

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC

61338-1-3

Première édition
First edition
1999-11

Résonateurs diélectriques à modes guidés –

Partie 1-3:

**Informations générales et conditions d'essais –
Méthode de mesure de la permittivité relative
complexe des matériaux diélectriques pour les
résonateurs diélectriques fonctionnant aux
hyperfréquences**

Waveguide type dielectric resonators –

Part 1-3:

**General information and test conditions –
Measurement method of complex relative
permittivity for dielectric resonator materials at
microwave frequency**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61338-1-3:1999

Numéros des publications

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

Publications consolidées

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

Validité de la présente publication

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

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

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

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

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

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

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

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

Numbering

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

Consolidated publications

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

Validity of this publication

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

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

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

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates

(On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

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

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

* See web site address on title page.

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC

61338-1-3

Première édition
First edition
1999-11

Résonateurs diélectriques à modes guidés –

Partie 1-3:

**Informations générales et conditions d'essais –
Méthode de mesure de la permittivité relative
complexe des matériaux diélectriques pour les
résonateurs diélectriques fonctionnant aux
hyperfréquences**

Waveguide type dielectric resonators –

Part 1-3:

**General information and test conditions –
Measurement method of complex relative
permittivity for dielectric resonator materials at
microwave frequency**

© IEC 1999 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photo-copie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

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

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

T

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	6
INTRODUCTION	10
Articles	
1 Domaine d'application et objet	12
2 Paramètres à mesurer	12
3 Théorie et équations de calcul	14
3.1 Permittivité relative et facteur de pertes	14
3.2 Détermination de la conductivité relative des lames conductrices	20
3.3 Coefficient de température de la fréquence de résonance	22
3.4 Dépendance en température de $\tan \delta$	26
4 Préparation du spécimen diélectrique	26
4.1 Préparation des barreaux diélectriques normalisés	26
4.2 Préparation du spécimen pour la mesure	28
5 Equipement et appareil de mesure	28
5.1 Equipement de mesure	28
5.2 Appareil de mesure de la permittivité complexe	30
5.3 Appareil de mesure du coefficient de température	34
6 Procédure de mesure	34
6.1 Procédure de mesure de la permittivité complexe	34
6.2 Procédure de mesure du coefficient de température	40
7 Précision de la mesure et évaluation des erreurs	40
7.1 Erreur de mesure due aux dimensions des lames conductrices	40
7.2 Erreur de mesure de la conductivité relative	42
7.3 Erreurs dues à l'espace entre le barreau diélectrique et les lames conductrices ou à la perturbation de champ	44
7.4 Résultat de mesure pendant le cycle «round robin»	44
Annexe A – Bibliographie	46
Figures	
Figure 1 – Configuration d'un résonateur diélectrique en barreau cylindrique court-circuité aux deux extrémités par deux lames conductrices parallèles	14
Figure 2 – Diagramme de calcul de la permittivité relative utilisant le mode TE_{01}	16
Figure 3 – Configuration des résonateurs diélectriques normalisés en barreau pour la mesure de la conductivité des lames conductrices	20
Figure 4 – Dépendance en température de f_0 (figure 4a) et $\tan \delta$ (figure 4b) pour cinq sortes de matériaux diélectriques ($\epsilon' = 21, 25, 30, 38$ et 90)	24
Figure 5 – Graphique de mode d'un résonateur diélectrique en barreau court-circuité à deux extrémités par les lames conductrices parallèles	30
Figure 6 – Diagramme synoptique de l'équipement de mesure	32
Figure 7 – Appareil pour la mesure de la permittivité complexe	32

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
INTRODUCTION	11
Clause	
1 Scope and object	13
2 Measuring parameters	13
3 Theory and calculation equations	15
3.1 Relative permittivity and loss factor	15
3.2 Determination of the relative conductivity of conducting plates	21
3.3 Temperature coefficient of resonance frequency	23
3.4 Temperature dependence of $\tan \delta$	27
4 Preparation of dielectric specimen	27
4.1 Preparation of standard dielectric rods	27
4.2 Preparation of test specimen	29
5 Measurement equipment and apparatus	29
5.1 Measurement equipment	29
5.2 Measurement apparatus for complex permittivity	31
5.3 Measurement apparatus for temperature coefficient	35
6 Measurement procedure	35
6.1 Measurement procedure for complex permittivity	35
6.2 Measurement procedure for temperature coefficient	41
7 Accuracy and error estimation	41
7.1 Measurement error due to the size of conducting plates	41
7.2 Measurement error of relative conductivity	43
7.3 Errors due to the air gap between dielectric rod and conducting plates or to field disturbance	45
7.4 Result of round robin test (RRT)	45
Annex A – Bibliography	47
Figures	
Figure 1 – Configuration of a cylindrical dielectric rod resonator short-circuited at both ends by two parallel conducting plates	15
Figure 2 – Chart for relative permittivity calculation using TE_{01l} mode	17
Figure 3 – Confirmation of standard dielectric rod resonators for measurement of conductivity of conducting plates	21
Figure 4 – Temperature dependence of f_0 (figure 4a) and $\tan \delta$ (figure 4b) for five kinds of dielectrics ($\epsilon' = 21, 25, 30, 38$ and 90)	25
Figure 5 – Mode chart of a dielectric rod resonator short-circuited at both ends by parallel conducting plates	31
Figure 6 – Schematic diagram of measurement equipment	33
Figure 7 – Measurement apparatus for complex permittivity	33

Figure 8 – Appareil de mesure du coefficient de température	34
Figure 9 – Réponse en fréquence d'un résonateur en mode TE_{011} ayant $\varepsilon' = 37,5$, $d = 8,00$ mm et $h = 3,3$ mm	38
Figure 10 – Affaiblissement d'insertion IA_0 , fréquence de résonance f_0 et largeur de bande à demi-puissance Δf	38
Figure 11 – Erreur de mesure sur ε' et $\tan \delta$ en fonction du rapport des dimensions d'/d	42

Tableaux

Tableau 1 – Exemples de dimensions des barreaux diélectriques normalisés.....	26
Tableau 2 – Exemple de la fréquence de résonance en mode TE_{011} pour les différents ε' et différentes dimensions d'un spécimen diélectrique	28
Tableau 3 – Dimensions et matériaux recommandés pour la lame conductrice	34

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61338-1-3:1999

Figure 8 – Measurement apparatus for temperature coefficient	35
Figure 9 – Frequency response for TE ₀₁₁ mode resonator having $\epsilon' = 37,5$, $d = 8,00$ mm and $h = 3,3$ mm	39
Figure 10 – Insertion attenuation IA_0 , resonance frequency f_0 and half-power bandwidth Δf	39
Figure 11 – Measurement error on ϵ' and $\tan \delta$ by the size ratio d'/d	43

Tables

Table 1 – Examples of dimensions for standard dielectric rods.....	27
Table 2 – Example of TE ₀₁₁ mode resonance frequency for various ϵ' and dimensions of a dielectric specimen	29
Table 3 – Recommended dimensions and materials for conducting plate	35

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61338-1-3:1999

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

RÉSONATEURS DIÉLECTRIQUES À MODES GUIDÉS –

Partie 1-3: Informations générales et conditions d'essais – Méthode de mesure de la permittivité relative complexe des matériaux diélectriques pour les résonateurs diélectriques fonctionnant aux hyperfréquences

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Électrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61338-1-3 a été établie par le comité d'études 49 de la CEI: Dispositifs piézoélectriques et diélectriques pour la commande et le choix de la fréquence.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
49/444/FDIS	49/449/RVD

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 3.

L'annexe A est donnée uniquement à titre d'information.

La présente norme constitue la partie 1-3 de la CEI 61338.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

WAVEGUIDE TYPE DIELECTRIC RESONATORS –

**Part 1-3: General information and test conditions –
Measurement method of complex relative permittivity for
dielectric resonator materials at microwave frequency**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61338-1-3 has been prepared by IEC technical committee 49: Piezoelectric and dielectric devices for frequency control and selection.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
49/444/FDIS	49/449/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 3.

Annex A is for information only.

This standard forms part 1-3 of IEC 61338.

La CEI 61338, Résonateurs diélectriques à modes guidés, comprend les parties suivantes:

Partie 1-1: Informations générales et conditions d'essais – Informations générales (CEI 61338-1-1)

Partie 1-2: Informations générales et conditions d'essais – Conditions d'essais (CEI 61338-1-2)

Partie 1-3: Informations générales et conditions d'essais – Méthode de mesure de la permittivité relative complexe des matériaux diélectriques pour les résonateurs diélectriques fonctionnant aux hyperfréquences (CEI 61338-1-3)

Partie 2: Guide d'emploi des résonateurs diélectriques à modes guidés (CEI 61338-2) (à l'étude)

Partie 3: Encombrements normalisés (CEI 61338-3) (à l'étude)

Le comité a décidé que cette publication reste valable jusqu'en 2003. A cette date, selon décision préalable du comité, la publication sera

- reconduite;
- supprimée;
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61338-1-3:1999

IEC 61338, Waveguide type dielectric resonators, consists of the following parts:

- Part 1-1: General information and test conditions – General information (IEC 61338-1-1)
- Part 1-2: General information and test conditions – Test conditions (IEC 61338-1-2)
- Part 1-3: General information and test conditions – Measurement method of complex relative permittivity for dielectric resonator materials at microwave frequency (IEC 61338-1-3)
- Part 2: Guide to the use of waveguide type dielectric resonators (IEC 61338-2) (under consideration)
- Part 3: Standard outlines (IEC 61338-3) (under consideration)

The committee has decided that this publication remains valid until 2003. At this date, in accordance with the committee's decision, the publication will be

- reconfirmed;
- withdrawn;
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61338-1-3:1999

INTRODUCTION

Les matériaux diélectriques pour résonateurs et filtres fonctionnant aux hyperfréquences ont une permittivité relative élevée, un faible facteur de pertes et une bonne stabilité en température des fréquences de résonance. La connaissance de ces paramètres est d'une importance primordiale pour le développement de nouveaux matériaux, de la part du fournisseur et pour la conception des composantes fonctionnant aux hyperfréquences, de la part du client.

Les paramètres des matériaux pour résonateurs diélectriques nécessaires pour la construction des composantes fonctionnant aux hyperfréquences sont:

- la composante réelle ε' de la permittivité relative complexe;
- le facteur de pertes $\tan \delta$;
- le coefficient de température de la fréquence de résonance (*TCF*);
- la dépendance en température de $\tan \delta$.

Plusieurs méthodes de mesure sont proposées pour déterminer la permittivité complexe aux hyperfréquences:

- la méthode du résonateur ayant la forme d'un barreau diélectrique utilisant le mode de résonance TE_{011} ;
- la méthode de la cavité cylindrique utilisant le mode de résonance $TE_{01\delta}$;
- la méthode de perturbation utilisant une cavité cylindrique;
- la méthode des paramètres S utilisant une ligne coaxiale.

INTRODUCTION

Dielectric materials for microwave resonators and filters have high relative permittivity, a low loss factor and superior temperature stability of resonance frequencies. Knowledge of these parameters is of primary importance for the development of new materials on the supplier side and for the design of dielectric microwave components on the customer side.

The parameters of dielectric resonator materials needed for the design of microwave components are:

- the real component ϵ' of the complex relative permittivity;
- the loss factor $\tan \delta$;
- the temperature coefficient of resonance frequency (*TCF*);
- the temperature dependence of $\tan \delta$.

Several measurement methods are proposed to determine the complex permittivity at microwave frequencies:

- the dielectric rod resonator method using TE_{011} resonance mode;
- the cylindrical cavity method using $TE_{01\delta}$ resonance mode;
- the perturbation method using a cylindrical cavity;
- the S-parameter method using a coaxial line.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61338-1-3:1999

RÉSONATEURS DIÉLECTRIQUES À MODES GUIDÉS –

Partie 1-3: Informations générales et conditions d'essais – Méthode de mesure de la permittivité relative complexe des matériaux diélectriques pour les résonateurs diélectriques fonctionnant aux hyperfréquences

1 Domaine d'application et objet

La présente partie de la CEI 61338 décrit la méthode d'un résonateur ayant la forme d'un barreau pour une large gamme de propriétés diélectriques dans la gamme des hyperfréquences dans des applications pratiques. Cette méthode a les caractéristiques suivantes:

- une solution mathématique complète et exacte de la permittivité relative complexe est donnée facilement par le programme d'une machine à calculer;
- l'erreur de mesure est inférieure à 0,3 % pour ε' et inférieure à $0,05 \times 10^{-4}$ pour $\tan \delta$;
- le TCF est mesuré directement sans aucune compensation avec une erreur de mesure inférieure à 1×10^{-6} /K.

L'objet de cette norme est de décrire les méthodes de mesure de la permittivité relative complexe des matériaux pour résonateurs diélectriques fonctionnant aux hyperfréquences par la méthode du résonateur diélectrique ayant la forme d'un barreau court-circuité aux deux extrémités par les lames conductrices parallèles. Les paramètres de mesure sont ε' , $\tan \delta$, TCF et la dépendance en température de $\tan \delta$ à la fréquence de résonance. Il est supposé que les matériaux diélectriques sont isotropes et homogènes.

2 Paramètres à mesurer

Les termes des paramètres à mesurer sont définis de la manière suivante:

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' = D/(\varepsilon_0 E) \quad (1)$$

$$\tan \delta = \varepsilon''/\varepsilon' \quad (2)$$

$$TCF = -\frac{1}{2} TC \varepsilon - \alpha \quad (3)$$

où

D est la densité du flux électrique;

E est l'intensité du champ électrique;

ε_0 est la permittivité du vide;

ε' et ε'' sont les composantes réelle et imaginaire de la permittivité relative complexe ε_r .

Il convient de noter que le TCF est défini par l'équation (3) comme la constante du matériau, $TC\varepsilon$ étant le coefficient de température de la permittivité relative et α le coefficient de dilatation linéaire thermique du spécimen diélectrique. Chaque coefficient de température est donné de la manière suivante:

WAVEGUIDE TYPE DIELECTRIC RESONATORS –

Part 1-3: General information and test conditions – Measurement method of complex relative permittivity for dielectric resonator materials at microwave frequency

1 Scope and object

This part of IEC 61338 describes the dielectric rod resonator measurement method for a wide range of microwave dielectric properties in practical applications. This method has the following characteristics:

- a complete and exact mathematical solution of complex relative permittivity is given by easy computer software;
- the measurement error is less than 0,3 % for ε' and less than $0,05 \times 10^{-4}$ for $\tan \delta$;
- the TCF is directly measured without any compensation with a measurement error less than $1 \times 10^{-6}/K$.

The object of this standard is to describe the measurement methods of the complex relative permittivity of dielectric resonator materials at microwave frequencies by means of the dielectric rod resonator method short-circuited at both ends by parallel conducting plates. The measuring parameters are ε' , $\tan \delta$, TCF and the temperature dependence of $\tan \delta$ at the resonance frequency. The dielectric materials are assumed to be isotropic and homogeneous.

2 Measuring parameters

The terms of the measuring parameters are defined as follows:

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' = D/(\varepsilon_0 E) \quad (1)$$

$$\tan \delta = \varepsilon''/\varepsilon' \quad (2)$$

$$TCF = -\frac{1}{2} TC \varepsilon - \alpha \quad (3)$$

where

D is the electric flux density;

E is the electric field strength;

ε_0 is the electric constant;

ε' and ε'' are the real and imaginary components of the complex relative permittivity ε_r .

It should be noted that the TCF is defined by equation (3) as the material constant, $TC\varepsilon$ being the temperature coefficient of relative permittivity and α the coefficient of thermal expansion of the dielectric specimen. Each of the temperature coefficients is given as follows:

$$TCF = \frac{1}{f_{\text{ref}}} \frac{f_T - f_{\text{ref}}}{T - T_{\text{ref}}} \times 10^6 \quad (1 \times 10^{-6}/\text{K}) \quad (4)$$

$$TC\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_{\text{ref}}} \frac{\varepsilon_T - \varepsilon_{\text{ref}}}{T - T_{\text{ref}}} \times 10^6 \quad (1 \times 10^{-6}/\text{K}) \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{h_{\text{ref}}} \frac{h_T - h_{\text{ref}}}{T - T_{\text{ref}}} \times 10^6 \quad (1 \times 10^{-6}/\text{K}) \quad (6)$$

où

f_T et f_{ref} sont les fréquences de résonance à la température T et à la température de référence T_{ref} ($T_{\text{ref}} = 20^\circ\text{C}$ à 25°C);

ε_T et ε_{ref} sont les parties réelles de la permittivité relative complexe aux températures T et T_{ref} ;

h_T et h_{ref} sont les longueurs du spécimen diélectrique qui est supposé être isotrope aux températures T et T_{ref} .

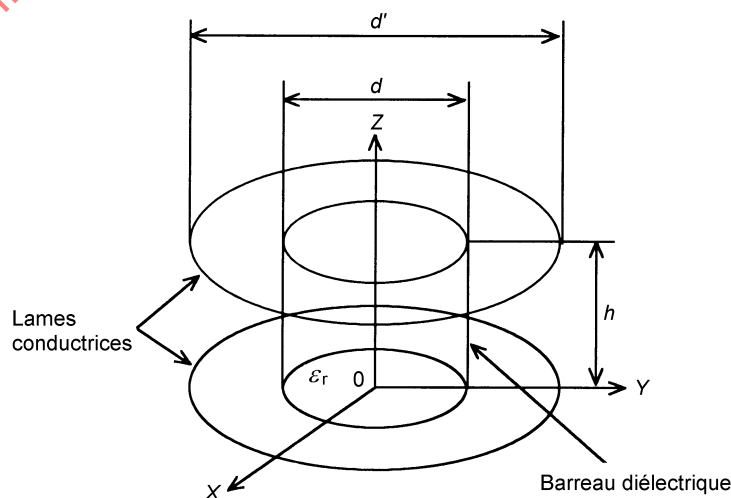
Les gammes de mesures des caractéristiques diélectriques pour cette méthode sont les suivantes:

- fréquence: $2 \text{ GHz} < f < 20 \text{ GHz}$;
- permittivité relative: $5 < \varepsilon' < 500$;
- facteur de pertes: $10^{-5} < \tan \delta < 10^{-2}$.

3 Théorie et équations de calcul

3.1 Permittivité relative et facteur de pertes

La figure 1 illustre la configuration du résonateur fonctionnant en mode $\text{TE}_{0m\ell}$. Un barreau cylindrique diélectrique est court-circuité aux deux extrémités par les deux plaques conductrices parallèles, constituant ainsi un résonateur. Les valeurs de ε' et $\tan \delta$ de ce résonateur sont calculées à partir de la fréquence de résonance mesurée (f_0) et du facteur de qualité à vide (Q_u) de la résonance en mode $\text{TE}_{0m\ell}$: les modes TE_{011} , TE_{012} et TE_{013} sont habituellement utilisés.



IEC 1574/99

Figure 1 – Configuration d'un résonateur diélectrique en barreau cylindrique court-circuité aux deux extrémités par deux lames conductrices parallèles

$$TCF = \frac{1}{f_{\text{ref}}} \frac{f_T - f_{\text{ref}}}{T - T_{\text{ref}}} \times 10^6 \quad (1 \times 10^{-6}/\text{K}) \quad (4)$$

$$TC\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_{\text{ref}}} \frac{\varepsilon_T - \varepsilon_{\text{ref}}}{T - T_{\text{ref}}} \times 10^6 \quad (1 \times 10^{-6}/\text{K}) \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{h_{\text{ref}}} \frac{h_T - h_{\text{ref}}}{T - T_{\text{ref}}} \times 10^6 \quad (1 \times 10^{-6}/\text{K}) \quad (6)$$

where

f_T and f_{ref} are the resonance frequencies at temperature T and reference temperature T_{ref} ($T_{\text{ref}} = 20^\circ\text{C}$ to 25°C);

ε_T and ε_{ref} are the real parts of the complex relative permittivity at temperatures T and T_{ref} ;

h_T and h_{ref} are the lengths of the dielectric specimen which is assumed to be isotropic at temperatures T and T_{ref} .

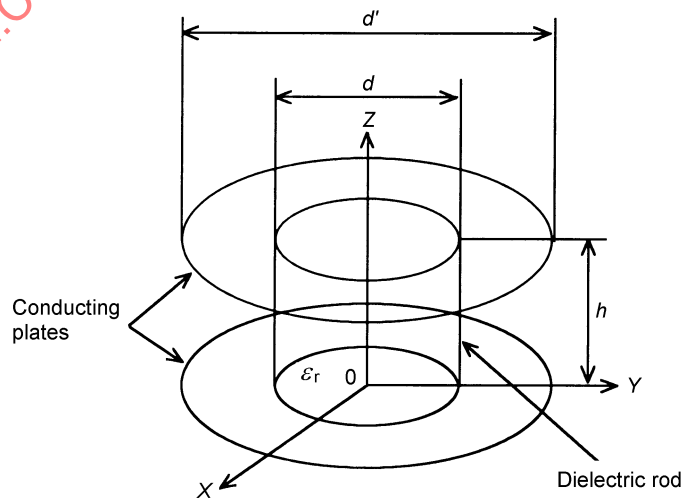
The applicable measuring ranges of dielectric properties for this method are the following:

- frequency: $2 \text{ GHz} < f < 20 \text{ GHz}$;
- relative permittivity: $5 < \varepsilon' < 500$;
- loss factor: $10^{-5} < \tan \delta < 10^{-2}$.

3 Theory and calculation equations

3.1 Relative permittivity and loss factor

Figure 1 shows the configuration of the TE_{0ml} mode resonator. A cylindrical dielectric rod is short-circuited at both ends by the two parallel conducting plates, thus constituting a resonator. The values ε' and $\tan \delta$ of this resonator are calculated from the measured resonance frequency (f_0) and unloaded quality factor (Q_u) of the TE_{0ml} mode resonance: TE_{011} , TE_{012} and TE_{013} modes are commonly used.



IEC 1574/99

Figure 1 – Configuration of a cylindrical dielectric rod resonator short-circuited at both ends by two parallel conducting plates

La permittivité relative ε' est calculée en utilisant la fréquence de résonance mesurée, le diamètre d et la hauteur h du spécimen diélectrique*.

La longueur d'onde en résonance dans le vide λ_0 et la longueur d'onde guidante dans la ligne en transmission diélectrique λ_g sont données par les équations suivantes:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}, \quad \lambda_g = \frac{2h}{\ell}, \quad \ell = 1, 2 \dots \quad (7)$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide ($c = 2,9979 \times 10^8$ m/s).

La valeur v^2 est ensuite calculée à partir de λ_0 et λ_g comme suit:

$$v^2 = \left(\frac{\pi d}{\lambda_0} \right)^2 \left[\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g} \right)^2 - 1 \right] \quad (8)$$

En utilisant la valeur v^2 , la valeur u^2 est donnée par l'équation transcendente suivante:

$$u \frac{J_0(u)}{J_1(u)} = -v \frac{K_0(v)}{K_1(v)} \quad (9)$$

où $J_n(u)$ est la fonction de Bessel de la première sorte et $K_n(v)$ est la fonction de Bessel modifiée de la deuxième sorte. Pour chaque valeur de v , la m ème solution u existe entre u_{0m} et u_{1m} , où $J_0(u_{0m}) = 0$ et $J_1(u_{1m}) = 0$. La première solution ($m = 1$) est illustrée à la figure 2 par la courbe A.

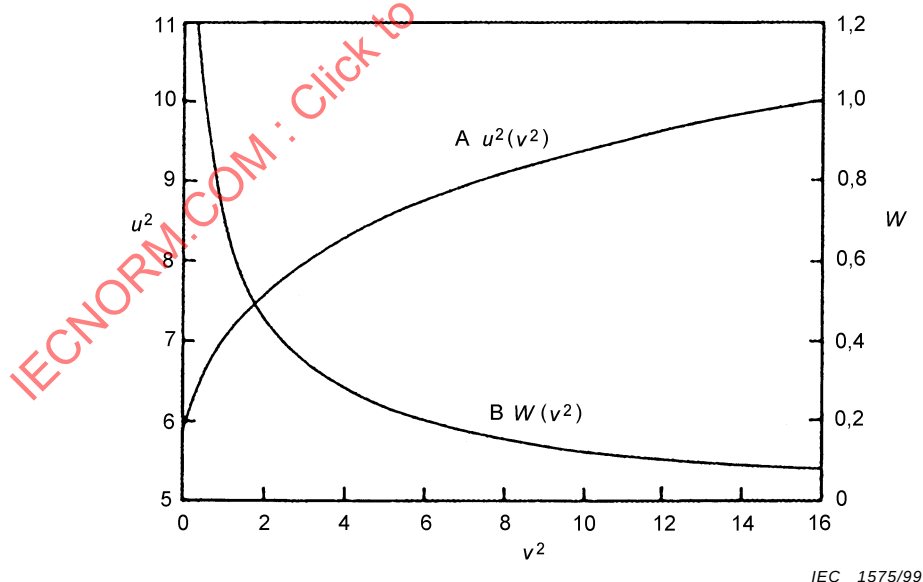


Figure 2 – Diagramme de calcul de la permittivité relative utilisant le mode $TE_{01\ell}$

* Dans le texte suivant de cette norme, la hauteur est identique à la longueur, parce que le barreau à mesurer est placé verticalement dans le montage de mesure.

The relative permittivity ε' is calculated using the measured resonance frequency, the diameter d and the height h of the dielectric specimen*.

The free space resonance wavelength λ_0 and the guiding wavelength in the dielectric transmission line λ_g are given by the following equations:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}, \quad \lambda_g = \frac{2h}{\ell}, \quad \ell = 1, 2, \dots \quad (7)$$

where c is the velocity of light in a vacuum ($c = 2,9979 \times 10^8$ m/s).

The value v^2 is calculated next from λ_0 and λ_g :

$$v^2 = \left(\frac{\pi d}{\lambda_0} \right)^2 \left[\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g} \right)^2 - 1 \right] \quad (8)$$

Using the value v^2 , the value u^2 is given by the following transcendental equation:

$$u \frac{J_0(u)}{J_1(u)} = -v \frac{K_0(v)}{K_1(v)} \quad (9)$$

where $J_n(u)$ is the Bessel function of the first kind and $K_n(v)$ is the modified Bessel function of the second kind. For any value of v , the m th solution u exists between u_{0m} and u_{1m} , where $J_0(u_{0m}) = 0$ and $J_1(u_{1m}) = 0$. The first solution ($m = 1$) is shown in figure 2 by curve A.

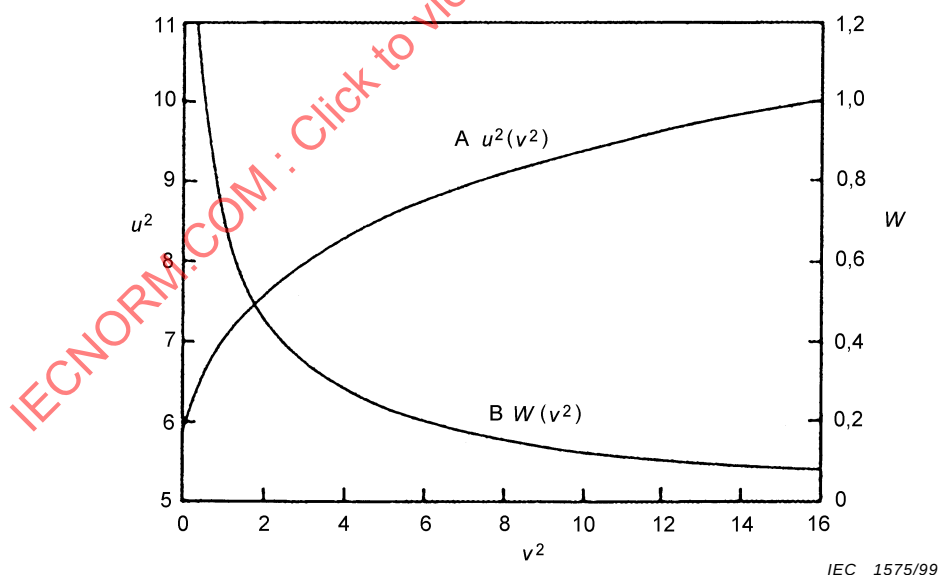


Figure 2 – Chart for relative permittivity calculation using $TE_{01\ell}$ mode

* In the following text of this standard, the height is identical with the length, because the bar to be measured is placed vertically in the measuring fixture.

La permittivité relative est calculée à partir de v^2 et u^2 :

$$\varepsilon' = \left(\frac{\lambda_0}{\pi d} \right)^2 (u^2 + v^2) + 1 \quad (10)$$

Dans le calcul qui suit, $\tan \delta$ est donné à partir de la valeur mesurée de Q à vide:

$$\tan \delta = \frac{A}{Q_u} - BR_s = \frac{A}{Q_u} - \frac{B'}{\sqrt{\sigma_r}} \quad (11)$$

où

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma_0 \sigma_r}} = 0,825 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{f_0}{\sigma_r}} \quad (12)$$

R_s étant exprimé en ohms (Ω) et f_0 en gigahertz (GHz)

$$\sigma_r = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \quad (13)$$

$$A = 1 + \frac{W}{\varepsilon'} \quad (14)$$

$$B = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g} \right)^3 \frac{1+W}{30 \pi^2 \varepsilon' \ell}, \quad B' = B \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma_0}} \quad (15)$$

$$W = \frac{J_1^2(u) K_0(v) k_2(v) - K_1^2(v)}{K_1^2(v) J_1^2(u) - J_0(u) J_2(u)} \quad (16)$$

Dans l'équation (12), R_s et σ sont respectivement la résistance de la surface et la conductivité des lames conductrices. La conductivité relative σ_r a été définie dans l'équation (13) comme étant le rapport de la conductivité mesurée sur la conductivité du cuivre cuit selon la norme internationale σ_0 ($\sigma_0 = 5,8 \times 10^7$ S/m à 20 °C). σ_r est utilisé à la place de R_s parce que σ_r ne dépend pas de la fréquence.

La constante ($0,825 \times 10^{-2}$) dans l'équation (12) est calculée à partir de la valeur $\sigma_0 = 5,8 \times 10^7$ S/m et la constante magnétique $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$ H/m, étant donné que μ est égal à μ_0 dans un spécimen diélectrique non magnétique.

La fonction W/ε' est égale au rapport de l'énergie du champ électrique stockée à l'extérieur sur l'énergie à l'intérieur du barreau diélectrique. Si toute l'énergie du champ électrique est concentrée à l'intérieur du barreau diélectrique, la valeur de W est égale à zéro. Le résultat calculé de la relation $W - v$ pour $m = 1$ de la résonance en mode $TE_{0m\ell}$ est illustré à la figure 2 par la courbe B.

The relative permittivity is calculated from v^2 and u^2 :

$$\varepsilon' = \left(\frac{\lambda_0}{\pi d} \right)^2 (u^2 + v^2) + 1 \quad (10)$$

In the following, $\tan \delta$ is given from the measured unloaded Q :

$$\tan \delta = \frac{A}{Q_u} - BR_s = \frac{A}{Q_u} - \frac{B'}{\sqrt{\sigma_r}} \quad (11)$$

where

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma_0 \sigma_r}} = 0,825 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{f_0}{\sigma_r}} \quad (12)$$

R_s being expressed in ohms (Ω) and f_0 in gigahertz (GHz)

$$\sigma_r = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \quad (13)$$

$$A = 1 + \frac{W}{\varepsilon'} \quad (14)$$

$$B = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g} \right)^3 \frac{1+W}{30 \pi^2 \varepsilon' \ell}, \quad B' = B \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma_0}} \quad (15)$$

$$W = \frac{J_1^2(u) K_0(v) k_2(v) - K_1^2(v)}{K_1^2(v) J_1^2(u) - J_0(u) J_2(u)} \quad (16)$$

In equation (12), R_s and σ are the surface resistance and the conductivity of conducting plates, respectively. The relative conductivity σ_r , defined in equation (13), is the ratio of the measured conductivity to the conductivity of the international standard annealed copper σ_0 ($\sigma_0 = 5,8 \times 10^7$ S/m at 20 °C). σ_r is used instead of R_s because σ_r is independent of frequency.

The constant ($0,825 \times 10^{-2}$) in equation (12) is calculated from the value $\sigma_0 = 5,8 \times 10^7$ S/m and the magnetic constant $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$ H/m since μ equals μ_0 in a non-magnetic dielectric specimen.

The function W/ε' equals the ratio of the electric-field energy stored outside to that inside the dielectric rod. If all of the electric field energy is concentrated inside the dielectric rod, the value W equals zero. The computed result of the $W - v$ relation for $m = 1$ of the $TE_{0m\ell}$ mode resonance is shown in figure 2 by curve B.

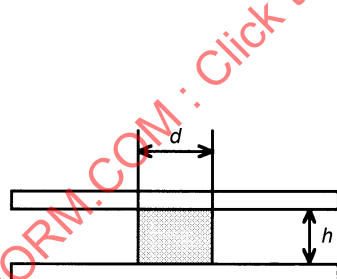
3.2 Détermination de la conductivité relative des lames conductrices

Comme l'équation (11) le montre, la valeur effective de R_s ou σ_r des lames conductrices, qui sont habituellement fabriquées en argent ou en cuivre, doit être déterminée avant la détermination de $\tan \delta$. La précision de la valeur de σ_r mesurée est primordiale pour la détermination de $\tan \delta$, parce que les termes (A/Q_u) et $(B'/\sqrt{\sigma_r})$ ont le même ordre de grandeur pour un spécimen diélectrique aux faibles pertes avec $\tan \delta$ de l'ordre de 10^{-4} .

La valeur effective de σ_r des lames conductrices doit être mesurée non en courant continu, mais aux hyperfréquences compte tenu de l'effet de peau sur la conductivité. Pour mesurer σ_r , deux spécimens qui sont appelés résonateurs diélectriques normalisés ayant la forme d'un barreau sont utilisés. Comme la figure 3 le montre, ces deux barreaux ont le même diamètre, mais des hauteurs différentes. Les hauteurs des barreaux sont telles que la hauteur d'un barreau est égale à ℓ fois la hauteur de l'autre; habituellement ℓ est égal à trois. Ces barreaux sont coupés dans un barreau diélectrique cylindrique et ont les mêmes valeurs de ϵ' et de $\tan \delta$.

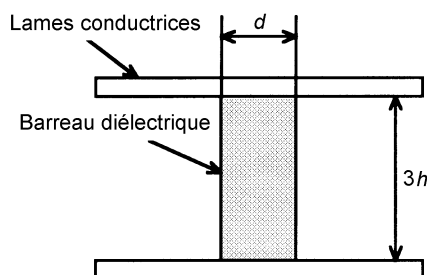
La figure 3 illustre la configuration des résonateurs diélectriques normalisés ayant la forme d'un barreau pour le cas où $\ell = 3$. La fréquence de résonance et le facteur de qualité à vide du mode TE_{011} sont mesurés en utilisant le barreau le plus court et ceux du mode $TE_{01\ell}$ sont mesurés en utilisant le barreau le plus haut. Nous désignons f_0 et Q_u pour chaque résonateur en utilisant les indices 1 et ℓ , respectivement: f_{01} et Q_{u1} pour le barreau le plus court et $f_{0\ell}$ et $Q_{u\ell}$ pour le barreau le plus haut.

Lorsque le barreau le plus haut est exactement égal à ℓ fois le barreau le plus court, $f_{0\ell}$ coïncide avec f_{01} . Cependant, $Q_{u\ell}$ est plus élevé que Q_{u1} du fait des pertes des conducteurs différentes sur les plaques conductrices.



IEC 1576/99

Figure 3a – Résonance de mode TE_{011}



IEC 1577/99

Figure 3b – Résonance de mode TE_{013}

Figure 3 – Configuration des résonateurs diélectriques normalisés en barreau pour la mesure de la conductivité des lames conductrices

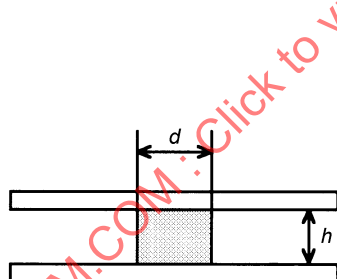
3.2 Determination of the relative conductivity of conducting plates

As equation (11) shows, the effective value of R_s or σ_r of the conducting plates, which are commonly made of silver or copper, shall be determined in advance of the calculation of $\tan \delta$. The accuracy of measured σ_r has vital importance in the determination of $\tan \delta$ because the terms (A/Q_u) and $(B'/\sqrt{\sigma_r})$ have the same order of magnitude for a low-loss dielectric specimen with $\tan \delta$ in the order of 10^{-4} .

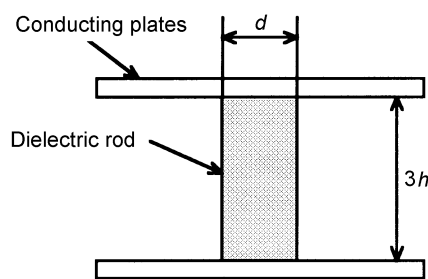
The effective value of σ_r of the conducting plates shall be measured not at direct current but at microwave frequencies due to the skin effect on conductivity. In order to measure σ_r , two dielectric rod samples which are called standard dielectric rod resonators are used. As figure 3 shows, these two rods have the same diameter but different heights. The rod heights are such that one rod is ℓ times the height of the other; ℓ is commonly set equal to three. The rod heights are cut from one cylindrical dielectric rod and have the same values of ϵ' and $\tan \delta$.

Figure 3 shows the configuration of the standard dielectric rod resonators in the case of $\ell = 3$. The resonance frequency and unloaded Q of the TE_{011} mode are measured using the shorter rod, and those of the $TE_{01\ell}$ mode are measured using the higher rod. We denote the f_0 and Q_u for each resonator by using the subscripts 1 and ℓ , respectively: f_{01} and Q_{u1} for the shorter rod, and $f_{0\ell}$ and $Q_{u\ell}$ for the higher rod.

When the higher rod is precisely ℓ times higher than the shorter rod, $f_{0\ell}$ coincides with f_{01} . But $Q_{u\ell}$ is higher than Q_{u1} according to the different magnitude of conductor loss on the conducting plates.



IEC 1576/99

Figure 3a – TE_{011} mode resonance

IEC 1577/99

Figure 3b – TE_{013} mode resonance

Figure 3 – Configuration of standard dielectric rod resonators for measurement of conductivity of conducting plates

A cause du fait que les deux barreaux diélectriques ont la même valeur de $\tan \delta$, l'équation (11) donne

$$R_s = 30 \pi^2 \left(\frac{\lambda_g}{\lambda_0} \right)^3 \frac{\varepsilon' + W}{1 + W} \frac{\ell}{\ell - 1} \left(\frac{1}{Q_{u1}} - \frac{1}{Q_{u\ell}} \right) \quad (17)$$

et, à partir de l'équation (12), σ_r est obtenu comme

$$\sigma_r = \left(\frac{0,825 \times 10^{-2}}{R_s} \right)^2 f_0 \quad (18)$$

où f_0 est exprimé en gigahertz (GHz).

Comme le montre l'équation (12), R_s^2 est proportionnel à la fréquence. Ainsi, la valeur de σ_r dans l'équation (18) ne dépend pas de la fréquence. Bien que la valeur réelle de σ_r ait une petite dépendance de la fréquence due à l'inégalité de la surface des lames, elle est considérée comme négligeable dans la gamme de mesures de la fréquence.

Après la mesure de σ_r , les valeurs f_0 et Q_u du mode TE_{011} sont mesurées pour les spécimens en essai et leur $\tan \delta$ est calculé à partir de l'équation (11).

NOTE – La valeur de $\tan \delta$ des résonateurs diélectriques normalisés en barreau peut être calculée en substituant l'équation (17) dans l'équation (11):

$$\tan \delta = \frac{A}{\ell - 1} \left(\frac{\ell}{Q_{u\ell}} - \frac{1}{Q_{u1}} \right) \quad (19)$$

3.3 Coefficient de température de la fréquence de résonance

Lorsque de petits changements linéaires $\Delta \varepsilon'$, Δd , Δh et Δf_0 sont causés par un changement de température ΔT d'un résonateur en mode TE_{011} , l'équation suivante est dérivée de l'équation (10):

$$TC\varepsilon = -2 \left(1 + \frac{W}{\varepsilon'} \right) (TCF + \alpha) \quad (20)$$

où $TC\varepsilon$ et TCF sont les coefficients de température de ε' et f_0 , et α est le coefficient de dilatation thermique du spécimen diélectrique qui est supposé être isotrope.

$$TC\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon'} \frac{\Delta \varepsilon'}{\Delta T}, \quad TCF = \frac{1}{f_0} \frac{\Delta f_0}{\Delta T}, \quad \alpha = \frac{1}{h} \frac{\Delta h}{\Delta T} = \frac{1}{d} \frac{\Delta d}{\Delta T} \quad (21)$$

Lorsque les spécimens diélectriques ont une valeur de ε' élevée et des dimensions approximativement égales à $d/h = 2$, la plus grande partie de l'énergie du champ électrique est localisée à l'intérieur du barreau. En conséquence, W/ε' a une petite valeur, au voisinage de 0,01, et l'équation (20) peut être approximée à l'équation de définition (3):

$$TCF = -\frac{1}{2} TC\varepsilon - \alpha$$

Owing to the fact that both dielectric rods have the same $\tan \delta$ value, equation (11) yields

$$R_s = 30 \pi^2 \left(\frac{\lambda_g}{\lambda_0} \right)^3 \frac{\epsilon' + W}{1 + W} \frac{\ell}{\ell - 1} \left(\frac{1}{Q_{u1}} - \frac{1}{Q_{u\ell}} \right) \quad (17)$$

and, from equation (12), σ_r is obtained as

$$\sigma_r = \left(\frac{0,825 \times 10^{-2}}{R_s} \right)^2 f_0 \quad (18)$$

where f_0 is expressed in gigahertz (GHz).

As shown in equation (12), R_s^2 is in proportion to frequency. Hence, the value of σ_r in equation (18) is independent of frequency. Although the actual σ_r has a small dependence on frequency due to the surface roughness of the plates, it is considered to be negligible within the measurement frequency range.

Following the measurement of σ_r , the values f_0 and Q_u of TE_{011} mode are measured for the test specimens and their $\tan \delta$ is calculated from equation (11).

NOTE – The $\tan \delta$ of the standard dielectric rod resonators can be calculated by substituting equation (17) into equation (11):

$$\tan \delta = \frac{A}{\ell - 1} \left(\frac{\ell}{Q_{u1}} - \frac{1}{Q_{u\ell}} \right) \quad (19)$$

3.3 Temperature coefficient of resonance frequency

When small linear changes $\Delta \epsilon'$, Δd , Δh and Δf_0 are caused by a temperature change ΔT on a TE_{011} mode resonator, the following equation is derived from equation (10):

$$TC \epsilon = -2 \left(1 + \frac{W}{\epsilon'} \right) (TCF + \alpha) \quad (20)$$

where $TC \epsilon$ and TCF are the temperature coefficients of ϵ' and f_0 , and α is the coefficient of thermal expansion of the dielectric specimen which is assumed to be isotropic.

$$TC \epsilon = \frac{1}{\epsilon'} \frac{\Delta \epsilon'}{\Delta T}, \quad TCF = \frac{1}{f_0} \frac{\Delta f_0}{\Delta T}, \quad \alpha = \frac{1}{h} \frac{\Delta h}{\Delta T} = \frac{1}{d} \frac{\Delta d}{\Delta T} \quad (21)$$

When dielectric specimens have a high ϵ' and dimensions around $d/h = 2$, the greater part of the electric field energy is concentrated inside the rod. Consequently, W/ϵ' has a small value, around 0,01, and equation (20) can be approximated to the definition equation (3):

$$TCF = -\frac{1}{2} TC \epsilon - \alpha$$

En général, la valeur de TCF est déterminée par l'équation suivante:

$$TCF = \frac{1}{f_{\text{ref}}} \frac{f_T - f_{\text{ref}}}{T - T_{\text{ref}}} \times 10^6 \quad (1 \times 10^{-6}/K) \quad (22)$$

où f_T et f_{ref} sont les fréquences de résonance à la température T et à la température de référence T_{ref} (T_{ref} entre 20 °C et 25 °C).

Comme le montre la figure 4a, un matériau diélectrique ne présente pas nécessairement une dépendance en température de la fréquence de résonance qui soit linéaire. Pour exprimer cette dépendance en température non linéaire de la fréquence de résonance, l'équation quadratique suivante est souvent utilisée:

$$\frac{f_T - f_{\text{ref}}}{f_{\text{ref}}} = TCF' (T - T_{\text{ref}}) + TCF'' (T - T_{\text{ref}})^2 \quad (23)$$

où TCF' et TCF'' sont les coefficients de température de la fréquence de résonance de premier et de deuxième ordre.

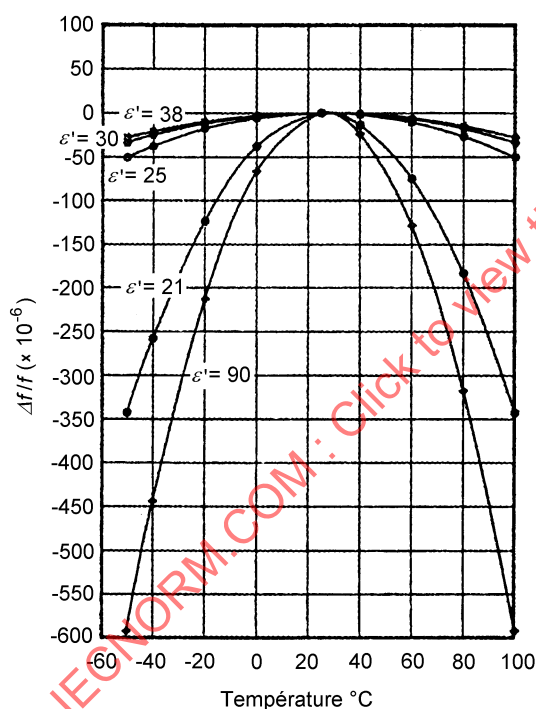


Figure 4a – f_0

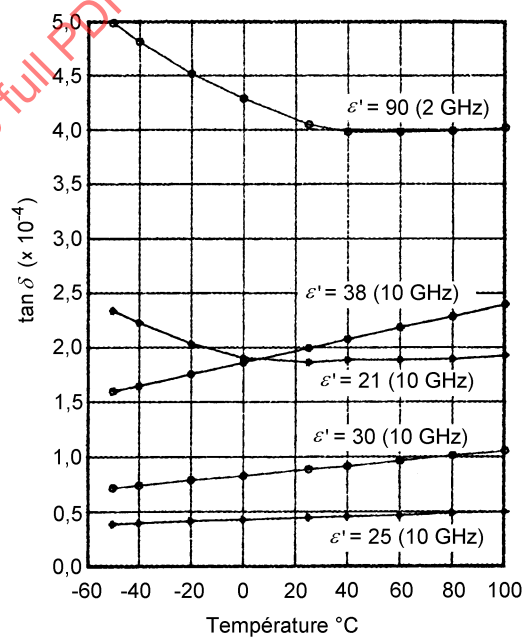


Figure 4b – $\tan \delta$

Figure 4 – Dépendance en température de f_0 (figure 4a) et $\tan \delta$ (figure 4b) pour cinq sortes de matériaux diélectriques ($\epsilon' = 21, 25, 30, 38$ et 90)

Les valeurs de TCF' et TCF'' peuvent être calculées à partir des fréquences de résonance mesurées aux trois températures T_{basse} , T_{ref} et $T_{\text{élevée}}$.

Generally, the value of TCF is determined by the following equation:

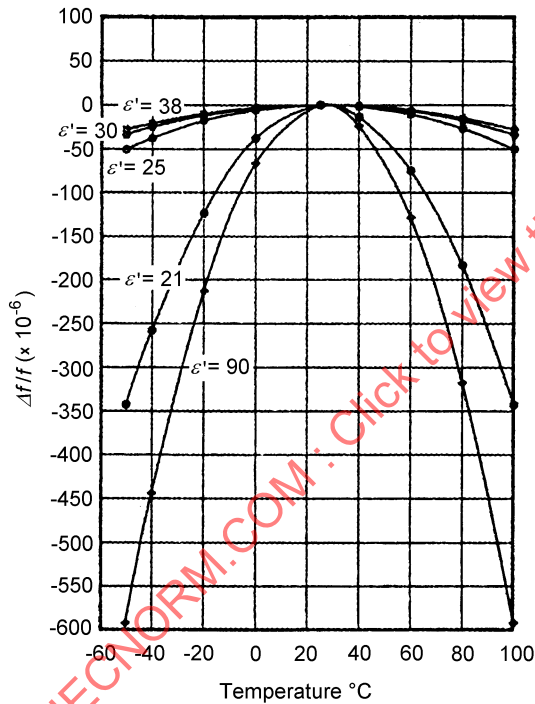
$$TCF = \frac{1}{f_{\text{ref}}} \frac{f_T - f_{\text{ref}}}{T - T_{\text{ref}}} \times 10^6 \quad (1 \times 10^{-6}/\text{K}) \quad (22)$$

where f_T and f_{ref} are the resonance frequencies at temperature T and at the reference temperature T_{ref} ($T_{\text{ref}} = 20^\circ\text{C}$ to 25°C).

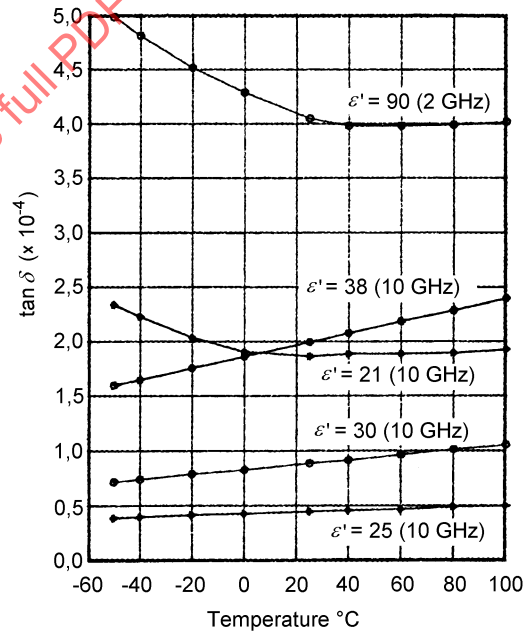
As figure 4a shows, a dielectric material does not necessarily exhibit a linear dependence of resonance frequency on temperature. In order to express this non-linear temperature dependence of resonance frequency, the following quadratic equation is often used:

$$\frac{f_T - f_{\text{ref}}}{f_{\text{ref}}} = TCF' (T - T_{\text{ref}}) + TCF'' (T - T_{\text{ref}})^2 \quad (23)$$

where TCF' and TCF'' are the first and the second order temperature coefficients of resonance frequency.



IEC 1578/99

Figure 4a – f_0 

IEC 1579/99

Figure 4b – $\tan \delta$

Figure 4 – Temperature dependence of f_0 (figure 4a) and $\tan \delta$ (figure 4b) for five kinds of dielectrics ($\epsilon' = 21, 25, 30, 38$ and 90)

The values TCF' and TCF'' can be calculated from the measured resonance frequencies at the three temperatures T_{low} , T_{ref} and T_{high} .

3.4 Dépendance en température de $\tan \delta$

La dépendance en température de $\tan \delta$ est obtenue en mesurant f_0 et Q_u à différentes températures. Pour le calcul de $\tan \delta$ à chaque température, on doit tenir compte de la dépendance en température de σ_r .

Par exemple, la dépendance entre température et conductivité du cuivre cuit conformément à la norme internationale est donnée comme

$$\sigma_0 = \frac{5,8 \times 10^7}{1 + 3,93 \times 10^{-3} (T - 20)} \quad (24)$$

exprimé en siemens par mètre (S/m).

Lorsque la valeur de σ_r de la lame en cuivre est mesurée à la température de référence, l'approximation de premier ordre de σ_r à la température T (°C) est supposée être la suivante:

$$\sigma_r(T) = \frac{\sigma_r}{1 + 3,93 \times 10^{-3} (T - 20)} \quad (25)$$

exprimé en siemens par mètre (S/m).

4 Préparation du spécimen diélectrique

4.1 Préparation des barreaux diélectriques normalisés

Comme décrit en 3.2, deux barreaux diélectriques sont coupés dans un barreau diélectrique cylindrique. Ces deux barreaux ont le même diamètre et des hauteurs différentes: un barreau est ℓ fois plus haut que l'autre. Le tableau 1 montre quelques exemples des dimensions des barreaux diélectriques normalisés.

Tableau 1 – Exemples de dimensions des barreaux diélectriques normalisés

ϵ'	Diamètre, d mm	Hauteur, h mm	Fréquence de résonance, f_0 GHz
38 barreau court barreau haut	10,0 10,0	4,7 14,1	7,031 (mode TE ₀₁₁) 7,031 (mode TE ₀₁₃)
30 barreau court barreau haut	10,0 10,0	4,7 14,1	7,909 (mode TE ₀₁₁) 7,909 (mode TE ₀₁₃)
25 barreau court barreau haut	10,0 10,0	4,7 14,1	8,658 (mode TE ₀₁₁) 8,658 (mode TE ₀₁₃)

Il est préférable d'utiliser des barreaux diélectriques normalisés avec faible $\tan \delta$ pour arriver à la précision de mesure de σ_r exigée. En conséquence, les matériaux diélectriques pour résonateurs tels que (Zr,Sn)TiO₄ ($\epsilon' = 38$), Ba₂Ti₉O₂₀ ($\epsilon' = 38$), Ba(Zn,Ta)O₃ ($\epsilon' = 30$) ou Ba(Mg,Ta)O₃ ($\epsilon' = 25$) sont recommandés, parce qu'ils ont de faibles $\tan \delta$ et des TCF de $0 \times 10^{-6}/K$.

Pour minimiser l'erreur sur la mesure de σ_r des lames conductrices, les deux extrémités des deux barreaux doivent être polies parallèlement l'une à l'autre et perpendiculairement à l'axe.

3.4 Temperature dependence of $\tan \delta$

The temperature dependence of $\tan \delta$ is obtained by measuring f_0 and Q_u at various temperatures. For the calculation of $\tan \delta$ at each temperature, the temperature dependence of σ_r shall be taken into account.

For example, the temperature dependence on the conductivity of the annealed copper in conformity with the international standard is given as

$$\sigma_0 = \frac{5,8 \times 10^7}{1 + 3,93 \times 10^{-3} (T - 20)} \quad (24)$$

expressed in siemens per metre (S/m).

When the σ_r of the copper plate at the reference temperature is measured, the first order approximation of σ_r at temperature T (°C) is assumed to be:

$$\sigma_r(T) = \frac{\sigma_r}{1 + 3,93 \times 10^{-3} (T - 20)} \quad (25)$$

expressed in siemens per metre (S/m).

4 Preparation of dielectric specimen

4.1 Preparation of standard dielectric rods

As described in 3.2, two dielectric rods are cut from one cylindrical dielectric rod. These two rods have the same diameter and different heights: one has a height ℓ times higher than the other. Table 1 shows some examples of dimensions for standard dielectric rods.

Table 1 – Examples of dimensions for standard dielectric rods

ϵ'	Diameter, d mm	Height, h mm	Resonance frequency, f_0 GHz
38 short rod high rod	10,0 10,0	4,7 14,1	7,031 (TE ₀₁₁ mode) 7,031 (TE ₀₁₃ mode)
30 short rod high rod	10,0 10,0	4,7 14,1	7,909 (TE ₀₁₁ mode) 7,909 (TE ₀₁₃ mode)
25 short rod high rod	10,0 10,0	4,7 14,1	8,658 (TE ₀₁₁ mode) 8,658 (TE ₀₁₃ mode)

It is preferable to use standard dielectric rods with a low $\tan \delta$ to achieve the requisite measurement accuracy of σ_r . Consequently, dielectric resonator materials such as (Zr,Sn)TiO₄ ($\epsilon' = 38$), Ba₂Ti₉O₂₀ ($\epsilon' = 38$), Ba(Zn,Ta)O₃ ($\epsilon' = 30$) or Ba(Mg,Ta)O₃ ($\epsilon' = 25$) are recommended as they have both a low $\tan \delta$ and a TCF of $0 \times 10^{-6}/K$.

In order to minimize the measurement error in σ_r of the conducting plates, both ends of the two rods shall be polished parallel to each other and perpendicular to the axis.

4.2 Préparation du spécimen pour la mesure

Pour la mesure de la permittivité relative, le mode TE_{011} est habituellement utilisé. Puisque la fréquence de résonance est fonction de ε' et des dimensions du spécimen diélectrique, le diamètre et la hauteur du spécimen doivent être choisis de façon que la valeur de f_0 désirée soit obtenue.

La figure 5 illustre le graphique de mode du résonateur diélectrique court-circuité aux deux extrémités par des lames conductrices parallèles. A partir de la courbe du mode TE_{011} de la figure, la valeur de ε' (d/λ_0)² peut être déterminée pour chaque valeur de $(d/h)^2$. Lorsque la valeur de $(d/h)^2$ est, par exemple, égale à 4, ε' (d/λ_0)² est égal à 1,9. Ainsi, la valeur de f_0 du mode TE_{011} pour les spécimens diélectriques ayant la dimension $d/h = 2$ est calculée à partir de l'équation suivante en spécifiant d et la valeur ε' espérée:

$$\varepsilon' (d/\lambda_0)^2 = \varepsilon' (d \times f_0/c)^2 = 1,9 \quad (26)$$

Le tableau 2 donne quelques résultats calculés en utilisant cette méthode.

Tableau 2 – Exemple de la fréquence de résonance en mode TE_{011} pour différents ε' et différentes dimensions d'un spécimen diélectrique

ε'	Diamètre, d mm	Hauteur, h mm	f_0 GHz	Diamètre, d mm	Hauteur, h mm	f_0 GHz
20	10,0	5,0	9,2	5,0	2,5	18,4
40	10,0	5,0	6,5	5,0	2,5	13,1
60	10,0	5,0	5,3	5,0	2,5	10,7
80	10,0	5,0	4,6	5,0	2,5	9,2
100	10,0	5,0	4,1	5,0	2,5	8,2

La figure 5 montre aussi que le mode de résonance TE_{011} n'a pas de couplage avec le mode TM ou le mode HE lorsque la valeur de d/h est dans la région de 0,8 à 1,2 ou de 1,8 à 2,3. Puisque le couplage entre le mode TE_{011} et d'autres modes entraîne la détérioration de Q à vide, il convient que le spécimen diélectrique satisfasse à cette condition dimensionnelle. La région de $d/h = 1,8$ à 2,3 est habituellement utilisée pour la mesure.

De la manière analogue à celle décrite pour les barreaux diélectriques normalisés, il convient que les deux extrémités du spécimen soient polies parallèlement et perpendiculairement à l'axe.

5 Équipement et appareil de mesure

5.1 Équipement de mesure

La figure 6 donne un diagramme synoptique de l'équipement nécessaire pour la mesure aux hyperfréquences. La puissance provenant d'une source d'hyperfréquences convenable telle qu'un oscillateur en dents de scie synthétisé est fournie à un circuit en dérivation. Une moitié de la puissance passe à travers un détecteur et vers un analyseur de réseaux, et l'autre moitié de la puissance passe vers le spécimen diélectrique fixé dans l'appareil de mesure. Cette dernière puissance transmise est détectée et comparée avec la première puissance, et ensuite indiquée sur l'analyseur de réseaux.

4.2 Preparation of test specimen

The TE₀₁₁ mode is commonly used for the measurement of relative permittivity. As the resonance frequency is a function of ε' and of the dimensions of the dielectric specimen, the diameter and height of the specimen shall be selected such that the desired f_0 is obtained.

Figure 5 shows the mode chart of the dielectric resonator short-circuited at both ends by parallel conducting plates. From the curve of TE₀₁₁ mode in the figure, the value of $\varepsilon' (d/\lambda_0)^2$ can be determined for each $(d/h)^2$ value. When the value $(d/h)^2$ equals 4, for example, the value of $\varepsilon' (d/\lambda_0)^2$ equals 1,9. Thus, the f_0 of TE₀₁₁ mode for the dielectric specimens with a dimension of $d/h = 2$ is calculated from the following equation by specifying d and the expected ε' of the specimen:

$$\varepsilon' (d/\lambda_0)^2 = \varepsilon' (d \times f_0/c)^2 = 1,9 \quad (26)$$

Table 2 shows some results calculated by this method.

Table 2 – Example of TE₀₁₁ mode resonance frequency for various ε' and dimensions of a dielectric specimen

ε'	Diameter, d mm	Height, h mm	f_0 GHz	Diameter, d mm	Height, h mm	f_0 GHz
20	10,0	5,0	9,2	5,0	2,5	18,4
40	10,0	5,0	6,5	5,0	2,5	13,1
60	10,0	5,0	5,3	5,0	2,5	10,7
80	10,0	5,0	4,6	5,0	2,5	9,2
100	10,0	5,0	4,1	5,0	2,5	8,2

Figure 5 also shows that the TE₀₁₁ resonance mode does not couple with TM or HE mode when the value d/h is in the region of 0,8 to 1,2 or 1,8 to 2,3. Since the coupling between TE₀₁₁ mode and other modes causes the degradation of unloaded Q , the dielectric specimen should satisfy this dimensional condition. The region of $d/h = 1,8$ to 2,3 is usually used for the measurement.

In a similar manner to the procedure described for standard dielectric rods, both ends of the test specimen should be polished parallel and perpendicular to the axis.

5 Measurement equipment and apparatus

5.1 Measurement equipment

Figure 6 shows a schematic diagram of the equipment required for microwave measurement. Power from a suitable microwave source such as a synthesized sweep oscillator is fed to a power splitter. One half of the power passes through a detector and to a network analyzer, and the other half of the power passes to the dielectric specimen fixed in the measurement apparatus. The latter transmitted power is detected and compared with the former power, and then indicated on the network analyzer.

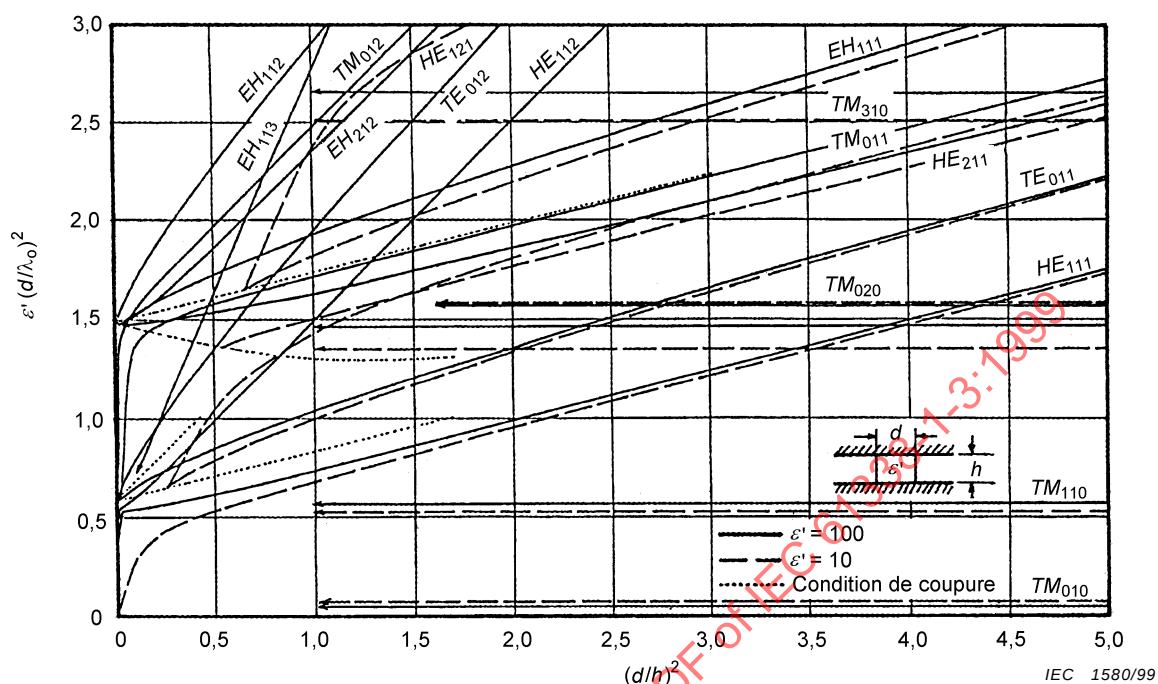


Figure 5 – Graphique de mode d'un résonateur diélectrique en barreau court-circuité aux deux extrémités par des lames conductrices parallèles

Pour la mesure des caractéristiques de température, l'appareil est fixé dans une enceinte thermostatée.

Pour la mesure des propriétés diélectriques, seule l'information sur l'amplitude de la puissance transmise est exigée, c'est-à-dire que l'information concernant la phase de la puissance transmise n'est pas exigée.

5.2 Appareil de mesure de la permittivité complexe

La figure 7 illustre l'appareil de mesure de la permittivité complexe d'un résonateur diélectrique. L'appareil est construit de deux lames conductrices planes et deux câbles semi-rigides. La lame conductrice supérieure peut être déplacée de haut en bas de manière qu'elle puisse être ajustée à la hauteur du spécimen diélectrique. Pour minimiser l'erreur de mesure, les deux lames conductrices doivent être parallèles et il convient que leur diamètre soit environ trois fois plus grand que le diamètre du spécimen diélectrique ($d' > 3d$ à la figure 1).

Le tableau 3 donne un exemple des dimensions et des matériaux recommandés pour la fabrication des lames conductrices. Il est préférable que les lames conductrices aient une conductivité élevée. C'est pour cette raison que les métaux tels que l'argent, le cuivre et d'autres métaux plaqués d'une couche d'argent d'épaisseur supérieure à 5 μm sont souvent utilisés. La surface des lames doit être polie afin d'obtenir un poli optique. Il convient que la rugosité de la surface soit de préférence réduite jusqu'à environ 0,1 μm parce que l'épaisseur de peau du cuivre cuit normalisé est de 0,66 μm à 10 GHz.

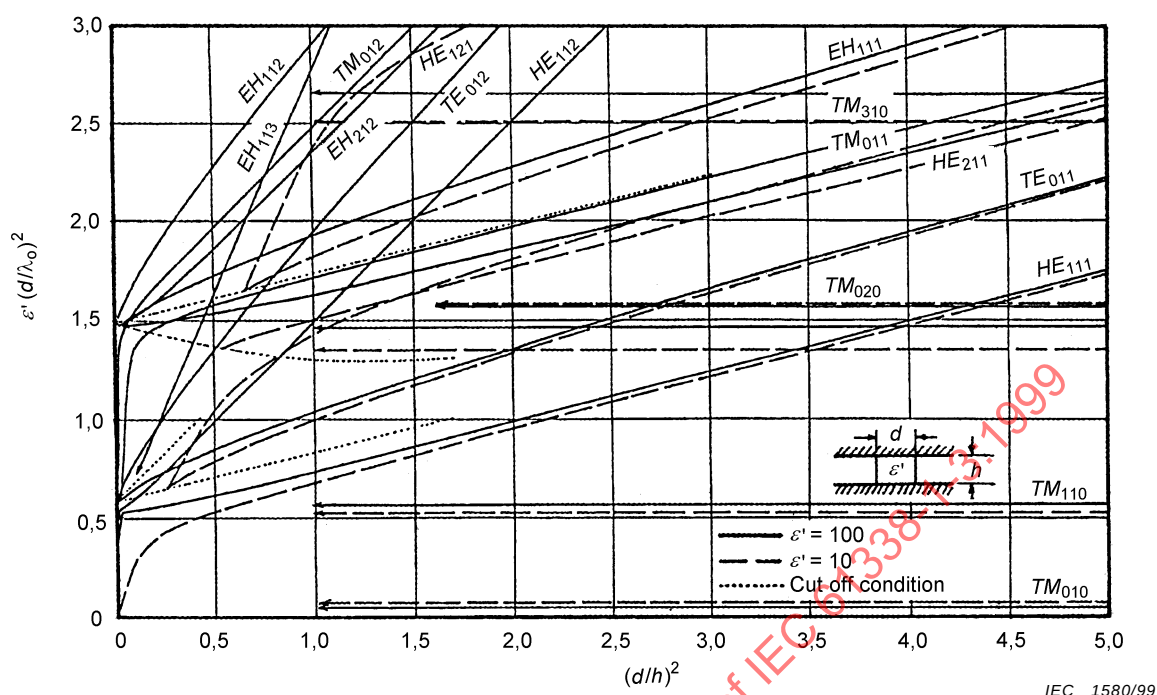


Figure 5 – Mode chart of a dielectric rod resonator short-circuited at both ends by parallel conducting plates

In the case of measurement of temperature properties, the apparatus is fixed in a temperature-controlled oven.

For the measurement of dielectric properties, only the information on the amplitude of transmitted power is needed, that is, the information on the phase of the transmitted power is not required.

5.2 Measurement apparatus for complex permittivity

Figure 7 shows a measurement apparatus of the complex permittivity of a dielectric resonator. The apparatus is made of two flat conducting plates and two semi-rigid cables. The upper conducting plate can be moved up and down so that it can be adjusted to the height of the dielectric specimen. In order to minimize the measurement error, the two conducting plates must be parallel to each other and the diameter should be about three times larger than that of the dielectric specimen ($d' > 3d$ in figure 1).

Table 3 shows an example of the recommended dimensions and materials for the conducting plates. It is preferable that the conducting plates have a high conductivity. Therefore, metals such as silver, copper, and other metals plated by silver with a thickness greater than 5 μm , are often used. The surface of the plates shall be polished to a mirror-like sheen. The surface roughness should preferably be reduced to the order of 0,1 μm because the skin depth of the standard annealed copper is 0,66 μm at 10 GHz.

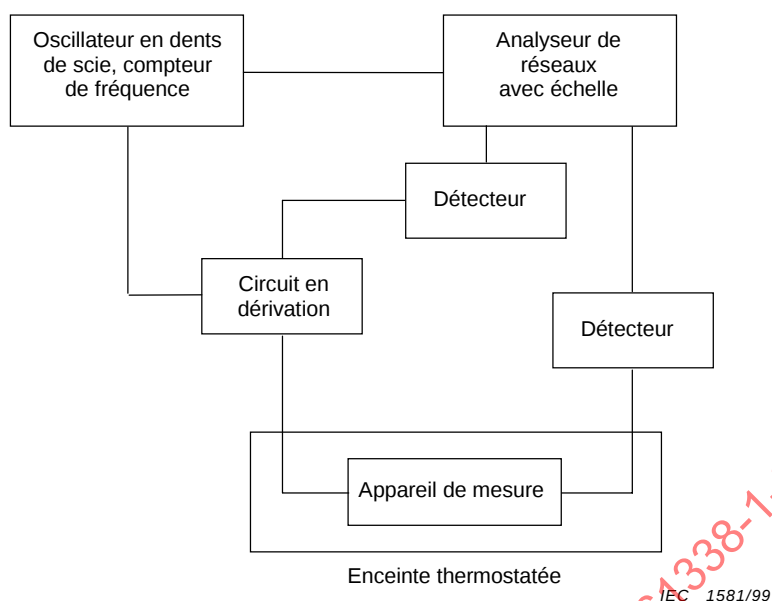


Figure 6 – Diagramme synoptique de l'équipement de mesure

Chacun des deux câbles semi-rigides a une petite boucle en haut, de manière telle que le plan de la boucle est parallèle au plan des lames conductrices. Ces câbles peuvent se déplacer à droite et à gauche pour ajuster l'affaiblissement d'insertion (IA_0) jusqu'à une valeur proche de 30 dB (voir figure 7). La valeur de l'affaiblissement d'insertion doit être choisie supérieure à 20 dB, pour diminuer la perturbation du champ due à la boucle de couplage et inférieure à 40 dB, pour diminuer l'effet de bruit thermique dû à l'analyseur de réseaux. Ainsi, une valeur moyenne de 30 dB est généralement choisie.

Un troisième câble semi-rigide, illustré à la figure 7, est utilisé comme ligne de référence pour mesurer le niveau total de puissance de transmission, c'est-à-dire le niveau de référence. Ce câble a une longueur égale à la somme totale des deux câbles de l'appareil de mesure. Les types de câbles semi-rigides recommandés sont UT-141, UT-85 et UT-47, ayant des diamètres externes de 3,58 mm, 2,20 mm et 1,20 mm, respectivement.

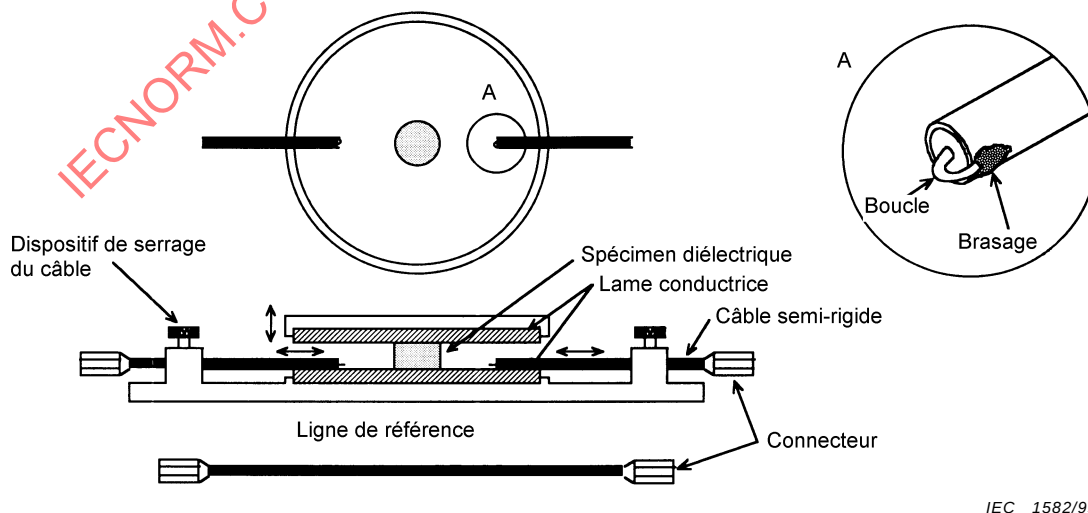


Figure 7 – Appareil pour la mesure de la permittivité complexe

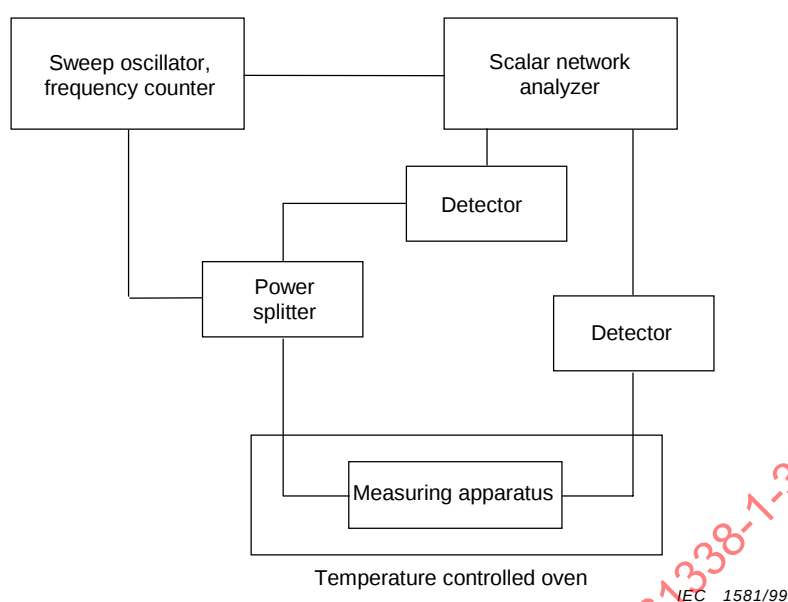


Figure 6 – Schematic diagram of measurement equipment

Each of the two semi-rigid cables has a small loop at the top so that the plane of the loop parallels that of the conducting plates. These cables can move right and left to adjust the insertion attenuation (IA_0) to around 30 dB (figure 7). The IA_0 value shall be selected so as to be greater than 20 dB, in order to decrease the field disturbance due to the coupling loop, and smaller than 40 dB, to decrease the effect of thermal noise due to the network analyzer. Hence, a mean value of 30 dB is generally chosen.

A third semi-rigid cable, shown in figure 7, is used as a reference line to measure the full transmission power level, i.e the reference level. This cable has a length equal to the total sum of the two cables of the measurement apparatus. The recommended types of semi-rigid cables are UT-141, UT-85 and UT-47 with outer diameters of 3,58 mm, 2,20 mm and 1,20 mm, respectively.

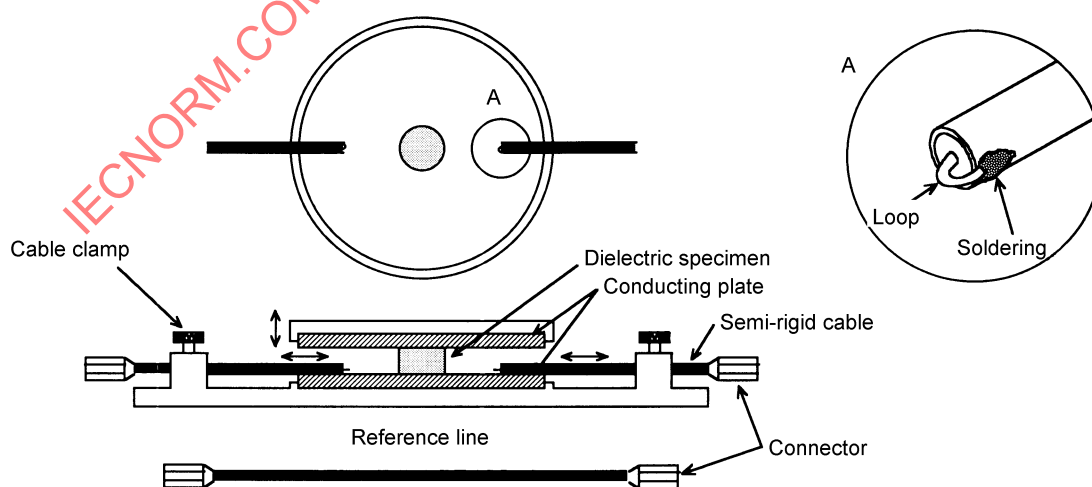


Figure 7 – Measurement apparatus for complex permittivity

Tableau 3 – Dimensions et matériaux recommandés pour la lame conductrice

Diamètre (d')	60 mm à 80 mm (pour spécimens diélectriques avec les dimensions de $d = 5$ mm à 20 mm et $d/h = 0,8$ à $1,2$)
Epaisseur	4 mm à 5 mm
Matériau	Argent, cuivre ou métaux plaqués d'une couche d'argent d'épaisseur supérieure à $5 \mu\text{m}$

5.3 Appareil de mesure du coefficient de température

Un appareil de mesure du coefficient de température de la fréquence de résonance est illustré à la figure 8. Le résonateur diélectrique est court-circuité aux deux extrémités par deux lames conductrices parallèles, la lame du haut étant pressée dans la direction de haut en bas par un ressort. Un ressort en feuille est recommandé pour améliorer la précision de la mesure. Ce type de ressort réduit le frottement entre le ressort et l'autre partie de l'appareil, et permet un mouvement lisse des lames conductrices dû à la dilatation thermique du spécimen essayé.

Lorsque le diamètre des lames conductrices est trois fois plus grand que celui du spécimen diélectrique ($d' > 3d$), le TCF mesuré satisfait approximativement à la relation de l'équation (3).

6 Procédure de mesure

6.1 Procédure de mesure de la permittivité complexe

a) Préparation

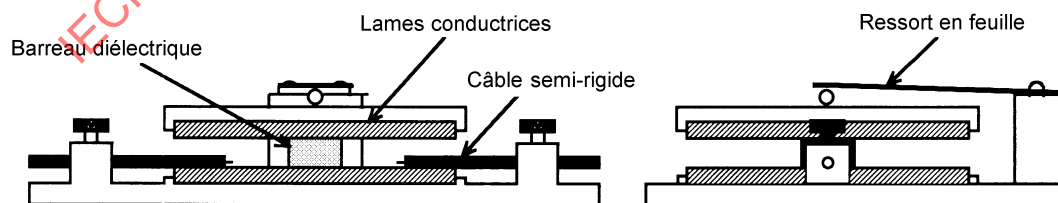
Assembler l'équipement de mesure comme il est indiqué à la figure 6. Tout l'équipement de mesure, le banc de mesure et les spécimens diélectriques doivent être maintenus dans des conditions nettes et sèches, étant donné qu'une humidité élevée dégrade la valeur de Q à vide. De préférence, l'humidité relative doit être inférieure à 60 %.

b) Mesure du niveau de référence

Le niveau de puissance totale de transmission (niveau de référence) est mesuré en premier. Relier la ligne de référence (voir figure 7) entre le circuit en dérivation et le détecteur en utilisant le câble semi-rigide. Mesurer ensuite le niveau de puissance totale de transmission dans la gamme entière des fréquences de mesure.

c) Mesure des barreaux diélectriques normalisés

La fréquence de résonance et le facteur de qualité à vide des modes TE_{011} et TE_{01l} des barreaux diélectriques normalisés sont mesurés de la manière suivante.



IEC 1583/99

Figure 8 – Appareil de mesure du coefficient de température

Connecter l'appareil de mesure entre le circuit en dérivation et le détecteur (voir figure 6). Insérer le barreau diélectrique normalisé le plus court au voisinage du centre des lames conductrices et ajuster la distance entre le barreau diélectrique et chacune des boucles des câbles semi-rigides afin qu'elles soient égales l'une à l'autre, de manière que ce résonateur de type en transmission puisse être sous-couplé de manière égale aux deux boucles.

Table 3 – Recommended dimensions and materials for conducting plate

Diameter (d')	60 mm to 80 mm (for dielectric specimens with dimensions of $d = 5$ mm to 20 mm and $d/h = 0,8$ to 1,2)
Thickness	4 mm to 5 mm
Material	Silver, copper or metals plated by silver thicker than 5 μm

5.3 Measurement apparatus for temperature coefficient

A measurement apparatus for the measurement of the temperature coefficient of resonance frequency is shown in figure 8. The dielectric resonator is short-circuited at both ends by two parallel conducting plates, the upper plate being pressed down by a spring. Use of a plate-type spring is recommended for the improvement of measurement accuracy. This type of spring reduces the friction between the spring and the other part of the apparatus, thus allowing the smooth movement of the conducting plates due to the thermal expansion of the test specimen.

If the diameter of the conducting plates is three times larger than that of the dielectric specimen ($d' > 3d$), the measured TCF approximately satisfies the relation of equation (3).

6 Measurement procedure

6.1 Measurement procedure for complex permittivity

a) Preparation

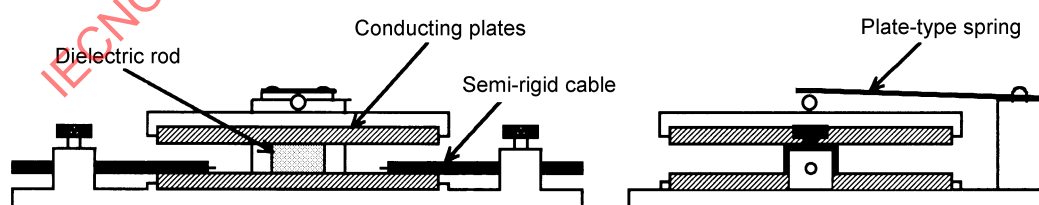
Set up the measurement equipment as shown in figure 6. All measurement equipment, apparatus and dielectric specimens shall be kept in a clean, dry state as high humidity degrades the unloaded Q value. Relative humidity shall, preferably, be less than 60 %.

b) Measurement of reference level

The level of full transmission power (reference level) is measured first. Connect the reference line (figure 7) between the power splitter and the detector using the semi-rigid cable. Then, measure the full transmission power level over the entire measurement frequency range.

c) Measurement of standard dielectric rods

The resonance frequency and unloaded Q of TE_{011} and TE_{01l} modes of the standard dielectric rods are measured as follows.



IEC 1583/99

Figure 8 – Measurement apparatus for temperature coefficient

Connect the measurement apparatus between the power splitter and the detector (figure 6). Insert the shorter standard dielectric rod near the centre of the conducting plates and adjust the distance between the dielectric rod and each of the loops of the semi-rigid cables to be equal to each other, so that this transmission-type resonator can be undercoupled equally to both loops.

Tirer doucement la lame conductrice supérieure jusqu'à ce qu'elle touche la face supérieure du barreau. Faire attention de ne pas endommager la surface des lames conductrices par une pression excessive.

Trouver la crête de résonance du mode TE_{011} de ce résonateur sur l'écran de l'analyseur de réseaux. Comme le montre la figure 9, ce mode peut être détecté comme la deuxième crête aiguë de la partie basse de la gamme des fréquences. Cette crête peut être aussi identifiée comme la crête qui se déplace en fréquence vers le bas, lorsque la lame du haut est lentement séparée de la face supérieure du barreau diélectrique.

Rétrécir la plage de balayage en fréquence sur l'écran de manière que seule la crête du mode TE_{011} puisse être visible sur l'écran (voir figure 10). En changeant la distance entre le spécimen diélectrique et les boucles des câbles semi-rigides, ajuster l'affaiblissement d'insertion (IA_0) de ce mode jusqu'à environ 30 dB à partir du niveau de référence.

Mesurer la fréquence de résonance (f_0) et la largeur de bande de demi-puissance (Δf) de ce mode. Le facteur de qualité chargé de ce résonateur en mode TE_{011} est donné de la manière suivante:

$$Q_L = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (27)$$

et le facteur de qualité à vide est donné de la manière suivante:

$$Q_u = \frac{Q_L}{1 - A_t}, \quad A_t = 10^{-IA_0 \text{ (dB)}/20} \quad (28)$$

La fréquence de résonance f_0 et le facteur Q_u du barreau le plus court sont désignés par f_{01} et Q_{u1} .

De manière analogue, insérer le barreau le plus haut dans l'appareil et mesurer les valeurs $f_{0\ell}$ et $Q_{u\ell}$ de son mode de résonance $TE_{01\ell}$. Lorsque la hauteur du barreau le plus haut est exactement ℓ fois plus haute que celle du barreau le plus court, la valeur $f_{0\ell}$ du mode $TE_{01\ell}$ du barreau le plus haut coïncide avec la valeur f_{01} du mode TE_{011} du barreau le plus court.

Pour améliorer la précision de mesure de la valeur de σ_r des lames conductrices, répéter cette mesure plusieurs fois pour chaque barreau. Calculer ensuite ε' à partir des équations (17) et (18) en utilisant la valeur moyenne de f_{01} , Q_{u1} , $f_{0\ell}$ et $Q_{u\ell}$.

Pull down the upper conducting plate gently to touch the top face of the rod. Be careful not to damage the surface of the conducting plates by excessive pressure.

Find the TE_{011} mode resonance peak of this resonator on the display of the network analyzer. As figure 9 shows, this mode can be detected as the second sharp peak from the lower side of the frequency range. This peak can also be identified as the peak which shifts downward in frequency as the upper plate is slowly separated from the top face of the dielectric rod.

Narrow the frequency span on the display so that only the resonance peak of TE_{011} mode can be shown on it (figure 10). By changing the distance between the dielectric specimen and the loops of the semi-rigid cables, adjust the insertion attenuation (IA_0) of this mode to around 30 dB from the reference level.

Measure the resonance frequency (f_0) and the half-power bandwidth (Δf) of this mode. The loaded Q of this TE_{011} mode resonator is given as:

$$Q_L = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (27)$$

and the unloaded Q as:

$$Q_u = \frac{Q_L}{1 - A_t}, \quad A_t = 10^{-IA_0 \text{ (dB)}/20} \quad (28)$$

The f_0 and Q_u of this shorter rod are described as f_{01} and Q_{u1} .

In a similar way, insert the higher rod in the apparatus and measure the $f_{0\ell}$ and $Q_{u\ell}$ of its $TE_{01\ell}$ resonance mode. When the height of the higher rod is precisely ℓ times greater than that of the shorter rod, the $f_{0\ell}$ of the $TE_{01\ell}$ mode of the higher rod coincides with f_{01} of the TE_{011} mode of the shorter rod.

In order to improve the measurement accuracy for the value σ_r of the conducting plates, repeat this measurement several times for each of the rods. Then, calculate ε' from equations (17) and (18) using the mean value of f_{01} , Q_{u1} , $f_{0\ell}$ and $Q_{u\ell}$.

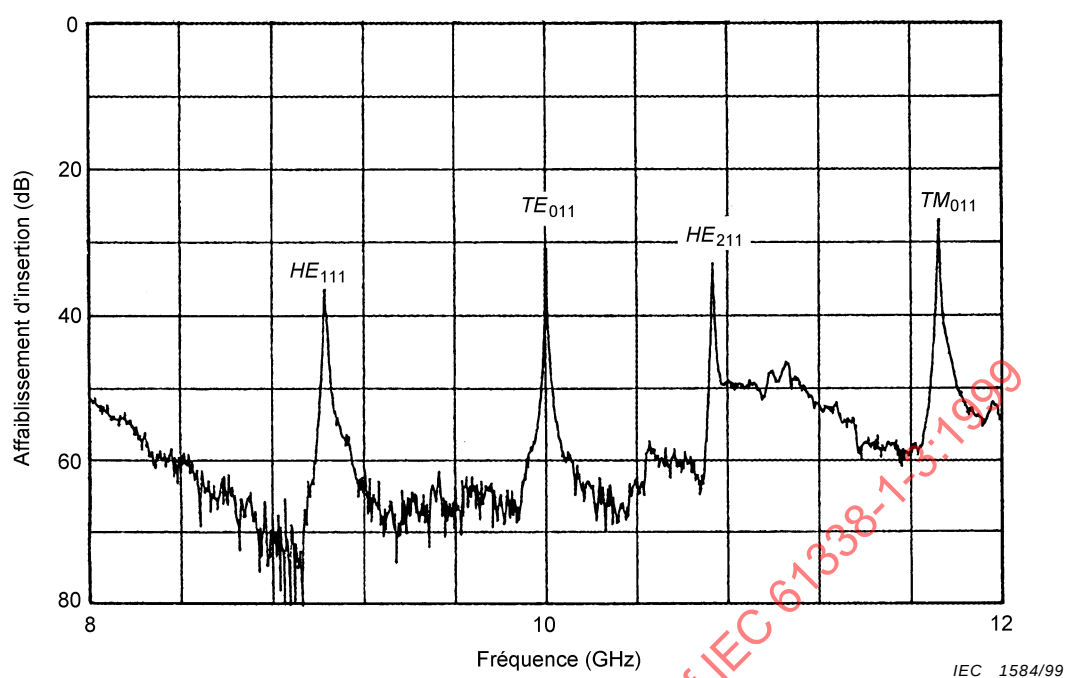


Figure 9 – Réponse en fréquence d'un résonateur en mode TE_{011} ayant $\epsilon' = 37,5$, $d = 8,00$ mm et $h = 3,3$ mm

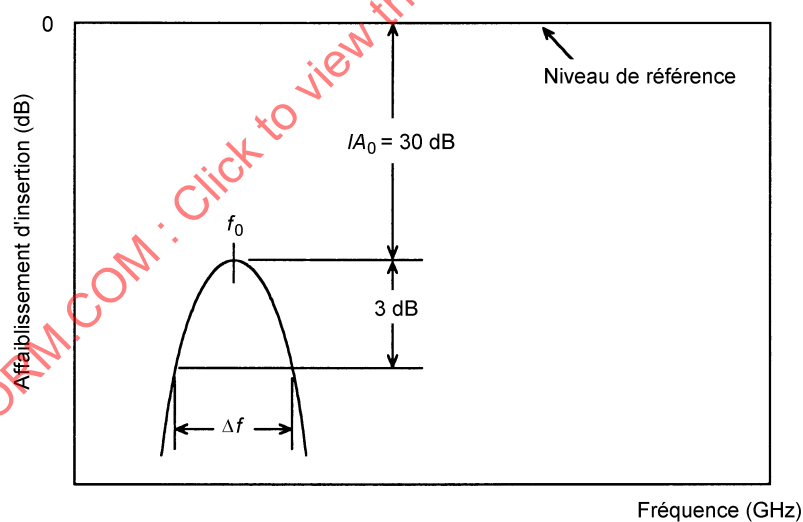


Figure 10 – Affaiblissement d'insertion IA_0 , fréquence de résonance f_0 et largeur de bande à demi-puissance Δf