

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

RECOMMANDATION DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC RECOMMENDATION

Publication 216-1

Deuxième édition — Second edition

1974

Guide pour la détermination des propriétés d'endurance thermique de matériaux isolants électriques

Première partie: Méthodes générales pour la détermination des propriétés d'endurance thermique,
des indices de température et des profils d'endurance thermique

Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials

Part 1: General procedures for the determination of thermal endurance properties,
temperature indices and thermal endurance profiles



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe

Genève, Suisse

Révision de la présente publication

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

Les renseignements relatifs à ce travail de révision, à l'établissement des éditions révisées et aux mises à jour peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et en consultant les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
Publié trimestriellement
- **Rapport d'activité de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement

Terminologie utilisée dans la présente publication

Seuls sont définis ici les termes spéciaux se rapportant à la présente publication.

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la Publication 50 de la CEI: Vocabulaire Electrotechnique International (V.E.I.), qui est établie sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini, l'index général étant publié séparément. Des détails complets sur le V.E.I. peuvent être obtenus sur demande.

Symboles graphiques et littéraux

Seuls les symboles graphiques et littéraux spéciaux sont inclus dans la présente publication.

Le recueil complet des symboles graphiques approuvés par la CEI fait l'objet de la Publication 117 de la CEI.

Les symboles littéraux et autres signes approuvés par la CEI font l'objet de la Publication 27 de la CEI.

Autres publications de la CEI établies par le même Comité d'Etudes

L'attention du lecteur est attirée sur la page 3 de la couverture, qui énumère les autres publications de la CEI préparées par le Comité d'Etudes qui a établi la présente publication.

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

- **IEC Bulletin**
Published quarterly
- **Report on IEC Activities**
Published yearly
- **Catalogue of IEC Publications**
Published yearly

Terminology used in this publication

Only special terms required for the purpose of this publication are defined herein.

For general terminology, readers are referred to IEC Publication 50: International Electrotechnical Vocabulary (I.E.V.), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field, the General Index being published as a separate booklet. Full details of the I.E.V. will be supplied on request.

Graphical and letter symbols

Only special graphical and letter symbols are included in this publication.

The complete series of graphical symbols approved by the IEC is given in IEC Publication 117.

Letter symbols and other signs approved by the IEC are contained in IEC Publication 27.

Other IEC publications prepared by the same Technical Committee

The attention of readers is drawn to the inside of the back cover, which lists other IEC publications issued by the Technical Committee which has prepared the present publication.

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

RECOMMANDATION DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC RECOMMENDATION

Publication 216-1

Deuxième édition — Second edition

1974

Guide pour la détermination des propriétés d'endurance thermique de matériaux isolants électriques

Première partie : Méthodes générales pour la détermination des propriétés d'endurance thermique,
des indices de température et des profils d'endurance thermique

Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials

Part 1: General procedures for the determination of thermal endurance properties,
temperature indices and thermal endurance profiles



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

1, rue de Varembe

Genève, Suisse

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
INTRODUCTION	6
Articles	
1. Domaine d'application	6
2. Objet	6
3. Considérations générales	8
4. Choix des méthodes d'essai et des éprouvettes	10
5. Choix des critères de dégradation	12
6. Préparation des éprouvettes	12
7. Nombre d'éprouvettes	12
8. Températures et durées d'exposition	14
9. Etuves de vieillissement	16
10. Conditions d'environnement	18
11. Analyse des résultats d'essais et détermination de l'indice de température ou du profil d'endurance thermique	18
12. Procès-verbal d'essai	22
FIGURES	27

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
INTRODUCTION	7
Clause	
1. Scope	7
2. Object	7
3. General considerations	9
4. Selection of test procedures and specimens	11
5. Selection of end points	13
6. Preparation of test specimens	13
7. Number of test specimens	13
8. Exposure temperatures and times	15
9. Ageing ovens	17
10. Environmental conditioning	19
11. Analysis of test data and determination of the temperature index or of the thermal endurance profile	19
12. Test report	23
FIGURES	27

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**GUIDE POUR LA DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS
D'ENDURANCE THERMIQUE DE MATÉRIAUX ISOLANTS ÉLECTRIQUES**

**Première partie : Méthodes générales pour la détermination des propriétés
d'endurance thermique, des indices de température et des profils d'endurance thermique**

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

La présente recommandation a été établie par le Sous-Comité 15B: Essais d'endurance, du Comité d'Etudes N° 15 de la CEI: Matériaux isolants.

La présente recommandation constitue la première partie de la deuxième édition de la Publication 216 de la CEI, qui sera publiée en trois parties.

Des projets de révision de cette première partie furent discutés lors des réunions tenues à Varsovie en septembre 1967, à Londres en septembre 1968, à Washington en mai 1970 et à Vienne en octobre 1971. A la suite de cette dernière réunion un projet, documents 15B(Bureau Central)25 et 25A, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en juillet 1972.

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

Allemagne	Norvège
Australie	Portugal
Belgique	Roumanie
Canada	Royaume-Uni
Danemark	Suède
Etats-Unis d'Amérique	Suisse
Finlande	Tchécoslovaquie
France	Turquie
Israël	Union des Républiques
Italie	Socialistes Soviétiques
Japon	Yougoslavie

Les Etats-Unis d'Amérique et le Royaume-Uni ont d'abord voté contre le projet, mais après que celui-ci ait subi un remaniement rédactionnel, se sont prononcés en faveur de la publication.

La présente édition de la Publication 216 de la CEI annule et remplace les sections de la Publication 85 de la CEI qui concernent les matériaux isolants.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**GUIDE FOR THE DETERMINATION OF THERMAL ENDURANCE PROPERTIES
OF ELECTRICAL INSULATING MATERIALS**

**Part 1: General procedures for the determination of thermal endurance properties,
temperature indices and thermal endurance profiles**

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This recommendation has been prepared by Sub-Committee 15B, Endurance Tests, of IEC Technical Committee No. 15, Insulating Materials.

This recommendation constitutes Part 1 of the second edition of IEC Publication 216, which will be published in three parts.

Drafts for the revision of this first part were discussed at the meetings held in Warsaw in September 1967, in London in September 1968, in Washington in May 1970 and in Vienna in October 1971. As a result of this latter meeting, a draft, documents 15B(Central Office)25 and 25A, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in July 1972.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	Norway
Belgium	Portugal
Canada	Romania
Czechoslovakia	Sweden
Denmark	Switzerland
Finland	Turkey
France	Union of Soviet
Germany	Socialist Republics
Israel	United Kingdom
Italy	United States of America
Japan	Yugoslavia

The United States of America and the United Kingdom at first voted against the draft, but after the latter had been amended editorially, they then voted in favour of publication.

This edition of IEC Publication 216 cancels and supersedes the sections of IEC Publication 85 dealing with insulating materials.

GUIDE POUR LA DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS D'ENDURANCE THERMIQUE DE MATÉRIAUX ISOLANTS ÉLECTRIQUES

Première partie : Méthodes générales pour la détermination des propriétés d'endurance thermique, des indices de température et des profils d'endurance thermique

INTRODUCTION

La révision de la première édition de la Publication 216 de la CEI: Guide pour la préparation des méthodes d'essai pour l'évaluation de la stabilité thermique des matériaux isolants électriques, comportera trois parties:

Première partie: Méthodes générales pour la détermination des propriétés d'endurance thermique, des indices de température et des profils d'endurance thermique.

Deuxième partie: Liste des matériaux et des essais existants.

Troisième partie: Exemples et applications des méthodes statistiques à la détermination de l'endurance thermique. (A l'étude.)

1. Domaine d'application

La présente recommandation définit les principes nécessaires à la mise au point de méthodes d'essai ayant pour objet l'évaluation de l'endurance thermique des matériaux isolants électriques et des combinaisons simples de ces matériaux.

Les résultats des essais accélérés d'endurance thermique, effectués suivant les méthodes prescrites, peuvent être utilisés pour déterminer des profils d'endurance thermique et des indices de température des matériaux isolants.

2. Objet

Les méthodes d'essai d'endurance thermique sont destinées à déterminer les changements survenus dans les propriétés des matériaux par suite d'une longue exposition à une température élevée.

Pour se comporter de façon satisfaisante, les matériaux isolants doivent présenter un ensemble convenable de propriétés mécaniques, chimiques et électriques et conserver celles-ci à un niveau suffisant pendant toute la durée de service du matériel.

Les propriétés mécaniques, chimiques et électriques des matériaux à l'état neuf devront être évaluées séparément suivant des modes opératoires qui ne font pas l'objet des méthodes d'essai d'endurance thermique. Les propriétés ainsi déterminées peuvent indiquer que l'une ou plusieurs ou des combinaisons d'entre elles seront, dans la pratique, le facteur de limitation plutôt que l'endurance thermique.

Le processus de vieillissement thermique des matériaux isolants est complexe et les mécanismes varient avec les différents matériaux et suivant les différentes conditions de service.

Les mécanismes caractéristiques comprennent:

- a) La perte des constituants volatils tels que des composants de faible poids moléculaire présents à l'origine ou formés durant le processus de vieillissement.
- b) L'oxydation qui cause une réticulation moléculaire du matériau et le rend fragile.
- c) La poursuite de la polymérisation moléculaire qui peut d'abord accroître les caractéristiques électriques et physiques, mais qui, par la suite, peut provoquer une diminution de la flexibilité, une fragilité et enfin une détérioration sous l'effet de contraintes mécaniques.

GUIDE FOR THE DETERMINATION OF THERMAL ENDURANCE PROPERTIES OF ELECTRICAL INSULATING MATERIALS

Part 1 : General procedures for the determination of thermal endurance properties, temperature indices and thermal endurance profiles

INTRODUCTION

The revision of the first edition of IEC Publication 216, Guide for the Preparation of Test Procedures for Evaluating the Thermal Endurance of Electrical Insulating Materials, is composed of three parts:

Part 1: General procedures for the determination of thermal endurance properties, temperature indices and thermal endurance profiles.

Part 2: List of materials and available tests.

Part 3: Examples and application of statistical methods to the determination of thermal endurance. (Under consideration.)

1. Scope

This recommendation gives principles for the development of test procedures to evaluate the thermal endurance of electrical insulating materials and simple combinations of such materials.

The results of accelerated thermal endurance tests, which are conducted according to prescribed procedures, may be used to establish thermal endurance profiles and temperature indices for insulating materials.

2. Object

Thermal endurance test procedures are intended to determine the changes in properties of materials caused by long-term exposure to elevated temperature.

To perform satisfactorily, insulating materials must have the required combination of mechanical, chemical and electrical properties and retain these at an adequate level throughout the service life of the equipment.

The mechanical, chemical and electrical properties of the materials when new should be evaluated separately by test methods not within the scope of thermal endurance test procedures. The properties so determined may indicate that one or more, or combinations of these, will be the limiting factor in practice rather than thermal endurance.

The process of thermal ageing in insulating materials is complex and the mechanisms vary with different materials and under different service conditions.

Typical mechanisms include:

- a) Loss of volatile constituents such as low molecular weight components initially present or formed in the ageing process.
- b) Oxidation which causes molecular cross-linking and embrittlement.
- c) Continuing molecular polymerization which may increase physical and electric strength at first, but may subsequently lead to decreased flexibility, embrittlement and failure under mechanical stress.

d) La dégradation par hydrolyse dans laquelle l'humidité emmagasinée réagit avec l'isolation sous l'influence de la chaleur.

e) La décomposition chimique des constituants avec formation de produits dangereux tels que l'acide chlorhydrique. Dès qu'ils ont commencé, ces processus peuvent être autocatalytiques.

Les progrès rapides dans la chimie des polymères ont eu pour conséquence l'apparition de nombreux matériaux isolants complexes, dont l'endurance thermique ne peut être prédéterminée de façon certaine à partir de leur famille chimique et qui souvent diffèrent l'un de l'autre de manière significative; c'est ainsi que des changements dans la nature physique du polymère et/ou dans le type et la quantité de divers additifs peuvent exercer une grande influence sur la stabilité du matériau.

Dans l'état actuel des connaissances, l'évaluation de l'endurance thermique des matériaux isolants et de leurs combinaisons simples s'effectue grâce à des essais accélérés pratiqués à des températures supérieures à la température de service prévue. L'expérience montre que les résultats d'essais d'endurance thermique peuvent être caractérisés par une loi du type Arrhenius, c'est-à-dire une relation linéaire entre le logarithme du temps correspondant à un certain degré de variation de propriété et l'inverse de la température thermodynamique. Cette loi est souvent utilisée pour évaluer, par extrapolation, les durées aux plus basses températures. L'exécution d'essais d'endurance thermique à plusieurs températures satisfait un double but; d'abord la précision de l'extrapolation est améliorée et, en second lieu, il est procédé à la vérification de l'hypothèse de l'existence d'une relation linéaire entre le logarithme du temps et l'inverse de la température thermodynamique, ce qui n'est pas le cas si le mécanisme de détérioration se trouve modifié dans la gamme des températures d'essai. Une extrapolation des résultats n'est pas justifiée dans le cas d'une vérification négative.

Les renseignements les plus complets concernant le résultat d'un essai accéléré de vieillissement thermique sont donnés sous la forme d'une courbe de vieillissement. Afin de permettre une comparaison très rapide des matériaux et l'introduction de leurs propriétés dans des tableaux, il a été défini un *profil d'endurance thermique* (voir l'article 11) pour décrire, sous une forme abrégée, une courbe de vieillissement. Le profil indique, sous la forme de quelques nombres, la stabilité relative d'un matériau déterminée par le changement d'une propriété particulière quand le matériau est soumis à un échauffement prolongé. *L'indice de température* (voir l'article 11) est une formule encore plus abrégée, utilisable aux fins d'une spécification.

Les profils et indices, tout en donnant des indications sur les matériaux, ne peuvent pas, à eux seuls, être utilisés pour prévoir la relation entre la température et la durée de vie d'un système d'isolation en service.

Toutes les propriétés d'un matériau soumis au vieillissement thermique ne se détériorent pas à la même vitesse et, en conséquence, des profils d'endurance thermique et des indices de température sont nécessaires pour un certain nombre de propriétés ayant trait à des modes possibles de défaillance du matériau en service.

Les matériaux sont habituellement placés librement dans une étuve pendant le vieillissement. D'autres dispositions peuvent être adoptées mais des résultats d'endurance thermique différents peuvent alors être obtenus.

Les essais d'endurance thermique fournissent un moyen de déterminer des changements irréversibles d'importantes propriétés de matériaux isolants en fonction de la température et du temps.

Diverses méthodes d'essai doivent être établies pour les différentes sortes de matériaux isolants tels que vernis d'imprégnation, isolants en feuille, etc. L'endurance thermique du matériau est déterminée en utilisant des critères de dégradation fondés sur l'aptitude du matériau à subir des contraintes telles que champ électrique, tension ou flexion mécanique, etc., ou est établie à partir des changements dans une propriété du matériau. Il peut être attribué à un matériau plus d'un profil d'endurance thermique ou plus d'un indice de température résultant de la mesure de différentes propriétés ou de différents essais.

3. Considérations générales

Les méthodes d'essai considérées dans ce guide concernent les matériaux isolants, y compris les compositions fabriquées à partir de matériaux de base, et leurs combinaisons simples, avant qu'ils n'aient été mis en œuvre pour réaliser des bobinages ou d'autres structures isolantes identifiables comme pièces spécifiques de matériel électrique.

- d) Hydrolytic degradation in which retained moisture reacts with the insulation under the influence of heat.
- e) Chemical breakdown of constituents with formation of harmful products such as hydrochloric acid. Such processes once started may be autocatalytic.

Rapid advances in polymer chemistry have resulted in numerous complex insulating materials, the thermal endurance of which cannot be reliably predicted from their chemical family and which often differ significantly from one another, e.g. changes in the physical nature of the polymer and/or in the type and quantity of various additives can exert an important influence on the stability of the material.

It is the present state of the art to assess the thermal endurance of insulating materials and simple combinations through accelerated tests at higher temperatures than the intended service temperature. It is a common experience that the results of thermal endurance tests can be described by an Arrhenius type of model law, i.e. a linear relationship between the logarithm of time to a certain degree of property change and the inverse thermodynamic temperature. This law is often used for estimating the times at lower temperatures by extrapolation. Performing thermal endurance tests at several temperatures serves a double purpose; first, the accuracy of the extrapolation is improved and, second, a check is provided that the basic assumption of a linear relationship between the logarithm of time and the reciprocal thermodynamic temperature is satisfied, which is not the case if the deterioration mechanism is subject to change in the range of test temperatures. An extrapolation of the results is not justified if this check is negative.

The most complete information about the result of an accelerated thermal ageing test is an ageing curve. To enable materials to be compared expeditiously and the properties tabulated, a *thermal endurance profile* (see Clause 11) is introduced as a "short hand form" of an ageing curve, indicating in a few numbers the relative stability of a material, as determined by the change in a particular property when it is subjected to prolonged heating. An even shorter form, suitable for specification purposes, is the *temperature index* (see Clause 11).

Profiles and indices, while giving guidance on materials, should not by themselves be taken to predict the relationship between temperature and life of an insulation system in service.

All the properties of a material subjected to heat ageing do not deteriorate at the same rate and, consequently, thermal endurance profiles and temperature indices are required for a number of properties related to possible modes of failure of the material in service.

Materials are normally freely exposed in an oven during ageing. Other arrangements may be used, but different thermal endurance results may then be obtained.

Thermal endurance tests provide a means for determining irreversible changes of important properties of insulating materials as a function of temperature and time.

Different test procedures are to be developed for different kinds of insulating materials such as impregnating varnishes, sheet insulation, etc. The thermal endurance of the material is determined by end-point criteria based on the material's ability to withstand a stress such as electric field, mechanical tension or flexure, etc., or is based on changes in a property of the material. A material may be assigned more than one thermal endurance profile or more than one temperature index derived from the measurement of different properties or from different tests.

3. General considerations

The test procedures covered by this guide apply to insulating materials including processed compositions of raw materials and simple combinations thereof before they are fabricated into coils or other insulating structures identified with specific parts of electric equipment.

La distinction entre de tels essais de matériaux et des essais destinés à évaluer le comportement de systèmes d'isolation est nécessaire, car les détails d'une utilisation particulière d'un matériau ne peuvent être connus de son fabricant.

Les méthodes d'essai faisant l'objet de la présente recommandation fournissent des résultats sur les caractéristiques à long terme des matériaux isolants; ces résultats fournissent à l'ingénieur de conception et à l'ingénieur de développement les informations pour sélectionner les matériaux qui seront ultérieurement évalués au cours d'essais de systèmes d'isolation et de matériels.

Les résultats d'essais effectués sur des matériaux connus et couramment utilisés peuvent être rassemblés pour servir de référence valable afin de comparer nouveaux et anciens matériaux.

De plus, des éprouvettes témoins de matériaux bien connus peuvent être incluses avantageusement dans chaque ensemble d'éprouvettes de façon à s'assurer de la validité de l'ensemble des conditions de vieillissement.

Le mode opératoire recommandé pour l'évaluation thermique d'un matériau isolant comprend:

- a) La sélection d'éprouvettes appropriées aux essais prévus.
- b) Le vieillissement de groupes d'éprouvettes à un minimum de trois températures élevées et fixes, soit de façon continue, soit pour un nombre de périodes entre lesquelles les éprouvettes sont remises à la température ambiante.
- c) La soumission d'éprouvettes à des essais tels que contrainte électrique, flexion mécanique ou autre mesure relative à une propriété importante.
- d) La poursuite de l'exposition continue ou cyclique à la chaleur jusqu'à l'apparition d'un défaut ou jusqu'à ce qu'un degré donné de changement de la propriété mesurée soit révélé.
- e) L'expression des résultats d'essais sous forme de courbes donnant le temps jusqu'à détérioration en fonction de la température.
- f) La détermination du profil d'endurance thermique ou de l'indice de température.

4. Choix des méthodes d'essai et des éprouvettes

Chaque méthode d'essai doit décrire le mode opératoire à utiliser pour la détermination de la propriété sur laquelle les résultats d'essais de vieillissement doivent être fondés et définir la forme et le nombre d'éprouvettes qui doivent subir les essais.

L'essai choisi doit se rapporter à une propriété présumée importante dans la pratique et doit, dans la mesure du possible, être fondé sur une méthode internationale d'essai bien établie. Ce n'est que lorsqu'il n'existe pas de méthode appropriée qu'une méthode nationale ou une méthode créée spécialement peut être utilisée.

Les éprouvettes doivent être choisies pour simuler une utilisation pratique dans la mesure du possible mais, comme les matériaux isolants sont utilisés pour différentes applications et sont soumis à un ensemble de contraintes et d'environnements, ce choix peut ne pas être possible dans tous les cas. Souvent, une éprouvette identique à celle utilisée pour des essais de routine peut être préférée.

Lorsque cela est réalisable, l'essai doit simuler, de façon aussi précise que possible, la fonction du matériau en service réel. La propriété mesurée au cours de l'essai doit être liée aux propriétés qui seront exigées dans l'utilisation réelle.

La méthode d'essai doit indiquer les modes opératoires suivant lesquels les éprouvettes doivent être essayées pour déterminer les durées de vie à chacune des températures. Le mode opératoire et le critère de dégradation doivent être choisis de façon réaliste afin de caractériser la détérioration du matériau isolant.

Un choix de méthodes d'essai proposées pour déterminer les propriétés d'endurance thermique de matériaux isolants électriques est donné dans la Publication 216-2 de la CEI.

Si la principale méthode de mesure est une épreuve dans laquelle une contrainte donnée est appliquée à l'issue d'expositions successives jusqu'à ce qu'un défaut apparaisse, il peut être également utile d'obtenir des résultats relatifs à d'autres propriétés afin de définir la vitesse de détérioration du matériau.

A distinction between such material tests and tests to evaluate the performance of insulation systems is necessary because the details of the particular use of a material cannot be known to its manufacturer.

The procedures covered by this recommendation produce data on the long-time characteristics of insulating materials which provide the designer and development engineer with information for the selection of materials for further evaluation in insulation systems and equipment tests.

The results of tests on familiar, widely used materials may be compiled for convenient reference so that comparisons between new and old materials can be made.

In addition, reference specimens of well-known materials may advantageously be included in each set of test specimens in order to ensure the validity of the overall ageing conditions.

The recommended procedure for the thermal evaluation of an insulating material consists in:

- a) Selecting suitable specimens appropriate for the intended tests.
- b) Subjecting groups of specimens to ageing at least at three fixed elevated temperatures, either continuously or for a number of periods between which the specimens are returned to room temperature.
- c) Subjecting specimens to a test such as electric stress, mechanical flexing or other measurement of a significant property.
- d) Continuing the steady heat exposure or the thermal cycling until failure of specimens or a specified degree of change in the measured property is revealed.
- e) Reporting the results of the tests in the form of time to failure versus temperature curves.
- f) Assigning the thermal endurance profile or temperature index

4. Selection of test procedures and specimens

Each test procedure should describe the method to be used in determining the property on which the ageing test results have to be based and state the form and number of specimens to be tested.

The test chosen should relate to a property which is likely to be of significance in practice and, when possible, use a well-established international method of test. Only when no such appropriate method exists should a national method or a specially devised method be used.

The test specimens should be chosen to simulate practical usage where possible but, since insulating materials are used in many different applications and are exposed to a complex of forces and environments, this may not always be possible. Often a test specimen as used for routine testing may be preferred.

When feasible, the test should simulate as closely as possible the function of the material in actual service. The property measured in the test should be related to property requirements in actual use.

The test procedure should specify the test methods to be applied to the specimens to obtain end points of ageing at each different temperature. The test method and the end point should be realistically selected to indicate deterioration of the insulating material.

A selection of proposed test methods for determining thermal endurance properties of electrical insulating materials is given in IEC Publication 216-2.

If the principal measuring method is a proof test, in which a specified stress is applied after successive exposures until failure occurs, it may also be helpful to obtain data on another property demonstrating the rate of deterioration of the material.

Lorsqu'on désire déterminer l'endurance thermique de matériaux vieilliss dans d'autres atmosphères que l'air (telles que l'azote ou d'autres gaz ou liquides), la méthode d'essai doit indiquer les détails de ces essais particuliers.

5. Choix des critères de dégradation

Le critère de dégradation doit être choisi afin de mettre en évidence un degré de détérioration du matériau isolant tel qu'il ne soit plus apte à supporter les contraintes rencontrées en service réel dans un système d'isolation. Le degré de détérioration, caractérisé par le critère de dégradation, doit être en rapport avec la valeur de sécurité admissible pour la propriété du matériau en pratique. Le critère de dégradation ne doit pas être choisi trop élevé afin de ne pas obtenir de trop courtes durées jusqu'à détérioration.

Chaque méthode d'essai doit fixer un critère de dégradation clairement défini. Il existe deux façons de définir le critère de dégradation, toutes deux étant également valables :

- a) Par le pourcentage d'augmentation ou de diminution de la valeur initialement mesurée pour la propriété. Cette méthode permettra la comparaison de matériaux mais a moins de rapport que b) avec la valeur de la propriété requise en service normal *. La valeur initiale de la propriété est définie — à moins qu'il n'en soit spécifié autrement — comme la valeur moyenne relative à un minimum de 10 éprouvettes exposées pendant 48 h à la plus basse température de vieillissement.
- b) Par une valeur fixe de la propriété. Cette valeur peut être choisie en fonction des exigences normales en service.

Un choix de critères de dégradation est donné dans la Publication 215-2 de la C.E.I. Dans quelques cas, des critères de dégradation autres que ceux donnés peuvent mieux convenir pour un matériau ou une application déterminés.

6. Préparation des éprouvettes

Les méthodes d'essai doivent inclure des instructions pour la préparation des éprouvettes. Des dessins et des photographies doivent être incorporés si possible.

L'épaisseur des éprouvettes est spécifiée dans la liste des modes opératoires pour la détermination des propriétés d'endurance thermique et doit être spécifiée dans les nouvelles méthodes d'essai. L'épaisseur des éprouvettes est importante car la vitesse du vieillissement en dépendra. Les résultats du vieillissement de matériaux d'épaisseur différente ne sont pas toujours comparables.

Lorsque les dimensions des éprouvettes exigent des tolérances plus serrées que celles utilisées normalement pour des essais généraux, ces tolérances spéciales doivent être indiquées.

Des essais de sélection doivent être effectués de façon à s'assurer que les éprouvettes sont de qualité homogène et bien représentatives du matériau à essayer.

7. Nombre d'éprouvettes

La précision des résultats d'essai dépend en grande partie du nombre d'éprouvettes vieilles à chaque température. Pour atteindre un degré acceptable de précision lorsqu'il existe une grande dispersion entre les résultats des éprouvettes exposées à chaque température, il peut être nécessaire d'augmenter le nombre des éprouvettes.

C'est l'expérience qui permettra de choisir le nombre adéquat d'éprouvettes.

* Un critère de dégradation fondé sur un pourcentage arbitraire de la valeur initiale de la propriété mesurée peut injustement pénaliser des matériaux de hautes valeurs initiales lorsqu'ils sont comparés à des matériaux présentant de plus faibles valeurs initiales

When it is desired to determine the thermal endurance of materials aged in atmospheres other than air (such as nitrogen or other gas or liquid), the test procedure must give details of such special tests.

5. Selection of end points

The end point should be selected to indicate a degree of deterioration of the insulating material which has reduced its ability to withstand a stress encountered in actual service in an insulation system. The degree of degradation indicated at the end point of the test should be related to the allowable safe value desired for the material property in practice. The end point should not be set so high that unreasonable short time to failure values are obtained.

Each test procedure must fix a clearly defined end point. There are two ways in which the end point may be defined, both of which are equally acceptable:

a) As a percentage increase or decrease in the measured value from the original value. This method will provide comparisons among materials but bears less relationship than b) to the property value required in normal service.* The original value of the property is defined—unless otherwise specified—as the average value of at least 10 specimens exposed to the lowest ageing temperature for 48 h.

b) As a fixed value of the property. This value might be selected with respect to usual service requirements.

A selection of end-point criteria is given in IEC Publication 216-2. In some cases, other end-point criteria than those given may be better suited for a specific material or a specific purpose.

6. Preparation of test specimens

Test procedures should contain instructions for preparing test specimens. Drawings and photographs should be included when applicable.

The thickness of specimens is specified in the list of test methods for the determination of thermal endurance properties and should be specified in new test procedures. The thickness is important because the rate of ageing will vary with thickness. Ageing data of materials with different thickness are not always comparable.

Where specimen dimensions need smaller tolerances than are normally used for general testing, these special tolerances should be given.

Screening tests should be used to ensure that specimens are of uniform quality and typical of the material to be tested.

7. Number of test specimens

The accuracy of the test results depends largely on the number of test specimens aged at each temperature. A greater number of test specimens is required to achieve an acceptable degree of accuracy if there is a wide spread in the results among specimens at each exposure temperature.

Experience with the test will help in selecting an adequate number of specimens.

* A test value based on an arbitrary percentage of the initial value of the measured property may unfairly penalize materials with high initial values when compared with materials with lower initial values.

8. Températures et durées d'exposition

Les éprouvettes doivent être soumises à un minimum de trois températures réparties sur une gamme suffisamment étendue pour permettre l'établissement de la relation entre la température et la durée jusqu'à détérioration et pour déterminer le profil d'endurance thermique ou l'indice de température.

Afin de réduire l'erreur lors de l'extrapolation des résultats d'endurance thermique en vue de la détermination du profil d'endurance thermique ou de l'indice de température, la gamme totale des températures d'essai doit être soigneusement choisie. La plus faible température d'exposition doit être telle qu'elle conduise à une durée moyenne de vie mesurée de plus de 5 000 h. Une température d'exposition qui conduit à des valeurs inférieures à 100 h est généralement considérée comme trop élevée. Il est recommandé de maintenir une différence de 20 deg C entre les températures d'exposition. Si cela conduit à ce que les températures d'exposition les plus élevées correspondent à des durées trop courtes pour être acceptables ou dépassent le point de fusion ou le point de ramollissement du matériau, la différence entre les températures d'exposition peut être ramenée à 10 deg C, mais il faudra alors une régulation plus précise des températures de l'étuve. L'extrapolation nécessaire pour établir le profil d'endurance thermique ou l'indice de température ne doit pas dépasser un intervalle de 25 deg C.

L'essai de matériaux isolants peut être destructif ou non destructif et est habituellement effectué à la température ambiante. Pour des essais destructifs, le vieillissement thermique doit être réalisé en utilisant un lot important d'éprouvettes dont on prélève successivement des groupes pour les soumettre aux essais. Des lots plus petits peuvent être utilisés lorsque les essais effectués sont non destructifs ou sont des essais d'épreuve et toutes les éprouvettes sont alors retirées de l'étuve pour être essayées à la température ambiante. La réalisation de cycles thermiques provoqués par introduction ou retrait d'éprouvettes de l'étuve chaude introduit des contraintes mécaniques d'origine thermique dans la procédure de vieillissement. Lorsqu'on utilise la méthode des cycles thermiques, le nombre de cycles d'essai peut avoir une influence sur les résultats d'essai.

Le choix des températures d'exposition implique la prédiction ou la connaissance préalable de la gamme de température dans laquelle le profil d'endurance thermique ou l'indice de température du matériau en essai est situé. En l'absence de connaissance préalable du matériau, des essais préliminaires fourniront une aide dans le choix des températures d'exposition les mieux adaptées pour l'évaluation de la tenue des matériaux.

Dans quelques cas, des températures d'exposition conduisant à des durées jusqu'à détérioration notablement supérieures à 5 000 h, seront nécessaires.

a) Vieillissement par cycles

Lorsque la méthode des cycles de température est utilisée, il est préférable de prévoir des durées de cycles telles qu'on obtienne approximativement, à chaque température, le même nombre de cycles avant défaut. Il est suggéré de choisir la durée d'exposition à chaque température de telle sorte que les éprouvettes soient soumises à approximativement 10 cycles de chauffage et de refroidissement. Cela permet de s'assurer que les éprouvettes sont soumises pratiquement aux mêmes manutentions, essais et cyclages thermiques à chaque température d'exposition.

Des combinaisons appropriées de durées et de températures d'exposition sont données dans le tableau I. Des essais préliminaires ou une connaissance préalable du matériau à essayer permettent d'estimer, moyennant une extrapolation, à quelle température correspondra une durée jusqu'à dégradation de 20 000 h et de choisir la colonne appropriée du tableau I. Dans cette colonne sont données des températures d'exposition auxquelles correspondent, dans la dernière colonne du tableau et sur la même ligne horizontale, les temps d'exposition par cycles, exprimés en jours.

Par exemple, si pour un matériau donné il est estimé par avance (peut-être en se basant sur la connaissance antérieure de matériaux similaires) qu'une température de 145 °C conduira à une dégradation en 20 000 h, les températures d'exposition, de 160 °C, 180 °C et 200 °C par exemple, peuvent être prises dans la cinquième colonne du tableau I et les durées de cycles correspondantes suggérées de 28, 7 et 2 jours sont lues dans la dernière colonne du tableau.

Les températures et durées suggérées peuvent être modifiées de façon à utiliser au mieux les disponibilités d'étuves.

b) Vieillissement continu

Lorsqu'on choisit le vieillissement continu, les températures d'exposition peuvent être tirées du tableau I de manière identique à celle indiquée ci-dessus. Seules les éprouvettes à soumettre aux essais sont retirées de l'étuve

8. Exposure temperatures and times

Test specimens should be exposed at not less than three temperatures covering a sufficient range to establish a relationship between temperature and time to failure and to determine the thermal endurance profile or the temperature index.

To reduce the error in extrapolating thermal endurance data to obtain the thermal endurance profile or the temperature index, the overall temperature range of test should be carefully selected. The lowest exposure temperature should be one which will result in an average measured life of more than 5 000 h. An exposure temperature which results in values of less than 100 h is generally considered too high. It is recommended that exposure temperatures differ by 20 deg C. If this results in the higher exposure temperatures giving unacceptably short times to failure, or exceeding the melting or softening point of the material, then the difference may be reduced to 10 deg C, but closer control of oven temperatures will then be necessary. The extrapolation necessary to establish the thermal endurance profile or the temperature index should not be more than 25 deg C.

The testing of the insulating materials may be destructive or non-destructive and is usually carried out at room temperature. For destructive tests, the thermal ageing should be conducted with a large batch of specimens from which groups are successively removed for test. Smaller batches can be used when non-destructive or proof tests are used and then all specimens are removed from the oven for testing at room temperature. The thermal cycling caused by inserting and removing specimens from the hot oven introduces thermal mechanical stressing in the ageing process. When thermal cycling is applied, the number of test cycles may influence the test results.

Selection of the exposure temperatures involves predicting or knowing beforehand the approximate temperature range in which the thermal endurance profile or the temperature index of the material to be tested is located. With no previous knowledge of the material, exploratory tests will assist in selecting the exposure temperatures best suited for the evaluation of the materials.

In some cases, exposure temperatures giving times to failure much longer than 5 000 h will be necessary.

a) Cyclic ageing

When thermal cycling is used, it is preferable to plan the exposure cycles so as to give approximately the same number of cycles before failure at each temperature. It is suggested that the exposure time at each temperature be selected so as to subject the specimens to approximately 10 heating and cooling cycles. This ensures that the test specimens are subjected to nearly equal handling, testing and thermal cycling at each exposure temperature.

Suitable combinations of exposure times and temperatures are given in Table I. Preliminary tests or estimates of the material to be tested enable the temperature corresponding to an extrapolated time to failure of 20 000 h to be assumed and the appropriate column in Table I selected. This column gives a set of exposure temperatures with the corresponding exposure times in days per cycle in the last column of the table on the same horizontal line.

For example, if, for a specific material, it is estimated beforehand (possibly on the basis of earlier experience with similar materials) that a temperature of 145 °C will lead to failure in 20 000 h, exposure temperatures of e.g. 160 °C, 180 °C and 200 °C may be chosen from the fifth column of Table I and the corresponding suggested cycle durations of 28, 7 and 2 days are read from the last column of the table.

The suggested temperatures and times may be adjusted to make the best use of available oven facilities.

b) Continuous ageing

When continuous ageing is chosen, the exposure temperatures may be taken from Table I in the same manner as described above. Only the specimens to be tested at each time are taken out of the oven and allowed to cool to

et laissées à refroidir à la température d'essai, habituellement la température ambiante. Les éprouvettes sont normalement rejetées après avoir été soumises aux essais — sauf en cas d'essais non destructifs — si bien qu'il n'y a ni manipulation ni cyclage des éprouvettes durant le vieillissement. En conséquence, la durée et le nombre des intervalles de temps entre les essais sont sans importance et la suite des durées d'exposition peut être choisie de façon à tirer, de manière économique, le maximum de renseignements des essais.

Dans de nombreux cas, une progression linéaire des durées d'exposition, avec des intervalles conformes à ceux du tableau I, sera satisfaisante en omettant éventuellement les premières durées, et si le but de l'essai est de démontrer que le temps pour parvenir à une détérioration est plus long qu'un temps prescrit, un essai correspondant à ce temps seulement sera effectué.

Dans quelques cas, une série géométrique des durées d'exposition sera préférée. L'exemple d'une série qui peut être utilisée est donné dans le tableau III de la Publication 212 de la C.E.I.: Conditions normales à observer avant et pendant les essais de matériaux isolants électriques solides. En réalité, cette série ne suit pas exactement une loi géométrique car elle prend en considération la division du temps en temps de travail et temps de repos.

Lorsqu'un matériau inconnu est essayé, il est souvent avantageux de débiter en introduisant dans l'étuve de vieillissement la moitié des éprouvettes préparées et en effectuant les mesures après la deuxième ou la troisième durée de la série recommandée. Après quelques intervalles de temps, les éprouvettes restantes peuvent être placées dans l'étuve et les points jugés nécessaires pour l'établissement de la courbe de vieillissement sont alors déterminés. De cette manière, les erreurs dans le choix du premier intervalle de temps peuvent être évitées et le nombre d'éprouvettes peut être réduit.

Les temps ou les températures peuvent être ajustés de façon à utiliser au mieux les disponibilités d'étuves.

9. Etuves de vieillissement

La confiance à accorder aux résultats d'essai dépendra de la précision avec laquelle la température d'exposition de l'éprouvette est connue et maintenue à la valeur prévue puisque des changements de température même minimes peuvent influencer considérablement la durée de vie.

Deux sortes de variations de température doivent être considérées: les variations en fonction du temps (dérive périodique ou à long terme) et les variations de la moyenne dans le temps en fonction des différents emplacements dans l'étuve.

Il est essentiel que les éprouvettes soient vieilles dans une étuve dans laquelle la température moyenne des éprouvettes est maintenue à $\pm 2^\circ\text{C}$ (températures inférieures ou égales à 180°C) ou $\pm 3^\circ\text{C}$ (températures supérieures à 180°C) de la valeur prévue, conformément à la Publication 212 de la C.E.I. A aucun moment, aucune température ne devra différer de plus de $\pm 5^\circ\text{C}$ de la valeur moyenne, quel que soit le nombre d'éprouvettes placées dans l'étuve. Il est également préférable que le renouvellement d'air frais dans l'étuve soit contrôlé car il y a des raisons de penser que la dégradation thermique peut être influencée par le taux de ce renouvellement d'air. Il doit y avoir approximativement un renouvellement complet d'air frais par heure pour chaque mètre carré de surface d'éprouvette.

Puisque la température d'une étuve peut ne pas être uniforme dans tout son volume intérieur, des mesures de température devront être faites dans l'étuve en divers points situés au contact des éprouvettes. La température dans les étuves de vieillissement, au voisinage immédiat des éprouvettes en équilibre thermique, peut être considérée comme la température des éprouvettes. Afin de minimiser les effets des variations de température dans l'étuve, les éprouvettes peuvent être périodiquement permutées.

Il peut être utile de noter l'emplacement de chaque éprouvette dans l'étuve (si les éprouvettes sont permutées d'un cycle à l'autre, les emplacements des échantillons doivent être notés). Cette technique donne une possibilité d'améliorer l'interprétation des résultats d'essai même si la répartition de la température dans l'étuve doit être réexaminée ou améliorée pendant l'essai.

Les éprouvettes peuvent aussi être placées dans les étuves en étant enfermées dans des ampoules scellées contenant de l'air, du liquide ou un autre agent environnant. La méthode d'essai devra définir ces conditions de vieillissement puisque l'environnement a une influence considérable sur l'endurance thermique.

the test temperature, usually room temperature. The specimens are normally discarded after the test—except in case of non-destructive tests—so that there is no handling or cycling of the specimens during the ageing. Consequently, the length and the number of the time intervals between testing are unimportant from this point of view and the sequence of exposure times may be chosen to get the maximum information from the tests with due regard to the economy of the tests.

In many cases, a linear progression of exposure times, with intervals in accordance with Table I, will be suitable, possibly with the leaving out of the first steps, and if the purpose of the test is to demonstrate that the time to failure is longer than a prescribed time, only this need be used.

In some cases, a geometric series of exposure times is preferred. An example of a useful series is given in Table III of IEC Publication 212, Standard Conditions for Use Prior to and During the Testing of Solid Electrical Insulating Materials. In fact, this series does not follow exactly a geometric law because it takes into account the division of time into work time and rest time.

When an unknown material is being tested, it is often convenient to start by loading the ageing oven with one-half of the prepared specimens and performing measurements after the second or third testing time of the recommended series. After a few intervals, the remaining specimens can be put into the oven and the points on the ageing curve deemed necessary determined. In this way, errors in selecting the first test interval can be avoided and the number of test specimens may be reduced.

Either the times or temperatures may be adjusted to make the best use of available oven facilities.

9. Ageing ovens

The reliability of the test results will depend on the accuracy with which the exposure temperature of the test specimen is known and maintained at the intended value, since even slight temperature changes may considerably influence life.

Two types of temperature variation must be considered: variation with time (cyclic or long-term drift) and variation of the time average at different locations in the oven.

It is essential that specimens be aged in an oven that will maintain the average temperature of the specimens within $\pm 2^\circ\text{C}$ (temperatures lower than or equal to 180°C) or $\pm 3^\circ\text{C}$ (temperatures higher than 180°C) of the desired value, according to IEC Publication 212. At no time shall the temperature deviate by more than $\pm 5^\circ\text{C}$ from the average regardless of the number of specimens in the oven. It is also preferable that the change of fresh air in the oven be controlled since there is reason to expect that the thermal degradation may be influenced by the fresh air change. There shall be approximately one complete change of fresh air per hour for each square metre of specimen surface.

Since oven temperature may not be uniform throughout the oven space, temperature measurements should be made at various locations within the oven in contact with the specimens. The temperature in ageing ovens, in the immediate vicinity of the specimens at thermal equilibrium, is allowed to be considered as the specimen temperature. To minimize the effects of temperature variations within ovens, the positions of the specimens may be periodically interchanged.

It may be useful to record the location of each test specimen in the oven (if specimens are permuted from cycle to cycle, the specimen locations for each cycle are reported). This gives a possibility of improving the interpretation of the test results even if the temperature distribution in the oven should be re-examined or improved during the test.

Test specimens may also be exposed in the ovens but enclosed in sealed capsules containing air, liquid or other environment. The test procedure should define these ageing conditions, since the environment has a major influence on the thermal endurance.

10. Conditions d'environnement

Les effets des conditions d'environnement telles que l'humidité, la contamination chimique ou les vibrations sont évalués de façon plus convenable dans les essais des systèmes d'isolation. C'est pourquoi des conditions d'environnement ne doivent être incluses dans les méthodes d'essai des matériaux isolants que dans des cas particuliers.

11. Analyse des résultats d'essais et détermination de l'indice de température ou du profil d'endurance thermique

Une analyse complète des résultats d'essais détaillés comprend les étapes suivantes:

- détermination du temps nécessaire à chaque température * pour atteindre le critère de dégradation (soit par une épreuve, soit par la mesure des variations d'une propriété en fonction du temps) (voir le paragraphe 11.1);
- détermination du graphique d'endurance thermique (voir le paragraphe 11.2);
- énoncé des résultats sous une forme concise: détermination de l'indice de température ou du profil d'endurance thermique (voir le paragraphe 11.3).

Définitions: L'indice de température est le nombre égal à la température, exprimée en degrés Celsius, qui correspond sur le graphique d'endurance thermique à un temps donné, normalement égal à 20 000 h **.

Le profil d'endurance thermique se compose de deux nombres égaux aux températures, exprimées en degrés Celsius, qui correspondent sur le graphique d'endurance thermique à 20 000 h et 5 000 h; ces deux nombres sont suivis d'un nombre correspondant à la limite inférieure unilatérale de confiance à 95 % sur la température au niveau de 5 000 h ***.

11.1 Détermination de la durée nécessaire à chaque température pour atteindre le critère de dégradation

a) *Pour les essais utilisant une épreuve comme critère de dégradation*, le temps jusqu'à dégradation d'une éprouvette donnée est pris égal au temps à l'issue duquel cette éprouvette ne subit pas l'épreuve avec succès, diminué de la moitié de la durée du cycle précédant la dégradation.

Dans le cas de la détermination d'un indice, le temps jusqu'à dégradation à chaque température, pour le groupe d'éprouvettes exposées à cette température est pris égal à la valeur médiane des temps jusqu'à dégradation des diverses éprouvettes. Si le nombre d'éprouvettes dans le groupe est égal à n , le temps jusqu'à dégradation de ce groupe est:

- le temps jusqu'à dégradation de l'éprouvette n° $(n + 1)/2$ si n est impair;
- la valeur moyenne des temps jusqu'à dégradation des éprouvettes n° $n/2$ et $(n + 1)/2$ si n est pair (voir la figure 1, page 27).

Cette méthode permet d'arrêter l'exposition à n'importe quelle température, lorsque environ la moitié des éprouvettes ont été détruites à cette température.

Dans le cas de la détermination du profil d'endurance thermique, on détermine le logarithme du temps jusqu'à dégradation de chaque éprouvette. La valeur moyenne des logarithmes des temps jusqu'à dégradation, à chaque température, est utilisée dans les calculs permettant la détermination du profil d'endurance thermique.

b) *Pour les essais utilisant des mesures de variations d'une propriété en fonction du temps*, un graphique des valeurs déterminées à la fin de chaque cycle d'exposition est tracé en fonction des durées d'exposition. La droite correspondant au critère de dégradation choisi, qui peut être défini soit comme un pourcentage de la valeur initiale, soit comme une valeur spécifiée fixe, est tracée sur ce graphique (figure 2, page 28).

Dans le cas de la détermination d'un indice, le point d'intersection de la courbe joignant les points expérimentaux avec la droite représentative du critère de dégradation est considéré comme le temps nécessaire pour atteindre la dégradation à chaque température d'exposition.

* La température d'exposition mesurée différera souvent légèrement de la valeur nominale adoptée; lorsque ce sera le cas, on devra utiliser la valeur moyenne mesurée.

** Les valeurs 5 000 h et 20 000 h ont été adoptées pour les raisons suivantes:

- la durée de 5 000 h représente une période de temps réel suffisamment courte pour être acceptable pour des essais de laboratoire;
- la durée de 20 000 h a été choisie au début du développement de la technique pour donner une valeur approximative de la température qui conduisait en général à une durée de vie satisfaisante en service dans de nombreux types de matériels.

10. Environmental conditioning

The effects of such environmental conditions as humidity, chemical contamination or vibration are more appropriately evaluated in insulation system tests. Therefore, environmental conditioning should be included in insulating material test procedures in special cases only.

11. Analysis of test data and determination of the temperature index or of the thermal endurance profile

Complete analysis of detailed test data comprises the following steps:

- determination of the time to reach the end-point criterion at each temperature * (either by proof test or by measurement of the variation of a property with time) (see Sub-clause 11.1);
- determination of the thermal endurance graph (see Sub-clause 11.2);
- expression of the results in a shortened form: determination of the temperature index or of the thermal endurance profile (see Sub-clause 11.3).

Definitions: The temperature index consists of the number corresponding to the temperature in degrees Celsius derived from the thermal endurance graph at a given time, normally 20 000 h. **

The thermal endurance profile consists of the two numbers corresponding to the temperatures in degrees Celsius derived from the thermal endurance graph at 20 000 h and 5 000 h, followed by a number corresponding to the lower 95 % unilateral confidence limit on the temperature at 5 000 h. **

11.1 Determination of the time to reach the end-point criterion at each temperature

a) *For tests using a proof test as the end point*, the time to failure of a given specimen is taken as the time at which that specimen failed to pass the proof test, minus half the duration of the period just prior to failure.

In the case of the determination of an index, the time to failure at each temperature for the group of specimens exposed at that temperature is taken as the median value of the times to failure of the individual specimens. If the number of specimens in the group is n , the time to failure of the group is:

- the time to failure of specimen number $(n + 1)/2$ if n is odd;
- the mean value of the times to failure of specimens number $n/2$ and $(n + 1)/2$ if n is even (see Figure 1, page 27).

This procedure makes it possible to stop the exposure at any one temperature, when about half the specimens have failed at that temperature.

In the case of determination of the thermal endurance profile, the logarithm of the time to failure of each specimen is determined and the mean value of the logarithms of the times to failure at each temperature is used in the calculations for deriving the thermal endurance profile.

b) *Where the test employs measurements of the variation of a property versus time*, a graph of the values determined at the end of each exposure period is plotted against time of exposure. The straight line corresponding to the selected end point, which may be either a percentage of the original value or a specified fixed value, is drawn on this graph (Figure 2, page 28).

In the case of determination of an index, the point where the curve drawn from the plotted points crosses the straight line indicating the end point is read as the measured time to failure at each exposure temperature.

* The measured exposure temperature will often differ slightly from the nominal value selected; when this occurs, the average measured value should be used.

** The values 5 000 h and 20 000 h have been adopted for the following reasons:

- 5 000 h represents an actual time period short enough to be acceptable for laboratory tests;
- 20 000 h was selected during early development of the technique to give an approximate indication of the temperature which normally allowed adequate life in service for many types of equipment.

Dans le cas de la détermination du profil d'endurance thermique, il est nécessaire d'avoir une estimation de la variance du temps de dégradation à chaque température de vieillissement de façon à définir les limites de confiance conformément au paragraphe 11.2. C'est pourquoi, la durée de vie à chaque température est déduite des résultats d'essais en suivant l'une des méthodes statistiques décrites au paragraphe 5, Mesures destructives, de la Publication 216-3 de la CEI (à l'étude).

11.2 Détermination du graphique d'endurance thermique

Pour la détermination de l'indice de température

Les temps nécessaires pour atteindre le critère de dégradation à chaque température sont portés sur un graphique ayant le logarithme du temps comme ordonnées et pour abscisses l'inverse des températures thermodynamiques.

Le graphique d'endurance thermique peut généralement être obtenu de façon satisfaisante par un traitement graphique des résultats. Mais comme l'ajustement d'une ligne droite aux points expérimentaux ne permet pas toujours une extrapolation précise, la méthode des moindres carrés devrait être utilisée dans tous les cas de doute ou de contestation.

La droite est extrapolée au moins jusqu'au nombre d'heures demandé par l'index, normalement 20 000 (figure 3a, page 29).

Pour la détermination du profil d'endurance thermique

Dans ce cas, les limites de confiance sont toujours nécessaires et l'évaluation graphique ne permet pas leur détermination.

C'est pourquoi la relation entre la durée de vieillissement et la température est calculée par la méthode de régression linéaire (voir la Publication 216-3 de la CEI, article 4, Mesures non destructives et essais d'épreuves). Les limites de confiance sur la moyenne des logarithmes des temps sont calculées (voir la Publication 216-3 de la CEI, paragraphe 4.7, Limites de confiance sur le temps) et l'on en déduit les limites de confiance sur la température (voir la Publication 216-3 de la CEI, paragraphe 3.3.4, Limites de confiance sur la température) *.

La droite de régression et les limites de confiance sont tracées sur le même système de coordonnées que ci-dessus (figure 4, page 30).

11.3 Détermination de l'indice de température et du profil d'endurance thermique

Indice de température (IT)

L'indice de température est déduit du graphique, au temps désiré, de préférence à 20 000 h et s'exprime comme suit:

$$IT/164 \text{ (voir figure 3a)}$$

Si un temps différent de 20 000 h est utilisé pour obtenir l'indice, le nombre de milliers d'heures ainsi utilisé doit précéder l'indice. Celui-ci s'écrira de la façon suivante:

$$IT \ 5 \text{ kh}/183$$

Une autre méthode consiste à essayer dans les mêmes étuves un matériau connu par l'expérience en service, à tracer sur la même feuille le graphique d'endurance thermique des deux matériaux, à trouver sur le graphique le point qui correspond à la température admissible en service pour le matériau connu et enfin à utiliser le temps correspondant pour déterminer l'indice de température du second matériau (voir figure 3b, page 29).

Lorsque l'indice de température est déterminé suivant cette méthode, il est appelé indice relatif de température et s'exprime par exemple de la façon suivante:

$$IRT/141$$

Des travaux supplémentaires sont en cours pour développer les détails de cette méthode.

* D'autres modes de calcul fondés sur une étude des médianes, sur l'utilisation de distributions tronquées de résultats ou sur des lois d'extrêmes valeurs sont actuellement à l'étude.

In the case of determination of the thermal endurance profile, estimates of the variance of the time to failure at each ageing temperature are necessary to obtain confidence limits according to Sub-clause 11.2. Therefore, the end point at each temperature is derived from the test data according to one of the statistical methods described in Clause 5, Destructive measurements, of IEC Publication 216-3 (under consideration).

11.2 *Determination of the thermal endurance graph*

For the determination of the temperature index

The times to reach the end point at each temperature are plotted on a graph with the logarithm of time as the ordinate and the reciprocal of the thermodynamic temperature as the abscissa.

The thermal endurance graph may generally be obtained satisfactorily by a graphical treatment of the results. But as fitting of a straight line to the plotted points does not always permit accurate extrapolation, the method of least squares should be used in all cases of doubt or dispute.

The straight line is extrapolated to at least the number of hours required by the index, normally 20 000 (Figure 3a, page 29).

For the determination of the thermal endurance profile

In this case, confidence limits are always necessary and graphical evaluation does not permit their determination.

Therefore, the relationship between ageing time and temperature is calculated by linear regression analysis (see Clause 4, Non-destructive measurements and proof tests, of IEC Publication 216-3). The confidence limits on the mean log time are calculated (see Sub-clause 4.7, Confidence limit on time, in IEC Publication 216-3) and the confidence limits on temperature are hence deduced (see Sub-clause 3.3.4, Confidence limit on temperature, in IEC Publication 216-3).*

The regression line and the confidence limits are plotted on the same co-ordinate system as previously described (Figure 4, page 30).

11.3 *Determination of the temperature index and of the thermal endurance profile*

Temperature index (TI)

The temperature index is deduced from the graph, at the desired time, preferentially at 20 000 h and is expressed as follows:

$$TI/164 \text{ (see Figure 3a)}$$

If any other time than 20 000 h is used for obtaining the index, the number of thousands of hours so used shall prefix the index. This will be expressed, for example:

$$TI \ 5 \text{ kh}/183$$

An alternative procedure is to test a material of recognized service experience in the same ovens, to plot the thermal endurance graph for both materials on the same sheet, to find the point on the graph for the known material which corresponds to its recognized service temperature and then to use this time for obtaining the temperature index of the second material (see Figure 3b, page 29).

When the temperature index is determined in this way, it is called the relative temperature index and expressed as, for example:

$$RTI/141$$

Further work is under way to develop the details of this procedure.

* Other ways of calculation based either on median analysis, truncated data or extreme values are now under consideration.

Profil d'endurance thermique (PET)

Avant d'effectuer le calcul du profil d'endurance thermique, l'incertitude statistique des résultats doit être appréciée au moyen d'un coefficient de variation CV. Conventionnellement, ce coefficient de variation est calculé sur les temps au point 5 000 h de la droite de régression :

$$CV = \frac{s_y}{\lg 5\,000\text{ h}} = \frac{s_y}{3,7}$$

où s_y^2 est la variance de la valeur du logarithme du temps déduite de la courbe de régression à la température correspondant à 5 000 h (voir la formule correspondante de la Publication 216-3, paragraphe 4.7, Limites de confiance sur le temps).

La détermination du PET n'est permise que lorsque le CV a une valeur inférieure à 1,5 %.

Le PET est exprimé par trois nombres, dans l'ordre suivant :

- la température correspondant à 20 000 h;
- la température correspondant à 5 000 h;
- la température correspondant à la limite de confiance unilatérale inférieure à 95 % sur la température correspondant à 5 000 h.

Ces trois nombres peuvent s'écrire par exemple :

PET 111/133 (129)

Si la valeur de CV est supérieure à 1,5 %, la détermination du profil d'endurance thermique n'est pas permise, mais seulement celle de l'indice de température.

Néanmoins, on peut essayer de réduire la valeur du CV en utilisant les résultats d'essais complémentaires effectués :

- soit à la même température avec un plus grand nombre d'éprouvettes,
- soit à une ou plusieurs températures d'essai supplémentaires plus basses.

12. Procès-verbal d'essai

Le procès-verbal d'essai comprendra dans tous les cas :

- la description du matériau essayé (y compris le matériau de référence si un IRT est déterminé);
- la propriété considérée;
- la méthode d'essai utilisée pour la détermination de la propriété (par exemple, par référence à une publication de la CEN);
- le critère de dégradation choisi;
- le graphique d'endurance thermique et, le cas échéant, les graphiques de variation de la propriété en fonction du temps.

Il comprendra également :

Pour l'indice de température

L'indice de température exprimé conformément aux indications du paragraphe 11.3.

Pour le profil d'endurance thermique

a) Cas d'une épreuve

- le nombre d'éprouvettes;
- le temps nécessaire pour obtenir la dégradation des éprouvettes détruites à chaque température de vieillissement;

Thermal endurance profile (TEP)

Before making the calculation of the thermal endurance profile, a check of the statistical uncertainty of the results is made by means of a coefficient of variation CV. Conventionally, this coefficient of variation is calculated on time at the 5 000 h point on the regression straight line:

$$CV = \frac{s_y}{\log 5\,000\text{ h}} = \frac{s_y}{3.7}$$

where s_y^2 is the variance of the value of logarithm of time determined from the regression curve at the temperature corresponding to 5 000 h (see corresponding formula in Sub-clause 4.7, Confidence limits on time, of IEC Publication 216-3).

Only when the CV is lower than 1.5% is derivation of the TEP allowed.

The TEP is reported as three numbers in the following sequence:

- the temperature corresponding to 20 000 h;
- the temperature corresponding to 5 000 h;
- the temperature corresponding to the lower unilateral 95% confidence limit on the temperature at 5 000 h.

These three numbers are written, for example:

TEP 111/133 (129)

If the CV is larger than 1.5% derivation of the thermal endurance profile is not allowed, but only that of the temperature index.

Nevertheless, it may be advisable to reduce the value of CV by using the results of additional tests performed:

- either at the same temperature with a greater number of test specimens,
- or at one or more supplementary lower test temperatures.

12. Test report

The test report will include in all cases:

- the description of the tested material (including the reference material if an RTI is derived);
- the property investigated;
- the test method used for the determination of the property (e.g., by reference to an IEC publication);
- the end point selected;
- the thermal endurance graph and, where applicable, the graphs of the variation of property versus time.

It will also include:

For the temperature index

The temperature index expressed in accordance with Sub-clause 11.3.

For the thermal endurance profile

a) Case of proof test

- the number of test specimens;
- the time to failure for those specimens which failed at each ageing temperature;

- l'équation de régression (par exemple, $\lg t = a + b/T$) et les coefficients de régression a et b ;
- le coefficient de variation (voir le paragraphe 11.3)

$$CV = \frac{s_y}{\lg 5\,000\text{ h}}$$

- le profil d'endurance thermique exprimé conformément aux indications du paragraphe 11.3.

b) Cas de variation d'une propriété

Pour chaque température de vieillissement:

- le nombre d'éprouvettes utilisées pour déterminer chaque point sur le graphique de variation de la propriété;
- les valeurs individuelles de la propriété P mesurée pendant l'essai, au moins aux temps auxquels les résultats seront utilisés dans la détermination des valeurs de durées jusqu'à détérioration;
- l'estimation des durées jusqu'à détérioration et de leurs variances et, en outre, tous les renseignements indiqués pour le cas *a*).

- the form of the regression equation (e.g. $\log t = a + b/T$) and the regression coefficients a and b ;
- the coefficient of variation (see Sub-clause 11.3)

$$CV = \frac{s_y}{\log 5\,000\,h}$$

- the thermal endurance profile expressed in accordance with Sub-clause 11.3.

b) Case of property variation

For each ageing temperature:

- the number of test specimens used to determine each point on the property variation graph;
- the individual values of the property P measured during the test, at least at those times where the results will be used to determine the estimated times to failure;
- the estimated times to failure and their variances, and then other information as in case a).

TABLEAU I — TABLE I
Températures d'exposition suggérées et durées de cycles
Suggested exposure temperatures and cycle durations

Température d'exposition °C	Gamme à laquelle est présumée appartenir la température correspondant à une durée jusqu'à dégradation extrapolée de 20 000 h Range to which the temperature corresponding to an extrapolated 20 000 h time to failure is assumed to belong														Durée par cycle (jours)
	°C														Time per cycle (days)
	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	
109	119	129	139	149	159	169	179	189	199	209	219	229	239		
170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	1	
160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	2	
150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	4	
140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	7	
130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	14	
120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	28	
110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	49	

Note. — Les températures d'exposition inférieures ou supérieures à celles données doivent être sélectionnées par expérimentation.
Exposure temperatures above and below those given are to be selected by experimentation.

Note. — Les températures d'exposition inférieures ou supérieures à celles données doivent être sélectionnées par expérimentation.
 Exposure temperatures above and below those given are to be selected by experimentation.