NORME INTERNATIONALE

INTERNATIONAL STANDARD

CEI
IEC
250

Première édition
First edition
1969

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

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

Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 250: 1969

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Validité de la présente publication

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

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles auprès du Bureau Central de la CEI.

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

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

Terminologie

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

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

Symboles graphiques et littéraux

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

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

et pour les appareils électromédicaux,

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

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

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

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

Validity of this publication

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

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available from the IEC Central Office.

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

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

Terminology

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

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

Graphical and letter symbols

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

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

and for medical electrical equipment,

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

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

IEC publications prepared by the same technical committee

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

NORME INTERNATIONALE
INTERNATIONAL STANDARD

CEI
IEC
250

Première édition
First edition
1969

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

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

© CEI 1969 Droits de reproduction réservés — Copyright – all rights reserved

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

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

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

Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE U

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale

SOMMAIRE

Pages

PRÉAMBULE 4

PRÉFACE 4

Articles

1. Objet et domaine d'application 6
2. Définitions 6
3. Utilisations et propriétés des isolants électriques 10
4. Forme d'éprouvettes et système d'électrodes 12
5. Choix des méthodes de mesure 24
6. Mode opératoire 24
7. Résultats 26
8. Procès-verbal 28

ANNEXE — Dispositifs de mesure 30

TABLEAU I: Calcul de la capacité dans le vide et des corrections de bord 44

TABLEAU II: Calcul de la capacité de l'éprouvette — Electrodes micrométriques en contact avec l'éprouvette 46

TABLEAU III: Calcul de la permittivité relative et du facteur de dissipation — Electrodes sans contact direct 48

FIGURES 50

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

CONTENTS

Page

FOREWORD 5

PREFACE 5

Clause

1. Object and scope 7
2. Definitions 7
3. Uses and properties of electrical insulating materials 11
4. Form of specimen and electrode arrangement 13
5. Choice of measuring methods 25
6. Testing procedure 25
7. Results 27
8. Test report 29

APPENDIX — Apparatus 31

TABLE I: Calculation of vacuum capacitance and edge corrections 45

TABLE II: Calculation of specimen capacitance — Contacting micrometer electrodes 47

TABLE III: Calculation of relative permittivity and dissipation factor — Non-contacting electrodes 49

FIGURES 50

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

PRÉAMBULE

1) Les décisions ou accords officiels de la C E I en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.

2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.

3) Dans le but d'encourager cette unification internationale, la C E I exprime le vœu que tous les Comités nationaux ne possédant pas encore de règles nationales, lorsqu'ils préparent ces règles, prennent comme base fondamentale de ces règles les recommandations de la C E I dans la mesure où les conditions nationales le permettent.

4) On reconnaît qu'il est désirable que l'accord international sur ces questions soit suivi d'un effort pour harmoniser les règles nationales de normalisation avec ces recommandations dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Les Comités nationaux s'engagent à user de leur influence dans ce but.

PRÉFACE

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

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

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

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

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

FOREWORD

1) The formal decisions or agreements of the I E C on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.

2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.

3) In order to promote this international unification, the I E C expresses the wish that all National Committees having as yet no national rules, when preparing such rules, should use the I E C recommendations as the fundamental basis for these rules in so far as national conditions will permit.

4) The desirability is recognized of extending international agreement on these matters through an endeavour to harmonize national standardization rules with these recommendations in so far as national conditions will permit. The National Committees pledge their influence towards that end.

PREFACE

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

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

The following countries voted explicitly in favour of publication:

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

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

1. Objet et domaine d'application

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

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

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

2. Définitions

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

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_o} \tag{1}$$

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

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

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

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

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

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

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

1. Object and scope

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

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

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

2. Definitions

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

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_o} \tag{1}$$

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

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

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

$$\varepsilon_o = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m} \approx \frac{1}{36\,\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m} \tag{2}$$

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

$$\varepsilon_o = 0.088\,54 \text{ pF/cm}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

2.2 *L'angle de pertes diélectriques* δ d'un isolant est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et le courant qui en résulte lorsque le diélectrique du condensateur se compose exclusivement du matériau isolant.

2.3 *Le facteur de dissipation diélectrique* [1]) *tg* δ d'un isolant est la tangente de l'angle de pertes δ.

2.4 *L'indice de pertes* ε_r'' d'un isolant est égal au produit de son facteur de dissipation tg δ par sa permittivité relative ε_r.

2.5 *La permittivité complexe relative* ε_r^* est obtenue par combinaison de la permittivité relative et de l'indice de pertes:

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \tag{3}$$

$$\varepsilon_r' = \varepsilon_r \tag{4}$$

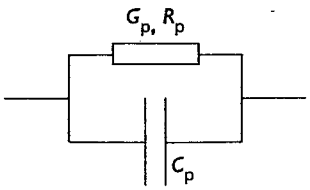
ε_r étant la permittivité relative définie au paragraphe 2.1:

$$\varepsilon_r'' = \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta \tag{5}$$

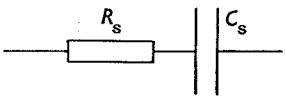
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \tag{6}$$

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

Circuit parallèle équivalent:



Circuit série équivalent:



$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} = \frac{G_p}{\omega C_p} \tag{7}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_s R_s \tag{8}$$

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

---

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

2.2 *The dielectric loss angle* δ of an insulating material is the angle by which the phase difference between applied voltage and resulting current deviates from $\pi/2$ rad, when the dielectric of the capacitor consists exclusively of the dielectric material.

2.3 *The dielectric dissipation factor* [1]) *tan* δ of an insulating material is the tangent of the loss angle δ.

2.4 *The loss index* ε_r'' of an insulating material is equal to the product of its dissipation factor tan δ and its relative permittivity ε_r.

2.5 *The relative complex permittivity* ε_r^* is derived by combining the relative permittivity and the loss index:

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \tag{3}$$

$$\varepsilon_r' = \varepsilon_r \tag{4}$$

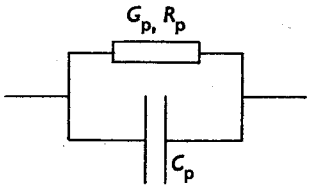
ε_r being the relative permittivity defined in Sub-clause 2.1:

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

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \tag{6}$$

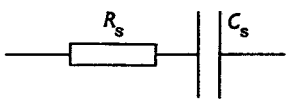
Note. — A capacitor with losses can be represented at any given frequency either by capacitance C_s and resistance R_s in series, or by capacitance C_p and resistance R_p (or conductance G_p) in parallel.

Equivalent parallel circuit:



$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} = \frac{G_p}{\omega C_p} \tag{7}$$

Equivalent series circuit:



$$\tan \delta = \omega C_s R_s \tag{8}$$

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

---

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

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

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \mathrm{tg}^2\,\delta} \tag{9}$$

$$R_p = \frac{1 + \mathrm{tg}^2\,\delta}{\mathrm{tg}^2\,\delta} R_s \tag{10}$$

$$\omega C_s R_s = \frac{1}{\omega C_p R_p} \tag{11}$$

Le facteur de dissipation diélectrique tg δ est le même pour les représentations en série et en parallèle.

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

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

3. Utilisations et propriétés des isolants électriques

3.1 *Rôle des diélectriques*

Les diélectriques sont utilisés en général à deux fins différentes:

— pour supporter les éléments d'un réseau électrique, et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre, et

— pour remplir les fonctions de diélectrique d'un condensateur.

3.2 *Facteurs influençant les propriétés diélectriques*

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

3.2.1 *Fréquence*

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

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

3.2.2 *Température*

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

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

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \tan^2 \delta} \tag{9}$$

$$R_p = \frac{1 + \tan^2 \delta}{\tan^2 \delta} R_s \tag{10}$$

$$\omega C_s R_s = \frac{1}{\omega C_p R_p} \tag{11}$$

The dielectric dissipation factor tan δ is the same for the series and parallel representations.

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

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

3. Uses and properties of electrical insulating materials

3.1 *Object of dielectrics*

Dielectric materials are used in general in two distinct ways:

— to support components of an electrical network and insulate them from each other and from ground, and

— to function as the dielectric of a capacitor.

3.2 *Factors influencing dielectric properties*

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

3.2.1 *Frequency*

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

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

3.2.2 *Temperature*

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

3.2.3 *Humidité*

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

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

3.2.4 *Intensité du champ*

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

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

4. Forme d'éprouvettes et systèmes d'électrodes

4.1 *Isolants solides*

4.1.1 *Géométrie des éprouvettes solides*

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

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

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

3.2.3 *Moisture*

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

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

3.2.4 *Field strength*

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

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

4. Form of specimen and electrode arrangement

4.1 *Solid insulating materials*

4.1.1 *Geometry of solid specimens*

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

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

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

4.1.2 *Systèmes d'électrodes*

4.1.2.1 *Electrodes solidaires de l'éprouvette*

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

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

4.1.2.2 *Electrodes non solidaires de l'éprouvette*

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

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

Deux formes de dispositifs sont particulièrement appropriées:

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

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

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

4.1.2.2.2 *Méthode par déplacement de fluide*

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

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

4.1.2.3 *Effets de bord*

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

4.1.2 *Electrode systems*

4.1.2.1 *Electrodes applied to the specimen*

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

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

4.1.2.2 *No electrodes applied to the specimen*

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

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

Two forms of apparatus are particularly convenient:

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

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

A guard electrode can be included in the electrode system.

4.1.2.2.2 *Fluid displacement method*

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

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

4.1.2.3 *Edge effects*

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

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

4.1.3 *Matériaux pour la constitution des électrodes*

4.1.3.1 *Electrodes en feuilles métalliques*

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

4.1.3.2 *Electrodes métallisées à chaud*

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

4.1.3.3 *Electrodes obtenues par pulvérisation de métal*

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

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

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

4.1.3.5 *Electrodes en mercure et autre métaux liquides*

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

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

4.1.3.6 *Peinture conductrice*

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Alternatively, the edge capacitance may be found from measurements both with and without a guard ring at a convenient frequency and temperature; the edge capacitance so found will be sufficiently accurate for use as a correction at other frequencies and temperatures.

4.1.3 *Materials for the constitution of electrodes*

4.1.3.1 *Metal foil electrodes*

Metal foil electrodes can be applied to the specimen by using the smallest possible quantity of silicone grease or of any other suitable low-loss adhesive. The metal foil may be of pure tin or lead or an alloy of these metals, of thickness up to 100 μm, or of aluminium of thickness less than 10 μm. Aluminium foils, however, are liable to form an electrically insulating oxide film which may influence the measuring results. Gold foil can also be used.

4.1.3.2 *Fired-on metal electrodes*

Metal films can be fired on glass, mica and ceramics, and are suitable for tests on these materials. Silver is commonly used, but migrates under a potential difference at high temperatures or high humidities. Gold is better.

4.1.3.3 *Electrodes produced by spraying metal*

Zinc or copper electrodes may be sprayed on to the specimen. They conform readily to a rough surface. They may be applied even to cloth since they do not penetrate very small holes.

4.1.3.4 *Metal electrodes applied by cathodic evaporation or evaporation in high vacuum*

These procedures may be used if the resultant stresses neither change nor damage the insulating material, and if the material does not emit excessive gas when subjected to vacuum. The edges of any such electrodes shall be sharply defined.

4.1.3.5 *Mercury and other liquid metal electrodes*

These can be used by clamping the specimen between suitable hollow blocks and filling with liquid metal which must be clean. Mercury should not be used at high temperatures, and precautions should be taken even when using it at room temperature, as its vapour is toxic.

Wood's metal or other low-melting alloy can be used instead of mercury. These alloys frequently contain cadmium which, like mercury, is a toxic element. These alloys should be used above 100 °C only in a well-ventilated room or preferably in a hood and the staff told of the possible health hazards.

4.1.3.6 *Conducting paint*

Certain types of high-conductivity silver paints, either air-drying or low-temperature-baking varieties, are commercially available for use as electrode material. They may be sufficiently porous to permit diffusion of moisture through them and thereby allow the test specimen to condition after application of the electrodes. This is particularly useful in studying humidity effects. The paint has the disadvantage of not being ready for use immediately after application. It usually requires overnight air-drying or low-temperature baking to remove all traces of solvent, which otherwise may increase both permittivity and dissipation factor.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Les contours de telles électrodes doivent être bien définis. Ceci peut être difficile à obtenir par application de la peinture au pinceau, mais on peut en général y remédier en pulvérisant la peinture au pistolet et en appliquant des caches adhésifs ou autres. La conductivité des électrodes de peinture à l'argent peut être assez basse pour provoquer des perturbations aux fréquences les plus élevées.

Il est essentiel que le solvant de la peinture soit sans effet permanent sur l'éprouvette.

4.1.3.7 *Graphite*

Le graphite n'est pas recommandé mais peut être utilisé quelquefois, en particulier aux basses fréquences. Sa résistance peut causer une augmentation appréciable de l'angle de pertes et, s'il est appliqué en suspension dans un liquide, il peut pénétrer dans l'éprouvette.

4.1.4 *Choix des électrodes*

4.1.4.1 *Eprouvettes planes*

Deux considérations sont importantes:

a) Les mesures sans électrodes solidaires de l'éprouvette sont rapides et commodes; elles évitent des incertitudes sur la qualité du contact entre les électrodes et l'éprouvette.

b) L'erreur relative sur la permittivité relative:

$$\frac{\Delta\varepsilon_r}{\varepsilon_r}$$

qui résulte d'une erreur:

$$\frac{\Delta h}{h}$$

dans la mesure de l'épaisseur de l'éprouvette h, est donnée par:

$$\frac{\Delta\varepsilon_r}{\varepsilon_r} = \frac{\Delta h}{h} \tag{12}$$

si les électrodes sont solidaires de l'éprouvette, mais si l'éprouvette est placée entre des électrodes d'écartement fixé $s > h$, elle est donnée par:

$$\frac{\Delta\varepsilon_r}{\varepsilon_r} = \left(1 - \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_f}\right) \cdot \frac{\Delta h}{h} \tag{13}$$

où ε_f est la permittivité relative du fluide dans lequel est immergée l'éprouvette, soit égal à un pour les mesures dans l'air.

Dans le cas de matériaux non poreux, dont la permittivité relative est supérieure à 10 environ, on doit utiliser des électrodes obtenues par dépôt de métal. Pour ces matériaux, les électrodes doivent couvrir entièrement les surfaces de l'éprouvette et il n'est pas nécessaire d'avoir une électrode de garde. Pour les matériaux dont la permittivité relative est comprise entre 3 et 10, les électrodes qui fournissent la meilleure précision sont celles en feuilles, en mercure ou obtenues par dépôt de métal et on doit les choisir de façon qu'elles conviennent aux propriétés du matériau. Mais, si on peut obtenir une précision suffisante dans la mesure de l'épaisseur, il peut être préférable de recourir à la méthode utilisant des électrodes non solidaires de l'éprouvette pour des raisons de commodité. La méthode d'immersion dans un liquide est excellente si des liquides appropriés existent et si leur permittivité relative est connue ou peut être déterminée avec une précision suffisante.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

The edges of any such electrodes shall be sharply defined; this may be difficult when the paint is brushed on, but this limitation can usually be overcome by spraying the paint and employing either clamp-on or pressure-sensitive masks. The conductivity of silver-paint electrodes may be low enough to give trouble at the highest frequencies.

It is essential that the solvent of the paint has no permanent effect on the specimen.

4.1.3.7 *Graphite*

Graphite is not recommended but may sometimes be used, especially at lower frequencies. Its resistance may cause an appreciable increase in loss angle and if it is applied from a suspension in a liquid it may penetrate the specimen.

4.1.4 *Choice of electrodes*

4.1.4.1 *Sheet specimens*

Two considerations are important:

a) Working without applied electrodes is quick and convenient, and avoids uncertainty about the effectiveness of the contact between electrodes and specimen.

b) The proportional error in relative permittivity:

$$\frac{\Delta\varepsilon_r}{\varepsilon_r}$$

resulting from an error:

$$\frac{\Delta h}{h}$$

in the measurement of the specimen thickness h, is given by:

$$\frac{\Delta\varepsilon_r}{\varepsilon_r} = \frac{\Delta h}{h} \tag{12}$$

if electrodes are applied to the specimen, but if the specimen is placed between electrodes of a fixed spacing $s > h$, it is given by:

$$\frac{\Delta\varepsilon_r}{\varepsilon_r} = \left(1 - \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_f}\right) \cdot \frac{\Delta h}{h} \tag{13}$$

when ε_f is the relative permittivity of the fluid in which the specimen is immersed, being unity for the measurement in air.

For non-porous materials having relative permittivities above about 10, deposited metal electrodes should be used. For such materials, the electrodes should cover the whole surfaces of the specimen, and no guard electrode is necessary. For materials having relative permittivities between about 3 and 10, the electrodes allowing the best accuracy are foils, mercury or deposited metal, and they must be chosen to suit the properties of the material. But, if sufficient accuracy can be obtained in the measurement of thickness, the method with no electrodes applied to the specimen may be preferable on the grounds of convenience. The liquid-immersion method is excellent if suitable liquids exist and their relative permittivities are known or can be determined with sufficient accuracy.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

4.1.4.2 *Eprouvettes tubulaires*

Le système d'électrodes le plus approprié pour une éprouvette tubulaire dépend de sa permittivité, de son épaisseur radiale, de son diamètre et de la précision de mesure recherchée. Le système d'électrodes doit être constitué en général par une électrode intérieure et par une électrode extérieure légèrement plus courte munie d'une électrode de garde à chaque extrémité. L'intervalle entre l'électrode extérieure et les électrodes de garde doit être faible par rapport à l'épaisseur radiale du tube. Pour des éprouvettes de petit et moyen diamètres, on peut appliquer sur la face externe du tube trois bandes de feuille métallique ou de métal déposé, la bande centrale étant utilisée comme électrode active extérieure et les deux bandes latérales servant d'électrodes de garde. Pour l'électrode intérieure, on peut utiliser du mercure, un film obtenu par dépôt de métal ou un mandrin soigneusement ajusté.

Pour les éprouvettes tubulaires de permittivité élevée, les électrodes intérieure et extérieure peuvent s'étendre sur toute la longueur du tube et on peut se dispenser d'électrodes de garde.

Pour les tubes ou cylindres de grand diamètre, le système d'électrodes peut être constitué de portions circulaires ou rectangulaires, l'essai ne portant que sur une partie de la périphérie du tube. On peut traiter le cas de ces éprouvettes comme celui des éprouvettes planes. Les électrodes intérieures en feuille métallique, métal déposé, ou constituées par une tige étroitement ajustée, sont utilisées avec des électrodes extérieures et des électrodes de garde en feuille métallique ou en métal déposé. Il peut être nécessaire d'utiliser à l'intérieur du tube une attache flexible et expansible pour assurer un contact satisfaisant entre l'électrode intérieure et l'éprouvette en cas d'emploi d'une électrode en feuille.

Pour les mesures de haute précision, on peut utiliser un système d'électrodes non solidaires de l'éprouvette à condition de pouvoir obtenir une précision suffisante dans la mesure de l'épaisseur. Pour les éprouvettes tubulaires dont la permittivité relative ε_r est inférieure ou égale à 10 environ, les électrodes les plus convenables sont celles en feuilles, mercure ou métal déposé. Pour les éprouvettes tubulaires dont la permittivité relative est supérieure à 10 environ, on doit utiliser des électrodes en métal déposé, les électrodes obtenues par métallisation à chaud doivent être utilisées pour les tubes en céramiques. Les électrodes peuvent être appliquées sous forme de bandes, sur une fraction ou sur la totalité de la circonférence.

4.2 *Isolants liquides*

4.2.1 *Construction des cellules*

Les caractéristiques essentielles d'un système d'électrodes pour la mesure des liquides à faible facteur de dissipation sont: la facilité de nettoyage, de réassemblage si nécessaire et de remplissage sans perturbation des positions relatives des électrodes. D'autres caractéristiques sont souhaitables: faible contenance, inertie réciproque du matériau constituant les électrodes et du liquide, contrôle facile de sa température, blindage adéquat des bornes et des connexions, non immersion dans le liquide des isolants supportant les électrodes. En outre, la cellule ne doit comporter ni lignes de fuite trop courtes, ni bords aigus susceptibles d'influencer la précision des mesures.

Le détail de cellules réunissant les conditions requises ci-dessus est donné sur les figures 2 à 4, pages 51 à 53. Les électrodes sont en acier inoxydable et les parties isolantes en verre au borosilicate ou en quartz fondu. Les cellules des figures 2 et 3 qui sont aussi utilisables pour les mesures de résistivité sont décrites en détail dans la Publication 247 de la CEI: Cellules recommandées pour la mesure de la résistivité des liquides isolants et technique de nettoyage des cellules.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

4.1.4.2 *Tube specimens*

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 should 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 should be small compared with the thickness of the tube wall. For tube specimens 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 mercury, deposited metal film, or a tightly fitting mandrel may be used.

For tube specimens 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 specimens can be treated as sheet specimens. 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 very accurate measurements, a system with no electrodes applied to the specimen may be used provided sufficient accuracy can be obtained in the measurement of thickness. For tube specimens having relative permittivities ε_r up to about 10, the most convenient electrodes are foils, mercury or deposited metal. For tube specimens having relative permittivities above about 10, deposited metal electrodes should be employed; fired-on electrodes should 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.

4.2 *Liquid insulating materials*

4.2.1 *Design of cells*

The essential features of an electrode system for testing liquids having low dielectric dissipation factor are: that it can easily be cleaned, reassembled if necessary and filled without disturbing the relative positions of the electrodes. Other desirable features are: that it should need only a small amount of liquid, that the electrode materials do not affect the liquid and vice versa, that its temperature should be easily controllable, that the terminals and connections should be adequately screened and that the insulating supports for the electrodes should not be immersed in the liquid. Furthermore, the cell should not contain too short creepage distances and sharp edges which otherwise could influence the measuring accuracy.

Details of cells meeting the above requirements are given in Figures 2 to 4, pages 51 to 53. The electrodes are of stainless steel and the insulation of borosilicate glass or fused quartz. Cells of Figures 2 and 3, which are also usable for resistivity measurements, are described in detail in IEC Publication 247, Recommended Test Cells for Measuring the Resistivity of Insulating Liquids and Methods of Cleaning the Cells.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Les électrodes en acier inoxydable ne sont pas toujours appropriées puisque quelques liquides, comme par exemple les dérivés chlorés, montrent une variation significative du facteur de dissipation en fonction du matériau de l'électrode. Des résultats beaucoup plus stables ont été parfois obtenus avec des électrodes d'aluminium et de duralumin.

4.2.2 *Préparation des cellules*

La cellule doit être nettoyée avec un ou plusieurs solvants appropriés, ou une succession de solvants qui ont été préalablement essayés, afin de s'assurer qu'ils ne contiennent pas de composés instables, soit en vérifiant leur pureté par analyse chimique, soit en s'assurant que leur usage conduit à des résultats corrects sur un liquide de permittivité et de facteur de dissipation diélectrique faibles et connus. Lorsque les cellules sont utilisées pour l'essai de certains types de fluides isolants, il peut être nécessaire de nettoyer la surface des électrodes de la cellule avec un détergent modérément abrasif et de l'eau, car l'usage seul de solvants ne permet pas toujours l'élimination des produits de contamination. Si l'on utilise une succession de solvants, il faut terminer en utilisant, soit un éther de pétrole pur pour analyse, de point d'ébullition maximal inférieur à 100 °C, soit un autre solvant dont l'usage a été reconnu apte à fournir des valeurs correctes pour un liquide de permittivité et de facteur de dissipation diélectrique faibles et connus, et chimiquement semblable au liquide à essayer. La technique décrite ci-dessous est recommandée.

La cellule doit être démontée complètement et toutes les pièces parfaitement nettoyées, avec les solvants choisis, par un procédé de reflux ou par lavages répétés avec agitation dans des quantités renouvelées de solvant. Toutes les pièces doivent être égouttées et placées dans une étuve exempte de souillures à 110 °C environ pendant 30 min.

Les pièces doivent être laissées à refroidir jusqu'à atteindre une température supérieure de quelques degrés à la température ambiante et alors assemblées de nouveau. La cellule doit ensuite être remplie avec un peu du produit à mesurer, laissée en repos quelques minutes, vidée et remplie à nouveau. Le support isolant ne doit pas être mouillé par le liquide.

A tous les stades du nettoyage les pièces doivent être manipulées avec des crochets ou des pincettes propres de façon qu'aucune surface active interne ne soit touchée avec les mains.

Notes 1. — Lors des essais de routine sur des huiles de même qualité, le procédé de nettoyage décrit ci-dessus peut être remplacé par un simple essuyage de la cellule après chaque essai avec un papier sec qui ne laisse pas de débris (fibres).

2. — Les précautions appropriées pour éviter le feu et les effets toxiques sur le personnel doivent être prises lors de l'usage des solvants: quelques-uns, notamment le benzène, le tétrachlorure de carbone, le toluène et le xylène sont particulièrement toxiques. En outre, les solvants chlorés sont sujets à la décomposition par la lumière.

4.2.3 *Etalonnage des cellules*

Lorsqu'une grande précision dans la détermination de la permittivité relative d'un diélectrique liquide est nécessaire, la «constante d'électrode» doit être déterminée d'abord au moyen d'un liquide étalon de permittivité relative connue (par exemple le benzène).

La «constante d'électrode» C_c est déterminée par la formule:

$$C_c = \frac{C_n - C_o}{\varepsilon_n - 1} \qquad (14)$$

où:

C_o est la capacité du système d'électrodes dans l'air

C_n est la capacité du système d'électrodes rempli du liquide étalon

ε_n est la permittivité relative du liquide étalon.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

As some liquids, as for example chlorides, reveal some significant dependence of the dielectric dissipation factor on the electrode material, electrodes made of stainless steel are not always appropriate. Much more stable results sometimes have been obtained working with electrodes made of aluminium and duraluminium.

4.2.2 *Preparation of cells*

The cell should be cleaned with one or more appropriate solvents or a succession of solvents which have previously been checked to ensure that they do not contain unstable compounds, either by chemical tests for purity or by ascertaining that they lead to correct results on a sample of liquid of known low permittivity and dielectric dissipation factor. When cells are used for testing some types of insulating fluids, it may be necessary to clean the electrode surfaces of the cell with a mildly abrasive detergent and water as the use of solvents alone does not always result in the removal of contamination products. If a series of solvents is used, it should end with the use of analytical grade petroleum ether with a maximum boiling point less than 100 °C, or, alternatively, with any solvent which is known to give the correct values for a liquid of known low permittivity and dielectric dissipation factor and chemically similar to the liquid to be tested. The technique described below is recommended.

The cell should be dismantled completely and all parts thoroughly cleaned with the chosen solvents, either by a reflux procedure or by repeated washings with agitation in a fresh solvent. All parts should be shaken free of solvent and placed in an uncontaminated oven at approximately 110 °C for 30 min.

The parts should be allowed to cool to a few degrees above room temperature and then reassembled. The cell should then be filled with some of the liquid to be measured, allowed to stand for a few minutes, emptied and refilled. The supporting insulation should not be wetted by the liquid.

At all stages, the parts should be manipulated with clean hooks or tongs so that no effective internal surfaces are touched with the hands.

Notes 1. — During routine testing of oils of the same quality, the cleaning procedure described above can be foregone by merely rubbing the cell after each test with a dry paper which leaves no waste.

2. — Appropriate precautions against fire and toxic effects on personnel must be observed when using solvents: some, notably benzene, carbon tetrachloride, toluene, and xylene, are particularly toxic. Further, chlorinated solvents are subject to decomposition by light.

4.2.3 *Calibration of cells*

When high accuracy in determining the relative permittivity of liquid dielectrics is needed, the "electrode constant" should be determined preliminarily by means of a calibration liquid of known relative permittivity, e.g. benzene.

The "electrode constant" C_c is determined by the formula:

$$C_c = \frac{C_n - C_o}{\varepsilon_n - 1} \qquad (14)$$

where:

C_o = the capacitance of electrode arrangement in air

C_n = the capacitance of electrode arrangement filled with the calibration liquid

ε_n = the relative permittivity of the calibration liquid.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

La différence entre les valeurs de C_o et C_c donne la valeur de la correction de capacité:

$$C_g = C_o - C_c \tag{15}$$

dont on tient compte lors du calcul de la permittivité relative ε_x du liquide inconnu, conformément à la formule:

$$\varepsilon_x = \frac{C_x - C_g}{C_c} \tag{16}$$

où:

C_x est la capacité du système d'électrodes rempli du liquide à essayer.

La précision maximale pour ε_x est obtenue lorsque les valeurs de C_o, C_n, et C_x sont déterminées à la température pour laquelle la valeur ε_n est connue.

L'application de la méthode décrite assure l'obtention de résultats suffisamment précis dans la détermination de la permittivité relative des diélectriques liquides puisqu'elle élimine les erreurs dues soit aux capacités parasites soit à une mesure imprécise de l'espace entre les électrodes.

5. Choix des méthodes de mesure

Les méthodes de mesure de la permittivité et du facteur de dissipation peuvent être classées en deux catégories: méthodes de zéro et méthodes de résonance.

5.1 *Les méthodes de zéro* sont utilisées jusqu'à des fréquences de l'ordre de 50 MHz. Pour les mesures de la permittivité et du facteur de dissipation, des techniques de substitution peuvent être employées; c'est-à-dire que le pont est équilibré, principalement par réglage dans une branche du pont, aussi bien avec que sans connexion de l'éprouvette. Les ponts normalement utilisés sont le pont de Schering, le pont à transformateur (un pont dont les bras de proportion sont couplés par inductance mutuelle), et le pont en «double T». Le pont à transformateur a l'avantage de permettre l'emploi d'une électrode de garde sans accessoires additionnels et de ne nécessiter aucune opération supplémentaire; il ne présente pas d'inconvénients par rapport aux autres ponts.

5.2 *Les méthodes de résonance* peuvent être utilisées dans la gamme de 10 kHz à plusieurs centaines de mégahertz. Ce sont invariablement des méthodes de substitution. La méthode employée le plus communément est celle de la variation de réactance. Ces méthodes ne peuvent pas se prêter facilement à l'utilisation d'électrodes de garde.

Note. — Des exemples de ponts et de circuits types sont donnés en annexe. Cette énumération ne peut naturellement pas être complète. Des informations complémentaires relatives à la description des ponts et des méthodes de mesure peuvent être trouvées dans la littérature et aussi dans les brochures des firmes construisant de tels appareils.

6. Mode opératoire

6.1 *Préparation des éprouvettes*

L'éprouvette doit être découpée dans le matériau solide ou être préparée en suivant une technique normalisée en vue d'obtenir des conditions initiales déterminées.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

The difference of values C_o and C_c gives the correction capacitance:

$$C_g = C_o - C_c \tag{15}$$

which is taken into account while calculating the relative permittivity ε_x of the unknown liquid according to:

$$\varepsilon_x = \frac{C_x - C_g}{C_c} \tag{16}$$

where:

C_x = the capacitance of electrode arrangement filled with the liquid to be tested.

Maximum accuracy in ε_x is obtained if values C_o, C_n, and C_x are determined at that temperature for which the value ε_n is known.

The application of the described method ensures that sufficiently accurate results are obtained in determining the relative permittivity of liquid dielectrics, as it eliminates errors made either because of parasitic capacitances or through inaccurate measuring of the value of the gap between the electrodes.

5. Choice of measuring methods

Methods for measuring permittivity and dissipation factor can be divided into two groups: null methods and resonance methods.

5.1 *Null methods* are used at frequencies up to about 50 MHz. 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, both 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.

5.2 *Resonance methods* can be used in the range 10 kHz to several hundred megahertz. They are invariably substitution methods. The method commonly used is that of reactance-variation. These methods cannot easily be adapted for use with guard electrodes.

Note. — Examples of typical bridges and circuits are to be found in the Appendix. This enumeration can by no means be complete. Further information describing the bridges and the methods for making the measurements may be found in the literature and also in pamphlets of the firms producing such apparatus.

6. Testing procedure

6.1 *Preparation of specimens*

The specimen shall be cut from the solid material or prepared by an appropriately standardized technique in order to obtain a determined initial condition.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

On effectue ensuite la mesure de l'épaisseur avec une précision de ± (0,2% + 0,005 mm). Les points de mesure doivent être répartis uniformément sur toute la surface de l'éprouvette. Si nécessaire, on détermine aussi la surface effective.

6.2 *Conditionnement*

Le conditionnement doit être effectué en conformité avec les spécifications particulières applicables.

6.3 *Mesures*

Les mesures électriques sont faites conformément aux méthodes employées suivant cette recommandation et les recommandations des fabricants du matériel utilisé.

Aux fréquences de l'ordre de 1 MHz ou plus, il faut prendre soin que l'inductance des connexions n'influence pas les résultats. Un système coaxial est utile. (Le système de la figure 1, page 50, comprend aussi, incorporé, un condensateur variable à vernier utilisé pour la méthode de mesure par variation de réactance.)

7. Résultats

7.1 *Permittivité relative ε_r*

La permittivité relative ε_r d'une éprouvette munie de ses propres électrodes est calculée suivant la formule (1). Comme la capacité C_x' d'une éprouvette mesurée sans anneau de garde comporte une petite fraction de capacité de bord C_e, la permittivité relative est:

$$\varepsilon_r = \frac{C_x' - C_e}{C_o} \qquad (17)$$

où:

C_o et C_e peuvent être calculées d'après les indications du tableau I, page 44.

S'il y a lieu, des corrections seront faites de façon analogue pour la capacité de l'éprouvette à la terre, pour la capacité entre les contacts de l'interrupteur et pour la différence entre les capacités équivalentes en série et en parallèle.

La permittivité relative d'éprouvettes mesurée entre les électrodes micrométriques ou entre des électrodes sans contact avec l'éprouvette est calculée suivant les formules appropriées des tableaux II et III, pages 46 et 48.

7.2 *Facteur de dissipation diélectrique tg δ*

Le facteur de dissipation diélectrique tg δ sera calculé à partir des valeurs mesurées en appliquant les formules relatives au dispositif de mesure utilisé.

7.3 *Degré de précision possible*

Les méthodes indiquées à l'article 5 et dans l'annexe visent à un degré de précision de ± 1% pour la détermination de la permittivité et de ± (5% + 0,0005) pour celle du facteur de dissipation. Ces précisions dépendent d'au moins trois facteurs: la précision des observations relatives à la capacité et au facteur de dissipation, la précision des corrections à apporter à ces grandeurs pour tenir compte du système d'électrodes utilisé et la précision du calcul de la capacité directe entre électrodes dans le vide (tableau I).

Dans des conditions favorables et aux basses fréquences, on peut mesurer la capacité avec une précision de ± (0,1% + 0,02 pF) et le facteur de dissipation avec une précision de ± (2% + 0,000 05). Aux plus hautes fréquences, ces limites peuvent être portées pour la capacité à ± (0,5% + 0,1 pF) et pour le facteur de dissipation à ± (2% + 0,0002).

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

The subsequent measurement of thickness shall be made accurately with a tolerance of ± (0.2% + 0.005 mm). The measuring points shall be distributed uniformly over the surface of the specimen. The effective area is also determined if necessary.

6.2 *Conditioning*

Conditioning should be made in accordance with the relevant specifications.

6.3 *Measurement*

Electrical measurements are made appropriate to the method employed, following this Recommendation and the recommendations of the makers of the equipment used.

At frequencies of the order of 1 MHz or more, care must be taken that the inductance of the connecting leads does not influence the results. A coaxial-lead system is useful. (The system in Figure 1, page 50, also provides a built-in vernier capacitor for use in the reactance-variation method of measurement.)

7. Results

7.1 *Relative permittivity* ε_r

The relative permittivity ε_r of a specimen provided with its own electrodes is calculated according to equation (1). As the measured capacitance C_x' of a specimen without guard-rings contains a small amount of edge capacitance C_e, the relative permittivity is:

$$\varepsilon_r = \frac{C_x' - C_e}{C_o} \tag{17}$$

where:

C_o and C_e can be calculated from Table I, page 45.

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

Relative permittivity of specimens measured between micrometer electrodes or between non-contacting electrodes is calculated according to the appropriate equations of Tables II and III, pages 47 and 49.

7.2 *The dielectric dissipation factor tan* δ

The dielectric dissipation factor tan δ shall be calculated from the measured values in accordance with the equations given for the particular measuring arrangement used.

7.3 *Accuracy to be expected*

The methods outlined in Clause 5 and in the Appendix envisage a degree of accuracy in the determination of permittivity of ± 1% and of dissipation factor of ± (5% + 0.0005). These accuracies depend upon at least three factors: the accuracy of the observations for capacitance and dissipation factor, the accuracy of the corrections to these quantities caused by the electrode arrangement used and the accuracy of the calculation of the direct interelectrode vacuum capacitance (Table I).

Under favourable conditions and at the lower frequencies, capacitance can be measured with an accuracy of ± (0.1% + 0.02 pF) and dissipation factor of ± (2% + 0.000 05). At the higher frequencies, these limits may increase for capacitance to ± (0.5% + 0.1 pF) and for dissipation factor to ± (2% + 0.0002).

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Les éprouvettes munies d'une électrode de garde ne sont sujettes qu'à une erreur dans la capacité directe entre électrodes dans le vide. L'erreur due à un intervalle trop grand entre l'électrode gardée et l'électrode de garde peut s'élever à quelques dixièmes de pour-cent et la correction peut se calculer à quelques centièmes près. Pour une épaisseur moyenne de 1,6 mm, en admettant qu'on puisse la mesurer avec une précision de ± 0,005 mm, l'erreur dans la mesure de l'épaisseur de l'éprouvette peut s'élever à quelques dixièmes de pour-cent. On peut mesurer à ± 0,1% près le diamètre d'une éprouvette circulaire, mais c'est son carré qui intervient. En combinant ces erreurs, on peut déterminer la capacité directe entre électrodes dans le vide avec une précision de ± 0,5%.

La capacité des éprouvettes munies d'électrodes solidaires de leur surface, mesurée avec des électrodes micrométriques, ne nécessite pas d'autre correction que celle de la capacité directe entre électrodes, pourvu que les éprouvettes aient un diamètre suffisamment inférieur à celui des électrodes micrométriques. Lorsqu'on effectue des mesures d'une autre façon sur des éprouvettes non munies d'électrodes de garde, le calcul des capacités de bord et par rapport à la terre entraîne une erreur considérable, car chacune d'elles peut être de 2% à 40% de la capacité de l'éprouvette. Avec la connaissance actuelle de ces capacités, on peut avoir une erreur de 10% dans le calcul de la capacité de bord et une erreur de 25% dans le calcul de la capacité par rapport à la terre. Donc l'erreur totale en jeu peut aller de plusieurs dixièmes à quelques pour-cent. Cependant, si aucune électrode n'est mise à la terre, l'erreur sur la capacité par rapport à la terre est considérablement réduite.

Avec des électrodes micrométriques, il est possible de mesurer un facteur de dissipation de l'ordre de 0,03 à ± 0,0003 près, et un facteur de dissipation de l'ordre de 0,0002 à ± 0,000 05 près. La plage de facteur de dissipation est normalement de 0,0001 à 0,1, mais elle peut s'étendre au delà de 0,1. Entre 10 MHz et 20 MHz il est possible de déceler un facteur de dissipation de 0,000 02. Les permittivités relatives de 1 à 5 peuvent être mesurées à ± 2% près. La précision est limitée par celle des mesures nécessaires pour le calcul de la capacité directe entre électrodes dans le vide et par les erreurs dans le système d'électrodes micrométriques.

8. Procès-verbal

Le procès verbal d'essais doit donner les renseignements suivants, s'il y a lieu;

- Type et désignation de l'isolant et forme sous laquelle il est fourni. Méthode de prélèvement, forme, dimensions de l'éprouvette et date de prélèvement (il est important de donner des indications sur l'épaisseur de l'éprouvette et, si nécessaire, des renseignements exacts sur le traitement des éprouvettes aux surfaces de contact avec les électrodes).
- Méthode et durée de conditionnement des éprouvettes.
- Système d'électrodes et s'il y a lieu type d'électrodes solidaires de l'éprouvette.
- Appareils de mesure.
- Température et humidité relative au cours de l'essai et température de l'éprouvette.
- Tension appliquée.
- Fréquence utilisée.
- Permittivité relative ε_r (valeur moyenne).
- Facteur de dissipation diélectrique tg δ (valeur moyenne).
- Date de l'essai.

Les valeurs de la permittivité relative et du facteur de dissipation et les valeurs qui en sont déduites par calcul, telles que l'indice de pertes et l'angle de pertes, doivent être données, si cela paraît utile, en fonction de la température et de la fréquence. Elles ne sont pas toutes nécessaires ni même judicieuses dans tous les cas.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Dielectric specimens provided with a guard electrode are subject only to an error in the calculation of the direct interelectrode vacuum capacitance. The error caused by too wide a gap between the guarded and the guard electrodes will generally amount to several tenths per cent, and the correction can be calculated to a few per cent of itself. The error in measuring the thickness of the specimen can amount to a few tenths per cent for an average thickness of 1.6 mm, on the assumption that it can be measured to ± 0.005 mm. The diameter of a circular specimen can be measured to an accuracy of ± 0.1%, but enters as the square. Combining these errors, the direct interelectrode vacuum capacitance can be determined to an accuracy of ± 0.5%.

The capacitance of specimens with electrodes applied to the surface, measured with micrometer electrodes, needs no corrections other than that for direct interelectrode capacitance, provided the specimens are sufficiently smaller in diameter than the micrometer electrodes. When two-terminal specimens are measured in any other manner, the calculation of edge and ground capacitance will involve considerable error, since each may be from 2% to 40% of the specimen capacitance. With the present knowledge of these capacitances, there may be a 10% error in calculating the edge capacitance and a 25% error in evaluating the ground capacitance. Hence the total error involved may be from several tenths to a few per cent. However, when neither electrode is grounded, the ground capacitance error is greatly reduced.

With micrometer electrodes, it is possible to measure dissipation factor of the order of 0.03 to within ± 0.0003 of the true value and dissipation factor of the order of 0.0002 to within ± 0.000 05 of it. The range of dissipation factor is normally 0.0001 to 0.1 but may be extended above 0.1. Between 10 MHz and 20 MHz it is possible to detect a dissipation factor of 0.000 02. Relative permittivities from 1 to 5 may be measured to ± 2% of the true value. The accuracy is limited by the accuracy of the measurements required in the calculation of direct interelectrode vacuum capacitance and by errors in the micrometer electrode system.

8. Test report

In the test report, the following information shall be given when relevant:

- Type and designation of the insulating material as well as the form in which it is delivered. Method of sampling, shape, dimensions of the test specimen and date of sampling (statements on the specimen thickness and, if necessary, exact information on the treatment of the specimens at the contact areas of the electrodes are important).
- Method and duration of conditioning the specimens.
- Electrode arrangement and type of electrode, applied to specimen, if any.
- Measuring apparatus.
- Temperature and relative humidity during the test and temperature of specimen.
- Applied voltage.
- Applied frequency.
- Relative permittivity ε_r (average value).
- Dielectric dissipation factor tan δ (average value).
- Date of test.

Values of relative permittivity and dielectric dissipation factor and the values calculated from them as loss index and loss angle shall be given, if necessary, in relation to temperature and frequency. Not all are necessary or even appropriate in all cases.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

ANNEXE

DISPOSITIFS DE MESURE

1. Pont de Schering

1.1 *Généralités*

Le pont de Schering constitue le dispositif le plus classique pour la mesure de la permittivité et des pertes diélectriques. Il est utilisé dans la gamme de fréquences allant des fréquences inférieures aux fréquences industrielles (50 Hz à 60 Hz) jusqu'à des fréquences de l'ordre de 100 kHz et pour des capacités habituellement comprises entre 50 pF et 1 000 pF (capacités usuelles des échantillons ou des équipements essayés).

C'est un pont à quatre branches (figure 5, page 53) dont deux essentiellement capacitives (la capacité inconnue C_X et une capacité C_N sans pertes) et les deux autres branches (souvent dites de mesure), composées de résistances (non réactives) R_1 et R_2 dont au moins celle (R_1) opposée à la capacité inconnue C_X est shuntée par une capacité (C_1). Cette dernière, et généralement l'une au moins des deux résistances R_1 et R_2, sont variables.

Si l'on adopte pour la capacité C_X la représentation équivalente d'une résistance R_S et d'une capacité (pure) C_S en série, l'équilibre du pont de la figure 5 conduit aux relations:

$$C_S = C_N \frac{R_1}{R_2} \tag{18}$$

et:

$$\operatorname{tg} \delta_X = \omega C_S R_S = \omega C_1 R_1 \tag{19}$$

Si la résistance R_2 est shuntée par une capacité C_2, l'expression pour tg δ devient:

$$\operatorname{tg} \delta_X = \omega C_1 R_1 - \omega C_2 R_2 \tag{20}$$

Les formes concrètes de réalisation du pont diffèrent sensiblement selon la gamme de fréquences. Ceci découle du fait qu'une capacité de 50 pF à 1 000 pF représente une impédance de 60 MΩ à 3 MΩ à 50 Hz et seulement de 30 000 Ω à 1 500 Ω à 100 kHz.

Dans ce dernier cas, les quatre branches du pont pourront aisément avoir des impédances du même ordre de grandeur, ce qui ne sera jamais le cas aux fréquences de 50 Hz ou de 60 Hz. Nous sommes donc amenés à distinguer deux types différents d'utilisation: à basse et à (relativement) haute fréquence.

1.2 *Pont à basse fréquence*

Ce sera normalement un pont à haute tension, non seulement pour des raisons de sensibilité, mais aussi du fait qu'aux fréquences basses les pertes diélectriques intéressent quasi exclusivement la technique des hautes tensions. La très grande différence entre les ordres de grandeur des impédances des branches capacitives et de mesure, dont il vient d'être question, entraîne alors une inégalité de même ordre dans la répartition de la tension, la presque totalité de celle-ci se retrouvant sur C_X et C_N. Les conditions d'équilibre données ci-dessus sont seulement valables si les éléments basse tension sont blindés par rapport aux éléments haute tension; ce blindage doit être mis à la terre afin de préserver la stabilité de l'équilibre. Comme l'indique la figure 6, page 54, le blindage est compatible avec l'emploi de capacités C_X et C_N munies de garde, cette garde étant pratiquement indispensable pour C_N.

Le choix du procédé de mise à la terre conduit essentiellement à deux variantes.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

APPENDIX

APPARATUS

1. Schering bridge

1.1 *General*

The Schering bridge represents the most classical device for the measurement of permittivity and dielectric losses. It is used in the frequency range from below power frequencies (50 Hz and 60 Hz) up to the order of 100 kHz and for capacitances of 50 pF to 1 000 pF (usual capacitances of specimens or equipment to be tested).

It is a four-arm network (Figure 5, page 53), two of these arms being primarily capacitive (the unknown capacitance C_X and a capacitance C_N without losses) and the two others (often called measuring arms) consisting of non-reactive resistances R_1 and R_2, the resistance (R_1) opposite to the unknown capacitance C_X, at least, being shunted by a capacitance (C_1). This last capacitance, and generally one at least of the two resistances R_1 and R_2 are adjustable.

If one chooses for the capacitance C_X the equivalent representation of a resistance R_S and a (pure) capacitance C_S in series, the balance of the bridge illustrated in Figure 5 leads to:

$$C_S = C_N \frac{R_1}{R_2} \tag{18}$$

and:

$$\tan \delta_X = \omega C_S R_S = \omega C_1 R_1 \tag{19}$$

If the resistance R_2 is shunted by a capacitance C_2, the expression for tan δ becomes:

$$\tan \delta_X = \omega C_1 R_1 - \omega C_2 R_2 \tag{20}$$

The practical realizations of the bridge will differ appreciably according to the frequency range. This is a result of the fact that a capacitance of 50 pF to 1 000 pF represents an impedance of about 60 MΩ to 3 MΩ at 50 Hz and only about 30 000 Ω to 1 500 Ω at 100 kHz.

In the latter case, the four arms of the bridge may easily have impedances of the same order of magnitude, while this will never be the case at frequencies of 50 Hz or 60 Hz. We are thus led to distinguish two different types of use, at low and at (relatively) high frequency.

1.2 *Low-frequency bridge*

This will normally be a high-voltage bridge, not only for reasons of sensitivity but also because, at low frequencies, it is high-voltage technology which is nearly exclusively interested in the problem of dielectric losses. The very great difference in the order of magnitude of the impedances between the so-called capacitive and measuring arms, consequently, results in a similar inequality in the distribution of the voltage, by far the largest part of it being found across the capacitances C_X and C_N. The balance conditions given above are only valid if the low-voltage elements are screened from the high-voltage elements; this screening must be earthed in order to secure the stability of the balance. As Figure 6, page 54, shows, the screening is compatible with the use of guarded capacitances C_X and C_N, the guard for C_N being practically indispensable.

The choice for the earthing procedure substantially leads to two types of bridges.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

1.2.1 *Pont de Schering simple, avec blindage*

Le point B du pont (borne d'alimentation du pont située du côté des branches de mesure) est relié au blindage et à la terre.

Le blindage joue bien son rôle de protection par rapport au côté haute tension, mais il accroît la capacité entre celui-ci et les divers conducteurs aboutissant aux extrémités M et N de la diagonale détectrice, capacité qui est soumise à la tension aux bornes des branches de mesure. Ceci peut introduire une erreur qui limite ordinairement la précision sur tg δ à l'ordre de 0,1%, surtout dans le cas de capacités C_X et C_N inégales.

1.2.2 *Pont de Schering avec «dispositif de Wagner»*

C'est la solution que représente la figure 6, page 54, et par laquelle on porte au même potentiel la diagonale détectrice et le blindage. Ceci est obtenu grâce à l'emploi de branches extérieures additionnelles Z_A et Z_B (dispositif de Wagner) dont le point intermédiaire P est relié au blindage et à la terre. On ajuste ces branches additionnelles (pratiquement Z_B) de façon que les tensions sur Z_A et Z_B soient respectivement identiques à celles aux bornes des branches capacitives et de mesure du pont. On voit que cette solution revient à l'équilibre simultané de deux ponts, le pont principal AMNB et le pont auxiliaire AMPB (ou ANPB). Le double équilibre s'obtient par approximations successives en déplaçant le détecteur de l'un à l'autre pont. On peut ainsi gagner au moins un ordre de grandeur sur la précision qui n'est pratiquement plus limitée que par celle des éléments utilisés dans le pont.

On remarquera que la solution particulière qui a été décrite ne s'applique que si les deux pôles du générateur peuvent être isolés de la terre. Si ce n'est pas possible, l'utilisation d'un montage plus complexe peut être nécessaire (pont à double blindage).

1.3 *Pont de Schering pour fréquences élevées*

Ce sera normalement un pont travaillant sous tension modérée permettant ainsi plus de souplesse; la capacité C_N sera très souvent variable (en haute tension la capacité C_N est très généralement fixe), et les méthodes de substitution pourront être plus facilement adoptées.

On peut encore utiliser avec avantage le blindage et le dispositif de Wagner, les effets capacitifs indésirables augmentant avec la fréquence.

1.4 *Note sur les détecteurs*

Lorsque le point B du pont de Schering est relié à la terre les détecteurs à entrée asymétrique (qui sont très courants dans les dispositifs électroniques) doivent être évités.

De tels détecteurs sont cependant utilisables avec les ponts munis d'un dispositif de Wagner à condition que la borne d'entrée à la terre soit toujours reliée au point P.

2. Pont «à transformateur» (à bras de proportion inductifs)

2.1 *Généralités*

Ce pont est d'un principe plus simple que le pont de Schering. Son schéma de principe est représenté à la figure 7, page 54.

On voit qu'à l'équilibre le rapport entre les impédances (complexes) Z_X et Z_M est identique au rapport (vectoriel) des tensions U_1 et U_2. Si ce dernier rapport est connu, on déduit ainsi Z_X de la connaissance de Z_M. Dans le pont idéal, ce rapport U_1 / U_2 est un nombre pur k, de sorte que dans ce cas $Z_X = kZ_M$ et en particulier l'argument de Z_M fournit directement δ_X.

Le grand avantage du pont à transformateur sur le pont de Schering est de permettre une mise à la terre directe et rationnelle du blindage et des électrodes de garde sans branches auxiliaires additionnelles.

Le pont s'utilise depuis des fréquences industrielles jusqu'à des fréquences radioélectriques de plusieurs dizaines de mégahertz; cette gamme est donc plus étendue que celle couverte par le pont de Schering mais, à nouveau, les réalisations constructives différeront sensiblement suivant la gamme de fréquences intéressée.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

1.2.1 *Simple Schering bridge, with screening*

Point B of the bridge (supply terminal of the bridge on the side of the measuring arms) is connected to the screening and to earth.

The screening acts well as a protection towards the high-voltage side, but it increases the capacitance between it and the various conductors leading to the terminals M and N of the detector arm, this capacitance being subjected to the voltage across the measuring arms. This may introduce an error which normally limits the accuracy on tan δ to the order of 0.1%, especially when capacitances C_X and C_N are unequal.

1.2.2 *Schering bridge with Wagner earth circuit*

This is the solution which is represented in Figure 6, page 54, and by which the detector arm and the screening are brought to the same potential. This is secured by using additional external arms Z_A and Z_B (Wagner earth circuit) and the intermediate point P being connected to the screening and to earth. The additional arms (practically Z_B) are adjusted in order that the voltages across Z_A and Z_B are identical to those across the capacitive and measuring arms of the bridge respectively. It is obvious that the solution consists in the simultaneous balance of two bridges, the main bridge AMNB and the auxiliary bridge AMPB (or ANPB). The double balance is reached by successive approximations, the detector being displaced from one bridge to the other. With this method, one order of magnitude may be gained on the accuracy, which is now in practice only limited by the precision of the elements used for the bridge.

It will be noted that the particular solution which has been considered requires that both terminals of the supply may be insulated from earth. If this is not possible, the use of a more complex arrangement may be required (bridge with double screen).

1.3 *Schering bridge for high frequencies*

This bridge will normally be operated with moderate voltages and will thus be more flexible; the capacitance C_N will very often be adjustable (while for high voltages, this capacitance is ordinarily of fixed value) and substitution methods can be more easily adopted.

Screening and Wagner earth circuit can still be used with advantage as undesirable capacitive effects increase with the frequency.

1.4 *Note on detectors*

When point B of the Schering bridge is earthed, detectors with asymmetrical input (which are most common with electronic devices) must be avoided.

Such detectors, however, are readily used with bridges with a Wagner earth circuit provided that the earthed input terminal is always connected to point P.

2. Transformer bridge (inductive ratio-arm bridges)

2.1 *General*

This bridge is based on a simpler principle than the Schering bridge. Its fundamental arrangement is given in Figure 7, page 54.

When balanced, the ratio between the (complex) impedances Z_X and Z_M is identical to the (vector) ratio of voltages U_1 and U_2. If this last ratio be known, then Z_X is readily derived from the knowledge of Z_M. In the ideal bridge, this ratio U_1 / U_2 is a pure number k and thus $Z_X = kZ_M$; in particular, the argument of Z_M yields directly δ_X.

The great advantage of the transformer bridge over the Schering bridge is to allow a direct and rational earthing of the screens and guard electrodes without any need of additional auxiliary arms.

The bridge is used from power frequencies up to radio frequencies of several tens of megahertz; this range is thus wider than the previous one for the Schering bridge but, again, the realization will differ appreciably according to the frequency range involved.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

2.2 *Pont à basse fréquence*

Ce sera à nouveau normalement un pont à haute tension (plus précisément, la tension U_1 est élevée, tandis que la tension U_2 reste basse) et sa technique est voisine de celle des transformateurs de tension.

On distingue deux modes d'alimentation:

1) l'alimentation est directement appliquée à l'un des enroulements, l'autre enroulement faisant fonction de secondaire d'un transformateur;

2) (représenté à la figure 7, page 54) l'alimentation est appliquée à un enroulement primaire séparé alors que les deux enroulements du pont proprement dit constituent, soit deux circuits secondaires distincts, soit un seul enroulement secondaire à prise intermédiaire permettant de disposer des tensions U_1 et U_2.

Comme pour tout transformateur de mesure, le pont présentera des erreurs (rapport vectoriel U_1 / U_2 différant de sa valeur théorique) et ces erreurs varient avec la charge. L'erreur la plus importante est le déphasage entre les tensions U_1 et U_2 qui affecte directement la mesure de tg δ.

Il est donc indispensable de tarer le pont et cette opération s'effectue en remplaçant Z_X par une capacité sans perte C_N (analogue à celle utilisée dans le pont de Schering). Si C_N a la même valeur que C_X, la méthode est pratiquement de substitution et le tarage est immédiat. Mais comme C_N est rarement variable, le tarage précédent ne resterait pas valable pour C_X du fait de la variation de la charge. On peut alors opérer à charge constante, comme l'indique la figure 8, page 55, un commutateur raccorde C_X à la terre lorsqu'on mesure C_N et vice versa; la charge constante pour l'enroulement à haute tension est alors la somme des deux charges. (En toute rigueur, il faudrait une disposition semblable du côté de la basse tension, mais comme les charges en jeu de ce côté sont beaucoup plus faibles, cette disposition, quoique facile à utiliser, est moins essentielle.)

De plus, lors du tarage avec une capacité pure C_N branchée sur la tension U_1, l'impédance de mesure Z_M soumise à la tension U_2 sera constituée:

1) soit par une capacité *pure* C_M si U_2 et U_1 sont *en phase* (cas idéal);

2) soit par une capacité C_M et une résistance R_M si la tension U_2 est en *avance* sur la tension U_1;

3) si la tension U_2 est en *retard* sur U_1 la résistance R_M devrait devenir négative. Ceci signifie que, pour rétablir l'équilibre, une composante du courant en phase avec U_1 doit être introduite dans le détecteur. Mais comme il n'existe pratiquement pas de résistances élevées et variables pour haute tension, on est amené à brancher cet élément résistif sur un *enroulement auxiliaire* fournissant une tension U_3 (de faible valeur) en phase avec U_1 (figure 9, page 55).

Note. — L'adjonction d'une résistance en série avec C_N est impossible car si elle était insérée du côté basse tension, elle romprait l'égalité de potentiel entre l'électrode de mesure et la garde et si elle était insérée du côté haute tension, elle serait également traversée par le courant des gardes, ce qui ne permettrait aucun tarage.

Ces considérations s'appliquent également à la résistance R_M dont il est question dans le deuxième cas. Mais du côté basse tension, une résistance élevée et variable shuntant la capacité peut aisément être obtenue en utilisant le montage en étoile de trois résistances R_1, R_2 et R' représenté en pointillé au bas de la figure 9. On a alors:

$$R_M = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R'} \qquad (21)$$

Cependant la capacité variable de mesure C_M doit être pure ou présenter des pertes faibles et bien connues (tandis que la capacité de mesure C_1 du pont de Schering n'est pas soumise à des exigences aussi sévères).

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

2.2 *Low-frequency bridge*

This will again normally be a high-voltage bridge (more precisely, the voltage U_1 is high while the voltage U_2 remains moderate) and its technique is related to that of voltage transformers.

Two methods of supply are used:

1) the supply voltage is directly applied to one of the windings, the other working as the secondary of a transformer;

2) (which is illustrated in Figure 7, page 54), the supply voltage is applied to a separate primary winding while both windings of the bridge itself constitute either two separate secondary circuits or a single secondary winding with an intermediate tapping allowing both voltages U_1 and U_2 to be obtained.

As with any measuring transformer, the bridge will show errors (that is, the vector ratio U_1 / U_2 will differ from its theoretical value) and these errors will be load dependant. The most important is actually the phase error between voltages U_1 and U_2 which influences directly the measurement of tan δ.

It is thus necessary to calibrate the bridge. This will be done by replacing Z_X by a capacitance C_N without losses (similar to that used in the Schering bridge). If C_N has the same value as C_X, the method is practically a substitution and the calibration is immediate. But, as C_N will seldom be adjustable, such a calibration would not remain valid for C_X on account of the load variation. It is then possible to operate under constant load, as indicated in Figure 8, page 55: a switch connects C_X to earth when C_N is measured and vice-versa; the constant load for the high-voltage winding is then the sum of both. (Strictly speaking, a similar disposition should be used on the low-voltage side but, because the loads are much smaller, such an arrangement, although easy to use, is less essential.)

In addition, when the calibration is made with a pure capacitance C_N connected across the voltage U_1, the measuring impedance Z_M, submitted to the voltage U_2, will consist of either:

1) a *pure* capacitance C_M if U_2 and U_1 have the *same phase* (ideal case); or

2) a capacitance C_M and a resistance R_M, if the voltage U_2 is *leading* on the voltage U_1; or

3) if the voltage U_2 is *lagging* with respect to U_1, this resistance R_M should become negative. This means that, in order to restore balance, a resistive component of the current has to be introduced on the side of U_1. But, as very high and adjustable resistors for high voltage practically do not exist, this resistive component is usually obtained through an auxiliary winding supplying a voltage U_3 (of low value) in phase with U_1 (Figure 9, page 55).

Note. — The addition of a resistance in series with C_N is impossible for the following reasons: if it were inserted below the capacitor, the potentials of the measuring electrode and of the guard of C_N would no longer be the same; and if inserted before C_N on the high-voltage conductor, the current in the resistance would also include the guard circuit current and no calibration would be possible.

These remarks may also be applied to the resistance R_M mentioned above for the second case. But on the low-voltage side, a resistance of high and adjustable value shunting the capacitance may easily be obtained by using the star connection of three resistances R_1, R_2 and R' illustrated in dotted lines at bottom of Figure 9. One has then:

$$R_M = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R'} \qquad (21)$$

The adjustable capacitance C_M for the measurement, however, must be a pure one or of low and well-known losses (while the measuring capacitance C_1 of the Schering bridge need not comply with such severe conditions).

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

2.3 *Pont à haute fréquence*

Un certain nombre des considérations précédentes s'appliqueront à nouveau, mais comme il ne s'agit normalement plus d'un pont à haute tension, la branche soumise à la tension U_1 peut comporter des éléments variables et des *méthodes de substitution*, dont l'emploi se recommande vivement chaque fois qu'elles sont applicables, peuvent alors facilement être utilisées.

Ajoutons encore que le pont avec enroulement primaire séparé se prête à la permutation de la source et du détecteur. L'équilibre correspond alors à la compensation des ampère-tours opposés dans les enroulements secondaires.

2.4 *Note sur les détecteurs*

Du fait que l'une des extrêmités de la branche détectrice est toujours à la terre, l'emploi de détecteurs à entrée symétrique n'est pas nécessaire.

3. Ponts en «double T»

Les ponts en «double T» sont des circuits de pont dans lesquels les courants s'écoulant de l'oscillateur au détecteur à travers les deux circuits en «T» sont, à l'entrée du détecteur, égaux et opposés. Dans un tel circuit, l'oscillateur et le détecteur peuvent chacun avoir une borne reliée à la terre; et dans certains des circuits possibles, l'éprouvette et chacun des éléments variables utilisés pour l'équilibrage ont aussi une borne reliée à la terre.

La figure 10, page 56, montre le circuit en «double T» le plus simple, utilisant uniquement des résistances et des condensateurs. Le circuit le plus employé en général pour les mesures sur diélectriques est en principe celui de la figure 11, page 56, pour lequel les conditions d'équilibre sont les suivantes (circuit entre X, X ouvert):

$$\frac{1}{C_A} + \frac{1}{C_N} + \frac{1}{C_B} = \frac{1}{\omega^2 C_A C_N L} \tag{22}$$

$$R_T \left(1 + \frac{C_H}{C_B}\right) = \frac{1}{\omega^2 C_A C_N R_F} \tag{23}$$

En pratique, un condensateur variable est relié aux bornes X, X et sa capacité C_V ainsi que sa conductance modifient les valeurs apparentes de L et R_F. Le circuit est équilibré dans cette condition; l'éprouvette est alors aussi reliée aux bornes X, X et l'équilibre est rétabli en réglant les capacités C_V et C_H:

Alors

1) la capacité de l'éprouvette est égale à la diminution ΔC_V de C_V;

2) la conductance G de l'éprouvette est:

$$G = \frac{\omega^2 C_A C_N R_T}{C_B} \cdot \Delta C_H \cdot \quad \text{et} \tag{24}$$

3) la facteur de dissipation tg δ de l'éprouvette:

$$\text{tg } \delta = \frac{\omega C_A C_N R_T}{C_B} \cdot \frac{\Delta C_H}{\Delta C_V} \tag{25}$$

où:

ΔC_H est l'accroissement de C_H.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

2.3 *High-frequency bridge*

Several of the previous considerations will apply again, but as the bridge will normally no longer be a high-voltage one, the arm across voltage U_1 may easily admit adjustable elements; *substitution methods*, which are highly recommendable whenever applicable, may then readily be used.

It should moreover be noted that a bridge, with separate primary winding, allows the source and detector to be interchanged. The balance corresponds to the compensation of the opposite ampere-turns in the secondary windings.

2.4 *Note on detectors*

Since one terminal of the detector arm is always earthed, the use of detectors with a symmetrical input is not required.

3. Parallel-T networks

Parallel-T networks are bridge circuits in which the currents flowing from the oscillator to the detector through two T networks are equal and opposite at the detector input. In such a circuit, the oscillator and detector can each have one terminal connected to earth; and in some of the possible circuits, the specimen and each of the variable components used for balancing also have a terminal connected to earth.

Figure 10, page 56, shows the simplest parallel-T circuit, using resistors and capacitors only. The circuit more commonly used for measurements on dielectrics is in principle that of Figure 11, page 56, for which the balance conditions are (with terminals X, X open):

$$\frac{1}{C_A} + \frac{1}{C_N} + \frac{1}{C_B} = \frac{1}{\omega^2 C_A C_N L} \tag{22}$$

$$R_T \left(1 + \frac{C_H}{C_B}\right) = \frac{1}{\omega^2 C_A C_N R_F} \tag{23}$$

In practice, a variable capacitor is connected to the terminals X, X, and its capacitance C_V and conductance modify the apparent values of L and R_F. The circuit is balanced in this condition; the specimen is then also connected to the terminals X, X and balance is regained by varying the capacitances C_V and C_H.

Then

1) the capacitance of the specimen equals the decrease ΔC_V of C_V;

2) the conductance G of the specimen is:

$$G = \frac{\omega^2 C_A C_N R_T}{C_B} \cdot \Delta C_H \quad \text{and} \tag{24}$$

3) the dissipation factor $\tan \delta$ of the specimen:

$$\tan \delta = \frac{\omega C_A C_N R_T}{C_B} \cdot \frac{\Delta C_H}{\Delta C_V} \tag{25}$$

where:

ΔC_H is the increase of C_H.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

On peut utiliser ces ponts avantageusement pour la gamme de fréquences de 50 kHz à 50 MHz et ceux-ci sont faciles à blinder efficacement. Un sérieux inconvénient est que l'équilibre est très sensible à la fréquence, en sorte que les harmoniques de la fréquence d'alimentation sont mal équilibrés. Pour couvrir une large gamme de fréquences, les composants doivent être changés ou commutés. Aux plus hautes fréquences, les impédances des fils de connexion et des commutateurs (s'il en est fait usage) peuvent introduire des erreurs importantes.

4. Méthode de résonance (acuimètre)

La méthode de résonance ou de l'acuimètre est utilisée dans la gamme de fréquences 10 kHz à 260 MHz. Elle est basée sur la mesure de la tension qui apparaît aux bornes d'un circuit résonnant lorsque l'on y applique une faible tension connue. La figure 12, page 56, montre une disposition usuelle du circuit, dans laquelle le circuit résonnant est couplé à l'oscillateur au moyen d'une résistance commune R. D'autres méthodes de couplage sont également acceptables.

Le mode opératoire consiste à régler la tension ou le courant d'entrée, à la fréquence requise, à une valeur connue; puis à accorder le circuit résonnant à sa réponse maximale, et à observer la tension U_0 qui apparaît alors. L'éprouvette est ensuite reliée aux bornes appropriées, le circuit est de nouveau amené à sa réponse maximale en réglant le condensateur variable, et la nouvelle valeur de la tension U_1 est relevée.

Lorsque l'éprouvette est reliée et le circuit réaccordé, la capacité totale reste presque constante, pourvu que $R_L G \ll 1$ (voir figure 12). La capacité de l'éprouvette est donc égale approximativement à ΔC, la variation de capacité du condensateur variable.

Le facteur de dissipation de l'éprouvette est approximativement:

$$\operatorname{tg} \delta \approx \frac{C_t}{\Delta C}\left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0}\right) \tag{26}$$

où C_t est la capacité totale dans le circuit, y compris celle du voltmètre ainsi que la capacité propre de la bobine d'inductance et Q_1, Q_0 sont les valeurs de Q respectivement avec et sans l'éprouvette branchée.

Les principales sources d'erreurs dans la méthode résident dans les étalonnages des deux appareils de mesure et dans les impédances indésirables introduites dans les connexions, notamment entre le condensateur variable et l'éprouvette. Pour les valeurs élevées du facteur de dissipation, la condition $R_L G \ll 1$ peut ne pas être remplie, et la formule approximative citée plus haut est alors en défaut.

5. Méthode de variation de la susceptance (méthode de variation de la réactance)

Le système d'électrodes micrométriques, représenté sur la figure 1, page 50, a été réalisé par Hartshorn pour éliminer les erreurs dues, aux hautes fréquences, à l'inductance et à la résistance en série des connexions et à celles du condensateur de mesure. Ceci s'obtient en utilisant une connexion coaxiale d'aller et retour vers les éprouvettes et en maintenant ces inductances et résistances relativement constantes indépendamment du fait que l'échantillon soit en circuit ou hors circuit. L'éprouvette, qui est de mêmes dimensions que les électrodes ou de dimensions inférieures, est serrée entre les électrodes. Si la planéité des surfaces de l'éprouvette et des électrodes n'est pas assurée par rodage ou meulage, on doit appliquer une feuille métallique ou son équivalent sur l'éprouvette avant de la placer dans le dispositif d'électrodes. Après avoir retiré l'éprouvette, on peut donner au dispositif d'électrodes la même capacité en rapprochant les électrodes micrométriques.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

These networks can conveniently be constructed for the frequency range 50 kHz to 50 MHz and are easy to screen satisfactorily. A serious disadvantage is that the balance is strongly sensitive to frequency, so that harmonics of the supply frequency are badly unbalanced. To cover a wide range of frequencies, components must be changed or switched. At the highest frequencies, the impedances of connecting wires and of switches (if used) may introduce significant errors.

4. Resonant-rise ("Q-meter") method

The resonant-rise or Q-meter method is used in the frequency range 10 kHz to 260 MHz. It is based on measurement of the voltage appearing across a resonant circuit when a small known voltage is induced in it. Figure 12, page 56, shows the usual form of the circuit, in which the resonant circuit is coupled to the oscillator by means of a common resistance R. Other methods of coupling are equally acceptable.

The procedure is to adjust the input voltage or current, at the required frequency, to a known value; to tune the resonant circuit to its maximum response, and to observe the voltage U_0 then appearing. The specimen is then connected to the appropriate terminals, the circuit brought again to its maximum response by adjusting the variable capacitor, and the new value of voltage, U_1, is observed.

When the specimen is connected and the circuit re-tuned, the total capacitance remains nearly constant, provided that $R_L G \ll 1$ (see Figure 12). The capacitance of the specimen is therefore approximately ΔC, the change of capacitance of the variable capacitor.

The dissipation factor of the specimen is approximately:

$$\tan \delta \approx \frac{C_t}{\Delta C}\left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0}\right) \tag{26}$$

where C_t is the total capacitance in the circuit including that of the voltmeter and the self-capacitance of the inductor, and Q_1, Q_0 are the values of Q respectively with and without the specimen connected.

The main sources of error in the method are in the calibrations of the two indicating instruments and in the unwanted impedances introduced in the wiring, especially between the variable capacitor and the specimen. For high values of dissipation factor, the condition $R_L G \ll 1$ may not hold, and the approximate equation quoted above then fails.

5. Susceptance variation method (reactance-variation method)

The *micrometer electrode system*, as shown in Figure 1, page 50, was developed by Hartshorn to eliminate the errors caused at high frequencies by the series inductance and resistance of the connecting leads and of the measuring capacitor. It accomplishes this by using a coaxial go-and-return path to the specimen, and by maintaining these inductances and resistances relatively constant, regardless of whether the test specimen is in or out of the circuit. The specimen, which is either the same size as, or smaller than, the electrodes, is clamped between the electrodes. Unless the surfaces of the specimen and electrodes are lapped or ground very flat, metal foil or its equivalent must be applied to the specimen before it is placed in the electrode system. Upon removal of the specimen, the electrode system can be made to have the same capacitance by moving the micrometer electrodes closer together.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Lorsque le système d'électrodes micrométriques est soigneusement étalonné pour les variations de capacité, son emploi élimine les corrections pour la capacité de bord, la capacité à la terre et la capacité de connexion. L'inconvénient est que l'étalonnage en capacité n'est pas aussi précis que celui d'un condensateur variable à lames multiples de type classique et également qu'il ne donne pas de lecture directe.

Aux fréquences inférieures à 1 MHz pour lesquelles l'effet de l'inductance et de la résistance en série dans les connexions est négligeable, l'étalonnage en capacité des électrodes micrométriques peut être remplacé par celui d'un condensateur étalon en parallèle avec le système d'électrodes micrométriques.

La variation de capacité selon que l'éprouvette est en place ou non se mesure au moyen des valeurs données par ce condensateur.

Une source d'erreurs secondaires dans un système d'électrodes micrométriques est celle due au fait que la capacité de bord des électrodes, qui est comprise dans leur étalonnage, est légèrement modifiée par la présence d'un diélectrique de même diamètre que les électrodes. On peut éliminer pratiquement cette erreur en donnant à l'éprouvette un diamètre égal à celui des électrodes diminué de deux fois son épaisseur.

L'éprouvette est tout d'abord fixée entre les électrodes micrométriques et le circuit utilisé pour la mesure est accordé. L'éprouvette est ensuite enlevée et la capacité totale dans le circuit est ramenée à sa valeur initiale, soit en rapprochant les électrodes micrométriques l'une de l'autre, soit en réajustant le condensateur étalon.

La capacité C_p de l'éprouvette est calculée comme il est indiqué au tableau II.

Le facteur de dissipation est alors:

$$\text{tg } \delta_1 = (\Delta C_1 - \Delta C_0) / 2\, C_p \qquad (27)$$

où:

ΔC_1 est la différence entre les capacités du condensateur variable M_2 (figure 1, page 50) qui conduisent de part et d'autre de la résonance à une tension à l'entrée du détecteur égale à $\sqrt{2}/2$ de la tension à la résonance

et

ΔC_0 est la différence homologue obtenue lorsque l'éprouvette est ôtée.

Il faut prendre soin que la fréquence d'essai demeure constante durant l'ensemble de ces mesures.

Note. — La résistance des électrodes appliquées à l'éprouvette devient appréciable aux hautes fréquences et produit une augmentation apparente du facteur de dissipation si l'éprouvette n'est ni plane ni d'épaisseur uniforme. La fréquence à partir de laquelle cet effet devient visible dépend de la planéité de la surface de l'éprouvette; cet effet peut cependant survenir pour une fréquence aussi basse que 10 MHz. Des mesures additionnelles de capacité et de facteur de dissipation doivent être faites à des fréquences de 10 MHz et plus sur l'éprouvette sans électrodes. Si C_W et tg δ_W sont la capacité et le facteur de dissipation de l'éprouvette sans électrodes, le vrai facteur de dissipation est:

$$\text{tg } \delta = \frac{C_p}{C_W} \text{ tg } \delta_W \qquad (28)$$

où:

C_p est la capacité de l'éprouvette avec électrodes.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

When the micrometer electrode system is carefully calibrated for capacitance changes, its use eliminates the corrections for edge capacitance, ground capacitance, and connection capacitance. A disadvantage is that the capacitance calibration is not as accurate as that of a conventional variable multiple plate capacitor, and also it is not direct reading.

At frequencies below 1 MHz, where the effect of series inductance and resistance in the leads is negligible, the capacitance calibration of the micrometer electrodes can be replaced by that of a standard capacitor in parallel with the micrometer electrode system.

The change in capacitance with the specimen in and out is measured in terms of this capacitor.

A source of minor error in a micrometer electrode system is that the edge capacitance of the electrodes, which is included in their calibration, is slightly changed by the presence of a dielectric having the same diameter as the electrodes. This error can be practically eliminated by making the diameter of the specimen less than that of the electrodes by twice its thickness.

The specimen is first clamped between the micrometer electrodes and the network used for measurement is tuned. The specimen is then removed, and the total capacitance in the circuit is restored to its original value either by moving the micrometer electrodes closer together or by readjusting the standard capacitor.

Capacitance C_p of the specimen is calculated according to Table II.

The dissipation factor is then:

$$\tan \delta_1 = (\Delta C_1 - \Delta C_0) / 2\, C_p \qquad (27)$$

where:

ΔC_1 is the difference between the two capacitance readings on either side of the resonance setting of the variable capacitor M_2 (Figure 1, page 50) which give detector input voltages equal to $\sqrt{2}/2$ of the resonance voltage, with the specimen in place

and:

ΔC_0 is the same difference with the specimen removed.

Care is to be taken that the test frequency remains unchanged during this procedure.

Note. — The resistance of the electrodes applied to the specimen becomes appreciable at high frequencies and causes a spurious increase in dissipation factor if the specimen is not flat or of uniform thickness. The frequency at which this becomes noticeable depends on the surface flatness of the specimen, but it can be as low as 10 MHz. Additional measurements of capacitance and dissipation factor must therefore be made at frequencies of 10 MHz and upwards on the specimen with no electrodes. If C_w and $\tan \delta_w$ are the capacitance and dissipation factor of the specimen with no electrodes, the true dissipation factor is:

$$\tan \delta = \frac{C_p}{C_w} \tan \delta_w \qquad (28)$$

where:

C_p is the capacitance of the specimen with electrodes.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

6. Blindage

Un blindage mis à la terre entre deux points d'un circuit supprime toute capacité entre ceux-ci et la remplace par les capacités à la terre de chacun d'eux. Le blindage des fils et des éléments constituants peut donc être librement utilisé dans les circuits dans lesquels la capacité à la terre en tout point est sans importance; le pont de Schering avec dispositif de Wagner et le pont à transformateur sont des circuits de ce type.

D'un autre côté, le blindage est inutile dans un pont de substitution dans les parties du circuit qui restent sans changement, que l'éprouvette soit ou non en place.

Dans la pratique, ces deux considérations impliquent que les connexions de l'éprouvette, de l'oscillateur et du détecteur soient blindées. On doit renfermer la plus grande partie possible du montage dans un blindage métallique de façon à empêcher une variation de la capacité entre le corps de l'observateur (qui peut ne pas être au potentiel de la terre et ne pas rester fixe), et les éléments des circuits de pont.

Pour des fréquences de l'ordre de 100 kHz, ou plus, les conducteurs d'aller et retour doivent être maintenus tout près l'un de l'autre de façon à réduire les inductances propres et les inductances mutuelles; si plusieurs fils sont destinés à être reliés ensemble, ils doivent se joindre aussi près que possible d'un seul et même point, étant donné que l'impédance d'une longueur de fil, même faible, peut être appréciable à ces fréquences.

Si on utilise un interrupteur pour mettre l'éprouvette hors circuit, il doit être tel que la capacité entre ses contacts ouverts n'entraîne pas d'erreur de mesure. Ceci peut s'obtenir dans les circuits à trois bornes en insérant un blindage à la terre entre les contacts ou en utilisant deux interrupteurs en série et, quand ils sont ouverts, en mettant à la terre la connexion qui les relie; ou encore en mettant à la terre l'électrode qui autrement resterait hors circuit.

7. Oscillateurs et détecteurs de ponts

7.1 *Sources de tension alternative*

Le générateur peut être toute source d'énergie capable de fournir la tension et le courant nécessaires avec une teneur globale d'harmoniques inférieure à 1%.

7.2 *Détecteurs*

Les formes suivantes de détecteurs sont utilisables. Toutes peuvent être employées avec un amplificateur pour augmenter la sensibilité:

1) Téléphone (avec changeur de fréquence si cela est nécessaire).
2) Voltmètre électronique ou analyseur d'onde.
3) Oscillographe cathodique.
4) Indicateur d'accord «œil magique».
5) Galvanomètre à vibrations (seulement pour basses fréquences).

Un transformateur peut être nécessaire entre le pont et le détecteur, soit pour adapter leurs impédances, soit parce qu'un des points de sortie du pont est mis à la terre.

Les harmoniques peuvent masquer ou déplacer le point d'équilibre. Cet inconvénient peut être évité soit par l'accord de l'amplificateur soit par l'introduction d'un filtre passe-bas. Une différence de 40 dB par rapport au deuxième harmonique de la fréquence de mesure est convenable.

8. Gamme de fréquences

Méthode	Gamme de fréquences recommandées	Forme de l'éprouvette	Observations
1. Pont de Schering	Jusqu'à 0,10 MHz	Plane ou tubulaire	
2. Pont à «transformateurs»	15 Hz – 50 MHz		
3. Pont en «double T»	50 kHz – 30 MHz	Plane ou tubulaire	
4. Méthode de résonance	10 kHz – 260 MHz		
5. Méthode de variation de la susceptance	10 kHz – 100 MHz	Plane ou tubulaire	

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

6. Screening of apparatus

An earthed screen between two points in the apparatus removes any capacitance between them and substitutes capacitance to earth from both of them. Screening of wires and components can therefore be used freely in circuits in which capacitance to earth from any point is unimportant; the Schering bridge with Wagner earth, and the transformer bridge, are circuits of this kind.

On the other hand, screening is unnecessary in a substitution bridge in parts of the circuit which remain unaltered whether the specimen is in or out.

In practice, these two considerations imply that leads to the specimen, to the oscillator, and to the detector, should be screened. As much as possible of the apparatus should be enclosed within a metal screen, to prevent variation in capacitance between the observer's body (which may not be at earth potential, and may not remain stationary) and the components of the bridge circuit.

For frequencies of the order of 100 kHz or more, "go" and "return" leads should be kept close together, so as to minimize self and mutual inductances; and if several wires are intended to be connected together, they should meet as nearly as possible at a single point, since the impedance of even a short length of wire may be appreciable at these frequencies.

If a switch is used to disconnect the specimen, it must be such that the capacitance between its contacts when they are open does not cause an error in the measurement. In three-terminal measuring systems, this can be achieved either by inserting an earthed screen between the contacts; or by using two switches in series and, when they are opened, earthing the connection between them; or by earthing the electrode which would otherwise be left disconnected.

7. Oscillators and detectors for bridges

7.1 *A.C. voltage sources*

The generator can be any source of power capable of supplying the necessary voltage and current with a total harmonic content of less than 1%.

7.2 *Detectors*

The following forms of detector are available. All may be used with an amplifier to increase the sensitivity:

1) Telephone (with frequency changer if necessary).
2) Electronic voltmeter or wave analyser.
3) Cathode-ray oscillograph.
4) "Magic eye" tuning indicator.
5) Vibration galvanometer (for low frequencies only).

A transformer may be needed between bridge network and the detector, either to match their impedances or because either side of the bridge output is grounded.

Harmonics may obscure or change the balance-point. This trouble can be avoided either by tuning the amplifier or by introducing a low-pass filter. A discrimination of 40 dB against the second harmonic of the measuring frequency is adequate.

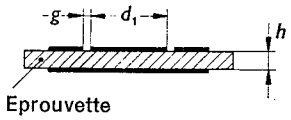
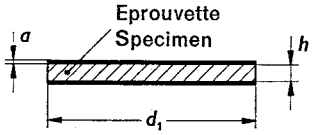
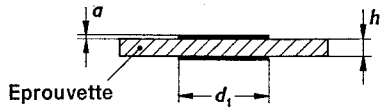
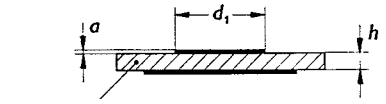
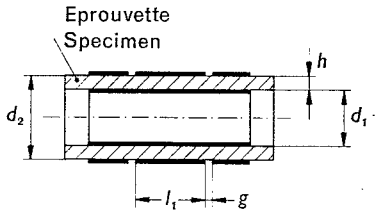
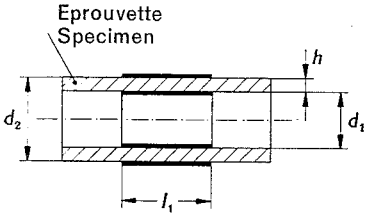
8. Frequency range

Method	Recommended range of frequency	Form of specimen	Remarks
1. Schering bridge	Up to 0.10 MHz	Sheet or tube	
2. Transformer bridge	15 Hz – 50 MHz		
3. Parallel-T networks	50 kHz – 30 MHz	Sheet or tube	
4. Resonant-rise method	10 kHz – 260 MHz		
5. Susceptance-variation method	10 kHz – 100 MHz	Sheet or tube	

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

TABLEAU I

Calcul de la capacité dans le vide et des corrections de bord

(1)	Capacité directe entre électrodes (unités: pF et cm) (2)	Correction pour capacité de bord (unités: pF et cm) (3)
1. Electrodes circulaires avec anneau de garde		
	$C_o = \varepsilon_o \cdot \frac{A}{h} = 0{,}088\,54\,\frac{A}{h}$ $A = \frac{\pi}{4}(d_1 + g)^2$	$C_e = 0$
2. Electrodes circulaires sans anneau de garde		
a) Diamètre des électrodes = diamètre de l'éprouvette 	$C_o = \varepsilon_o \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d_1^2}{h}$ $= 0{,}069\,54\,\frac{d_1^2}{h}$	Si $a \ll h$ $\frac{C_e}{P} = 0{,}029 - 0{,}058 \log h$ $P = \pi d_1$
b) Electrodes égales, plus petites que l'éprouvette 		$\frac{C_e}{P} = 0{,}019\,\varepsilon_1 - 0{,}058 \log h + 0{,}010$ $P = \pi d_1$ Où: ε_1 est une valeur approchée de la permittivité relative de l'éprouvette, et $a \ll h$
c) Electrodes inégales 		$\frac{C_e}{P} = 0{,}041\,\varepsilon_1 - 0{,}077 \log h + 0{,}045$ $P = \pi d_1$ Où: ε_1 est une valeur approchée de la permittivité relative de l'éprouvette et $a \ll h$
3. Electrodes cylindriques avec anneau de garde		
	$C_o = \varepsilon_o \cdot \frac{2\pi (l_1 + g)}{\ln d_2/d_1}$ $= 0{,}2416\,\frac{(l_1 + g)}{\log d_2/d_1}$	$C_e = 0$
4. Electrodes cylindriques sans anneau de garde		
	$C_o = \varepsilon_o \cdot \frac{2\pi\, l_1}{\ln d_2/d_1}$ $= 0{,}2416\,\frac{l_1}{\log d_2/d_1}$	Si $\frac{h}{h + d_1} < \frac{1}{10}$, $\frac{C_e}{2P} = 0{,}019\,\varepsilon_1 - 0{,}058 \log h + 0{,}010$ $P = \pi (d_1 + h)$ Où: ε_1 est une valeur approchée de la permittivité relative de l'éprouvette

Permittivité relative de l'éprouvette: $\varepsilon_r = \frac{C'_x - C_e}{C_o}$

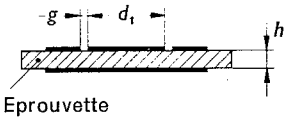
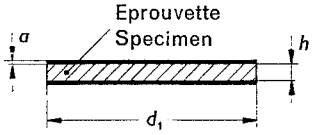
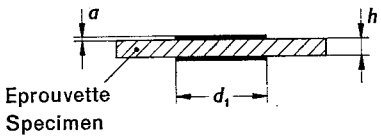
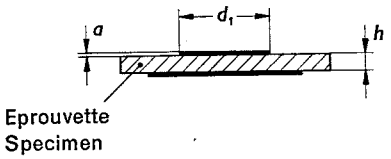
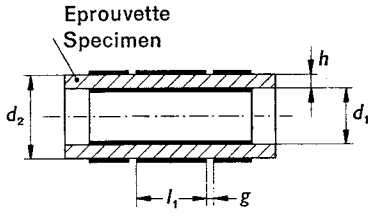
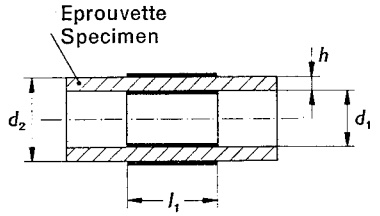
Où:

C'_x est la capacité mesurée entre les électrodes
ln = logarithme népérien
log = logarithme décimal

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

TABLE I

Calculation of vacuum capacitance and edge corrections

(1)	Direct interelectrode capacitance (units: pF and cm) (2)	Correction for edge capacitance (units: pF and cm) (3)
1. Disk electrodes with guard-ring		
	$C_o = \varepsilon_o \cdot \frac{A}{h} = 0.088\,54\,\frac{A}{h}$ $A = \frac{\pi}{4}(d_1 + g)^2$	$C_e = 0$
2. Disk electrodes without guard-ring		
a) Diameter of the electrodes = diameter of the specimen 	$C_o = \varepsilon_o \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d_1^2}{h}$ $= 0.069\,54\,\frac{d_1^2}{h}$	When $a \ll h$ $\frac{C_e}{P} = 0.029 - 0.058 \log h$ $P = \pi d_1$
b) Equal electrodes smaller than the specimen 		$\frac{C_e}{P} = 0.019\,\varepsilon_1 - 0.058 \log h + 0.010$ $P = \pi d_1$ Where: ε_1 is an approximate value of the specimen relative permittivity, and $a \ll h$
c) Unequal electrodes 		$\frac{C_e}{P} = 0.041\,\varepsilon_1 - 0.077 \log h + 0.045$ $P = \pi d_1$ Where: ε_1 is an approximate value of the specimen relative permittivity, and $a \ll h$
3. Cylindrical electrodes with guard-ring		
	$C_o = \varepsilon_o \cdot \frac{2\pi (l_1 + g)}{\ln d_2/d_1}$ $= 0.2416\,\frac{(l_1 + g)}{\log d_2/d_1}$	$C_e = 0$
4. Cylindrical electrodes without guard-ring		
	$C_o = \varepsilon_o \cdot \frac{2\pi l_1}{\ln d_2/d_1}$ $= 0.2416\,\frac{l_1}{\log d_2/d_1}$	If $\frac{h}{h + d_1} < \frac{1}{10}$, $\frac{C_e}{2P} = 0.019\,\varepsilon_1 - 0.058 \log h + 0.010$ $P = \pi (d_1 + h)$ Where: ε_1 is an approximate value of the specimen relative permittivity

Relative permittivity of specimen: $\varepsilon_r = \frac{C'_x - C_e}{C_o}$

Where:

C'_x is the measured capacitance between electrodes
ln = natural logarithm
log = common logarithm

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

TABLEAU II

Calcul de la capacité de l'éprouvette – Electrodes micrométriques en contact avec l'éprouvette

<table>
<tr><th>Capacité de l'éprouvette</th><th>Remarques</th><th>Définition des symboles</th></tr>
<tr><td colspan="2">1. Compensation de la capacité de l'éprouvette au moyen d'un condensateur étalon branché en parallèle</td><td rowspan="8">C_p = capacité parallèle de l'éprouvette
ΔC = augmentation de capacité du condensateur étalon nécessaire pour rétablir l'équilibre après retrait de l'éprouvette
C_r = valeur étalonnée de la capacité des électrodes micrométriques distantes de r
C_s = valeur étalonnée de la capacité des électrodes micrométriques distantes de s, cette distance étant celle pour laquelle l'équilibre est rétabli après retrait de l'éprouvette
C_{or}, C_{oh} = capacité à air correspondant à la surface qui était occupée par l'éprouvette, entre les électrodes micrométriques distantes respectivement de r ou de h. Cette capacité est calculée suivant la formule 1 du tableau I
r = épaisseur de l'éprouvette et des électrodes solidaires
h = épaisseur de l'éprouvette
Permittivité relative = $\varepsilon_r = \frac{C_p}{C_{oh}}$</td></tr>
<tr><td>$C_p = \Delta C + C_{or}$</td><td>Le diamètre de l'éprouvette est inférieur au diamètre de l'électrode, la différence étant au moins égale à 2 r. Les valeurs réelles de l'épaisseur h et de la surface A de l'éprouvette doivent être utilisées pour le calcul de la permittivité</td></tr>
<tr><td colspan="2">2. Compensation de la capacité de l'éprouvette par un rapprochement des électrodes micrométriques après retrait de l'éprouvette</td></tr>
<tr><td>$C_p = C_s - C_r + C_{or}$</td><td>Le diamètre de l'éprouvette est inférieur au diamètre de l'électrode, la différence étant au moins égale à 2 r. Les valeurs réelles de l'épaisseur h et de la surface A de l'éprouvette doivent être utilisées pour le calcul de la permittivité</td></tr>
<tr><td colspan="2">Le double calcul de la capacité à air peut être évité moyennant une assez faible erreur (0,2% à 0,5% due à la distorsion de champ au bord de l'électrode), si l'éprouvette a le même diamètre que les électrodes, par
3. Compensation de la capacité de l'éprouvette au moyen d'un condensateur étalon branché en parallèle</td></tr>
<tr><td>$C_p = \Delta C + C_{oh}$</td><td>Le diamètre de l'éprouvette est égal à celui des électrodes micrométriques
Les électrodes solidaires de l'éprouvette ont une épaisseur nulle</td></tr>
</table>

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

TABLE II

Calculation of specimen capacitance – Contacting micrometer electrodes

Specimen capacitance	Remarks	Definition of symbols
1. Substitution of the specimen capacitance by a standard capacitor in parallel		C_p = parallel capacitance of the specimen
$C_p = \Delta C + C_{or}$	Specimen diameter is less than the micrometer electrode diameter by at least 2 r. The true thickness h and area A of the specimen must be used in calculating the permittivity	ΔC = increase of the capacitance of the standard capacitors as to restore balance after removal of the specimen
2. Substitution of the specimen capacitance by lowering the spacing of the micrometer electrodes after removal of the specimen		C_r = calibration capacitance of the micrometer electrodes at spacing r
$C_p = C_s - C_r + C_{or}$	Specimen diameter is less than the micrometer electrodes diameter by at least 2 r. The true thickness h and area A of the specimen must be used in calculating the permittivity	C_s = calibration capacitance of the micrometer electrodes at spacing s, restoring balance after removal of the specimen
The double calculation of the air capacitance can be avoided with only a small error (0.2% to 0.5% due to fringing at the electrode edge), when the specimen has the same diameter as the electrodes, by 3. Substitution of the specimen capacitance by a standard capacitor in parallel		C_{or}, C_{oh} = air capacitance for the area between the micrometer electrodes which was occupied by the specimen, at spacing r or h respectively, calculated using equation 1 of Table I r = thickness of specimen and applied electrodes
$C_p = \Delta C + C_{oh}$	Specimen diameter equals micrometer electrode diameter Electrodes applied to the specimen are of zero thickness	h = thickness of specimen Relative permittivity = $\varepsilon_r = \frac{C_p}{C_{oh}}$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

TABLEAU III

Calcul de la permittivité relative et du facteur de dissipation — Electrodes sans contact direct

Permittivité relative (1)	Facteur de dissipation (2)	Définition des symboles (3)
1. Electrodes micrométriques dans l'air		
$\varepsilon_r = \dfrac{1}{1 - \dfrac{\Delta C}{C_1} \cdot \dfrac{h_o}{h}}$ ou, si h_o est réglée à une nouvelle valeur, h_o' telle que $\Delta C = O$ $\varepsilon_r = \dfrac{h}{h - (h_o - h_o')}$	$\operatorname{tg} \delta_x = \operatorname{tg} \delta_c + M \cdot \varepsilon_r \cdot \Delta \operatorname{tg} \delta$	ΔC = variation de capacité lorsque l'éprouvette est introduite (+ lorsque la capacité croît) C_1 = capacité lorsque l'éprouvette est en place $C_f = \varepsilon_f \cdot C_o$ = capacité avec le fluide seul C_o = capacité dans le vide pour la surface considérée ($= \varepsilon_o \cdot A/h_o$) A = surface d'une face de l'éprouvette en centimètres carré (ou surface des électrodes si la dimension de l'éprouvette est exactement égale ou supérieure à celle des électrodes) ε_f = permittivité relative du fluide à la température de l'essai (= 1,00 pour l'air) ε_o = constante électrique exprimée en pF/cm $\Delta \operatorname{tg} \delta$ = accroissement du facteur de dissipation dû à l'insertion de l'éprouvette $\operatorname{tg} \delta_c$ = facteur de dissipation lorsque l'éprouvette est en place $\operatorname{tg} \delta_x$ = facteur de dissipation calculé de l'éprouvette d_o = diamètre extérieur de l'électrode intérieure d_1 = diamètre intérieur de l'éprouvette d_2 = diamètre extérieur de l'éprouvette d_3 = diamètre intérieur de l'électrode extérieure h_o = écartement entre électrodes parallèles h = épaisseur moyenne de l'éprouvette $M = h_o/h - 1$ log = logarithme décimal *Note.* — Dans l'équation pour la méthode des deux fluides, les indices 1 et 2 se rapportent respectivement au premier et au second fluide.
2. Electrodes planes – déplacement de fluide		
$\varepsilon_r = \dfrac{\varepsilon_f}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_x} \cdot \left\{ \dfrac{(C_f + \Delta C)(1 + \operatorname{tg}^2 \delta_c)}{C_f + M[C_f - (C_f + \Delta C)(1 + \operatorname{tg}^2 \delta_c)]} \right\}$	$\operatorname{tg} \delta_x = \operatorname{tg} \delta_c + M \cdot \Delta \operatorname{tg} \delta \cdot \left\{ \dfrac{(C_f + \Delta C)(1 + \operatorname{tg}^2 \delta_c)}{C_f + M[C_f - (C_f + \Delta C)(1 + \operatorname{tg}^2 \delta_c)]} \right\}$	
Lorsque le facteur de dissipation de l'éprouvette est inférieur à 0,1 environ, les formules suivantes peuvent être utilisées:		
$\varepsilon_r = \dfrac{\varepsilon_f}{1 - \dfrac{\Delta C}{\varepsilon_f \cdot C_o + \Delta C} \cdot \dfrac{h_o}{h}}$	$\operatorname{tg} \delta_x = \operatorname{tg} \delta_c + M \dfrac{\varepsilon_r}{\varepsilon_f} \cdot \Delta \operatorname{tg} \delta$	
3. Electrodes cylindriques – déplacement de fluide (pour $\operatorname{tg} \delta_x$ inférieur à 0,1 environ)		
$\varepsilon_r = \dfrac{\varepsilon_f}{1 - \dfrac{\Delta C}{C_1} \cdot \dfrac{\log d_3/d_o}{\log d_2/d_1}}$	$\operatorname{tg} \delta_x = \operatorname{tg} \delta_c + \Delta \operatorname{tg} \delta \cdot \dfrac{\varepsilon_r}{\varepsilon_f} \left[\dfrac{\log d_3/d_o}{\log d_2/d_1} - 1 \right]$	
4. Méthode des 2 fluides – électrodes planes (pour $\operatorname{tg} \delta_x$ inférieur à 0,1 environ)		
$\varepsilon_r = \varepsilon_{f_1} + \dfrac{\Delta C_1 \cdot C_2 \, (\varepsilon_{f_2} - \varepsilon_{f_1})}{\Delta C_1 \cdot C_2 - \Delta C_2 \cdot C_1}$	$\operatorname{tg} \delta_x = \operatorname{tg} \delta_{c_1} + \dfrac{\varepsilon_r C_o - C_1}{\Delta C_2} \cdot \Delta \operatorname{tg} \delta_2$	

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

TABLE III

Calculation of relative permittivity and dissipation factor — Non-contacting electrodes

Relative permittivity (1)	Dissipation factor (2)	Definition of symbols (3)
1. Micrometer electrodes in air		ΔC = capacitance change when specimen is inserted (+ when capacitance increases) C_1 = capacitance with specimen in place $C_f = \varepsilon_f \cdot C_o$ = capacitance with fluid alone C_o = vacuum capacitance for area considered ($= \varepsilon_o \cdot A/h_o$) A = area of one face of specimen in square centimetres (or area of electrodes when specimen is exactly the same size or larger than the electrodes) ε_f = relative permittivity of fluid at test temperature (= 1.00 for air) ε_o = electric constant rated in pF/cm $\Delta \tan \delta$ = increase in dissipation factor when specimen is inserted $\tan \delta_c$ = dissipation factor with specimen in place $\tan \delta_x$ = calculated dissipation factor of specimen d_o = outer diameter of inner electrode d_1 = inner diameter of specimen d_2 = outer diameter of specimen d_3 = inner diameter of outer electrode h_o = parallel-plate spacing h = average thickness of specimen $M = h_o/h - 1$ log = common logarithm *Note.* — In the equation for the two-fluid method, subscripts 1 and 2 refer to the first and second fluids respectively.
$\varepsilon_r = \dfrac{1}{1 - \dfrac{\Delta C}{C_1} \cdot \dfrac{h_o}{h}}$ or, if h_o is adjusted to a new value h_o', such that $\Delta C = 0$ $\varepsilon_r = \dfrac{h}{h - (h_o - h_o')}$	$\tan \delta_x = \tan \delta_c + M \cdot \varepsilon_r \cdot \Delta \tan \delta$	
2. Plane electrodes – fluid displacement		
$\varepsilon_r = \dfrac{\varepsilon_f}{1 + \tan^2 \delta_x} \cdot \left\{ \dfrac{(C_f + \Delta C)(1 + \tan^2 \delta_c)}{C_f + M[C_f - (C_f + \Delta C)(1 + \tan^2 \delta_c)]} \right\}$	$\tan \delta_x = \tan \delta_c + M \cdot \Delta \tan \delta \cdot \left\{ \dfrac{(C_f + \Delta C)(1 + \tan^2 \delta_c)}{C_f + M[C_f - (C_f + \Delta C)(1 + \tan^2 \delta_c)]} \right\}$	
When the dissipation factor of the specimen is less than about 0.1, the following equations can be used:		
$\varepsilon_r = \dfrac{\varepsilon_f}{1 - \dfrac{\Delta C}{\varepsilon_f \cdot C_o + \Delta C} \cdot \dfrac{h_o}{h}}$	$\tan \delta_x = \tan \delta_c + M \dfrac{\varepsilon_r}{\varepsilon_f} \cdot \Delta \tan \delta$	
3. Cylindrical electrodes – fluid displacement (for $\tan \delta_x$ less than about 0.1)		
$\varepsilon_r = \dfrac{\varepsilon_f}{1 - \dfrac{\Delta C}{C_1} \cdot \dfrac{\log d_3/d_o}{\log d_2/d_1}}$	$\tan \delta_x = \tan \delta_c + \Delta \tan \delta \cdot \dfrac{\varepsilon_r}{\varepsilon_f} \left[\dfrac{\log d_3/d_o}{\log d_2/d_1} - 1 \right]$	
4. Two-fluid method – plane electrodes (for $\tan \delta_x$ less than about 0.1)		
$\varepsilon_r = \varepsilon_{f_1} + \dfrac{\Delta C_1 \cdot C_2 \, (\varepsilon_{f_2} - \varepsilon_{f_1})}{\Delta C_1 \cdot C_2 - \Delta C_2 \cdot C_1}$	$\tan \delta_x = \tan \delta_{c_1} + \dfrac{\varepsilon_r C_o - C_1}{\Delta C_2} \cdot \Delta \tan \delta_2$	

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

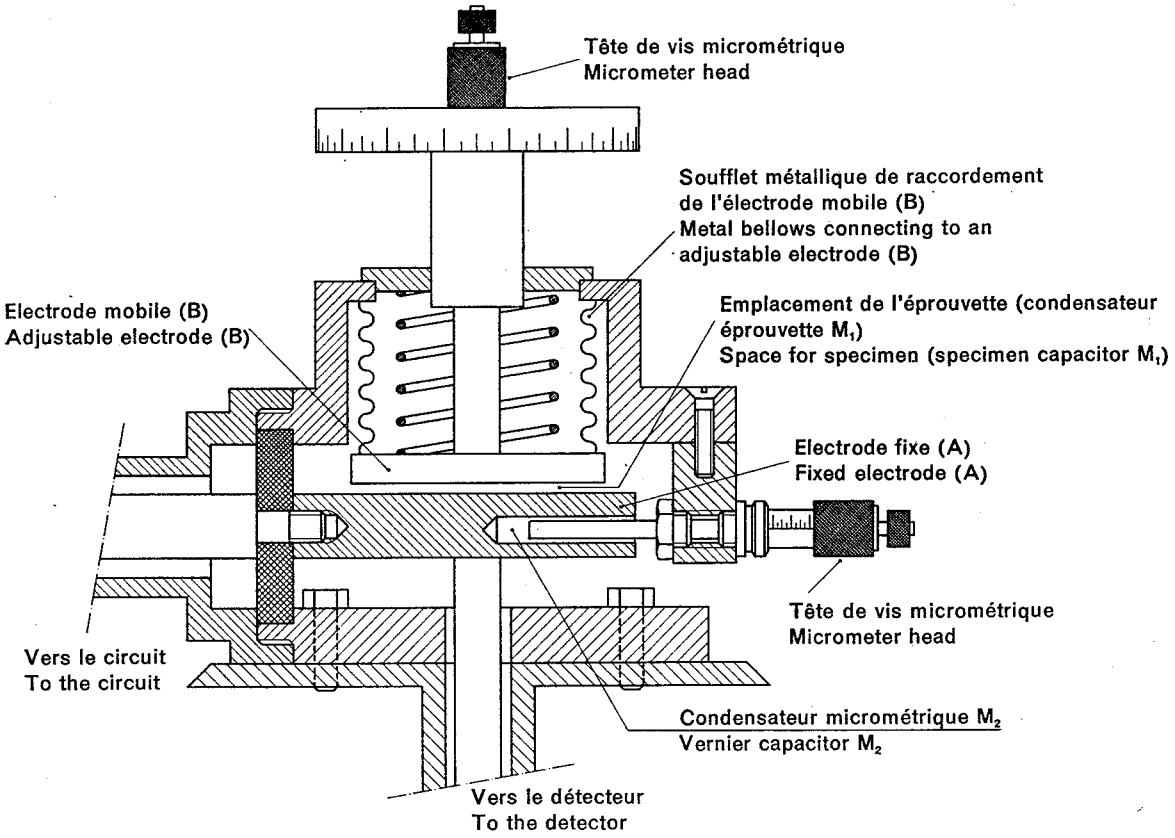
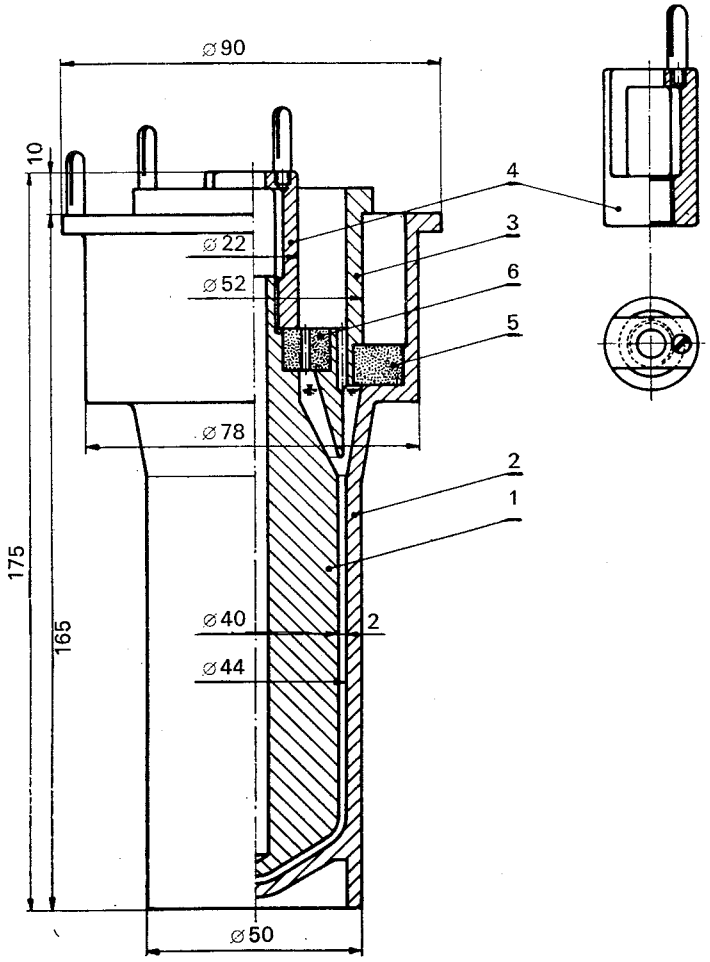


FIG. 1. — Système de condensateurs micrométriques pour diélectriques solides.
Micrometer-capacitor assembly for solid dielectrics.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale



1 = électrode interne
inner electrode

2 = électrode externe
outer electrode

3 = anneau de garde
guard-ring

4 = poignée de levage
lifting handle

5 = anneau de quartz ou de borosilicate
borosilicate or quartz washer

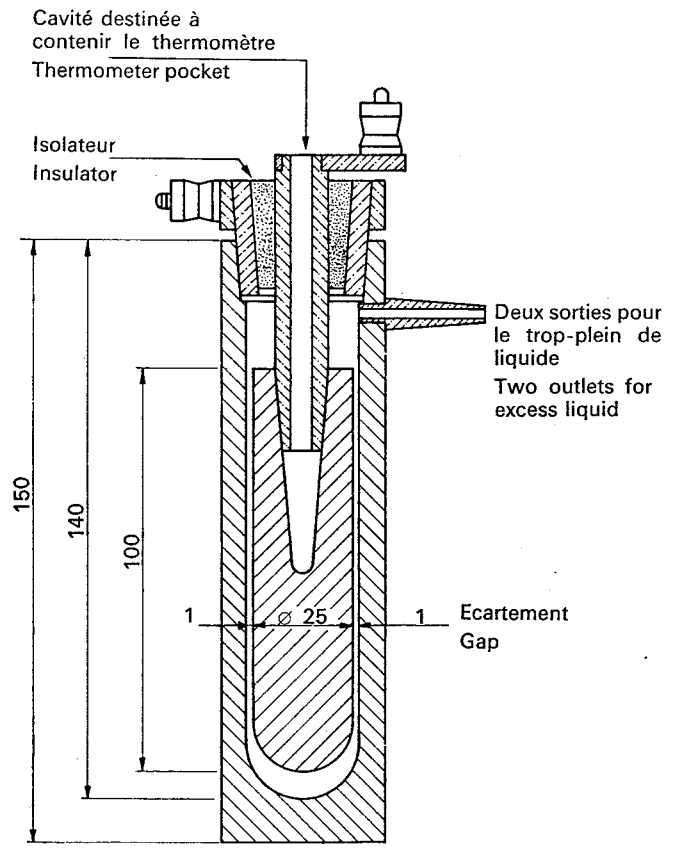
6 = anneau de quartz ou de borosilicate
borosilicate or quartz washer

Dimensions en millimètres

Dimensions in millimetres

FIG. 2. — Exemple d'une cellule à trois bornes pour mesures sur liquides.
Example of a three-terminal cell for measurements on liquids.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale



Dimensions en millimètres *Dimensions in millimetres*

FIG. 3. — Exemple d'une cellule à deux bornes pour mesures sur liquides.
Example of a two-terminal cell for measurements on liquids.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

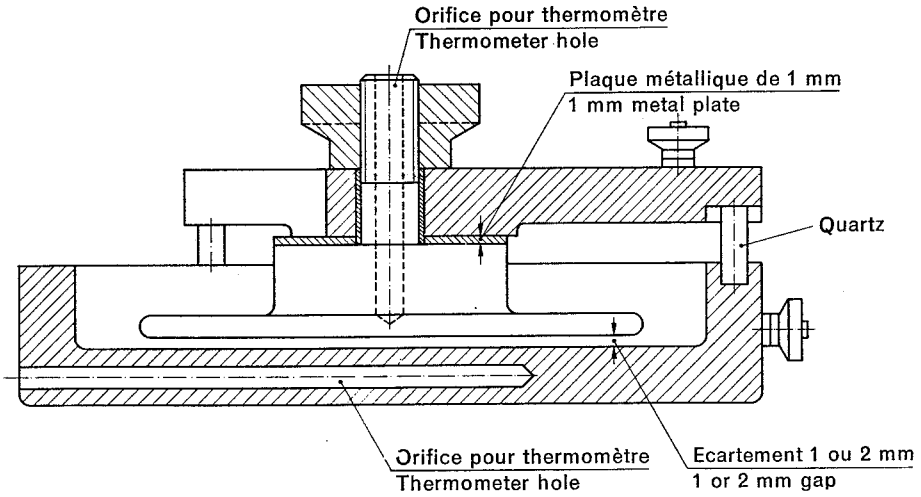


FIG. 4. — Cellule à deux bornes à électrodes planes pour mesures sur liquides.
Two-terminal cell with plane electrodes for measurements on liquids.

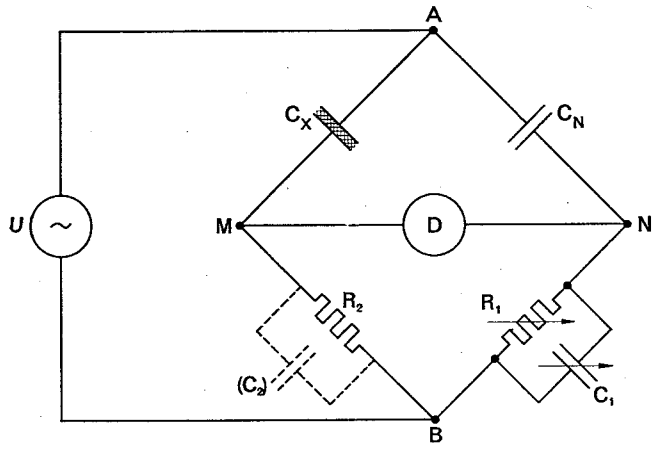


FIG. 5. — Pont de Schering, schéma de principe.
Schering bridge, circuit diagram.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

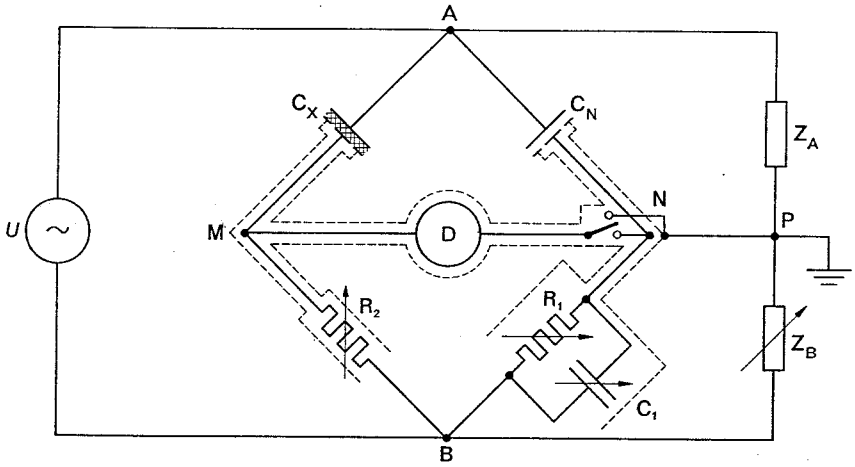


FIG. 6. — Pont de Schering avec dispositif de Wagner.
Schering bridge with Wagner earth circuit.

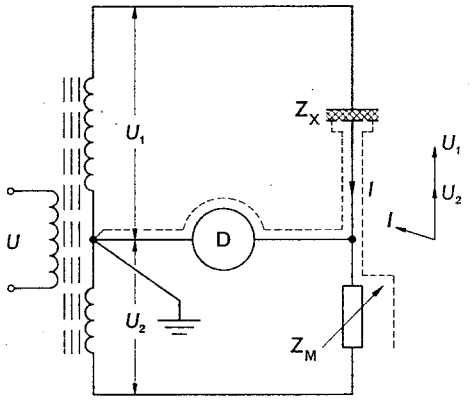


FIG. 7. — Pont à transformateur, schéma de principe.
Transformer bridge, circuit diagram.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

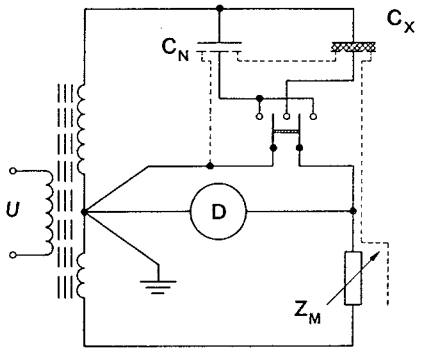
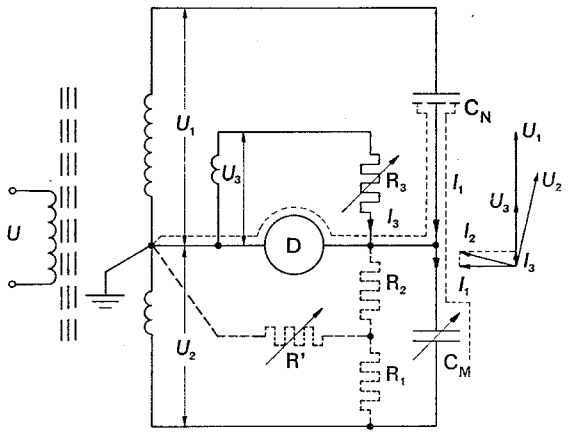


FIG. 8. — Pont à transformateur, tarage à charge constante.
Transformer bridge, constant load calibration.



En pointillé: constitution d'une résistance élevée en parallèle sur C_M (cas de l'avance de I_2 sur I_1)

Dotted line: formation of a high resistance in parallel with C_M (when I_2 leads with respect to I_1)

FIG. 9. — Pont à transformateur, compensation lorsque U_2 est en retard par rapport à U_1 (enroulement U_3).
Transformer bridge, compensation when U_2 is lagging with respect to U_1 (winding U_3).

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

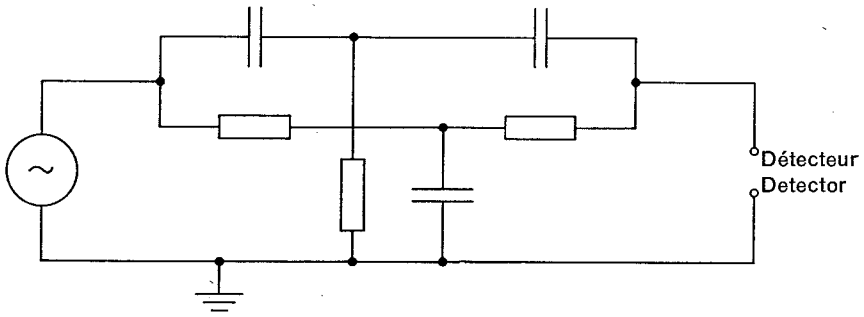


FIG. 10. — Pont en «double T», schéma de principe du circuit.
Parallel-T network, principal circuit diagram.

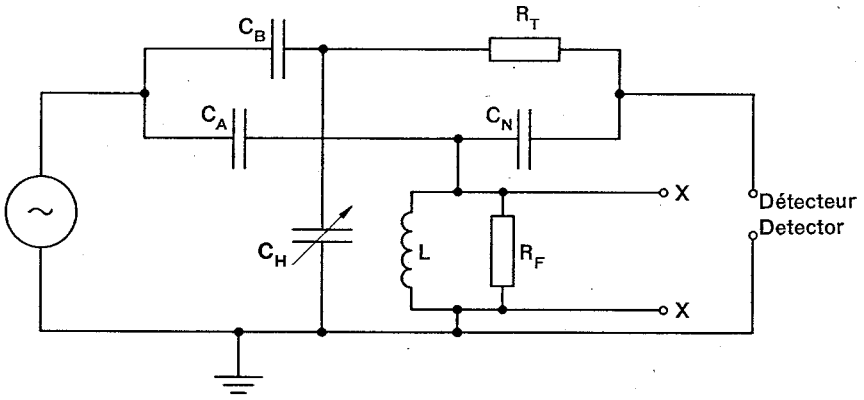


FIG. 11. — Pont en «double T», schéma pratique du circuit.
Parallel-T network, practical circuit diagram.

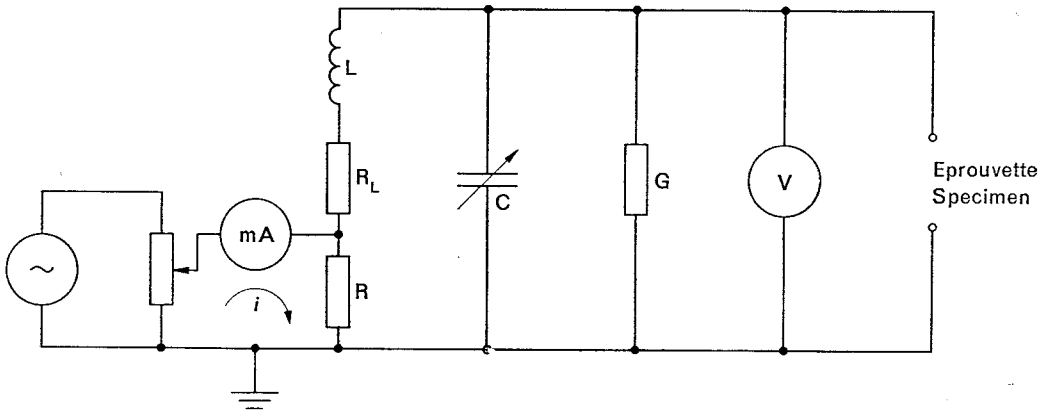


FIG. 12. — Méthode de résonance, schéma du circuit.
Resonant-rise method, circuit diagram.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

ICS 17.220.99 - 29.035.01

Typeset and printed by the IEC Central Office
GENEVA, SWITZERLAND

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale