

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Publication 216-3

Deuxième édition — Second edition

1980

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

Troisième partie: Méthodes statistiques

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

Part 3: Statistical methods



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

Terminologie

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.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit repris du V.E.I., soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

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

- la Publication 27 de la CEI: Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique;
- la Publication 117 de la CEI: Symboles graphiques recommandés.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit repris des Publications 27 ou 117 de la CEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

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

L'attention du lecteur est attirée sur les pages 3 et 4 de la couverture, qui énumèrent 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**
- **Report on IEC Activities**
Published yearly
- **Catalogue of IEC Publications**
Published yearly

Terminology

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.

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

Graphical and letter symbols

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

- IEC Publication 27: Letter symbols to be used in electrical technology;
- IEC Publication 117: Recommended graphical symbols.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC Publications 27 or 117, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

Other IEC publications prepared by the same Technical Committee

The attention of readers is drawn to pages 3 and 4 of the cover, which list other IEC publications issued by the Technical Committee which has prepared the present publication.

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Publication 216-3

Deuxième édition — Second edition
1980

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

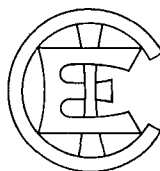
Troisième partie: Méthodes statistiques

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

Part 3: Statistical methods

Mots clés: matériaux isolants;
essais d'endurance thermique;
statistique mathématique.

Key words: insulating materials;
thermal endurance tests;
statistical mathematics.



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 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. Méthodes statistiques	10
4. Mesures non destructives et essais d'épreuve	12
5. Mesures destructives	22
ANNEXE A — Fractiles d'ordre 0,95 des lois de χ^2 , de t et de F	28
ANNEXE B — Organigramme de la méthode statistique	30
ANNEXE C — Liste des symboles	32
FIGURES	36

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
INTRODUCTION	7
Clause	
1. Scope	7
2. Object	7
3. Statistical procedures	11
4. Non-destructive measurements and proof tests	13
5. Destructive measurements	23
APPENDIX A — 0.95 fractiles of the χ^2 , t , and F distributions	29
APPENDIX B — Flow diagram of statistical procedure	31
APPENDIX C — List of symbols	33
FIGURES	36

WATERMARK: IEC NORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60216-3:1980

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

Troisième partie: Méthodes statistiques

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 norme a été établie par le Sous-Comité 15B: Essais d'endurance, du Comité d'Etudes N° 15 de la CEI: Matériaux isolants. Il constitue la troisième partie de la deuxième édition de la Publication 216 de la CEI, qui est publiée en plusieurs parties.

Des projets furent discutés lors des réunions tenues à Zurich en 1973 et à Toronto en 1976. A la suite de cette dernière réunion, un projet, document 15B(Bureau Central)36, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en mai 1977.

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

Afrique du Sud (République d')
Allemagne
Autriche
Belgique
Canada
Danemark
Egypte
Espagne
Finlande
France
Norvège

Portugal
Roumanie
Royaume-Uni
Suède
Suisse
Tchécoslovaquie
Turquie
Union des Républiques
Socialistes Soviétiques
Yougoslavie

Autres publications de la CEI citées dans la présente publication:

- Publications N°s 216-1: 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.
- 216-2: Liste des matériaux et des essais existants.
- 493-1: Guide pour l'analyse statistique de données d'essais de vieillissement, Première partie: Méthodes basées sur les valeurs moyennes de résultats d'essais normalement distribués.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

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

Part 3: Statistical methods

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 standard has been prepared by Sub-Committee 15B: Endurance Tests, of IEC Technical Committee No. 15: Insulating Materials. It constitutes Part 3 of the second edition of IEC Publication 216, which is published in several parts.

Drafts were discussed at the meetings held in Zurich in 1973 and in Toronto in 1976. As a result of this last meeting, a draft, Document 15B(Central Office)36, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in May 1977.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Austria	Romania
Belgium	South Africa (Republic of)
Canada	Spain
Czechoslovakia	Sweden
Denmark	Switzerland
Egypt	Turkey
Finland	Union of Soviet
France	Socialist Republics
Germany	United Kingdom
Norway	Yugoslavia
Portugal	

Other IEC publications quoted in this publication:

- Publications Nos. 216-1: 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.
- 216-2: Part 2: List of Materials and Available Tests.
- 493-1: Guide for the Statistical Analysis of Ageing Test Data, Part 1: Methods Based on Mean Values of Normally Distributed Test Results.

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

Troisième partie: Méthodes statistiques

INTRODUCTION

La deuxième édition de la Publication 216 de la CIE: Guide pour la préparation des propriétés d'endurance thermique de matériaux isolants électriques, comporte plusieurs 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: Méthodes statistiques.
- Quatrième partie: Instructions pour le calcul du profil d'endurance thermique.
- Cinquième partie: Instructions pour les essais d'endurance thermique et le calcul de l'indice de température (à l'étude).
- Sixième partie: Procédures de détermination des indices de température relatifs (à l'étude).

1. Domaine d'application

Cette troisième partie définit les méthodes statistiques pour la détermination du graphique d'endurance thermique et du profil d'endurance thermique des matériaux isolants électriques ainsi que de l'indice de température dans le cas prévu au paragraphe 11.2 de la Publication 216-1 de la CIE.

2. Objet

Les méthodes décrites dans cette troisième partie s'appliquent à la détermination des propriétés d'endurance thermique des matériaux isolants électriques suivant les Publications 216-1 et 216-2 de la CIE.

La signification des méthodes et du test statistiques, employés ci-après, est expliquée dans la Publication 493-1 de la CIE: Guide pour l'analyse statistique de données d'essais de vieillissement, Première partie: Méthodes basées sur les valeurs moyennes de résultats d'essais normalement distribués, auquel le lecteur doit se reporter pour les détails des méthodes et des formules plus complètes.

Le graphique d'endurance thermique d'un matériau isolant électrique est un graphique montrant la façon dont une propriété choisie du matériau dépend de la température, établi à partir d'essais spécifiés pendant ou après exposition à différentes températures.

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

Part 3: Statistical methods

INTRODUCTION

The second edition of IEC Publication 216, Guide for the Determination of Thermal Endurance Properties of Electrical Insulating Materials, is composed of several 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: Statistical Methods.
- Part 4: Instructions for Calculating the Thermal Endurance Profile.
- Part 5: Instructions for Making Thermal Endurance Tests and Obtaining the Temperature Index. (Under consideration.)
- Part 6: Procedures for the Determination of Relative Temperature Indices. (Under consideration.)

1. Scope

This Part 3 gives statistical methods for the determination of the thermal endurance graph and the thermal endurance profile of electrical insulating materials, as well as the temperature index in the case provided for in Sub-clause 11.2 of IEC Publication 216-1.

2. Object

The procedures described in this Part 3 apply to the determination of the thermal endurance properties of electrical insulating materials according to IEC Publications 216-1 and 216-2.

The significance of the methods and the statistical test used in the following is explained in IEC Publication 493-1, Guide for the Statistical Analysis of Ageing Test Data, Part 1: Methods Based on Mean Values of Normally Distributed Test Results, to which the reader is referred for particulars on the methods and more comprehensive formulae.

The thermal endurance graph of an electrical insulating material is a graph showing the dependence on temperature of a selected property of the material, based on specified tests during or after exposure to different temperatures.

L'indice de température, selon la définition de l'article 11 de la Publication 216-1 de la CEI, 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, selon la définition de l'article 11 de la Publication 216-1 de la CEI, 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 de confiance à 95% sur la température au niveau de 5 000 h.

La détermination de la limite de confiance nécessite le traitement statistique des résultats des essais d'endurance thermique. Les formules pour ce traitement statistique sont indiquées ci-après.

Les données expérimentales à traiter statistiquement pour obtenir les propriétés d'endurance thermique sont les temps jusqu'à dégradation, par exemple les temps nécessaires pour atteindre un critère de dégradation spécifié par suite du traitement de vieillissement thermique d'un certain nombre d'éprouvettes à différentes températures de vieillissement.

Le traitement statistique des données d'essais, indiqué ci-dessous, se fonde sur l'hypothèse de l'existence d'une relation linéaire entre le logarithme du temps jusqu'à dégradation et l'inverse de la température thermodynamique (absolue), ce qui est par exemple le cas quand la dégradation est due à une réaction chimique du premier ordre et suit en conséquence la loi d'Arrhenius. Etant donné que des modifications du mécanisme de vieillissement avec la température peuvent infirmer cette hypothèse en dehors de la gamme des températures d'exposition, même si on ne peut le détecter dans cette gamme, on doit choisir la plus basse température d'exposition de façon à obtenir un temps moyen jusqu'à dégradation d'au moins 5 000 h, et l'extrapolation nécessaire pour établir le profil d'endurance thermique ou l'indice de température ne doit pas être supérieure à 25 °C.

Lorsque les valeurs mesurées montrent manifestement qu'une telle relation linéaire n'existe pas, on ne doit pas faire d'extrapolation. Les courbes représentant la propriété essayée en fonction du temps aux différentes températures d'exposition peuvent donner, en pareil cas, de précieuses indications, mais on ne peut déduire un indice de température qu'après des essais à une température d'exposition donnant un temps moyen jusqu'à dégradation d'au moins 20 000 h.

Le nombre d'éprouvettes exposées à chaque température a une grande influence sur la précision des résultats d'essais. Si l'on peut prévoir la dispersion probable des résultats d'essais, il est possible de calculer le nombre d'éprouvettes nécessaires pour obtenir un degré acceptable de confiance dans les résultats; dans le cas contraire, on peut se guider sur les résultats d'essais préliminaires.

Si l'on se doute que des résultats d'essai extrêmes et isolés n'appartiennent pas à la population, on peut les éliminer en tant qu'aberrants par des méthodes statistiques, mais seulement après avoir examiné soigneusement les circonstances de l'essai, et leur valeur doit être notée dans le procès-verbal. En pareil cas, le nombre de résultats d'essai aux diverses températures d'exposition sera en général différent.

Les méthodes de traitement des données dépendent jusqu'à un certain point du mode opératoire. Il convient de distinguer les cas suivants:

- a. Méthode de vieillissement.
 - a.1 Vieillissement continu.
 - a.2 Vieillissement par cycles.

The temperature index as defined in Clause 11 of IEC Publication 216-1, consists of the number corresponding to the temperature in degrees Celsius derived from the thermal endurance graph at one given time, normally 20 000 h.

The thermal endurance profile as defined in Clause 11 of IEC Publication 216-1, consists of 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% confidence limit on the temperature at 5 000 h.

The determination of the confidence limit necessitates a statistical treatment of the results of the thermal endurance tests. Formulae for this statistical treatment are given in the following.

The experimental data which are to be treated statistically in order to obtain the thermal endurance properties are the times to failure, for example the times to reach a specified end point as a result of a thermal ageing treatment of a number of specimens at different ageing temperatures.

The statistical treatment of the test data given below is based on the assumption that a linear relationship exists between the logarithm of the time to failure and the reciprocal of the thermodynamic (absolute) temperature, which, for example, is the case when the degradation is due to a first order chemical reaction and thus obeys Arrhenius' law. Since changes in the ageing mechanism with temperature may invalidate this assumption outside the range covered by the exposure temperatures, even if not detectable within this range, the lowest exposure temperature should be chosen to result in an average time to failure of at least 5 000 h, and the extrapolation necessary to establish the thermal endurance profile or the temperature index should be not more than 25 °C.

In cases where the measured values clearly indicate that such a linear relationship does not exist, no extrapolation should be made. Curves of the property tested versus time at the different exposure temperatures may give valuable information in such cases, but a temperature index may only be derived after tests with an exposure temperature giving an average time to failure of at least 20 000 h.

The number of specimens exposed at each temperature has a great influence on the accuracy of the test results. If the probable spread in the test results can be anticipated, it is possible to calculate the number of specimens necessary to obtain an acceptable confidence in the results, otherwise guidance may be obtained from preliminary tests.

If suspicion arises that isolated extreme test results do not belong to the population, these may be sorted out as outliers by statistical methods, but only after careful examination of the circumstances of the test, and their value should be noted in the report. In such cases the number of test results at the various exposure temperatures will usually be different.

The methods for treating the data depend to some degree on the experimental procedure. The following cases should be distinguished:

- a. Ageing procedure.
 - a.1 Continuous.
 - a.2 Cyclic.

b. Evaluation de l'état des éprouvettes.

b.1 Mesure non destructive de la ou des propriétés.

b.1.1 Contrôle continu.

b.1.2 Mesures périodiques.

b.2 Application périodique d'une contrainte d'essai spécifiée (essais d'épreuves).

b.3 Détermination destructive d'une propriété.

La méthode b.1 peut être appliquée en combinaison avec la méthode a.1 (vieillessement continu) ou la méthode a.2 (vieillessement par cycles), auquel cas les cycles peuvent avoir par exemple pour objet d'exposer les éprouvettes à des chocs thermiques définis au cours du vieillissement. Si les mesures sont enregistrées sans interruption ou par des relevés fréquents (b.1.1), les temps jusqu'à dégradation sont obtenus directement au vu des valeurs enregistrées et, si l'on procède à des mesures périodiques (b.1.2), ils s'obtiennent par interpolation sur les graphiques de la propriété en fonction du temps (voir paragraphe 4.1). Dans les deux cas, le temps jusqu'à dégradation est déterminé pour chaque éprouvette individuelle en tant que variable continue et la vitesse de variation de la propriété ressort des mesures, ce qui n'est pas le cas quand on applique les méthodes b.2 et b.3. L'évaluation des résultats est décrite à l'article 4.

La méthode b.2 est appliquée le plus souvent en association avec la méthode a.2 (vieillessement par cycles). L'essai d'épreuve permet de déterminer si la propriété essayée d'une éprouvette reste ou non dans les limites de la contrainte d'épreuve (critère de dégradation). Si on exécute l'épreuve, par exemple à la fin de chaque cycle de vieillissement, le temps jusqu'à dégradation est défini comme le point milieu d'un cycle et est ainsi une variable discontinue (voir paragraphe 4.1). Comme l'essai ne fait pas apparaître la variation de la propriété au cours du temps, cette méthode est moins riche en enseignements que la méthode b.1. La méthode statistique pour obtenir le profil d'endurance thermique est analogue à celle appliquée dans le cas b.1 et est décrite à l'article 4.

On peut appliquer la méthode b.3 avec la méthode a.1 ou a.2. On examine un nombre prédéterminé d'éprouvettes, puis on les rejette, après chaque mesure. Comme les valeurs de la propriété aux différents instants de mesure sont déterminées sur des éprouvettes différentes, la méthode est plus sensible aux inégalités entre éprouvettes que les méthodes ci-dessus. Il n'est pas possible d'obtenir un temps jusqu'à dégradation pour les éprouvettes individuelles, mais les résultats indiquent la tendance générale de la propriété en fonction du temps et un temps moyen jusqu'à dégradation à chaque température de vieillissement. Les méthodes statistiques pour obtenir le profil d'endurance thermique dans ce cas sont étudiées à l'article 5.

Un schéma fonctionnel montrant les principales phases de la méthode statistique et les décisions à prendre est donné dans l'annexe B.

3. Méthodes statistiques

3.1 Les méthodes statistiques en question comprennent les phases suivantes:

- 1) Détermination des temps jusqu'à dégradation.
- 2) Calcul des coefficients a et b de l'équation linéaire de régression, $y = a + bx$, du logarithme du temps jusqu'à dégradation ($y = \lg t$), en fonction de l'inverse de la température thermodynamique ($x = 1/\theta$).
- 3) Tracé du graphique d'endurance thermique.
- 4) Détermination de l'indice de température (s'il y a lieu).
- 5) Contrôle de l'égalité des variances du logarithme des temps jusqu'à dégradation aux différentes températures de vieillissement.

- b. Evaluation of the state of the specimens.
 - b.1 Non-destructive measurement of property/properties.
 - b.1.1 Continuous monitoring.
 - b.1.2 Periodic measurements.
 - b.2 Periodic application of a specified test stress (proof tests).
 - b.3 Destructive determination of a property.

Method b.1 may be applied in combination with either Procedure a.1 (continuous ageing), or Procedure a.2 (cyclic ageing) in which case the purpose of the cycling may be, for example, to expose the test specimens to defined thermal shocks during ageing. If the measurements are recorded continuously or by frequent scanning (b.1.1), the times to failure are obtained directly by examination of the recorded values, and if periodic measurements are made (b.1.2) they are interpolated on graphs of property versus time (see Sub-clause 4.1). In both cases the time to failure is determined for each individual specimen as a continuous variable and the rate of change of the property appears from the measurements, which is not the case with Methods b.2 and b.3. The evaluation of the results is described in Clause 4.

Method b.2 is most frequently applied in connection with Procedure a.2 (cyclic ageing). The proof test determines whether the tested property of a specimen is still within the limit of the proof stress (end-point criterion) or not. If the proof test is applied, for example at the end of each ageing cycle, the time to failure is defined as the midpoint of a cycle, and is thus a discontinuous variable (see Sub-clause 4.1). Since the variation during time of the property is not revealed by the test, this method is not as informative as Method b.1. The statistical procedure for obtaining the thermal endurance profile is analogous to the procedure used in case b.1 and is described in Clause 4.

Method b.3 may be applied to either Procedure a.1 or a.2. A predetermined number of specimens are examined and then discarded, at each time of measurement. Since the values of the property at the different measuring times are determined on different specimens, this method is more sensitive to variations between specimens than the above methods. It is not possible to obtain a time to failure for the individual specimens, but the results indicate the general trend of property versus time and an average time to failure at each ageing temperature. The statistical procedures for obtaining the thermal endurance profile in this case are discussed in Clause 5.

A flow diagram, showing the main steps in the statistical procedure and the decisions to be taken, is given in Appendix B.

3. Statistical procedures

3.1 The statistical procedures involved comprise the following steps:

- 1) Determination of the times to failure.
- 2) Calculation of the coefficients a and b of the linear equation of regression, $y = a + bx$, of the logarithm of time to failure ($y = \lg t$) on the reciprocal value of the thermodynamic temperature ($x = 1/\Theta$).
- 3) Drawing the thermal endurance graph.
- 4) Determination of the temperature index (when applicable).
- 5) Testing the equality of the variances of the logarithm of the times to failure at the different ageing temperatures.

6) Test de linéarité de l'équation de régression.

Note. — L'attention est attirée sur le fait que ce test ne s'applique qu'à la gamme des points de mesure et que les limites de confiance pour les points extrapolés se fondent uniquement sur l'hypothèse de linéarité mentionnée ci-dessous (voir paragraphe 3.2, point 4).

7) Détermination de la limite de confiance inférieure unilatérale de 95% sur le temps moyen logarithmique jusqu'à dégradation sur la droite de régression.

8) Calcul des valeurs de température θ °C correspondant aux temps jusqu'à dégradation de 5 000 h et 20 000 h d'après l'équation de régression.

9) Vérification du coefficient de variation du logarithme du temps jusqu'à dégradation d'après l'équation de régression à 5 000 h.

10) Calcul de la limite de confiance inférieure unilatérale de 95% sur la température correspondant à un temps jusqu'à dégradation de 5 000 h sur la droite de régression.

3.2 Hypothèses

Les hypothèses à la base des méthodes statistiques sont les suivantes:

- 1) Les valeurs observées du temps jusqu'à dégradation sont *stochastiquement indépendantes*. Les éprouvettes employées pour l'essai de vieillissement constituent un échantillon prélevé au hasard sur la population étudiée et ont été traitées uniformément.
- 2) La variable dépendante y (logarithme du temps jusqu'à dégradation) est *normalement distribuée* à chaque valeur de la variable indépendante x (inverse de la température thermodynamique).
- 3) La variance σ^2 de y est la même pour toutes les valeurs de x .
- 4) La variable dépendante y est une fonction *linéaire* de la variable indépendante x , du moins dans une gamme comprenant tous les points d'essai et tous les points extrapolés.
- 5) Les *erreurs* sur x sont *négligeables*, de sorte que x a la même valeur, connue exactement, pour toutes les éprouvettes vieillies à la même température.

4. Mesures non destructives et essais d'épreuve

Lorsque le critère de dégradation est obtenu par des mesures non destructives d'une ou de plusieurs propriétés (article 2, point b.1) ou par l'application d'une épreuve spécifiée (article 2, point b.2), c'est la méthode décrite dans le présent article qui s'applique. La méthode à suivre dans le cas de la détermination destructive d'une propriété (article 2, point b.3) est indiquée à l'article 5.

4.1 Temps jusqu'à dégradation

On expose un total de N éprouvettes à k températures différentes θ_i °C, où $i = 1 \dots k$. Le nombre d'éprouvettes exposées à θ_i °C est désigné par n_i ($N = \sum n_i$). Les expériences sont en général conduites avec le même nombre n d'éprouvettes exposées à toutes les températures ($N = kn$), mais on peut aussi effectuer le calcul dans le cas où les n_i sont différents.

On obtient pour chaque éprouvette un temps jusqu'à dégradation comme indiqué ci-dessous. Les temps individuels jusqu'à dégradation sont désignés par t_{ij} , le premier indice i indiquant la température d'exposition considérée (θ_i °C) et le second indice j , le numéro attribué à l'éprouvette dans la série des n_i éprouvettes exposées à cette température, c'est-à-dire $j = 1 \dots n_i$.

6) Test for linearity of the regression equation.

Note. — It is emphasized that this test applies to the range of measured points only, and that confidence limits calculated for extrapolated points are based exclusively on the assumption of linearity mentioned below, (see Sub-clause 3.2, Item 4).

- 7) Determination of the lower unilateral 95% confidence limit on the logarithmic mean time to failure on the regression line.
- 8) Calculation of the values of temperature θ °C corresponding to times to failure of 5 000 h and 20 000 h according to the regression equation.
- 9) Check of the coefficient of variation of the logarithm of time to failure according to the regression equation at 5 000 h.
- 10) Calculation of the lower unilateral 95% confidence limit on the temperature corresponding to a time to failure of 5 000 h on the regression line.

3.2 Assumptions

The assumptions underlying the statistical procedures are as follows.

- 1) The observed values of time to failure are *stochastically independent*. The specimens used for the ageing test constitute a random sample from the population investigated, and have been treated uniformly.
- 2) The dependent variable y (logarithm of time to failure) is *normally distributed* at each value of the independent variable x (reciprocal value of thermodynamic temperature).
- 3) The variance σ^2 of y is the *same* at all values of x .
- 4) The dependent variable y is a *linear* function of the independent variable x , at least over a range including all test points and all extrapolated points.
- 5) The *errors* in x are *negligible*, so that x has the same exactly known value for all specimens aged at the same temperature.

4. Non-destructive measurements and proof tests

In cases where the end-point criterion is revealed by non-destructive measurements of one or more properties (Clause 2, Item b.1) or by applying a specified proof test (Clause 2, Item b.2) the procedure described in this clause applies. The procedure to be followed in the case of destructive determination of a property (Clause 2, Item b.3) is given in Clause 5.

4.1 Times to failure

A total of N specimens are exposed at k different temperatures θ_i °C, where $i = 1 \dots k$. The number of specimens exposed at θ_i °C is designated n_i ($N = \sum n_i$). Usually experiments are planned with the same number, n , of specimens exposed at all temperatures ($N = kn$), but it is also possible to carry out the calculation in cases where the n_i 's are different.

For each specimen a time to failure is obtained as described below. The individual times to failure are designated t_{ij} , where the first index, i , indicates the relevant exposure temperature (θ_i °C), and the second index, j , the number allocated to the specimen within the series of n_i specimens exposed at that temperature, i.e., $j = 1 \dots n_i$.

4.1.1 Contrôle continu (b.1.1)

Le contrôle continu consiste à enregistrer les valeurs mesurées de la propriété de façon continue ou par des relevés fréquents sur les éprouvettes au cours de l'exposition. L'examen des valeurs enregistrées donnera directement le temps auquel le critère de dégradation aura été dépassé pour chaque éprouvette, c'est-à-dire le temps individuel jusqu'à dégradation t_{ij} .

4.1.2 Mesures périodiques (b.1.2)

Si les éprouvettes exposées à une seule température sont essayées à des temps prédéterminés $t_1, t_2, \dots$, on peut déterminer le temps individuel jusqu'à dégradation pour chaque éprouvette, t_{ij} , à partir d'un graphique donnant la propriété en fonction du temps.

4.1.3 Essais d'épreuve (b.2)

Si une contrainte d'épreuve est appliquée à des temps prédéterminés, le résultat de l'essai se traduit par un temps t_f auquel la dégradation a été observée pour la première fois et le temps immédiatement précédent t_{f-1} auquel la dégradation n'a pas été observée en dernier lieu.

Le temps individuel jusqu'à dégradation est pris égal à la moyenne de ces deux valeurs, c'est-à-dire

$$t_{ij} = \frac{t_f + t_{f-1}}{2}$$

4.2 Equation de régression

Pour chaque valeur de la température θ_i , calculer l'inverse de la température thermodynamique $\Theta_i = \theta_i + 273$,

$$x_i = \frac{1}{\Theta_i}$$

le logarithme des temps jusqu'à dégradation t_{ij} ,

$$y_{ij} = \lg t_{ij}$$

et les valeurs moyennes de y_{ij} ,

$$\bar{y}_i = \frac{\sum y_{ij}}{n_i}$$

Les coefficients de l'équation de régression

$$y = a + bx$$

sont déterminés à partir des équations

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

$$b = \frac{N \sum (x_i \sum y_{ij}) - (\sum n_i x_i) (\sum \sum y_{ij})}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2}$$

4.1.1 Continuous monitoring (b.1.1)

By continuous monitoring the measured property values are recorded continuously or by frequent scanning of the specimens during exposure. Examination of the recorded values will directly reveal the time when the end-point criterion was exceeded for each specimen, that is, the individual time to failure t_{ij} .

4.1.2 Periodic measurements (b.1.2)

If the specimens exposed at one temperature are measured at predetermined times $t_1, t_2 \dots$, the individual time to failure for each specimen, t_{ij} , may be determined from a graph of property versus time.

4.1.3 Proof tests (b.2)

If a proof stress is applied at predetermined times, the outcome of the test is a time t_f when failure was first observed, and the immediately preceding test time t_{f-1} when failure was last not observed.

The individual time to failure is taken as the mean of these two values, i.e.,

$$t_{ij} = \frac{t_f + t_{f-1}}{2}.$$

4.2 The regression equation

For each value of the temperature θ_i , calculate the reciprocal value of the thermodynamic temperature $\Theta_i = \theta_i + 273$,

$$x_i = \frac{1}{\Theta_i},$$

the logarithm of the times to failure t_{ij} ,

$$y_{ij} = \lg t_{ij},$$

and the mean values of y_{ij} ,

$$\bar{y}_i = \frac{\sum y_{ij}}{n_i}.$$

The coefficients of the regression equation

$$y = a + bx$$

are determined from the equations

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

$$b = \frac{N \sum (x_i \sum y_{ij}) - (\sum n_i x_i) (\sum \sum y_{ij})}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2}.$$

où

$$\bar{x} = \frac{\sum n_i x_i}{\sum n_i}$$

et

$$\bar{y} = \frac{\sum \sum y_{ij}}{\sum n_i} = \frac{\sum n_i \bar{y}_i}{\sum n_i}.$$

4.3 Graphique d'endurance thermique

Lorsque la droite de régression a été établie, on la trace sur le graphique d'endurance thermique, c'est-à-dire un graphique avec $y = \lg t$ en ordonnée et $x = 1/\theta$ en abscisse. On porte en général de droite à gauche les valeurs croissantes de x et on marque sur l'axe des abscisses les valeurs correspondantes de θ en °C (voir figure 1, page 36). On peut se procurer du papier graphique spécial à cet usage.

Les valeurs individuelles $y_{ij} = \lg t_{ij}$, et les valeurs moyennes $\bar{y}_i = \lg t_i$ où t_i représente les valeurs moyennes logarithmiques du temps jusqu'à dégradation sont portées sur le graphique aux valeurs correspondantes de $x_i = \frac{1}{\theta_i + 273}$.

4.4 Indice de température

S'il y a lieu, on détermine l'indice de température IT à partir du graphique d'endurance thermique (paragraphe 4.3) comme étant la température θ (en °C) sur la droite de régression qui correspond à un temps spécifié T, normalement 20 000 h.

La valeur IT ne doit être déterminée que si les positions des points expérimentaux relatifs à la droite de régression confirment l'hypothèse d'une relation linéaire.

4.5 Test d'égalité des variances

Pour chaque valeur de i , on calcule les variances

$$s_{ii}^2 = \frac{n_i \sum y_{ij}^2 - (\sum y_{ij})^2}{n_i f_i}$$

avec $f_i = n_i - 1$ degrés de liberté, et leur moyenne pondérée

$$s_1^2 = \frac{\sum f_i s_{ii}^2}{\sum f_i}$$

avec

$$f_1 = \sum f_i \quad \text{degrés de liberté.}$$

L'égalité des k variances s_{ii}^2 se vérifie par le test de Bartlett sur le niveau de signification $\alpha = 0,05$ en comparant la variable de test

$$\chi^2 = \frac{2,3 [f_1 \lg s_1^2 - \sum (f_i \lg s_{ii}^2)]}{c}$$

where

$$\bar{x} = \frac{\sum n_i x_i}{\sum n_i}$$

and

$$\bar{y} = \frac{\sum \sum y_{ij}}{\sum n_i} = \frac{\sum n_i \bar{y}_i}{\sum n_i}.$$

4.3. The thermal endurance graph

When the regression line has been established, it is drawn on the thermal endurance graph, i.e., a graph with $y = \lg t$ as ordinate, and $x = 1/\theta$ as abscissa. Usually x is plotted as increasing from the right to the left, and the corresponding values of θ in °C are marked on the axis (see Figure 1, page 36). Special graph paper is obtainable for this purpose.

The individual values $y_{ij} = \lg t_{ij}$, and the mean values $\bar{y}_i = \lg \bar{t}_i$ where $\bar{t}_i$ denotes the logarithmic mean values of time to failure, are plotted on the graph at the corresponding values of

$$x_i = \frac{1}{\theta_i + 273}.$$

4.4. The temperature index

When applicable, the temperature index, TI, is determined from the thermal endurance graph (Sub-clause 4.3), as the temperature θ (in °C) on the regression line corresponding to a specified time T , normally 20 000 h.

The TI should only be derived if the positions of the experimental points relative to the regression line justify the assumption of a linear relationship.

4.5. Test for equality of variances

For each value of i , one calculates the variances

$$s_{li}^2 = \frac{n_i \sum y_{ij}^2 - (\sum y_{ij})^2}{n_i f_i}$$

with $f_i = n_i - 1$ degrees of freedom, and their weighted mean

$$s_l^2 = \frac{\sum f_i s_{li}^2}{\sum f_i}$$

with

$$f_l = \sum f_i \quad \text{degrees of freedom.}$$

The equality of the k variances s_{li}^2 is tested by Bartlett's test on significance level $\alpha = 0.05$ by comparing the test variable

$$\chi^2 = \frac{2.3 [f_l \lg s_l^2 - \sum (f_i \lg s_{li}^2)]}{c}$$

où

$$c = 1 + \frac{\left(\sum \frac{1}{f_i} \right) - \frac{1}{f_i}}{3(k-1)},$$

$$f_1 = \sum f_i$$

avec la valeur tabulaire $\chi^2(0,95, k-1)$, où $k-1$ est le nombre de degrés de liberté de χ^2 (voir annexe A).

Si χ^2 est supérieur à la valeur tabulaire, les différences sur s_i^2 sont considérées comme significatives et la valeur de χ^2 doit être indiquée dans le procès-verbal d'essai. La moyenne pondérée s_1^2 est prise comme estimation pondérée de la variance dans les k groupes de mesures avec f_1 degrés de liberté.

4.6 Test de linéarité

A partir de l'équation de régression, on calcule les valeurs moyennes estimées de y conformément à la droite de régression

$$Y_i = a + bx_i$$

correspondant aux k valeurs de x_i , d'où la variance

$$s_2^2 = \frac{\sum n_i (\bar{y}_i - Y_i)^2}{f_2} = \frac{(\sum n_i \bar{y}_i^2 - N\bar{y}^2) - b(\sum n_i x_i \bar{y}_i - N\bar{x}\bar{y})}{f_2}$$

avec

$$f_2 = k - 2 \text{ degrés de liberté.}$$

L'estimation pondérée s_1^2 de la variance dans les k groupes de mesures est comparée à la variance s_2^2 autour de la droite de régression au moyen du test de Fisher effectué sur le niveau de signification $\alpha = 0,05$.

On compare la variable d'essai $F = \frac{s_2^2}{s_1^2}$ à la valeur tabulaire de $F(0,95, f_n, f_d)$ (voir annexe A), f_n étant le nombre de degrés de liberté du numérateur de F et f_d celui du dénominateur, c'est-à-dire que f_n est égal à f_2 calculé ci-dessus et f_d est égal à f_1 obtenu comme indiqué au paragraphe 4.5.

Si F est supérieur à la valeur tabulaire, l'écart par rapport à la droite est considéré comme significatif et la valeur de F doit être indiquée dans le procès-verbal d'essai.

L'estimation pondérée de la variance se calcule ainsi

$$s^2 = \frac{(N-k) s_1^2 + (k-2) s_2^2}{N-2}$$

avec

$$f = N - 2 \text{ degrés de liberté.}$$

4.7 Limite de confiance sur le temps dans le graphique

La limite de confiance inférieure unilatérale de 95% sur la valeur vraie de y pour une valeur donnée X est

$$Y_c = Y - t s_y,$$

where

$$c = 1 + \frac{\left(\sum \frac{1}{f_i} \right) - \frac{1}{f_1}}{3(k-1)},$$

$$f_1 = \sum f_i$$

with the tabulated value χ^2 (0.95, $k - 1$), where $k - 1$ is the number of degrees of freedom of χ^2 , (see Appendix A).

If χ^2 is greater than the tabulated value, the differences in $s_{f_i}^2$ are considered significant, and the value of χ^2 shall be given in the test report. The weighted mean s_1^2 is used as a pooled estimate of the variance within the k sets of measurements with f_1 degrees of freedom.

4.6 Test for linearity

From the regression equation one calculates the estimated mean values of y according to the regression line

$$Y_i = a + bx_i$$

corresponding to the k values of x_i , and hence the variance

$$s_2^2 = \frac{\sum n_i (\bar{y}_i - Y_i)^2}{f_2} = \frac{(\sum n_i \bar{y}_i^2 - N\bar{y}^2) - b(\sum n_i x_i \bar{y}_i - N\bar{x}\bar{y})}{f_2}$$

with

$$f_2 = k - 2 \text{ degrees of freedom.}$$

The pooled estimate s_1^2 of the variance within the k sets of measurements is compared with the variance s_2^2 about the regression line by Fisher's test on significance level $\alpha = 0.05$.

The test variable $F = \frac{s_2^2}{s_1^2}$ is compared with the tabulated value of $F(0.95, f_n, f_d)$, see Appendix A. Here f_n is the number of degrees of freedom of the numerator of F , and f_d of the denominator, that is, f_n is equal to f_2 calculated above, and f_d equal to f_1 as shown in Sub-clause 4.5.

If F is greater than the tabulated value, the deviation from the straight line is considered significant and the value of F shall be given in the test report.

A pooled estimate of the variance is calculated as

$$s^2 = \frac{(N - k) s_1^2 + (k - 2) s_2^2}{N - 2}$$

with

$$f = N - 2 \text{ degrees of freedom.}$$

4.7 Confidence limit on time in the graph

The lower unilateral 95% confidence limit on the true value of y at a given value X is

$$Y_c = Y - t s_y.$$

où

$$Y = a + bX$$

$$s_y^2 = s^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{(X - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right]$$

et t est la valeur tabulaire du t de Student avec $f = N - 2$ degrés de liberté correspondant au niveau de confiance de 95%, $t(0,95, f)$ (voir annexe A).

On calcule Y_c pour plusieurs valeurs associées de Y et X de l'équation de régression, distribuées dans la gamme d'intérêt, et on trace sur le graphique une courbe passant par les points (X, Y_c) .

4.8 Températures correspondant à 5 kh et 20 kh jusqu'à dégradation

A partir de l'équation de régression

$$y = a + bx$$

on calcule les valeurs X_5 et X_{20} correspondant aux valeurs

$$Y_5 = \lg 5000 = 3,70,$$

et

$$Y_{20} = \lg 20000 = 4,30,$$

d'où les températures correspondantes en degrés Celsius

$$\theta_5 = \frac{1}{X_5} - 273$$

et

$$\theta_{20} = \frac{1}{X_{20}} - 273.$$

4.9 Coefficient de variation

La variance de Y_5 déterminée à partir de l'équation de régression correspondant à la température θ_5 se calcule comme suit

$$s_y^2 = s^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{(X_5 - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right].$$

d'où le coefficient de variation

$$CV = \frac{s_y}{\lg 5000} = \frac{s_y}{3,7}.$$

Si le coefficient de variation $CV \leq 1,5\%$, le profil d'endurance thermique se détermine comme indiqué au paragraphe 4.11; dans le cas contraire, on ne note que le graphique d'endurance thermique (paragraphe 4.3) et, s'il y a lieu, l'indice de température (paragraphe 4.4).

where

$$Y = a + bX$$

$$s_y^2 = s^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{(X - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right]$$

and t is the tabulated value of Student's t with $f = N - 2$ degrees of freedom corresponding to 95% confidence level, $t(0.95, f)$, (see Appendix A).

Y_c is calculated for several connected values of Y and X of the regression equation, distributed over the range of interest, and a curve through the points (X, Y_c) drawn on the graph.

4.8 Temperatures corresponding to 5 kh and 20 kh to failure

From the regression equation

$$y = a + bx$$

one calculates the values X_5 and X_{20} corresponding to the values

$$Y_5 = \lg 5000 = 3.70,$$

and

$$Y_{20} = \lg 20\,000 = 4.30,$$

and hence the corresponding temperatures in degrees Celsius

$$\theta_5 = \frac{1}{X_5} - 273$$

and

$$\theta_{20} = \frac{1}{X_{20}} - 273.$$

4.9 Coefficient of variation

The variance of Y_5 as determined from the regression equation corresponding to the temperature θ_5 is calculated as

$$s_y^2 = s^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{(X_5 - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right]$$

and hence the coefficient of variation

$$CV = \frac{s_y}{\lg 5000} = \frac{s_y}{3.7}.$$

If the coefficient of variation $CV \leq 1.5\%$, the thermal endurance profile is determined as per Sub-clause 4.11; if not, only the thermal endurance graph (Sub-clause 4.3) and when applicable, the temperature index (Sub-clause 4.4) are reported.

4.10 Limite de confiance sur θ_5

La limite de confiance inférieure unilatérale de 95% θ_c sur la température correspondant à 5 000 h jusqu'à dégradation se calcule à partir de

$$X_c = \bar{x} + \frac{Y_5 - \bar{y}}{b_r} + \frac{t s_r}{b_r}$$

où

$$b_r = b - \frac{t^2 s^2}{b \sum n_i (x_i - \bar{x})^2}$$

$$s_r^2 = s^2 \left[\frac{b_r}{Nb} + \frac{(X_5 - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right]$$

t étant la valeur tabulaire du t de Student avec $f = N - 2$ degrés de liberté correspondant au niveau de confiance de 95%, $t(0,95, f)$ (voir annexe A).

$$\theta_c = \frac{1}{X_c} - 273.$$

4.11 Profil d'endurance thermique

Le profil d'endurance thermique (PET) est défini par les nombres correspondant aux températures donnant un temps moyen logarithmique estimé jusqu'à dégradation de 20 kh et 5 kh, θ_{20} et θ_5 (paragraphe 4.8) suivis de θ_c (paragraphe 4.10).

$$\text{PET } \theta_{20} / \theta_5 (\theta_c)$$

5. Mesures destructives

Quand on emploie la mesure destructive d'une propriété pour déterminer le critère de dégradation (article 2, point b.3), le nombre d'éprouvettes exposées à chaque température doit être au moins égal au produit du nombre d'éprouvettes mesurées à la fin de chaque intervalle de temps par le nombre des temps $t_1, t_2 \dots$ auxquels sont effectuées les mesures.

Si on a prévu par exemple de mesurer dix éprouvettes à chacun des huit temps à trois températures différentes, un total de $3 \times 8 \times 10 = 240$ éprouvettes est nécessaire. Il est toutefois avantageux d'exposer à chaque température des groupes supplémentaires de dix éprouvettes de façon à pouvoir faire des mesures pour des temps plus longs que ceux primitivement prévus si les mesures indiquent un temps jusqu'à dégradation à une ou plusieurs températures plus long que celui prévu quand on a établi le programme de l'expérience. Il peut également être avantageux de commencer plus tard l'exposition de certains groupes supplémentaires d'éprouvettes de façon à faire des mesures à des temps d'exposition intermédiaires ou plus courts que ceux initialement prévus si on en a reconnu l'utilité au cours de l'expérience.

Comme les éprouvettes sont rejetées après la mesure, il n'est pas possible de suivre les modifications de propriété des éprouvettes individuelles et de déterminer sans ambiguïté un temps jusqu'à dégradation pour chaque éprouvette.

4.10 Confidence limit on θ_5

The lower unilateral 95% confidence limit θ_c on the temperature corresponding to 5 000 h to failure is calculated from

$$X_c = \bar{x} + \frac{Y_5 - \bar{y}}{b_r} + \frac{t s_r}{b_r}$$

where

$$b_r = b - \frac{t^2 s^2}{b \sum n_i (x_i - \bar{x})^2}$$

$$s_r^2 = s^2 \left[\frac{b_r}{Nb} + \frac{(X_5 - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right]$$

and t is the tabulated value of Student's t with $f = N - 2$ degrees of freedom corresponding to 95% confidence level, $t(0.95, f)$, (see Appendix A).

$$\theta_c = \frac{1}{X_c} - 273.$$

4.11 The thermal endurance profile

The thermal endurance profile (TEP) is determined as the numbers corresponding to the temperatures yielding an estimated logarithmic mean time to failure of 20 kh and 5 kh, θ_{20} and θ_5 (Sub-clause 4.8) followed by θ_c (Sub-clause 4.10).

$$\text{TEP } \theta_{20}/\theta_5(\theta_c)$$

5. Destructive measurements

When destructive measurement of a property is used to determine the end point (Clause 2, Item b.3), the number of specimens exposed at each temperature shall be at least equal to the product of the number of specimens measured at the end of each time interval, and the number of times $t_1, t_2 \dots$, at which the measurements are carried out.

If, for example, it is planned to measure ten specimens at each of eight times at three different temperatures, a total of $3 \times 8 \times 10 = 240$ specimens is necessary. It is, however, convenient to expose some extra sets of ten specimens at each temperature to be able to measure at even longer times than originally planned, if the measurements indicate a longer time to failure at one or more temperatures, than foreseen at the planning of the experiment. It may also be convenient to start exposure of some extra sets of specimens at a later time in order to measure at intermediate exposure times, or at shorter exposure times than originally planned, if found appropriate during the experiment.

Since the specimens are discarded after measurement, it is not possible to follow the change in property for the individual specimens, and to determine unambiguously a time to failure for each specimen.

5.1 Temps jusqu'à dégradation

A chaque température d'essai, les résultats de mesure sont portés sur un graphique représentant la propriété mesurée en fonction du temps de la mesure. On trace la courbe donnant la meilleure représentation des valeurs mesurées, et l'intersection de cette courbe avec la droite représentant le critère de dégradation donne le temps jusqu'à dégradation t_i à cette température.

Les spécifications pour des matériaux déterminés peuvent exiger un traitement spécial des résultats de mesure, tel que ceux consistant à porter le logarithme de la propriété en fonction du temps ou une certaine fonction de la propriété en fonction du logarithme du temps de façon à obtenir un graphique simple, par exemple approximativement linéaire. La courbe peut être ajustée sur les points de mesure par la méthode des moindres carrés. La fonction mathématique représentant la relation entre la propriété et le temps dépend du type de matériau essayé, c'est-à-dire de l'ordre des réactions chimiques mises en jeu dans le processus de vieillissement et de la relation entre la composition chimique et la propriété mesurée. Il convient de tenir compte de la connaissance théorique de ces processus et de ces relations et de l'expérience recueillie à leur sujet pour choisir la méthode exacte d'évaluation.

5.2 Calculs

Les calculs se déroulent essentiellement comme indiqué à l'article 4, mais comme on n'obtient qu'une valeur du temps jusqu'à dégradation à partir du graphique de la propriété à chaque température (paragraphe 5.1), n_i devient égal à un.

Il n'est donc pas possible de déterminer la valeur s^2 (paragraphe 4.5) qui est basée sur l'écart de y à une température fixe; l'estimation s^2 de la variance de y doit être exclusivement basée sur la dispersion des valeurs t_i autour de la droite de régression, ce qui se traduit par une valeur de s^2 avec seulement $k - 1$ degrés de liberté.

Pour faire une estimation du degré de conformité des courbes de propriétés et de la linéarité du graphique d'endurance thermique, on procède, comme suit, à une estimation sommaire de la variance s_{ij}^2 à chaque température.

On suppose que les courbes de la propriété en fonction du temps pour chaque éprouvette sont parallèles à la courbe moyenne de la propriété obtenue conformément au paragraphe 5.1 — du moins au voisinage du point où la courbe coupe la droite du critère de dégradation — bien qu'on ne puisse établir qu'un seul point de chaque courbe en raison de la nature destructive de l'essai.

Sur le graphique de la propriété en fonction du temps, des courbes sont tracées parallèlement à la courbe moyenne en passant par certains des points de mesure près du point d'intersection, comme l'indique par exemple la figure 2, page 36, qui montre de telles courbes passant par trois points de mesure à chacun des quatre instants de mesure t_{m-2} , t_{m-1} , t_m , t_{m+1} les plus proches de l'instant t_j où la courbe moyenne (ou celle donnant la meilleure représentation) coupe la droite représentant le critère de dégradation.

Les intersections t_{ij} de ces courbes avec la droite du critère de dégradation sont prises égales aux temps jusqu'à dégradation à la température θ_i et sont utilisées pour le calcul en conformité avec les paragraphes 4.5 et 4.6.

L'attention est toutefois attirée sur le fait que ces calculs ne conduisent qu'à des estimations sommaires.

5.3 Indice de température

S'il y a lieu, l'indice de température IT est déterminé comme indiqué au paragraphe 4.4.

5.1 Times to failure

At each test temperature the measured results are plotted on a graph of the property measured versus the time of measurement. A curve is drawn, which makes a best fit to the measured values, and the intersection of this curve with a line representing the end-point criterion determines the time to failure at that temperature, t_i .

Specifications for particular materials may call for a special treatment of the measuring results, such as plotting the logarithm of the property versus time, or some function of the property versus the logarithm of time to obtain a simple, for instance approximately linear, graph. The curve may be fitted to the measured points by the method of least squares. The mathematical function describing the connection between property and time depends on the type of material tested, i.e., on the order of chemical processes involved in the ageing process, and the relation between chemical composition and the property measured. Theoretical knowledge and previous experience of such processes and relations should be kept in mind when choosing the exact evaluating procedure.

5.2 Calculations

The calculations proceed essentially as described in Clause 4, but since only one value of time to failure is obtained from the property graph at each temperature (Sub-clause 5.1), n_i becomes equal to one.

Therefore it is not possible to determine the value s_y^2 (Sub-clause 4.5), which is based on the deviation of y at fixed temperature; and the estimate s^2 of the variance of y must be based exclusively on the scatter of the values t_i about the regression line, resulting in a value of s^2 with only $k - 1$ degrees of freedom.

In order to make an estimate of the degree of conformity of the property curves, and of the linearity of the thermal endurance graph, a rough estimate of the variance $s_{t_i}^2$ at each temperature is derived as follows.

It is assumed that the curves of property versus time for the individual specimens run parallel to the average curve of property obtained according to Sub-clause 5.1—at least in the vicinity of the point where the curve crosses the end-point criterion—although only one point of each curve can be assessed, because of the destructive nature of the test.

In the property versus time graph curves are drawn parallel to the average curve, through some of the measuring points near to the crossover point, e.g., as indicated in Figure 2, page 36, where such curves are shown through three measuring points at each of the four measuring times t_{m-2} , t_{m-1} , t_m , t_{m+1} closest to the time t_j , where the average (or best fitting) curve crosses the line representing the end-point criterion.

The intersections t_{ij} of these curves with the end-point criterion line are taken as the times to failure at the temperature θ_j , and are used in the calculation in accordance with Sub-clauses 4.5 and 4.6.

It is emphasized, however, that these calculations lead to rough estimates only.

5.3 The temperature index

When applicable, the temperature index, TI, is determined as described in Sub-clause 4.4.

5.4 Profil d'endurance thermique

Le coefficient de variation CV se calcule conformément au paragraphe 4.9. Si $CV \leq 1,5\%$, le profil d'endurance thermique PET est déterminé comme indiqué au paragraphe 4.11.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60216-3:1980

Withdrawn

5.4 *The thermal endurance profile*

The coefficient of variation, CV , is calculated in accordance with Sub-clause 4.9. If $CV \leq 1.5\%$, the thermal endurance profile, TEP, is determined as described in Sub-clause 4.11.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60216-3:1980

Withdrawn

ANNEXE A

Fractiles d'ordre 0,95 des lois de χ^2 , de t et de F

Ce tableau donne les valeurs de $\chi^2(0,95, f)$, $t(0,95, f)$ et $F(0,95, f_n, f_d)$, où f_n est le nombre de degrés de liberté du numérateur et f_d celui du dénominateur dans l'expression $F = \frac{s_n^2}{s_d^2}$.

f	χ^2	t	$f_n \backslash f_d$	F				
				1	2	3	4	5
1	3,8	6,31	1	161	200	216	225	230
2	6,0	2,92	2	19	19	19	19	19
3	7,8	2,35	3	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0
4	9,5	2,13	4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3
5	11,1	2,02	5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1
6	12,6	1,94	6	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4
7	14,1	1,90	7	5,6	4,7	4,4	4,1	4,0
8	15,5	1,86	8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7
9	16,9	1,83	9	5,1	4,3	3,9	3,6	3,5
10	18,3	1,81	10	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3
11	19,7	1,80	11	4,8	4,0	3,6	3,4	3,2
12	21,0	1,78	12	4,8	3,9	3,5	3,3	3,1
13	22,4	1,77	13	4,7	3,8	3,4	3,2	3,0
14	23,7	1,76	14	4,6	3,7	3,3	3,1	3,0
15	25,0	1,75	15	4,5	3,7	3,3	3,1	2,9
16	26,3	1,73	16	4,5	3,6	3,2	3,0	2,9
17	27,6	1,74	17	4,5	3,6	3,2	3,0	2,8
18	28,9	1,73	18	4,4	3,6	3,2	2,9	2,8
19	30,1	1,73	19	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7
20	31,4	1,73	20	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7
25	33,7	1,71	25	4,2	3,4	3,0	2,8	2,6
30	43,8	1,70	30	4,2	3,3	2,9	2,7	2,5
40	55,8	1,68	40	4,1	3,2	2,8	2,6	2,5
50	67,5	1,68	50	4,0	3,2	2,8	2,6	2,4
100	124,3	1,66	100	3,9	3,1	2,7	2,5	2,3
500	553,2	1,65	500	3,9	3,0	2,6	2,4	2,2

APPENDIX A

0.95 fractiles of the χ^2 , t , and F distributions

This table gives the values of $\chi^2(0.95, f)$, $t(0.95, f)$ and $F(0.95, f_n, f_d)$, where f_n is the number of degrees of freedom of the numerator, and f_d of the denominator in the expression $F = \frac{s_n^2}{s_d^2}$.

f	χ^2	t	$f_n \backslash f_d$	F				
				1	2	3	4	5
1	3.8	6.31	1	161	200	216	225	230
2	6.0	2.92	2	19	19	19	19	19
3	7.8	2.35	3	10.1	9.6	9.3	9.1	9.0
4	9.5	2.13	4	7.7	6.9	6.6	6.4	6.3
5	11.1	2.02	5	6.6	5.8	5.4	5.2	5.1
6	12.6	1.94	6	6.0	5.1	4.8	4.5	4.4
7	14.1	1.90	7	5.6	4.7	4.4	4.1	4.0
8	15.5	1.86	8	5.3	4.5	4.1	3.8	3.7
9	16.9	1.83	9	5.1	4.3	3.9	3.6	3.5
10	18.3	1.81	10	5.0	4.1	3.7	3.5	3.3
11	19.7	1.80	11	4.8	4.0	3.6	3.4	3.2
12	21.0	1.78	12	4.8	3.9	3.5	3.3	3.1
13	22.4	1.77	13	4.7	3.8	3.4	3.2	3.0
14	23.7	1.76	14	4.6	3.7	3.3	3.1	3.0
15	25.0	1.75	15	4.5	3.7	3.3	3.1	2.9
16	26.3	1.75	16	4.5	3.6	3.2	3.0	2.9
17	27.6	1.74	17	4.5	3.6	3.2	3.0	2.8
18	28.9	1.73	18	4.4	3.6	3.2	2.9	2.8
19	30.1	1.73	19	4.4	3.5	3.1	2.9	2.7
20	31.4	1.73	20	4.4	3.5	3.1	2.9	2.7
25	37.7	1.71	25	4.2	3.4	3.0	2.8	2.6
30	43.8	1.70	30	4.2	3.3	2.9	2.7	2.5
40	55.8	1.68	40	4.1	3.2	2.8	2.6	2.5
50	67.5	1.68	50	4.0	3.2	2.8	2.6	2.4
100	124.3	1.66	100	3.9	3.1	2.7	2.5	2.3
500	553.2	1.65	500	3.9	3.0	2.6	2.4	2.2

ANNEXE B

ORGANIGRAMME DE LA MÉTHODE STATISTIQUE

Cas

Données
(temps
jusqu'à
dégradation)
Calcul et
décisions

