

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
250**

Première édition
First edition
1969

**Méthodes recommandées pour la détermination
de la permittivité et du facteur de dissipation des
isolants électriques aux fréquences industrielles,
audibles et radioélectriques (ondes métriques
comprises)**

**Recommended methods for the determination
of the permittivity and dielectric dissipation
factor of electrical insulating materials at power,
audio and radio frequencies including metre
wavelengths**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 250: 1969

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 auprès du Bureau Central de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 50: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI), qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit tirés du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électro-technique;*
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles;*
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas;*

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale.*

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

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 from the IEC Central Office.

Information on the revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
Published yearly
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 50: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV or have been specifically approved for the purpose of this publication.

Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications:

- IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology;*
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets;*
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams;*

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice.*

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
250**

Première édition
First edition
1969

**Méthodes recommandées pour la détermination
de la permittivité et du facteur de dissipation des
isolants électriques aux fréquences industrielles,
audibles et radioélectriques (ondes métriques
comprises)**

**Recommended methods for the determination
of the permittivity and dielectric dissipation
factor of electrical insulating materials at power,
audio and radio frequencies including metre
wavelengths**

© CEI 1969 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 pro-
cédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et
les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

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

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

U

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

AVA Documents
Document Sharing Hub

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
Articles	
1. Objet et domaine d'application	6
2. Définitions	6
3. Utilisations et propriétés des isolants électriques	10
4. Forme d'éprouvettes et système d'électrodes	12
5. Choix des méthodes de mesure	24
6. Mode opératoire	24
7. Résultats	26
8. Procès-verbal	28
ANNEXE — Dispositifs de mesure	30
TABLEAU I: Calcul de la capacité dans le vide et des corrections de bord.	44
TABLEAU II: Calcul de la capacité de l'éprouvette — Electrodes micrométriques en contact avec l'éprouvette	46
TABLEAU III: Calcul de la permittivité relative et du facteur de dissipation — Electrodes sans contact direct	48
FIGURES	50

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Object and scope	7
2. Definitions	7
3. Uses and properties of electrical insulating materials	11
4. Form of specimen and electrode arrangement	13
5. Choice of measuring methods	25
6. Testing procedure	25
7. Results	27
8. Test report	29
APPENDIX — Apparatus	31
TABLE I: Calculation of vacuum capacitance and edge corrections	45
TABLE II: Calculation of specimen capacitance — Contacting micrometer electrodes	47
TABLE III: Calculation of relative permittivity and dissipation factor — Non-contacting electrodes	49
FIGURES	50

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**MÉTHODES RECOMMANDÉES POUR LA DÉTERMINATION
DE LA PERMITTIVITÉ ET DU FACTEUR DE DISSIPATION
DES ISOLANTS ÉLECTRIQUES AUX FRÉQUENCES INDUSTRIELLES,
AUDIBLES ET RADIOÉLECTRIQUES (ONDES MÉTRIQUES COMPRISES)**

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager cette unification internationale, la CEI 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 CEI 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.

PRÉFACE

La présente recommandation a été établie par le Comité d'Etudes N° 15 de la CEI: Matériaux isolants.

Un premier projet fut discuté lors de la réunion tenue à Venise en 1963, à la suite de laquelle un projet définitif fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en novembre 1964.

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

Afrique du Sud	Italie
Allemagne	Japon
Australie	Norvège
Autriche	Pays-Bas
Belgique	Roumanie
Canada	Royaume-Uni
Corée (République de)	Suède
Danemark	Suisse
Etats-Unis d'Amérique	Tchécoslovaquie
Finlande	Turquie
France	Union des Républiques Socialistes
Israël	Soviétiques

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**RECOMMENDED METHODS FOR THE DETERMINATION
OF THE PERMITTIVITY AND DIELECTRIC DISSIPATION FACTOR
OF ELECTRICAL INSULATING MATERIALS AT POWER, AUDIO
AND RADIO FREQUENCIES INCLUDING METRE WAVELENGTHS**

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote this international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees having as yet no national rules, when preparing such rules, should use the IEC 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.

PREFACE

This Recommendation has been prepared by IEC Technical Committee No. 15, Insulating Materials.

A first draft was discussed at the meeting held in Venice in 1963, as a result of which a final draft was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in November 1964.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	Korea (Republic of)
Austria	Netherlands
Belgium	Norway
Canada	Romania
Czechoslovakia	South Africa
Denmark	Sweden
Finland	Switzerland
France	Turkey
Germany	Union of Soviet Socialist Republics
Israel	United Kingdom
Italy	United States of America
Japan	

MÉTHODES RECOMMANDÉES POUR LA DÉTERMINATION DE LA PERMITTIVITÉ ET DU FACTEUR DE DISSIPATION DES ISOLANTS ÉLECTRIQUES AUX FRÉQUENCES INDUSTRIELLES, AUDIBLES ET RADIOÉLECTRIQUES (ONDES MÉTRIQUES COMPRISES)

1. Objet et domaine d'application

Cette recommandation s'applique aux méthodes de détermination de la permittivité et du facteur de dissipation et aux grandeurs qui s'en déduisent, telles que l'indice de pertes, dans la gamme de fréquences de 15 Hz à 300 MHz environ. Certaines des méthodes décrites dans cette recommandation peuvent être utilisées, moyennant des précautions spéciales, pour effectuer des mesures à des fréquences notablement plus basses ou plus hautes que les fréquences limites indiquées.

Les méthodes décrites s'appliquent aux isolants solides, liquides ou liquéfiables. Les valeurs mesurées dépendent de conditions physiques telles que la fréquence, la température, le degré d'humidité et aussi, dans des cas spéciaux, de l'intensité du champ.

Dans certains cas, des essais à des tensions supérieures à 1000 V peuvent introduire des effets étrangers à la permittivité et au facteur de dissipation diélectrique et ne sont pas décrits ici.

2. Définitions

- 2.1 *La permittivité relative ϵ_r* d'un isolant est le rapport de la capacité C_x d'un condensateur, dans lequel l'espace entre les électrodes et autour d'elles est entièrement et exclusivement rempli de l'isolant en question, à la capacité C_0 de la même disposition d'électrodes dans le vide:

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (1)$$

La permittivité relative ϵ_r de l'air sec exempt de gaz carbonique à la pression atmosphérique normale est égale à 1,000 53 de sorte qu'en pratique la capacité C_a du dispositif d'électrodes dans l'air peut être normalement utilisée au lieu de C_0 pour déterminer la permittivité relative ϵ_r avec une précision suffisante.

La permittivité d'un isolant est, dans un système de mesure donné, le produit de sa permittivité relative ϵ_r par la constante électrique (ou permittivité du vide) ϵ_0 dans ce système.

Dans le système SI, la permittivité absolue s'exprime en farad par mètre (F/m); en outre, en unités SI, la constante électrique ϵ_0 a la valeur suivante:

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m} \approx \frac{1}{36 \pi} \times 10^{-9} \text{ F/m} \quad (2)$$

Pour les besoins de cette recommandation, où l'on utilise dans le calcul de la capacité des pico-farads et des centimètres, la constante électrique est:

$$\epsilon_0 = 0,088 54 \text{ pF/cm}$$

RECOMMENDED METHODS FOR THE DETERMINATION OF THE PERMITTIVITY AND DIELECTRIC DISSIPATION FACTOR OF ELECTRICAL INSULATING MATERIALS AT POWER, AUDIO AND RADIO FREQUENCIES INCLUDING METRE WAVELENGTHS

1. Object and scope

This Recommendation applies to the procedures for determination of permittivity and dissipation factor and of quantities calculated from them, such as loss index, within the frequency range 15 Hz to 300 MHz approximately. Some of the methods described in this Recommendation can, with special precautions, be used for measurements at frequencies considerably lower or higher than the given limits.

Liquids and fusible materials, as well as solid materials, can be measured by the methods described. The measured values are dependent on physical conditions such as frequency, temperature and moisture content, and in special cases, on field strength as well.

In some cases, tests at voltages exceeding 1 000 V may introduce effects not related to permittivity and dielectric dissipation factor, and are not described here.

2. Definitions

- 2.1 *The relative permittivity ϵ_r* of an insulating material is the ratio of capacitance C_x of a capacitor, in which the space between and around the electrodes is entirely and exclusively filled with the insulating material in question, to the capacitance C_0 of the same configuration of electrodes in vacuum:

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (1)$$

The relative permittivity ϵ_r of dry air free from carbon dioxide, at normal atmospheric pressure, equals 1.000 53 so that in practice, the capacitance C_a of the configuration of electrodes in air can normally be used instead of C_0 to determine the relative permittivity ϵ_r with sufficient accuracy.

The *permittivity* of an insulating material is, in a measurement system, the product of its relative permittivity ϵ_r and the electric constant (or permittivity of vacuum) ϵ_0 in that measurement system.

In the SI system, the absolute permittivity is expressed in farad per metre (F/m); furthermore, in SI units, the electric constant ϵ_0 has the following value:

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m} \approx \frac{1}{36 \pi} \times 10^{-9} \text{ F/m} \quad (2)$$

For the purpose of this Recommendation, where picofarads and centimetres are used in calculating capacitance, the electric constant is:

$$\epsilon_0 = 0.088 54 \text{ pF/cm}$$

- 2.2 *L'angle de pertes diélectriques δ d'un isolant est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et le courant qui en résulte lorsque le diélectrique du condensateur se compose exclusivement du matériau isolant.*
- 2.3 *Le facteur de dissipation diélectrique ¹⁾ $\operatorname{tg} \delta$ d'un isolant est la tangente de l'angle de pertes δ .*
- 2.4 *L'indice de pertes ϵ_r'' d'un isolant est égal au produit de son facteur de dissipation $\operatorname{tg} \delta$ par sa permittivité relative ϵ_r .*
- 2.5 *La permittivité complexe relative ϵ_r^* est obtenue par combinaison de la permittivité relative et de l'indice de pertes:*

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (3)$$

$$\epsilon_r' = \epsilon_r \quad (4)$$

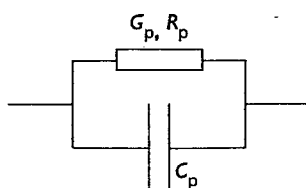
ϵ_r étant la permittivité relative définie au paragraphe 2.1:

$$\epsilon_r'' = \epsilon_r \operatorname{tg} \delta \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (6)$$

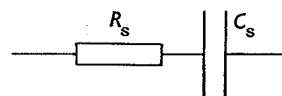
Note. — Tout condensateur présentant des pertes peut être représenté conventionnellement, à une fréquence donnée quelconque, soit par une capacité C_s et une résistance R_s en série, soit par une capacité C_p et une résistance R_p (ou une conductance G_p) en parallèle.

Circuit parallèle équivalent:



$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} = \frac{G_p}{\omega C_p} \quad (7)$$

Circuit série équivalent:



$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_s R_s \quad (8)$$

Alors que la représentation en parallèle d'un isolant ayant des pertes diélectriques est en général la représentation la plus convenable, il est toujours possible, et parfois souhaitable, de représenter un condensateur à une fréquence unique par une capacité C_s en série avec une résistance R_s .

¹⁾ Dans certains pays, on utilise le terme «tangente de l'angle de pertes» de préférence à «facteur de dissipation diélectrique» parce que le résultat de la mesure des pertes est donné sous la forme de la tangente de l'angle de pertes.

- 2.2 The dielectric loss angle δ of an insulating material is the angle by which the phase difference between applied voltage and resulting current deviates from $\pi/2$ rad, when the dielectric of the capacitor consists exclusively of the dielectric material.
- 2.3 The dielectric dissipation factor ¹⁾ $\tan \delta$ of an insulating material is the tangent of the loss angle δ .
- 2.4 The loss index ϵ_r'' of an insulating material is equal to the product of its dissipation factor $\tan \delta$ and its relative permittivity ϵ_r .
- 2.5 The relative complex permittivity ϵ_r^* is derived by combining the relative permittivity and the loss index:

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (3)$$

$$\epsilon_r' = \epsilon_r \quad (4)$$

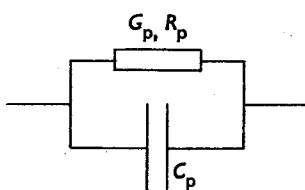
ϵ_r being the relative permittivity defined in Sub-clause 2.1:

$$\epsilon_r'' = \epsilon_r \tan \delta \quad (5)$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (6)$$

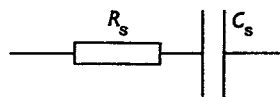
Note. — A capacitor with losses can be represented at any given frequency either by capacitance C_s and resistance R_s in series, or by capacitance C_p and resistance R_p (or conductance G_p) in parallel.

Equivalent parallel circuit:



$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} = \frac{G_p}{\omega C_p} \quad (7)$$

Equivalent series circuit:



$$\tan \delta = \omega C_s R_s \quad (8)$$

While the parallel representation of an insulating material having a dielectric loss is usually the more proper representation, it is always possible and occasionally desirable to represent a capacitor at a single frequency by a capacitance C_s in series with a resistance R_s .

¹⁾ Certain countries refer to “loss tangent” in preference to “dielectric dissipation factor” because the result of the measurement of the loss is reported as the tangent of the loss angle.

Entre les éléments en série et les éléments en parallèle, on a les relations suivantes:

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (9)$$

$$R_p = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}{\operatorname{tg}^2 \delta} R_s \quad (10)$$

$$\omega C_s R_s = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (11)$$

Le facteur de dissipation diélectrique $\operatorname{tg} \delta$ est le même pour les représentations en série et en parallèle.

Si un circuit de mesure fournit des résultats en termes d'éléments en série, et si $\operatorname{tg}^2 \delta$ est trop grand pour être négligé dans la relation (9), on doit alors calculer la capacité parallèle avant de calculer la permittivité.

Les calculs et les mesures mentionnés dans cette recommandation sont effectués à partir d'une forme d'onde sinusoïdale de pulsation $\omega = 2\pi f$.

3. Utilisations et propriétés des isolants électriques

3.1 Rôle des diélectriques

Les diélectriques sont utilisés en général à deux fins différentes:

- pour supporter les éléments d'un réseau électrique, et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre, et
- pour remplir les fonctions de diélectrique d'un condensateur.

3.2 Facteurs influençant les propriétés diélectriques

Dans ce qui suit, les influences de la fréquence, de la température, de l'humidité et de l'intensité du champ sur les propriétés diélectriques sont traitées séparément.

3.2.1 Fréquence

Etant donné qu'il n'existe que peu de matériaux, tels que la silice fondue, le polystyrène ou le polyéthylène, ayant ϵ_r et $\operatorname{tg} \delta$ pratiquement constants dans le domaine de fréquences étendu où l'on utilise les diélectriques à des fins techniques, il est nécessaire de mesurer le facteur de dissipation et la permittivité aux fréquences mêmes auxquelles le diélectrique sera utilisé.

Les modifications de la permittivité et du facteur de dissipation sont produites par la polarisation diélectrique et la conductivité. Les modifications les plus importantes sont causées par la polarisation dipolaire due aux molécules polaires et la polarisation interfaciale qui résulte de la non-homogénéité du matériau.

3.2.2 Température

L'indice de pertes peut présenter un maximum à une fréquence qui dépend de la température du diélectrique. Les coefficients de température du facteur de dissipation et de la permittivité peuvent être positifs ou négatifs selon la position du maximum de l'indice de pertes par rapport à la température de mesure.

Between the series components and the parallel components, the following relations hold:

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \tan^2 \delta} \quad (9)$$

$$R_p = \frac{1 + \tan^2 \delta}{\tan^2 \delta} R_s \quad (10)$$

$$\omega C_s R_s = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (11)$$

The dielectric dissipation factor $\tan \delta$ is the same for the series and parallel representations.

If a measuring circuit yields results in terms of series components, and if $\tan^2 \delta$ is too large to be ignored in equation (9), then the parallel capacitance must be evaluated before the permittivity is calculated.

The calculations and measurements in this Recommendation are based on a sinusoidal wave-form of the current with $\omega = 2\pi f$.

3. Uses and properties of electrical insulating materials

3.1 Object of dielectrics

Dielectric materials are used in general in two distinct ways:

- to support components of an electrical network and insulate them from each other and from ground, and
- to function as the dielectric of a capacitor.

3.2 Factors influencing dielectric properties

In the following, the influences of frequency, temperature, moisture and field strength on dielectric properties are separately treated.

3.2.1 Frequency

As only a few materials, such as fused silica, polystyrene, or polyethylene, have ϵ_r and $\tan \delta$ practically constant over the wide frequency range through which dielectric materials are used for technical purposes, it is necessary to measure the dissipation factor and the permittivity at those frequencies at which the dielectric material will be used.

Changes in permittivity and in dissipation factor are produced by the dielectric polarization and conductivity. The most important changes are caused by dipole polarization due to polar molecules and interfacial polarization caused by inhomogeneities in the material.

3.2.2 Temperature

The loss index may show a maximum at a frequency which depends upon the temperature of the dielectric material. The temperature coefficients of dissipation factor and permittivity can be positive or negative depending on the position of the loss index maximum with respect to the measuring temperature.

3.2.3 *Humidité*

La polarisation est augmentée par l'absorption de l'eau ou par la formation d'une pellicule d'eau à la surface du diélectrique, ce qui accroît la permittivité, le facteur de dissipation et la conductivité en courant continu. Le conditionnement des éprouvettes est de ce fait d'une importance capitale et la régulation du degré d'humidité, tant avant que pendant l'essai, est indispensable pour l'interprétation correcte des résultats d'essais.

Note. — Les effets importants de l'humidité apparaissent habituellement à des fréquences inférieures à 1 MHz environ et dans la région des hyperfréquences.

3.2.4 *Intensité du champ*

Lorsqu'il existe une polarisation interfaciale, le nombre d'ions libres augmente avec l'intensité du champ, ce qui entraîne une variation de la valeur et de la position du maximum de l'indice de pertes.

Aux fréquences élevées, la permittivité et le facteur de dissipation sont indépendants de l'intensité du champ, tant qu'il ne se produit pas de décharge partielle dans le diélectrique.

4. **Forme d'éprouvettes et systèmes d'électrodes**

4.1 *Isolants solides*

4.1.1 *Géométrie des éprouvettes solides*

Pour la détermination de la permittivité et du facteur de dissipation d'un matériau, il est préférable d'utiliser des éprouvettes planes; mais il existe aussi des matériaux ne se présentant que sous forme tubulaire.

Lorsqu'une grande précision dans la mesure de la permittivité est nécessaire, la principale incertitude est celle relative aux dimensions de l'éprouvette, et plus particulièrement à son épaisseur. Celle-ci devrait de ce fait être suffisamment grande pour permettre sa mesure avec la précision exigée. Le choix de l'épaisseur dépend de la méthode de préparation de l'éprouvette et de la variation probable de son épaisseur d'un point à un autre. Pour une précision de 1%, une épaisseur de l'ordre de 1,5 mm est en général suffisante. Cependant pour obtenir une meilleure précision, il peut être souhaitable d'utiliser une éprouvette d'épaisseur supérieure, de 6 mm à 12 mm par exemple. L'épaisseur doit être déterminée au moyen de mesures systématiquement réparties sur toute la surface de l'échantillon intéressée par la mesure électrique; elle ne doit pas différer de plus de 1% de l'épaisseur moyenne. Si les électrodes s'étendent jusqu'aux bords de l'éprouvette et si l'on connaît la masse volumique du matériau, on peut déterminer l'épaisseur par pesée. La *surface* choisie pour l'éprouvette doit être telle que la capacité de l'éprouvette puisse être mesurée avec la précision voulue. Avec des appareils munis d'un dispositif de garde convenable et par ailleurs suffisamment blindés, il ne doit y avoir aucune difficulté à mesurer des capacités de 10 pF. Toutefois, une grande partie de l'appareillage existant a une résolution limitée à environ 1 pF de sorte que l'éprouvette doit être mince et d'un diamètre égal ou supérieur à 10 cm.

Dans la mesure des faibles valeurs du facteur de dissipation, il est essentiel que les pertes introduites par la résistance en série des connexions soient aussi faibles que possible, c'est-à-dire que le produit de la résistance par la capacité à mesurer soit aussi faible que possible. De plus, le rapport de la capacité cherchée à la capacité totale doit être le plus grand possible. Le premier point conduit à réaliser des connexions aussi peu résistantes que possible et à utiliser une éprouvette de faible capacité. Le second point exige un montage introduisant des capacités aussi faibles que possible et l'emploi d'une éprouvette de forte capacité. Le meilleur compromis est fréquemment une éprouvette de capacité voisine de 20 pF, utilisée avec un circuit de mesure qui n'introduise pas en parallèle avec l'éprouvette une capacité supérieure à 5 pF environ.

3.2.3 *Moisture*

The degree of polarization is increased by absorption of water or by the formation of a water film on the surface of the dielectric material, thus raising the permittivity, the dissipation factor and the d.c. conductivity. Conditioning of test specimens is therefore of decisive importance and control of the moisture content, both before and during testing, is imperative if test results are to be interpreted correctly.

Note. — The gross effects of humidity usually occur at frequencies below approximately 1 MHz and in the micro-wave frequency region.

3.2.4 *Field strength*

When interfacial polarization exists, the number of free ions increases with the field strength, and the magnitude and the position of the loss index maximum is altered.

At higher frequencies, permittivity and dissipation factor are independent of the field strength, so long as no partial discharge occurs in the dielectric.

4. **Form of specimen and electrode arrangement**

4.1 *Solid insulating materials*

4.1.1 *Geometry of solid specimens*

For determining the permittivity and dissipation factor of a material, sheet specimens are preferable; but material may be available only in tubular form.

When high accuracy is needed in measuring permittivity, the source of the greatest uncertainty is the dimensions of the specimen, and particularly its thickness, which should therefore be large enough to allow its measurement with the required accuracy. The choice of thickness depends on the method of producing the specimen and the likely variation in thickness from point to point. For 1% accuracy, a thickness such as 1.5 mm is usually enough, although for greater accuracy it may be desirable to use a thicker specimen, for example 6 mm – 12 mm. The thickness must be determined by measurements distributed systematically over the area of the specimen which is used in the electrical measurement, and should be uniform to within $\pm 1\%$ of the average thickness. When the electrodes extend to the edge of the specimen, the thickness can be determined by weighing, if the density of the material is known. The *area* chosen for the specimen should be such as to provide a specimen capacitance which can be measured to the desired accuracy. With well guarded and screened apparatus, there need be no difficulty in measuring capacitances of 10 pF. Much existing apparatus, however, is limited in resolution to about 1 pF and then the specimen should be thin and of a diameter of 10 cm or more.

When small values of dissipation factor are being measured, it is essential that the loss introduced by the series resistance of the leads be as small as possible, that is, the product of the resistance and the capacitance being measured should be as small as possible. Also, the ratio of the measured capacitance to the total capacitance should be as large as possible. The first point indicates a need for keeping the lead resistances as low as possible and the desirability of having a small specimen capacitance. The second point indicates the need for low total capacitance in the arm of the bridge to which the specimen is connected and the desirability of having a large specimen capacitance. Frequently the best compromise is a specimen having a capacitance of about 20 pF, used with a measuring circuit which does not connect more than about 5 pF in parallel with the specimen.

4.1.2 *Systèmes d'électrodes*

4.1.2.1 *Electrodes solidaires de l'éprouvette*

Des électrodes peuvent être rendues solidaires de l'éprouvette en appliquant à leur surface l'un des matériaux énumérés au paragraphe 4.1.3. Lorsque l'on opère sans anneau de garde et qu'il est difficile de placer les électrodes exactement en regard l'une de l'autre sur les deux faces de l'éprouvette, l'une des électrodes doit être plus grande que l'autre. L'éprouvette munie de ces électrodes doit alors être montée entre deux électrodes métalliques adjacentes, celles-ci étant légèrement plus petites que les électrodes attenant à l'éprouvette. Les formules pour la détermination de la capacité des diverses dispositions d'électrodes circulaires ou cylindriques, de même que les formules empiriques pour la détermination approximative de la capacité de bord dans ces conditions, sont données dans le tableau I, page 44. Ces formules ne sont valables que pour un nombre restreint de formes d'éprouvettes.

Pour la mesure du facteur de dissipation, les électrodes de ce type ne conviennent pas pour les hautes fréquences, à moins que les surfaces de l'éprouvette et des plaques métalliques ne soient très planes. Le système d'électrodes de la figure 1, page 50, exige aussi des éprouvettes d'épaisseur uniforme.

4.1.2.2 *Electrodes non solidaires de l'éprouvette*

Les éprouvettes ayant une conductivité de surface suffisamment faible peuvent être essayées sans électrodes solidaires en les insérant dans un système d'électrodes dans lequel subsiste un intervalle occupé par de l'air ou par un liquide, d'un ou des deux côtés de l'éprouvette.

Les formules pour la détermination des capacités des systèmes d'électrodes planes ou cylindriques sont données dans le tableau III.

Deux formes de dispositifs sont particulièrement appropriées:

4.1.2.2.1 *Dans l'air, avec électrodes parallèles à commande micrométrique.*

La capacité peut être ajustée à la même valeur avec et sans l'éprouvette insérée, et la permittivité est ainsi déterminée sans référence à l'étalonnage électrique du système de mesure.

Une électrode de garde peut être incluse dans le système d'électrodes.

4.1.2.2.2 *Méthode par déplacement de fluide*

Dans un liquide dont la permittivité est voisine de celle de l'éprouvette et dont le facteur de dissipation est négligeable, la mesure dépend d'une manière moins critique que d'ordinaire de la connaissance exacte de l'épaisseur de l'éprouvette. En utilisant successivement deux fluides, l'épaisseur de l'éprouvette et les dimensions du système d'électrodes peuvent être éliminées des équations.

L'éprouvette doit être un disque ayant le même diamètre que les électrodes de la cellule d'essai ou, dans le cas d'électrodes micrométriques, l'éprouvette peut être suffisamment petite pour rendre négligeables les effets de bord. Dans ce but, le diamètre de l'éprouvette doit être plus petit que celui des électrodes micrométriques, d'une quantité au moins égale à deux fois l'épaisseur de l'éprouvette.

4.1.2.3 *Effets de bord*

Pour éviter les erreurs dans la détermination de la permittivité causées par les effets de bord, le système d'électrodes peut comporter une électrode de garde. Dans ce cas, celle-ci doit avoir une largeur d'au moins deux fois l'épaisseur de l'éprouvette, et l'écartement qui existe entre elle et l'électrode principale doit être petit par rapport à l'épaisseur de l'éprouvette. Si l'on ne peut pas utiliser d'anneaux de garde, une correction doit habituellement être faite pour tenir compte de la capacité de bord; des formules approchées sont données dans le tableau I. Ces formules sont empiriques et n'ont été établies que pour un nombre restreint de formes d'éprouvettes.

4.1.2 *Electrode systems*

4.1.2.1 *Electrodes applied to the specimen*

Electrodes may be applied to the surface of the specimen using one of the materials listed in Sub-clause 4.1.3. When a guard-ring is not used and when there is difficulty in locating electrodes accurately opposite one another on the two faces of the specimen, one electrode should be larger than the other. The specimen with its own electrodes should then be mounted between metal backing electrodes, these being slightly smaller than the specimen electrodes. The equations for computing the capacitance of different arrangements of disk-shaped or cylindrical electrodes as well as empirical equations for computing the approximate edge capacitances for this condition are given in Table I, page 45. These equations hold only for a restricted range of shapes of specimens.

For measurement of dissipation factor, electrodes of this type are unsatisfactory at high frequencies, unless the surfaces of the specimen and the metal plates are very flat. The electrode system of Figure 1, page 50, requires specimens also to be of uniform thickness.

4.1.2.2 *No electrodes applied to the specimen*

Specimens of sufficiently low surface conductivity can be tested without applied electrodes by inserting them in an electrode system in which there is an intentional gap, occupied by air or liquid, on one or both sides of the specimen.

The equations for computing the capacitances of arrangements of plane or cylindrical electrodes are given in Table III.

Two forms of apparatus are particularly convenient:

4.1.2.2.1 *In air, with micrometer-controlled parallel electrodes.*

The capacitance can be adjusted to the same value with and without the specimen inserted, and the permittivity determined without reference to the electrical calibration of the measuring system.

A guard electrode can be included in the electrode system.

4.1.2.2.2 *Fluid displacement method*

In a liquid, whose permittivity is nearly equal to that of the specimen and whose dissipation factor is negligible, the measurement depends less critically than usual on exact knowledge of the thickness of the specimen. By using two fluids in turn, the thickness of the specimen and the dimensions of the electrode system can be eliminated from the equations.

The test specimen should be a disk having the same diameter as the cell electrodes, or for micrometer electrodes, the specimen may be sufficiently small to render edge effects negligible. To make the edge effects negligible in the micrometer electrodes, the specimen diameter should be smaller than that of the micrometer electrodes by at least twice the thickness of the specimen.

4.1.2.3 *Edge effects*

To avoid errors in permittivity caused by edge effects, the electrode system may include a guard electrode. If so, its width should be at least twice the thickness of the specimen, and the gap between it and the main electrode should be small compared with the thickness of the specimen. If guard rings cannot be used, a correction must usually be made for edge capacitance; approximate equations are given in Table I. These equations are empirical and hold only for a restricted range of shapes of specimen.

En variante, la capacité de bord peut être obtenue à partir de mesures faites avec et sans anneau de garde à une fréquence et une température appropriées; la capacité de bord ainsi obtenue sera suffisamment précise pour être utilisée comme correction à d'autres fréquences et d'autres températures.

4.1.3 *Matériaux pour la constitution des électrodes*

4.1.3.1 *Electrodes en feuilles métalliques*

On peut appliquer des électrodes en feuilles métalliques sur l'éprouvette en utilisant la plus petite quantité possible de graisse de silicone ou d'un autre adhésif approprié à faibles pertes. La feuille métallique peut être en étain ou en plomb purs ou encore en un alliage de ces métaux, d'une épaisseur inférieure ou égale à 100 μm , ou enfin en aluminium d'une épaisseur inférieure à 10 μm . Les feuilles d'aluminium sont toutefois susceptibles de former une couche isolante d'oxyde qui peut influencer les résultats. On peut également utiliser des feuilles d'or.

4.1.3.2 *Electrodes métallisées à chaud*

On peut appliquer à chaud des films métalliques sur le verre, le mica et les matériaux céramiques, et ces films se prêtent aux essais sur ces matériaux. On utilise couramment l'argent, mais il peut donner lieu à une migration aux températures ou aux humidités élevées sous une différence de potentiel. L'or est préférable.

4.1.3.3 *Electrodes obtenues par pulvérisation de métal*

On peut obtenir des électrodes en pulvérisant du zinc ou du cuivre sur l'éprouvette. Ces électrodes épousent facilement les surfaces rugueuses. On peut même les appliquer à un tissu étant donné qu'elles ne pénètrent pas dans les trous très petits.

4.1.3.4 *Electrodes métalliques appliquées par vaporisation cathodique ou par vaporisation sous un vide poussé*

On peut utiliser ces procédés si les contraintes qui en résultent n'entraînent pas de modifications ni de dommages à l'isolant et si le matériau ne dégage pas une quantité excessive de gaz sous l'effet du vide. Les bords de telles électrodes doivent être nettement définis.

4.1.3.5 *Electrodes en mercure et autre métaux liquides*

On peut les utiliser en fixant l'éprouvette entre des supports creux appropriés et en les remplissant de métal liquide qui doit être propre. On ne doit pas utiliser le mercure aux températures élevées, et on doit prendre des précautions, même lorsqu'on l'utilise à la température ambiante, du fait qu'il émet des vapeurs toxiques.

On peut utiliser de façon analogue le métal de Wood ou d'autres alliages à bas point de fusion. Ces alliages contiennent fréquemment du cadmium qui, comme le mercure, est un élément toxique. Au-dessus de 100 °C, ces alliages ne doivent être utilisés que dans une pièce bien ventilée ou de préférence sous une hotte. Le personnel doit être averti de leurs effets toxiques possibles.

4.1.3.6 *Peinture conductrice*

On trouve dans le commerce, en vue de leur emploi comme matériau d'électrode, certains types de peinture à l'argent à conductivité élevée appartenant aux catégories séchant à l'air ou cuisant à basse température. Elles peuvent être suffisamment poreuses pour pouvoir être traversées par l'humidité, ce qui permet d'effectuer le conditionnement des éprouvettes après l'application des électrodes. Ceci est particulièrement avantageux pour l'étude des effets de l'humidité. La peinture présente l'inconvénient de ne pas être prête à l'emploi immédiatement après son application. Elle nécessite en général une nuit de séchage à l'air ou de cuisson à basse température pour éliminer toutes les traces de solvant qui pourraient, dans le cas contraire, augmenter à la fois la permittivité et le facteur de dissipation.