

# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE



**Dielectric and resistive properties of solid insulating materials –  
Part 2-1: Relative permittivity and dissipation factor – Technical frequencies  
(0,1 Hz to 10 MHz) – AC methods**

**Propriétés diélectriques et résistives des matériaux isolants solides –  
Partie 2-1: Permittivité relative et facteur de dissipation – Fréquences techniques  
(0,1 Hz à 10 MHz) – Méthodes en courant alternatif**



**THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED**  
**Copyright © 2018 IEC, Geneva, Switzerland**

All rights reserved. Unless otherwise specified, 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 either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office  
3, rue de Varembe  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)

### About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

### About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

#### IEC Catalogue - [webstore.iec.ch/catalogue](http://webstore.iec.ch/catalogue)

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

#### IEC publications search - [webstore.iec.ch/advsearchform](http://webstore.iec.ch/advsearchform)

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

#### IEC Just Published - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and also once a month by email.

#### Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 21 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

#### IEC Glossary - [std.iec.ch/glossary](http://std.iec.ch/glossary)

67 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

#### IEC Customer Service Centre - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: [sales@iec.ch](mailto:sales@iec.ch).

---

### A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

### A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

#### Catalogue IEC - [webstore.iec.ch/catalogue](http://webstore.iec.ch/catalogue)

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

#### Recherche de publications IEC - [webstore.iec.ch/advsearchform](http://webstore.iec.ch/advsearchform)

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

#### IEC Just Published - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

#### Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 21 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

#### Glossaire IEC - [std.iec.ch/glossary](http://std.iec.ch/glossary)

67 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

#### Service Clients - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: [sales@iec.ch](mailto:sales@iec.ch).

# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE



---

**Dielectric and resistive properties of solid insulating materials –  
Part 2-1: Relative permittivity and dissipation factor – Technical frequencies  
(0,1 Hz to 10 MHz) – AC methods**

**Propriétés diélectriques et résistives des matériaux isolants solides –  
Partie 2-1: Permittivité relative et facteur de dissipation – Fréquences techniques  
(0,1 Hz à 10 MHz) – Méthodes en courant alternatif**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

---

ICS 17.220.99; 29.035.01

ISBN 978-2-8322-5414-1

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.  
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

## CONTENTS

FOREWORD.....	3
INTRODUCTION.....	5
1 Scope.....	6
2 Normative references .....	6
3 Terms and definitions .....	6
4 Method of test .....	7
4.1 General theory.....	7
4.2 Power supply (voltage) .....	10
4.3 Equipment .....	10
4.3.1 Accuracy .....	10
4.3.2 Choice of measuring methods.....	10
4.3.3 Measurement setup with applied electrodes to the material .....	11
4.4 Calibration .....	14
4.5 Test specimen .....	14
4.5.1 General .....	14
4.5.2 Recommended dimensions of test specimen and electrode arrangements .....	15
4.5.3 Manufacturing of test specimen .....	15
4.5.4 Number of test specimen .....	15
4.5.5 Conditioning and pre-treatment of test specimen .....	16
4.6 Procedures for specific materials .....	16
5 Test procedure .....	16
5.1 General.....	16
5.2 Calculation of permittivity and relative permittivity.....	16
5.2.1 Relative permittivity .....	16
5.2.2 The dielectric dissipation factor $\tan \delta$ .....	16
6 Report .....	16
7 Repeatability and reproducibility.....	17
Annex A (informative) Basic fundamentals .....	18
A.1 Error for the effective area in guard ring electrodes – Examples with $d_1 =$ 25 mm, 50 mm or 100 mm and $w = 1$ mm .....	18
A.2 Computation of edge correction of effective area .....	19
A.3 Determining $H$ and calculating $B$ .....	20
Bibliography.....	21
Figure 1 – Dielectric dissipation factor .....	8
Figure 2 – Equivalent circuit diagrams .....	9
Figure 3 – Cylindrical electrode with guard ring for plate designed specimen .....	12
Figure 4 – Specimen with liquid electrodes .....	13
Figure A.1 – Area error of $h$ in $e\%$ with $\epsilon_r = 1$ .....	18
Figure A.2 – Area error of $h$ in $e\%$ with $\epsilon_r = \infty$ .....	18
Figure A.3 – Error calculation for different $\epsilon_r$ and $d_1$ .....	18
Figure A.4 – Flow chart for the computation of edge correction of effective area.....	19
Figure A.5 – Factor $H$ versus gap and height .....	20
Table 1 – Test specimen.....	15

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**DIELECTRIC AND RESISTIVE PROPERTIES  
OF SOLID INSULATING MATERIALS –****Part 2-1: Relative permittivity and dissipation factor –  
Technical frequencies (0,1 Hz to 10 MHz) – AC methods**

## FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of 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, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). 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. 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 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 IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 62631-2-1 has been prepared by IEC technical committee 112: Evaluation and qualification of electrical insulating materials and systems.

This first edition cancels and replaces the first edition IEC 60250, published in 1969. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) technical frequencies confined to AC methods;
- b) update on measurements on solid dielectric materials.

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

FDIS	Report on voting
112/412/FDIS	112/417/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 2.

A list of all parts in the IEC 62631 series, published under the general title *Dielectric and resistive properties of solid insulating materials*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

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

**IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.**

## INTRODUCTION

Tan  $\delta$ , also called loss tangent, or dissipation factor is a basic parameter for the quality of insulating materials. The measurement of capacitance and loss angle is a classical method well established in the industry over 100 years.

The dissipation factor (tan  $\delta$ ) is dependent on several parameters, such as electrode design, material characteristics, environmental issues, moisture, temperature, voltage applied, and highly dependent on frequencies, the accuracy of measuring apparatus and other parameters applied to the measured specimen.

The frequency range is limited, depending on the test cell and electrode design, the dimension of the samples and connection leads. In this standard the parameters for the frequencies applied are therefore limited in the range of very low frequency (VLF) from less than 1 Hz and up to 10 MHz. However, measuring instruments can provide a broader frequency range, whereby the usable and suitable frequency range is limited by the whole test setup.

# DIELECTRIC AND RESISTIVE PROPERTIES OF SOLID INSULATING MATERIALS –

## Part 2-1: Relative permittivity and dissipation factor – Technical frequencies (0,1 Hz to 10 MHz) – AC methods

### 1 Scope

This part of IEC 62631 describes test methods for the determination of permittivity and dissipation factor properties of solid insulating materials (AC methods from 0,1 Hz up to 10 MHz).

NOTE This part of the standard mainly considers measuring setups with guard-electrodes.

### 2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60212, *Standard conditions for use prior to and during the testing of solid electrical insulating materials*

ISO 4593, *Plastics – Film and sheeting – Determination of thickness by mechanical scanning*

### 3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

#### 3.1

##### **electrical insulating material**

solid with negligibly low electric conductivity, used to separate conducting parts at different electrical potentials

Note 1 to entry: The term "electrical insulating material" is sometimes used in a broader sense to designate also insulating liquids and gases. Insulating liquids are covered by IEC 60247.

#### 3.2

##### **dielectric properties**

comprehensive behaviour of an insulating material measured with AC comprising the capacitance, absolute permittivity, relative permittivity, relative complex permittivity, dielectric dissipation factor

#### 3.3

##### **absolute permittivity**

electric flux density divided by the electric field strength

### 3.4

#### **relative permittivity**

ratio of the absolute permittivity to the permittivity of a vacuum  $\varepsilon_0$

### 3.5

#### **relative complex permittivity**

permittivity in a complex number representation, under steady sinusoidal field conditions

### 3.6

#### **dielectric dissipation factor $\tan \delta$ (loss tangent)**

numerical value of the ratio of the imaginary to the real part of the complex permittivity

### 3.7

#### **capacitance $C$**

property of an arrangement of conductors and dielectrics which permits the storage of electrical charge when a potential difference exists between the conductors

### 3.8

#### **voltage application**

application of a voltage between electrodes

Note 1 to entry: Voltage application is sometimes referred to as electrification.

### 3.9

#### **measuring electrodes**

conductors applied to, or embedded in, a material to make contact with it to measure its dielectric or resistive properties

Note 1 to entry: The design of the measuring electrodes depends on the specimen and the purpose of the test.

## 4 Method of test

### 4.1 General theory

The measured permittivity (formerly known as dielectric constant)  $\varepsilon$  of an insulating material is the product of its relative permittivity  $\varepsilon_r$  and the permittivity of a vacuum  $\varepsilon_0$ :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (1)$$

The permittivity is expressed in farad per meter (F/m); the permittivity of vacuum  $\varepsilon_0$  has the following value:

$$\varepsilon_0 = 8,854187817 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \quad (2)$$

Relative permittivity is the ratio of the absolute permittivity to the permittivity of a vacuum  $\varepsilon_0$ .

In the case of constant fields and alternating fields of sufficiently low frequency the relative permittivity of an isotropic or quasi-isotropic dielectric is equal to the ratio of the capacitance of a capacitor, in which the space between and around the electrodes is entirely and exclusively filled with the dielectric, to the capacitance of the same configuration of electrodes in vacuum.

In practical engineering it is usual to employ the term permittivity when referring to relative permittivity. The relative permittivity  $\epsilon_r$  of an insulating material is the quotient of capacitance  $C_x$  of a capacitive test specimen (capacitor), in which the space between the two electrodes is entirely and exclusively filled with the insulating material in question, and the capacitance  $C_0$  of the same configuration of electrodes in vacuum:

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \tag{3}$$

The relative permittivity  $\epsilon_r$  of dry air free from carbon dioxide, at normal atmospheric pressure in Pa, equals 100053 Pa, so that in practice, the capacitances  $C_a$  of the configuration of electrodes in air can normally be used instead of  $C_0$  to determine the relative permittivity  $\epsilon_r$  with sufficient accuracy.

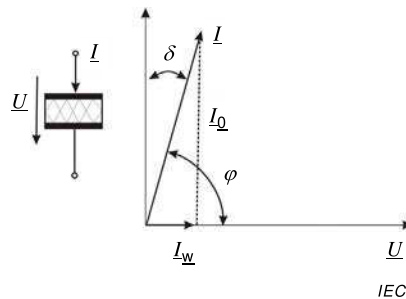
Relative complex permittivity is permittivity in a complex number representation under steady sinusoidal field conditions expressed as

$$\underline{\epsilon}_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_r \cdot e^{-j\delta} \tag{4}$$

where  $\epsilon_r'$  and  $\epsilon_r''$  have positive values.

NOTE 1 The complex permittivity  $\underline{\epsilon}_r$  is customarily quoted either in terms of  $\epsilon_r'$  and  $\epsilon_r''$ , or in terms of  $\epsilon_r$  and  $\tan \delta$ . If  $\epsilon_r' > \epsilon_r''$  then  $\epsilon_r \approx \epsilon_r'$  which are both called relative permittivity.

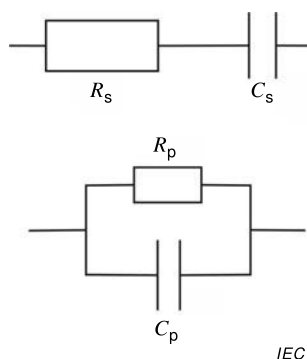
NOTE 2  $\epsilon_r''$  is termed loss index.



**Figure 1 – Dielectric dissipation factor**

The dielectric dissipation factor  $\tan \delta$  (loss tangent) is the numerical value of the ratio of the imaginary to the real part of the complex permittivity.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \tag{5}$$



**Figure 2 – Equivalent circuit diagrams**

Thus, the dielectric dissipation factor  $\tan \delta$  of an insulating material is the tangent of the angle  $\delta$  by which the phase difference  $\varphi$  between the applied voltage and the resulting current deviates from  $\pi/2$  rad when the solid insulating material is exclusively used as dielectric in a capacitive test specimen (capacitor) (compare with Figure 1). The dielectric dissipation factor can also be expressed by an equivalent circuit diagram using an ideal capacitor with a resistor in series or parallel connection (see Figure 2).

$$\tan \delta = \omega C_s \cdot R_s = \frac{1}{\omega C_p \cdot R_p} \quad (6)$$

with

$$\frac{C_p}{C_s} = \frac{1}{1 + \tan^2 \delta} \quad (7)$$

and

$$\frac{R_p}{R_s} = 1 + \frac{1}{\tan^2 \delta} \quad (8)$$

NOTE 3  $R_s$  and  $R_p$  respectively are not directly related to but affected by the volume and the surface resistance of an insulating material. Therefore the dielectric dissipation factor may also be affected by these resistive materials properties.

Capacitance  $C$  is the property of an arrangement of conductors and dielectrics which permits the storage of electrical charge when a potential difference exists between the conductors.

$C$  is the ratio of a quantity  $q$  of charge to a potential difference  $U$ . A capacitance value is always positive. The unit is farad when the charge is expressed in coulomb and the potential in volts.

$$C = \frac{q}{U} \quad (9)$$

This general method describes common values for general measurements. If a method for a specific type of material is described in this standard, the specific method shall be used.

The measurement of permittivity and dielectric dissipation factor is to be done carefully and under consideration of the electric properties of the measuring circuit as well as the specific electric properties of the material.

NOTE 4 To carry out the test, in most cases the use of high voltage is necessary. Care shall be taken to prevent from electric shock.

The basic principles of apparatus and methods are not described here. Some references to the literature is given in the bibliography.

## 4.2 Power supply (voltage)

The power source shall provide a stable sinusoidal voltage. For the measuring duration the measured value of the supplied voltage shall be maintained within  $\pm 5\%$ .

The voltage wave shape shall approximate to a sinusoid with the difference of the magnitudes of the positive and negative peak values being less than 2 %.

The deviation of the sinusoidal shape (the ratio of peak to *r.m.s.* values equals  $\sqrt{2}$ ) shall be within  $\pm 5\%$ .

Preferred voltages are 0,1 V; 0,5 V; 10 V; 100 V; 500 V; 1 000 V; 2 000 V.

Higher voltages may be applicable in order to perform tests at operating field strength. Other voltage levels shall be documented in the report.

NOTE Partial discharge can lead to erroneous measurements when a specific inception voltage is exceeded. In air, below 340 V no partial discharges will occur.

## 4.3 Equipment

### 4.3.1 Accuracy

The measuring device should be capable of determining the unknown permittivity and dielectric dissipation factor in accordance with the expected material properties. The accuracy of the measuring system must be documented in the report.

NOTE The user can choose the measuring system accuracy according to the requirements of the measuring results.

### 4.3.2 Choice of measuring methods

#### 4.3.2.1 General

Methods for measuring the permittivity and dissipation factor can be divided into three groups:

- null method
- impedance analyser method
- digital phase shift method

#### 4.3.2.2 Null method

For measurements of permittivity and dissipation factor, substitution techniques can be used that is, the bridge is balanced by adjustment mainly in one arm of the network, with and without the specimen connected. The networks normally used are the Schering bridge, the transformer bridge (i.e. a bridge with ratio arms coupled by mutual inductance) and the parallel-T. The transformer bridge has the advantage of allowing the use of a guard electrode without any additional components or operations; it has no disadvantages in comparison with the other networks.

#### 4.3.2.3 Impedance analyser method

There exist a lot of commercially available instruments (impedance analyzers or LCR meters). These instruments determine the impedance of the specimen as the ratio of the measured

vector of voltage and current. The vector is the value of the magnitude and a phase. Typically, the impedance is determined at one or more fixed frequencies or as a sweep over a frequency range.

Most instruments allow to express the impedance as a loss capacitance ( $C$ ,  $\tan \delta$  or  $D$ ) using either a serial or a parallel equivalent circuit for a given frequency. For the purposes of this International Standard the parallel equivalent circuit is to be used.

Care should be taken that the influence of cables is to be compensated in a correct manner. For this reason typically an OPEN and SHORT compensation of the measuring circuit is to be done and in some cases also LOAD compensation. Irregular compensation will lead to erroneous measurements.

Precision of impedance analysers depends on the instruments quality itself but may also strongly depend on the magnitude of the measured impedance (capacity) and on frequency. Any instrument can be used. However, the precision of the instrument shall be appropriate for the material under test and is to be stated in the test report.

#### **4.3.2.4 Digital phase shift method**

The measuring principle is based on precise recording of the currents through the standard capacitor (reference) and the test object path, with the voltage as a reference phase shift marker. The dielectric dissipation factor is calculated by measurement of the phase shift between these currents.

The measurement of sinusoidal-wave current and voltage in both voltage paths with amplitude and time precision is provided by high precision analogue to digital conversion simultaneously. Harmonics and external noise at current and voltage sinusoidal-wave may be suppressed with digital filtering, for example Fast Fourier Transformation (FFT) in the time or frequency domain. The dissipation factor  $\tan \delta$  and capacitance  $C_x$  are calculated based on phase shift and amplitude information extracted from the digital current measurement.

To reach a required precision  $\tan \delta \leq 1,10^{-4}$  of the test results, the A/D converter should have a resolution of  $\geq 16$  bit.

Due to safety reasons it is recommended to decouple the measuring devices, which are placed in the voltage area, from the control unit for the operator, for example fibre optics.

### **4.3.3 Measurement setup with applied electrodes to the material**

#### **4.3.3.1 General**

The electrodes for insulating materials should be of a material that is readily applied, that allows intimate contact with the specimen surface and introduces no appreciable error because of electrode resistance or contamination of the specimen. The electrode material should be corrosion resistant under the conditions of the test. The electrodes shall be used with suitable backing plates of given form and dimensions. It may be advantageous to use two different electrode materials or two methods of application to see if significant error is introduced.

The measurement of the dimensions of the electrode shall be according to ISO 4593.

NOTE The accuracy of the measurement of the dimensions of the electrode is directly related to the accuracy of the expected test result.

The mechanical force, which is applied by the fixture electrode to the specimen, should be approximately 1 Pa for pressure sensitive test specimen. Other electrode forces are possible and shall be documented in the test report. The mechanical electrode force should not overstress the test specimen.

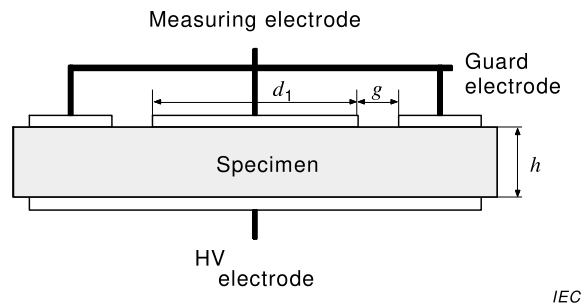
### 4.3.3.2 Guarding

The insulation of the measuring circuit is composed of materials which, at best, have properties comparable with those of the material under test. Errors in the measurement of the specimen may arise from:

- edge effects of the electrical field which influence the measured capacity
- the surface resistance which may influence the dielectric dissipation factor, especially at low frequencies

A satisfactory correction is obtained by using the technique of guarding.

The guard conductors are connected together, constituting the guard system and forming with the measuring terminals a three-terminal network. The basic connections for guarded electrodes used for measurement of permittivity and dielectric dissipation factor are shown in Figure 3.



**Figure 3 – Cylindrical electrode with guard ring for plate designed specimen**

The surface area  $A$  (in mm<sup>2</sup>) defined in Equation (10), is  $\pi/4$  multiplied by square of the sum of electrode diameter  $d_1$  and gap space  $g$ .

$$A = \frac{\pi}{4} (d_1 + B \cdot g)^2 \tag{10}$$

$$e\% = \frac{A_{B=1} - A_{B \neq 1}}{A_{B \neq 1}} \cdot 100\% \tag{11}$$

The factor  $B$  is a function of the ratio of the gap and thickness of the specimen and of the dielectric constant. Equation (10) assumes a relative permittivity of  $\epsilon_r \rightarrow \infty$ . Equation (11) represents the possible error of the effective area, neglecting the factor  $B$ .

The specimen with its own electrodes shall 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 edge capacitance correction for this condition are given in Annex A.

### 4.3.3.3 Conductive silver paint

Certain types of commercially available, high-conductivity silver paints, either air-drying or low-temperature-baking varieties, are sufficiently porous to permit diffusion of moisture through them and thereby allow the test specimen to be conditioned after application of the electrodes. This is a particularly useful feature in studying resistance-humidity effects as well as changes with temperature. However, before conductive paint is used as an electrode

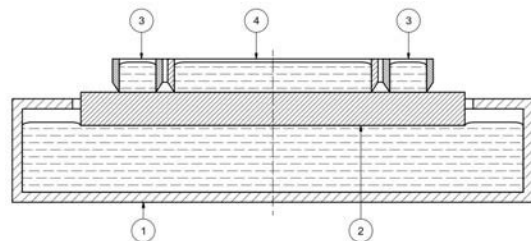
material, it should be established that the solvent in the paint does not affect the electrical properties of the specimen. Reasonably smooth edges of guard electrodes may be obtained with a fine-bristle brush. However, for circular electrodes, sharper edges may be obtained by the use of a compass for drawing the outline circles of the electrodes and filling in the enclosed areas by brush. Clamp-on masks may be used if the electrode paint is sprayed on.

#### 4.3.3.4 Evaporated or sputtered metal

Evaporated or sputtered metal can be used where it can be shown that the material is not affected by ion bombardment, temperature stress or vacuum treatment.

#### 4.3.3.5 Liquid electrodes

Liquid electrodes can be used and give satisfactory results. The liquid forming the upper electrode should be confined, for example, by stainless steel rings, each of which should have its lower rim reduced to a sharp edge by bevelling on the side away from the liquid. Figure 4, shows the electrode arrangement. Alloys containing for example gallium, indium and tin, which are liquid at room temperature, have been proved as suitable. Mercury is not recommended.



#### Legend:

- 1 Test voltage electrode
- 2 Specimen
- 3 Guard electrode
- 4 Measurement electrode

**Figure 4 – Specimen with liquid electrodes**

#### 4.3.3.6 Metal foil

Aluminum and tin foil are in common use. They are usually attached to the specimen by a minimum quantity of petrolatum, silicone grease, oil or other suitable material, as an adhesive.

All adhesive materials may be of influence on the measurement results and should be minimized.

NOTE Silicon grease with a sufficient low dielectric loss has been found suitable.

#### 4.3.3.7 Tube specimen

The most appropriate electrode system for a tube specimen will depend on its permittivity, wall thickness, diameter, and the accuracy of measurement required. In general, the electrode system shall consist of an inner electrode and a somewhat narrower outer electrode, with a guard electrode at each end. The gap between the outer and guard electrodes shall be small compared with the thickness of the tube wall. For tube specimen of small and medium diameters, three bands of foil or deposited metal can be applied to the outside of the tube, the centre band serving as the working outer electrode with the two bands of foil or deposited metal, one on each side, serving as guard electrodes. Inner electrodes of liquid metal, deposited metal film or a tightly fitting mandrel may be used.

For tube specimen of high permittivity, the inner and outer electrodes may extend the complete length of the tube and the guard electrodes may be dispensed with.

For tubes or cylinders of large diameter, the electrode system can be either a circular or rectangular patch, a portion only of the tube periphery being tested. Such specimen can be treated as sheet specimen. Inner electrodes of metal foil, deposited metal film, or a tightly fitting mandrel are employed with outer and guard electrodes of metal foil or deposited metal. A flexible, expanding clamp may be necessary inside the tube to ensure satisfactory contact between the inner electrode and the specimen if a foil electrode is used.

For tube specimen having relative permittivity  $\epsilon_r$  up to about 10, the most convenient electrodes are foils or liquid metal. For tube specimen having relative permittivity above about 10, deposited metal electrodes shall be employed; fired-on electrodes shall be used for ceramic tubes. The electrodes may be applied to the complete circumference of the tube as bands or to only a portion of the circumference.

#### **4.3.3.8 Micrometre controlled parallel electrodes, in air**

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.

#### **4.3.3.9 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 shall be a disk having the same diameter as the cell electrodes, or, for micrometre electrodes, the specimen may be sufficiently small to make edge effects negligible.

To make the edge effects negligible in the micrometre electrodes, the specimen diameter shall be smaller than that of the micrometre electrodes by at least twice the thickness of the specimen.

### **4.4 Calibration**

The equipment shall be calibrated in the dielectric dissipation factor measured.

### **4.5 Test specimen**

#### **4.5.1 General**

For determining the permittivity and dissipation factor of a material, sheet specimen are preferable; but material may be available only in tubular form. The specimen under test shall have a thickness close to its application.

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 shall 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. The thickness shall be determined by measurements distributed systematically over the area of the specimen, which is used in the electrical measurement, and shall be uniform to within  $\pm 1\%$  of the average thickness. The area chosen for the specimen shall be such as to provide a specimen capacitance, which can be measured to the desired accuracy.

NOTE 1 Experience shows that the capacitances of typical test specimen are approximately between 10 pF and 100 pF.

When small values of the dissipation factor are being measured, it is essential that the loss introduced by the series resistance of the leads be as small as possible or it needs to be corrected, that is, the product of the resistance and the capacitance being measured shall be as small as possible. Also, the ratio of the measured capacitance to the total capacitance shall be as large as possible.

NOTE 2 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.

NOTE 3 If not otherwise specified, a plate  $\geq 100 \text{ mm} \times \geq 100 \text{ mm} \times (1 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm})$  can be used.

#### 4.5.2 Recommended dimensions of test specimen and electrode arrangements

If not otherwise stipulated in the relevant product standard the following dimensions (see Table 1) for test specimen are recommended:

**Table 1 – Test specimen**

Type of product	Recommended dimensions of test specimen	Remarks
Thermoplastic moulding compounds	60 mm × 60 mm × 1 mm	ISO 294-1 and ISO 294-3
Thermosetting moulding compounds		ISO 295
Long fibre reinforced polyester and vinyl ester moulding compounds (SMB BMC)	100 mm × 100 mm × 3 mm	
Epoxy based sheets and laminates		
Impregnating resins and varnishes		Materials described in the IEC 60455 and IEC 60464 series
Casting resins		Materials described in the IEC 60455 series
Pipes bars rods		Materials described in IEC 61212
Elastomeric material	100 mm × 100 mm × 3 mm	

The dimensions of test specimen shall be greater than the dimensions of the measuring electrode including the guard ring.

#### 4.5.3 Manufacturing of test specimen

The production and shape of the test specimen shall be determined by the relevant standards for the material. During removal and production of the specimen the condition of the material shall not be changed and the specimen shall not be damaged.

If the surface of the test specimen is machined at the contact areas of the electrodes, the type of machining shall be specified in the test report. The test specimen shall have a geometrically simple shape (plate with parallel measuring areas, cylinder, etc.).

Specimens from products shall be prepared with the product thickness, if possible.

#### 4.5.4 Number of test specimen

The number of specimen to be tested shall be determined by the relevant product standards. If no such data is available, at least three specimens shall be tested.

#### 4.5.5 Conditioning and pre-treatment of test specimen

Conditioning and any other pre-treatment of the test specimen shall be done according to the relevant product standard. If no product standard exists, conditioning shall be done for at least 4 days at 23 °C and 50 % RH according to IEC 60212 (standard climate B).

#### 4.6 Procedures for specific materials

Procedures for specific materials are described in material specifications. If a specific procedure for a specified material exists this specification shall be used. The measuring procedure including preparation of test specimen shall be described in the report.

### 5 Test procedure

#### 5.1 General

A number of specimens as described in the relevant specification are to be prepared. If not otherwise specified, 3 specimens shall be tested. Thickness of the sample should be measured at 5 points at least before application of the electrodes. The thickness of the specimen and the electrode dimensions are to be measured with an accuracy of  $\pm 1\%$ . Conditioning and pre-treatment of test specimen shall be done according to the relevant product standard. If no product standard exists, conditioning shall be done for at least 4 days at 23 °C and 50 % RH according to IEC 60212 (standard climate B).

#### 5.2 Calculation of permittivity and relative permittivity

##### 5.2.1 Relative permittivity

The relative permittivity  $\varepsilon_r$  of a specimen is calculated according to Equation (12). As the measured capacitance  $C_x$  of a specimen is measured the relative permittivity is:

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (12)$$

where  $C_0$  can be calculated as follows:

$$C_0 = \varepsilon_r \times \frac{A}{h} = 0,08854 \frac{A}{h} \quad (13)$$

If necessary, corrections shall be made similarly for capacitance of the specimen to earth, capacitance between switch contacts and for the difference between equivalent series and parallel capacitances.

##### 5.2.2 The dielectric dissipation factor $\tan \delta$

The dielectric dissipation factor  $\tan \delta$  shall be calculated from the measured values in accordance with the equations given for the particular measurement arrangement used.

### 6 Report

The report shall include the following:

- name, identification, material specification, color, source and manufacturer's code for the specimen
- shape and dimensions of test specimen and test cell

- temperature of the test specimen and relative humidity of the environment
- curing conditions of the specimen and any pre-treatment
- number of tests, describing the procedure
- test method and measurement circuit used
- manufacturer's instrument identification and accuracy of test equipment
- location and date of testing
- ambient temperature, relative humidity and air pressure
- test voltage
- test frequency
- electrode arrangement and type of electrode applied to sample used
- mechanical electrode pressure in Pascal (if applicable)
- number of samples
- date and time of test
- each single value and the average of permittivity and dielectric loss factor respectively
- any other important observations, if applicable
- values of parallel capacitance, relative permittivity and dielectric dissipation factor with estimated accuracy, error correction of effective area of specimen and the values calculated from them as loss index and loss angle. The mean value shall be given, if multiple tests on one sample are made, in relation to temperature and frequency. Not all are necessary or even appropriate in all cases.

## **7 Repeatability and reproducibility**

Measurements of relative permittivity and the dissipation factor are dependent on numerous aspects.

NOTE Experiences have shown that the reproducibility for the dissipation factor is in the range of 10 % and for the relative permittivity in the range of 10 % of the measured value.

## Annex A (informative)

### Basic fundamentals

#### A.1 Error for the effective area in guard ring electrodes – Examples with $d_1 = 25\text{ mm}$ , $50\text{ mm}$ or $100\text{ mm}$ and $w = 1\text{ mm}$

The ratio gap/thickness can lead to an error, especially for thin specimen. Correction formulas have been developed to resolve the problem [B.3.5]. For standard geometries correction factors  $B$  are shown in formula A.3. For other cases where a higher precision is necessary  $B$  should be calculated. In case the dimensions of the specimen are different from the recommended dimensions, one should apply the edge correction factor calculation (see Figures A.1 to A.3).

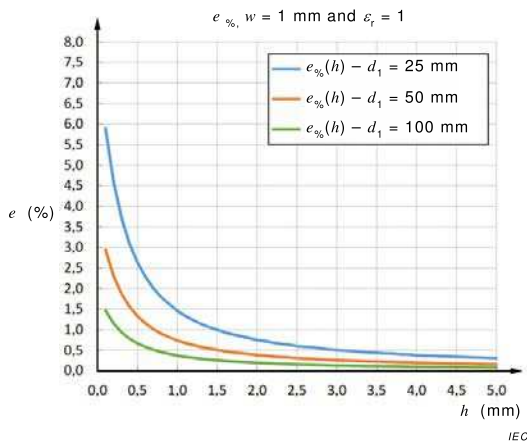


Figure A.1 – Area error of  $h$  in  $e\%$  with  $\epsilon_r = 1$

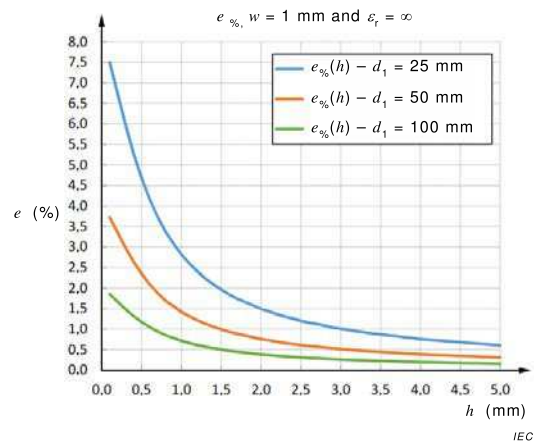


Figure A.2 – Area error of  $h$  in  $e\%$  with  $\epsilon_r = \infty$

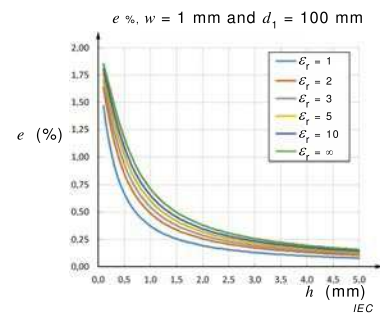
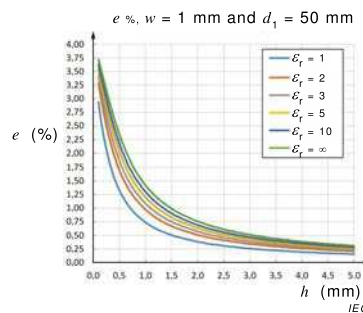
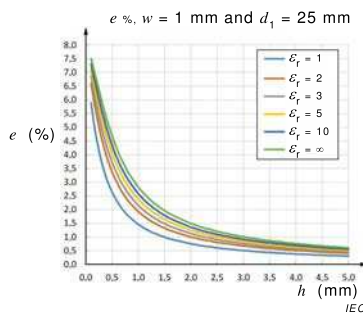
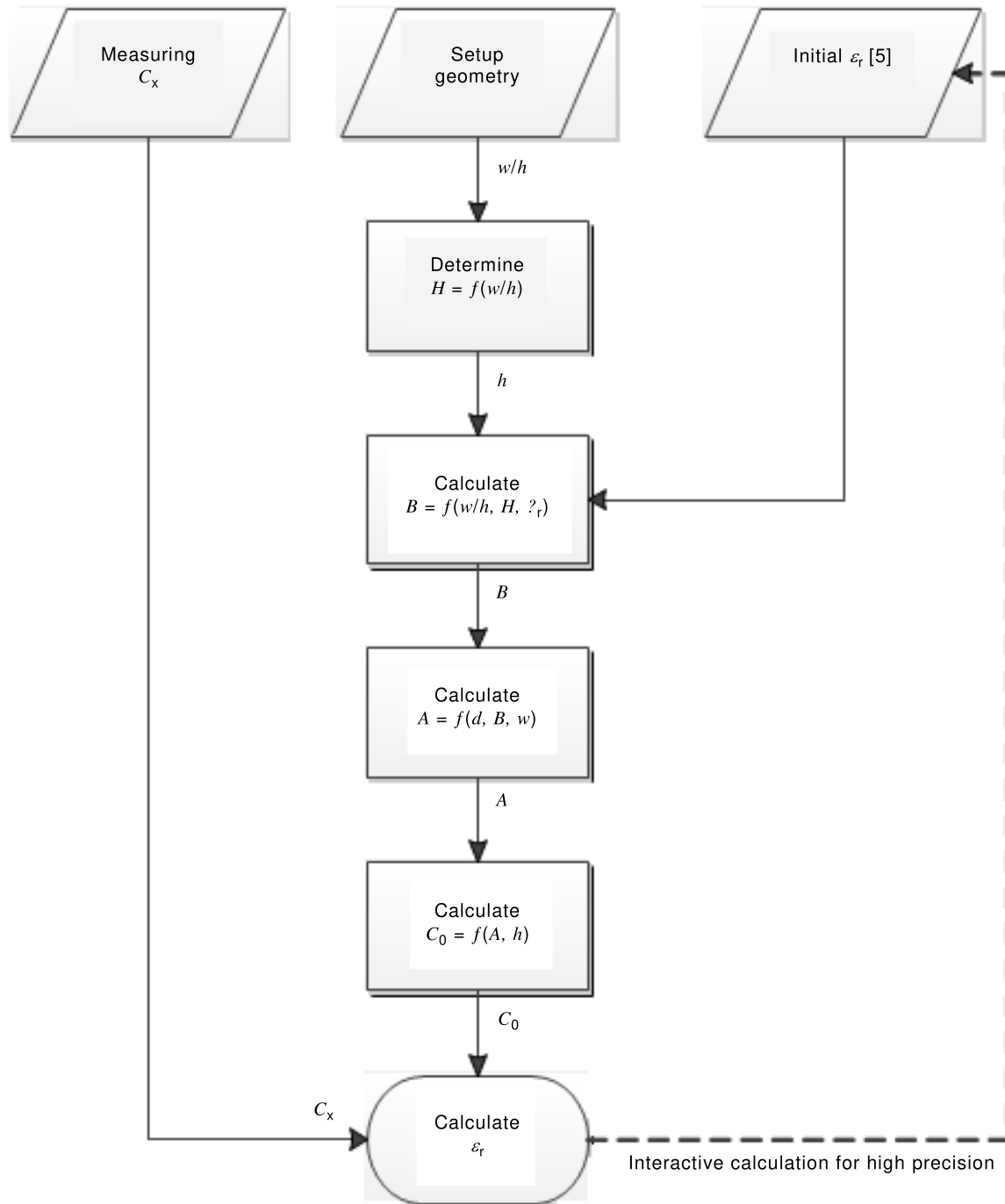


Figure A.3 – Error calculation for different  $\epsilon_r$  and  $d_1$

## A.2 Computation of edge correction of effective area

A flow chart for the computation of the edge correction is shown in Figure A.4.



IEC

**Figure A.4 – Flow chart for the computation of edge correction of effective area**

NOTE The initial value for  $\varepsilon_r$  can be determined by either assuming  $B = 1$  or using an estimate based on prior knowledge.

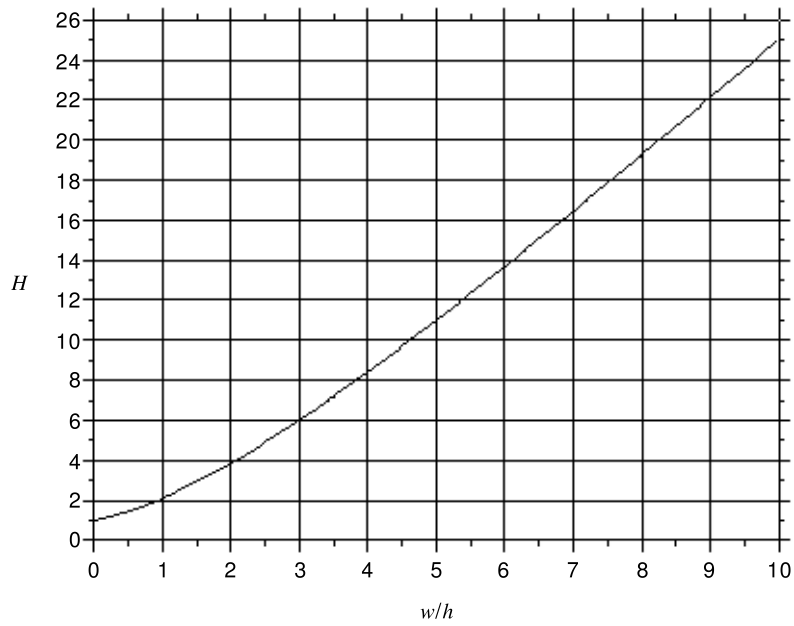
### A.3 Determining $H$ and calculating $B$

Approximation of  $H$  by the curve fitting:

$$\pi \cdot \frac{w}{h} = H - \frac{1}{H} + 2$$

$$H \approx a_6 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^6 + a_5 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^5 + a_4 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^4 + a_3 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^3 + a_2 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^2 + a_1 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^1$$

Figure A.5 shows the factor  $H$  versus gap  $w$  and height  $h$ .



IEC

**Figure A.5 – Factor  $H$  versus gap and height**

Calculation of  $B$ : 
$$B = 1 - \frac{H - 1}{\left(1 - \frac{1}{\varepsilon_r}\right) \cdot (H + 1) + \frac{\pi \cdot w \cdot H}{\varepsilon_r \cdot h \cdot (H - 1)}}$$

## Bibliography

IEC 60050-121:1998, *International electro technical vocabulary – Part 121: Electromagnetism* (available at [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org))

IEC 60216-1, *Electrical insulating materials – Properties of thermal endurance – Part 1: Ageing procedures and evaluation of test results*

IEC 60216-4-1:2006, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 4-1: Ageing ovens – Single-chamber ovens*

IEC 60247, *Insulating liquids – Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor ( $\tan \delta$ ) and D.C. resistivity*

IEC 60250:1969, *Recommended methods for the determination of the permittivity and dielectric dissipation factor of electrical insulating materials at power, audio and radio frequencies including metre wavelength*

IEC 60505, *Evaluation and qualification of electrical insulation systems*

IEC 62631-1, *Dielectric and resistive properties of solid insulating materials – Part 1: General*

IEC 60455 (all parts), *Resin based reactive compounds used for electrical insulation*

IEC 60464 (all parts), *Varnishes used for electrical insulation*

IEC 61212 (all parts), *Insulating materials – Industrial rigid round laminated tubes and rods based on thermosetting resins for electrical purposes*

ISO 291, *Plastics Standard atmospheres for conditioning and testing*

ISO 294-1, *Plastics – Injection moulding of test specimen of thermoplastic materials – Part 1: General principles, and moulding of multipurpose and bar test specimen*

ISO 294-3, *Plastics – Injection moulding of test specimen of thermoplastic materials – Part 3: Small plates*

ISO 295, *Plastics – Compression moulding of test specimen of thermosetting materials*

ISO 558, *Conditioning and testing; Standard atmospheres; Definitions*

EN 10088-2:201X, *Stainless steels, – Part 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes*

Schering, H.; Bridge for loss measurement (in German). Tätigkeitsbericht der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Braunschweig, Germany, 1919

Wagner, K.W.; Zur Messung dielektrischer Verluste mit der Wechselstrombrücke (To the measurement of dielectric losses with the a.c. bridge). Elektrotechnische Zeitschrift Vol. 32 (1911), p. 1001

Hague, B.; Alternating current bridge methods; Pitman 1959

Poleck, H.; Measuring bridges for the measurement of capacitances and loss factors of grounded test objects (in German); Archiv für Technisches Messen, 921-951, 1939

Seitz, P., Osvath P.; Microcomputer controlled transformer ratio-arm bridges; 3<sup>rd</sup> ISH, Milan paper 43.11, 1979

Kaul, G., Plath, R., Kalkner, W.; Development of a computerized loss factor measurement system, including 0,1 Hz and 50/60 Hz. 8<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Yokohama, Japan, paper 56.04, 1993

R. Bartnikas, ASTM Engineering Dielectrics, Electrical Insulation Liquids, Volume III, page 122-124, ISBN 0-8031-2055-9-1, "Phase shift measurement with complex compensation bridge"

P. F. Hyde, "Wide frequency range dielectric spectrometer," Proc. IEE, Vol 117, no. 9, pp.1891-1901, September 1970

Muhr M., Knollseisen G. Schwarz R. Sumereeder C., „Comparison of methods for the dissipation factor measurement". 51th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau September 11-15, 2006

Pütter, M.; Krüger, M.; Koch, M.; Hulka, L.: Laboratory and Field Measurements on Transformer Insulations with Different Dissipation Factor test Methods, 11<sup>th</sup> Insucon Conference, Birmingham, UK 2009, pp. 20-26

R. Bartnikas, "Engineering Dielectrics, Volume IIB Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Measuring Techniques", ASTM Library PCN 04-926000-21, STP 926 -1987

M. Lisowski and A. Skopec: "Effective Area of Thin Guarded Electrode in Determining of Permittivity and Volume Resistivity", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, No. 1; February 2009

U. Schichler, O. Pischler: "Effective Area of Disk Electrodes with Guard-Ring Contribution for the Revision of IEC 60250", Institute of High Voltage Engineering and System Performance, Graz University of Technology, Austria, February 2015

Dorota Kołakowska, Michał Lisowski: "The effective area of measurement electrode in volume resistivity and permittivity of solid dielectrics measurements", Measurement Automation Monitoring, Feb. 2015, vol. 61, no. 02

L. Schnell: Alternating-Current Bridge Methods See Chapter 4, Technology of Electrical Measurements, John Wiley and Sons Ltd, 1993, or B. Hague, (5<sup>th</sup> ed.), Pitman & Sons, London, 1962

W. Hauschild, E. Lemke: High-Voltage Test and Measuring Techniques, Springer, Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-45352-6, 2014

---



## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	25
INTRODUCTION.....	27
1 Domaine d'application .....	28
2 Références normatives .....	28
3 Termes et définitions .....	28
4 Méthode d'essai .....	29
4.1 Théorie générale.....	29
4.2 Tension d'alimentation (tension) .....	32
4.3 Appareillage.....	32
4.3.1 Précision .....	32
4.3.2 Choix des méthodes de mesure .....	32
4.3.3 Montage de mesure avec des électrodes appliquées au matériau .....	33
4.4 Etalonnage .....	37
4.5 Spécimen d'essai.....	37
4.5.1 Généralités .....	37
4.5.2 Dimensions recommandées pour les spécimens d'essai et les arrangements d'électrodes.....	37
4.5.3 Fabrication de spécimens d'essai .....	38
4.5.4 Nombre de spécimens d'essai .....	38
4.5.5 Conditionnement et prétraitement du spécimen d'essai.....	38
4.6 Procédures pour matériaux spécifiques.....	38
5 Procédure d'essai.....	39
5.1 Généralités .....	39
5.2 Calcul de la permittivité et de la permittivité relative.....	39
5.2.1 Permittivité relative .....	39
5.2.2 Facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$ .....	39
6 Rapport .....	39
7 Répétabilité et reproductibilité .....	40
Annexe A (informative) Principes fondamentaux .....	41
A.1 Erreur sur la surface effective pour des électrodes de garde en anneau – Exemples avec $d_1 = 25$ mm, 50 mm ou 100 mm et $w = 1$ mm.....	41
A.2 Calcul de la correction de bord de la surface effective .....	42
A.3 Détermination de $H$ et calcul de $B$ .....	43
Bibliographie.....	44
Figure 1 – Facteur de dissipation diélectrique .....	30
Figure 2 – Schémas de circuits équivalents .....	31
Figure 3 – Electrode cylindrique équipée d'un anneau de garde pour un spécimen en forme de plaque.....	34
Figure 4 – Spécimen avec électrodes liquides.....	35
Figure A.1 – Erreur sur l'aire de $h$ et $e\%$ avec $\epsilon_r = 1$ .....	41
Figure A.2 – Erreur sur l'aire de $h$ et $e\%$ avec $\epsilon_r = \infty$ .....	41
Figure A.3 – Calcul d'erreur pour différents $\epsilon_r$ et $d_1$ .....	41
Figure A.4 – Organigramme de calcul de la correction de bord de la surface effective .....	42
Figure A.5 – Facteur $H$ en fonction de l'espacement et de la hauteur .....	43
Tableau 1 – Spécimen d'essai .....	38

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES ET RÉSISTIVES  
DES MATÉRIAUX ISOLANTS SOLIDES –****Partie 2-1: Permittivité relative et facteur de dissipation – Fréquences  
techniques (0,1 Hz à 10 MHz) – Méthodes en courant alternatif**

## AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC 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, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). 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 l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC 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 l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est d'autre part attirée sur le fait que certains des éléments de la présente publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 62631-2-1 a été établie par le comité d'études 112 de l'IEC: Evaluation et qualification des systèmes et matériaux d'isolement électrique.

Cette première édition annule et remplace la première édition de l'IEC 60250, publiée en 1969. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) fréquences techniques réservées aux méthodes en courant alternatif;
- b) mise à jour des mesures appliquées aux matériaux diélectriques solides.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
112/412/FDIS	112/417/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/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62631, publiées sous le titre général *Propriétés diélectriques et résistives des matériaux isolants solides*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

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

**IMPORTANT – Le logo "*colour inside*" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.**

## INTRODUCTION

Le paramètre  $\tan \delta$ , également appelé tangente des pertes ou facteur de dissipation est un paramètre fondamental pour la qualité des matériaux isolants. La mesure de la capacité et de l'angle de perte est une méthode classique bien établie dans l'industrie depuis plus de cent ans.

Le facteur de dissipation ( $\tan \delta$ ) dépend fortement des fréquences, de la précision des appareils de mesure et d'autres paramètres appliqués au spécimen mesuré, et, dans une moindre mesure, de paramètres tels que la conception des électrodes, les caractéristiques des matériaux, les problèmes liés à l'environnement, l'humidité, la température et la tension appliquée.

La plage de fréquences est limitée par la conception des électrodes et des cellules d'essai et par les dimensions des échantillons et des fils de connexion. Dans la présente norme, les paramètres des fréquences appliquées sont donc limités dans la plage des très basses fréquences (TBF) allant de moins de 1 Hz à 10 MHz. Toutefois, la plage de fréquences des instruments de mesure peut être plus large, et la plage de fréquences utilisable et appropriée est limitée par le montage d'essai dans son ensemble.

# PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES ET RÉSISTIVES DES MATÉRIAUX ISOLANTS SOLIDES –

## Partie 2-1: Permittivité relative et facteur de dissipation – Fréquences techniques (0,1 Hz à 10 MHz) – Méthodes en courant alternatif

### 1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62631-2-1 décrit des méthodes d'essai pour déterminer les propriétés de la permittivité et du facteur de dissipation de matériaux isolants solides (méthodes en courant alternatif de 0,1 Hz à 10 MHz).

NOTE La présente partie de la norme traite principalement des montages de mesure avec des électrodes de garde.

### 2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60212, *Conditions normales à observer avant et pendant les essais de matériaux isolants électriques solides*

ISO 4593, *Plastiques – Film et feuille – Détermination de l'épaisseur par examen mécanique*

### 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

#### 3.1

##### **matériau isolant électrique**

solide de conductivité électrique faible pratiquement négligeable, utilisé pour séparer des pièces conductrices portées à des potentiels différents

Note 1 à l'article: Le terme "matériau isolant électrique" est parfois utilisé dans un sens plus large pour désigner également les isolants liquides et gazeux. Les isolants liquides sont couverts par l'IEC 60247.

#### 3.2

##### **propriétés diélectriques**

comportement global d'un matériau isolant mesuré avec un courant alternatif comprenant: la capacité, la permittivité absolue, la permittivité relative, la permittivité complexe relative, le facteur de dissipation diélectrique

#### 3.3

##### **permittivité absolue**

induction électrique divisée par le champ électrique

### 3.4

#### **permittivité relative**

rapport de la permittivité absolue à la permittivité du vide  $\varepsilon_0$

### 3.5

#### **permittivité relative complexe**

permittivité exprimée en notation complexe, dans des conditions de champ sinusoïdal établi

### 3.6

#### **facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$ (tangente des pertes)**

valeur numérique du rapport de la partie imaginaire à la partie réelle de la permittivité complexe

### 3.7

#### **capacité $C$**

propriété d'une disposition de conducteurs et de diélectriques qui permet le stockage d'une charge électrique, lorsqu'il existe une différence de potentiel entre les conducteurs

### 3.8

#### **application de tension**

application d'une tension entre électrodes

Note 1 à l'article: L'application d'une tension est parfois appelée "électrification".

### 3.9

#### **électrodes de mesure**

conducteurs appliqués sur un matériau ou enrobés dans sa masse, afin d'assurer un contact avec ce dernier, en vue de mesurer ses propriétés diélectriques ou résistives

Note 1 à l'article: La conception des électrodes de mesure dépend du spécimen et de l'objectif de l'essai.

## 4 Méthode d'essai

### 4.1 Théorie générale

La permittivité mesurée (connue auparavant sous le terme "constante diélectrique")  $\varepsilon$  d'un matériau isolant est le produit de sa permittivité relative  $\varepsilon_r$  et de la permittivité du vide  $\varepsilon_0$ :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (1)$$

La permittivité est exprimée en farad par mètre (F/m); la permittivité du vide  $\varepsilon_0$  a la valeur suivante:

$$\varepsilon_0 = 8,854187817 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \quad (2)$$

La permittivité relative est le rapport de la permittivité absolue à la permittivité du vide  $\varepsilon_0$ .

Pour des champs continus et des champs alternatifs de fréquence suffisamment basse, la permittivité relative d'un diélectrique isotrope ou quasi isotrope est égale au rapport de la capacité d'un condensateur, dans lequel l'espace entre et autour des électrodes est entièrement et exclusivement rempli du diélectrique, à la capacité de la même configuration d'électrodes dans le vide.

Dans les techniques de l'ingénieur, il est courant d'employer le terme permittivité lorsqu'il est fait référence à la permittivité relative. La permittivité relative  $\varepsilon_r$  d'un matériau isolant est le quotient de la capacité  $C_x$  d'un spécimen d'essai capacitif (un condensateur), dans lequel

l'espace entre les deux électrodes est entièrement et exclusivement rempli du matériau isolant concerné, et de la capacité  $C_0$  de la même configuration des électrodes dans le vide:

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \tag{3}$$

La permittivité relative  $\varepsilon_r$  de l'air sec sans dioxyde de carbone, sous une pression atmosphérique normale en Pa, est égale à 100053 Pa, de telle sorte qu'en pratique, les capacités  $C_a$  de la configuration des électrodes dans l'air peuvent normalement être utilisées à la place de  $C_0$  pour déterminer la permittivité relative  $\varepsilon_r$  avec une précision suffisante.

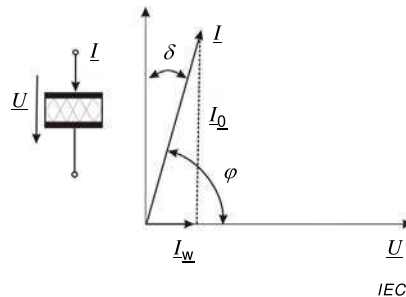
La permittivité complexe relative est la permittivité exprimée en notation complexe, dans des conditions de champ sinusoïdal établi, exprimée comme suit

$$\underline{\varepsilon}_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = \varepsilon_r \cdot e^{-j\delta} \tag{4}$$

où  $\varepsilon_r'$  et  $\varepsilon_r''$  ont des valeurs positives.

NOTE 1 La permittivité complexe  $\underline{\varepsilon}_r$  est habituellement exprimée soit en termes de  $\varepsilon_r'$  et de  $\varepsilon_r''$ , soit en termes de  $\varepsilon_r$  et de  $\tan \delta$ . Si  $\varepsilon_r' > \varepsilon_r''$  alors  $\varepsilon_r \approx \varepsilon_r'$  qui sont toutes les deux désignées comme permittivité relative.

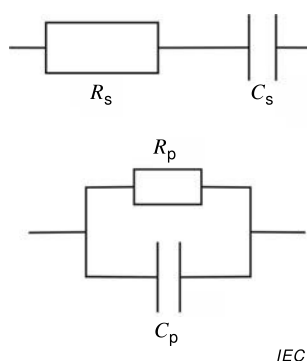
NOTE 2  $\varepsilon_r''$  est désignée comme l'indice de perte.



**Figure 1 – Facteur de dissipation diélectrique**

Le facteur de dissipation diélectrique  $\tan \delta$  (tangente de perte) est la valeur numérique du rapport de la partie imaginaire à la partie réelle de la permittivité complexe.

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \tag{5}$$



**Figure 2 – Schémas de circuits équivalents**

Ainsi, le facteur de dissipation diélectrique  $\tan \delta$  d'un matériau isolant est la tangente de l'angle  $\delta$  par lequel la différence de phase  $\varphi$  entre la tension appliquée et le courant résultant s'écarte de  $\pi/2$  rad lorsque le matériau isolant solide est exclusivement utilisé comme diélectrique dans un spécimen d'essai capacitif (un condensateur) (comparer avec la Figure 1). Le facteur de dissipation diélectrique peut aussi être exprimé par un schéma de circuit équivalent en utilisant un condensateur idéal avec une résistance en série ou en parallèle (voir Figure 2).

$$\tan \delta = \omega C_s \cdot R_s = \frac{1}{\omega C_p \cdot R_p} \quad (6)$$

avec

$$\frac{C_p}{C_s} = \frac{1}{1 + \tan^2 \delta} \quad (7)$$

et

$$\frac{R_p}{R_s} = 1 + \frac{1}{\tan^2 \delta} \quad (8)$$

NOTE 3  $R_s$  et  $R_p$  respectivement ne sont pas directement liées à la résistance transversale et à la résistance superficielle d'un matériau isolant, mais elles sont affectées par celles-ci. Par conséquent, le facteur de dissipation diélectrique peut aussi être affecté par ces propriétés des matériaux résistifs.

La capacité  $C$  est la propriété d'une disposition de conducteurs et de diélectriques qui permet le stockage d'une charge électrique, lorsqu'il existe une différence de potentiel entre les conducteurs.

$C$  est le rapport d'une grandeur  $q$  de charge à une différence de potentiel  $U$ . Une valeur de capacité est toujours positive. L'unité utilisée est le farad lorsque la charge est exprimée en coulomb et le potentiel en volts.

$$C = \frac{q}{U} \quad (9)$$

Cette méthode générale décrit des valeurs courantes pour les mesures générales. Si la présente norme décrit une méthode pour un type spécifique de matériau, la méthode spécifique doit être utilisée.

La permittivité et le facteur de dissipation diélectrique doivent être mesurés avec précaution et en tenant compte des propriétés électriques du circuit de mesure ainsi que des propriétés électriques spécifiques du matériau.

NOTE 4 Dans la plupart des cas, il est nécessaire d'utiliser une haute tension pour réaliser l'essai. Des précautions doivent être prises pour éviter les chocs électriques.

Les principes de base de l'appareil et les méthodes ne sont pas décrits ici. Des ouvrages de référence sont donnés dans la bibliographie.

## 4.2 Tension d'alimentation (tension)

La source d'alimentation doit délivrer une tension sinusoïdale stable. La valeur mesurée de la tension d'alimentation doit être maintenue à  $\pm 5\%$  pendant toute la durée de la mesure.

La forme d'onde de la tension doit s'approcher d'une sinusoïde et la différence des amplitudes des valeurs de crête positive et négative ne doit pas dépasser pas  $2\%$ .

L'écart avec la forme sinusoïdale (le rapport de la valeur de crête aux valeurs efficaces vaut  $\sqrt{2}$ ) ne doit pas dépasser  $\pm 5\%$ .

Les tensions préférentielles sont 0,1 V; 0,5 V; 10 V; 100 V; 500 V; 1 000 V; 2 000 V.

Des tensions plus élevées peuvent être applicables pour réaliser les essais au niveau du champ électrique de fonctionnement. Les autres niveaux de tension doivent être consignés dans le rapport.

NOTE Une décharge partielle peut conduire à des mesures erronées lorsqu'une tension d'apparition spécifique est dépassée. Dans l'air, aucune décharge partielle ne se produit en dessous de 340 V.

## 4.3 Appareillage

### 4.3.1 Précision

Il convient que le dispositif de mesure permette de déterminer la permittivité inconnue et le facteur de dissipation diélectrique inconnu en fonction des propriétés prévues des matériaux. La précision du système de mesure doit être consignée dans le rapport.

NOTE L'utilisateur peut choisir la précision du système de mesure en fonction des exigences des résultats de mesure.

### 4.3.2 Choix des méthodes de mesure

#### 4.3.2.1 Généralités

Des méthodes pour mesurer la permittivité et le facteur de dissipation peuvent être divisées en trois groupes:

- méthode par zéro
- méthode de l'analyseur d'impédance
- méthode du déphasage numérique

#### 4.3.2.2 Méthode par zéro

Des techniques de substitution peuvent être utilisées pour mesurer la permittivité et le facteur de dissipation. C'est-à-dire que le pont est équilibré en ajustant principalement une branche du réseau, avec et sans spécimen connecté. Les réseaux généralement utilisés sont le pont de Schering, le pont à transformateur (c'est-à-dire un pont dont les branches de proportion sont couplées par une inductance mutuelle) et le pont en T parallèle. Le pont à transformateur présente l'avantage de permettre l'utilisation d'une électrode de garde sans composant ni opération supplémentaire. Il ne présente pas d'inconvénient par rapport aux autres réseaux.

#### 4.3.2.3 Méthode de l'analyseur d'impédance

De nombreux appareils sont disponibles dans le commerce (des analyseurs d'impédance ou des impédancemètres (RLC)). Ces appareils déterminent l'impédance du spécimen comme le rapport du vecteur mesuré de tension et de courant. Le vecteur est la valeur de l'amplitude et une phase. Typiquement, l'impédance est déterminée pour une ou pour plusieurs fréquences fixes, ou en balayant une plage de fréquences.

La plupart des appareils permettent d'exprimer l'impédance comme une capacité avec pertes ( $C$ ,  $\tan \delta$  ou  $D$ ) en utilisant soit un circuit équivalent série, soit un circuit équivalent parallèle pour une fréquence donnée. Dans le cadre de la présente Norme internationale, le circuit équivalent parallèle doit être utilisé.

Il convient de prendre des précautions particulières, car l'influence des câbles doit être compensée correctement. Pour cette raison, le circuit de mesure doit être compensé en circuit OUVERT et en COURT-CIRCUIT. Dans certains cas, il doit être compensé en CHARGE. Une compensation irrégulière conduit à des mesures erronées.

La précision des analyseurs d'impédance dépend de la qualité des appareils, mais elle peut également être fortement influencée par l'amplitude de l'impédance mesurée (la capacité) et par la fréquence. N'importe quel appareil peut être utilisé, toutefois sa précision doit être appropriée au matériau en essai et elle doit être consignée dans le rapport d'essai.

#### 4.3.2.4 Méthode du déphasage numérique

Le principe de mesure est basé sur un enregistrement précis du courant traversant le chemin du condensateur normalisé (condensateur de référence) et du courant traversant le chemin de l'objet en essai, la tension servant de marqueur de déphasage de référence. Le facteur de dissipation diélectrique est calculé en mesurant le déphasage entre ces courants.

Le courant et la tension de l'onde sinusoïdale dans les deux chemins sont mesurés en effectuant simultanément une conversion analogique-numérique de haute précision. Le temps et l'amplitude devant être précis. Les harmoniques et le bruit externe du courant et de la tension de l'onde sinusoïdale peuvent être supprimés par filtrage numérique, par exemple par une transformée de Fourier rapide (FFT: *Fast Fourier Transformation*) dans le domaine temporel ou fréquentiel. Le facteur de dissipation  $\tan \delta$  et la capacité  $C_x$  sont calculés en utilisant le déphasage et l'amplitude extraits de la mesure numérique du courant.

Pour obtenir la précision exigée  $\tan \delta \leq 1,10^{-4}$  des résultats d'essai, il convient que la résolution du convertisseur analogique-numérique soit supérieure ou égale à 16 bits.

Pour des raisons de sécurité, il est recommandé que les dispositifs de mesure situés dans la zone de tension soient découplés de l'unité de contrôle de l'opérateur, par exemple les dispositifs fibroniques.

### 4.3.3 Montage de mesure avec des électrodes appliquées au matériau

#### 4.3.3.1 Généralités

Il convient que les électrodes pour des matériaux isolants soient constituées d'un matériau qui s'applique facilement, qui assure un bon contact avec la surface du spécimen et qui n'introduit pas d'erreur appréciable causée par la résistance de l'électrode ou par la contamination du spécimen. Il convient que le matériau de l'électrode résiste à la corrosion dans les conditions d'essai. Les électrodes doivent être utilisées avec des plaques de fixation de forme et de dimensions données. Il peut être avantageux que les électrodes soient constituées de deux matériaux différents ou d'utiliser deux méthodes d'application pour voir si une erreur appréciable apparaît.

La mesure des dimensions de l'électrode doit être conforme à l'ISO 4593.

NOTE La précision de la mesure des dimensions de l'électrode est directement liée à la précision du résultat d'essai attendu.

Il convient que la force mécanique appliquée par l'électrode de fixation au spécimen soit d'environ 1 Pa pour un spécimen d'essai sensible à la pression. D'autres forces peuvent être appliquées par les électrodes. Si c'est le cas, elles doivent être consignées dans le rapport d'essai. Il convient que la force mécanique des électrodes n'applique pas de contrainte excessive au spécimen d'essai.

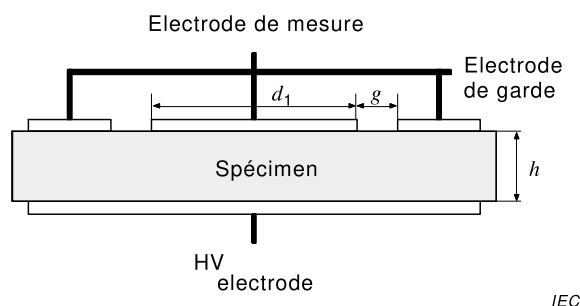
#### 4.3.3.2 Dispositifs de garde

L'isolation du circuit de mesure est composée de matériaux dont les propriétés sont, dans les cas favorables, comparables à celles du matériau soumis aux essais. Des erreurs dans la mesure d'un spécimen peuvent être dues aux phénomènes suivants:

- les effets de bord du champ électrique qui influencent la capacité mesurée
- la résistance superficielle qui peut influencer le facteur de dissipation diélectrique, en particulier aux basses fréquences

Une correction satisfaisante est obtenue en utilisant la technique du dispositif de garde.

Les conducteurs de garde reliés ensemble constituent le système de garde et forment, avec les bornes de mesure, un réseau à trois bornes. Les connexions de base d'électrodes gardées utilisées pour mesurer la permittivité et le facteur de dissipation diélectrique sont représentées à la Figure 3.



**Figure 3 – Electrode cylindrique équipée d'un anneau de garde pour un spécimen en forme de plaque**

L'aire de la surface  $A$  (en  $\text{mm}^2$ ) définie dans l'Equation (10), vaut  $\pi/4$  multiplié par la somme du diamètre de l'électrode  $d_1$  et de la largeur de l'espacement  $g$ .

$$A = \frac{\pi}{4} (d_1 + B \cdot g)^2 \tag{10}$$

$$e\% = \frac{A_{B=1} - A_{B \neq 1}}{A_{B \neq 1}} \cdot 100\% \tag{11}$$

Le facteur  $B$  est fonction du rapport entre l'espacement et l'épaisseur du spécimen et de la constante diélectrique. L'Equation (10) prend pour hypothèse une permittivité relative  $\epsilon_r \rightarrow \infty$ . L'Equation (11) représente l'erreur possible de la surface effective, en négligeant le facteur  $B$ .

Le spécimen avec ses électrodes doit ensuite être monté entre des contre-électrodes métalliques, ces dernières étant légèrement plus petites que les spécimens d'électrodes. Les équations pour calculer la capacité de différentes dispositions d'électrodes cylindriques ou en

forme de disques ainsi que les équations empiriques pour calculer la correction des capacités de bord pour cette condition sont présentées à l'Annexe A.

#### 4.3.3.3 Peinture conductrice à l'argent

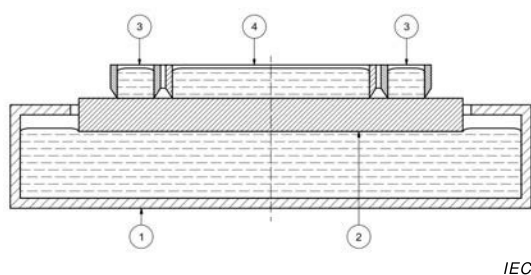
Certaines peintures à l'argent de haute conductivité disponibles dans le commerce, qui séchent à l'air ou qui cuisent à faible température, sont suffisamment poreuses pour être perméables à l'humidité. Elles permettent donc de conditionner le spécimen d'essai après l'application des électrodes. Cette caractéristique est particulièrement utile pour étudier les effets de l'humidité sur la résistance ainsi que des variations de température. Toutefois, avant d'utiliser une peinture conductrice comme matériau d'électrode, il convient de vérifier que le solvant de la peinture n'affecte pas les propriétés électriques du spécimen. Des électrodes de garde avec des bords raisonnablement réguliers peuvent être obtenues à l'aide d'une brosse à poils fins. Toutefois, pour des électrodes circulaires, des bords plus nets peuvent être obtenus en utilisant un compas pour dessiner les contours circulaires des électrodes et en remplissant les zones ainsi définies à l'aide d'un pinceau. Des masques peuvent être utilisés si la peinture des électrodes est appliquée par pulvérisation.

#### 4.3.3.4 Métal évaporé ou pulvérisé

Du métal évaporé ou pulvérisé peut être utilisé pour démontrer que le matériau n'est pas affecté par le bombardement des ions, les contraintes de température ou un traitement sous vide.

#### 4.3.3.5 Electrodes liquides

Des électrodes liquides peuvent être utilisées et donnent des résultats satisfaisants. Il convient que le liquide formant les électrodes supérieures soit confiné, par exemple, par des anneaux en acier inoxydable, et il convient que le bord inférieur de chaque anneau soit taillé en biseau du côté opposé au liquide. La Figure 4 représente un arrangement d'électrodes. Les alliages contenant par exemple du gallium, de l'indium ou de l'étain, qui sont liquides à température ambiante conviennent. Le mercure n'est pas recommandé.



IEC

#### Légende:

- 1 Electrode de tension d'essai
- 2 Spécimen
- 3 Electrode de garde
- 4 Electrode de mesure

**Figure 4 – Spécimen avec électrodes liquides**

#### 4.3.3.6 Feuille métallique

Des feuilles d'aluminium et d'étain sont couramment utilisées. Elles sont généralement fixées au spécimen à l'aide d'une faible quantité d'adhésif constitué de pétrolatum, de graisse de silicone, d'huile ou d'un autre matériau approprié.

Tous les matériaux adhésifs peuvent avoir une influence sur les résultats de mesure et il convient d'en utiliser une quantité minimale.

NOTE De la graisse de silicone dont la perte diélectrique est suffisamment faible s'est montrée appropriée.

#### 4.3.3.7 Spécimens en forme de tube

Le système d'électrodes le mieux approprié pour un spécimen en forme de tube dépend de sa permittivité, de l'épaisseur des parois, du diamètre et de la précision exigée pour les mesures. En général, le système d'électrodes doit être constitué d'une électrode intérieure et d'une électrode extérieure légèrement plus étroite, avec une électrode de garde à chaque extrémité. L'espace entre l'électrode extérieure et l'électrode de garde doit être petit par rapport à l'épaisseur de la paroi du tube. Pour un spécimen en forme de tube de diamètre petit ou moyen, trois bandes de dépôt métallique ou de feuille métallique peuvent être appliquées à l'extérieur du tube, la bande centrale étant l'électrode extérieure de fonctionnement, les deux bandes de dépôt métallique ou de feuille métallique, une de chaque côté, servant d'électrodes de garde. Des électrodes intérieures faites de métal liquide, de film de dépôt métallique ou d'un mandrin à ajustement serré peuvent être utilisées.

Pour un spécimen en forme de tube de permittivité élevée, les électrodes intérieures et extérieures peuvent augmenter la longueur totale du tube et les électrodes de garde peuvent ne plus être nécessaires.

Pour les tubes ou les cylindres de grand diamètre, le système d'électrodes peut être une plaque rectangulaire ou circulaire; seule une partie de la périphérie du tube étant soumise aux essais. Un tel spécimen peut être traité comme un spécimen en forme de feuille. Des électrodes intérieures constituées d'une feuille métallique, d'un film de dépôt métallique ou d'un mandrin à ajustement serré sont utilisées avec des électrodes extérieures ou des électrodes de garde constituées d'une feuille métallique ou d'un dépôt métallique. Si une électrode en feuille est utilisée, il peut être nécessaire de placer une pince flexible et extensible à l'intérieur du tube pour assurer un contact satisfaisant entre l'électrode intérieure et le spécimen.

Pour un spécimen en forme de tube de permittivité relative  $\epsilon_r$  inférieure à environ 10, les électrodes les mieux appropriées sont les feuilles métalliques ou le métal liquide. Pour un spécimen en forme de tube de permittivité relative supérieure à environ 10, des électrodes à dépôt métallique doivent être utilisées. Pour les tubes en céramique, des électrodes vitrifiées doivent être utilisées. Les électrodes peuvent être appliquées à toute la circonférence ou seulement à une partie de la circonférence du tube sous forme de bandes.

#### 4.3.3.8 Electrodes micrométriques parallèles contrôlées, dans l'air

La capacité peut être ajustée à la même valeur avec et sans que le spécimen soit inséré, et la permittivité peut être déterminée sans référence à l'étalonnage électrique du système de mesure.

#### 4.3.3.9 Mesure du déplacement de fluide

Un liquide de permittivité quasiment égale à celle du spécimen et de facteur de dissipation négligeable rend la dépendance de la mesure à la connaissance exacte de l'épaisseur du spécimen moins critique. En utilisant deux fluides à tour de rôle, l'épaisseur du spécimen et les dimensions du système d'électrodes peuvent être éliminées des équations.

Le spécimen d'essai doit être un disque de diamètre égal à celui des électrodes en forme de cellules, ou, pour les électrodes micrométriques, le spécimen peut être suffisamment petit pour rendre les effets de bord négligeables.

Pour rendre les effets de bord négligeables dans les électrodes micrométriques, le diamètre du spécimen doit être plus petit que celui des électrodes micrométriques d'au moins deux fois l'épaisseur du spécimen.

## 4.4 Etalonnage

L'appareillage doit être étalonné dans le facteur de dissipation diélectrique mesuré.

## 4.5 Spécimen d'essai

### 4.5.1 Généralités

Pour déterminer la permittivité et le facteur de dissipation d'un matériau, il est préférable d'utiliser un spécimen en forme de feuille, mais le matériau peut n'être disponible que sous forme de tube. L'épaisseur du spécimen d'essai doit être proche de celle prévue pour son application.

Lorsqu'une précision élevée est nécessaire pour mesurer la permittivité, les dimensions du spécimen, et particulièrement son épaisseur, constituent la principale source d'incertitude. L'épaisseur doit donc être suffisamment grande pour permettre la mesure avec la précision exigée. Le choix de l'épaisseur dépend de la méthode de production du spécimen et de la variation d'épaisseur potentielle d'un point à un autre. L'épaisseur doit être déterminée par des mesures distribuées systématiquement sur la surface du spécimen utilisé pour la mesure électrique et doit être uniforme sans s'écarter de  $\pm 1\%$  de l'épaisseur moyenne. L'aire du spécimen doit être choisie pour que la capacité du spécimen puisse être mesurée à la précision souhaitée.

NOTE 1 L'expérience montre que les capacités du spécimen d'essai typiques sont approximativement comprises entre 10 pF et 100 pF.

Lorsque les valeurs mesurées du facteur de dissipation sont faibles, il est essentiel que la perte introduite par la résistance série des fils soit aussi petite que possible ou soit corrigée. C'est-à-dire que le produit de la résistance par la capacité mesurée doit être aussi petit que possible. En outre, le rapport de la capacité mesurée à la capacité totale doit être aussi grand que possible.

NOTE 2 Le premier point indique la nécessité de garder les résistances des fils aussi petites que possible et le souhait d'avoir un spécimen de petite capacité. Le second point indique la nécessité d'avoir une petite capacité totale dans la branche du point auquel le spécimen est connecté et le souhait d'avoir un spécimen de grande capacité. Fréquemment, le meilleur compromis est un spécimen, dont la capacité vaut environ 20 pF, utilisé avec un circuit de mesure qui ne raccorde pas plus d'environ 5 pF en parallèle sur le spécimen.

NOTE 3 Sauf spécification contraire, une plaque de dimensions supérieures ou égales à 100 mm  $\times$   $\geq$  100 mm  $\times$  (1 mm  $\pm$  0,5 mm) peut être utilisée.

### 4.5.2 Dimensions recommandées pour les spécimens d'essai et les arrangements d'électrodes

Sauf spécification contraire dans la norme de produit applicable, les dimensions suivantes (voir Tableau 1) du spécimen d'essai sont recommandées:

**Tableau 1 – Spécimen d'essai**

Type de produit	Dimensions recommandées du spécimen d'essai	Remarques
Mélanges de moulage thermoplastiques	60 mm × 60 mm × 1 mm	ISO 294-1 et ISO 294-3
Mélanges de moulage thermodurcissables		ISO 295
Matériaux de moulage à base d'éther vinylique ou de polyester renforcés par des fibres de verre (SMB BMC)	100 mm × 100 mm × 3 mm	
Feuilles et stratifiés à base d'époxy		
Résines et vernis d'imprégnation		Matériaux décrits dans les séries IEC 60455 et IEC 60464
Résines de coulée		Matériaux décrits dans la série IEC 60455
Tubes, barres et tiges		Matériaux décrits dans l'IEC 61212
Matériau élastomère	100 mm × 100 mm × 3 mm	

Les dimensions du spécimen d'essai doivent être supérieures aux dimensions de l'électrode de mesure, anneau de garde compris.

#### 4.5.3 Fabrication de spécimens d'essai

La production et la forme du spécimen d'essai doivent être déterminées par les normes applicables au matériau. Pendant la production et le retrait du spécimen, l'état du matériau ne doit pas varier et le spécimen ne doit pas être endommagé.

Si la surface du spécimen d'essai est usinée au niveau des zones de contact des électrodes, le type d'usinage doit être spécifié dans le rapport d'essai. Le spécimen d'essai doit être de forme géométrique simple (une plaque avec des zones de mesure parallèles, un cylindre, etc.).

Si possible, l'épaisseur des spécimens de produits doit être celle du produit.

#### 4.5.4 Nombre de spécimens d'essai

Le nombre de spécimens à soumettre aux essais doit être déterminé par les normes de produits applicables. Si de telles données ne sont pas disponibles, au moins trois spécimens doivent être soumis aux essais.

#### 4.5.5 Conditionnement et prétraitement du spécimen d'essai

Le conditionnement et tout autre prétraitement du spécimen d'essai doivent être réalisés conformément à la norme de produit applicable. En l'absence de norme de produit, le conditionnement doit être réalisé pendant au moins 4 jours à une température de 23 °C et une humidité relative de 50 % conformément à l'IEC 60212 (climat normalisé B).

#### 4.6 Procédures pour matériaux spécifiques

Les procédures pour des matériaux spécifiques sont décrites dans des spécifications de matériaux. S'il existe une procédure spécifique pour un matériau spécifié, cette spécification doit être utilisée. La procédure de mesure, y compris la préparation du spécimen d'essai, doit être décrite dans le rapport.

## 5 Procédure d'essai

### 5.1 Généralités

Le nombre de spécimens indiqué dans la spécification applicable doit être préparé. Sauf spécification contraire, trois spécimens doivent être soumis aux essais. Il convient de mesurer l'épaisseur de l'échantillon en 5 points au moins avant l'application des électrodes. L'épaisseur du spécimen et les dimensions des électrodes doivent être mesurées avec une précision de  $\pm 1\%$ . Le conditionnement et le prétraitement du spécimen d'essai doivent être réalisés conformément à la norme de produit applicable. En l'absence de norme de produit, le conditionnement doit être réalisé pendant au moins 4 jours à une température de 23 °C et une humidité relative de 50 % conformément à l'IEC 60212 (climat normalisé B).

### 5.2 Calcul de la permittivité et de la permittivité relative

#### 5.2.1 Permittivité relative

La permittivité relative  $\varepsilon_r$  d'un spécimen est calculée selon l'Equation (12). La capacité mesurée d'un spécimen est  $C_x$  et la permittivité relative est:

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (12)$$

où  $C_0$  peut être calculée comme suit:

$$C_0 = \varepsilon_r \times \frac{A}{h} = 0,08854 \frac{A}{h} \quad (13)$$

Si cela est nécessaire, des corrections doivent être apportées de manière similaire pour la capacité du spécimen à la terre, pour la capacité entre des contacts de commutateurs et pour la différence entre des capacités séries et parallèles équivalentes.

#### 5.2.2 Facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$

Le facteur de dissipation diélectrique  $\tan \delta$  doit être calculé à partir des valeurs mesurées conformément aux équations données pour la disposition de mesure particulière utilisée.

## 6 Rapport

Le rapport doit comporter les éléments suivants:

- nom, identification, spécifications des matériaux, couleur, source et code du spécimen attribué par le fabricant
- forme et dimensions du spécimen d'essai et de la cellule d'essai
- température du spécimen d'essai et humidité relative de l'environnement
- conditions de durcissement du spécimen et tout prétraitement
- nombre d'essais, description de la procédure
- méthode d'essai et circuit de mesure utilisé
- identifications des instruments attribuées par les fabricants et précision de l'appareillage d'essai
- lieu et date de l'essai
- température ambiante, humidité relative et pression atmosphérique

- tension d'essai
- fréquence d'essai
- disposition des électrodes et types d'électrodes appliquées à l'échantillon utilisé
- pression mécanique de l'électrode en Pascal (le cas échéant)
- nombre d'échantillons
- date et heure de l'essai
- chaque valeur et la valeur moyenne de la permittivité et du facteur de dissipation diélectrique respectivement
- toutes autres informations jugées importantes, le cas échéant
- valeurs de capacité parallèle, de permittivité relative et de facteur de dissipation diélectrique avec la précision estimée, la correction d'erreur sur la surface effective du spécimen et les valeurs calculées à partir de ces valeurs en tant qu'indice de perte et angle de perte. La valeur moyenne doit être donnée, si des essais multiples sont réalisés sur un seul échantillon, en fonction de la température et de la fréquence. Ces informations ne sont pas toutes nécessaires, voire ne sont pas appropriées dans tous les cas.

## **7 Répétabilité et reproductibilité**

Les mesures de la permittivité relative et du facteur de dissipation dépendent de nombreux facteurs.

NOTE Des expériences ont montré que la reproductibilité est possible pour le facteur de dissipation dans une plage de 10 % et pour la permittivité relative dans une plage de 10 % de la valeur mesurée.

## Annexe A (informative)

### Principes fondamentaux

#### A.1 Erreur sur la surface effective pour des électrodes de garde en anneau – Exemples avec $d_1 = 25$ mm, 50 mm ou 100 mm et $w = 1$ mm

Le rapport espacement/épaisseur peut conduire à une erreur, en particulier pour un spécimen de faible épaisseur. Afin de résoudre ce problème, des formules de correction ont été développées [B.3.5]. Les facteurs de correction  $B$  pour les géométries normalisées sont présentés dans les formules A.3. Pour les autres cas qui nécessitent une précision plus grande, il convient de calculer  $B$ . Si les dimensions du spécimen sont différentes des dimensions recommandées, il convient d'appliquer le calcul du facteur de correction de bord (voir les Figures A.1 à A.3).

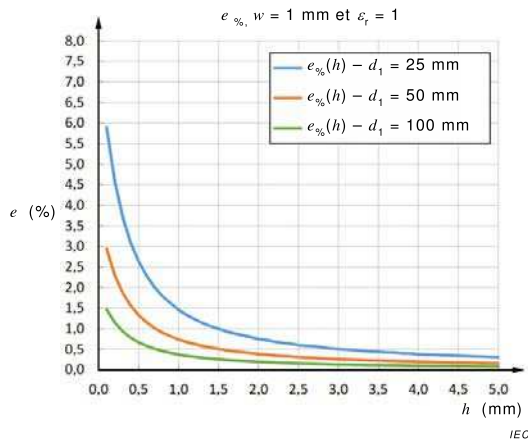


Figure A.1 – Erreur sur l'aire de  $h$  et  $e_{\%}$  avec  $\epsilon_r = 1$

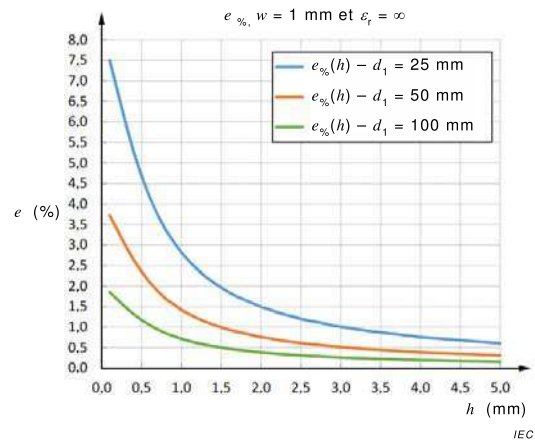


Figure A.2 – Erreur sur l'aire de  $h$  et  $e_{\%}$  avec  $\epsilon_r = \infty$

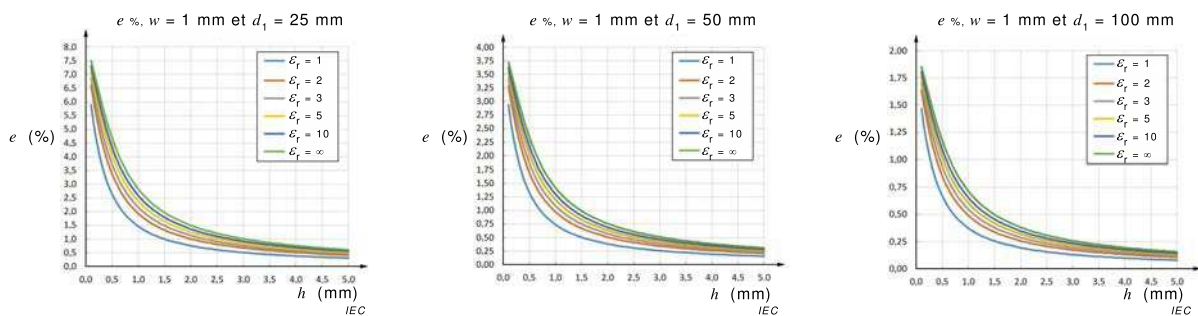
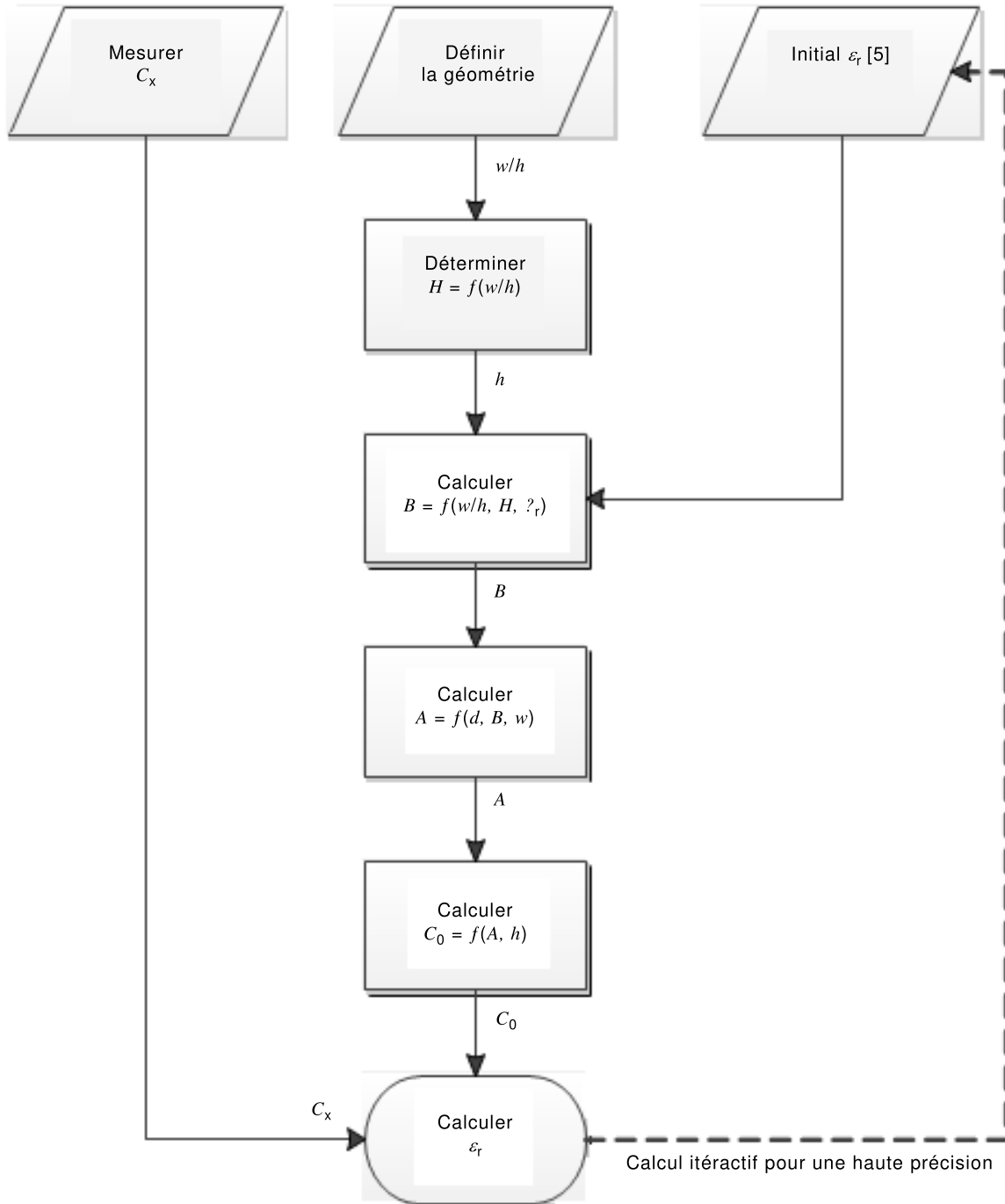


Figure A.3 – Calcul d'erreur pour différents  $\epsilon_r$  et  $d_1$

## A.2 Calcul de la correction de bord de la surface effective

La Figure A.4 présente un schéma de calcul de la correction de bord.



IEC

**Figure A.4 – Organigramme de calcul de la correction de bord de la surface effective**

NOTE La valeur initiale pour  $\epsilon_r$  peut être déterminée soit en prenant pour hypothèse  $B = 1$ , soit en utilisant une estimation basée sur une connaissance préalable.

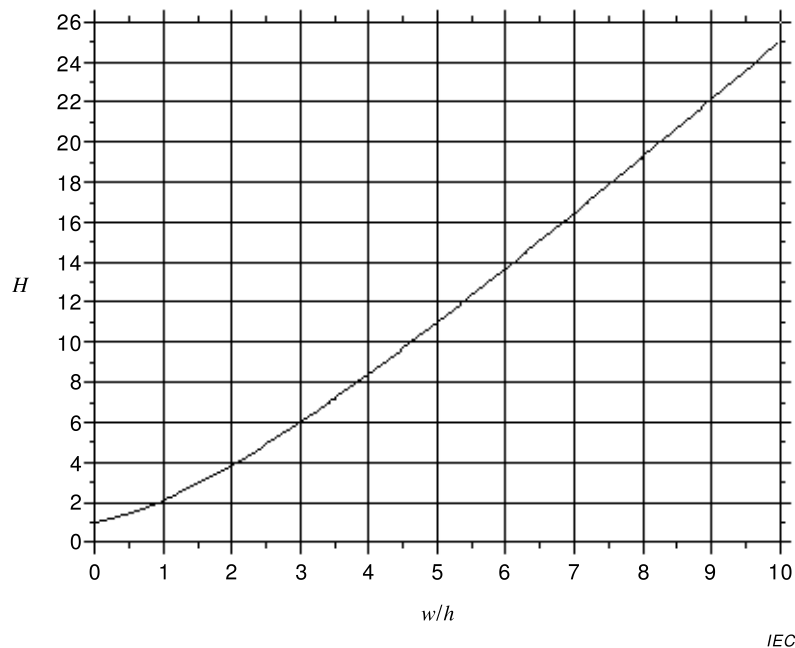
### A.3 Détermination de $H$ et calcul de $B$

Approximation de  $H$  par adaptation de courbe:

$$\pi \cdot \frac{w}{h} = H - \frac{1}{H} + 2$$

$$H \approx a_6 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^6 + a_5 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^5 + a_4 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^4 + a_3 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^3 + a_2 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^2 + a_1 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^1$$

La Figure A.5 présente le facteur  $H$  en fonction de l'espacement  $w$  et de la hauteur  $h$ .



IEC

**Figure A.5 – Facteur  $H$  en fonction de l'espacement et de la hauteur**

Calcul de  $B$ : 
$$B = 1 - \frac{H - 1}{\left(1 - \frac{1}{\varepsilon_r}\right) \cdot (H + 1) + \frac{\pi \cdot w \cdot H}{\varepsilon_r \cdot h \cdot (H - 1)}}$$

## Bibliographie

IEC 60050-121:1998, *Vocabulaire Electrotechnique International. Electromagnétisme – Partie 121: Electromagnétisme* (disponible à l'adresse [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org))

IEC 60216-1, *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique – Partie 1: Méthodes de vieillissement et évaluation des résultats d'essai*

IEC 60216-4-1:2006, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Partie 4-1: Ageing ovens – Single-chamber ovens* (disponible en anglais seulement)

IEC 60247, *Liquides isolants – Mesure de la permittivité relative, du facteur de dissipation diélectrique (tan delta) et de la résistivité en courant continu*

IEC 60250:1969, *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)*

IEC 60505, *Evaluation et qualification des systèmes d'isolation électrique*

IEC 62631-1, *Propriétés diélectriques et résistives des matériaux isolants solides – Partie 1: Généralités*

IEC 60455 (toutes les parties), *Composés réactifs à base de résine utilisés comme isolants électriques*

IEC 60464 (toutes les parties), *Vernis utilisés pour l'isolation électrique*

IEC 61212 (toutes les parties), *Matériaux isolants – Tubes et barres industriels, rigides, ronds, stratifiés, à base de résines thermodurcissables, à usages électriques*

ISO 291, *Plastiques – Atmosphères normales de conditionnement et d'essai*

ISO 294-1, *Plastiques – Moulage par injection des éprouvettes de matériaux thermoplastiques – Partie 1: Principes généraux, et moulage des éprouvettes à usages multiples et des barreaux*

ISO 294-3, *Plastiques – Moulage par injection des éprouvettes de matériaux thermoplastiques – Partie 3: Plaques de petites dimensions*

ISO 295, *Plastiques – Moulage par compression des éprouvettes de matériaux thermodurcissables*

ISO 558, *Conditionnement et essais – Atmosphères normales – Définitions*

EN 10088-2:201X, *Aciers inoxydables – Partie 2: Conditions techniques de livraison des tôles et bandes en acier de résistance à la corrosion pour usage général*

Schering, H.; *Bridge for loss measurement* (en allemand). Tätigkeitsbericht der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Braunschweig, Germany, 1919

Wagner, K.W; *Zur Messung dielektrischer Verluste mit der Wechselstrombrücke* (To the measurement of dielectric losses with the a.c. bridge). Elektrotechnische Zeitschrift Vol. 32 (1911), p. 1001.

Hague, B.; *Alternating current bridge methods*; Pitman 1959

Poleck, H.; Measuring bridges for the measurement of capacitances and loss factors of grounded test objects (in German); Archiv für Technisches Messen, 921-951, 1939

Seitz, P., Osvath P.; Microcomputer controlled transformer ratio-arm bridges; 3<sup>rd</sup> ISH, Milan paper 43.11, 1979

Kaul, G., Plath, R., Kalkner, W.; Development of a computerized loss factor measurement system, including 0,1 Hz and 50/60 Hz. 8<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Yokohama, Japan, paper 56.04, 1993

R. Bartnikas, ASTM Engineering Dielectrics, Electrical Insulation Liquids, Volume III, page 122-124, ISBN 0-8031-2055-9-1, "Phase shift measurement with complex compensation bridge"

P. F. Hyde, "Wide frequency range dielectric spectrometer," Proc. IEE, Vol 117, no. 9, pp.1891-1901, September 1970

Muhr M., Knollseisen G. Schwarz R. Sumereder C., „Comparison of methods for the dissipation factor measurement". 51th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau September 11-15, 2006

Pütter, M.; Krüger, M.; Koch, M.; Hulka, L.: Laboratory and Field Measurements on Transformer Insulations with Different Dissipation Factor test Methods, 11<sup>th</sup> Insucon Conference, Birmingham, UK 2009, pp. 20-26

R. Bartnikas, "Engineering Dielectrics, Volume IIB Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Measuring Techniques", ASTM Library PCN 04-926000-21, STP 926 -1987

M. Lisowski and A. Skopec: "Effective Area of Thin Guarded Electrode in Determining of Permittivity and Volume Resistivity", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16, No. 1; February 2009

U. Schichler, O. Pischler: "Effective Area of Disk Electrodes with Guard-Ring Contribution for the Revision of IEC 60250", Institute of High Voltage Engineering and System Performance, Graz University of Technology, Austria, February 2015

Dorota Kołakowska, Michał Lisowski: "The effective area of measurement electrode in volume resistivity and permittivity of solid dielectrics measurements", Measurement Automation Monitoring, Feb. 2015, vol. 61, no. 02

L. Schnell: Alternating-Current Bridge Methods See Chapter 4, Technology of Electrical Measurements, John Wiley and Sons Ltd, 1993, or B. Hague, (5<sup>th</sup> ed.), Pitman & Sons, London, 1962

W. Hauschild, E. Lemke: High-Voltage Test and Measuring Techniques, Springer, Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-45352-6, 2014





INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

3, rue de Varembé  
PO Box 131  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11  
Fax: + 41 22 919 03 00  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)