

# COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

RECOMMANDATION DE LA C.E.I.

# INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

I.E.C. RECOMMENDATION

## Publication 122-2

Première édition — First edition

1962

---

### Quartz pour oscillateurs

Section trois: Guide d'emploi des quartz pour oscillateurs

---

### Quartz crystal units for oscillators

Section three: Guide to the use of quartz oscillator crystals

---



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembé

Genève, Suisse

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60122-2:1962

Withdr2wn

**COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE**

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

**RECOMMANDATION DE LA C.E.I.**

**INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION**

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

**I.E.C. RECOMMENDATION**

**Publication 122-2**

Première édition — First edition

1962

---

**Quartz pour oscillateurs**

**Section trois: Guide d'emploi des quartz pour oscillateurs**

---

**Quartz crystal units for oscillators**

**Section three: Guide to the use of quartz oscillator crystals**

---



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe

Genève, Suisse

## SOMMAIRE

|                                                                                                       | Pages |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| PRÉAMBULE . . . . .                                                                                   | 4     |
| PRÉFACE . . . . .                                                                                     | 4     |
| <br>SECTION TROIS — GUIDE D'EMPLOI DES QUARTZ POUR OSCILLATEURS                                       |       |
| 3.1 Introduction . . . . .                                                                            | 6     |
| 3.1.1 Domaine d'application du document . . . . .                                                     | 8     |
| 3.1.2 Préambule technique . . . . .                                                                   | 8     |
| 3.2 Classification des boîtiers de quartz . . . . .                                                   | 10    |
| 3.2.1 Boîtiers . . . . .                                                                              | 12    |
| 3.2.2 Connexions aux quartz . . . . .                                                                 | 12    |
| 3.2.3 Montage . . . . .                                                                               | 12    |
| 3.2.4 Interchangeabilité des quartz . . . . .                                                         | 14    |
| 3.3 Fréquence . . . . .                                                                               | 14    |
| 3.3.1 Modes de vibration et gammes de fréquence . . . . .                                             | 14    |
| 3.3.2 Quartz fonctionnant sur partiel . . . . .                                                       | 16    |
| 3.4 Variation de la fréquence en fonction de la température . . . . .                                 | 18    |
| 3.4.1 Courbes paraboliques . . . . .                                                                  | 18    |
| 3.4.2 Courbes relatives à la coupe AT . . . . .                                                       | 20    |
| 3.4.3 Spécification de la tolérance de fréquence et plages de température de fonctionnement . . . . . | 20    |
| 3.5 Relations entre la stabilité en fréquence et les conditions d'emploi du cristal . . . . .         | 22    |
| 3.5.1 Facteurs affectant la stabilité en fréquence . . . . .                                          | 22    |
| 3.5.2 Types d'oscillateurs . . . . .                                                                  | 22    |
| 3.5.3 Capacité de charge . . . . .                                                                    | 28    |
| 3.5.4 Activité du cristal . . . . .                                                                   | 30    |
| 3.5.5 Niveau d'excitation . . . . .                                                                   | 32    |
| 3.6 Conditions spéciales . . . . .                                                                    | 34    |
| 3.6.1 Variation totale de fréquence dans la plage de température de fonctionnement . . . . .          | 34    |
| 3.6.2 Variation de fréquence en dehors de la plage de température de fonctionnement . . . . .         | 34    |
| 3.6.3 Glissement de fréquence . . . . .                                                               | 34    |
| 3.6.4 Niveau élevé d'excitation . . . . .                                                             | 36    |
| 3.6.5 Commutation et manipulation . . . . .                                                           | 36    |
| 3.6.6 Cristaux fonctionnant en résonance série sur le mode fondamental . . . . .                      | 38    |
| 3.6.7 Conditions climatiques et mécaniques extrêmes . . . . .                                         | 38    |
| 3.6.8 Marquage . . . . .                                                                              | 38    |
| 3.7 Méthodes de mesure et conditions d'essai . . . . .                                                | 38    |
| 3.8 Données techniques destinées à accompagner la feuille de commande . . . . .                       | 38    |
| 3.9 Bibliographie . . . . .                                                                           | 40    |
| 3.10 Définitions . . . . .                                                                            | 42    |

*Les publications connexes sont:*

La Publication 122-1 de la C.E.I.

Section un: Valeurs et conditions normalisées

Section deux: Conditions de mesure et d'essais

La Publication 122-3 de la C.E.I.

Section quatre: Encombrements normaux

Section cinq: Connexions des broches

Section six: Feuilles particulières

## CONTENTS

|                                                                                       | Page |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------|
| FOREWORD . . . . .                                                                    | 5    |
| PREFACE . . . . .                                                                     | 5    |
| SECTION THREE—GUIDE TO THE USE OF QUARTZ OSCILLATOR CRYSTALS                          |      |
| 3.1 Introduction . . . . .                                                            | 7    |
| 3.1.1 Scope of document . . . . .                                                     | 9    |
| 3.1.2 Technical preamble . . . . .                                                    | 9    |
| 3.2 Crystal holder classification . . . . .                                           | 11   |
| 3.2.1 Holders . . . . .                                                               | 13   |
| 3.2.2 Crystal connections . . . . .                                                   | 13   |
| 3.2.3 Mounting . . . . .                                                              | 13   |
| 3.2.4 Replacement of crystal units . . . . .                                          | 15   |
| 3.3 Frequency . . . . .                                                               | 15   |
| 3.3.1 Modes of vibration and frequency ranges . . . . .                               | 15   |
| 3.3.2 Overtone crystal units . . . . .                                                | 17   |
| 3.4 Frequency/temperature dependence . . . . .                                        | 19   |
| 3.4.1 Parabolic curves . . . . .                                                      | 19   |
| 3.4.2 The AT-cut curve . . . . .                                                      | 21   |
| 3.4.3 Specifying frequency tolerance and operating temperature range . . . . .        | 21   |
| 3.5 Frequency stability related to the conditions of using the crystal unit . . . . . | 23   |
| 3.5.1 Factors affecting the frequency stability . . . . .                             | 23   |
| 3.5.2 Types of oscillators . . . . .                                                  | 23   |
| 3.5.3 Load capacitance . . . . .                                                      | 29   |
| 3.5.4 Crystal unit activity . . . . .                                                 | 31   |
| 3.5.5 Level of drive . . . . .                                                        | 33   |
| 3.6 Special requirements . . . . .                                                    | 35   |
| 3.6.1 Total frequency variation over the operating temperature range . . . . .        | 35   |
| 3.6.2 Frequency variation outside the operating temperature range . . . . .           | 35   |
| 3.6.3 Frequency pulling . . . . .                                                     | 35   |
| 3.6.4 High level of drive . . . . .                                                   | 37   |
| 3.6.5 Switching and keying . . . . .                                                  | 37   |
| 3.6.6 Series resonance operation of fundamental crystals . . . . .                    | 39   |
| 3.6.7 Climatic and mechanical extremes . . . . .                                      | 39   |
| 3.6.8 Marking . . . . .                                                               | 39   |
| 3.7 Measuring methods and test conditions . . . . .                                   | 39   |
| 3.8 Technical data to accompany order form . . . . .                                  | 39   |
| 3.9 Bibliography . . . . .                                                            | 41   |
| 3.10 Glossary of terms . . . . .                                                      | 43   |

### *Related publications are:*

#### I.E.C. Publication 122-1

Section one: Standard values and conditions

Section two: Test conditions

#### I.E.C. Publication 122-3

Section four: Standard outlines

Section five: Pin connections

Section six: Article sheets.

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### QUARTZ POUR OSCILLATEURS

#### Section trois: Guide d'emploi des quartz pour oscillateurs

##### PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la C.E.I. 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 cette unification internationale, la C.E.I. exprime le vœu que tous les Comités nationaux ne possédant pas encore de règles nationales, lorsqu'ils préparent ces règles, prennent comme base fondamentale de ces règles les recommandations de la C.E.I. dans la mesure où les conditions nationales le permettent.
- 4) On reconnaît qu'il est désirable que l'accord international sur ces questions soit suivi d'un effort pour harmoniser les règles nationales de normalisation avec ces recommandations dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Les Comités nationaux s'engagent à user de leur influence dans ce but.
- 5) La C.E.I. n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand il est déclaré qu'un matériel est conforme à l'une de ses recommandations.

##### PRÉFACE

La présente publication a été établie par le Sous-Comité 40-3: Cristaux piézoélectriques (remplacé maintenant par le Comité d'Etudes N° 49: Cristaux piézoélectriques et dispositifs associés).

Elle constitue la deuxième partie des recommandations de la C.E.I. pour les quartz pour oscillateurs.

La première partie, contenant la Section un: «Valeurs et conditions normalisées» et la Section deux: «Conditions de mesure et d'essais» fait l'objet de la Publication 122-1 de la C.E.I.

La troisième partie, contenant la section quatre: «Encombrements normaux», la section cinq: «Connexions des broches» et la section six: «Feuilles particulières» fait l'objet de la Publication 122-3 de la C.E.I.

Lors de sa réunion tenue à Zurich en 1957, le Sous-Comité 40-3 décida que les travaux avaient atteint un stade suffisamment avancé pour permettre la diffusion d'un projet aux Comités nationaux pour approbation suivant la Règle des Six Mois. Ce projet fut diffusé en avril 1960.

Les pays suivants se sont prononcés explicitement en faveur de la publication:

|                       |                                               |
|-----------------------|-----------------------------------------------|
| Allemagne             | Pays-Bas                                      |
| Belgique              | Roumanie                                      |
| Danemark              | Royaume-Uni                                   |
| Etats-Unis d'Amérique | Suède                                         |
| France                | Suisse                                        |
| Italie                | Tchécoslovaquie                               |
| Japon                 | Union des Républiques Socialistes Soviétiques |
| Norvège               | Yougoslavie                                   |

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**QUARTZ CRYSTAL UNITS FOR OSCILLATORS**

**Section Three: Guide to the use of quartz oscillator crystals**

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the I.E.C. 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 this international unification, the I.E.C. expresses the wish that all National Committees having as yet no national rules, when preparing such rules, should use the I.E.C. recommendations as the fundamental basis for these rules in so far as national conditions will permit.
- 4) The desirability is recognized of extending international agreement on these matters through an endeavour to harmonize national standardization rules with these recommendations in so far as national conditions will permit. The National Committees pledge their influence towards that end.
- 5) The I.E.C. has not laid down any procedure concerning marking as an indication of approval and has no responsibility when an item of equipment is declared to comply with one of its recommendations.

PREFACE

This publication has been prepared by Sub-Committee 40-3: Piezo-electric crystals (now superseded by Technical Committee No. 49: Piezo-electric crystals and associated devices).

It forms Part 2 of the I.E.C. recommendations for quartz crystals for oscillators.

The first part, consisting of Section one: "Standard values and conditions", and Section two: "Test conditions" is issued as I.E.C. Publication 122-1.

Part 3, consisting of Section four: "Standard outlines", Section five: "Pin connections" and Section six: "Article sheets" is issued as I.E.C. Publication 122-3.

At the Zurich meeting of Sub-Committee 40-3 in 1957 it was decided that the work was sufficiently advanced for a draft to be submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule. A draft was accordingly circulated in April 1960.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

|                |                                     |
|----------------|-------------------------------------|
| Belgium        | Norway                              |
| Czechoslovakia | Romania                             |
| Denmark        | Sweden                              |
| France         | Switzerland                         |
| Germany        | Union of Soviet Socialist Republics |
| Italy          | United Kingdom                      |
| Japan          | United States of America            |
| Netherlands    | Yugoslavia                          |

## QUARTZ POUR OSCILLATEURS

### SECTION TROIS — GUIDE D'EMPLOI DES QUARTZ POUR OSCILLATEURS

#### 3.1 INTRODUCTION

Ce document a été établi pour répondre à un désir généralement exprimé, tant par les usagers que par les constructeurs, d'un guide d'emploi des quartz pour oscillateurs, afin qu'ils puissent être utilisés au mieux. L'erreur la plus commune a été celle faite par quelques usagers qui pensaient que le cristal est un dispositif qui détermine, de façon absolue, la fréquence. Cette idée s'est maintenue, probablement du fait que les tolérances de fréquence des anciens équipements étaient suffisamment larges pour masquer les variations de fréquence entraînées par les caractéristiques du circuit associé.

Les résultats obtenus avec un quartz dépendent en grande partie de la fabrication du quartz lui-même. Les résultats qu'il donne peuvent, en pratique, être sérieusement modifiés ou amoindris lorsqu'il est associé à un matériel sans que l'on tienne préalablement compte de l'effet de leur association. Il se peut que, dans bien des cas, on ne se rende pas compte que de petites variations de l'impédance d'entrée d'un oscillateur peuvent se traduire par une modification de la fréquence d'oscillation qui va au-delà des limites admissibles. Ceci peut être dû, par exemple, à l'«effet Miller».

On admet généralement qu'un cristal se brisera sous l'effet d'un niveau d'excitation trop élevé. On se rend moins compte que le fonctionnement à des niveaux qui ne sont pas suffisants pour le briser peut, cependant, provoquer une élévation de température excessive dans le cristal lui-même. L'excitation à un niveau supérieur à celui qui est spécifié pour le cristal peut provoquer une élévation de température telle, que la fréquence de fonctionnement se trouvera être en dehors des limites spécifiées. De plus, des gradients de température peuvent se produire à l'intérieur de la lame provoquant des dérives de fréquences qui peuvent souvent être supérieures à celles qui sont provoquées par l'élévation de température de la totalité de la lame. Des niveaux élevés d'excitation ont également tendance à créer ou à renforcer les effets des fréquences parasites.

Dans les conditions normales, la fréquence d'oscillation du cristal ne change pas sensiblement avant et après une courte période d'utilisation. Lorsque le niveau d'excitation dépasse le niveau admissible relatif au type de cristal considéré, on trouve fréquemment qu'un changement de fréquence permanent et fini peut se produire en quelques minutes de fonctionnement. Des effets de ce genre peuvent avoir diverses causes: par exemple, un déplacement permanent de la structure cristalline du quartz due à une contrainte mécanique excessive, le manque d'élasticité du système de montage ou un endommagement de la surface ayant pour cause les accélérations énormes auxquelles sont soumises les particules du quartz ou des électrodes. (Ces accélérations peuvent atteindre  $10^6$  g). Pour quelques types de quartz, on peut trouver que l'activité dépend également du niveau d'excitation. Etant donné que le constructeur a essayé le cristal au niveau d'excitation spécifié on aura pour ce niveau une activité minimum déterminée.

De ce qui précède, il ressort clairement qu'il faut apporter un grand soin à la réalisation de l'oscillateur pour assurer au cristal un fonctionnement où le niveau d'excitation est aussi voisin que possible de la valeur spécifiée. Dans les cas où une très haute stabilité en fréquence est demandée, on devra choisir des cristaux conçus pour fonctionner avec de faibles niveaux d'excitation.

## QUARTZ CRYSTAL UNITS FOR OSCILLATORS

### SECTION THREE — GUIDE TO THE USE OF QUARTZ OSCILLATOR CRYSTALS

#### 3.1 INTRODUCTION

This document has been compiled in response to a generally expressed desire on the part of both user and manufacturer for a guide to the use of quartz oscillator crystals, so that the crystal units may be used to their best advantage. The most common error has been the assumption on the part of some users that the crystal unit is an absolute frequency-determining device. This idea has persisted, probably due to the fact that the frequency tolerances in earlier equipment were sufficiently wide to swamp any frequency variations imposed by the associated circuit conditions.

The performance of a quartz crystal unit is governed largely by the design of the crystal element. Its behaviour may, in practice, be seriously modified or impaired when the unit is associated with equipment without prior consideration of the effects of the combination. It may not be generally realized that small variations of the input impedance of an oscillator can result in modification of the frequency of oscillation beyond the permissible limits. This may be due, for example, to "Miller effect".

It is usually accepted that a crystal element will fracture as a result of serious electrical overdrive. It is much less appreciated that operation at levels insufficient to cause fracturing may yet cause excessive temperature rise in the crystal element. Driving at a higher level than that specified for the crystal unit may cause a temperature rise such that the working frequency will be taken outside the specified limits. In addition temperature gradients within the plate may be created, leading to frequency shifts which can often be larger than those caused by the temperature rise of the plate as a whole. High drive levels also tend to create or enhance the effects of unwanted responses.

In normal circumstances the oscillation frequency of the unit before and after a short period of use is substantially unchanged. With a level of drive in excess of the rated level for the type, it is frequently found that a permanent finite change in frequency has occurred, perhaps within a few minutes of operating time. Effects of this nature may be due to various causes, for example, permanent displacement of the lattice structure of the quartz as the result of excess mechanical strain, inelastic properties of the mounting system, or surface damage resulting from the enormous accelerations imparted to the quartz or electrode particles (these accelerations may reach  $10^6$  g). For some types of crystal units it may be found that the activity is also dependent on the level of drive. Since the manufacturer will have tested the crystal unit at the rated level of drive the specified minimum activity will apply at that level.

From the foregoing, it is clear that considerable care is required in the oscillator design to ensure that crystal units are operated as near as possible at their rated levels of drive. In cases where the highest frequency stability is required crystals should be selected which are designed to operate at low levels of drive.

### 3.1.1 Domaine d'application du document

Le but de ce court document n'est pas de développer des notions théoriques ou d'essayer de couvrir tous les cas qui peuvent se présenter en pratique. Son but est seulement d'attirer l'attention sur quelques-uns des problèmes les plus fondamentaux que l'utilisateur devrait prendre en considération avant de commander un cristal pour une nouvelle application. Une telle façon de procéder évitera à l'utilisateur un fonctionnement non satisfaisant.

Certaines combinaisons de caractéristiques qui sont discutées dans ce guide sont impossibles à atteindre; pour cette raison, on devrait utiliser au maximum les feuilles particulières.

Dans les cas spéciaux, la conception exacte du cristal devra être, en grande partie, laissée aux soins du constructeur, qui s'efforcera, dans les limites du possible, de satisfaire aux exigences de l'utilisateur.

Les feuilles particulières normalisées, telles que celles de la Recommandation de la C.E.I. dont ce guide fait partie, ainsi que les Spécifications Nationales ou les feuilles de caractéristiques publiées par un constructeur, détermineront les combinaisons possibles de tolérance de fréquence, de plage de température et de capacité de charge, l'ordre du partiel dans le cas de cristaux fonctionnant sur un mode partiel et la nature du fonctionnement (série ou parallèle). En outre, chaque feuille spécifiera le niveau maximal d'excitation et la résistance parallèle équivalente minimale ou la résistance série équivalente maximale en fonction de la fréquence du cristal. Ces feuilles ont été soigneusement groupées pour couvrir une vaste gamme de quartz possédant des caractéristiques et des dimensions normalisées, et l'on ne peut trop insister sur le fait que l'utilisateur devrait, partout où cela est possible, choisir ces cristaux à partir de ces feuilles, même si cela peut l'amener à faire de légères modifications à son circuit pour permettre l'emploi d'éléments normalisés.

Une multiplicité de types ne différant qu'à un faible degré n'est pas économique et restreint l'interchangeabilité.

La normalisation est en évolution continue et lorsque de nouveaux besoins se présentent, de nouvelles feuilles sont élaborées pour satisfaire à ces besoins, après examen minutieux par la Commission Electrotechnique Internationale.

### 3.1.2 Preamble technique

Tout système piézoélectrique faiblement amorti, vibrant mécaniquement et excité par des électrodes formant dipôle peut, au voisinage de la résonance, être représenté par un circuit électrique équivalent (figure 1). Ce circuit comprend une capacité  $C_1$ , une inductance  $L_1$  et une résistance  $R_1$  en série, shuntées par une seconde capacité  $C_0$ . Les trois premiers paramètres  $C_1$ ,  $L_1$  et  $R_1$  peuvent être appelés les «paramètres dynamiques du cristal».

Ce sont les paramètres fondamentaux du résonateur piézoélectrique.

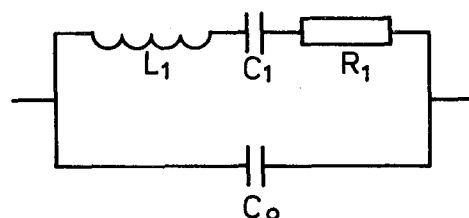


FIG. 1. — Circuit équivalent au cristal

### 3.1.1 Scope of document

It is not the function of this brief document to explain theory, nor to attempt to cover all the eventualities which may arise in practical circumstances. It does draw attention to some of the more fundamental questions which should be considered by the user before he places an order for a unit for a new application. Such a procedure will be the user's insurance against unsatisfactory performance.

Certain combinations of the characteristics discussed in this guide are impossible to achieve. For this reason, maximum use should be made of available article sheets.

In special cases, the exact design of a crystal unit must be left largely to the manufacturer, who will endeavour to meet the customer's requirements where practicable.

Standard article sheets, such as those of the I.E.C. Recommendation of which this guide forms a part and National Specifications or the data sheets issued by the manufacturer, will define the available combinations of frequency tolerance, temperature range and load capacitance, the overtone order in the case of overtone crystals, and whether for series or parallel operation. Each sheet will further specify the maximum level of drive and the minimum equivalent parallel resistance (EPR) or maximum equivalent series resistance (ESR) in relation to the frequency of the crystal. These article sheets have been carefully compiled to include a wide range of crystal units with standardized performances and dimensions and it cannot be stressed too greatly that the user should, wherever possible, select his crystal units from these article sheets, even if it may lead to making small modifications to his circuit to enable standard units to be used.

A multiplicity of types only varying in a small degree is uneconomical and restricts interchangeability.

Standardization is a continuing process and, as new requirements arise, new article sheets will be produced to meet these requirements, after careful consideration by the International Electrotechnical Commission.

### 3.1.2 Technical preamble

The properties of any mode of a lightly damped mechanical vibrator piezo-electrically excited through electrodes, can be represented near resonance by an equivalent electrical circuit (Figure 1) which consists of a capacitance  $C_1$ , inductance  $L_1$  and resistance  $R_1$  in series, shunted by a second capacitance, the parallel capacitance  $C_0$ . The first three parameters  $C_1$ ,  $L_1$  and  $R_1$  may be termed the "motional parameters" of the crystal unit.

These are the fundamental parameters of the piezo-electric vibrator.

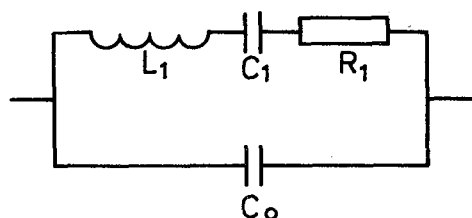


FIG. 1. — Crystal equivalent circuit

La représentation d'un résonateur piézoélectrique par le circuit de la figure 1 n'est utilisable que si les quatre 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'autres modes de vibration au voisinage de sa résonance. Généralement, le mode principal est suffisamment isolé des autres modes pour permettre cette hypothèse. *Si tel n'est pas le cas, les équations et méthodes de mesures que l'on utilise normalement ne s'appliquent pas.* On peut déterminer la validité de la représentation par un circuit en mesurant et représentant graphiquement l'impédance ou l'admittance du résonateur en fonction de la fréquence.

Pour une fréquence déterminée, les paramètres du circuit équivalent tendent généralement vers des valeurs constantes lorsque l'amplitude de la vibration tend vers 0. L'amplitude que l'on peut tolérer avant que les paramètres ne soient affectés d'une façon appréciable varie beaucoup suivant les types de résonateurs et on ne peut la déterminer que par l'expérience.

Les caractéristiques fréquence/température sont en première approximation déterminées par les coefficients de température de la densité, des dimensions et du module d'élasticité de la lame de quartz. Lorsque la résultante de ces trois phénomènes devient nulle, on obtient une stabilité optimale de la fréquence en fonction de la température. Une partie importante de la conception du cristal consiste dans l'obtention de cette condition optimale pour une gamme de température spécifiée.

La stabilité de la fréquence obtenue, en fonction de différentes caractéristiques du circuit d'entrée, est principalement déterminée par le rapport de capacité du cristal ( $C_0/C_1$ ). Un grand rapport de capacité permet une meilleure stabilité de la fréquence vis-à-vis des changements intervenant dans le circuit, mais on peut alors constater une diminution de l'activité du cristal.

Les paramètres précédents peuvent être affectés par la résultante de couplages piézoélectriques et/ou mécaniques qui se présentent au sein de la lame de quartz. Pour n'importe quel type donné de cristal, ces couplages ont, en général, un effet plus grand aux fréquences plus basses. Les rapports entre les dimensions du cristal ont une répercussion considérable sur l'ordre de grandeur de ce phénomène qui se manifeste d'ordinaire par une diminution de l'activité associée à un changement de fréquence sur une petite plage de température. Il se peut donc, pour certaines fréquences, lorsque le rapport entre les dimensions du cristal devient important, qu'il ne soit pas raisonnable de le loger dans un boîtier trop petit.

On comprendra facilement, étant donné les remarques faites jusqu'à présent, qu'il est de l'intérêt, tant du constructeur que de l'utilisateur, de prendre pour base du choix dans la construction d'un quartz adapté aux exigences de l'utilisateur, la Publication 122-1 de la C.E.I. (Quartz pour oscillateurs).

Le fait de pouvoir ou non disposer de cristaux conformes aux spécifications choisies peut modifier, à un certain point, les conditions demandées par l'utilisateur.

### 3.2 CLASSIFICATION DES BOITIERS DE QUARTZ

Les renseignements suivants seront portés sur le boîtier:

- Fréquence.
- Constructeur (nom sous forme codifiée ou non).
- Numéro de catalogue du constructeur ou numéro de code.
- Tous autres renseignements nécessaires pour obtenir une description complète du quartz, par exemple C.E.I. ou marque du code national.
- Au gré du constructeur ou sur demande de l'utilisateur, on pourra ajouter un numéro de série et la date de fabrication.

The representation of a piezo-electric vibrator by the circuit of Figure 1 is useful only if the four 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 its 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.

At a given frequency the parameters of the equivalent circuit generally approach constant values as the amplitude of vibration approaches zero. The amplitude which can be tolerated before the parameters are appreciably affected varies widely between vibrators of various types and can only be determined by experiment.

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

The dependence of the generated frequency with respect to differing input circuit conditions is determined largely by the capacitance ratio of the crystal unit ( $C_0/C_1$ ). A large capacitance ratio allows better frequency stability against circuit changes, but it may then be found that the activity deteriorates.

The foregoing parameters may be affected again as a result of piezoelectric and/or mechanical couplings occurring within the quartz plate. In general these couplings have greater effect at the lower frequencies of any given type of crystal element. Dimensional ratios of the crystal element have a considerable bearing on the magnitude of this problem, which usually manifests itself as a fall in activity combined with a change in frequency over a small range of temperature. Therefore, when the dimensional ratio becomes important, it may not always be reasonable to house crystal elements of certain frequencies in the smaller holders.

It will be readily understood, in view of the comments made so far, that it is in the interests of manufacturer and user, equally, to decide upon a suitable design of crystal unit in terms of the user's requirements, using I.E.C. Publication 122-1, Quartz Crystal Units for Oscillators, as a basis. Questions of availability of crystals to the chosen specification may modify, to some extent, the user's original requirements.

### 3.2 CRYSTAL HOLDER CLASSIFICATION

The following information will normally be given on the crystal unit:

- Frequency
- Manufacturer's name or code
- Manufacturer's catalogue or type number
- Any other information necessary to obtain a complete definition of the crystal unit (e. g. I.E.C. or national code marking).
- At the option of the manufacturer or by special request by the purchaser, a serial number and date of manufacture may be added

### 3.2.1 Boîtiers

#### 3.2.1.1 Catégorie de boîtier

Les boîtiers appartiennent généralement à l'un des trois types suivants:

- a) tout verre,
- b) boîtier métallique étanche avec scelllements verre-métal pour les connexions,
- c) boîtier en résines phénoliques.

Les enveloppes en verre sont généralement sous vide. Ceci procure une augmentation de l'activité, particulièrement aux fréquences basses et améliore également la stabilité à long terme.

Le type de boîtier le plus répandu est le boîtier métallique étanche. La tendance est à l'emploi de types plus petits de tels boîtiers, bien qu'il ne faille pas perdre de vue le fait que des boîtiers plus petits impliquent, en général, des niveaux d'excitation plus faibles.

Les boîtiers en résines phénoliques sont utilisables en atmosphère sèche et tempérée, mais ne sont pas adaptés à des conditions climatiques plus dures étant donné qu'ils ne sont pas insensibles à l'humidité et qu'on ne peut pas les rendre étanches. Ces boîtiers devraient être considérés comme périmés.

#### 3.2.1.2 Boîtiers non normalisés

Pour certaines applications importantes mais qui ne se présentent pas souvent, par exemple dans le cas de cristaux pour basse fréquence taillés suivant les coupes GT et NT, il y a lieu d'utiliser des boîtiers non normalisés. Dans ce cas, il faudra arriver à un accord particulier entre l'utilisateur et le constructeur.

### 3.2.2 Connexions aux quartz

Dans le cas des boîtiers métalliques, le cristal est connecté aux broches, mais le boîtier n'est pas, en général, réuni à l'une d'elles. Dans le cas d'enveloppes en verre ne contenant qu'un cristal, les connexions au cristal se font par les broches 1 et 5.

Pour plus de renseignements sur les connexions aux broches dans le cas de cristaux multiples, il y aurait lieu de se référer à la section quatre de la Publication 122-3 de la C.E.I. et aux feuilles particulières appropriées.

### 3.2.3 Montage

Les cristaux sont, en général, capables de résister à un certain niveau de choc et de vibration, mais on doit se rendre compte que les cristaux destinés aux fréquences basses seront plus fragiles que les cristaux de même coupe destinés à des fréquences plus élevées.

Pour les cristaux de fréquences basses, à montage nodal, il est courant de supporter les lames ou les barreaux par une ou plusieurs paires de fils soudés aux surfaces du cristal en des points nodaux ou sur des lignes nodales. Ces régions nodales sont de faible étendue et l'amortissement entraîné par le montage se fait particulièrement sentir sur les petites lames. A l'extrémité inférieure de la gamme de fréquence, la masse et l'inertie du quartz augmentent et il est difficile d'assurer le maintien de caractéristiques satisfaisantes dans le cas de secousses et de vibrations.

Les cristaux de fréquences basses peuvent, par conséquent, être souvent inutilisables pour le matériel mobile à moins que des précautions spéciales ne soient prises pour les protéger des chocs. Les caractéristiques des cristaux de fréquences basses sont influencées de façon appréciable par la qualité du montage et les effets de changements de température se traduisent de façon évidente, en particulier sur l'activité, pour une température élevée.

### 3.2.1 Holders

#### 3.2.1.1 Categories of holders

Holders generally fall into one of three classes:

- a) all glass units
- b) hermetically sealed metal cases using glass to metal seals for the terminations
- c) phenolic resin cases.

Glass envelopes are usually evacuated. This gives increased activity particularly at low frequencies, as well as improved long term stability.

The most popular type of holder is the hermetically sealed metal case. The trend is towards the use of the smaller types of these holders, although it should be borne in mind that crystals in the smaller holders usually demand lower drive levels than those in the larger ones.

Phenolic holders are adequate for use in dry temperate conditions, but are not suitable for more severe climatic conditions since they are not impervious to moisture, nor can they be effectively sealed. These holders should be regarded as obsolescent.

#### 3.2.1.2 Non-standard holders

For certain important, though not widespread, applications, e. g. low-frequency GT and NT crystals, non-standard holders have to be used. In these cases, individual agreement will have to be reached between customer and manufacturer.

### 3.2.2 Crystal connections

Metal cases have crystal connections to pins and the case is not in general connected to either of them. In the case of glass types containing only one crystal, the crystal leads are connected to pins 1 and 5.

For further information on multiple crystal pin connections, reference should be made to Section four of I.E.C. Publication 122-3 and to the appropriate article sheets.

### 3.2.3 Mounting

Crystal units in general are capable of withstanding a specified amount of shock and vibration, but it must be realized that low-frequency crystals of a particular cut will be more fragile than those of higher frequency of the same cut.

For nodally-mounted low-frequency crystals it is the practice to support plates or bars from one or more pairs of wires soldered to the crystal surfaces at nodes or on a nodal line. These nodal regions are small and damping due to the mounting results particularly on the smaller plates. At the lower end of the frequency range, the mass and inertia of the quartz increase and satisfactory performance under bumping and vibration is difficult to maintain.

Thus, low-frequency crystals may often be unusable in mobile applications unless special precautions are taken to protect the crystal unit from shock. The characteristics of low-frequency crystals are appreciably influenced by the mounting and the effects of changes of temperature are likely to be evident, particularly on the activity at an elevated temperature.

Les quartz pour fréquences élevées fonctionnant à des fréquences supérieures à 800 kHz et vibrant en cisaillement suivant l'épaisseur ont tendance à osciller de façon importante dans la partie centrale de la lame. Cette tendance est accentuée par le constructeur qui ne métallise que le centre du cristal. On utilise donc, pour la fixation et les connexions électriques, des suspensions par des fils fixés aux portions relativement inactives de la lame.

Des quartz présentant cette forme de montage ont été largement utilisés en donnant d'excellents résultats. La figure 2, page 50, représente des exemples simplifiés de ces montages.

### 3.2.4 Interchangeabilité des quartz

Des difficultés peuvent se présenter lorsqu'un quartz métallisé et monté sur fils est introduit dans un circuit primitivement conçu pour des types plus anciens de quartz à lame d'air; non seulement l'activité du cristal métallisé est en général plus élevée, mais la suppression de la lame d'air entraîne en général un couplage plus serré entre le cristal et le circuit.

## 3.3 FRÉQUENCE

### 3.3.1 Modes de vibration et gammes de fréquence

La gamme de fréquence couverte par les quartz du commerce peut être considérée comme allant de quelques centaines de Hz à 150 MHz. Pour couvrir cette gamme, on utilise différentes coupes et différents modes de vibrations (voir figure 3, page 51); un résumé des types les plus courants est donné ci-dessous:

TABEAU 1

| Description    | Mode de vibration                                                 | Gamme de fréquence usuelle | $C_0/C_1$                |
|----------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| X + 5° Duplex  | flexion                                                           | 0,2– 10 kHz                | 200                      |
| X + 5° Barreau | flexion                                                           | 2 – 16 kHz                 |                          |
| NT             | flexion                                                           | 3 – 100 kHz                | 900                      |
| X + 5° Barreau | élongation                                                        | 40 – 200 kHz               | 130                      |
| CT             | cisaillement plan                                                 | 150 – 500 kHz              | 350                      |
| DT             | cisaillement plan                                                 | 100 – 250 kHz              | 400                      |
| ET             | cisaillement plan (2 <sup>e</sup> partiel)                        | 400 – 800 kHz              |                          |
| GT             | élongation                                                        | 90 – 250 kHz               | 350                      |
| BT             | cisaillement d'épaisseur (fondamental)                            | 3 000 – 22 000 kHz         | 650                      |
| AT (voir note) | cisaillement d'épaisseur (fondamental)                            | 800 – 20 000 kHz           | 250                      |
| AT ou BT       | cisaillement d'épaisseur (n <sup>e</sup> partiel = 3, 5, 7, etc.) | 15 000 – 150 000 kHz       | $n^2 \times$ fondamental |

*Note:* Les quartz de coupe AT peuvent également être fabriqués pour la gamme 400–800 kHz. L'emploi de cristaux de coupe AT dans cette gamme de fréquence implique généralement l'utilisation de boîtiers plus grands.

Les rapports  $C_0/C_1$  donnés ci-dessus sont des valeurs moyennes. Cependant des techniques diverses adoptées par les différents constructeurs pour la fabrication des quartz peuvent conduire à des variations importantes des rapports de capacité.

L'importance de ces variations est d'autant plus grande que le rapport est plus élevé. Pour certaines applications, il peut y avoir lieu de considérer les effets de ces variations lorsque l'on utilise des quartz pour lesquels le rapport  $C_0/C_1$  n'est pas spécifié (voir paragraphe 3.5.3 et paragraphe 3.6.3).

Il doit être bien entendu que des quartz fabriqués par différents constructeurs pour une certaine fréquence de la gamme ci-dessus peuvent présenter des caractéristiques très différentes. Ils ne sont pas forcément de même coupe et même si la coupe est identique, le circuit équivalent différera certainement. Ceci peut

High-frequency crystals of frequencies above 800 kHz (kc/s) vibrating in thickness shear tend to oscillate largely on the centre portion of the plate. This tendency is encouraged by the designer who plates the centre of the crystal only. Wire suspensions to the relatively inactive part of the plate are therefore used for support and electrical connections.

Crystals with this form of mounting have been widely used with excellent results. Examples of methods of mounting in a simplified form are shown in Figure 2, page 50.

### 3.2.4 Replacement of the crystal units

Difficulties can arise when a plated and wired unit is substituted in a circuit design primarily intended for the older types of gapped crystal units; not only is the activity of the plated crystal usually much higher, but the elimination of the gap usually makes coupling between crystal and circuit closer than was formerly the case.

## 3.3 FREQUENCY

### 3.3.1 Modes of vibration and frequency ranges

The frequency range covered commercially by quartz crystals may be taken as a few hundred Hz (c/s) to 150 MHz (Mc/s). Use is made of several cuts and modes of vibration (see Figure 3, page 51) to cover this range and crystals of the common types are summarized below.

TABLE I

| Description   | Mode of vibration                                                 | Usual frequency range       | $C_0/C_1$                   |
|---------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| + 5° X Duplex | flexural                                                          | 0.2– 10 kHz (kc/s)          | 200                         |
| + 5° X Bar    | flexural                                                          | 2 – 16 kHz (kc/s)           |                             |
| NT            | flexural                                                          | 3 – 100 kHz (kc/s)          | 900                         |
| + 5° X Bar    | extensional                                                       | 40 – 200 kHz (kc/s)         | 130                         |
| CT            | face shear                                                        | 150 – 500 kHz (kc/s)        | 350                         |
| DT            | face shear                                                        | 100 – 250 kHz (kc/s)        | 400                         |
| ET            | face shear (2nd overtone)                                         | 400 – 800 kHz (kc/s)        |                             |
| GT            | extensional                                                       | 90 – 250 kHz (kc/s)         | 350                         |
| BT            | thickness shear (fundamental)                                     | 3 000 – 22 000 kHz (kc/s)   | 650                         |
| AT (see note) | thickness shear (fundamental)                                     | 800 – 20 000 kHz (kc/s)     | 250                         |
| AT or BT      | thickness shear<br>( $n^{\text{th}}$ overtone $n = 3, 5, 7$ etc.) | 15 000 – 150 000 kHz (kc/s) | $n^2 \times$<br>fundamental |

*Note:* AT-cut crystals units can also be produced in the range 400-800 kHz (kc/s). The use of AT-cut crystals in this frequency range usually implies using larger holders.

The  $C_0/C_1$  ratios quoted above are average values. However, various techniques adopted by individual manufacturers in the design of crystal units lead to quite wide variations in the capacitance ratios.

The extent of these variations is much greater towards the higher ratios than it is towards the lower. For some applications the effects of these variations may have to be considered when using crystal units for which the  $C_0/C_1$  ratio is not specified (see Sub-clauses 3.5.3 and 3.6.3).

It should be made clear that a crystal unit produced at any frequency in the above range by a number of manufacturers will differ in many respects. There may even be a difference in cut, but even where this is known to be the same, the equivalent network will almost certainly differ. This may be very important

être très important dans quelques applications, par exemple pour la manipulation, dans le cas d'excitation importante et dans les cas où l'on effectue un glissement de fréquence. C'est l'une des raisons pour lesquelles on demande à l'utilisateur qui fait les essais de fournir tous les détails sur ses desiderata (voir article 3.6). Lorsque l'on a besoin de quartz d'un type particulier, en dehors des gammes de fréquences énumérées ci-dessus, il y a lieu de prendre des arrangements particuliers avec le constructeur. Une situation similaire peut se produire pour de nouvelles coupes de quartz sur lesquelles nous n'avons pas suffisamment d'informations au moment de la publication de ce document.

### 3.3.2 Quartz fonctionnant sur partiel

#### 3.3.2.1 Généralités

Il est, en général, possible de provoquer dans une lame de quartz des vibrations qui sont des partiels mécaniques d'une certaine vibration fondamentale. Un exemple important de cette possibilité est l'excitation des 3<sup>e</sup>, 5<sup>e</sup>, 7<sup>e</sup> (ordre impair seulement) etc. partiels de la fréquence élevée du cisaillement d'épaisseur des lames AT ou BT. Ainsi, si un cristal a été conçu pour fonctionner à 60 MHz sur son 3<sup>e</sup> partiel, il sera également capable de vibrer à environ 20 MHz sur son fondamental et à 100 MHz, 140 MHz, etc. sur ses 5<sup>e</sup>, 7<sup>e</sup>, etc. partiels. (Le rapport entre les fréquences des modes partiels et fondamental n'est égal qu'approximativement au nombre entier qui exprime l'ordre du partiel.)

#### 3.3.2.2 Caractéristiques

Il y a lieu de garder présentes à l'esprit les caractéristiques de ces quartz pour fréquences élevées, fonctionnant sur partiel, lorsque l'on fait des projets d'appareils qui en comportent.

- a) Leur emploi implique généralement l'utilisation d'un oscillateur ayant une largeur de bande suffisamment étroite pour écarter aussi bien la fréquence fondamentale du quartz que les autres partiels.
- b) Etant donné que la plupart des constructeurs de quartz partiel sont équipés pour la mesure de fréquence de ces quartz à la résonance série, il y aura lieu de prendre toutes dispositions pour s'assurer que l'oscillateur utilisé fait réellement osciller le quartz à sa résonance série (voir paragraphe 3.5.2.2). Si cela n'est pas possible, des échanges de vues avec le constructeur se traduiront, en général, par une solution satisfaisante.
- c) Il est nécessaire de bien comprendre qu'il y a une différence fondamentale entre faire osciller un quartz sur son partiel 3 à 48 MHz et sélectionner l'harmonique 3 produit par un tube électronique à partir d'un quartz de 16 MHz.

Dans un oscillateur à quartz fonctionnant sur le 3<sup>e</sup> partiel et correctement réglé à 48 MHz, on ne trouve nulle part dans le circuit de signal à 16 MHz; on trouvera par contre, en général, la gamme normale des harmoniques: 96, 144 MHz, etc.

- d) Les propriétés des quartz fonctionnant sur partiel peuvent, par une construction correcte, satisfaire aux exigences concernant la relation fréquence/température et à la plupart des autres caractéristiques.

Cependant, ces propriétés, pour un quartz donné et un ordre donné du partiel, sont totalement différentes de celles relatives à la fréquence fondamentale ou aux autres partiels, de sorte que l'on ne peut avoir aucune certitude en ce qui concerne le comportement du quartz pour toute fréquence autre que celle pour laquelle il a été conçu.

in some applications, for example, keying, high drive conditions, and cases where frequency “pulling” is in use. This is one of the reasons why the prospective user is asked to give full details of his requirements (see Clause 3.6).

Where crystals are required of a particular type outside the frequency ranges listed above, special arrangements will have to be made with the manufacturer.

A similar situation may arise with respect to the newer cuts of crystals for which complete information is not available at the time of publication.

### 3.3.2 Overtone crystal units

#### 3.3.2.1 General

It is generally possible to excite vibrations in a quartz plate which are mechanical overtones of some fundamental vibration. An important example of this possibility is the excitation of the third, fifth, seventh (odd orders only) etc. overtones of the high-frequency thickness-shear AT or BT cut plates. Thus if a crystal unit were designed for operation at 60 MHz (Mc/s) on its third overtone it would also be capable of vibrating at about 20 MHz (Mc/s) on its fundamental, and at 100 MHz (Mc/s), 140 MHz (Mc/s) etc. on its fifth and seventh etc. overtone orders. (The relation between the overtone and fundamental frequencies is always approximately, though never quite, equal to the integer expressing the overtone order.)

#### 3.3.2.2 Characteristics

A few important characteristics of these high-frequency overtone crystals must be kept in mind when designing apparatus using them.

- a) Their application generally involves the use of an oscillator with a bandwidth sufficiently narrow to exclude both the fundamental frequency of the unit and also the other overtones.
- b) Since most manufacturers of overtone crystals are equipped to measure their frequencies at series resonance, every attempt should be made to ensure that the oscillator used will in fact oscillate the crystals at series resonance (see Sub-clause 3.5.2.2). If this is impossible, discussion with the manufacturer will usually result in a satisfactory solution.
- c) It is to be clearly understood that oscillating a crystal at say 48 MHz (Mc/s) on its third mechanical overtone is quite different from operating a fundamental crystal at 16 MHz (Mc/s) and selecting the third harmonic, electrically produced by the valve. In a correctly adjusted 48 MHz (Mc/s) third overtone crystal oscillator, there is no signal anywhere in the circuit at 16 MHz (Mc/s); there will generally, of course, be the normal range of harmonics at 96, 144 MHz (Mc/s) etc.
- d) The properties of overtone crystal units as regards frequency/temperature and other characteristics can be suited to most requirements by correct design.

However, these properties for a given crystal unit and given order of overtone are quite different from those for its fundamental frequency or other orders of overtones, so that no reliance can be put on the behaviour of a crystal unit at any frequency other than that for which it was designed.

e) Les quartz pour fréquences élevées fonctionnant sur partiel possèdent les mêmes propriétés de stabilité mécanique et climatique et le même vieillissement, etc. que les cristaux de construction similaire fonctionnant sur fondamental.

f) La meilleure façon d'obtenir un glissement de fréquence est de disposer une réactance variable en série avec le quartz (voir paragraphe 3.6.3).

### 3.4 VARIATION DE LA FRÉQUENCE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

Le choix du quartz pour les cristaux oscillateurs est basé sur l'effet piézoélectrique, sur sa longévité en tant que matériau brut et enfin sur la possibilité de production d'éléments dont la fréquence de résonance varie peu avec la température.

On peut obtenir des coefficients fréquence-température de faible valeur en choisissant correctement l'angle de coupe ainsi qu'éventuellement par un choix approprié des dimensions.

Lorsque l'on utilise des quartz à température contrôlée, l'étuve peut, par conception, introduire des gradients supplémentaires de température à l'intérieur du résonateur. Ces gradients de température peuvent provoquer des dérives de fréquence excessives qui font que la fréquence de fonctionnement n'est plus dans les tolérances, bien que la température de fonctionnement de l'étuve et les autres conditions de fonctionnement se trouvent être à l'intérieur des limites spécifiées.

Des considérations similaires peuvent s'appliquer si un quartz à température non contrôlée est placé au voisinage d'une source thermique. On peut étudier ce sujet plus en détail en se rapportant à la Bibliographie.

#### 3.4.1 Courbes paraboliques

Beaucoup de courbes fréquence-température suivent, avec une bonne approximation, la loi suivante:

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

$\frac{\Delta f}{f}$  étant la différence de fréquence relative exprimée en millionnièmes entre les températures  $T$  et  $T_0$ .

$T_0$  est la température pour laquelle la fréquence est maximale (température d'inversion).

$T$  est une température quelconque dans la gamme de fonctionnement.

$a_2$  est la constante de la parabole.

La figure 4, page 52 montre la forme de courbes types représentant des variations comparées fréquence-température pour les coupes suivantes: BT, CT, DT, ET.

Le constructeur peut accepter des spécifications où l'on demande un point d'inversion déterminé à l'intérieur d'une grande gamme de température. Des valeurs courantes sont 25°C et 75°C; le constructeur peut espérer placer le point d'inversion à  $\pm 10^\circ$  près, cette incertitude provenant des tolérances de fabrication.

Dans le cas des quartz de coupe NT et X+5°, le constructeur n'a pas une liberté complète dans la disposition de la parabole et les cristaux peuvent différer selon le choix particulier des dimensions par le constructeur.

- e) The high-frequency overtone units have the same order of mechanical and climatic stability, ageing etc., as the similarly made fundamental units.
- f) Frequency pulling can best be arranged by connecting a variable reactance in series with the crystal unit. (See Sub-clause 3.6.3.)

### 3.4 FREQUENCY/TEMPERATURE DEPENDENCE

The choice of quartz for oscillator crystals is based on the piezoelectric effect, its permanence as a raw material and finally on the possibility of producing units which vary very little in resonance frequency with temperature variation.

Low frequency/temperature coefficients can be produced by choice of correct cutting angle either alone or in conjunction with a suitable choice of dimensions.

In the use of temperature controlled crystals the design of the oven may introduce additional temperature gradients within the vibrator. These temperature gradients may cause excessive frequency shifts resulting in the working frequency going outside its tolerances, although the operating temperature of the oven and other operating conditions appear to be within their specified limits.

Similar considerations may apply if a non-temperature controlled crystal is placed adjacent to a heat source. The subject may be studied in more detail by reference to the bibliography.

#### 3.4.1 Parabolic curves

Many frequency/temperature curves conform fairly closely to the form:

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

where  $\frac{\Delta f}{f}$  is the fractional frequency difference, expressed in parts per million (p.p.m.) between temperatures  $T$  and  $T_0$ .

$T_0$  is the temperature at which maximum frequency occurs (turnover temperature).

$T$  is any temperature in the operating range.

$a_2$  is the constant of the parabola.

Figure 4, page 52 shows the form of representative frequency/temperature curves of the following cuts on a comparison basis: BT, CT, DT, ET.

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

In the case of NT-cut and  $+5^\circ\text{X}$ -cut units, the manufacturer does not have complete freedom in positioning the parabola and units may differ according to the individual manufacturer's choice of dimensions.

### 3.4.2 Courbes relatives à la coupe AT

Ce type de lame possède une courbe fréquence-température complexe qui se compose de termes linéaires et cubiques.

La figure 5, page 52, montre un réseau typique de courbes obtenues à partir d'une lame de coupe AT dont on fait varier uniquement l'angle de coupe.

Il est clair que cette coupe a beaucoup d'avantages lorsque l'on doit considérer une gamme étendue de température, mais il y a lieu de se souvenir qu'il faut soigneusement choisir le niveau d'excitation sous peine de voir les effets d'échauffement interne du cristal rendre impossible l'obtention des courbes optimales. La famille de courbes relatives à la coupe AT est pratiquement symétrique autour d'environ 27°C et le constructeur ne peut rien faire pour modifier ce chiffre.

Si, par exemple, un constructeur fabrique un quartz de coupe AT pour satisfaire à une tolérance de  $\pm 50 \cdot 10^{-6}$  dans la gamme de température qui va de  $-55$  à  $+90^\circ\text{C}$ , il peut produire des quartz dont les caractéristiques fréquence-température varient considérablement ainsi que le montre la figure 6, page 53.

Les courbes A et B sont les courbes limites pour les écarts minimaux de fréquence dans la plage de température. Par recalage de la fréquence à la température de 27°C il est possible d'obtenir dans la gamme de température de fonctionnement, une fréquence ne différant jamais de  $\pm 20 \cdot 10^{-6}$  de la fréquence nominale. En pratique, cependant, ces courbes limites ne seront pas satisfaites par tous les quartz fabriqués conformément à ces spécifications et le constructeur peut fournir des quartz ayant des dérives fréquence-température aussi variées que celles montrées par les courbes C et D. Aussi l'acheteur ne devrait pas compter sur le recalage de la fréquence des quartz, sauf après consultation avec le constructeur.

### 3.4.3 Spécification de la tolérance de fréquence et de la plage de température de fonctionnement

Fréquemment l'ingénieur a tendance à spécifier ses exigences relatives à la fréquence à la température ambiante, et à négliger ou à ajouter après coup les dérives de fréquence admissibles dans une plage de température de fonctionnement. Etant donné que tout matériel doit garder une certaine précision dans la plage de température, il est d'abord logique de fixer ces chiffres. En le faisant, il y a lieu de tenir compte de l'échauffement du matériel, échauffement qui peut être considérable.

Le constructeur préfère une spécification en fréquence de la forme « $\pm 100 \cdot 10^{-6}$  dans la gamme de température  $-40^\circ\text{C} + 70^\circ\text{C}$ », pour des conditions définies de capacité de charge et de niveau d'excitation. Dans l'intérêt, tant de l'acheteur que du fabricant, on devra, dans tous les cas, utiliser des valeurs normalisées pour les plages de température, les tolérances de fréquence et les capacités de charge. On peut trouver dans la section un de la Publication 122-1 de la C.E.I. des valeurs normalisées de plages de température, des tolérances de fréquence, etc.

Pour un certain nombre de raisons, on ne devrait jamais spécifier une tolérance à la température ambiante à moins que cela ne soit essentiel pour l'application particulière envisagée.

Il devrait être bien entendu qu'il est difficile, en pratique, de combiner de grandes plages de température et de très petites tolérances de fréquence.

On devrait se référer aux spécifications internationales ou nationales pour les combinaisons «recommandées» de plages de température et de tolérance de fréquence, ou consulter le constructeur.

### 3.4.2 AT-cut curve

This type of plate has a complex frequency/temperature curve which consists of a combination of linear and cubic terms.

Figure 5, page 52, shows a representative family of curves obtained from an AT-cut plate by varying the angle of cut only.

Clearly this cut has many advantages where a wide temperature range must be considered, but it must be remembered that drive levels must be carefully adhered to or crystal internal heating effects may make the realization of the best curves impossible. The family of AT-cut curves is substantially symmetrical about 27°C and the manufacturer can do nothing to vary this figure.

For example, if a manufacturer produces an AT-cut crystal unit to meet the specification  $\pm 50$  parts per million over the temperature range  $-55^{\circ}$  to  $+90^{\circ}\text{C}$ , he can provide units whose frequency/temperature performance vary considerably as shown in Figure 6, page 53.

Curves A and B are the limiting curves with the minimum frequency deviation over the temperature range. By frequency pulling, crystals with this performance can be adjusted so that the working frequency is never more than about  $\pm 20$  parts per million from the nominal frequency over the working temperature range. In practice, however, these limiting curves will not be followed by all units produced to this specification and the manufacturer can provide crystal units having a frequency/temperature behaviour as varied as those shown in curves C and D. Thus the purchaser should not rely on pulling crystals to frequency unless the manufacturer has been consulted.

### 3.4.3 Specifying frequency tolerance and operating temperature range

Frequently the engineer has tended to specify his frequency requirement at room temperature and to neglect or add as an afterthought the frequency change permissible over the operating temperature range. Since all equipment has to maintain an accuracy over a temperature range, it is logical first of all to fix these figures. In so doing allowance should be made for equipment heating which may be considerable.

The manufacturer prefers a frequency specification of the form " $\pm 100$  p.p.m. over the temperature range  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+70^{\circ}\text{C}$ " under stated load capacitance and drive level conditions. In the interests of customer and manufacturer alike, standard temperature ranges, frequency tolerance and input conditions should be used in all cases. Standard temperature ranges, frequency tolerances etc. may be found in Section one of I.E.C. Publication 122-1.

For a number of reasons, a tolerance at room temperature should not be specified unless the particular application makes it essential.

It should be clearly understood that it is not practicable to combine wide temperature ranges with very small frequency tolerances.

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.

### 3.5 RELATIONS ENTRE LA STABILITÉ EN FRÉQUENCE ET LES CONDITIONS D'EMPLOI DU CRISTAL

#### 3.5.1 Facteurs affectant la stabilité en fréquence

Dans un oscillateur dont la fréquence est principalement déterminée par un cristal de quartz, il doit être entendu que le circuit et les conditions de fonctionnement affectent la fréquence d'oscillation.

Bien qu'un quartz soit réglé lors de sa fabrication sur une fréquence nominale, il faut définir soigneusement les conditions dans lesquelles la fréquence est réellement obtenue dans un oscillateur à quartz. C'est l'objet de ce qui suit que d'exposer les considérations de ce genre les plus importantes. Pour des raisons de commodité, on a énuméré ci-après quelques points importants qui se rapportent tant au circuit de l'oscillateur qu'au cristal lui-même.

##### 3.5.1.1 Circuit de l'oscillateur

- a) Capacité de charge (paragraphe 3.5.3).
- b) Alimentation haute tension et filament ou chauffage. Des variations de ces quantités affecteront, en général, les composantes dynamiques de la capacité de charge et l'amplitude de de l'oscillation et, par conséquent, la fréquence (paragraphe 3.5.3 et 3.5.5).
- c) Conditions climatiques et mécaniques. Une évaluation réelle des effets dus à ces facteurs présente une grande importance.
- d) Vieillessement des tubes et des pièces détachées du circuit.

##### 3.5.1.2 Quartz

- a) Niveau d'excitation (paragraphe 3.5.5).
- b) Plage de température de fonctionnement (article 3.4).
- c) Conditions climatiques et mécaniques. Si ces conditions sont plus dures que celles indiquées dans les feuilles particulières, on devra consulter le constructeur du quartz.
- d) Vieillessement. Ce n'est, en général, que lorsque l'on a besoin d'une haute stabilité en fréquence que le vieillissement aura une influence. Il y aura lieu de consulter le constructeur pour avoir des renseignements plus détaillés.

#### 3.5.2 Types d'oscillateurs

Pour des raisons de commodité, on peut diviser les oscillateurs en deux grands groupes: oscillateurs à résonance parallèle et oscillateurs à résonance série.

On considère, ci-dessous, certaines caractéristiques de ces deux types d'oscillateur.

##### 3.5.2.1 Oscillateurs à résonance parallèle

- a) Des exemples de ce groupe sont donnés aux figures 7 à 10, page 54. C'est intentionnellement que l'on a évité ici l'emploi de noms comme «oscillateurs de Pierce», etc. car les mêmes circuits ne sont pas toujours, suivant les pays, connus sous la même dénomination.

### 3.5 FREQUENCY STABILITY RELATED TO THE CONDITIONS OF USING THE CRYSTAL UNIT

#### 3.5.1 Factors affecting the frequency stability

In an oscillator whose frequency is decided principally by a quartz crystal, it must be understood that the circuit and conditions of operation do have their effects on the oscillation frequency.

Although a crystal unit is adjusted during manufacture to a nominal frequency, the conditions under which this frequency is actually obtained in a crystal oscillator must be carefully defined. It is the object of the following discussion to cover the more important considerations of this type. For convenience some important points are listed here, referring to both the oscillator network and the crystal unit itself.

##### 3.5.1.1 Oscillator network

- a) Load capacitance (Sub-clause 3.5.3).
- b) H.T. and filament or heater supplies. Variations of these will generally affect the dynamic component of the load capacitance and the amplitude of oscillations, and hence the frequency (Sub-clauses 3.5.3 and 3.5.5).
- c) Climatic and mechanical conditions. A true assessment of the effect of these is of great importance.
- d) Ageing of the valve and the circuit components.

##### 3.5.1.2 Crystal unit

- a) Level of drive (Sub-clause 3.5.5).
- b) Operating temperature range (Clause 3.4).
- c) Climatic and mechanical conditions. If these are more severe than those called for in the article sheets, the crystal manufacturer should be consulted.
- d) Ageing. Generally speaking, only where very good frequency stability is required should ageing be of consequence. For detailed information the manufacturer should be consulted.

#### 3.5.2 Types of oscillators

For convenience, oscillators may be divided into two broad groups, parallel resonance and series resonance oscillators.

Certain features of the two types of oscillators are considered below.

##### 3.5.2.1 Parallel resonance oscillators

- a) Examples of this group are given in Figures 7 to 10, page 54. The use of the names "Pierce oscillator" etc. is intentionally avoided here, as in the different countries the same circuit is not always known by the same name.

- b) La limite supérieure en fréquence de ces oscillateurs à résonance parallèle est, en général, de l'ordre de 25 MHz. On peut utiliser le circuit de la figure 10 à des fréquences plus élevées. Si l'on devait utiliser des quartz pour des fréquences supérieures à 25 MHz, il y aurait lieu de consulter le constructeur.
- c) La disposition des oscillateurs à résonance parallèle est, en général, telle que le quartz est placé aux bornes d'une capacité de charge déterminée. Dans les circuits des figures 7, 8 et 9, la variation de capacité totale de charge est faible pour une grande gamme de fréquence. Cela revient à dire que la composante dynamique de cette capacité est faible et sensiblement constante.

Dans le circuit de la figure 10, les choses se présentent différemment étant donné que la capacité dynamique de charge est fonction de l'accord du circuit d'anode et de la pente du tube. Cependant, on obtient un fonctionnement stable lorsque le circuit est accordé sur la partie des fréquences élevées de la courbe de résonance et, dans ce cas, de faibles variations d'accord ne présentent pas tellement d'importance. De tels effets sont proportionnels à la capacitance totale anode-grille, de telle sorte qu'ils peuvent être rendus petits par l'emploi d'une contre-réaction adéquate.

- d) Lorsque l'on commute les quartz, les points suivants ont une certaine importance. Lorsque le cristal est branché entre la grille et la masse (figures 9 et 10), la capacité parasite du contacteur apparaît à tour de rôle aux bornes de chaque quartz et si elle risque d'être importante, il peut être préférable d'utiliser les circuits des figures 7 et 8 et de commuter les deux broches du quartz. De cette manière, les capacités parasites sont réparties d'une façon plus favorable entre les capacités du circuit. Les quartz qui ne sont pas effectivement utilisés devraient, de préférence, être court-circuités.
- e) Dans la réalisation des oscillateurs des figures 7, 8 et 9, les deux capacités du circuit devraient être maintenues à des valeurs presque égales. Cependant, lorsque l'on examine la stabilité en fréquence, il peut arriver que la capacité parasite ou dynamique qui se superpose à une des capacités du circuit soit moins stable que celle qui se superpose à l'autre. S'il en était ainsi, il y aurait lieu, pour obtenir une grande stabilité de l'ensemble, de connecter une capacité fixe plus grande aux bornes de la capacité la moins stable. Dans les cas où il y a lieu, pour obtenir la capacité de charge correcte, d'introduire une capacité additionnelle, celle-ci devrait être répartie entre les capacités du circuit.
- f) En employant un circuit oscillateur à quartz à couplage électronique, comme dans la figure 8, on peut utiliser un circuit accordé pour sélectionner une harmonique de la fréquence de fonctionnement. Cependant, avec le circuit de la figure 10, il faut se rendre compte que si le circuit d'anode est accordé, par exemple, sur le 3<sup>e</sup> harmonique de la fréquence de fonctionnement, le quartz fonctionnera sur son troisième-partiel et aura, ainsi, des propriétés différentes de celles pour lesquelles il a été conçu.
- g) Si l'oscillateur a un gain sensiblement constant en fonction de la fréquence, il peut apparaître un mode d'oscillation indésirable du quartz. Il se peut que le constructeur du quartz n'ait pas la possibilité de supprimer ce mode indésirable, de sorte qu'il est nécessaire de s'assurer que le gain de l'oscillateur est considérablement réduit pour les fréquences correspondant à de tels modes. Cet inconvénient peut vraisemblablement apparaître surtout dans le cas des quartz pour fréquences basses.

### 3.5.2.2 Oscillateurs à résonance série

- a) Des exemples de ce groupe sont donnés dans les figures 11 à 17, pages 54 et 55.

- b) The upper frequency limit of these parallel resonance oscillators is usually restricted to 25 MHz (Mc/s). The circuit of Figure 10 can be used at higher frequencies. Should crystal units be required for frequencies higher than 25 MHz (Mc/s), the manufacturer should be consulted.
- c) A parallel resonance oscillator is usually so arranged that the crystal looks into a specified load capacitance. In the circuits of Figures 7, 8 and 9, the effective load capacitance varies only slightly over a wide range of frequencies. That is to say, the dynamic component of this capacitance is small, and substantially constant.

In the circuit of Figure 10 the position is different, because the dynamic load capacitance is a function of the tuning of the anode circuit and the mutual conductance of the tube. However, stable operation is achieved when the circuit is tuned to the high-frequency side of resonance, and in this case small variations in tuning are not then so important. Such effects are proportional to the total anode-grid capacitance, so this should be kept small, consistent with adequate feed-back.

- d) When switching crystals, the following points are of importance. With the crystal between grid and earth (Figures 9 and 10) the stray switch capacitance appears across each crystal in turn, and if it is likely to be large it may be preferable to use the circuits of Figures 7 and 8 and switch each side of the crystal unit. In this way, the stray capacitances are more favourably distributed across each of the circuit capacitances. Crystals which are not actually in use should preferably be short-circuited.

- e) In the design of the oscillators of Figures 7, 8 and 9, the two circuit capacitances should be kept nearly equal. However, when considering frequency stability, it may happen that the stray or dynamic capacitance across one of the circuit capacitors is less stable than that across the other.

If so, a larger fixed capacitor should be connected across the less stable capacitance to obtain a high overall stability. In the cases where additional capacitance is required to make up the correct load capacitance, it should be distributed between the circuit capacitances.

- f) By using an electron-coupled crystal oscillator circuit, as in Figure 8, a tuned anode circuit may be used to select a harmonic of the working frequency. With the circuit of Figure 10, however, it must be realized that if the anode circuit is tuned to, say, the third harmonic of the working frequency, the crystal will operate on its third overtone and thus will have properties different from those for which it was designed.

- g) If the oscillator has substantially constant gain with frequency, an unwanted mode of oscillation of the crystal may be excited. The crystal manufacturer may be unable to suppress these unwanted modes, so it is necessary to ensure that the oscillator gain is considerably reduced at the frequencies of such modes. This trouble is most likely to occur with low-frequency crystals.

### 3.5.2.2 *Series resonance oscillators*

- a) Examples of this group are given in Figures 11 to 17, pages 54 and 55.

- b) Le circuit de la figure 11 trouve de nombreuses applications dans la gamme de fréquence 0,4–100 kHz; ceux des figures 12 et 13 dans la gamme de fréquence 10 kHz à 1 MHz et ceux des figures 14 à 17, dans la gamme située au-dessus de 15 MHz. Les circuits des figures 14 et 17 sont particulièrement utiles étant donné qu'ils représentent l'arrangement le plus souhaitable en ce qui concerne la tension de sortie, le niveau d'excitation, la réalisation du circuit, l'accord et la stabilité en fréquence.

*Note:* Les oscillateurs utilisant les transistors en sont encore en grande partie au stade expérimental et il n'est pas possible de définir les limites de fréquence.

- c) Les oscillateurs à résonance série impliquent, en général, l'utilisation d'un circuit accordé qui nous conduit aux considérations suivantes: en premier lieu, l'accord de ces circuits affectera la fréquence de l'oscillateur et il faudra donc tenir compte de sa stabilité globale, en fonction des conditions mécaniques et climatiques auxquelles il sera vraisemblablement soumis. En second lieu, lorsqu'il y a commutation des quartz, il faudra commuter également les circuits accordés, à moins que la gamme de fréquence mise en jeu ne soit restreinte, par exemple 5 % de la fréquence moyenne, lorsque l'on peut utiliser un amplificateur accordé à large bande. Même dans ce cas, le changement de réactance de l'amplificateur peut introduire une dérive de fréquence comparable aux tolérances spécifiées pour les quartz qui fonctionnent en résonance série. Lorsqu'une bande plus large est nécessaire, on peut utiliser un circuit apériodique.
- d) La capacité parasite introduite par la commutation des cristaux n'a pas, en général, étant donné la basse impédance mise en jeu, des effets aussi critiques que dans les oscillateurs résonance parallèle.

On devrait, cependant, prendre soin de s'assurer que l'inductance parasite soit aussi réduite que possible, particulièrement aux fréquences élevées.

- e) Les circuits série peuvent faire fonctionner le cristal à la fréquence de résonance série ou à une fréquence plus élevée ou plus basse selon qu'il y a une réactance respectivement négative ou positive en série avec le cristal. Il faut prendre un soin particulier pour s'assurer que, mise à part la capacité de charge, s'il y en a, la variation de phase de l'oscillateur soit très petite. S'il n'en est pas ainsi, on pourrait avoir une fréquence d'oscillation située en dehors des tolérances spécifiées. Un accord incorrect du circuit oscillant de l'oscillateur avec grille à la masse (figure 17) pourrait, par exemple, introduire un déphasage, rejetant la fréquence du quartz (réglée pendant sa fabrication à la résonance série) loin de la résonance série.

Une augmentation de la valeur effective du coefficient de surtension du quartz réduit l'effet ci-dessus.

- f) On peut prendre des dispositions pour sélectionner des harmoniques de la fréquence de travail, par exemple, en utilisant un tube pentode, le circuit d'anode servant à la sélection de l'harmonique. Ceci n'est pas la même chose que le choix de la fréquence d'un partiel du cristal.
- g) Lorsque l'on a une possibilité d'accord sur une grande gamme de fréquence, il est possible de voir apparaître des réponses indésirables à l'intérieur de cette gamme. Ceci peut également se présenter dans les oscillateurs possédant un amplificateur apériodique.

### 3.5.2.3 Oscillateur avec quartz à 3 ou 4 électrodes

Le circuit de base relatif à ce type d'oscillateur est donné à la figure 11. Les quartz qui s'adaptent le mieux à ce circuit sont les quartz de fréquences très basses qui vibrent suivant les modes de flexion (1–50 kHz).

- b) The circuit of Figure 11 finds greatest application in the frequency range 0.4 to 100 kHz (kc/s); those of Figures 12 and 13 in the frequency range from about 10 kHz (kc/s) to 1 MHz (Mc/s); and those of Figures 14, 15, 16 and 17 in the range above 15 MHz (Mc/s). The circuits of Figures 14 and 17 are particularly useful because they exhibit the most desirable combination of output voltage, drive level, circuit construction, tuning and frequency stability.

*Note:* Oscillators using transistors are still largely in the experimental stage and it is not possible to define the frequency limits.

- c) Series resonance oscillators generally involve the use of a tuned circuit which leads to the following considerations. Firstly, the tuning of this circuit will affect the oscillator frequency and so thought must be given to its overall stability in terms of the mechanical and climatic conditions likely to be imposed. Secondly, where there are switched crystals, the tuned circuit also will have to be switched unless the frequency range involved is quite small, say 5% of the mean frequency, when the use of a tuned broad-band amplifier is possible. Even in that case, the reactance change of the amplifier may introduce a frequency shift comparable with the tolerance for crystal units specified at their series resonance condition. Where a broader band is necessary an aperiodic circuit may be used.

- d) In general, due to the low impedance operation of the crystal units, stray capacitance introduced by switching crystals does not have the same serious effect as in parallel resonance oscillators.

Care, however, should be taken to ensure that stray inductance is kept to a minimum, particularly at the higher frequencies.

- e) Series circuits may operate the crystal at its series resonance frequency, or higher or lower as a function of there being a negative or positive reactance, respectively in series with the crystal unit. Special care must be taken to ensure that, apart from the load capacitance (if any), the loop phase change of the oscillator is very small. Failure to do this could cause the oscillation frequency to be outside the specified tolerance. For example, incorrect tuning of the transformer coupling in the grounded-grid circuit (Figure 17) could introduce a phase shift, thereby throwing the crystal frequency (adjusted during manufacture to series resonance) away from series resonance.

Increased effective Q value of the crystal reduces the above effect.

- f) Arrangements can be made for selecting harmonics of the working frequency, for example by using a pentode valve with the harmonic selector in the anode circuit. This is not the same case as selecting an overtone frequency of the crystal.

- g) With the facility of tuning over a wide frequency range, it is possible that unwanted responses within this range may be excited. This may also occur in oscillators having an aperiodic amplifier.

### 3.5.2.3 Oscillators with crystals having 3 or 4 electrodes

The basic circuit for this type of oscillator is given in Figure 11. The crystals most applicable in this circuit are the very low frequency units which vibrate in flexure mode (1–50 kHz (kc/s)).

Il y a lieu de remarquer qu'en établissant des circuits pour quartz à 3 ou 4 électrodes, il peut être nécessaire d'utiliser un dispositif de limitation d'amplitude pour éviter un endommagement du résonateur à quartz.

### 3.5.2.4 Mérites relatifs à quelques circuits d'oscillateurs

TABEAU 2

| Caractéristiques                                                         | Oscillateurs parallèle                              |                                               | Oscillateurs série                                         |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|                                                                          | Figures 7, 8, 9                                     | Figure 10                                     |                                                            |
| Stabilité en fréquence, le cristal étant dans des conditions stabilisées | Bonne à excellente                                  | Faible                                        | Bonne à excellente                                         |
| Puissance de sortie                                                      | Moyenne                                             | Elevée                                        | Faible à moyenne                                           |
| Gamme de fréquence                                                       | Jusqu'à 25 MHz                                      | Jusqu'à 25 MHz                                | Jusqu'au plus élevé des partiels du cristal                |
| Fonctionnement et réglage du cristal                                     | Ne demande aucun accord                             | Demande un accord                             | Peut ou non demander un accord                             |
| Commutation du cristal                                                   | Ne demande aucune commutation des circuits accordés | Demande une commutation des circuits accordés | Peut ou non demander une commutation des circuits accordés |

### 3.5.3 Capacité de charge

Dans les oscillateurs à résonance parallèle, le quartz est conçu pour fonctionner en tant qu'impédance inductive connectée à un amplificateur qui se comporte comme une capacité à la base du quartz. C'est cette capacité de charge qui constitue le principal élément extérieur influant sur la fréquence de fonctionnement de l'oscillateur.

Il y aurait donc lieu de maintenir à un niveau aussi faible que possible l'influence des conditions mécaniques et climatiques sur la valeur de la capacité de charge.

On donne au Tableau 3 des valeurs typiques du taux de variation de la fréquence avec la capacité de charge. Ces chiffres s'appliquent également lorsque l'on fait glisser intentionnellement la fréquence (voir paragraphe 3.6.3).

TABEAU 3

| Type de cristal                                     | Variation de fréquence $\Delta f$ en $10^{-6}$ pour 1 pF de variation de la capacité nominale de charge, la valeur moyenne de cette dernière étant de: |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                                     | 20 pF                                                                                                                                                  |                 | 30 pF           |                 | 50 pF           |                 |
|                                                     | $\Delta f$ min.                                                                                                                                        | $\Delta f$ max. | $\Delta f$ min. | $\Delta f$ max. | $\Delta f$ min. | $\Delta f$ max. |
| AT Cisaillement d'épaisseur                         | 10                                                                                                                                                     | 20              | 4               | 12              | 2               | 5               |
| AT Cisaillement d'épaisseur, 3 <sup>e</sup> partiel | 1,5                                                                                                                                                    | 2,5             | 1               | 1,5             | 0,3             | 0,6             |
| 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               |
| ET Cisaillement plan, 2 <sup>e</sup> partiel        | 2,5                                                                                                                                                    | 4               | 1,5             | 2,5             | 0,7             | 1               |
| GT Elongation                                       | 12                                                                                                                                                     | 13              | 6               | 7,5             | 2,5             | 3,5             |
| X+5° Elongation                                     | 20                                                                                                                                                     | 40              | 12              | 30              | 6               | 15              |

It should be noted that in using the 3-electrode and 4-electrode circuits, it may be necessary to employ some form of amplitude limiting to avoid damaging the crystal vibrator.

### 3.5.2.4 Relative merits of some oscillator circuits

TABLE 2

| Characteristics                                                        | Parallel oscillators                   |                                      | Series oscillators                                 |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------|
|                                                                        | Figures 7, 8, 9                        | Figure 10                            |                                                    |
| Typical frequency stability with the crystal under constant conditions | Good to excellent                      | Poor                                 | Good to excellent                                  |
| Power output                                                           | Moderate                               | High                                 | Low to moderate                                    |
| Frequency range                                                        | Up to 25 MHz (Mc/s)                    | Up to 25 MHz (Mc/s)                  | Up to the highest overtone crystal frequencies     |
| Crystal operation and adjustment                                       | Require no tuning                      | Requires tuning                      | May or may not require tuning                      |
| Crystal switching                                                      | Require no switching of tuned circuits | Requires switching of tuned circuits | May or may not require switching of tuned circuits |

### 3.5.3 Load capacitance

In parallel resonance oscillators, the crystal unit is designed to operate as an inductive impedance, being connected to an amplifier which appears capacitive at the crystal socket. It is this load capacitance which is the principal external influence in determining the operating frequency of the oscillator.

Thus, the influence of mechanical and climatic conditions on the value of the load capacitance should be kept as small as possible.

Typical rates of change of frequency with change of load capacitance are given in Table 3. These figures also apply when the frequency is intentionally pulled (see Sub-clause 3.6.3).

TABLE 3

| Type of crystal element          | Frequency variation $\Delta f$ in parts per million per pF change in nominal load capacitance |                 |                 |                 |                 |                 |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                  | mean 20 pF                                                                                    |                 | mean 30 pF      |                 | mean 50 pF      |                 |
|                                  | $\Delta f$ min.                                                                               | $\Delta f$ max. | $\Delta f$ min. | $\Delta f$ max. | $\Delta f$ min. | $\Delta f$ max. |
| AT Thickness shear               | 10                                                                                            | 20              | 4               | 12              | 2               | 5               |
| AT Thickness shear, 3rd overtone | 1.5                                                                                           | 2.5             | 1               | 1.5             | 0.3             | 0.6             |
| 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               |
| ET Face shear, 2nd overtone      | 2.5                                                                                           | 4               | 1.5             | 2.5             | 0.7             | 1               |
| GT Extensional                   | 12                                                                                            | 13              | 6               | 7.5             | 2.5             | 3.5             |
| +5° X Extensional                | 20                                                                                            | 40              | 12              | 30              | 6               | 15              |

De plus, étant donné que les quartz sont construits pour fonctionner avec une valeur définie de la capacité de charge, il y a lieu de prendre des mesures pour que cette capacité soit réellement présentée au quartz. On doit évaluer avec soin les effets des capacités parasites dynamiques, c'est-à-dire celles qui sont introduites par le tube fonctionnant en tant qu'amplificateur. Lorsque l'on utilise des quartz commutables et une enceinte thermostatique, on doit maintenir à un niveau aussi faible que possible la capacité parasite ou, dans certains cas, l'inductance parasite des connexions.

On devrait faire tous les efforts possibles pour que la valeur de la capacité de charge choisie pour la construction d'un oscillateur particulier soit une valeur normalisée.

Les valeurs normalisées de la capacité de charge pour les cristaux fonctionnant sur fondamental sont données dans la section un de la Publication 122-1 de la C.E.I. Pour les quartz fonctionnant sur fondamental, on préfère souvent une valeur de 30 pF, valeur donnant le meilleur compromis entre une haute activité et une bonne stabilité en fréquence.

On fait, en général, fonctionner à la résonance série les quartz partiels, mais dans les cas où l'on désire utiliser une capacité de charge, on devra se référer, pour les valeurs normalisées, à la section un de la Publication 122-1 de la C.E.I.

#### 3.5.4 Activité du cristal

La tension alternative mise en jeu aux bornes du quartz d'un oscillateur est déterminée (dans des conditions données) par l'activité du cristal. Pour des quartz fonctionnant sur des oscillateurs à résonance parallèle, l'activité est définie de la façon la plus adéquate par la résistance parallèle équivalente; plus cette résistance est grande, plus l'amplitude des oscillations dans le circuit est grande. Pour les oscillateurs série, l'activité est définie par la résistance série équivalente du quartz: plus la résistance série équivalente est faible, plus l'amplitude des oscillations est élevée. Pour un quartz donné, la résistance parallèle équivalente, aussi bien que la résistance série équivalente, dépendent de la capacité de charge avec laquelle a été prévu le fonctionnement du quartz; le constructeur du quartz possède le matériel nécessaire à la mesure de ces quantités. Si les paramètres du circuit équivalent au cristal (voir paragraphe 3.1.2) sont  $L_1$ ,  $C_1$ ,  $C_o$  et  $R_1$  et si  $C_L$  est la capacité externe connectée, soit en série, soit en parallèle avec le cristal (c'est-à-dire si  $C_L$  est la capacité de charge), on a, en désignant par  $\omega$  le produit  $2\pi$  par la fréquence de fonctionnement ( $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ ):

$$RPE = \frac{1}{\omega^2 (C_o + C_L)^2 R_1} \text{ ohms}$$

$$RSE = R_1 \left(1 + \frac{C_o}{C_L}\right)^2 \text{ ohms}$$

$$\text{On a donc: } (RPE) \times (RSE) = \frac{1}{\omega^2 C_L^2}$$

Dans la plupart des cas, on ne peut pas prévoir au cours de la fabrication l'activité d'un cristal particulier; on peut seulement faire en sorte qu'elle soit supérieure au minimum figurant dans la spécification. En fait, dans la production de certains types de quartz, une dispersion de ce paramètre dans le rapport de 1 à 3 n'est pas rare.

Further, because crystals are designed to operate with a definite value of load capacitance, steps must be taken to ensure that this capacitance is in fact presented to the crystal. The effects of stray capacitance and dynamic capacitances viz. those introduced by the valve operating as an amplifier, must be carefully evaluated. Where switched crystals and oven control are used, stray capacitance—or in some cases, stray lead inductance—must be kept as small as possible.

Every effort should be made to ensure that the value of the load capacitance chosen for a particular oscillator design is a standard value.

Standard values of load capacitance for fundamental crystals are given in Section one of I.E.C. Publication 122-1. For fundamental crystals, 30 pF is often preferred as giving the best compromise between high activity and good frequency stability.

Overtone crystals are usually operated at series resonance, but in those cases where a load capacitance must be used, reference should be made to Section one of I.E.C. Publication 122-1 for the standard values.

### 3.5.4 Crystal unit activity

The alternating voltage developed across the crystal in an oscillator is determined (under given conditions) by the crystal unit activity. For crystals in parallel resonance oscillators, the activity is most conveniently defined in terms of the EPR (equivalent parallel resistance); the greater the EPR the greater the amplitude of oscillations in the circuit. For series oscillators, it is the ESR (equivalent series resistance) of the crystal which defines its activity; the lower the ESR the greater the amplitude of oscillations. Both the EPR and the ESR for a given crystal unit depend upon the load capacitance with which that unit is intended to operate, and the crystal manufacturer has equipment to measure these quantities. If the parameters of the crystal equivalent network (see Sub-clause 3.1.2) are  $L_1$   $C_1$   $C_o$   $R_1$  and if  $C_L$  is the external capacitance connected either in series or in parallel with the crystal unit (i. e.  $C_L$  is the load capacitance), and  $\omega$  may be taken as  $2\pi \times$  operating frequency ( $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ ), then

$$\text{EPR} = \frac{1}{\omega^2 (C_o + C_L)^2 R_1} \text{ ohms}$$

$$\text{ESR} = R_1 \left(1 + \frac{C_o}{C_L}\right)^2 \text{ ohms}$$

$$\text{therefore: } (\text{EPR}) \times (\text{ESR}) = \frac{1}{\omega^2 C_L^2}$$

In most cases, the activity of a particular unit cannot be predicted during manufacture; it is only possible to ensure that it is greater than the minimum laid down in the specification. In fact, a spread in this parameter of two or three to one is not uncommon in the production of some types of crystals.

Il ne faudra pas oublier que l'on doit tenir compte de telles variations de l'activité dans la construction d'un oscillateur. Le quartz ayant l'activité la plus faible, prévue par la spécification, doit fonctionner d'une façon satisfaisante, tandis que les quartz qui ont la plus haute activité ne doivent pas donner des niveaux d'excitation excessifs. Pour être certain de l'amorçage, le circuit de l'oscillateur devra être conçu de façon telle qu'il y ait oscillation avec des quartz ayant approximativement  $\frac{1}{3}$  de l'activité minimum spécifiée pour le cristal. Cette nécessité découle de ce que l'activité des quartz pour des niveaux d'excitation qui s'approchent du niveau du bruit peut être moindre que l'activité mesurée dans les conditions d'essais spécifiées. On peut, en général, obtenir du constructeur un relevé d'activité pour un quartz particulier, dans le but d'évaluer les qualités des oscillateurs à quartz.

La figure 18, page 56, donne une idée générale des variations de la résistance à la résonance que l'on peut rencontrer.

### 3.5.5 Niveau d'excitation

Le niveau de l'excitation appliquée à un quartz oscillateur est généralement exprimé en fonction de la puissance dissipée dans le cristal. D'une façon idéale, l'oscillateur à quartz devrait être considéré comme une source de fréquence stable, mais en pratique il doit être aussi considéré comme une source de puissance.

Les niveaux normaux d'excitation sont énumérés dans la section un de la Publication 122-1 de la C.E.I. pour des quartz de différents types et de différentes fréquences et on verra qu'ils ne sont jamais supérieurs à quelques milliwatts. Le fait de dépasser ces valeurs peut, ou non, conduire à un endommagement permanent du cristal, mais il rendra certainement plus difficile l'obtention d'une bonne stabilité en fréquence.

De plus, étant donné qu'un niveau d'excitation excessif provoque un glissement de la fréquence du quartz, soit permanent, soit pour la durée d'application de cette excitation, il est très possible que le glissement soit supérieur à la tolérance de fréquence admissible. On voit ainsi que celui qui conçoit l'équipement devrait veiller à ce que les inégalités entre les pièces détachées, les variations de tension d'alimentation, etc., ne se traduisent pas par un dépassement du niveau d'excitation spécifié.

Par ailleurs, il peut ne pas être souhaitable, dans certains cas, que le niveau d'excitation tombe beaucoup en dessous de la valeur spécifiée: cela n'est pas tant dans le but d'obtenir une stabilité plus élevée que d'assurer le maintien de la fréquence d'oscillation dans les tolérances requises.

Il doit être entendu que le constructeur ajuste les fréquences de ses quartz au niveau d'excitation spécifié, il est donc désirable que l'utilisateur se serve du quartz dans les mêmes conditions.

Il résulte évidemment de ces considérations que la puissance de sortie demandée à l'oscillateur devrait être faible. Dans les cas difficiles, le choix d'un oscillateur conforme à la figure 10 peut être la meilleure solution, car son gain en puissance est élevé bien que sa stabilité en fréquence soit généralement inférieure à celles des autres montages. Dans la gamme des très hautes fréquences lorsque la valeur de la puissance de sortie a de l'importance, on devrait prendre en considération le montage avec grille à la masse de la figure 17.

La puissance dissipée sera  $\frac{V^2}{R_{PE}}$  pour le montage parallèle et  $I^2 \times R_{SE}$  dans le cas du montage série,  $V$  étant la tension aux bornes du quartz et  $I$  le courant en ampères qui traverse le quartz.

It will be realized that such variations in activity must be allowed for in oscillator design. The lowest activity crystal, defined in the specification, must operate satisfactorily, whilst those of the highest activity must 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 approximately  $\frac{1}{3}$  of the minimum specified activity of the crystal unit. The necessity for this arises from the fact that the activity of crystal units at levels of drive approaching noise level may be less than the activity measured under the specified test conditions. For the purpose of assessing the performance of crystal oscillators, a certificate of activity for a particular crystal unit can usually be obtained from the manufacturer.

Figure 18, page 56, gives a general impression of the variation of the resonance resistance that may be encountered.

### 3.5.5 Level of drive

The level of drive imposed on an oscillator crystal is usually specified in terms of the power dissipated in it. Ideally, the crystal oscillator should be regarded as a source of stable frequency, but in practice it must also be considered as a source of power.

Rated levels of drive are listed in Section one of I.E.C. Publication 122-1 for various types and frequencies of crystal unit, and it will be seen that they are never greater than a few milliwatts. Exceeding them may or may not lead to permanent damage of the crystal unit, but will certainly make adequate frequency stability more difficult to attain.

Further, since overdrive causes the frequency of a crystal to shift, either permanently or for the time the drive is imposed, it is quite possible that the shift will be greater than the allowable frequency tolerance. Thus, it is seen that the equipment designer should take care that variations between components, supply voltage variations, etc. do not result in rated drive levels being exceeded.

On the other hand, it may be undesirable in some cases to allow the drive level to fall much below the rated value: this is not so much in the interests of getting higher stability, but to ensure that the frequency of oscillation shall be within the required tolerance.

Since the crystal manufacturer adjusts the frequencies of his crystals units at the rated level of drive, it is desirable therefore that the user should operate the crystal unit under the same conditions.

As a result of these considerations, it is evident that the power output required from the oscillator should be small. In difficult cases, the choice of an oscillator according to Figure 10 may be the best solution for its power gain is high, although its frequency stability is generally less than for other designs. At v.h.f. the use of the grounded-grid circuit of Figure 17 should be considered where output power is of importance.

The power dissipated will be  $\frac{V^2}{EPR}$  in the parallel case and  $I^2 \times ESR$  in the series case where  $V$  is the voltage across the crystal unit and  $I$  is the current in amperes through the crystal unit.

### 3.6 APPLICATIONS SPÉCIALES

Le but de la normalisation des spécifications et des conditions d'emploi des quartz est de rendre possible un choix de quartz normalisés directement disponibles couvrant la plupart des exigences et on devra faire tout ce qui est possible pour utiliser de tels quartz. Dans certains cas, les quartz normalisés seront propres à une utilisation autre que celles qui sont spécifiées pour le quartz; mais il peut arriver que le constructeur du quartz modifie considérablement la construction du quartz, tout en le maintenant dans les limites données par les spécifications normalisées; de telles modifications peuvent très bien rendre alors le nouveau quartz inutilisable pour ces applications non normalisées. Il faut donc insister sur le fait qu'il est essentiel, pour l'utilisateur, de renseigner le constructeur sur les applications particulières prévues lorsque celles-ci ne sont pas normalisées.

On peut prendre ce qui suit comme exemple de conditions spéciales.

#### 3.6.1 Variation totale de fréquence dans la plage de température de fonctionnement

Il peut être nécessaire de définir les limites de cette variation pour permettre un réglage d'appoint dans le but d'avoir une meilleure précision dans l'ajustement de la fréquence. On peut l'utiliser pour éliminer l'erreur de fréquence qui provient du réglage à la construction, ainsi que les écarts de la capacité de charge et toute dérive de fréquence ultérieure imputable au vieillissement. On ne devra faire appel à cette possibilité que lorsque la tolérance en fréquence exigée est plus sévère que toutes celles qui sont offertes dans le choix normalisé pour la plage de température exigée et lorsque l'on disposera d'un étalon de fréquence convenable pour contrôler l'ajustement.

#### 3.6.2 Variation de fréquence en dehors de la plage de température de fonctionnement

Dans le cas de quartz devant fonctionner dans les enceintes thermostatiques, il peut être nécessaire de définir les limites de cette variation pour tenir compte des effets d'une défaillance de la régulation de température.

#### 3.6.3 Glissement de fréquence

Etant donnée que l'impédance équivalente du quartz est fonction de la fréquence, il est possible, en provoquant un changement de cette impédance, de modifier la fréquence de fonctionnement. La façon la plus facile de réaliser ce changement dans un oscillateur consiste à mettre une réactance variable, soit en série, soit en parallèle, avec le quartz, le choix dépendant de la nature du circuit utilisé pour l'oscillateur; par exemple, dans le cas de l'oscillateur de la figure 7, on peut modifier la capacité de charge en disposant une capacité variable aux bornes du quartz, la fréquence étant alors modifiée conformément à la relation:

$$\frac{f_1 - f_2}{f_1} = \frac{C_1}{2} \times \frac{C_{L2} - C_{L1}}{(C_0 + C_{L1})(C_0 + C_{L2})}$$

$f_1$  et  $f_2$  sont ici les fréquences de l'oscillateur pour les capacités de charge  $C_{L1}$  et  $C_{L2}$ .  $C_1$  et  $C_0$  sont respectivement les capacités dynamique et parallèle du quartz (voir figure 1, paragraphe 3.1.2).

### 3.6 SPECIAL REQUIREMENTS

The standardization of specifications and operating conditions for crystal units is intended to make it possible to select readily available standard units to cover most requirements and every effort should be made to use such units. In certain cases, standard items will be adequate for use under conditions other than those specified for the crystal unit, but since it is possible that the crystal manufacturer can alter considerably the design of a crystal unit whilst keeping it within the standard specification, such alterations may well render the new unit unusable for these non-standard applications. It must be stressed, therefore, that it is essential for the user to inform the manufacturer of his particular applications when they are non-standard.

The following may be taken as examples of special requirements.

#### 3.6.1 Total frequency variation over the operating temperature range

The definition of the limits of this variation may be necessary to permit trimming for greater accuracy of frequency adjustment. It can be used to eliminate that part of the frequency error resulting from manufacturing adjustment, load capacitance deviations, and any subsequent frequency drift due to ageing.

This facility should only be sought where the frequency tolerance required is closer than any offered in the standard patterns for the requisite temperature range, and where an adequate frequency standard will be available to monitor the adjustment.

#### 3.6.2 Frequency variation outside the operating temperature range

The definition of the limits of this variation may be necessary in the case of crystals to be operated in temperature-controlled ovens to allow for the effects of failure of temperature control.

#### 3.6.3 Frequency pulling

Since the equivalent impedance of a crystal unit is a function of the frequency, it is possible, by causing this impedance to change, to alter the working frequency. This is most easily effected in an oscillator by putting a variable reactance either in series or in parallel with the crystal, the actual choice being decided by the nature of the oscillator circuit used. For example, in the oscillator of Figure 7, the load capacitance could be changed by putting a variable capacitor across the crystal socket, when the frequency would change according to the following relation:

$$\frac{f_1 - f_2}{f_1} = \frac{C_1}{2} \times \frac{C_{L2} - C_{L1}}{(C_0 + C_{L1})(C_0 + C_{L2})}$$

Here  $f_1$  and  $f_2$  are the oscillator frequencies at load capacitances  $C_{L1}$  and  $C_{L2}$ .  $C_1$  and  $C_0$  are the motional and parallel capacitances respectively of the crystal unit (see Figure 1, Sub-clause 3.1.2).

Les mêmes équations s'appliquent aux oscillateurs série où la capacité variable de charge est en série avec le quartz.

On voit que le glissement de la fréquence,  $f_1 - f_2$ , dépend de  $C_1$  et  $C_0$ , quantités qui dépendent elles-mêmes de la construction du quartz. Il en résulte que lorsqu'il est important d'avoir des réglages de fréquence définis, les paramètres du quartz doivent être choisis en accord avec le constructeur, car ils peuvent varier beaucoup d'un constructeur à un autre, même dans le cas de quartz ayant même fréquence et même boîtier. Si nécessaire, le constructeur peut conseiller des valeurs de  $C_1$  et  $C_0$  pour une fréquence et une coupe déterminées (voir le tableau du paragraphe 3.5.3 où l'on traite des variations de fréquence-type pour différents types de quartz).

Il existe des limites aux glissements de fréquence réalisables; en effet, si la capacité de charge augmente trop, l'activité du quartz tombera en-dessous de la valeur requise pour l'entretien de l'oscillation (voir le paragraphe 3.5.4).

Si l'on rend trop petite la capacité de charge, l'effet des capacités parasites peut affecter la stabilité globale en fréquence ou rendre excessif le niveau d'excitation.

Des remarques identiques à celles qui précèdent peuvent s'appliquer aux oscillateurs à résonance série, sauf que dans ce cas la réactance variable est en général connectée en série avec le quartz.

Une autre propriété des oscillateurs série est que leur fréquence peut être réglée par un désaccord du circuit normalement accordé, à partir de la position optimum, mais ce procédé n'est pas judicieux car il se traduit par une puissance de sortie réduite.

#### 3.6.4 Niveau élevé d'excitation

Pour certaines applications, principalement le remplacement d'un vieux matériel, il peut être nécessaire de tirer parti du niveau d'excitation plus élevé que l'on peut obtenir en utilisant des cristaux à lame d'air. Dans ce cas, la spécification complète du cristal doit être faite en accord avec le constructeur.

#### 3.6.5 Commutation et manipulation

Etant donné que les cristaux de quartz ont de très faibles décrets (les valeurs de surtension se tiennent dans une gamme qui va de  $10^4$  à plus de  $10^6$ ), il est clair que le temps d'établissement des oscillations dans un oscillateur à cristal ne sera pas négligeable. Dans le cas des résonateurs à fréquence très basse, ce temps d'établissement peut être d'un certain nombre de secondes, mais il est, en général, très inférieur à cette valeur et assez petit pour permettre la manipulation de l'oscillateur. Ce temps sera lié à la vitesse de manipulation par un facteur qui dépend du taux de distorsion admissible sur les caractères; ainsi, pour une manipulation de 40 mots par minute avec un écrêtage de 20 % pour les points, on pourra admettre un temps d'établissement de 4 millisecondes en supposant un temps supplémentaire de 2 millisecondes imputable au circuit. Le temps de décroissance peut également se révéler gênant pour un récepteur voisin à moins d'utiliser un amortissement correct du quartz. Le temps nécessaire pour que les oscillations passent de 0 à 99 % de l'amplitude en régime permanent, ou diminuent jusqu'à 1 %

de cette amplitude, est donné par  $t = \frac{1,47Q}{f}$  où  $t$  est exprimé en millisecondes et  $f$  en kHz.

Cependant, quels que soient les avantages que l'on pense avoir en manipulant des oscillateurs à quartz, on ne devrait y recourir que dans les cas exceptionnels, car il est difficile d'assurer à la fois des vitesses de manipulation suffisamment élevées et une bonne stabilité en fréquence.

For series oscillators, with the variable load capacitance in series with the crystal, the same equation holds.

It is seen that the frequency shift  $f_1 - f_2$  depends upon  $C_1$  and  $C_o$ , which in turn depend upon the crystal unit design. Consequently, where consistent frequency adjustment is important, the crystal parameters must be agreed with the manufacturer, for they may vary widely from one manufacture to another, even for crystals of the same frequency and in the same holder. Where necessary, the manufacturer can advise on the values of  $C_1$  and  $C_o$  for a given frequency, and cut. (See the table in Sub-clause 3.5.3 for typical frequency shifts for various crystal types).

There are limitations to the amount of frequency pulling available, for if the load capacitance increases too much, the activity of the crystal (see Sub-clause 3.5.4) will fall below the value required to maintain oscillation. If the load capacitance is made very small, the effects of stray capacitance may affect the overall frequency stability or the drive level may become excessive.

Similar remarks to those above may be applied to series resonance oscillators, except that, in this case, the variable reactance is usually connected in series with the crystal unit.

Another point on the series oscillator is that its frequency may be adjusted by detuning the normal tuned circuit from its optimum setting, but this is not advisable for it results in a reduced output.

#### 3.6.4 High level of drive

For certain purposes, chiefly replacements for old equipment, it may be necessary to take advantage of the higher drive levels possible with gap-type crystal units. In these cases, the complete specification for the crystal unit must be agreed with the manufacturer.

#### 3.6.5 Switching and keying

Since quartz crystals have very low decrements (for example  $Q$  values lie in the range of from  $10^4$  to over  $10^6$ ), it is clear that the build-up time for oscillations in a crystal oscillator will be appreciable. For very low frequency vibrators this build-up time may be many seconds, but usually it is much less than this, being small enough to allow the oscillator to be keyed. The figure will be related to the keying speed by a factor dependent on the permissible distortion of characters; thus for keying at 40 words per minute with 20% clipping of dots, a build-up time of 4 milliseconds would be permissible, assuming 2 milliseconds residual delay in the circuit. The decay time may also prove an embarrassment to an adjacent receiver unless adequate crystal damping is used. The time required for oscillations to build up from zero to 99% of the steady amplitude, or to decay to 1% of the steady amplitude, is given by

$$t = \frac{1.47Q}{f} \text{ where } t \text{ is in milliseconds and } f \text{ is in kHz (kc/s).}$$

However convenient it may be though, to key crystal oscillators, it should only be resorted to in extreme cases, for it is difficult to combine sufficiently high keying rates with good frequency stability.

Lorsqu'il s'avère nécessaire d'utiliser un oscillateur manipulé, les principales précautions consistent à avoir une valeur aussi faible que possible pour la valeur de la résistance de fuite de la grille et pour les capacités de découplage de l'anode et de la grille-écran.

On doit prendre grand soin de ne pas appliquer de tension excessive au quartz dans les régimes transitoires. En ce qui concerne le quartz, il faudra également prendre des dispositions spéciales avec le constructeur pour obtenir des quartz possédant une faible inductance équivalente et une faible capacité parallèle. Il peut également être nécessaire de spécifier le temps maximum d'amorçage des oscillations en accord avec le constructeur.

Les considérations qui précèdent ne s'appliquent pas nécessairement au cas de la manipulation par déplacement de fréquence.

#### 3.6.6 Cristaux fonctionnant en résonance série sur le mode fondamental

Dans certains cas, il peut être nécessaire d'utiliser des quartz fonctionnant sur le mode fondamental à la résonance série dans la bande 1–25 MHz (Mc/s). Les niveaux maximaux d'excitation seront les mêmes que pour les cristaux du même type réglés pour la résonance parallèle.

De nombreux circuits à résonance série donnent cependant, pour une fréquence déterminée, des courants sensiblement constants dans le quartz, quelles que soient les variations de la résistance série équivalente du quartz. Dans ces cas, il peut être plus indiqué de spécifier le niveau d'excitation du quartz en fonction du courant, mais lorsque ceci implique un niveau d'excitation en puissance excessif, il peut en résulter une altération d'autres caractéristiques telles que la tolérance de fréquence. On devra tenir compte de toutes variations du courant dans le quartz en fonction de la fréquence lorsque l'on établit les spécifications en collaboration avec le constructeur.

#### 3.6.7 Conditions climatiques et mécaniques extrêmes

Il y aura lieu de consulter le constructeur lorsque les quartz peuvent être soumis à des conditions mécaniques et climatiques plus dures que celles prévues dans les spécifications.

#### 3.6.8 Marquage

Il y aura lieu de consulter le constructeur lorsqu'il est nécessaire d'avoir des indications supplémentaires autres que celles spécifiées dans la feuille particulière.

### 3.7 METHODES DE MESURES ET CONDITIONS D'ESSAIS

Les mesures et les essais effectués seront normalement ceux recommandés dans les spécifications appropriées.

### 3.8 DONNÉES TECHNIQUES DESTINÉES A ACCOMPAGNER LA FEUILLE DE COMMANDE

Lorsque les exigences peuvent être satisfaites par un quartz normalisé, il suffira de spécifier la (ou les) fréquence(s) et la (ou les) feuille(s) particulière(s) relative(s) au (aux) quartz.

When it does become necessary to employ a keyed oscillator, the points of principal importance are to keep the value of grid-leak resistance and anode and screen-grid decoupling capacitances as small as possible.

Care is necessary to ensure that excessive voltages are not applied to the crystal unit under transient conditions. Also, for the crystal, special arrangements must be made with the manufacturer to provide suitable units having a small equivalent inductance and a small parallel capacitance. It may be necessary to specify maximum build-up time under conditions agreed with the manufacturer.

When frequency shift keying is involved, the above considerations do not necessarily apply.

### **3.6.6 Series resonance operation of fundamental crystals**

Occasionally, it may prove necessary to use fundamental crystals at series resonance within the band 1–25 MHz (Mc/s). Maximum levels of drive will be the same as for a crystal of same type adjusted for parallel resonance.

Many series resonance circuits, however, give sensibly constant crystal current irrespective of variations of crystal ESR, at a given frequency. In these cases, it may prove more convenient to specify the crystal operating level on a current basis, but when this involves an excessive drive level in terms of power this may result in a necessary relaxation in other operating conditions such as frequency tolerance. Any variation of crystal current with frequency should be taken into account when drawing up the specification in collaboration with the manufacturer.

### **3.6.7 Climatic and mechanical extremes**

When crystal units may be subjected to mechanical and climatic conditions more severe than those laid down in the specification, the manufacturer should be consulted.

### **3.6.8 Marking**

When additional marking is required other than that specified in the article sheet, the manufacturer should be consulted.

## **3.7 MEASURING METHODS AND TEST CONDITIONS**

The measurements and tests employed will normally be those recommended in the relevant specification.

## **3.8 TECHNICAL DATA TO ACCOMPANY ORDER FORM**

Where the requirements can be met by a standard item, it will be sufficient to specify the frequency(ies) and the article sheet for the item(s).

Lorsque les exigences ne peuvent être complètement satisfaites d'après une feuille particulière, cette feuille devra être indiquée ainsi que les différences connues, par exemple :

Fréquence(s) nominale(s) . . . . . kHz  
 Feuille particulière N° . . . . .  
 à l'exception des points suivants :  
 tolérance de fréquence  $\pm 30 \times 10^{-6}$   
 gamme de température de fonctionnement  $+10$  à  $+60^{\circ}\text{C}$ .

Dans les cas très spéciaux où les différences sont telles qu'il n'est pas raisonnable de se référer à une feuille particulière existante, il y aura lieu de préparer une nouvelle feuille particulière de conception similaire à celle déjà utilisée pour les feuilles particulières normalisées.

### 3.9 BIBLIOGRAPHIE

#### Généralités

1. Quartz Crystals for Electrical Circuits, R. A. Heising. (D. Van Nostrand, New York).
2. Piezoelectricity, W. G. Cady. (McGraw Hill Book Co.)
3. Handbook of Piezoelectric Crystals for Radio Equipment Designers. (PB-No. 111586) J. P. Buchanan. (Office of Technical Services U.S. Dept. of Commerce, Washington D.C.).
4. Quartz Vibrators and their Applications. P. Vigoreux and C. F. Booth (H. M. Stationery Office).
5. Vacuum Tube Oscillators, W. A. Edson. (Chapman and Hall).
6. Oscillatoren mit Schwingkristallen. W. Herzog (Springer Verlag, Berlin 1958).

#### Articles spécialisés

7. Flexure Mode Quartz Oscillators. N. J. Beane and R. C. Richards, *Marconi Review* **16**, 141, 1953.
8. The Measurement of the Activity of Quartz Oscillator Crystals. A. J. Biggs and G. M. Wells, *Journ. I.E.E.*, **93**, III, 29, 1946.
9. The Development of Quartz Crystal Production. C. F. Booth and J. P. Johns, *Journ. I.E.E.*, **94**, IIIA, 243, 1947.
10. Piezoelectric Crystals in Oscillator Circuits. I. E. Fair, *Bell System Technical Journal*, **24**, 161, 1945.
11. Notes on the Frequency-Temperature Relationship of Some Low Frequency Quartz Plates. D. Fairweather and N. J. Beane, *Marconi Review*, **12**, 68, 1949.
12. Review of Methods for measuring the Constants of Piezoelectric Vibrators, E. A. Gerber, *Proc. I.R.E.*, **41**, 1103, 1953.
13. High Frequency Plated Quartz Crystal Units, R. A. Sykes, *Proc. I.R.E.*, **36**, 4, 1948.
14. Frequency Ageing of High Frequency Plated Crystal Units, A. W. Warner, *Proc. I.R.E.*, **43**, 790, 1955.
15. Symposium on Quartz Oscillator Plates. *American Mineralogist*, **30**, 205, 1945.
16. A Method of Analysis of Fundamental and Overtone Crystal-oscillator Circuits. F. R. G. Rockstuhl. *Proc. I.E.E.*, **99**, III, 377, 1952.
17. Some Notes on Overtone Crystals and Maintaining Oscillator Operating in the Frequency Range of 33-55 Mc/s. J. B. Supper, *Proc. I.E.E.*, **98**, III, 240, 1951.
18. Crystal Oscillators and their Application to Radio Transmitter Control. I. I. Creighton, H. B. Law and R. J. Turner, *Proc. I.E.E.*, **94**, IIIA, 331, 1947.
19. The Design of Fundamental Mode Quartz Crystal Oscillators, G. J. Camfield, R. A. E. Farnborough Technical Note: Rad. 525, July 1952.
20. Variable-frequency Crystal Oscillators. H. Stanesby and P. W. Fryer. *Proc. I.E.E.*, **94**, IIIA, 368, 1947.
21. Amplitude of Vibration in Piezoelectric Crystals. E. A. Gerber, *Electronics* **24**, 142, April 1951 and 326, September 1951.
22. Formules relatives aux fréquences remarquables du dipôle équivalent à un résonateur piézoélectrique. P. Andrieux; *l'Onde Electrique* **365**, **366**, 746 Août-Septembre 1957.
23. IRE Standards on Piezoelectric Crystals—The Piezoelectric Vibrator: Definitions and Methods of Measurement, 1957, *Proc. I.R.E.*, **45**, 353, 1957.
24. Methods of Measurement of Parameters of Piezoelectric Vibrators, E. A. Gerber and L. F. Koezner, *Proc. I.R.E.*, **46**, 1731, 1958.

When the requirements cannot wholly be met by an existing article sheet, the article sheet should be quoted together with known differences e. g.:

nominal frequency(ies) . . . . . kHz (kc/s)  
 article sheet No. . . . .  
 except that:  
 frequency tolerance  $\pm 30 \times 10^{-6}$   
 operating temperature range  $+10$  to  $+60^{\circ}\text{C}$ .

In the very unusual case where the differences are such that it is not reasonable to quote an existing article sheet, a new article sheet should be prepared in a similar form to that already used for standard article sheets.

### 3.9 BIBLIOGRAPHY

#### General

1. Quartz Crystals for Electrical Circuits, R.A. Heising. (D. Van Nostrand, New York).
2. Piezoelectricity, W.G. Cady. (McGraw Hill Book Co.)
3. Handbook of Piezoelectric Crystals for Radio Equipment Designers. (PB-No. 111586). J.P. Buchanan. (Office of Technical Services U.S. Dept. of Commerce, Washington D.C.).
4. Quartz Vibrators and their Applications. P. Vigoreux and C.F. Booth (H. M. Stationery Office).
5. Vacuum Tube Oscillators, W.A. Edson. (Chapman and Hall).
6. Oscillatoren mit Schwingkristallen. W. Herzog (Springer Verlag, Berlin 1958).

#### Specialist Articles

7. Flexure Mode Quartz Oscillators. N.J. Beane and R.C. Richards, *Marconi Review* **16**, 141, 1953.
8. The Measurement of the Activity of Quartz Oscillator Crystals. A.J. Biggs and G.M. Wells, *Journ. I.E.E.*, **93**, III, 29, 1946.
9. The Development of Quartz Crystal Production. C.F. Booth and J.P. Johns, *Journ. I.E.E.*, **94**, IIIA, 243, 1947.
10. Piezoelectric Crystals in Oscillator Circuits. J.E. Fair, *Bell System Technical Journal*, **24**, 161, 1945.
11. Notes on the Frequency-Temperature Relationship of Some Low Frequency Quartz Plates. D. Fairweather and N.J. Beane, *Marconi Review*, **12**, 68, 1949.
12. Review of Methods for measuring the Constants of Piezoelectric Vibrators, E.A. Gerber, *Proc. I.R.E.*, **41**, 1103, 1953.
13. High Frequency Plated Quartz Crystal Units, R.A. Sykes, *Proc. I.R.E.*, **36**, 4, 1948.
14. Frequency Ageing of High Frequency Plated Crystal Units, A.W. Warner, *Proc. I.R.E.*, **43**, 790, 1955.
15. Symposium on Quartz Oscillator Plates. *American Mineralogist*, **30**, 205, 1945.
16. A Method of Analysis of Fundamental and Overtone Crystal-oscillator Circuits. F.R.G. Rockstuhl. *Proc. I.E.E.*, **99**, III, 377, 1952.
17. Some Notes on Overtone Crystals and Maintaining Oscillator Operating in the Frequency Range of 33-55 Mc/s. J.B. Supper, *Proc. I.E.E.*, **98**, III, 240, 1951.
18. Crystal Oscillators and their Application to Radio Transmitter Control. I.I. Creighton, H.B. Law and R.J. Turner, *Proc. I.E.E.*, **94**, IIIA, 331, 1947.
19. The Design of Fundamental Mode Quartz Crystal Oscillators, G.J. Camfield, R.A.E. Farnborough Technical Note: Rad. 525, July 1952.
20. Variable-frequency Crystal Oscillators. H. Stanesby and P.W. Fryer. *Proc. I.E.E.*, **94**, IIIA, 368, 1947.
21. Amplitude of Vibration in Piezoelectric Crystals. E.A. Gerber, *Electronics* **24**, 142, April 1951 and 326, September 1951.
22. Formules relatives aux fréquences remarquables du dipôle équivalent à un résonateur piézoélectrique. P. Andrieux; *l'Onde Electrique* **365**, **366**, 746 Août-Septembre 1957.
23. IRE Standards on Piezoelectric Crystals—The Piezoelectric Vibrator: Definitions and Methods of Measurement, 1957, *Proc. I.R.E.*, **45**, 353, 1957.
24. Methods of Measurement of Parameters of Piezoelectric Vibrators, E.A. Gerber and L.F. Koezner, *Proc. I.R.E.*, **46**, 1731, 1958.

### 3.10 DÉFINITIONS

Pour rendre ce guide autonome en ce qui concerne la terminologie, on y a inclus les définitions suivantes, qui sont prises dans la Section un de la Publication 122-1 de la C.E.I.

#### *Fréquence d'antirésonance $f_a$*

Fréquence la plus haute au voisinage de la fréquence nominale pour laquelle le quartz est équivalent à une résistance pure.

#### *Résistance parallèle $R_a$*

Résistance équivalente au quartz à sa fréquence d'antirésonance.

#### *Quartz pincé*

Quartz dans lequel le cristal est uniquement serré entre des supports.

#### *Activité du quartz*

Terme qualificatif exprimant comparativement la faculté d'osciller de différents quartz dans des conditions semblables.

*Note:* Pour une comparaison quantitative de la faculté d'osciller de plusieurs quartz, dans des conditions semblables, il faut mesurer la résistance série équivalente ou la résistance parallèle équivalente.

#### *Coupe du cristal*

Orientation du cristal par rapport aux axes cristallographiques de la matière.

#### *Cristal*

Matière piézoélectrique taillée selon une forme géométrique, des dimensions et une orientation donnée par rapport aux axes cristallographiques du matériau.

#### *Quartz*

Un ou plusieurs cristaux résonateurs montés dans un boîtier.

#### *Circuit équivalent du quartz*

Circuit électrique de même impédance que le quartz au voisinage de la fréquence de résonance.

Il est généralement représenté par une inductance  $L_1$ , une capacité  $C_1$ , et une résistance  $R_1$ , en série, le tout shunté par une capacité  $C_0$ .

#### *Résonateur à cristal*

Cristal monté avec ses électrodes.

#### *Electrode*

Plaque ou film électriquement conducteur en contact avec ou à proximité d'un cristal, permettant d'appliquer à ce cristal un champ électrique.

### 3.10 GLOSSARY OF TERMS

The following terms are included to make this guide self-contained in terminology. The terms are taken from Section one of I.E.C. Publication 122-1.

*Activity* see Crystal activity

*Antiresonance frequency*  $f_a$

The higher of the two frequencies in the vicinity of a resonance at which the electrical impedance of the crystal unit is resistive.

*Antiresonance resistance*  $R_a$

The resistance of the crystal unit at the antiresonance frequency.

*Clamped crystal unit*

One in which the crystal element is mounted solely by clamping between supports.

*Crystal activity*

A qualitative term for comparing the ability of crystal units to oscillate under similar conditions.

*Note:* For a quantitative comparison of the ability of crystal units to oscillate under similar conditions, the equivalent series resistance (ESR) or the equivalent parallel resistance (EPR) must be measured.

*Crystal cut*

The orientation of the crystal element with respect to the crystallographic axes of the material.

*Crystal element*

Piezo-electric material cut to a given geometric shape, size and orientation with respect to the crystallographic axes of the material.

*Crystal unit*

One or more crystal vibrators mounted in a holder.

*Crystal unit equivalent circuit*

The electric circuit which has the same impedance as the unit in the frequency region of resonance. It is usually represented by an inductance, capacitance and resistance in series, this series arm being shunted by the capacitance between the terminals of the unit. The parameters of the series branch of inductance, capacitance and resistance are usually given by  $L_1$ ,  $C_1$  and  $R_1$  respectively. The parallel capacitance is given by  $C_0$ .

*Crystal vibrator*

A mounted crystal element with electrodes.

*Electrode*

An electrically conducting plate or film in contact with, or in proximity to, a face of a crystal element, by means of which an electric field is applied to the element.

### *Résistance parallèle équivalente (RPE)*

Impédance de l'ensemble du quartz en parallèle avec une capacité donnée à la fréquence la plus haute dans le voisinage de la fréquence nominale pour laquelle l'impédance de l'ensemble est réelle.

*Note:* Cette résistance est également connue sous le nom d'Indice de Performance (P.I.).

### *Résistance série équivalente (RSE)*

Impédance de l'ensemble du quartz en série avec une capacité (ou une inductance) donnée à la fréquence la plus basse dans le voisinage de la fréquence nominale pour laquelle l'impédance de l'ensemble est réelle.

### *Tolérance de fréquence*

Ecart maximum admissible entre la fréquence de fonctionnement du quartz et sa fréquence nominale, produit par une cause déterminée ou une combinaison de causes.

*Note:* Les tolérances normalement utilisées sont:

- précision d'ajustage (liée à la fabrication),
- vieillissement,
- tolérance dans la gamme de température.

### *Cristal fonctionnant sur fondamental*

Résonateur à cristal conçu pour fonctionner sur l'ordre le plus bas d'un mode déterminé.

### *Quartz à lame d'air*

Quartz où il existe un certain espace entre une, ou plus, des électrodes et le cristal.

### *Boîtier*

Enveloppe assurant la protection du résonateur à cristal et de son montage.

### *Niveau d'excitation*

Mesure des conditions de fonctionnement imposées au quartz, s'exprimant par la puissance dissipée, le courant ou la tension.

### *Capacité de charge ( $C_L$ )*

Capacité extérieure au quartz qui, en association avec ce dernier, détermine la fréquence de fonctionnement dans un oscillateur.

### *Impédance de charge*

Impédance extérieure au quartz qui, en association avec ce dernier, détermine la fréquence de fonctionnement dans un oscillateur.

### *Mode de vibration*

Configuration du mouvement des particules élémentaires dans un corps vibrant, résultant des contraintes appliquées à ce corps, de la fréquence de l'oscillation et des conditions aux limites. Les trois modes de vibration habituels sont:

- a) mode de flexion,
- b) mode d'extension,
- c) mode de cisaillement.

#### *Equivalent parallel resistance (EPR)*

The impedance of the combination of the unit in parallel with a stated external capacitance at the higher of the two frequencies in the vicinity of the nominal frequency for which the electrical impedance of the combination is real.

*Note:* This is also known as Performance Index (P.I.).

#### *Equivalent series resistance (ESR)*

The impedance of the combination of the unit in series with a stated external capacitance (or inductance) at the lower of the two frequencies in the vicinity of the nominal frequency for which the electrical impedance of the combination is real.

#### *Frequency tolerance*

The maximum permissible deviation of the working frequency from a given frequency due to a specific cause, or a combination of causes.

*Note:* The tolerances normally used are:

- accuracy of adjustment (related to manufacture)
- ageing
- tolerance over the temperature range.

#### *Fundamental crystal*

A crystal vibrator designed to operate at the lowest order of a given mode.

#### *Gapped crystal unit*

One in which there are spaces between one or more of the electrodes and the surface(s) of the crystal element.

#### *Holder*

The enclosure protecting the crystal vibrator(s) and mounting.

#### *Level of drive*

A measure of the conditions imposed upon the crystal unit expressed in terms of the power dissipated, current or voltage.

#### *Load capacitance ( $C_L$ )*

The effective external capacitance associated with the crystal unit, in an oscillator, to determine the working frequency.

#### *Load impedance*

The effective external impedance associated with the crystal unit, in an oscillator, to determine the working frequency.

#### *Mode of vibration*

The pattern of motion in a vibrating body for the individual particles resulting from stresses applied to the body, the frequency of oscillation, and the boundary conditions existing. The three common modes of vibration are:

- a) flexural
- b) extensional
- c) shear.

### *Montage*

Moyens assurant la fixation dans le boîtier du résonateur à cristal.

### *Fréquence nominale*

Fréquence prescrite au quartz.

### *Cristal fonctionnant sur partiel*

Résonateur à cristal conçu pour fonctionner sur un ordre supérieur à l'ordre le plus bas d'un mode déterminé.

### *Plage de température de service*

Gamme de température, mesurée sur le boîtier, dans laquelle le quartz doit pouvoir fonctionner, quoique pas nécessairement, dans les conditions spécifiées dans la gamme de température de fonctionnement.

### *Plage de température de fonctionnement*

Gamme de température, mesurée sur le boîtier, dans laquelle le quartz doit satisfaire aux conditions spécifiées de fréquence et de résistance.

### *Ordre d'un partiel*

Rang des partiels successifs d'un mode de vibration donné dans l'ordre des fréquences croissantes en commençant par un pour le mode fondamental.

Pour le mode de cisaillement et le mode d'extension, l'ordre d'un partiel est égal au quotient de la fréquence du partiel par la fréquence fondamentale, arrondi à l'entier le plus voisin.

### *Fréquence de résonance parallèle $f_p$*

Fréquence donnée par la relation:

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 \frac{C_1 C_o}{C_1 + C_o}}}$$

### *Oscillateur à résonance parallèle*

Oscillateur pour lequel l'impédance aux bornes du cristal est nulle lorsque l'impédance de charge est court-circuitée.

*Note:* Il y a deux exemples courants d'oscillateurs à résonance parallèle; dans l'un, l'impédance de charge est constituée de deux capacités en série avec une capacité quelconque en parallèle aux bornes du cristal; dans l'autre, la capacité de charge est composée d'une capacité quelconque en parallèle aux bornes du cristal et d'une capacité dynamique symétrique également en parallèle. On verra plus clairement le sens de cette définition en l'appliquant aux circuits des figures 7 et 10 respectivement.