

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC
1251**

Première édition
First edition
1993-09

**Matériaux isolants électriques –
Evaluation de l'endurance à la tension
alternative – Introduction**

**Electrical insulating materials –
A.C. voltage endurance evaluation –
Introduction**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 1251: 1993

Numéros des publications

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

Publications consolidées

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

Validité de la présente publication

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

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

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

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

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

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

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

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

Numbering

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

Consolidated publications

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

Validity of this publication

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

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

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

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates (On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

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

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

* See web site address on title page.

**RAPPORT
TECHNIQUE – TYPE 2
TECHNICAL
REPORT – TYPE 2**

**CEI
IEC
1251**

Première édition
First edition
1993-09

**Matériaux isolants électriques –
Evaluation de l'endurance à la tension
alternative – Introduction**

**Electrical insulating materials –
A.C. voltage endurance evaluation –
Introduction**

© CEI 1993 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 Varembe Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

T

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
Articles	
1 Domaine d'application et objet	8
2 Références normatives	8
3 Définitions et termes	10
4 Relation d'endurance à la tension	14
5 Méthodes d'essai	18
5.1 Essais à contrainte constante	18
5.2 Essais à plus haute fréquence	22
5.3 Essais avec contrainte progressive	22
5.4 Essais préliminaires pour déterminer la partie initiale de la courbe ET	24
5.5 Traçage de la courbe ET par des mesures de rigidité diélectrique après vieillissement (méthode N)	26
5.6 Méthode d'essai proposée	28
6 Evaluation de l'endurance à la tension	30
6.1 Signification du CET	30
6.2 Signification de la contrainte électrique seuil	30
6.3 Dispersion des données et exigences de précision	30
6.4 Présentation des résultats	32
Figures	36
Annexes	
A Loi de Weibull	38
B Essais de courte durée	42
C Abréviations et symboles	46

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
Clause	
1 Scope and object	9
2 Normative references	9
3 Definitions and terms	11
4 Voltage endurance relationship	15
5 Test methods	19
5.1 Tests at constant stress	19
5.2 Tests at higher frequency	23
5.3 Progressive stress tests	23
5.4 Preliminary tests to determine the initial part of the VE line	25
5.5 Plotting the VE line by electric strength measurements after ageing (the N-method)	27
5.6 Suggested test method	29
6 Evaluation of Voltage Endurance	31
6.1 Significance of the VEC	31
6.2 Significance of the electrical threshold stress	31
6.3 Dispersion of data and precision requirements	31
6.4 Presentation of the results	33
Figures	36
Annexes	
A The Weibull distribution	39
B Short-time tests	43
C Abbreviations and symbols	47

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX ISOLANTS ÉLECTRIQUES – ÉVALUATION DE L'ENDURANCE À LA TENSION ALTERNATIVE – INTRODUCTION

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par les comités d'études 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.
- 3) Ces décisions constituent des recommandations internationales publiées sous forme de normes, de rapports techniques ou de guides et agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est d'élaborer des Normes internationales. Exceptionnellement, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique de l'un des types suivants:

- type 1, lorsque, en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale;
- type 2, lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou lorsque, pour une raison quelconque, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat;
- type 3, lorsqu'un comité d'études a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

Les rapports techniques de types 1 et 2 font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales. Les rapports techniques de type 3 ne doivent pas nécessairement être révisés avant que les données qu'ils contiennent ne soient plus jugées valables ou utiles.

La CEI 1251, rapport technique de type 2, a été établie par le sous-comité 15B: Essais d'endurance, du comité d'études 15 de la CEI: Matériaux isolants.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTRICAL INSULATING MATERIALS –
A.C. VOLTAGE ENDURANCE EVALUATION –
INTRODUCTION**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international cooperation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, 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.
- 3) They have the form of recommendations for international use published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances, a technical committee may propose the publication of a technical report of one of the following types:

- type 1, when the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts;
- type 2, when the subject is still under technical development or where for any other reason there is the future but not immediate possibility of an agreement on an International Standard;
- type 3, when a technical committee has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

Technical reports of types 1 and 2 are subject to review within three years of publication to decide whether they can be transformed into International Standards. Technical reports of type 3 do not necessarily have to be reviewed until the data they provide are considered to be no longer valid or useful.

IEC 1251, which is a technical report of type 2, has been prepared by sub-committee 15B: Endurance tests, of IEC technical committee 15: Insulating materials.

Le texte de ce rapport technique est issu des documents suivants:

Projet de comité	Rapport de vote
15B(SEC)123	15B(SEC)131

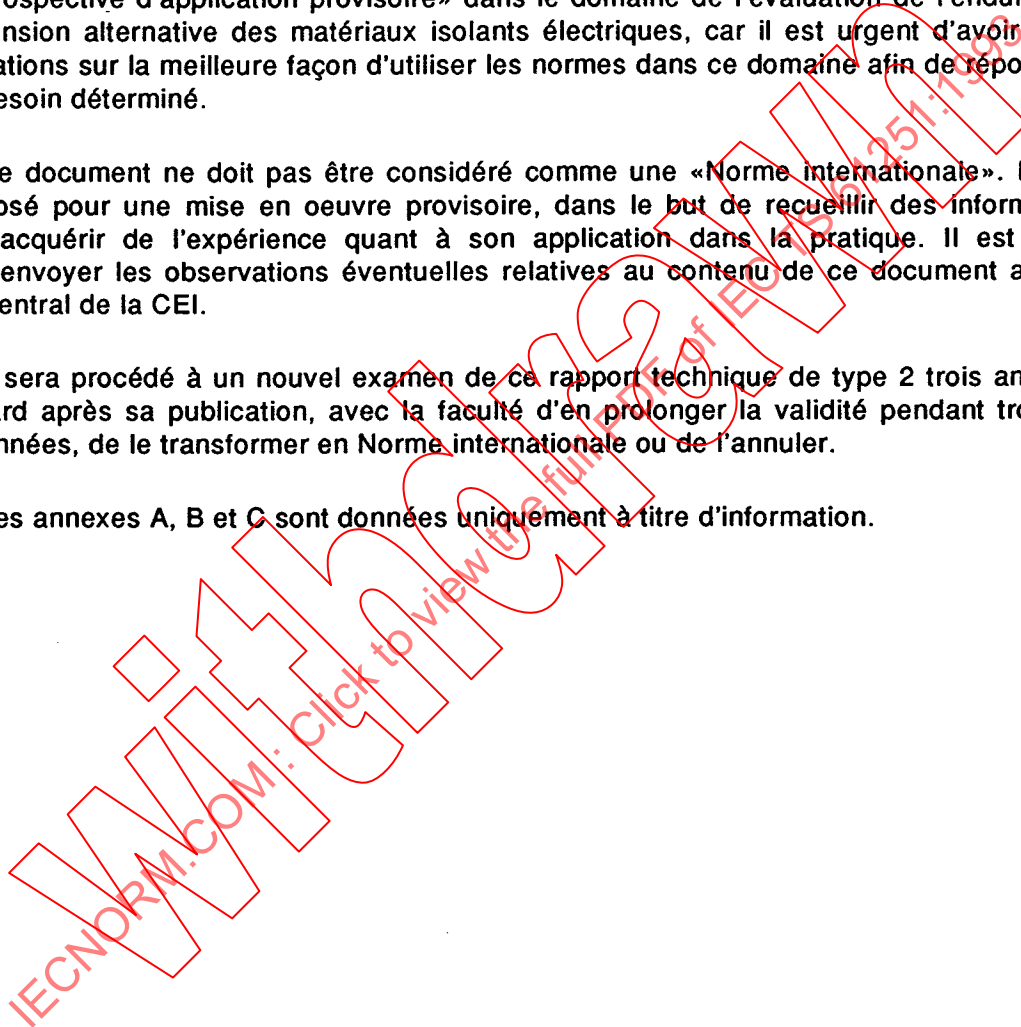
Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de ce rapport technique.

Le présent document est publié dans la série des rapports techniques de type 2 (conformément au paragraphe G.4.2.2 de la partie 1 des Directives CEI/ISO) comme «norme prospective d'application provisoire» dans le domaine de l'évaluation de l'endurance à la tension alternative des matériaux isolants électriques, car il est urgent d'avoir des indications sur la meilleure façon d'utiliser les normes dans ce domaine afin de répondre à un besoin déterminé.

Ce document ne doit pas être considéré comme une «Norme internationale». Il est proposé pour une mise en oeuvre provisoire, dans le but de recueillir des informations et d'acquérir de l'expérience quant à son application dans la pratique. Il est de règle d'envoyer les observations éventuelles relatives au contenu de ce document au Bureau Central de la CEI.

Il sera procédé à un nouvel examen de ce rapport technique de type 2 trois ans au plus tard après sa publication, avec la faculté d'en prolonger la validité pendant trois autres années, de le transformer en Norme internationale ou de l'annuler.

Les annexes A, B et C sont données uniquement à titre d'information.



The text of this technical report is based on the following documents:

Committee draft	Report on voting
15B(SEC)123	15B(SEC)131

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

This document is issued in the type 2 technical report series of publications (according to G.4.2.2 of part 1 of the IEC/ISO Directives) as a "prospective standard for provisional application" in the field of a.c. voltage endurance evaluation of electrical insulating materials because there is an urgent requirement for guidance on how standards in this field should be used to meet an identified need.

This document is not to be regarded as an "International Standard". It is proposed for provisional application so that information and experience of its use in practice may be gathered. Comments on the content of this document should be sent to the IEC Central Office.

A review of this type 2 technical report will be carried out not later than three years after its publication, with the options of either extension for a further three years or conversion to an International Standard or withdrawal.

Annexes A, B and C are for information only.

MATÉRIAUX ISOLANTS ÉLECTRIQUES – ÉVALUATION DE L'ENDURANCE À LA TENSION ALTERNATIVE – INTRODUCTION

1 Domaine d'application et objet

Le présent rapport technique expose un grand nombre de facteurs intervenant dans les essais d'endurance à la tension des matériaux isolants électriques. Il décrit le graphe d'endurance à la tension, répertorie les méthodes d'essai en indiquant leurs limites et donne des conseils pour évaluer l'endurance à la tension alternative des matériaux isolants à partir des résultats des essais.

La terminologie utilisée pour l'endurance à la tension est définie et expliquée. Il faut souligner que ce rapport technique concerne les matériaux isolants, et les résultats des essais d'endurance à la tension peuvent ne pas être directement applicables aux performances des systèmes d'isolation¹⁾.

Les essais d'endurance à la tension sont utilisés pour comparer et évaluer les matériaux isolants en vue de leurs différentes applications dans les systèmes électriques. La détermination de la capacité d'endurance des matériaux isolants électriques aux contraintes de tension alternative est très complexe. Les résultats d'essais d'endurance à la tension dépendent de nombreux facteurs; ce rapport technique ne doit donc être considéré que comme une tentative de présentation globale de l'endurance à la tension permettant une planification et une analyse simplifiées. Ce rapport technique est une introduction générale; certains documents existent pour les différents cas pratiques et d'autres sont en préparation.

Il doit être reconnu, cependant, qu'il n'est pas possible, à partir des résultats de l'essai, de tirer des conclusions sur les performances des matériaux en service dans un système d'isolation.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour le présent rapport technique. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur le présent rapport technique sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 243, *Méthodes d'essai pour la détermination de la rigidité diélectrique des matériaux isolants solides*

CEI 343: 1991, *Méthodes d'essai recommandées pour la détermination de la résistance relative des matériaux isolants au claquage par les décharges superficielles*

CEI 727-2: 1993, *Evaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation électrique – Partie 2: Procédures d'évaluation basées sur des distributions de valeurs extrêmes*

¹⁾ Pour les systèmes, voir la CEI 727.

ELECTRICAL INSULATING MATERIALS – A.C. VOLTAGE ENDURANCE EVALUATION – INTRODUCTION

1 Scope and object

This technical report explains many of the factors involved in Voltage Endurance tests on electrical insulating materials. It describes the Voltage Endurance graph, lists test methods illustrating their limitations, and gives guidance for evaluating the a.c. Voltage Endurance of insulating materials from the results of the tests.

The terminology to be used in Voltage Endurance is defined and explained. It must be emphasized that this technical report is concerned with materials, and the results may not be directly applicable to the performance of insulating systems¹⁾.

Voltage Endurance tests are used to compare and evaluate insulating materials in view of their various applications in electrical systems. Determining the ability of electrical insulating materials to endure a.c. voltage stress is very complex. The results of Voltage Endurance test procedures are influenced by many factors, so this technical report should only be considered an attempt to present a unified view of Voltage Endurance for simplified planning and analysis. This report is an introduction with general purposes: some documents for the various practical cases exist and others are being developed.

It should be recognized, however, that it is not possible from the results of the test to draw conclusions about the performance of the materials in service in an insulating system.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this technical report. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this technical report are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 243, *Methods of test for electric strength of solid insulating materials*

IEC 343: 1991, *Recommended test methods for determining the relative resistance of insulating materials to breakdown by surface discharges*

IEC 727-2: 1993, *Evaluation of electrical endurance of electrical insulation systems – Part 2: Evaluation procedures based on extreme value distributions*

¹⁾ For systems, see IEC 727.

3 Définitions et termes

3.1 Endurance à la tension (ET)

L'endurance à la tension est une mesure de la capacité de matériaux isolants solides à endurer une tension. Dans le présent rapport seule la tension alternative est prise en considération.

3.2 Durée de vie en tension

La durée de vie de tout système technique est le temps jusqu'à sa défaillance. Pour les matériaux isolants solides, la durée de vie en tension est le temps jusqu'au claquage sous contrainte de tension constante.

3.3 Essais d'endurance à la tension

Pour évaluer l'endurance à la tension de matériaux isolants, on soumet un certain nombre d'éprouvettes de ces matériaux à une tension alternative et on mesure leur temps jusqu'à défaillance. Dans la pratique des essais ET, on essaye plusieurs échantillons constitués de nombreuses éprouvettes à différentes tensions pour mettre en évidence l'effet de la tension appliquée sur le temps jusqu'à défaillance. Le temps moyen jusqu'au claquage de chaque échantillon est la moyenne des temps jusqu'au claquage de toutes les éprouvettes à cette tension. Le temps au bout duquel un certain pourcentage d'éprouvettes ont claqué est le temps estimé jusqu'au claquage avec une probabilité égale à ce pourcentage.

Le traitement statistique des données (par des méthodes analytique ou graphique) permet de mettre en évidence des données supplémentaires telles que d'autres percentiles de défaillance ou des limites de confiance et, le cas échéant, la détermination de la distribution (gaussienne, de Weibull, log normale, etc.).

3.4 Contrainte électrique

D'une manière générale, il est conseillé de faire référence à la contrainte électrique (tension par unité d'épaisseur) plutôt qu'à la tension. Pour un champ uniforme, la contrainte électrique est donnée par le rapport de la tension (valeur efficace) à l'épaisseur des éprouvettes.

Si le champ électrique n'est pas uniforme, on peut prendre sa valeur moyenne ou sa valeur maximale. Dans ce cas, le classement en champ uniforme peut ne pas être appliqué.

3.5 Graphe d'endurance à la tension (ET)

C'est le graphe du temps jusqu'au claquage en fonction de la valeur correspondante de contrainte électrique¹⁾. Dans le graphe ET, la contrainte électrique est représentée en ordonnées sur une échelle linéaire ou logarithmique. Les temps jusqu'au claquage sont représentés en abscisses, généralement sur une échelle logarithmique. La courbe d'endurance à la tension sur ce graphe représente le résultat final des essais ET dans la mesure où ils permettent une évaluation claire et complète de l'endurance à la tension des éprouvettes dans les conditions d'essai spécifiées.

¹⁾ Pour une comparaison plus significative, il convient que les matériaux soient comparés à épaisseur égale.

3 Definitions and terms

3.1 Voltage Endurance (VE)

Voltage Endurance is a measure of the ability of solid insulating materials to endure voltage. In this report only a.c. voltage is considered.

3.2 Voltage life

The life of any technical system is the time until its failure. For solid insulating materials, the voltage life is the time to breakdown under constant voltage stress.

3.3 Voltage Endurance testing

To evaluate the Voltage Endurance of insulating materials, a number of specimens of the material under consideration are subjected to a.c. voltage and their times to breakdown are measured. In VE testing practice, several samples of many specimens are tested at different voltages to reveal the effect of the applied voltage on the time to breakdown. The mean time to breakdown of each sample is the average time to breakdown of all specimens at that voltage. The time at which a certain percentage of specimens has broken down is the estimated time to breakdown with a probability equal to this percentage.

The statistical treatment of the data (either by analytical or graphical methods) allows the extraction of additional data such as other failure percentiles or confidence bounds and, possibly, determination of the distribution (e.g. Gaussian, Weibull, log normal, etc.).

3.4 Electrical stress

In general, it is advisable to make reference to electrical stress (voltage per unit thickness) instead of voltage. For uniform field, electrical stress is given by the ratio of voltage (effective value) to the thickness of specimens.

If the electric field is not uniform, its mean or maximum value can be considered. In this case, the uniform field ranking of materials may not be applied.

3.5 Voltage Endurance (VE) graph

This is the graph of the time to breakdown versus the corresponding value of electrical stress¹⁾. In the VE graph, the electrical stress is plotted as the ordinate with either a linear or logarithmic scale. The times to breakdown are plotted on the abscissa, usually with a logarithmic scale. The Voltage Endurance line on this graph gives the final result of the VE tests, as it allows clear and complete evaluation of Voltage Endurance of the specimens under the specified test conditions.

¹⁾ For maximum significance, materials should be compared at equal thickness.

Le traçage précis de la courbe nécessitant de nombreux essais effectués à des tensions très différentes, il est généralement nécessaire d'effectuer des essais à des tensions basses qui donnent des temps longs jusqu'au claquage. Toutefois, on peut réduire le temps et le coût des essais ET sans réduire notablement le niveau de fiabilité en évaluant la forme de la courbe (voir article 5).

La courbe d'endurance à la tension peut être rectiligne ou curviligne. Dans ce dernier cas, on peut souvent donner une approximation de sa tournure avec quelques segments de droite, le premier représentant généralement les temps courts avec une pente faible, une région moyenne (qui peut être prolongée jusqu'à des temps très longs) avec une pente plus raide et enfin une dernière partie de la courbe tendant à l'horizontalité (voir la figure 1 qui représente une courbe ET générale).

La forme du graphe ET peut changer beaucoup d'un matériau à un autre.

3.6 Rigidité diélectrique de courte durée

La rigidité diélectrique de courte durée est généralement mesurée avec une tension en croissance linéaire. La durée d'un tel essai, tel que pratiqué dans ce rapport, est de l'ordre de quelques dizaines de secondes à quelques dizaines de minutes (ce qui est supérieur aux valeurs suggérées par la CEI 245). Ces mesures de rigidité diélectrique de courte durée peuvent être utilisées pour indiquer le degré de vieillissement d'éprouvettes soumises à une tension en comparant les valeurs après exposition à la tension avec les valeurs initiales.

Les résultats des essais de rigidité diélectrique (ou, d'une manière générale, des essais en tension croissante) ne sont pas reportés directement sur le graphe ET, mais, au lieu de cela, on effectue un essai à tension constante à la même contrainte que la rigidité diélectrique moyenne E_0 , pour déterminer le temps réel jusqu'à défaillance, t_0 , avec contrainte constante. Le point (E_0, t_0) est sur la courbe ET. On donne plus de détails sur cette méthode en 5.4 et 5.6. Cependant, lorsque cette méthode est utilisée, il convient de prendre les précautions suivantes:

- i) l'essai doit être réalisé dans les mêmes conditions (ambiance, température, etc.), dans la même cellule d'essai et avec les mêmes procédures que les essais d'endurance à la tension, et
- ii) les éprouvettes et les conditions du claquage de l'éprouvette doivent être examinées et enregistrées pour une utilisation future dans l'analyse des résultats. Cette dernière est faite pour s'assurer que le mode de défaillance à contrainte élevée n'est pas supposé indûment être le même que celui des autres éprouvettes essayées plus tard à contrainte plus basse.

3.7 Coefficient d'endurance à la tension – CET (n)

Ce coefficient se définit comme la valeur numérique de l'inverse de la pente de la courbe ET si la courbe est rectiligne en coordonnées log-log. Dans ce cas, la pente de la courbe ET peut être un indice de la réponse du matériau à la contrainte électrique. Le CET n est sans dimensions. Lorsque la pente de la courbe est faible, une faible réduction de la contrainte produit une augmentation notable de la durée de vie.

L'inverse de la pente est supposé conforme à la valeur numérique de l'exposant n dans l'équation (1) qui a un précédent historique. Une valeur élevée de n indique souvent un haut niveau d'endurance à la tension. Cependant, si cela se produit avec une faible con-

An accurate plotting of the line requires many tests at widely different voltages, thus some tests are usually required at low voltages, which result in long times to breakdown. However, it may be possible to reduce the time and cost of the VE test without an appreciable reduction of the reliability in evaluating the shape of the line (see clause 5).

The Voltage Endurance line may be straight or curved. In the latter case, its trend can often be approximated by a few straight regions, sometimes a first part for short times with a gentle slope, a middle region (which may be prolonged until very long times) with a steeper slope, and finally a further trend of the line showing a tendency to become horizontal (see figure 1, where a general VE line is shown).

The shape of the VE graph may change greatly from one material to another.

3.6 Short-time electric strength

The short-time electric strength is generally measured using a linearly increasing voltage. The duration of such a test, as used in this document, is of the order of some tens of seconds up to some tens of minutes (and thus longer than the values suggested by IEC 243). These short-time electric strength measurements can be used to indicate the degree of ageing of specimens subjected to voltage, by comparing the values after voltage exposure with the initial ones.

The results of electric strength tests (or, in general, of tests with increasing voltage) are not reported directly in the VE graph, but instead, a constant voltage test at the same stress as the mean electric strength, E_0 , is made to determine the actual time to breakdown, t_0 , with constant stress. The point (E_0, t_0) is on the VE line. More details on this procedure are given in 5.4 and 5.6. However, when this procedure is used, the following precautions should be taken:

- i) the test should be carried out in the same conditions (ambient, temperature, etc.), in the same test cell and with the same procedures as for the Voltage Endurance tests, and
- ii) the specimens and the conditions of the specimen breakdown should be examined and recorded for future use in the analysis of the results. This latter is to assure that the mode of failure at high stress is not unduly assumed to be the same as that of the other specimens tested later at lower stress.

3.7 Voltage Endurance Coefficient – VEC (n)

This is defined as the numerical value of the reciprocal of the slope of the VE plot, if the line is straight in a log-log plot. In such a case, the slope of the VE line may be an index of the response of a material to electrical stress. The VEC n is dimensionless. With a gentle slope of the line, even a small reduction of stress produces a great increase in life.

The reciprocal of the slope is taken to be consistent with the numerical value of the exponent n in equation (1) which has historical precedent. A large value of n often indicates a high level of Voltage Endurance. However, if it occurs together with a low

trainte, la valeur élevée de n peut indiquer une faible rigidité diélectrique, qui ne doit pas être confondue avec une haute endurance.

Une faible valeur de n indique une faible endurance. La chose la plus significative est le maintien d'une rigidité diélectrique utilisable pour de longues périodes de temps. Voir également l'équation (7) en 5.4.

3.8 CET différentiel (n_d)

Si la courbe ET est curviligne en coordonnées log-log, sa pente change d'un point à un autre. On peut donc mesurer en un point quelconque la pente par la tangente. Pour toute contrainte électrique, et donc pour tout point de la courbe, le coefficient différentiel d'endurance à la tension n_d , peut être défini comme la valeur numérique de l'inverse de la pente de la droite tangente à la courbe en ce point (figure 2). L'autre coefficient, N , décrit dans la figure, est défini en 5.5.

3.9 Contrainte électrique seuil (E_t)

La courbe ET peut tendre à l'horizontalité lorsque la contrainte diminue, suggérant ainsi l'existence d'une contrainte limite E_t au-dessous de laquelle le vieillissement électrique devient négligeable. Cette limite est appelée contrainte électrique seuil. La tendance à l'horizontalité de la courbe peut parfois être détectée par des essais d'une durée adéquate; toutefois, les essais ne permettent pas toujours de révéler cette tendance. Certains matériaux isolants ne présentent pas de contrainte électrique seuil même avec des temps d'essai très longs.

4 Relation d'endurance à la tension

La relation ET est le modèle mathématique de la durée de vie en tension, c'est-à-dire l'équation reliant la contrainte électrique et le temps jusqu'au claquage, dont la représentation graphique est donnée par la courbe ET. Si la courbe est rectiligne en coordonnées log-log, l'équation est du type suivant:

$$L = CE^{-n} \quad (1)$$

où

L représente le temps jusqu'au claquage et E la contrainte électrique;

C et n sont des constantes (dépendant de la température et d'autres facteurs environnementaux).

L'équation (1) constitue le modèle de puissance inverse qui est le modèle de durée de vie en tension que l'on trouve souvent dans les données d'endurance à la tension de l'isolation électrique solide. Quand on dispose de données de temps jusqu'au claquage à deux contraintes de tension, ce modèle peut être utilisé pour estimer la valeur de n en utilisant l'équation (1'):

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{-n} \quad (1')$$

stress, the high value of n can indicate a low electric strength, which should not be confused with high endurance.

A low value of n indicates poor endurance. What is most significant is the retention of usable electric strength for long periods of time. See also equation (7) in 5.4.

3.8 Differential VEC (n_d)

If the VE line is curved in log-log co-ordinates its slope changes from point to point. Therefore, the slope may be measured by means of the tangent at any point. For any electrical stress, and thus for any point on the line, the differential Voltage Endurance coefficient, n_d , can be defined as the numerical value of the reciprocal of the slope of the straight line tangent to the curve at that point (figure 2). The other coefficient, N , described in the figure, is defined in 5.5.

3.9 Electrical threshold stress (E_t)

The VE line may tend to become horizontal with decreasing stress, suggesting a limiting stress E_t below which electrical ageing becomes negligible. This limit is called the electrical threshold stress. The tendency of the line to become horizontal can sometimes be detected by means of tests of suitable duration; however, the tests do not always succeed in disclosing such a trend. Some insulating materials do not show any electrical threshold stress even for very long test times.

4 Voltage Endurance relationship

The VE relationship is the mathematical model of voltage life, i.e. the equation relating electrical stress and time to breakdown, whose graphical representation is given by the VE line. If this line is straight on log-log graph paper, the equation is of the type:

$$L = C E^{-n} \quad (1)$$

where

L is time to breakdown and E electrical stress;

C and n are constants (depending on temperature and other environmental conditions).

Equation (1) constitutes the so-called inverse-power model, which is the voltage-life model often encountered with Voltage Endurance data on solid electrical insulation. When data are available for time to breakdown at two voltage stresses, this model can be used to estimate the value of n by using equation (1'):

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{-n} \quad (1')$$

Si les données d'essai ET ne forment pas une droite en coordonnées log-log, l'utilisation du modèle de puissance inverse n'est pas correcte. Si la courbe tend vers une contrainte électrique limite E_t , d'autres modèles ont été proposés dont le suivant:

$$L = C' (E - E_t)^{-n} \quad (2)$$

qui devient le modèle de puissance inverse lorsque E_t tend vers 0 et qui est utilisé de préférence lorsque les données obtenues avec des temps brefs ou moyens forment une droite en coordonnées log-log. On peut aussi utiliser le modèle suivant:

$$L = \frac{k \exp(-h E)}{E - E_t} \quad (3)$$

qui est dérivé du modèle exponentiel simple, correspondant approximativement à une droite en coordonnées semi-log pour $E > E_t$, mais donne un temps infini jusqu'au claquage lorsque E tend vers E_t . Dans les équations (2) et (3), les constantes C' , n , k , h et E_t dépendent de la température et autres facteurs environnementaux¹⁾.

Les équations (2) et (3) peuvent être utilisées pour former deux nouvelles équations qui définissent la tendance de la courbe entre deux points quelconques, (L_1, E_1) et (L_2, E_2) . On obtient les équations suivantes :

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{E_1 - E_t}{E_2 - E_t} \right)^{-n} \quad (2')$$

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{\exp \{-h (E_1 - E_2)\}}{(E_1 - E_t) / (E_2 - E_t)} \quad (3')$$

Les équations (1), (1'), (2), (2'), (3) et (3') sont les équations de la courbe ET dans les différents cas considérés (droite ou segment de droite en coordonnées log-log; tendance vers un seuil après une tendance à peu près linéaire en coordonnées log-log ou semi-log).

Si l'on prend les logarithmes, le modèle de puissance inverse devient:

$$\ln L = \ln C - n \ln E \quad (4)$$

C'est l'équation de la droite ET en coordonnées log-log. Sa pente est de $-1/n$. Comme la valeur numérique de l'inverse de la pente est égale au CET, le CET peut aussi être défini comme l'exposant n dans le modèle de puissance inverse. Toutefois, la définition géométrique est plus générale et peut être appliquée aux courbes non rectilignes, comme l'indique l'article 3.

¹⁾ D'autres modèles ont été proposés où $(E - E_t)$ est élevé à une puissance v dépendant du matériau à l'étude.

If the VE test data do not form a straight line on log-log paper, the use of the inverse-power model is incorrect. If the line approaches an electrical threshold stress, E_t , other models have been proposed, among them:

$$L = C' (E - E_t)^{-n} \quad (2)$$

which becomes the inverse-power model if E_t tends to 0 and is preferably used when the data for short and medium times fit a straight line on log-log co-ordinates. Alternatively, another model is:

$$L = \frac{k \exp(-h E)}{E - E_t} \quad (3)$$

which derives from the simple exponential model, corresponding to an approximately straight line in semilog co-ordinates for $E > E_t$, but gives infinite time to breakdown when E tends to E_t . In equations (2) and (3), constants C' , n , k , h and E_t depend on temperature and other environmental conditions¹⁾.

Equations (2) and (3) can be used to generate two new equations which define the trend of the VE line between any two points, (L_1, E_1) and (L_2, E_2) . The following equations are obtained:

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{E_1 - E_t}{E_2 - E_t} \right)^{-n} \quad (2')$$

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{\exp\{-h(E_1 - E_2)\}}{(E_1 - E_t) / (E_2 - E_t)} \quad (3')$$

Equations (1), (1'), (2), (2'), (3), and (3') are the equations of the VE line in the various cases considered (straight line or a straight line segment on log-log plot; tendency toward a threshold after an approximately linear trend on log-log or semilog graph paper).

By taking the logarithms, the inverse-power model becomes:

$$\ln L = \ln C - n \ln E \quad (4)$$

This is the equation of the straight VE line in log-log co-ordinates. Its slope is $-1/n$. As the numerical value of the reciprocal of the slope is equal to the VEC, the VEC can also be defined as the exponent n in the inverse-power model. The geometrical definition is, however, more general and can be applied even for curved lines, as is done in clause 3.

¹⁾ Other models have been proposed where $(E - E_t)$ is raised to an exponent v , dependent on the material under consideration.

5 Méthodes d'essai

Dans cet article sont décrites plusieurs méthodes pour effectuer l'essai ET. Les différences à examiner concernent la méthode d'application de la tension (constante ou croissante avec le temps), la fréquence (fréquence de service ou supérieure) et le moment d'interruption de l'essai (temps jusqu'au claquage ou temps plus court auquel sont faites les mesures destructives de diagnostic).

En général, le type de cellule de vieillissement peut être le même, quel que soit le choix des paramètres ci-dessus. Cependant, en ce qui concerne le choix de la fréquence de la tension appliquée, la quantité de chaleur produite par les pertes diélectriques ou par les décharges partielles doit être telle que l'échauffement qui en résulte puisse être négligé.

Dans les essais de matériaux, la cellule de vieillissement doit de préférence être telle que la contrainte appliquée soit uniforme. On peut pour cela avoir recours à des électrodes dont les surfaces sont plates et les bords arrondis. On peut métalliser la surface des éprouvettes pour éviter des décharges partielles à la surface des éprouvettes. Par ailleurs, pour éviter les contournements le long de la surface des éprouvettes, il est recommandé que l'éprouvette fasse saillie bien au-delà des bords des électrodes. Si les essais préliminaires montrent que ce n'est pas suffisant pour éviter les contournements au bout d'un certain temps, à cause de la détérioration de la surface des éprouvettes provoquée autour des électrodes par des décharges partielles, il faut enrober les électrodes avec un diélectrique approprié d'une permittivité proche de celle du matériau essayé.

Si le champ électrique n'est pas uniforme, il est nécessaire de connaître le rapport du maximum à la valeur moyenne de l'intensité du champ pour présenter correctement les données.

La forme et le traitement de l'éprouvette dépendront du but de l'essai. A des fins de recherche, des études de dégradation interne en fonction de la taille et de la forme des cavités ont été effectuées; cependant, cela se situe en dehors du domaine d'application du présent rapport technique. De même, l'évaluation et la comparaison de matériaux du point de vue de la dégradation par des décharges externes sont traitées dans la CEI 343.

5.1 Essais à contrainte constante

5.1.1 Essai ET conventionnel

Dans l'essai à contrainte constante, la valeur de la tension appliquée à chaque échantillon d'éprouvettes est maintenue constante tout au long de l'essai. Cette valeur est généralement choisie de manière que le temps moyen jusqu'au claquage de l'échantillon soit de l'ordre de quelques dizaines à quelques milliers d'heures. Le temps jusqu'au claquage de quelques éprouvettes peut être si long qu'il devient impossible d'attendre le claquage de toutes les éprouvettes de l'échantillon, notamment aux faibles contraintes. Dans ce cas, il est demandé d'interrompre l'essai après le claquage de la majorité des éprouvettes et de prendre en considération la valeur centrale au lieu de la valeur moyenne, ou d'utiliser les procédures de calcul statistique pour données tronquées (voir, par exemple, la CEI 727-2).

En général, on utilise au moins trois ou quatre tensions différentes, ce qui donne trois ou quatre points de la courbe d'endurance à la tension. Trois ou quatre points sont souvent insuffisants pour mettre en évidence la courbure de la ligne. D'un autre côté, il est souvent économiquement impossible d'obtenir la quantité de données nécessaire pour des essais à plus de quatre tensions différentes.

5 Test methods

In this clause different methods of carrying out the VE test are described. The differences to be discussed concern the way of applying voltage (constant or increasing with time), the frequency (service or higher), and the time at which the test is interrupted (the time to breakdown or a shorter time at which destructive diagnostic measurements are performed).

In general, the type of ageing cell can be the same, whatever the choice of the parameters above. However, with respect to the choice of the frequency of the applied voltage, the amount of heating from either dielectric loss or from partial discharges should be such that the temperature rise from these causes can be neglected.

When testing materials, the ageing cell should preferably be such that the applied stress be uniform. This can be obtained by electrodes having a flat surface rounded at the edges. The surface of specimens can be metallized in order to avoid partial discharges at the specimen surface. Furthermore, to avoid flashover along the specimen surface, the specimen should extend well beyond the edges of the electrodes. If preliminary tests indicate that this is not enough to avoid flashover after some time, due to deterioration of the specimen surface around the electrodes caused by partial discharges, then the electrodes should be embedded in an appropriate dielectric having permittivity close to that of the material under test.

If the electric field is not uniform, it is necessary to know the ratio of the maximum to the mean value of the field strength in order to report the data correctly.

The form and processing of the specimen will depend on the purpose of the test. For research purposes internal degradation studies as a function of cavity size and shape have been performed; however, this lies outside the scope of this technical report. Also, evaluation and comparison of materials from the point of view of degradation by external discharge are dealt with in IEC 343.

5.1 Tests at constant stress

5.1.1 The conventional VE test

In the constant stress test the magnitude of the voltage applied to each sample of specimens is kept constant during the test. This magnitude is usually selected in such a way that the mean time to breakdown of the sample is between some tens and a few thousand hours. The time to breakdown of some specimens, especially at the lower stresses, may be so long that it is impractical to wait for breakdown of all specimens of the sample. In this case, the interruption of the test after breakdown of the majority of the specimens and consideration of the central value instead of the mean value is advisable, or the use of statistical procedures for censored data is required (for example, see IEC 727-2).

Usually, at least three or four different voltages are used, and thus three or four points of the Voltage Endurance line are obtained. Three or four points are often not enough to demonstrate curvature of the line. On the other hand, the amount of data required for tests at more than four voltages may often be beyond that which is economically feasible.

L'ajustement des données à une ligne droite peut être établi par une analyse de régression. Si la qualité de l'ajustement est bonne, la courbe ET peut être ajustée à une ligne droite dont l'inverse négatif de la pente est CET. Bien sûr, c'est une moyenne des différentes valeurs des CET différentiels si la forme réelle de la ligne est courbe.

Pour toute tension d'essai, on peut tester les temps jusqu'au claquage pour leur ajustement à différentes fonctions de probabilités. Si les données répondent à la loi de Weibull, les données expérimentales donnent naissance à une droite (sur papier de Weibull) dont la pente indique le paramètre de forme β de la loi (voir annexe A). On peut contrôler la constance de β en procédant de la même manière pour tous les essais à différentes tensions. Si β est constant, on peut supposer que le CET l'est également.

5.1.2 Mesures de diagnostic

Les valeurs de diagnostic telles que $\tan \delta$ et/ou l'activité des décharges partielles peuvent être contrôlées pendant l'essai. Si l'on compare les courbes de $\tan \delta$ par rapport au temps, obtenues à différentes tensions, il peut arriver que l'on trouve une ressemblance dans leur forme. Dans ce cas, on peut évaluer le facteur d'accélération du vieillissement en tension et prévoir le temps jusqu'au claquage. Sans cette comparaison, un diagnostic des conditions de vieillissement à travers des mesures de $\tan \delta$ est difficile et souvent aléatoire, à moins que l'on observe des changements anormaux.

On peut aussi effectuer des mesures de rigidité diélectrique de courte durée sur des éprouvettes qui restent sans défaillance pour évaluer leur état de vieillissement. La rigidité diélectrique de courte durée peut donc servir aussi de valeur de diagnostic pour déterminer le degré de vieillissement causé par la contrainte électrique. Avec certains types de cellules de vieillissement, on peut parfois mesurer la rigidité diélectrique en plusieurs endroits de la même éprouvette. De cette façon, on peut déterminer si le claquage a été dû au vieillissement ou à un défaut localisé alors que l'éprouvette, dans son ensemble, était encore en bonne condition. Si, par exemple, on relève une diminution négligeable ou très faible de la valeur moyenne de la rigidité diélectrique sur les éprouvettes défaillantes, ceci indique un comportement non uniforme des éprouvettes qui peut être dû à une mauvaise technique de fabrication. Ceci permet de faire une distinction entre la qualité de la technique de fabrication et celle du matériau dont l'endurance intrinsèque peut être supérieure à celle indiquée par les temps jusqu'à défaillance des éprouvettes. L'utilisation des mesures de rigidité diélectrique sur des éprouvettes non défaillantes pour prédire leur durée de vie sera traitée en 5.5.

Pour étudier d'une manière exhaustive le processus de vieillissement, on peut utiliser des analyses chimiques ou microstructurelles. Les résultats peuvent souvent être rattachés aux variations de propriétés macroscopiques telles que rigidité diélectrique, conductivité, $\tan \delta$, etc.

5.1.3 Détection d'une contrainte électrique seuil

Les points expérimentaux montrent souvent une tendance à l'horizontalité de la courbe ET après de longues périodes d'exposition. De plus, de nombreux rapports de recherches sur ET font état de points indiquant des non défaillances aux niveaux plus bas de contrainte à des temps beaucoup plus longs que ceux attendus par extrapolation de la tendance aux hautes tensions. Ces résultats peuvent indiquer l'existence d'une contrainte électrique seuil. Il peut être souhaitable de tester ces données pour détecter la présence d'un tel seuil (E_t).

The fit of the data to a straight line may be established through regression analysis. If the quality of fit is not poor, the VE line can be fitted to a straight line with the negative reciprocal of the slope of the line being VEC. Of course, this is an average of different values of the differential VECs if the actual shape of the line is curved.

For any test voltage, the times to breakdown can be tested for their fit to various probability functions. If the data fit the Weibull distribution, the experimental data give rise to a straight line (on Weibull paper) whose slope is the shape parameter, β , of the distribution (see annex A). Proceeding in the same way for every test at different voltages, the constancy of β can be checked. If β is constant, constancy of the VEC may be expected.

5.1.2 Diagnostic measurements

Diagnostic quantities such as $\tan \delta$ and/or partial discharge activity may be monitored during the test. When $\tan \delta$ versus time curves obtained at different voltages are compared, it may occur that a similarity in their shape is found. In this case, evaluation of the ageing voltage acceleration factor, and thus a prediction of time to breakdown might be made. Without such a comparison, a diagnosis of the ageing conditions through measurements of $\tan \delta$ is difficult and often unreliable, unless unusual changes are observed.

Short-time electric strength measurements can also be carried out on specimens which remain unfailed, in order to evaluate their state of ageing. Thus the short-time electric strength can also be a diagnostic quantity to determine the degree of ageing caused by electric stress. With some types of ageing cell designs, the electric strength can be measured on the same specimen at several locations. In this way, one can check whether breakdown has occurred because of ageing or owing to a localized defect while the specimen was, on the whole, still in good condition. If, for example, a negligible or a very small decrease in the mean value of electric strength is observed in the failed specimens, this indicates a non-uniform behaviour of specimens, which might be due to poor manufacturing technique. This permits a distinction to be made between the quality of the manufacturing technique and that of the material, whose inherent endurance may be better than that indicated from times to breakdown of specimens. The use of electric strength measurements on unfailed specimens in order to predict time to breakdown will be dealt with in 5.5.

To investigate the ageing process thoroughly, chemical and microstructural analyses can be employed. The results can often be related to the variation of macroscopic properties such as electric strength, conductivity, $\tan \delta$, etc.

5.1.3 Detection of an electrical threshold

The experimental points often show a tendency of the VE line to become horizontal after long exposure times. Moreover, many reports of VE investigations include points indicating non-failures at the lower levels of stress at much longer times than expected from extrapolation of the trend at higher voltages. These results may indicate the existence of an electrical threshold. It may be desirable to test the data for the presence of such a threshold (E_t).

On peut contrôler l'existence d'un seuil en réalisant un essai à une fréquence supérieure à la fréquence industrielle, comme indiqué en 5.2. Une autre méthode permettant d'évaluer la tendance de la courbe ET aux faibles contraintes est décrite en 5.6. Le seuil dépend de la température: il décroît généralement lorsque la température augmente. Aux températures supérieures à la température ambiante et pour une contrainte électrique égale, la courbe CET est généralement décalée vers la gauche du graphe et les temps jusqu'au claquage sont plus courts. On réalise souvent l'essai ET à la température ambiante mais des essais à des températures plus élevées peuvent apporter des informations sur la forme de la courbe ET et notamment, sur l'existence d'un seuil et sa dépendance vis-à-vis de la température.

5.2 Essais à plus haute fréquence

Pour réduire les temps d'essai, on applique parfois une procédure consistant à augmenter la fréquence de la tension appliquée. Souvent, le temps jusqu'au claquage L_f à la fréquence industrielle f peut être relié au temps jusqu'au claquage L_h à la fréquence d'essai f_h par l'équation suivante:

$$L_f = L_h \frac{f_h}{f} \quad (5)$$

Toutefois, la validité de cette relation n'est pas prouvée. Parfois, l'accélération se révèle proportionnelle au rapport des fréquences élevé à une puissance différente de l'unité. Ce fait peut être dû aux différentes conditions auxquelles est soumis le matériau à haute fréquence. Comme on le sait, la permittivité et $\tan \delta$ dépendent de la fréquence, et le chauffage diélectrique, proportionnel au produit de la fréquence par la permittivité et par $\tan \delta$, peut affecter le temps jusqu'au claquage. Par ailleurs, les décharges partielles dans des micro-vides ou des défauts à l'intérieur du matériau et/ou la surface de l'éprouvette peuvent avoir des conséquences différentes suivant la fréquence. Il serait nécessaire de faire des essais comparatifs pour déterminer le rapport à utiliser suivant les différentes conditions d'essai; cependant, ce rapport peut être différent pour des contraintes élevées ou faibles. Il faut donc être très prudent dans l'interprétation des expériences accélérées en fréquence. Cependant, les essais à haute fréquence à de faibles contraintes peuvent donner des indications sur l'existence d'un seuil¹⁾.

5.3 Essais avec contrainte progressive

Dans les essais avec contrainte progressive, le niveau de la contrainte appliquée à chaque éprouvette augmente avec le temps. La vitesse d'augmentation de la contrainte doit être la même pour toutes les éprouvettes d'un même échantillon mais elle doit être différente d'un échantillon à l'autre pour obtenir la courbe ET avec contrainte progressive (voir figure 3).

On peut utiliser la tension moyenne de claquage, la médiane ou tout autre percentile puisque, dans cet essai, toutes les éprouvettes sont défailantes. Le traitement statistique des données est particulièrement intéressant étant donné le grand nombre de données que l'on peut obtenir à faible coût additionnel. Si les données propres à chaque échantillon répondent à la loi de Weibull, les points correspondants forment une droite en

¹⁾ Si les résultats d'essais à fréquence industrielle semblent indiquer la présence éventuelle d'un seuil, un essai à haute fréquence peut être effectué à une tension très peu inférieure à la tension du seuil pressenti. Si le temps jusqu'au claquage à cette tension est considérablement plus long que celui attendu selon la tendance de la courbe ET à tensions élevées combinée avec l'équation (5), la présence du seuil est presque certainement confirmée.

A check for the threshold may be given by a test at higher-than-power frequency, as illustrated in 5.2. Another method which may permit evaluation of the trend of the VE line at low stresses is described in 5.6. The threshold stress is influenced by temperature, usually decreasing as temperature rises. For temperatures higher than room temperature, the VE line is usually displaced towards the left of the graph and the times to breakdown are shorter, the electric stress being equal. The VE test is often carried out at room temperature, but tests at higher temperatures may provide information on the shape of VE line and, in particular, on the existence of a threshold and its dependence on temperature.

5.2 Tests at higher frequency

In order to reduce the test times, a procedure sometimes used is to increase the frequency of the applied voltage. The time to breakdown L_f at power frequency f is often derived from the time to breakdown L_h at the test frequency f_h by means of the following relationship:

$$L_f = L_h \frac{f_h}{f} \quad (5)$$

However, the validity of this relationship is not proved. Sometimes, acceleration is found to be proportional to the frequency ratio raised to a power different from unity. This may be due to the different conditions to which the material is subjected at high frequency. As is well known, permittivity and $\tan \delta$ depend on frequency and dielectric heating, proportional to the product of the frequency by permittivity and by $\tan \delta$, may affect the time to breakdown. Also, partial discharges in microvoids or defects inside the material and/or on the specimen surface can have different influence at different frequency. It would be necessary to perform comparative tests in order to determine the relationship to be used for the various test conditions; however, this relationship might be different for high and low stresses. Therefore, one should be very cautious in the interpretation of frequency accelerated experiments. However, high-frequency tests at low stresses may provide an indication if a threshold stress exists¹⁾.

5.3 Progressive stress tests

In the progressive stress test, the magnitude of the stress applied to each specimen increases with time. The rate of the stress rise should be the same for all specimens belonging to the same sample, but must be changed from one sample to another to obtain the VE line with progressive stress (see figure 3).

The mean breakdown voltage, the median or any other percentile may be used since, in this test, all specimens fail. Statistical treatment of the data is particularly useful due to the great deal of information obtainable at low additional cost. If the data relevant to each sample fit the Weibull distribution, the corresponding points fit a straight line in Weibull paper. The slope of the line is the shape parameter γ of the distribution (see A.2 and A.3

¹⁾ If the results of power-frequency tests seem to indicate the possible presence of a threshold, a high-frequency test may be made at a voltage very slightly below the voltage of the suspected threshold. If the time to breakdown at that voltage is considerably longer than it would be expected to be according to the trend of the VE line at higher voltages combined with equation (5), the presence of the threshold is almost certainly confirmed.

coordonnées Weibull. La pente de cette droite est égale au paramètre de forme γ de la distribution (voir A.2 et A.3 de l'annexe A). Notons que si les valeurs de γ sont les mêmes à différentes vitesses de montée en tension, le CET peut être déduit du rapport γ/β (voir A.4 de l'annexe A). C'est pourquoi, dans les essais ET réalisés sur des matériaux pour lesquels on s'attend à une valeur de CET constante sur la gamme de tensions d'essai, il est recommandé d'effectuer un essai avec contrainte progressive pour déterminer la valeur de γ avant de réaliser les essais avec contrainte constante. Ceci permet de contrôler la valeur du CET et, par conséquent, la durée probable du programme d'essai.

Il est important de connaître la valeur de γ lorsque les résultats doivent être présentés pour des éprouvettes de surface et/ou de volume différents. La probabilité de claquage à niveau de contrainte égal augmente en effet en fonction des dimensions des éprouvettes. Pour adapter les données – par exemple, la contrainte de claquage avec une probabilité donnée – des éprouvettes sur lesquelles elles ont été effectivement obtenues, à des éléments de dimensions différentes, il est nécessaire de connaître le rapport entre la probabilité, la contrainte et les dimensions. Si la loi de Weibull peut s'appliquer, le rapport entre deux contraintes, E_1 et E_2 , correspondant respectivement à la même probabilité de défaillance pour deux éléments, 1 et 2, de dimensions différentes peut être exprimé par l'équation suivante:

$$\frac{E_1}{E_2} = R^{1/\gamma} \quad (5')$$

où R est le rapport dimensionnel, c'est-à-dire le rapport entre les dimensions (surface ou volume) de l'élément 2 et celles de l'élément 1 (voir A.2 de l'annexe A).

Les données des essais avec contrainte progressive sont habituellement moins dispersées que celles des essais avec contrainte constante. Si la courbe ET est rectiligne en coordonnées log-log, sa pente est la même pour une contrainte constante ou progressive; les données de contrainte progressive peuvent être reliées à celles de contrainte constante par la formule suivante:

$$t_p = t_c (n + 1) \quad (6)$$

où t_p et t_c sont les temps jusqu'au claquage avec respectivement contrainte progressive et contrainte constante, pour le même niveau de contrainte et n est le CET.

Comme n est généralement très supérieur à l'unité, t_c est beaucoup plus court que t_p . Par conséquent, les temps jusqu'au claquage avec contrainte progressive correspondent aux temps avec contrainte constante, qui sont en général considérablement plus courts. Les essais avec contrainte progressive ne permettent donc d'évaluer le CET que dans la gamme des temps courts. Si le CET n'est pas constant, il n'est pas possible de prédire le temps jusqu'au claquage à contrainte constante à partir des données de contrainte progressive. Dans tous les cas, aucune information sur le comportement à long terme du matériau testé ne peut être tirée des essais à contrainte progressive, à l'exception de la valeur de seuil.

5.4 Essais préliminaires pour déterminer la partie initiale de la courbe ET

Dans certains cas, des essais préliminaires peuvent être utiles pour déterminer la partie initiale à haute tension de la courbe ET, ainsi qu'une estimation initiale de la valeur de n . Ces essais fournissent des données pour planifier les essais futurs à basse tension. Ils comprennent:

of annex A). Note that if γ is the same at different rates of voltage rise, the VEC can be derived from the ratio of γ to β (see A.4 of annex A). For this reason, in the VE test on materials for which constancy of the VEC is expected in the test voltage range, a good practice is to carry out a progressive stress test in order to determine γ before starting with the constant stress tests. This permits a check of the value of the VEC and thus the likely duration of the test programme.

Knowledge of the value of γ is of great importance when the results have to be reported for specimens of different areas and/or volumes. The breakdown probability at the same voltage stress is indeed an increasing function of the dimensions of specimens. In order to refer the data – for instance the breakdown stress with a given probability – from the specimens for which these data have actually been obtained to elements of different dimensions, it is then necessary to know the relationship between probability, stress, and dimensions. In the case of validity of the Weibull distribution, the ratio between two stresses, E_1 and E_2 , corresponding to the same breakdown probability for two elements, 1 and 2, of different dimensions is given by:

$$\frac{E_1}{E_2} = R^{1/\gamma} \quad (5')$$

where R is the dimensional ratio, i.e. the ratio of dimensions (area or volume) of element 2 to those of element 1 (see A.2 of annex A).

The progressive stress test data are usually less scattered than those from constant stress tests. If the VE line is straight on a log-log plot, its slope is the same for constant and progressive stress, and the progressive stress data may be related to those at constant stress by the following formula:

$$t_p = t_c (n + 1) \quad (6)$$

where t_p and t_c are the times to breakdown at progressive and constant stress, respectively, for the same value of stress, and n is the VEC.

Since n is usually much larger than unity, t_c is much shorter than t_p ; hence, the breakdown times with progressive stress correspond to times with constant stress which are, normally, considerably shorter. Therefore, the progressive stress test is useful only for evaluation of the VEC in the short-times range. If the VEC is not constant, it is not possible to predict time to breakdown at constant stress starting from progressive stress data. In any case, no information on the long-time behaviour of the test material, let alone on the threshold, is obtainable by progressive stress test.

5.4 Preliminary tests to determine the initial part of the VE line

In certain cases, preliminary tests may be useful to determine the initial high-voltage part of the VE line, as well as an initial estimate for the value of n . These tests provide data for planning the future lower voltage tests. They include:

- a) Un essai à contrainte progressive ou un essai par paliers de tension, semblable à un essai de rigidité diélectrique. La tension moyenne de claquage pour cet essai est E_o . La défaillance ne doit pas être un contournement, et devrait ressembler aux claquages obtenus aux basses tensions et aux temps longs. Comme mentionné en 3.6, le temps jusqu'au claquage dans cet essai peut être plus long que la valeur suggérée dans la CEI 243.
- b) Un essai à contrainte constante E_o . Dans l'exécution de cet essai, la tension doit être élevée jusqu'à la valeur E_o sans dépassement et le temps t_o doit être mesuré à partir du temps où la tension atteint E_o . On peut utiliser un interrupteur par passage à zéro pour commencer l'essai et un compteur pour compter le nombre de cycles alternatifs jusqu'au claquage.
- c) Des essais à des contraintes constantes légèrement inférieures à E_o , par exemple $0,9 E_o$, $0,8 E_o$.

Pour la description de cette procédure d'essai, voir l'annexe B.

Conformément à l'équation (6), le rapport du temps moyen jusqu'au claquage avec contrainte progressive, t_p , sur le temps moyen jusqu'au claquage avec contrainte constante, t_c , est égal à $n + 1$, à partir duquel on peut estimer la valeur de n à la partie initiale de la courbe ET. De même, si la valeur de t_c est appelée t_o , le point (E_o, t_o) est un point sur la courbe ET.

5.5 Traçage de la courbe ET par des mesures de rigidité diélectrique après vieillissement (méthode N)

Un autre type d'essai avec contrainte constante présente certains avantages par rapport à la méthode conventionnelle. Il s'agit d'un essai avec contrainte constante interrompu avant claquage des éprouvettes et suivi de mesures de rigidité diélectrique de courte durée sur les éprouvettes précontraintes. Ainsi, la méthode est basée sur la mesure de la rigidité diélectrique résiduelle après vieillissement et permet de tracer la courbe ET, point par point, au moyen de la détermination d'un coefficient, N , expliqué ci-dessous.

Si E est la contrainte constante appliquée, t le temps d'exposition, E_s la rigidité diélectrique de courte durée après exposition, E_o sa valeur initiale et t_o le temps jusqu'au claquage correspondant à une contrainte constante, on peut établir l'équation suivante:

$$\left(\frac{E_s}{E_o} \right)^{N+1} = 1 - \left(\frac{E}{E_o} \right)^N \frac{t}{t_o} \quad (7)$$

où N est l'inverse négatif de la pente de la ligne droite de E_o à E en coordonnées log-log, et E_o et t_o sont les valeurs mesurées en 5.4 (voir aussi figure 2).

Dans l'équation (7), toutes les valeurs sont connues sauf N . Par conséquent, cette équation permet de calculer N à la contrainte E ; ceci signifie que la pente de la droite reliant le point de départ (E_o, t_o) au point (E, L) est connue (L étant le temps jusqu'au claquage à la contrainte E). On peut donc déterminer le temps jusqu'au claquage L graphiquement (voir la figure 4) ou analytiquement. Dans ce but, il faut noter que l'équation de la droite mentionnée ci-dessus est la suivante:

$$\ln (L / t_o) = - N \ln (E / E_o) \quad (8)$$

d'où l'on peut tirer L , une fois que N est connu.

- a) A progressive stress test or a step voltage test similar to an electric strength test. The mean breakdown voltage on this test is E_o . The failure must not be a flashover, and preferably should resemble the breakdowns obtained at lower voltages and longer times. As mentioned in 3.6, the time to breakdown in this test may be longer than the value suggested in IEC 243.
- b) A constant stress test at E_o . In the performance of this test, the voltage must be raised to the value of E_o without overshoot and time t_o should be measured from the time the voltage reaches E_o . A zero crossing switch may be used to initiate the test, and a counter to count the number of a.c. cycles to breakdown.
- c) Constant stress tests at stresses slightly lower than E_o , for example $0,9 E_o$, $0,8 E_o$.

For description of these tests, see annex B.

According to equation (6), the ratio of the mean time to breakdown with progressive stress, t_p , to the mean time to breakdown with the constant stress, t_o , is $n + 1$, from which the value of n at the initial part of the VE line may be estimated. Also, if the value of t_c is called t_o , the point (E_o, t_o) is a point on the VE line.

5.5 Plotting the VE line by electric strength measurements after ageing (the N-method)

Another type of constant stress test presents some advantages in comparison with the conventional one. This test is a constant stress test interrupted before breakdown of specimens and followed by short-time electric strength measurements on the prestressed specimens. Thus the method is based upon the measurement of the residual electric strength after ageing, and permits the VE line to be plotted, point by point, by means of determination of a coefficient, N , explained below.

If E is the constant stress applied and t the exposure time, E_s the short-time electric strength after exposure, E_o its initial value and t_o the corresponding time to breakdown at constant stress, the following relationship may hold:

$$\left(\frac{E_s}{E_o} \right)^{N+1} = 1 - \left(\frac{E}{E_o} \right)^N \frac{t}{t_o} \quad (7)$$

where N is the negative inverse of the slope of the straight line from E_o to E in log-log co-ordinates, and E_o and t_o are the values measured in 5.4 (see also figure 2).

In equation (7) all quantities except N are known. Hence, this equation permits N at stress E to be calculated; this means that the slope of the straight line connecting the initial point (E_o, t_o) with (E, L) is known (L is the time to breakdown at stress E). Therefore, time to breakdown L can be determined either graphically (see figure 4) or analytically. For this purpose, it should be noted that the equation of the above straight line is:

$$\ln (L / t_o) = - N \ln (E / E_o) \quad (8)$$

from which L can be derived, once N is known.

En répétant cette procédure à différentes contraintes, on peut tracer la courbe ET point par point, comme avec l'essai conventionnel avec contrainte constante. Un avantage est que la détermination de N à différentes contraintes donne des informations supplémentaires utiles pour prévoir la forme de la courbe. Une tendance de N à augmenter lorsque la contrainte diminue peut être le signe de la tendance vers un seuil.

Il faut prendre certaines précautions pour utiliser cette procédure. Tout d'abord, il faut effectuer un grand nombre de mesures de rigidité diélectrique et prendre la valeur moyenne. La méthode est particulièrement avantageuse lorsque la cellule de vieillissement dans laquelle les éprouvettes sont soumises à une tension constante et l'appareil d'essai de rigidité diélectrique sont différents. Les éprouvettes peuvent alors être perforées en plusieurs points. Dans ce cas, le nombre de perforations peut être très grand même avec un nombre d'éprouvettes relativement faible. Tout essai de rigidité diélectrique sur des éléments préalablement soumis à contrainte doit être réalisé à la même vitesse de montée en tension que celle utilisée pour la détermination de la rigidité diélectrique initiale, E_0 . Il est donc évident que cette dernière mesure, dont le résultat sert de référence à toutes les autres, doit être effectuée sur un grand nombre d'éprouvettes à l'aide d'une méthode précise pour mesurer la tension de claquage.

Un autre point concerne l'interruption de l'essai à contrainte constante. L'expérience a montré qu'il est de bonne règle d'arrêter la partie à contrainte constante de l'essai après quelques défaillances, c'est-à-dire deux ou plus suivant le nombre d'éprouvettes.

Comme les temps de vieillissement des éprouvettes défaillantes (sauf la dernière) sont plus courts que ceux des autres éprouvettes, les résultats des essais de rigidité diélectrique doivent être traités de façon convenable en appliquant les méthodes statistiques utilisées pour les essais tronqués et progressivement tronqués.

La méthode N n'est pas recommandée si le graphe ET dévie considérablement d'une ligne droite lorsqu'il est tracé en coordonnées log-log. Il doit être utilisé seulement si l'on observe une décroissance appréciable dans la rigidité diélectrique.

5.6 Méthode d'essai proposée

Pour caractériser parfaitement les matériaux isolants du point de vue de l'endurance électrique, la méthode suivante est proposée:

- a) Exécution d'essais préliminaires à haute contrainte comme mentionné en 5.4.
- b) Essais à contrainte constante à de plus faibles contraintes. Il faut effectuer à différentes contraintes autant d'essais qu'il est nécessaire pour tracer la courbe ET et obtenir une prédiction fiable du comportement à long terme du matériau testé. Dans tous les cas, il faut utiliser au moins trois tensions d'essai. La méthode N peut être appliquée si l'on observe une diminution appréciable de la rigidité diélectrique. D'autres mesures de diagnostic sont aussi utiles.

Lorsque le matériau testé montre une tendance à donner une courbe ET rectiligne en coordonnées log-log, des essais à contrainte progressive et avec une faible vitesse de montée en tension sont utiles pour contrôler la valeur du CET.

Lorsque la courbe montre une tendance vers une contrainte seuil, un essai à contrainte légèrement inférieure à la contrainte seuil présumée, interrompu après quelques milliers d'heures et suivi de mesures de rigidité diélectrique peut être un moyen utile pour contrôler l'existence d'un seuil. On ne doit relever aucune diminution de la rigidité diélectrique si la tension appliquée est en fait en dessous du seuil.

By repeating this procedure at different stresses, the VE line can be plotted point by point as in the conventional constant stress test. An advantage is that determination of N at various stresses provides additional information useful to predict the shape of the line. A tendency of N to increase for decreasing stress may be evidence of the tendency towards a threshold.

Some precautions in using this procedure are required. First, a large number of electric strength measurements should be carried out and the average should be taken. The method is especially advantageous when the ageing cell in which specimens are exposed to constant voltage and the electric strength test apparatus are different. Thus specimens can be punctured at several points. In this case the number of punctures can be large even with a relatively small number of specimens. Every electric strength test on pre-stressed specimens must be carried out with the same rate of voltage rise used for determination of initial electric strength, E_0 . Also, it is evident that the latter measurement, whose result gives the reference for all the others, should be performed on a large number of specimens, and using an accurate procedure to measure the breakdown voltage.

Another point concerns the termination of the constant stress test. Experience has shown that a good practice is to stop the constant stress part of the test after a few failures, i.e. two or more according to the number of specimens.

Since the ageing times of the failed specimens (except the last) are shorter than that of the other specimens, the results of the electric strength tests should be suitably processed by applying the statistical methods used for censored and progressively censored tests.

The N -method is not recommended if the VE graph deviates considerably from a straight line when drawn in log-log co-ordinates. It should be used only if an appreciable decrease in electric strength is observed.

5.6 Suggested test method

In order to exhaustively characterize insulating materials from the point of view of electrical endurance, the following method is suggested:

- a) Performance of preliminary tests at high stress, as mentioned in 5.4.
- b) Constant stress tests at lower stresses. As many tests at different stresses should be performed as necessary to plot the VE graph and obtain a reliable prediction of the long-time behaviour of the material under test. In any case, not less than three test voltages are required. The N -method can be applied if an appreciable decrease in electric strength is observed. Other diagnostic measurements are also useful.

When the material under test shows a linear trend of the VE graph on log-log plot, tests with progressive stress and low rate of voltage rise are useful to check the value of the VEC.

When the graph shows a tendency towards a threshold stress, a test at stress close below the expected threshold stress, interrupted after a few thousand hours and followed by electric strength measurements, may be a useful tool to check for the existence of a threshold. No decrease of electric strength should be found if the voltage applied is actually below the threshold.

6 Evaluation de l'endurance à la tension

6.1 Signification du CET

En examinant la courbe ET normale, on constate immédiatement que plus le CET est élevé, plus le temps jusqu'au claquage est long pour une même valeur de l'ordonnée (E/E_0), tous les autres paramètres étant égaux. En d'autres termes, lorsqu'une contrainte égale au même pourcentage de E_0 est appliquée à deux matériaux ayant différents CET, celui qui a le plus grand CET possède un temps plus long jusqu'au claquage. De plus, si l'on interrompt l'essai de ET avant le claquage et que l'on mesure la rigidité diélectrique, la diminution de rigidité est plus faible pour le matériau qui a le CET le plus élevé, comme cela peut être déduit de l'équation (7). Par conséquent, le CET est un paramètre important pour évaluer l'endurance à la tension des matériaux isolants.

Comme les propriétés à court et à long terme sont souvent sans rapport entre elles, un CET élevé n'implique pas forcément une forte rigidité diélectrique. Il peut arriver que le matériau possédant le CET le plus faible ait un temps jusqu'au claquage plus long à contrainte égale, si sa rigidité diélectrique à court terme est si élevée qu'elle compense sa faible endurance.

Comme la courbe ET peut être curviligne, et par conséquent le CET non constant, il est important de spécifier la gamme de contraintes dans laquelle a été déterminé le CET. Si la constance du CET n'a pas été prouvée et si une valeur moyenne a été déterminée, il convient de le préciser. Dans le cas d'une courbe curviligne, on a décrit le coefficient différentiel n_d en 3.8. Pour ce coefficient, la gamme de contraintes auxquelles il a été déterminé constitue une information additionnelle à fournir nécessairement.

On peut noter que n_d donne des informations directes sur la pente effective de la courbe. Par conséquent, une spécification du type « n_d décroissant de 15 à 8 pour des contraintes décroissant de 100 % à 50 % de E_0 » est une façon pratique de décrire la courbe ET dans cette gamme de contraintes.

6.2 Signification de la contrainte électrique seuil

Si le matériau à l'étude présente une contrainte électrique seuil d'intérêt technique (c'est-à-dire pas trop basse pour que son importance pratique soit négligeable), cette contrainte seuil devient un facteur très intéressant à déterminer dans l'essai ET. C'est le cas pour les matériaux qui montrent une tendance vers un seuil pour des temps d'essai relativement courts. Cela signifie que des contraintes supérieures au seuil entraîneraient un temps plus court jusqu'au claquage. Etant donnée l'importance de la détermination de la contrainte seuil, de nombreuses recherches sont en cours et des méthodes de détermination sont à l'étude.

6.3 Dispersion des données et exigences de précision

Lorsque la contrainte appliquée à des matériaux isolants est supérieure à la contrainte seuil, le risque de claquage doit être calculé par un traitement statistique des données, comme décrit dans la CEI 727-2. Pour obtenir des résultats statistiquement valides, il est nécessaire

- a) que les éprouvettes d'essai soient prélevées suivant un échantillonnage au hasard à partir d'un lot important (provenant du même processus de fabrication);
- b) d'essayer des éprouvettes d'épaisseur uniforme, exigeant des différences non significatives d'un point à l'autre de la même éprouvette et d'une éprouvette à l'autre;

6 Evaluation of Voltage Endurance

6.1 Significance of the VEC

By considering the normal VE line, it is immediately realized that the larger the VEC, the longer the time to breakdown for the same value of the ordinate (E/E_0), all other parameters being equal. In other words, when a stress equal to the same percentage of E_0 is applied to two materials having different VECs, time to breakdown is longer for the one having the larger VEC. Furthermore, if the VE test is stopped before breakdown, and electric strength measured, its decrease is smaller for the material having larger VEC, as can be derived from equation (7). Therefore, the VEC is an important parameter for Voltage Endurance evaluation of insulating materials.

Since short- and long-time properties are often not correlated, a large value of the VEC does not necessarily accompany a high electric strength. It may happen that the material with lower VEC has longer time to breakdown at the same stress if its short-time electric strength is so high that its poorer endurance is compensated for.

Since the VE line may be curved and thus the VEC not constant, it is important to specify the stress range within which the VEC has been determined. If the constancy of the VEC has not been proved, and an average has been obtained, this should be reported. In the case of a curved line, the differential coefficient n_d has been described in 3.8. For this coefficient, the range of stress at which it has been determined constitutes additional information to be necessarily provided.

It can be noted that n_d gives direct information on the actual slope of the line. Therefore, a specification such as: " n_d decreasing from 15 to 8 for stresses decreasing from 100 % to 50 % of E_0 ", is a useful way to describe the VE line in that range of stresses.

6.2 Significance of the electrical threshold stress

If the material under consideration presents an electrical threshold stress of technical interest (that is to say, not so low that its practical importance is negligible), this threshold stress becomes a very interesting factor to be determined in the VE test. This is the case for materials which show a tendency towards a threshold, even for not very long test times. This means that stresses higher than the threshold stress would give rise to a shorter time to breakdown. Due to the importance of the determination of the threshold stress, much research is in progress and relevant methods are under consideration.

6.3 Dispersion of data and precision requirements

When the stress applied to insulating materials is higher than the threshold stress, the breakdown risk should be calculated by statistical treatment of test data, as described in IEC 727-2. In order to obtain statistically valid results it is necessary:

- a) that the test specimens are taken by a random procedure from a large batch (coming from the same manufacturing process);
- b) to test specimens of uniform thickness, requiring non-significant differences from one point to another of the same specimen and from one specimen to another;

- c) d'utiliser des conditions d'essai uniformes, c'est-à-dire d'utiliser des cellules d'essai identiques pour chaque éprouvette, et de s'assurer que les conditions ambiantes ne changent pas de manière significative pendant chaque essai ou d'un essai à l'autre.

Dans de nombreux cas, la courbe ET pour les très faibles probabilités de claquage est plus intéressante que la courbe ET moyenne ou médiane. Un traitement statistique des données d'essai est alors effectué pour calculer les temps jusqu'au claquage de faible probabilité, en plus du contrôle de la linéarité de la courbe.

La différence entre le temps moyen ou médian jusqu'au claquage et le temps jusqu'au claquage avec une faible probabilité de claquage donnée est une fonction de la dispersion des temps jusqu'au claquage inhérente au matériau en essai. En augmentant le nombre d'éprouvettes ou de perforations pour chaque éprouvette, on peut obtenir des estimations plus précises de cette dispersion, et ainsi des temps à faible probabilité de claquage avec une confiance raisonnable.

Pour avoir une vue immédiate de la précision d'un essai, on peut reporter les limites de confiance de chaque point déterminé expérimentalement sur la courbe ET.

Un test F peut être efficace pour contrôler si les données répondent aux exigences de tolérance en matière d'écart de linéarité. Les données doivent couvrir plusieurs décades en temps. Plus la valeur du CET est élevée, plus le nombre de décades doit être important pour la définir avec précision.

6.4 Présentation des résultats

Pour avoir une évaluation complète de l'endurance à la tension d'un matériau, il faut présenter la courbe ET (ou mieux les courbes correspondant aux différents percentiles jusqu'aux faibles probabilités de claquage), avec les intervalles de confiance. Ce graphe est difficile et coûteux à obtenir, et il peut rarement être tracé de manière fiable sur de longues périodes de temps. Néanmoins, le graphe ET doit toujours accompagner le rapport d'essai qui, bien entendu, doit contenir toutes les données permettant de comprendre le graphe et d'évaluer sa fiabilité. Il convient que le rapport présente les éléments suivants:

- Identification claire du matériau.
- Epaisseur et forme des éprouvettes et méthode pour les préparer.
- Conditionnement des éprouvettes (le cas échéant).
- Forme et dimensions des électrodes.
- Méthode d'essai et appareillage utilisé.
- Vitesse de montée en tension pour tout essai à contrainte progressive.
- Fréquence de la tension d'essai.
- Température d'essai.
- Nombre d'éprouvettes testées à chaque tension d'essai.
- Dispersion ou limites de confiance de chaque point rapporté sur le graphe.
- Toute autre information utile.

Si les résultats sont donnés en termes de CET, les exigences de linéarité du graphe doivent être satisfaites; si le graphe ne répond pas à ces exigences, les valeurs de N ou de n_d peuvent être données avec les gammes de contraintes correspondantes.

- c) to use uniform test conditions, that is, to use identical test cells for every specimen, and to ensure that the ambient conditions do not change significantly during each test, or from one test to another.

In many cases the VE line for very low breakdown probabilities has a greater interest than the mean or the median VE line. Statistical treatment of the test data is then carried out to calculate times to breakdown at low probabilities, besides checking the linearity of the graph.

The difference between the mean or median time to breakdown and the time to breakdown with a given low breakdown probability is a function of the dispersion of times to breakdown inherent in the material under test. By increasing the number of specimens or of punctures for each specimen, more precise estimates of this dispersion, and thus low breakdown probability times can be obtained with reasonable confidence.

To have an immediate view of test accuracy, the confidence bounds for each experimentally determined point on the VE graph can be reported.

An *F*-test may be effective to check that the data satisfy tolerance regarding departure from linearity. The data should span several decades in time. The higher the value of the VEC, the larger the number of decades required to define it with precision.

6.4 Presentation of the results

In order to have a complete evaluation of a material's Voltage Endurance, the VE line (or, better, the lines corresponding to different percentiles down to low breakdown probabilities) should be shown, including the confidence intervals. This graph is difficult and expensive to obtain, and can rarely be plotted in a reliable way over long time spans. Nevertheless, the VE graph should always accompany the test report which, of course, should include all the data necessary to understand the graph and its reliability. The following items should be indicated in the report:

- Clear identification of the material.
- Thickness and shape of specimens, and method to prepare them.
- Conditioning of specimens (if any).
- Shape and dimensions of electrodes.
- Test method and apparatus used.
- Rate of voltage rise for any progressive stress test.
- Frequency of the test voltage.
- Test temperature.
- Number of specimens tested at each test voltage.
- Scatter or confidence bounds of each point reported in the graph.
- Any other information of interest.

If the results are given in terms of VEC, the requirement of linearity of the graph should be satisfied; if the graph does not satisfy such requirements, values of N or n_d may be supplied, together with the corresponding stress ranges.

Le type d'analyse statistique utilisée doit aussi être spécifié et, dans la mesure du possible, il faut aussi présenter les graphes sur papier de probabilité. Les conditions spéciales à satisfaire pour tout type particulier d'essai ET seront indiquées sur des documents spéciaux.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TS 61251:1993

Withdr2Wm

The type of statistical analysis used should also be specified and, if possible, graphs on probability paper should be shown. Special conditions to be satisfied for any particular kind of VE test will be indicated by special documents.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TS 61251:1993

Withdrawn

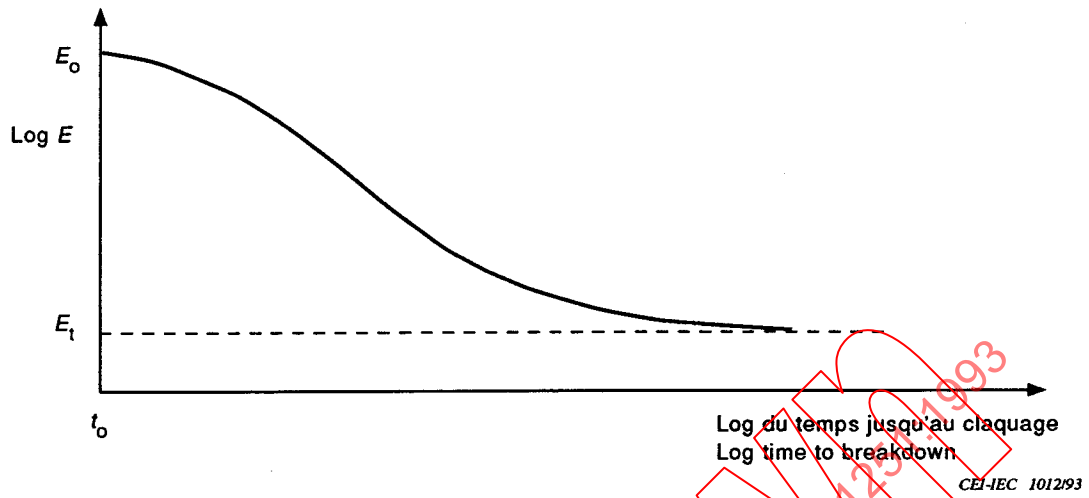


Figure 1 – Courbe générale d'endurance à la tension
General voltage endurance line

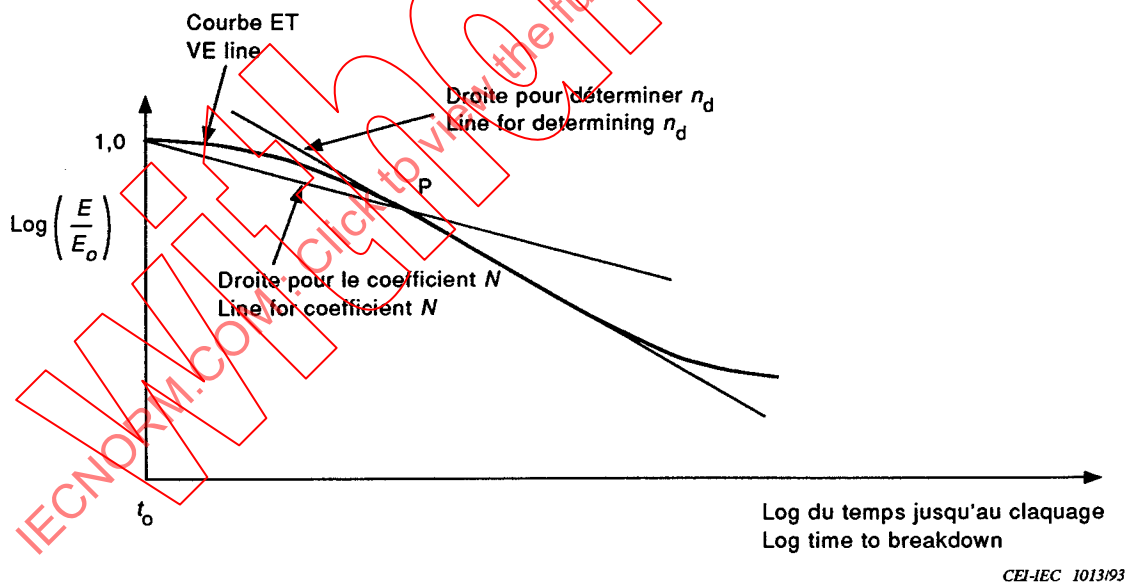


Figure 2 – Détermination du CET différentiel n_d et du coefficient N
en un point générique P de la courbe ET
Determination of the differential VEC n_d and the
coefficient N at a generic point P of the VE line

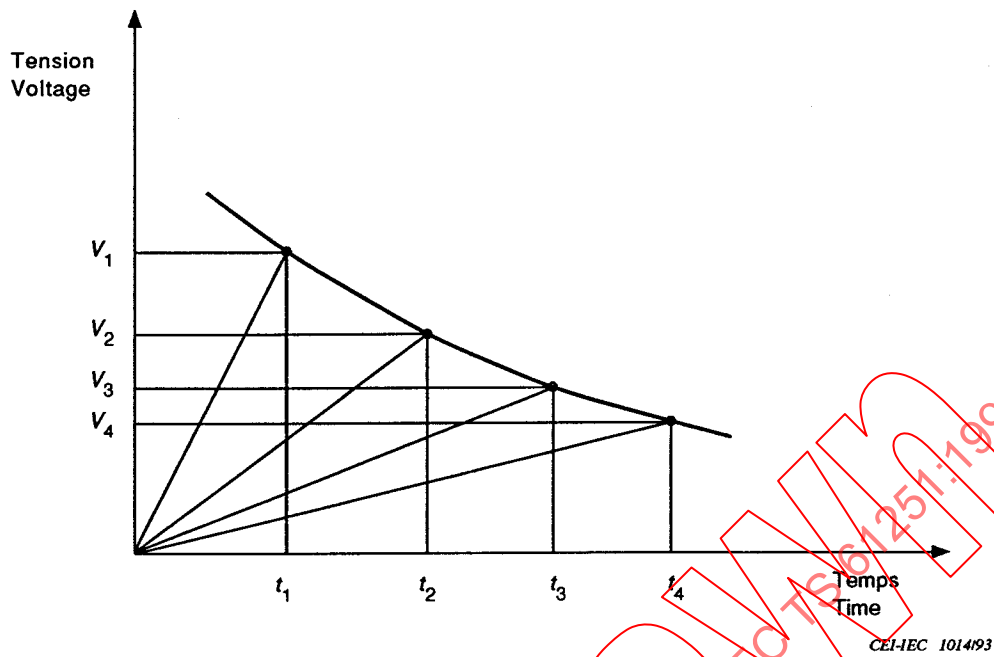


Figure 3 – Tracé de la courbe ET à contrainte progressive
Plotting the VE line with progressive stress

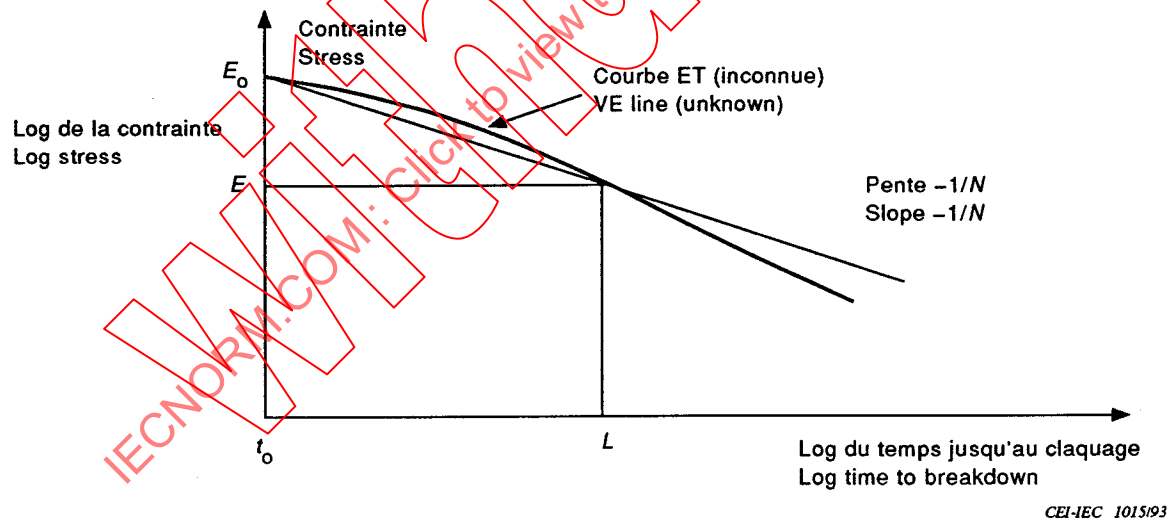


Figure 4 – Prédiction du temps jusqu'au claquage L à la contrainte E
lorsque le coefficient N est connu
Prediction of time to breakdown L at stress E
when coefficient N is known

Annexe A (informative)

Loi de Weibull

A.1 La loi de Weibull à deux paramètres des temps jusqu'au claquage s'écrit généralement de la manière suivante:

$$P(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (\text{A.1})$$

où

$P(t)$ est la probabilité de claquage au temps t ,

β est le paramètre de forme et

α est le temps correspondant à $P = 1 - 1/e = 0,632$.

En prenant deux fois les logarithmes, on obtient:

$$\ln \ln \frac{1}{1-P} = \beta \ln \frac{t}{\alpha} \quad (\text{A.2})$$

ce qui, en coordonnées $(\ln \ln \frac{1}{1-P})$ en fonction de $\ln t$ représente une droite de pente β .

Le papier Weibull est un papier gradué spécial dont les graduations correspondent à ce système de coordonnées.

A.2 La loi de Weibull des contraintes de claquage peut s'écrire de la manière suivante:

$$P(E) = 1 - \exp (- m E^\gamma) \quad (\text{A.3})$$

où

γ est le paramètre de forme et

m est proportionnel au rapport dimensionnel R (voir 5.3).

Sur papier Weibull, on obtient une droite de pente γ .

Si deux éléments de dimensions différentes sont soumis respectivement à deux contraintes E_1 et E_2 telles que leur probabilité de claquage P soit la même, on obtient alors:

$$1 - P = \exp (- m_1 E_1^\gamma) = \exp (- m_2 E_2^\gamma) = \exp (- R m_1 E_2^\gamma) \quad (\text{A.4})$$

A partir de (A.4), on déduit facilement l'égalité (5') de 5.3.

A.3 La loi de Weibull généralisée pour les temps et les contraintes peut s'écrire de la manière suivante:

$$P(t, E) = 1 - \exp (- M t^\beta E^\gamma) \quad (\text{A.5})$$

Annex A (informative)

The Weibull distribution

A.1 *The two-parameter Weibull distribution of the times to breakdown is usually written as:*

$$P(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (\text{A.1})$$

where

$P(t)$ is the breakdown probability at time t ,

β is the shape parameter and

α is the time corresponding to $P = 1 - 1/e = 0,632$.

By taking logarithms twice one obtains:

$$\ln \ln \frac{1}{1-P} = \beta \ln \frac{t}{\alpha} \quad (\text{A.2})$$

which, in co-ordinates $(\ln \ln \frac{1}{1-P} \text{ versus } \ln t)$ represents a straight line of slope β .

The Weibull paper is a special plotting paper having the scales according to such a co-ordinate system.

A.2 *The Weibull distribution of the breakdown stresses can be written as:*

$$P(E) = 1 - \exp (- m E^\gamma) \quad (\text{A.3})$$

where

γ is the shape parameter and

m is proportional to the dimensional ratio, R (see 5.3).

On Weibull paper, a straight line of slope γ is obtained.

If two elements of different dimensions are stressed by two stresses, E_1 and E_2 , so that their breakdown probability is the same, P , then;

$$1 - P = \exp (- m_1 E_1^\gamma) = \exp (- m_2 E_2^\gamma) = \exp (- R m_1 E_2^\gamma) \quad (\text{A.4})$$

From (A.4), relationship (5') of 5.3 is easily derived.

A.3 *The generalized Weibull distribution for times and stresses can be written as:*

$$P(t, E) = 1 - \exp (- M t^\beta E^\gamma) \quad (\text{A.5})$$