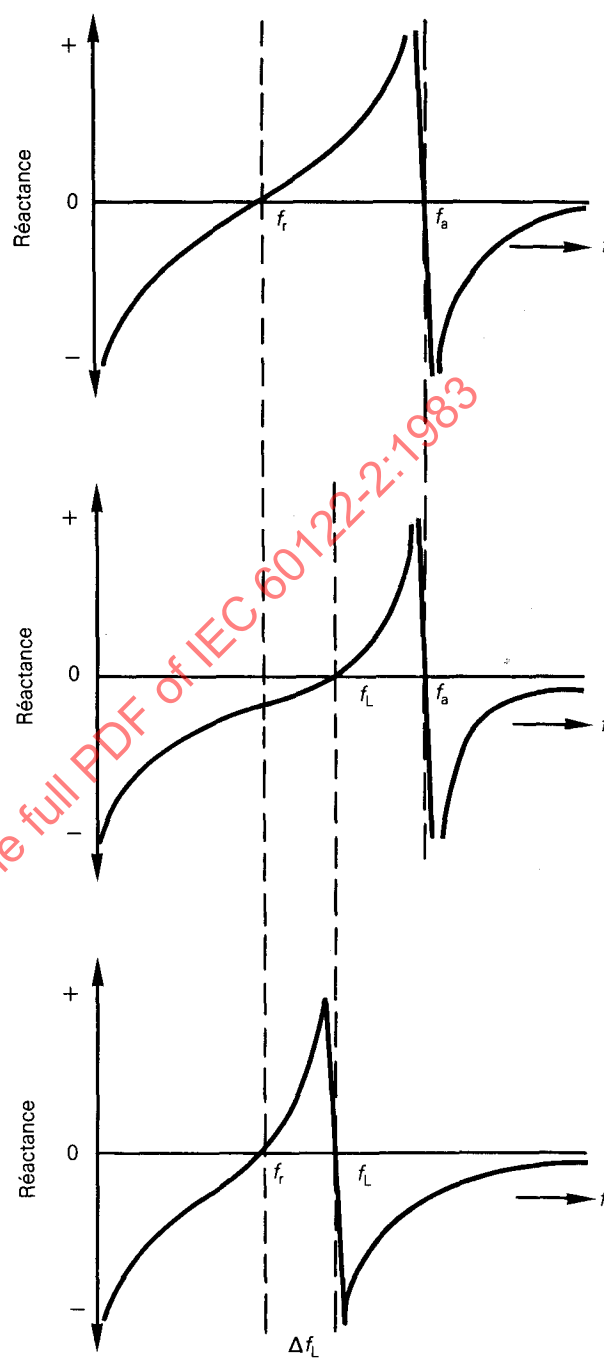
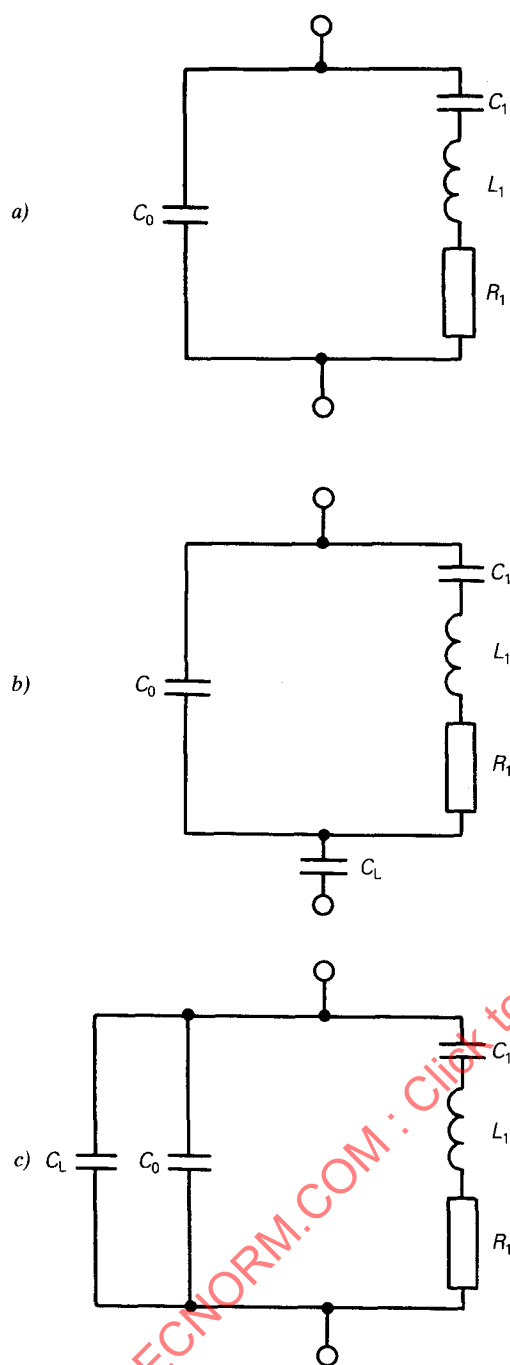
- a crystal unit alone;
- a crystal unit with a series connected load capacitance  $C_L$ , and
- a crystal unit with a parallel connected load capacitance  $C_L$ . All three along with the equivalent reactance/frequency curves.

For example, in an oscillator circuit the combination of a crystal unit and a capacitor (Figure 12b) acts as a crystal unit with the load resonance frequency  $f_L$  in a similar low impedance condition to Figure 12a.

The fractional difference in frequency between the load resonance frequency ( $f_L$ ) and the resonance frequency ( $f_r$ ) is known as the “load resonance frequency offset ( $D_L$ )”.

In Figure 12c, the load capacitance  $C_L$  is in parallel with the crystal unit, and the combination will act as a crystal unit with a load resonance frequency  $f_L$ . For the same value of  $C_L$  as in Figure 12b, the  $D_L$  is the same, but in this case it should be understood that the impedance of the network is high.

This combination is used in filter circuits and is often used for convenience in oscillator circuits. This arrangement is not suggested for oscillators because it seriously degrades the  $Q$  of combination. It should be noted that the exact equivalence of Figures 12b and 12c is true only in the ideal case when  $Q = \infty$  and/or  $C_0 = 0$ . This is not the case in practical oscillator circuits, and due to phase requirements for the oscillator, the operating frequency will differ slightly from  $f_L$  in Figure 12c.

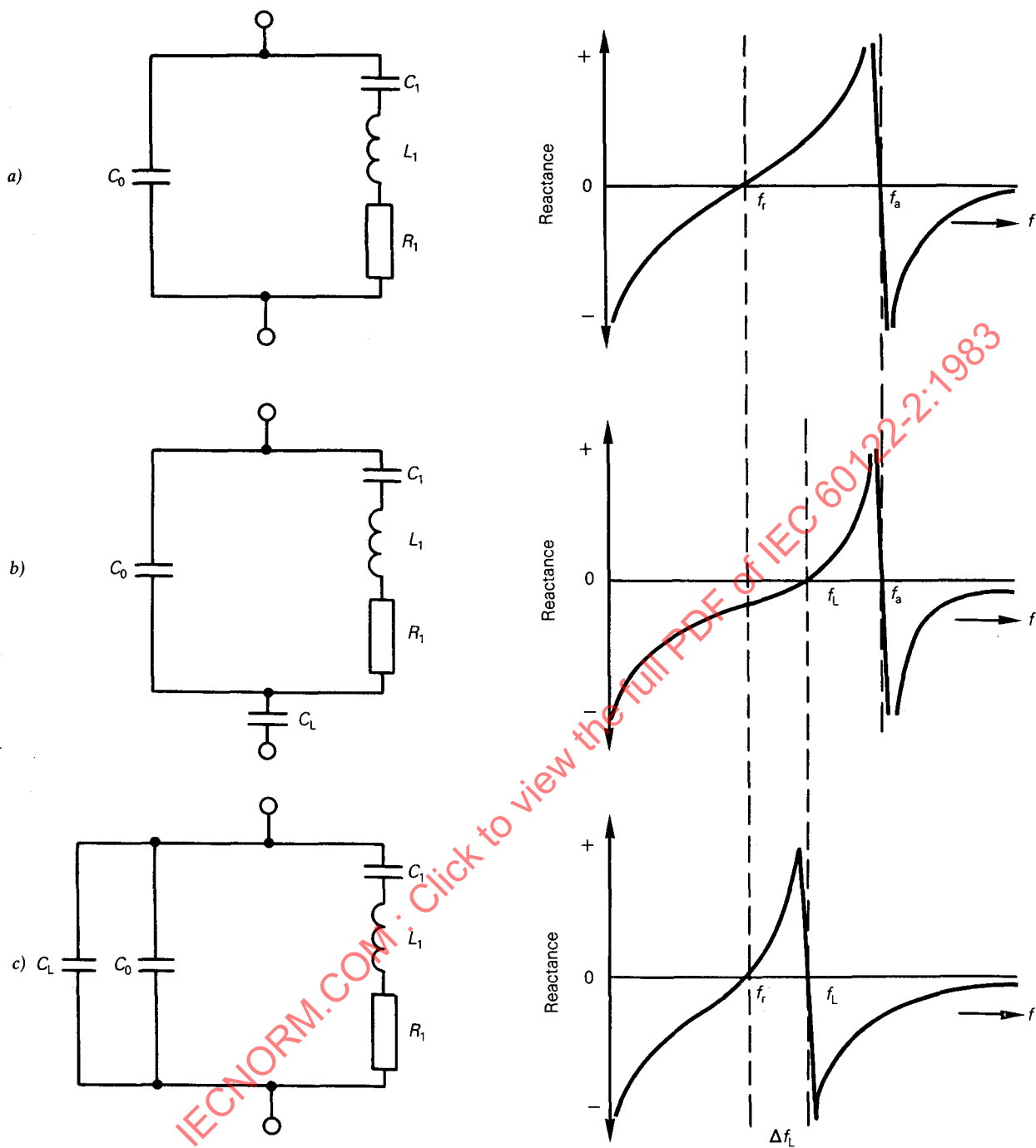


057/83

FIG. 12 a). – Résonateur à quartz seul.

FIG. 12 b). – Résonateur à quartz connecté en série avec une capacité de charge  $C_L$ .FIG. 12 c). – Résonateur à quartz connecté en parallèle avec une capacité de charge  $C_L$ .

FIGURE 12



057/83

FIG. 12a). – Quartz crystal unit alone.

FIG. 12b). – Quartz crystal unit with a series connected load capacitance  $C_L$ .FIG. 12c). – Quartz crystal unit with a parallel connected load capacitance  $C_L$ .

FIGURE 12

Le décalage relatif de fréquence en charge peut être calculé en utilisant la formule:

$$D_L = \frac{f_L - f_r}{f_r} \cong \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)}$$

en faisant l'approximation  $\sqrt{1+a} = 1 + \frac{a}{2}$  pour  $a \ll 1$ .

Dans de nombreuses applications, un condensateur variable (ajustable) est utilisé comme élément réactif de charge pour ajuster la fréquence. Le décalage relatif de fréquence obtenu entre des valeurs spécifiées de l'élément réactif de charge est appelé «plage relative de décalage de fréquence ( $D_{L_1, L_2}$ )» et peut aussi être calculé en utilisant la formule suivante:

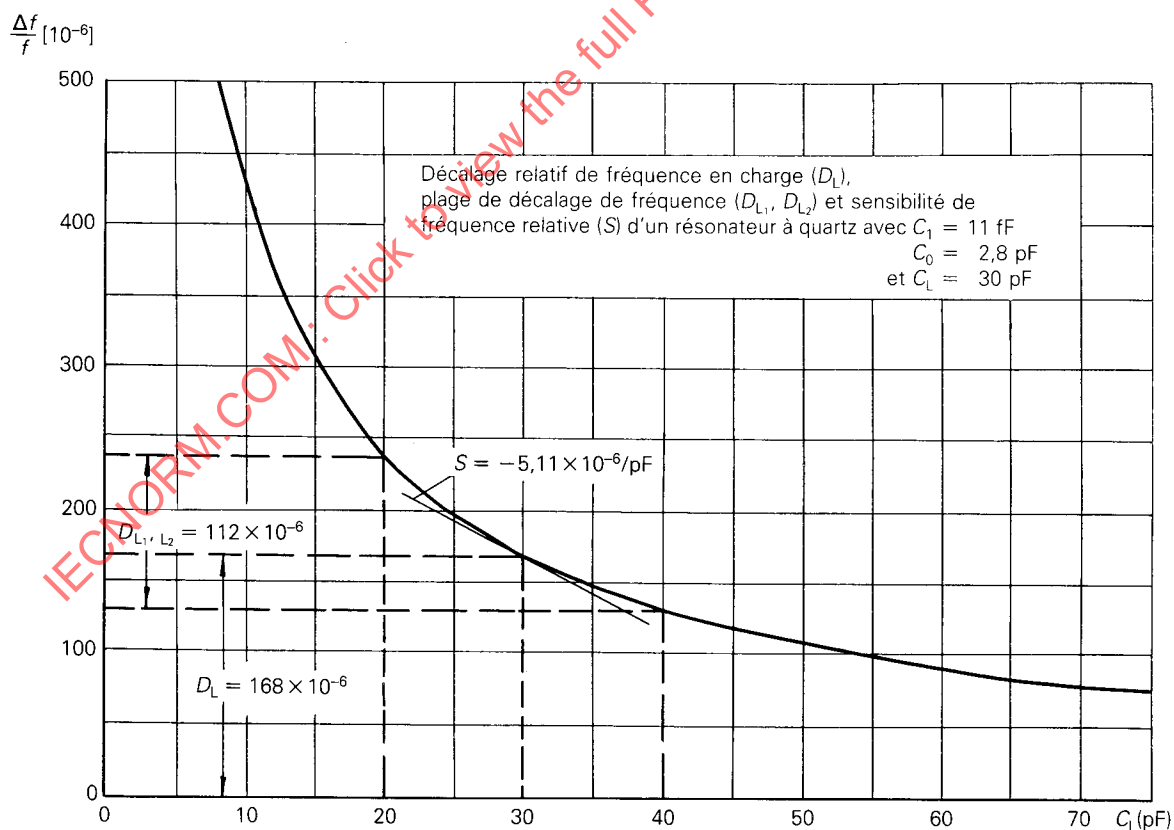
$$D_{L_1, L_2} = \left| \frac{f_{L_1} - f_{L_2}}{f_r} \right| \cong \left| \frac{C_1 (C_{L_1} - C_{L_2})}{2(C_0 + C_{L_1})(C_0 + C_{L_2})} \right|$$

Un paramètre utile pour l'ingénieur d'étude est la sensibilité de fréquence relative ( $S$ ) pour une valeur spécifiée de la capacité de charge. Elle est définie comme l'écart relatif différentiel de fréquence pour une variation infiniment petite de la capacité de charge.

Elle est habituellement exprimée en  $10^{-6}/\text{pF}$  et peut être calculée par la formule:

$$S = \frac{d D_L}{d C_L} \cong \frac{-C_1}{2(C_0 + C_L)^2}$$

La figure 13 montre la relation qui existe entre  $D_L$ ,  $D_{L_1, L_2}$  et  $S$ .



058/83

FIG. 13. – Décalage relatif de fréquence en charge ( $D_L$ ), plage de décalage de fréquence ( $D_{L_1, L_2}$ ) et sensibilité de fréquence relative ( $S$ ) d'un résonateur à quartz.

The fractional load resonance frequency offset can be calculated using the formula:

$$D_L = \frac{f_L - f_r}{f_r} \cong \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)}$$

using the approximation  $\sqrt{1+a} = 1 + \frac{a}{2}$  for  $a \ll 1$ .

In many applications, a variable capacitor (trimmer) is used as the load reactive element to adjust the frequency. The fractional frequency range available between specified values of this load reactive element is called the “fractional pulling range ( $D_{L_1, L_2}$ )” and it can be calculated by using the following formula:

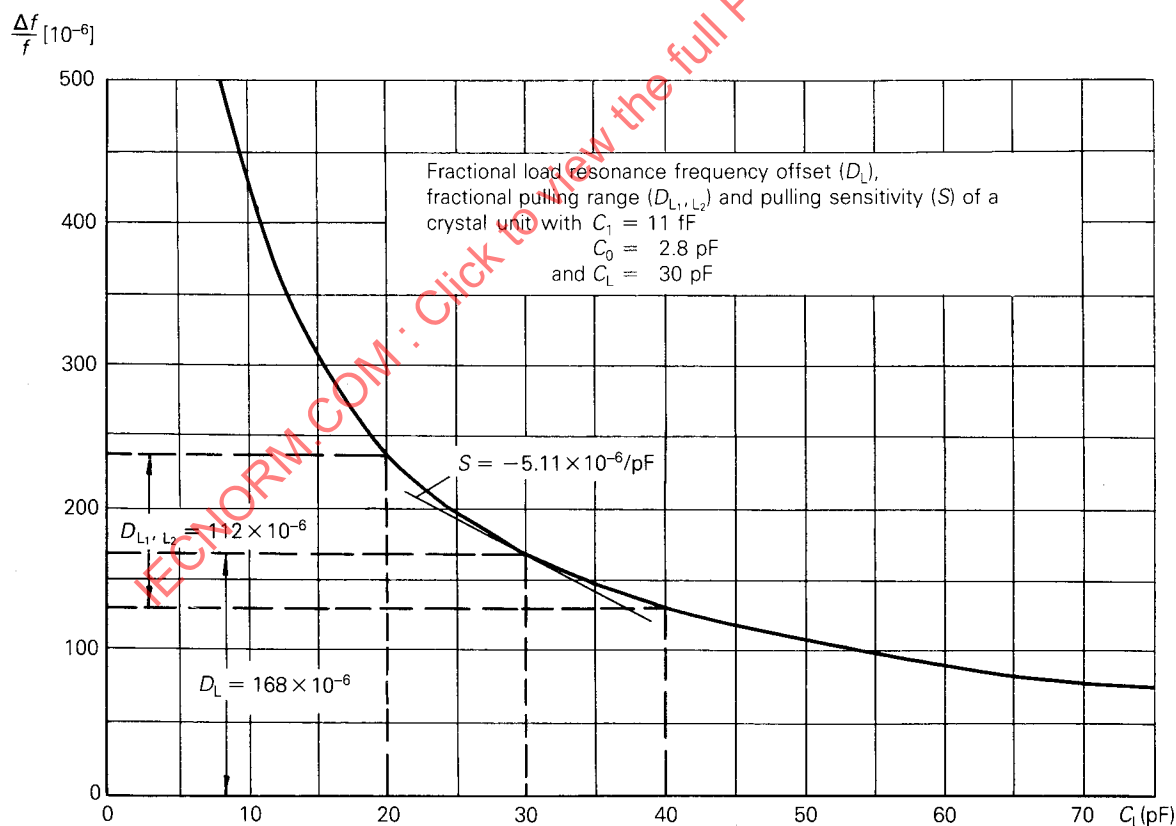
$$D_{L_1, L_2} = \left| \frac{f_{L_1} - f_{L_2}}{f_r} \right| \cong \left| \frac{C_1(C_{L_1} - C_{L_2})}{2(C_0 + C_{L_1})(C_0 + C_{L_2})} \right|$$

A useful parameter to the design engineer is the pulling sensitivity ( $S$ ) at a specified value of load capacitance. It is defined as the incremental fractional frequency change for an incremental change in the load capacitance.

It is normally expressed in  $10^{-6}/\text{pF}$  and can be calculated from the formula:

$$S = \frac{d D_L}{d C_L} \cong \frac{-C_1}{2(C_0 + C_L)^2}$$

Figure 13 shows the relationship between  $D_L$ ,  $D_{L_1, L_2}$  and  $S$ .



058/83

FIG. 13. – Fractional load resonance frequency offset ( $D_L$ ), fractional pulling range ( $D_{L_1, L_2}$ ) and pulling sensitivity of a quartz crystal unit.

Le tableau III présente des sensibilités de fréquence relatives typiques que l'on peut compter obtenir.

Il est très important de définir la capacité de charge moyenne de façon à faire tenir la fréquence réelle du résonateur à quartz dans les tolérances de fréquence qui accompagnent la fréquence nominale dans la spécification. Dans le cas de capacités de charge, de faible valeur, de notables erreurs de fréquence peuvent découler du fait de ne pas prendre convenablement en considération les effets de la mise à la terre du boîtier et d'autres capacités parasites. Il est également important de choisir, chaque fois que possible, la capacité de charge parmi les valeurs normalisées, soit: 10 pF, 20 pF, 30 pF ou 50 pF.

Il faut remarquer qu'une tolérance de  $\pm 0,5$  pF pour une capacité de charge de 20 pF peut conduire à une erreur de fréquence de  $\pm 10 \times 10^{-6}$  pour certains résonateurs à quartz.

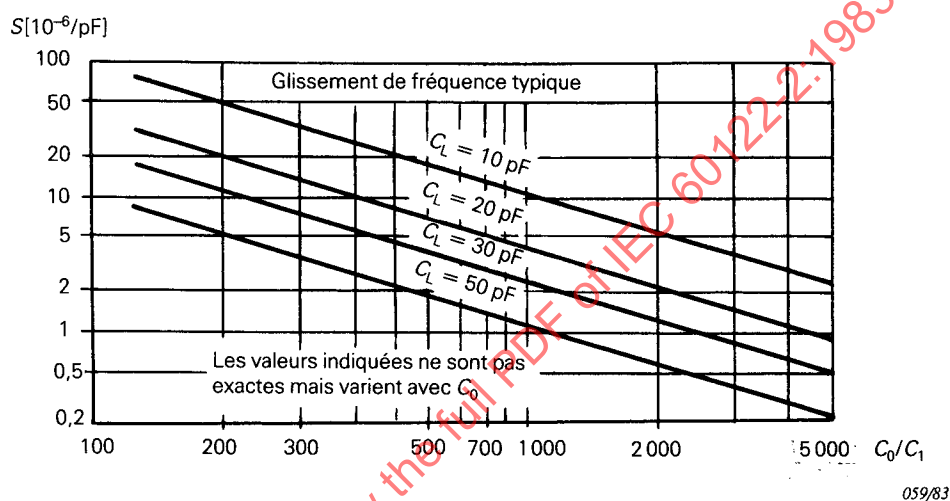


FIG. 14. – Sensibilité de fréquence relative ( $S$ ) en fonction du rapport des capacités  $C_0/C_1$  pour différentes valeurs de capacité de charge  $C_L$ .

### 3.1.3 Influence de la capacité de charge sur la résistance du résonateur à quartz

La résistance dynamique  $R_1$  est un autre paramètre important du circuit équivalent. Ce paramètre détermine le facteur  $Q$  du résonateur et définit le niveau d'oscillation que doit avoir le circuit d'entretien. La résistance de charge à la résonance pour un résonateur à quartz donné dépend de la capacité de charge avec laquelle ce résonateur doit fonctionner.

Ainsi qu'on l'a vu plus haut, la fréquence de l'oscillation dans un circuit approprié est approximativement identique, que la capacité de charge soit branchée en série ou en parallèle. Si la capacité de charge externe a été définie, la résistance de charge à la résonance peut être calculée par la formule:

$$R_L = R_1 \left( 1 + \frac{C_0}{C_L} \right)^2$$

Typical pulling sensitivities to be expected are given in Table III.

It is very important to define the mean load capacitance to enable the actual crystal unit frequency to fall within the tolerances placed on the nominal frequency in the specification. In the case of small values of load capacitance, significant frequency errors can result from failure to properly take into account the effects of grounding the enclosure and of other stray capacitances. It is also important to use, wherever possible, standard values of load capacitance; for example: 10 pF, 20 pF, 30 pF or 50 pF.

It should be noted that a tolerance of  $\pm 0.5$  pF at 20 pF load capacitance can lead to a frequency error of  $\pm 10 \times 10^{-6}$  on some crystal elements.

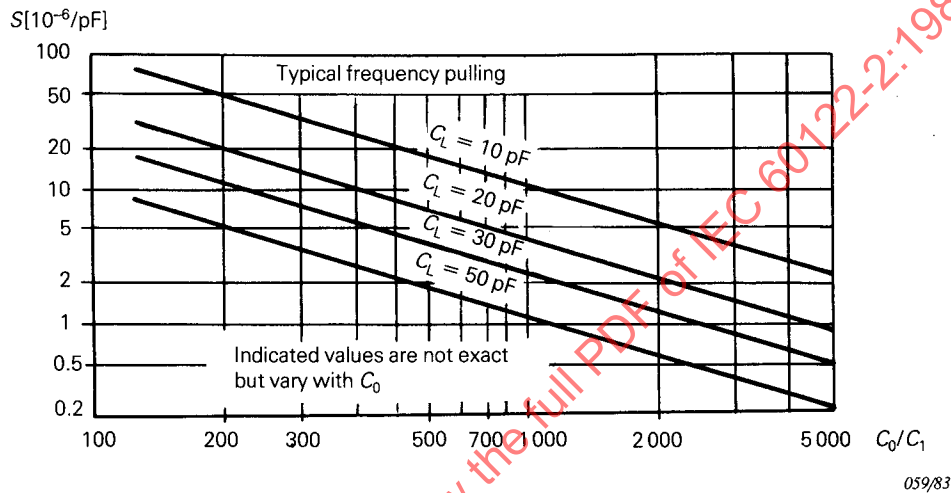


FIG. 14. – Pulling sensitivity ( $S$ ) versus  $C_0/C_1$  for various values of load capacitance  $C_L$ .

### 3.1.3 The effects of load capacitance on crystal resistance

The equivalent circuit of the crystal unit has one other important parameter, this is  $R_1$ , the motional resistance. This parameter controls the  $Q$  of the crystal unit and will define the level of oscillation in any maintaining circuit. The load resonance resistance for a given crystal unit depends upon the load capacitance with which that unit is intended to operate.

As was seen earlier, the frequency of oscillation in an appropriate circuit is approximately the same in either a series or parallel connection of the load capacitance. If the external capacitance is designated, the load resonance resistance may be calculated as follows:

$$R_L = R_1 \left( 1 + \frac{C_0}{C_L} \right)^2$$

TABLEAU III

| Type de vibreur<br>à quartz                | Sensibilité de fréquence relative typique aux valeurs nominales<br>de la capacité de charge<br>$S \left[ \frac{10^{-6}}{\text{pF}} \right]$ |                  |                  |                  |                  |                  |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                                            | 20 pF                                                                                                                                       |                  | 30 pF            |                  | 50 pF            |                  |
|                                            | $S_{20}$<br>min.                                                                                                                            | $S_{20}$<br>max. | $S_{30}$<br>min. | $S_{30}$<br>max. | $S_{50}$<br>min. | $S_{50}$<br>max. |
| AT cisaillement d'épaisseur<br>fondamental | 10                                                                                                                                          | 20               | 4                | 12               | 2                | 5                |
| AT cisaillement d'épaisseur<br>partiel 3   | 1,5                                                                                                                                         | 2,5              | 1                | 1,5              | 0,3              | 0,6              |
| partiel 5                                  | 0,2                                                                                                                                         | 1                | 0,1              | 0,5              | 0,04             | 0,2              |
| partiel 7                                  | $\Delta f/\text{pF}$ trop petit pour être pratique                                                                                          |                  |                  |                  |                  |                  |
| BT cisaillement d'épaisseur                | 6                                                                                                                                           | 14               | 3                | 8                | 1                | 3                |
| CT cisaillement plan                       | 4                                                                                                                                           | 11               | 2                | 6                | 1                | 3                |
| DT cisaillement plan                       | 5                                                                                                                                           | 16               | 2,5              | 9                | 1                | 4                |
| + 5° X elongation                          | 20                                                                                                                                          | 40               | 12               | 30               | 6                | 15               |
| NT flexion                                 |                                                                                                                                             |                  | Moyenne 10 pF    |                  |                  |                  |
| XY flexion                                 |                                                                                                                                             |                  | 9                |                  |                  |                  |
| XY diapason                                |                                                                                                                                             |                  | 14               |                  |                  |                  |
|                                            |                                                                                                                                             |                  | 9                |                  |                  |                  |

Pour une utilisation plus générale, on applique les courbes de la figure 14, page 54, et l'abaque de la figure 15, page 58.

Note. — L'attention est attirée sur la difficulté de pratiquer le glissement de fréquence pour les résonateurs à quartz qui ont des rapports  $C_0/C_1$  élevés.

La résistance parallèle équivalente à la fréquence de résonance à la charge est approximativement:

$$R_p = \frac{1}{R_1} [\omega(C_0 + C_L)]^{-2}$$

Il faut tenir compte que  $R_1$  ne change pas; de cette manière, les paramètres effectifs du circuit de chaque utilisateur peuvent être facilement calculés.

Dans la plupart des cas, la résistance d'un résonateur particulier ne peut être prévue en fabrication; il est seulement possible de s'assurer qu'elle est inférieure à une valeur maximale prescrite dans la spécification.

Finalement, le rédacteur de la spécification doit se souvenir que, avec un condensateur en série, la résistance est toujours supérieure à celle du résonateur sans capacité de charge. Certaines spécifications nationales définissent des valeurs de résistance de résonance avec capacité de charge aussi bien que sans capacité.

TABLE III

| Type of crystal element         | Typical pulling sensitivity at nominal values of load capacitance<br>$S \left[ \frac{10^{-6}}{\text{pF}} \right]$ |                  |                  |                  |                  |                  |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                                 | 20 pF                                                                                                             |                  | 30 pF            |                  | 50 pF            |                  |
|                                 | $S_{20}$<br>min.                                                                                                  | $S_{20}$<br>max. | $S_{30}$<br>min. | $S_{30}$<br>max. | $S_{50}$<br>min. | $S_{50}$<br>max. |
| AT thickness shear fundamental  | 10                                                                                                                | 20               | 4                | 12               | 2                | 5                |
| AT thickness shear 3rd overtone | 1.5                                                                                                               | 2.5              | 1                | 1.5              | 0.3              | 0.6              |
| AT thickness shear 5th overtone | 0.2                                                                                                               | 1                | 0.1              | 0.5              | 0.04             | 0.2              |
| AT thickness shear 7th overtone | $\Delta f/\text{pF}$ too small to be useful                                                                       |                  |                  |                  |                  |                  |
| BT thickness shear              | 6                                                                                                                 | 14               | 3                | 8                | 1                | 3                |
| CT face shear                   | 4                                                                                                                 | 11               | 2                | 6                | 1                | 3                |
| DT face shear                   | 5                                                                                                                 | 16               | 2.5              | 9                | 1                | 4                |
| + 5° X extensional              | 20                                                                                                                | 40               | 12               | 30               | 6                | 15               |
| NT flexural                     | Mean 10 pF                                                                                                        |                  |                  |                  |                  |                  |
| XY flexural                     |                                                                                                                   |                  |                  |                  |                  |                  |
| XY tuning fork                  |                                                                                                                   |                  |                  |                  |                  |                  |

For more general use, Figure 14, page 55, and nomogram (Figure 15, page 59) apply.

Note. — Attention is drawn to the difficulty of pulling crystal units with high  $C_0/C_1$  ratios.

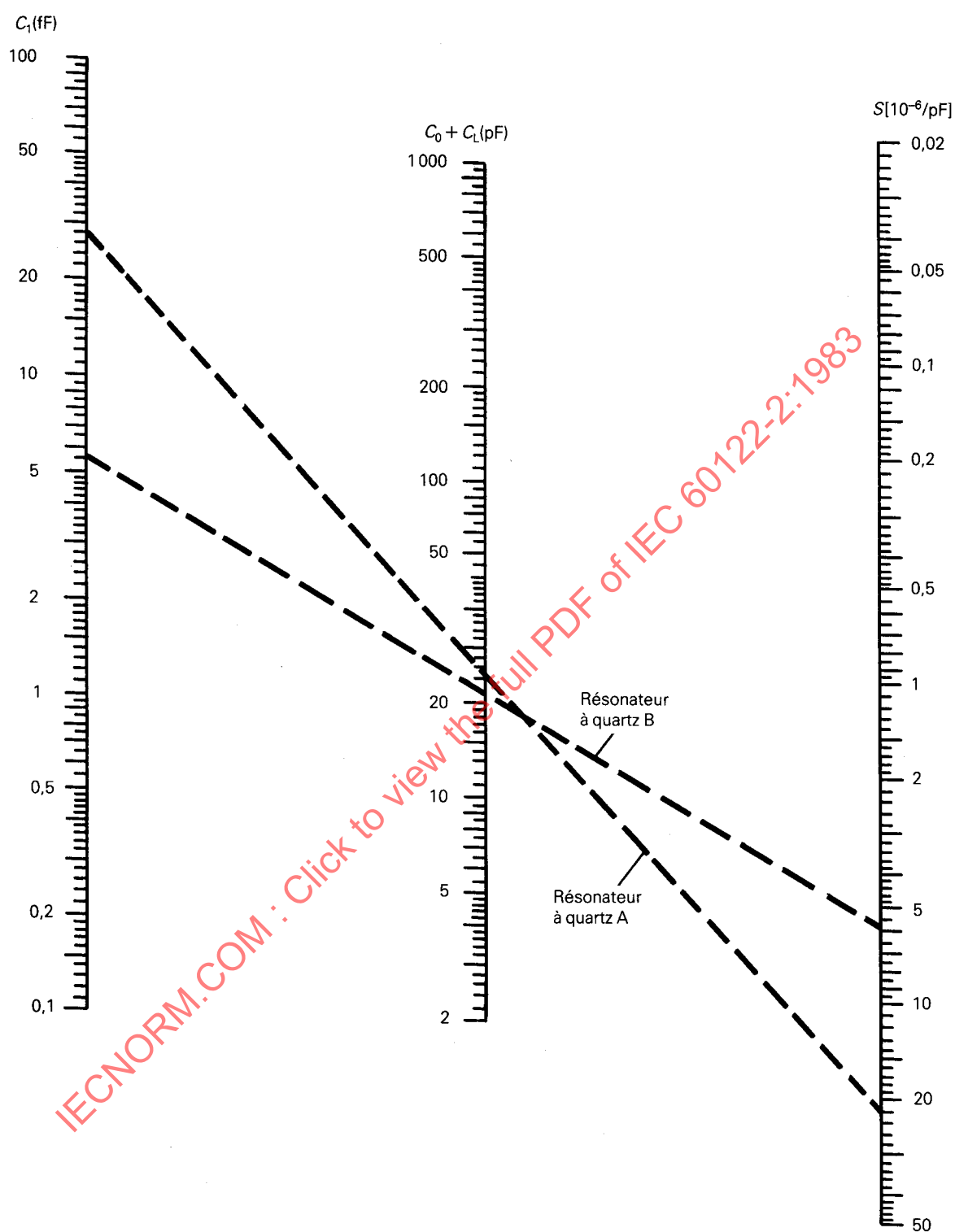
The equivalent shunt or parallel resistance at the load resonance frequency is approximately:

$$R_p = \frac{1}{R_1} [\omega(C_0 + C_L)]^{-2}$$

It should be remembered that  $R_1$  does not change; thus, the effective parameters of any user network can be readily calculated.

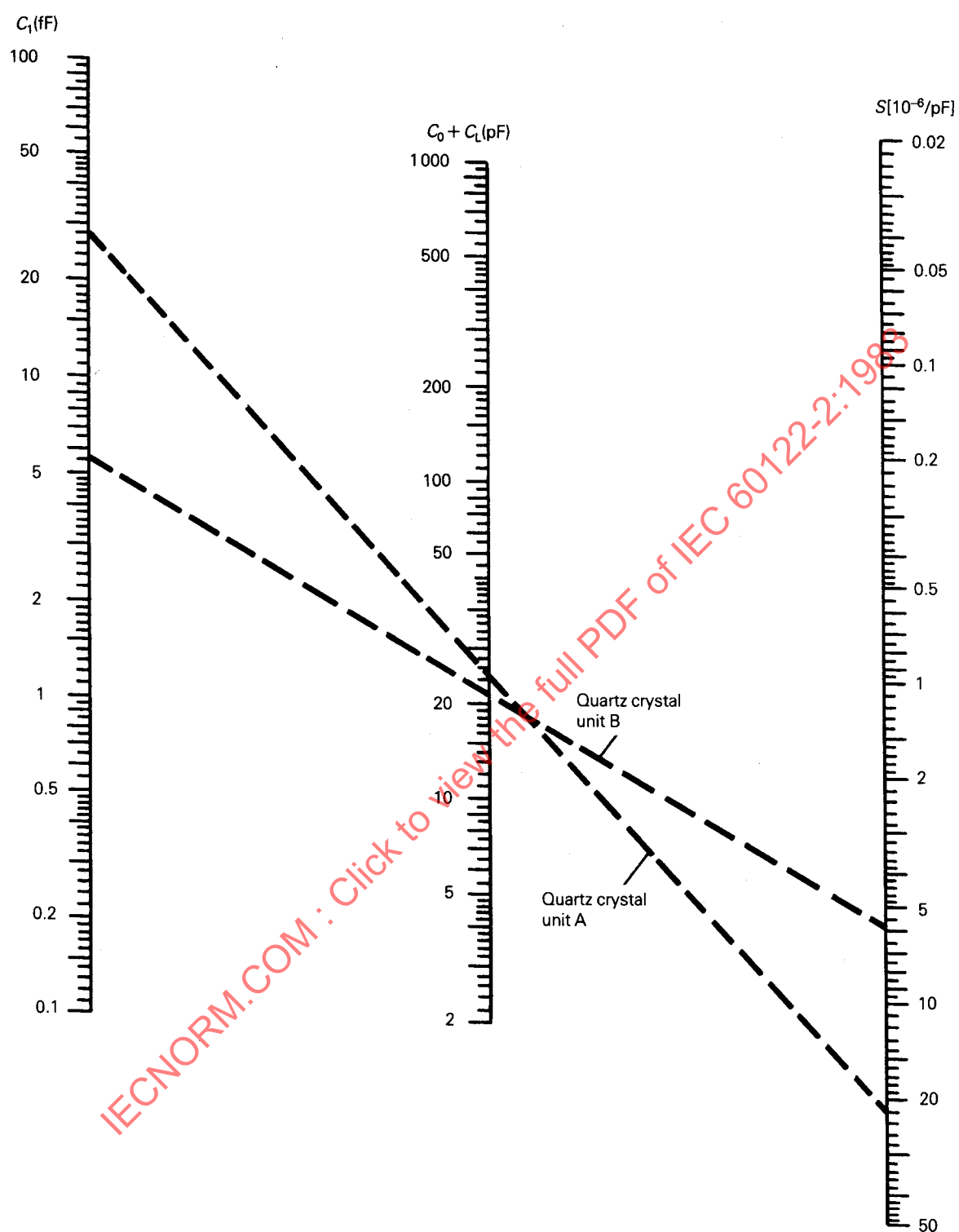
In most cases, the resistance of a particular unit cannot be predicted during manufacture; it is only possible to ensure that it is less than the maximum given in the specification.

Finally, it should always be remembered when specifying that the resistance with a series capacitor is always increased over the value of the crystal itself. Some national specifications give values of resonance resistance with load capacitance as well as without load capacitance.



060/83

FIG. 15. – Taux de variation de la fréquence en fonction de la capacité de charge.



060/83

FIG.15. – Rate of frequency change as a function of load capacitance.

### 3.2 Oscillateurs, notion de base

Ce paragraphe décrit la relation qui existe entre le résonateur à quartz et l'oscillateur. La Publication 679-2 de la CEI: Oscillateurs pilotés par quartz, Deuxième partie: Guide pour l'utilisation des oscillateurs pilotés par quartz, présente un exposé complet sur ce sujet.

#### 3.2.1 Facteurs affectant la fréquence

Il faut comprendre que dans un oscillateur dont la fréquence est définie principalement par un résonateur à quartz, les conditions de fonctionnement ont une influence sur la fréquence d'oscillation.

Bien que le résonateur à quartz ait été ajusté en fabrication à la fréquence nominale, les conditions dans lesquelles cette fréquence sera obtenue dans l'oscillateur à quartz doivent être exactement définies.

La méthode de la phase nulle, décrite dans la Publication 444 de la CEI, a été adoptée comme méthode fondamentale pour la mesure de la fréquence de résonance et de la résistance de résonance du résonateur à quartz. (L'analyse détaillée des points sur la courbe du résonateur est donnée dans la Publication 302 de la CEI.)

#### 3.2.2 Types d'oscillateurs

Un oscillateur piloté par quartz peut être décrit d'une façon générale comme un amplificateur avec un circuit de réaction contenant un résonateur à quartz. Pour entretenir l'oscillation, le gain de boucle doit être supérieur à l'unité à la fréquence pour laquelle la phase de boucle totale est égale à  $2n\pi$  ( $n = 0$  ou un entier quelconque).

Les oscillateurs pilotés par quartz peuvent être classés en deux groupes importants:

- 1) Ceux pour lesquels le résonateur à quartz fonctionne à la condition de phase nulle. Ils sont généralement désignés sous le terme «oscillateurs à résonance série».
- 2) Ceux qui utilisent le résonateur à quartz comme inductance dans un réseau de réaction déphaseur. On devrait les désigner sous le terme «oscillateurs à réactance positive» alors qu'ils sont communément appelés «oscillateurs à résonance parallèle» ou «oscillateurs à antirésonance». Ces deux termes sont techniquement incorrects et l'on devrait éviter de les utiliser.

Ces deux groupes sont destinés à assurer une sélectivité adéquate à la fréquence correcte pour éviter des oscillations aux fréquences indésirables.

#### 3.2.3 Oscillateurs à résonance série

3.2.3.1 La figure 16 montre le principe de cet oscillateur.

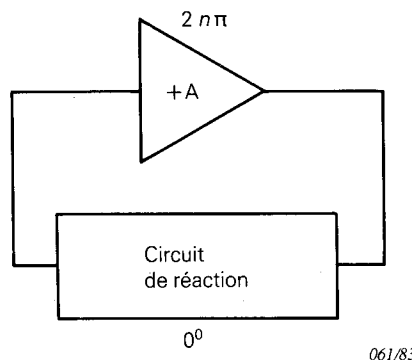


FIG. 16. – Oscillateur à résonance série.

### 3.2 Oscillators, basic concept

This sub-clause deals with the relationship of the crystal unit to the oscillator. A complete description of this subject is provided in IEC Publication 679-2: Quartz Crystal Controlled Oscillators, Part 2: Guide to the Use of Quartz Crystal Controlled Oscillators.

#### 3.2.1 Factors affecting the frequency

In an oscillator whose frequency is to be decided principally by a crystal resonator, it shall be understood that the circuit and conditions of operation have a significant effect on the oscillation frequency.

Although a crystal unit is adjusted during manufacture to a nominal frequency, the conditions under which this frequency is to be obtained in a crystal oscillator shall be adequately defined.

The zero phase method as described in IEC Publication 444 has been adopted as the basic method for the measurement of the resonance frequency and resonance resistance of crystal units. (A detailed analysis of the various points on the resonator curve is given in IEC Publication 302.)

#### 3.2.2 Types of oscillators

A crystal controlled oscillator can generally be described as an amplifier with a feedback network containing a crystal resonator. To sustain oscillation, the loop gain shall exceed unity at a frequency at which the total loop phase is  $2n\pi$  ( $n = 0$  or some whole integer).

Crystal controlled oscillators can be divided into two broad groups:

- 1) Those that operate the crystal unit at zero phase condition. These are generally called “series resonance oscillators”.
- 2) Those that use the crystal unit as an inductance in a shifting feedback network. These should be called “positive reactance oscillators”. They are commonly called “parallel resonance” or “anti-resonance oscillators”. These two terms are not technically correct and their use should be avoided.

Both groups should be designed to ensure adequate selectivity at the correct frequency to avoid oscillation at undesired frequencies.

#### 3.2.3 Series resonance oscillators

3.2.3.1 The basic principle of this type of oscillator is shown in Figure 16.

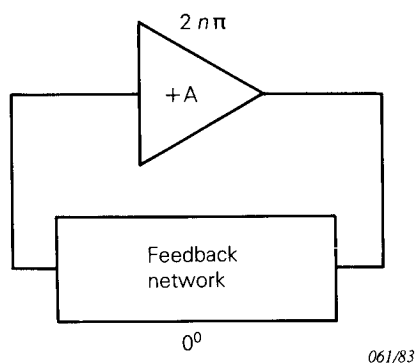


FIG. 16. – Series resonance oscillator.

3.2.3.2 Dans ce circuit l'amplificateur consiste souvent en deux amplificateurs inverseurs de phase, particulièrement aux fréquences très basses où l'impédance du résonateur est relativement élevée. Il peut aussi consister en un amplificateur inverseur de phase et en un transformateur ou autre type d'inverseur ne comportant pas le résonateur.

#### 3.2.4 Oscillateurs à réactance positive

3.2.4.1 La figure 17 montre le principe de cet oscillateur.

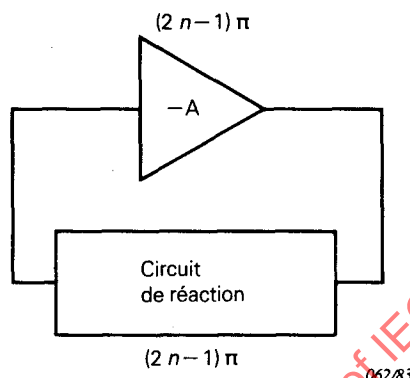


FIG. 17. — Oscillateur à réactance positive.

3.2.4.2 Dans ce circuit l'amplificateur consiste habituellement en un amplificateur inverseur de phase. Le résonateur à quartz fonctionne comme une inductance dans le réseau déphaseur nécessaire pour former la boucle de phase. Afin que cela se produise, les conditions de la figure 18a ou 18b, page 64, doivent être remplies.

3.2.4.3 Dans le principe de fonctionnement de cet oscillateur, le résonateur et son réseau associé fournissent le déphasage nécessaire pour fermer la boucle de phase. Le résonateur corrige alors toute instabilité de phase avec une dérive de fréquence minimale.

3.2.4.4 Un oscillateur du type à résonance série peut fonctionner comme un oscillateur à réactance positive si l'on branche un condensateur en série avec le résonateur comme l'indique la figure 19, page 64. Dans ce cas, la réactance négative du condensateur et toute réactance accidentelle sont supprimées par la réactance positive du résonateur. Pour ce type de fonctionnement, les résonateurs à quartz sont mis en œuvre avec un déphasage significatif voulu. En conséquence, il convient de spécifier qu'ils doivent fonctionner avec une capacité de charge appropriée et *non* en résonance série.

3.2.4.5 Dans tout circuit à réactance positive, l'ajustage de fréquence peut être effectué à l'aide d'un condensateur variable convenablement connecté dans le réseau déphaseur du résonateur.

3.2.3.2 The amplifier in the circuit often consists of two inverters, especially at very low frequencies where crystal impedances are relatively high. It may also consist of one inverter and a transformer or other inverting network that does not include the crystal unit.

#### 3.2.4 Positive reactance oscillators

3.2.4.1 The basic principle of this type of oscillator is shown in Figure 17.

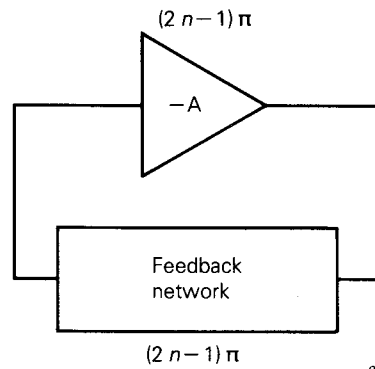


FIG. 17. – Positive reactance oscillator.

3.2.4.2 The amplifier in this circuit usually consists of an inverter and the crystal unit operates as an inductance in the phase shifting network required to close the phase loop. For this to occur, the conditions of Figure 18a or 18b, page 65 shall be met.

3.2.4.3 The operating principle of this oscillator is to have the crystal unit and its associated network provide the necessary phase shift to close the phase loop. The crystal unit then corrects any phase instability with a minimum frequency shift.

3.2.4.4 A series resonance type of oscillator can be operated as a positive reactance oscillator by connecting a capacitor in series with the crystal unit as shown in Figure 19, page 65. In this case, the negative reactance of the capacitor plus any incidental reactance are cancelled by the positive reactance of the crystal unit. For this type of operation, the crystal units are operated with significant, deliberate phase shift. Therefore, they should be specified for operation with the appropriate load capacitance and *not* for series resonance.

3.2.4.5 In any of the positive reactance circuits, frequency adjustment can be provided by a variable capacitor appropriately connected in the crystal phase shifting network.

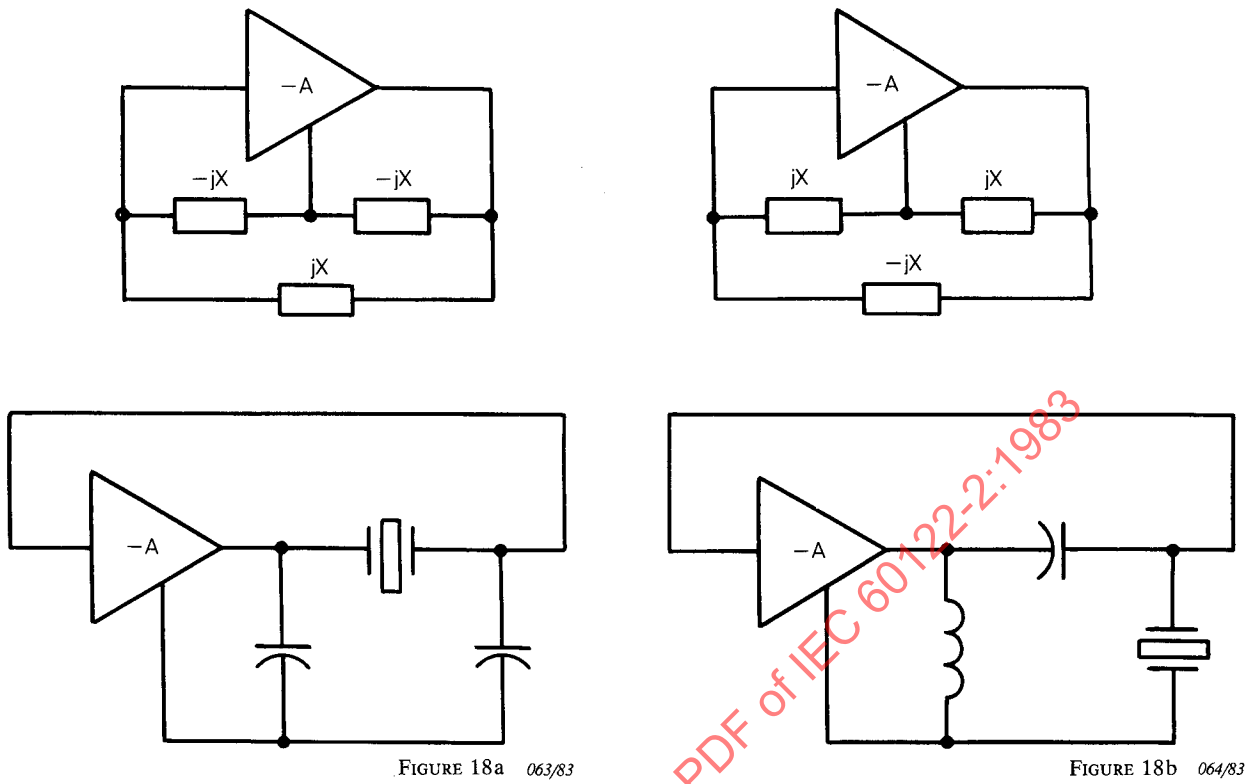
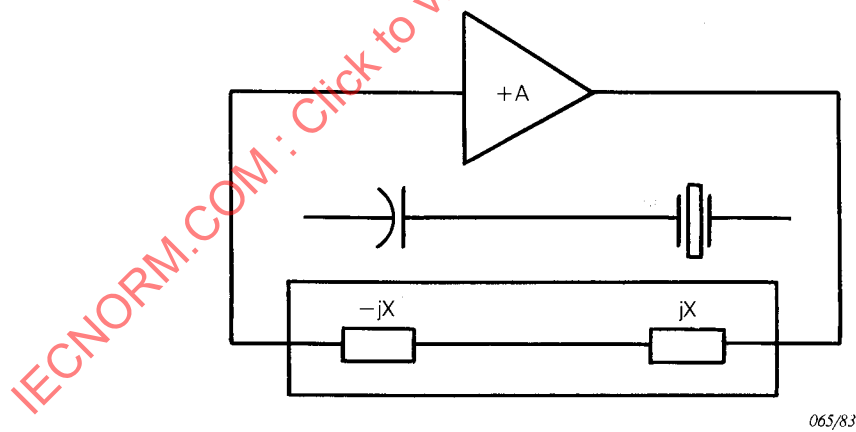


FIGURE 18a 063/83

FIGURE 18b 064/83

FIG. 18. – Le résonateur à quartz fonctionne comme inductance dans le réseau déphaseur.



065/83

FIG. 19. – Résonateur à quartz avec capacité de charge en série.

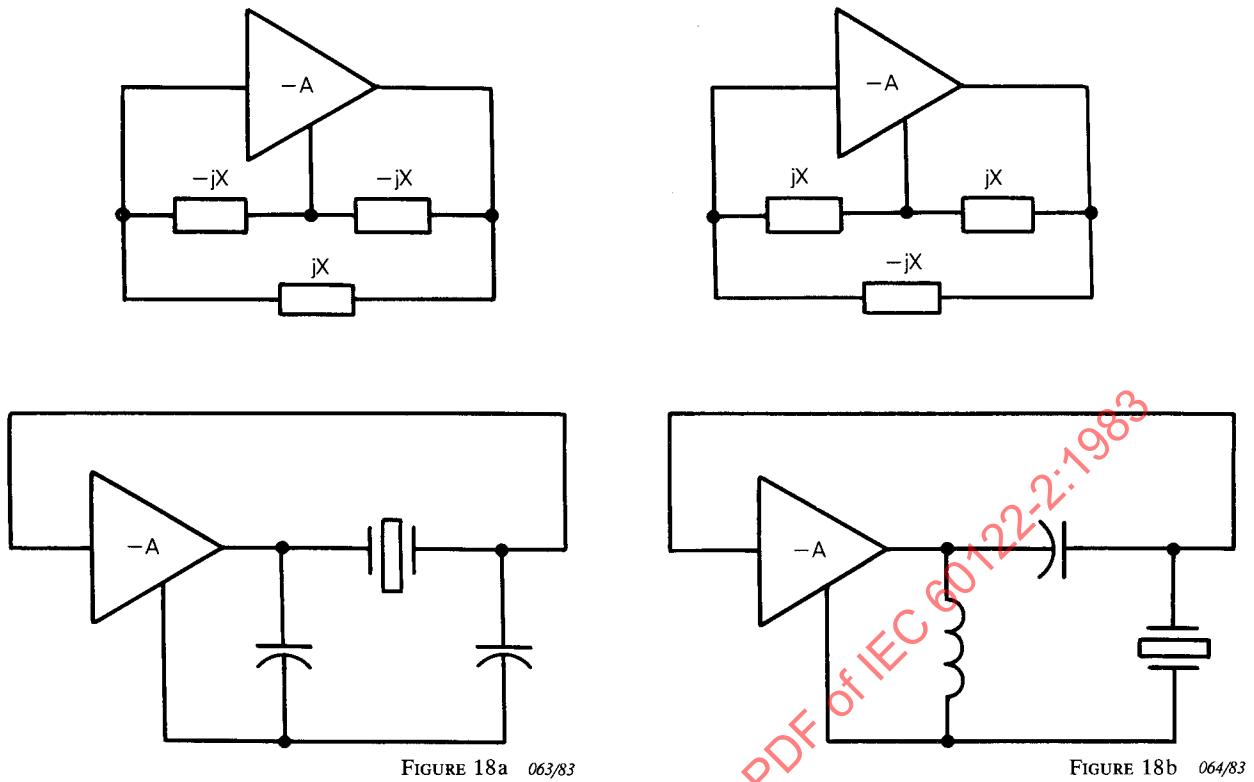


FIG. 18. – The crystal unit operates as an inductance in the phase shifting network.

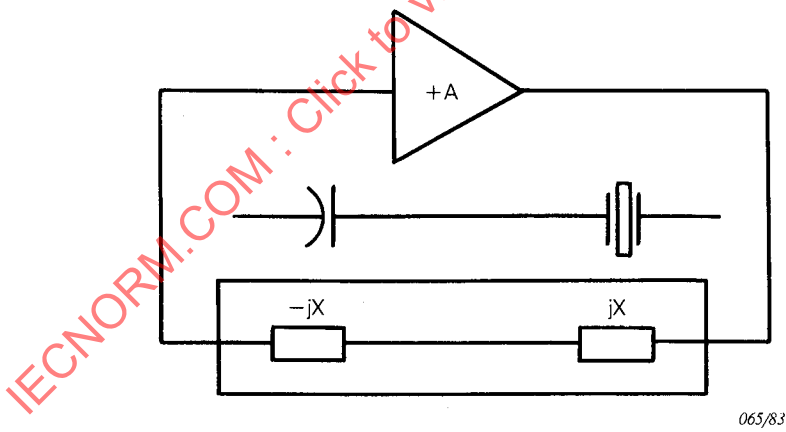


FIG. 19. – Crystal unit with a series connected load capacitance.

### 3.2.5 Difficultés de fonctionnement des oscillateurs

- 3.2.5.1 L'apparition d'amplificateurs à l'état solide économiques, utilisant des circuits discrets ou des circuits intégrés, a donné naissance à une nouvelle classe d'oscillateurs qui peuvent présenter de sérieuses difficultés. Des retards de phase rendant l'oscillateur apparemment inductif peuvent résulter de circuits à plusieurs étages médiocrement conçus.
- 3.2.5.2 Si l'erreur de phase est faible, il est possible de la corriger à l'aide d'un condensateur monté en série avec le résonateur à quartz, comme dans la figure 19, page 64. Pour les fonctionnements en résonance série, on doit choisir le condensateur de façon à annuler le déphasage aux bornes d'un résonateur à quartz.
- 3.2.5.3 Si l'on désire que le résonateur à quartz fonctionne en réactance positive, le condensateur peut être de faible valeur. Dans ce cas, la valeur de  $C_L$  vue par le résonateur peut être supérieure à celle du condensateur.
- 3.2.5.4 Si le retard de phase est trop important, la capacité requise pour le corriger sera si faible que le circuit deviendra instable. Dans certains cas, la boucle de phase peut être fermée par  $C_0$  du résonateur, laissant l'oscillateur fonctionner sans le contrôle du résonateur.
- 3.2.5.5 Lorsqu'on détermine la valeur de  $C_L$  dans les oscillateurs similaires à ceux qui sont représentés sur la figure 18a, page 64, le déphasage dans l'amplificateur doit être considéré en plus du déphasage dans les deux condensateurs.
- 3.2.5.6 Dans les oscillateurs du type de la figure 18a, il est important d'indiquer les capacités réelles plutôt que seulement les capacités parasites ou les capacités d'entrée ou de sortie de l'amplificateur. Les capacités d'un amplificateur ne sont pas spécifiées car elles sont sensibles à la tension et à la température et sujettes à des variations importantes en production. La basse valeur de  $C_L$  qui en résulte également situera le point de fonctionnement dans la portion la plus défavorable de la courbe de glissement de fréquence (voir paragraphe 3.1.2) avec, comme résultat, des caractéristiques de mise en fonctionnement imprévisibles.

### 3.3 Considérations pratiques sur les oscillateurs

- 3.3.1 Pour un oscillateur du type à résonance série, le déphasage entre les sorties du résonateur à quartz doit être suffisamment faible pour ne faire dériver la fréquence que d'un faible pourcentage de la tolérance d'étalonnage.
- 3.3.2 *Résistance du résonateur à quartz*

Il faut bien comprendre que l'on doit, lors de la conception de l'oscillateur, tenir compte des variations de résistance. Le résonateur ayant la résistance la plus élevée définie dans la spécification devra fonctionner de façon satisfaisante alors que celui qui aura la résistance la plus faible ne devra pas engendrer de niveaux d'excitation excessifs. Pour être certain de l'amorçage, on devra concevoir l'oscillateur de façon telle qu'il y ait oscillation avec des résonateurs à quartz ayant des résistances de valeur triple de la résistance maximale spécifiée. Cette nécessité découle de ce que la résistance des résonateurs à quartz, pour des niveaux d'excitation proches du niveau de bruit, peut être supérieure à la valeur maximale mesurée dans des conditions spécifiées (voir paragraphe 2.5.3).

#### 3.3.3 Résonances indésirables

En pratique, les résonances indésirables provoquent rarement des difficultés lorsqu'il s'agit de résonateurs pour oscillateurs.

Si de telles difficultés surviennent, elles sont le fait à la fois de la conception du résonateur et de celle de l'oscillateur. Elles se produisent souvent lorsque les résonateurs sont utilisés en groupes multiples de résonateurs commutables. Il convient de remarquer que la mise à la masse des boîtiers et la mise en court-circuit des résonateurs non utilisés peuvent réduire de façon très importante la possibilité d'oscillations sur des fréquences indésirables.

### 3.2.5 *Oscillator problems*

3.2.5.1 The advent of economical solid state amplifiers, using either discrete or integrated circuits has resulted in another class of oscillators that may present serious problems. Poorly designed multistage circuits can result in phase delays that make the oscillator appear inductive.

3.2.5.2 If the phase error is small, it can be corrected by a capacitor in series with the crystal unit as in Figure 19, page 64. For series resonance operation, the capacitor shall be chosen to bring the phase shift to zero at the terminals of the crystal unit.

3.2.5.3 If positive reactance operation of the crystal is desired, the capacitor can have a small value. In that case, the value of  $C_L$  as seen by the crystal unit may be larger than the capacitor value.

3.2.5.4 If the phase delay is too severe, the capacitance required to correct it becomes so small that the circuit becomes unstable. In some cases the phase loop can be closed by  $C_0$  of the crystal unit, allowing the oscillator to operate with no control by the resonator.

3.2.5.5 In determining the value of  $C_L$  in oscillators similar to those in Figure 18a, page 65, the phase shift in the amplifier shall be considered in addition to the phase shift in the two capacitors.

3.2.5.6 In oscillators of the type shown in Figure 18a, it is important that the capacitors shown should be real rather than only strays or the input and output capacitance of the amplifier. The amplifier capacitances are unspecified, voltage and temperature sensitive and subject to wide production variation. Also the low value of  $C_L$  that results will put the operating point on a most unfavourable portion of the frequency pulling curve (see Sub-clause 3.1.2) as well as resulting in unpredictable starting characteristics.

### 3.3 *Oscillators, practical considerations*

3.3.1 If an oscillator is to be considered as operating at series resonance, the phase shift between the crystal unit terminals shall be small enough to cause the crystal unit to shift frequency by only a small percentage of the calibration tolerance.

#### 3.3.2 *Crystal unit resistance*

It shall be realized that variation in resistance should be allowed for in oscillator design. The highest resistance crystal unit defined in the specification should operate satisfactorily whilst those of the lowest resistance should not give rise to excessive drive levels. For certainty of starting, the oscillator circuit should be so designed that it will oscillate with crystal units having three times the maximum resistance specified. The necessity for this arises from the fact that the resistance of the crystal units at levels of drive approaching noise level may be greater than the maximum under specified test conditions (see Sub-clause 2.5.3).

#### 3.3.3 *Unwanted responses*

In practice, unwanted responses seldom give any trouble for oscillator applications.

The occurrence of such troubles in oscillator applications is a function of both the oscillator and crystal design. Often problems arise when crystal units are used in applications involving multiple switched crystals. It should be noted that earthing of the crystal unit enclosures and shorting out of the crystal units not connected in the circuit can considerably reduce the possibility of oscillation on unwanted frequencies.

On doit admettre que certains résonateurs à quartz ont des résonances indésirables que l'on peut prévoir et qui sont bien connues du fabricant. Les cas les plus évidents que l'on ne peut négliger sont les modes d'élongation des vibrateurs à quartz à modes de flexion et de cisaillement plan, le fondamental d'un mode partiel et les modes non harmoniques des vibrateurs de coupe AT.

La réponse en hautes fréquences des oscillateurs modernes à semiconducteurs peut provoquer des difficultés en raison des résonances indésirables dans les résonateurs à quartz aux fréquences supérieures à la fréquence souhaitée. Afin d'éviter cet inconvénient, il convient que l'amplificateur ait une caractéristique de coupure passe-bas entre la fréquence souhaitée et la résonance la plus proche de fréquence plus élevée.

La réduction d'une résonance indésirable d'un résonateur à quartz entraîne généralement une augmentation de l'impédance à la résonance utilisée. Il convient de consulter le fabricant pour ces questions quand c'est nécessaire.

Les essais relatifs aux résonances indésirables d'un quartz pour oscillateurs sont très coûteux et il est généralement suffisant de ne les effectuer que lors des vérifications du prototype.

#### 3.3.4 Niveau d'excitation

On recommande que le gain de boucle des circuits de l'oscillateur soit élevé à l'accrochage et qu'il reste faible par la suite. Cela est particulièrement important lorsque le niveau d'excitation est très faible, de façon à permettre un démarrage rapide du résonateur. Le niveau d'excitation réel de l'équipement devrait toujours être spécifié.

#### 3.4 Stabilité de fréquence

La stabilité de fréquence d'un oscillateur à quartz dépend principalement de la façon dont le résonateur à quartz corrige l'erreur de phase de l'oscillateur.

La stabilité à court terme d'un oscillateur déterminé est principalement fonction de la surtension en charge ( $Q$ ) et du rapport  $C_0/C_1$  du résonateur à quartz ainsi que des conditions climatiques et mécaniques telles que la température et les chocs.

La stabilité à long terme est fonction principalement du vieillissement du quartz.

#### 3.5 Utilisation pour le filtrage

Une prescription importante pour un résonateur à quartz oscillateur est la tolérance de fréquence mesurée dans des conditions déterminées à la température de référence, dans la gamme des températures de fonctionnement et en fonction du temps.

Lorsqu'il s'agit de résonateurs à quartz utilisés pour le filtrage, ces prescriptions sont importantes aussi, mais les valeurs et tolérances des éléments du circuit équivalent ainsi que la position et l'amplitude des résonances indésirables sont peut-être plus importantes.

Les résonateurs à quartz utilisés comme éléments de filtres sont les mêmes que ceux qui équipent les oscillateurs et font l'objet des mêmes méthodes d'étude et de fabrication. Cependant, en raison des prescriptions différentes propres à l'utilisation qui est faite du résonateur, l'importance relative de certains aspects de la spécification sera différente. Il y a des résonateurs monolithiques, conçus spécialement, et des multirésonateurs; mais ceux-ci peuvent déjà être considérés comme des filtres. On peut trouver ailleurs des informations sur ces éléments.

Les articles de la présente norme traitant de ces sujets donnent quelques renseignements sur ces facteurs mais, d'une façon générale, une coopération étroite doit exister avec le fabricant de quartz lorsque le résonateur à quartz doit être utilisé comme élément d'un filtre, pour arriver à une spécification mutuellement satisfaisante.

It should be realized that certain crystal units exhibit unwanted responses which are predictable and well known to the crystal manufacturer. The most obvious cases that must not be neglected are extension modes of flexure and face shear mode crystal units, the fundamental of overtone units, and inharmonics of contoured AT cut crystal units.

The h.f. response of modern semiconductor oscillators can cause problems due to unwanted responses in the crystal units usually above the desired frequency. To prevent this the amplifier should have a low pass cut-off characteristic between the desired frequency and the next highest unwanted frequency.

The reduction of the crystal unit unwanted responses usually results in an increase of the impedance of the main response. These aspects should be referred to the manufacturer when necessary.

Testing for unwanted responses in oscillator crystals is very expensive and it is usually adequate to test for these as part of the initial design assessment only.

#### 3.3.4 *Drive level*

It is recommended that oscillator circuits have a high initial loop gain which thereafter remains low. This is particularly important where the drive level is very low to ensure that crystal units start up quickly. The actual drive level of the equipment should always be specified.

#### 3.4 *Frequency stability*

The frequency stability of a quartz crystal oscillator depends principally upon the correction of oscillator phase error by the crystal resonator.

For a given oscillator, short term stability is primarily a function of the loaded  $Q$  and  $C_0/C_1$  ratio of the crystal unit as well as environmental factors such as temperature and shock.

Long term stability is principally a function of ageing of the crystal unit.

#### 3.5 *Use in filter applications*

For oscillator crystals, the frequency tolerance under stated conditions is usually an important requirement at the reference temperature, over the operating temperature range and as a function of time.

With crystals for use in filter applications these requirements are also important, but perhaps more important are the values and tolerances of the crystal equivalent circuit elements and the position and magnitude of unwanted responses.

Quartz crystal units used as filter elements are basically the same as crystal units for oscillator applications and are subject to similar design and manufacturing techniques. However, because of different requirements of the application, the relative importance of certain aspects of the crystal unit specification differ. There are specially designed monolithic units and multi-resonator units but these may be considered as filters. Information on these will be found elsewhere.

The clauses of this standard dealing with these subjects give some information about these factors but, in general, all applications of crystal units for use as filter elements require close consultation with the crystal manufacturer to arrive at a mutually satisfactory specification.

#### 4. Facteurs affectant le coût et la disponibilité commerciale des résonateurs à quartz

##### 4.1 Introduction

Presque tous les facteurs qui concernent la spécification des résonateurs à quartz affectent leur coût et leur disponibilité commerciale. Il est donc nécessaire de prendre en considération tous les facteurs dont il a été question dans la présente norme pour parvenir à rédiger la spécification d'un résonateur à quartz qui remplira sa fonction de façon satisfaisante et que l'on pourra se procurer au plus faible coût avec une disponibilité commerciale maximale. Par disponibilité commerciale, il faut entendre la possibilité de se procurer un résonateur à quartz défini à plus d'une source, dans une période de temps raisonnable.

Les renseignements donnés dans cet article sont donc limités aux principaux facteurs affectant le coût et la disponibilité, mais on doit fortement souligner que tous les aspects concernant la spécification du quartz peuvent avoir une action sur ces facteurs. Comme beaucoup de résonateurs à quartz sont fabriqués sur mesure, le fabricant ne peut se permettre de conserver en stock un assortiment de résonateurs terminés. Chaque commande de tels résonateurs fabriqués sur mesure est, en conséquence, traitée individuellement par le fabricant, qui doit réserver une marge en prévision des pertes qui pourraient se produire pendant le processus de fabrication. Si les évaluations du fabricant sont correctes, le résonateur commandé devrait être livré à la date promise; si ce n'est pas le cas, une nouvelle commande doit être passée, ce qui retarde invariablement la livraison.

Les paragraphes 4.2 à 4.8 indiquent les principaux facteurs qui influencent le coût et la disponibilité commerciale des résonateurs à quartz.

##### 4.2 Fréquence du résonateur à quartz

Le choix de la fréquence du résonateur pour une fonction déterminée peut souvent être discuté au stade de la conception. Il est souhaitable que le concepteur se rende compte de ce que son choix, portant sur des fréquences situées à la limite ou près de la limite (supérieure ou inférieure) pour une coupe ou un type de boîtier, entraînera probablement des pénalités en termes de coût ou de disponibilité commerciale. Il convient de consulter le fabricant de quartz avant que la décision finale soit prise, si le choix de la fréquence peut faire l'objet d'une discussion.

##### 4.3 Boîtiers de résonateurs à quartz

Par ses dimensions, le boîtier détermine le format maximal du vibreur qu'il peut contenir. Cela définit la limite inférieure de la gamme de fréquences pour chaque type de boîtier et détermine aussi la limite de la robustesse, de la reproductibilité et du choix des paramètres du circuit équivalent.

Des précautions doivent être prises en conséquence lorsqu'on approche de la limite inférieure de fréquence pour un boîtier donné et il convient de consulter le fabricant pendant qu'il est encore temps d'examiner d'autres propositions.

##### 4.4 Tolérances de fréquence

D'une façon générale, les tolérances de fréquence et la gamme de températures de fonctionnement dans laquelle elles s'appliquent sont déterminées en fonction des éléments qui caractérisent le système de prescriptions.

Si le même équipement est destiné à fonctionner dans des territoires différents avec des conditions climatiques et des spécifications différentes, il est préférable d'envisager la possibilité de disposer d'un certain nombre de spécifications différentes correspondant aux différentes prescriptions, plutôt que d'établir une normalisation sur la spécification la plus difficile.

#### 4. Factors affecting cost and availability of quartz crystal units

##### 4.1 Introduction

Almost all factors concerning the specification for quartz crystal units affect their cost and availability. Consideration of all the factors dealt with in this standard is necessary therefore, to arrive at a specification for a crystal unit which will perform its function satisfactorily and be obtainable at the lowest cost with maximum availability. By availability is meant the ability to obtain crystal units from more than one source within a reasonable period of time.

The information in this clause is, therefore, limited to the main factors affecting cost and availability, but it is re-emphasized that all aspects of the crystal specification can have an effect on these factors. Because many quartz crystal units are custom-made devices, it is impossible for the crystal manufacturer to carry a stock of finished crystal units. Each order for such crystal units therefore is individually treated by the manufacturer and he shall make an allowance for the anticipated losses during the production cycle. If the manufacturer's assessment is correct, the ordered crystal units should be delivered on the promised date. If not, a re-order has to be placed and this invariably gives rise to late delivery.

Sub-clauses 4.2 to 4.8 indicate the main factors in the quartz crystal specification which affect cost and availability.

##### 4.2 Crystal unit frequency

Often the choice of the frequency of the crystal unit to be used in any application is negotiable at the design stage. The designer should realise that specifying crystal frequencies at or near the upper or lower limit for any cut or enclosure type will probably lead to penalties in terms of cost and availability. If the frequency is negotiable, crystal unit manufacturers should be consulted before a final decision is made.

##### 4.3 Crystal unit enclosures

The size of the crystal unit enclosure determines the maximum size of the resonator that it can accommodate. This limits the lower end of the frequency range for each enclosure type. It may also limit the ruggedness, reproducibility and choice of equivalent circuit parameters.

Caution shall be used therefore, when approaching the lower frequency limit for a given enclosure and the crystal unit manufacturer should be consulted while alternatives can still be considered.

##### 4.4 Frequency tolerances

In general, frequency tolerances and the operating temperature range over which they apply should be determined from a knowledge of the system requirements.

Where the same equipment is intended for different territories with different climatic conditions and specifications, consideration shall be given to having several crystal specifications to cover these different requirements rather than standardizing on the most difficult specification.