

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Publication 216-4
Deuxième édition — Second edition
1980

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

Quatrième partie: Instructions pour le calcul du profil d'endurance thermique

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

Part 4: Instructions for calculating the thermal endurance profile



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 216-4

Deuxième édition — Second edition
1980

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

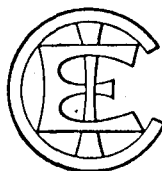
Quatrième partie: Instructions pour le calcul du profil d'endurance thermique

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

Part 4: Instructions for calculating the thermal endurance profile

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. Hypothèses	8
4. Méthodes et données d'essai	8
5. Calculs statistiques et décisions	10
6. Exemples	16
ANNEXE A — Fractiles d'ordre 0,95 des lois de χ^2 , de t et de F	48
ANNEXE B — Liste des symboles	50

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
INTRODUCTION	7
Clause	
1. Scope	7
2. Object	7
3. Assumptions	9
4. Test procedures and data	9
5. Statistical calculations and decisions	11
6. Examples	17
APPENDIX A — 0.95 fractiles of the χ^2 , t and F distributions	49
APPENDIX B — List of symbols	51

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

Quatrième partie: Instructions pour le calcul du profil 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 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 quatrième partie de la deuxième édition de la Publication 216 de la CEI, qui est publiée en plusieurs parties.

Un premier projet fut discuté lors de la réunion tenue à Toronto en 1976. A la suite de cette réunion, un projet, document 15B(Central Office)37, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en mai 1977.

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

Afrique du Sud (République d')
Allemagne
Autriche
Belgique
Canada
Danemark
Égypte
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 le présent guide:

- Publications Nos 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: Deuxième partie: Liste des matériaux et des essais existants.
- 216-3: Troisième partie: Méthodes statistiques.
- 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 4: Instructions for calculating the thermal endurance profile

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 4 of the second edition of IEC Publication 216, which is published in several parts.

A first draft was discussed at the meeting held in Toronto in 1976. As a result of this meeting, a draft, Document 15B(Central Office)37, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in May 1977.

The National Committees of 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 guide:

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.

216-3: Statistical methods.

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

Quatrième partie: Instructions pour le calcul du profil d'endurance thermique

INTRODUCTION

La deuxième édition de la Publication 216 de la CEI: Guide pour la préparation des méthodes d'essai pour l'évaluation de la stabilité thermique de matériaux isolants électriques, comportera 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 des essais d'endurance thermique et le calcul de l'indice de température. (A l'étude.)
- Sixième partie: Procédures de détermination des indices de température relatifs. (A l'étude.)

1. Domaine d'application

La présente partie donne des instructions détaillées pour le calcul du profil d'endurance thermique des matériaux isolants électriques à partir des résultats des essais d'endurance thermique conformément à la Publication 216-3 de la CEI, Troisième partie: Méthodes statistiques.

2. Objet

Les méthodes statistiques pour la détermination du profil d'endurance thermique des matériaux isolants électriques sont décrites dans la Publication 216-3.

La présente partie donne des instructions détaillées pour effectuer les calculs conformément à ces méthodes. Ces instructions sont illustrées par des exemples numériques montrant les calculs de proche en proche.

Au cours des calculs, on compare les variables des tests statistiques aux valeurs du tableau de l'annexe A. Il est fait référence à des tableaux plus complets dans la Publication 493-1 de la CEI: Guide pour l'analyse statistique de données d'essais de vieillissement, Première partie: Méthodes basées sur les valeurs moyennes des résultats d'essais normalement distribués.

Les exemples portent sur trois cas:

Exemple 1. Mesures continues.

Exemple 2. Application cyclique de l'essai d'épreuve.

Exemple 3. Mesures destructives

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

Part 4: Instructions for calculating the thermal endurance profile

INTRODUCTION

The second edition of IEC Publication 216, Guide for the Preparation of Test Procedures for Evaluating the Thermal Endurance of Electric 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 gives detailed instructions for calculating the thermal endurance profile of electrical insulating materials from thermal endurance test results, according to IEC Publication 216-3, Part 3: Statistical Methods.

2. Object

Statistical methods for determination of the thermal endurance profile of electrical insulating materials are described in Publication 216-3.

In this part, detailed instructions are given for making the calculations according to these methods. The instructions are illustrated by means of numerical examples showing the calculations step by step.

During the calculation, the statistical test variables are compared with the values tabulated in Appendix A. More comprehensive tables are referenced 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.

The examples comprise three cases:

Example 1. Continuous measurements.

Example 2. Cyclic application of proof test.

Example 3. Destructive measurements.

Les exemples 1 et 2 montrent les calculs tels qu'ils sont effectués à l'aide d'une simple calculatrice de bureau. L'exemple 3 suppose l'emploi d'une calculatrice électronique de bureau avec des programmes statistiques incorporés. Les calculs se présentent ainsi sous une forme assez différente et beaucoup plus courte, mais il serait facile de les reprendre sous la forme des exemples 1 et 2 (et réciproquement).

3. Hypothèses

Les hypothèses à la base des méthodes statistiques ci-après 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) Le logarithme du temps jusqu'à dégradation suit une *loi normale* avec la *même variance* à toutes les températures.
- 3) Le logarithme du temps jusqu'à dégradation est une fonction linéaire de l'inverse de la température thermodynamique de vieillissement (équation d'Arrhenius), du moins dans une gamme comprenant tous les points d'essai et points extrapolés.
- 4) L'erreur sur la température d'exposition est négligeable et est la même pour les éprouvettes exposées simultanément.

4. Méthodes et données d'essai

Pour déterminer le profil d'endurance thermique (PET) d'un matériau isolant électrique conformément à un critère de dégradation prescrit, on expose un nombre spécifié d'éprouvettes à chacune des températures d'une série choisie et on détermine les temps jusqu'à dégradation.

Les températures sont choisies conformément à la Publication 216-1 de la CIE et un groupe d'éprouvettes est soumis à un vieillissement à chaque température, soit par cycles, soit de façon continue. La détermination des temps jusqu'à dégradation, c'est-à-dire le temps auquel une propriété spécifiée dépasse un critère de dégradation donné, dépend de la méthode d'essai.

4.1 Essais répétitifs

Chaque éprouvette est essayée à plusieurs reprises au cours du vieillissement, soit par mesure continue de la propriété spécifiée, soit à des temps fixes par mesure ou application d'une contrainte d'épreuve spécifiée.

Si la mesure de la propriété est continue, le temps jusqu'à dégradation pour chaque éprouvette s'obtient directement des valeurs enregistrées sous forme du temps auquel la propriété atteint le critère de dégradation.

Cela s'applique à tous les cas où la propriété est mesurée de façon continue ou par des relevés fréquents au cours du vieillissement par des mesures non destructives.

Si la propriété est mesurée à des temps fixes pendant le vieillissement, la propriété (ou une fonction prédéterminée de la propriété) est portée sur un graphique en fonction du temps (ou d'une fonction du temps) et on détermine sur le graphique les temps individuels jusqu'à dégradation comme les temps auxquels la propriété des éprouvettes individuelles atteint le critère de dégradation.

In examples 1 and 2, the calculations are shown as carried out using a simple desk calculator. In example 3 the use of an electronic desk calculator with built-in statistical programmes is assumed. The calculations therefore present themselves in a somewhat different and much shorter form, but could easily be transformed to the format of examples 1 and 2 (and vice versa).

3. Assumptions

The assumptions underlying the following statistical procedures are:

- 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 were treated uniformly.
- 2) The logarithm of time to failure is *normally distributed* with the *same variance* at all temperatures.
- 3) The logarithm of time to failure depends linearly on the reciprocal thermodynamic ageing temperature (Arrhenius' equation) at least over a range including all test points and extrapolated points.
- 4) The exposure temperature has negligible error, and is the same for all specimens exposed together.

4. Test procedures and data

In order to determine the thermal endurance profile (TEP) of an electrical insulating material according to a prescribed end-point criterion, a specified number of specimens are exposed to each of a series of selected temperatures, and the times to failure determined.

The temperatures are selected in accordance with IEC Publication 216-1, and a group of specimens is aged at each temperature either by cyclic or by continuous ageing. The determination of the times to failure, that is the time when a specified property passes a given end-point criterion, depends on the test procedure.

4.1 Repeated tests

Each specimen is tested repeatedly during ageing, either by continuous measurement of the specified property, or at fixed times by measurement or application of a specified proof stress.

If the property is measured continuously, the time to failure for each specimen is obtained directly from the recorded values as the time when the property passes the end-point criterion.

This applies to all cases where a property is monitored continuously or by frequent scanning during ageing by non-destructive measurements.

If the property is measured at fixed times during ageing, the property (or a predetermined function of the property) is plotted versus time (or a function of the time), and the individual times to failure determined from the graph as the time when the property of the individual specimens passes the end-point criterion.

Cette méthode s'applique aux essais de vieillissement continu et cycliques lorsque la propriété est mesurée à des intervalles peu fréquents (par exemple à la fin de cycles de vieillissement) par des mesures non destructives. Dans certains cas, il peut suffire de considérer le critère de dégradation comme une valeur d'épreuve et d'employer la méthode ci-dessous.

Si une contrainte d'épreuve est appliquée à des temps fixés pendant le vieillissement, le temps jusqu'à dégradation est pris égal à la moyenne du temps auquel l'éprouvette pour la première fois ne satisfait plus à l'épreuve, et du temps de mesure immédiatement antérieur, c'est-à-dire que l'on prend comme temps jusqu'à dégradation le point milieu du dernier cycle auquel l'éprouvette est exposée.

Cette méthode s'applique aux essais cycliques dans lesquels toutes les éprouvettes sont soumises à une contrainte d'épreuve à la fin de chaque cycle, puis exposées à un nouveau cycle tant que l'éprouvette satisfait à l'épreuve.

4.2 Essai unique de chaque éprouvette

Dans chaque cas, on porte les valeurs de la propriété en fonction du temps sur un graphique pour chaque température et on trace la courbe s'ajustant le mieux sur les points. Aux quatre temps de mesure les plus proches de l'intersection de la courbe donnant la meilleure représentation et de la droite représentant le critère de dégradation, on trace des courbes parallèles à celle donnant la meilleure représentation et passant par les points de mesure individuels. Les points où ces courbes coupent la droite du critère de dégradation sont pris comme temps individuels jusqu'à dégradation.

Cette méthode est appliquée dans les cas où la propriété est déterminée par des mesures destructives et ceux de vieillissement continu où, à des temps fixés, on ne retire de l'étuve et rejette après mesure qu'un nombre spécifié d'éprouvettes.

5. Calculs statistiques et décisions

Pour chaque valeur des k températures différentes θ_i °C ($i = 1, 2, \dots, k$), calculer l'inverse de la température thermodynamique

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

et le logarithme décimal des temps jusqu'à dégradation

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

où t_{ij} est le temps jusqu'à dégradation de l'éprouvette n° j à la température θ_i °C ($j = 1, 2, \dots, n_i$), n_i étant le nombre d'éprouvettes exposées à θ_i °C. Le nombre total d'éprouvettes est $N = \sum n_i$.

5.1 Test d'égalité des variances de y_{ij}

Calculer les variances s_{ii}^2 aux différentes valeurs de x_i

$$s_{ii}^2 = \frac{n_i \sum y_{ij}^2 - (\sum y_{ij})^2}{n_i f_i} \quad f_i = n_i - 1$$

et la variance pondérée

$$s_1^2 = \frac{\sum f_i s_{ii}^2}{\sum f_i} \quad f_1 = \sum f_i = N - k$$

This procedure applies to continuous and cyclic ageing tests, where a property is measured at infrequent intervals (e.g. at the end of ageing cycles) by non-destructive measurements. In some cases it may be sufficient to consider the end-point criterion as a proof value, and use the procedure below.

If a proof stress is applied at fixed times during ageing, the time to failure for each specimen is determined as the mean of the time when the specimen first failed to pass the proof test and the immediately preceding measuring time, i.e. the time to failure is taken as the midpoint of the last cycle to which the specimen is exposed.

This procedure applies to cyclic tests where all specimens are tested by proof stress at the end of each cycle, and then exposed to a new cycle, as long as they pass the proof test.

4.2 Single test on each specimen

In each case the property values are plotted versus time in a graph for each temperature, and a curve making the best fit of the points is drawn. At the four measuring times nearest to the crossing point of the best fitting curve and the line representing the end-point criterion, curves are drawn parallel to the best fitting curve through the individual measured points. The points where these curves cross the end-point line are taken as the individual times to failure.

This procedure is used in cases where the property is determined by destructive measurements, and cases of continuous ageing where at fixed times only a specified number of specimens are removed from the oven and discarded after measurement.

5. Statistical calculations and decisions

For each value of the k different temperatures θ_i °C ($i = 1, 2, \dots k$), calculate the reciprocal value of the thermodynamic temperature

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

and the common (Briggsian) logarithm (i.e. the logarithm to the base of 10) of the times to failure

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

Here t_{ij} is the time to failure of specimen No. j at temperature θ_i °C ($j = 1, 2, \dots n_i$), where n_i is the number of specimens exposed at θ_i °C. The total number of specimens equals $N = \sum n_i$.

5.1 Testing the equality of the variances of y_{ij}

Calculate the variances s_{ii}^2 at the different values of x_i

$$s_{ii}^2 = \frac{n_i \sum y_{ij}^2 - (\sum y_{ij})^2}{n_i f_i} \quad f_i = n_i - 1$$

and the pooled variance

$$s_1^2 = \frac{\sum f_i s_{ii}^2}{\sum f_i} \quad f_1 = \sum f_i = N - k$$

On compare ces variances par le test de Bartlett. On calcule

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

et la variable de test

$$\chi^2 = 2,3 \cdot \frac{f_1 \cdot \lg s_1^2 - \sum (f_i \cdot \lg s_{1i}^2)}{c}.$$

On compare la variable de test χ^2 à la valeur tabulaire $\chi^2(0,95, k-1)$ de l'annexe A.

Si $\chi^2 > \chi^2(0,95, k-1)$, la valeur de χ^2 doit être notée en liaison avec le profil d'endurance thermique.

5.2 Coefficients de régression

Calculer les coefficients de l'équation de régression

$$y = a + bx$$

à partir de

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

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

$$\bar{y} = \frac{\sum n_i \bar{y}_i}{N}$$

sous la forme

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

et

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

Tracer la droite de régression sur un graphique d'endurance thermique (voir figure 1, page 23).

5.3 Test de linéarité

Calculer

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

où

$$f_2 = k - 2,$$

et le rapport de s_2^2 à s_1^2 obtenu à partir du paragraphe 5.1

$$F = \frac{s_2^2}{s_1^2}$$

These variances are compared by Bartlett's test. One calculates

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

and the test variable

$$\chi^2 = 2.3 \cdot \frac{f_1 \cdot \lg s_1^2 - \sum (f_i \cdot \lg s_{1i}^2)}{c}.$$

The test variable χ^2 is compared with the tabulated value $\chi^2(0.95, k-1)$ from Appendix A.

If $\chi^2 > \chi^2(0.95, k-1)$, the value of χ^2 shall be reported in connection with the thermal endurance profile.

5.2 Regression coefficients

Calculate the coefficients of the regression equation

$$y = a + bx$$

from

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

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

$$\bar{y} = \frac{\sum n_i \bar{y}_i}{N}$$

as

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

and

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

Draw the regression line on a thermal endurance graph (see Figure 1, page 23).

5.3 Test for linearity

Calculate

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

where

$$f_2 = k - 2,$$

and the ratio of s_2^2 and s_1^2 from Sub-clause 5.1

$$F = \frac{s_2^2}{s_1^2}$$

On compare la variable d'essai F à la valeur classifiée $F(0,95, f_n, f_d)$ de l'annexe A avec $f_n = f_2$ et $f_d = f_1$.

Si $F > F(0,95, f_n, f_d)$, on note au procès-verbal la valeur de F en liaison avec le profil d'endurance thermique.

L'estimateur pondéré de la variance se calcule comme

$$s^2 = \frac{f_1 s_1^2 + f_2 s_2^2}{f}$$

avec

$$f = N - 2$$

5.4 Limite de confiance sur y

Pour des valeurs choisies de X , calculer

$$Y = a + bX,$$

et

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

Déterminer $t = t(0,95, f)$ dans l'annexe A et calculer la limite de confiance unilatérale inférieure sur y comme:

$$Y_c = Y - t s_y,$$

où s_y est la racine carrée de la variance s_y^2 .

On porte les valeurs associées de X et Y_c sur le graphique d'endurance thermique (voir paragraphe 5.2) et on trace sur le graphique une courbe passant par les points (X, Y_c) qui donne la limite de confiance unilatérale inférieure à 95% sur la valeur vraie de y à une valeur donnée de x .

5.5 Coefficient de variation

A partir de l'équation de régression, on calcule la valeur X_5 correspondant à $Y_5 = 3,7$ (temps jusqu'à dégradation 5 000 h)

$$X_5 = \frac{Y_5 - a}{b},$$

et la variance correspondante sur Y_5

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

Si le coefficient de variation

$$CV = \frac{s_y}{3,7}$$

est supérieur à 0,015, on arrête les calculs et on ne note au procès-verbal que le graphique d'endurance thermique.

The test variable F is compared with the tabulated value $F(0.95, f_n, f_d)$ from Appendix A with $f_n = f_2$ and $f_d = f_1$.

If $F > F(0.95, f_n, f_d)$, the value of F shall be reported in connection with the thermal endurance profile.

A pooled estimate of the variance is calculated as

$$s^2 = \frac{f_1 s_1^2 + f_2 s_2^2}{f}$$

where

$$f = N - 2$$

5.4 Confidence limit on y

For selected values of X calculate

$$Y = a + bX,$$

and

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

Determine $t = t(0.95, f)$ from Appendix A, and calculate the lower unilateral confidence limit on y as

$$Y_c = Y - t s_y,$$

where s_y is the square root of the variance s_y^2 .

The connected values of X and Y_c are plotted on the thermal endurance graph (see Sub-clause 5.2) and a curve drawn through the points (X, Y_c) on the graph, giving the lower unilateral 95% confidence limit on the true value of y at a given value of x .

5.5 The coefficient of variation

From the regression equation one calculates the value X_5 corresponding to $Y_5 = 3.7$ (time to failure 5 000 h)

$$X_5 = \frac{Y_5 - a}{b},$$

and the corresponding variance on Y_5

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

If the coefficient of variation

$$CV = \frac{s_y}{3.7}$$

is greater than 0.015 the calculations are stopped and only the thermal endurance graph reported.

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

Calculer

$$X_{20} = \frac{4,3 - a}{b}$$

et

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

$$\theta_5 = \frac{1}{X_5} - 273 \quad (\text{à partir du paragraphe 5.5}).$$

5.7 Limite de confiance sur θ_5

Calculer

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

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

et

$$X_c = \bar{x} + \frac{X_5 - \bar{y}}{b_r} + \frac{t s_r}{b_r}$$

où $t = t(0,95, f)$ comme dans le paragraphe 5.4,

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

5.8 Profil d'endurance thermique

On note au procès-verbal le PET sous la forme:

$$\theta_{20}/\theta_5 (\theta_c).$$

6. Exemples

Dans le texte qui suit, les calculs sont illustrés par des exemples numériques et effectués de proche en proche à l'aide d'une simple calculatrice de bureau et éventuellement d'une règle à calcul et d'une table de logarithmes. Pour plus de commodité on a employé les abréviations suivantes:

S = somme	P = produit	V = variance
D = différence	M = moyenne	R = inverse
Q = carré		

de sorte que, par exemple, SQD signifie la somme des carrés des différences. Les indices sont placés entre parenthèses. L'emploi des symboles ressort des tableaux.

5.6 Temperatures corresponding to 20 kh and 5 kh to failure

Calculate

$$X_{20} = \frac{4.3 - a}{b}$$

and

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

$$\theta_5 = \frac{1}{X_5} - 273 \quad (\text{from Sub-clause 5.5}).$$

5.7 Confidence limit on θ_5

Calculate

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

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

and

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

where $t = t(0.95, f)$ as in Sub-clause 5.4,

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

5.8 Thermal endurance profile

The TEP is reported as

$$\theta_{20}/\theta_5.(\theta_c).$$

6. Examples

In the following, the calculations are illustrated by means of numerical examples as carried out step by step using a simple desk calculator and possibly a slide rule and a table of logarithms. For convenience the following abbreviations have been used:

S = sum

P = product

V = variance

D = difference

M = mean

R = reciprocal

Q = square

so that, e.g., SQD means the sum of the squares of the differences. Indices are placed in parentheses. The use of the symbols will appear from the tables.

6.1 Exemple 1. Mesures continues

Les essais d'un matériau s'effectuent par la mesure continue d'une propriété, par exemple la résistance d'isolement.

Le temps jusqu'à dégradation se détermine pour chaque éprouvette comme le temps auquel la résistance d'isolement devient inférieure à une valeur spécifiée (critère de dégradation).

La gamme de températures escomptée correspondant à un temps jusqu'à dégradation de 20 000 h est celle de 160 °C à 169 °C. On choisit trois températures d'exposition θ_i °C dans le tableau I de la Publication 216-1, à savoir 180 °C, 200 °C et 220 °C, c'est-à-dire que $k = 3$ ($i = 1, 2, 3$).

On prépare un total d'au moins $N = 15$ éprouvettes et on choisit au hasard cinq éprouvettes pour les exposer à chaque température, $n_i = 5$ ($j = 1, 2, 3, 4, 5$).

Les temps jusqu'à dégradation obtenus, t_{ij} en heures, sont donnés dans le tableau I.

Ce tableau indique également le calcul de l'inverse de la température thermodynamique x_i et les valeurs de $y_{ij} = \lg t_{ij}$. Pour plus de commodité les valeurs de x ont été multipliées par 1 000.

Le tableau II montre le calcul du profil d'endurance thermique.

6.1.1 Les variances $s_{t_i}^2$ se calculent comme point (14), $V(1, i)$, avec $f(i) = 4$ degrés de liberté et la variance pondérée s_f^2 comme point (26), $V(1)$ avec $f(1) = 12$ degrés de liberté. La variable de test $\chi^2 = 0,17$, point (34), est comparée à $\chi^2(0,95, 2) = 6,0$, point (35). Comme $\chi^2 < \chi^2(0,95, 2)$, la valeur de χ^2 n'est pas significative au niveau 5%.

6.1.2 On calcule les coefficients de régression $a = -7,604$, point (53), et $b = 5,174$, point (51). On trace la droite de régression

$$y = -7,604 + 5,174 x$$

sur un graphique d'endurance thermique (figure 1, page 23).

6.1.3 On compare la variable de test $F = 0,7$, point (63), à $F(0,95, 1, 12) = 4,8$, point (64). Comme $F < F(0,95, 1, 12)$, la valeur de F n'est pas significative au niveau 5%.

6.1.4 On choisit les températures de 220 °C, 200 °C, 180 °C et 160 °C, point (70). On calcule les limites de confiance à 95% t_c , point (83), sur les valeurs correspondantes de t , point (84), avec le t de Student, $t(0,95, 13) = 1,77$, point (69), et on les porte sur le graphique d'endurance thermique.

6.1.5 On calcule le coefficient de variation $CV = 0,009$, point (97). Comme $CV < 0,015$, on poursuit les calculs.

6.1.6 On calcule les valeurs $\theta_5 = 185$ et $\theta_{20} = 162$ comme point (90).

6.1.7 On calcule la limite de confiance à 95% $\theta_c = 182$ sur θ_5 comme point (113).

6.1.8 Le profil d'endurance thermique est

$$PET = 162/185 (182).$$

6.1 Example 1. Continuous measurements

A material is tested by continuous measurements of a property, for instance insulation resistance.

The time to failure is determined for each specimen as the time when the insulation resistance falls below a specified value (the end-point criterion).

The expected temperature range corresponding to an extrapolated time to failure of 20 000 h is 160 °C to 169 °C. Three exposure temperatures θ_i °C are selected from Table I of IEC Publication 216-1, namely 180 °C, 200 °C and 220 °C, i.e. $k = 3$ ($i = 1, 2, 3$).

A total of at least $N = 15$ specimens are prepared, and five specimens selected at random are exposed at each temperature, $n_i = 5$ ($j = 1, 2, 3, 4, 5$).

The times to failure, t_{ij} hours obtained are given in Table I.

Table I also shows the calculation of the reciprocal thermodynamic temperature x_i , and the values of $y_{ij} = \lg t_{ij}$. For convenience the values of x have been multiplied by 1 000.

Table II shows the calculation of the thermal endurance profile.

6.1.1 The variances $s_{t_i}^2$ are calculated as Item (14), $V(1, i)$, with $f(i) = 4$ degrees of freedom, and the pooled variance s_t^2 as Item (26), $V(1)$ with $f(1) = 12$ degrees of freedom. The test variable $\chi^2 = 0.17$, Item (34), is compared with $\chi^2(0.95, 2) = 6.0$, Item (35). Since $\chi^2 < \chi^2(0.95, 2)$, the value of χ^2 is not significant on the 5% level.

6.1.2 The regression coefficients $a = -7.604$, Item (53), and $b = 5.174$, Item (51) are calculated. The regression line

$$y = -7.604 + 5.174 x$$

is drawn in a thermal endurance graph (Figure 1, page 23).

6.1.3 The test variable $F = 0.7$, Item (63), is compared with $F(0.95, 1, 12) = 4.8$, Item (64). Since $F < F(0.95, 1, 12)$ the value of F is not significant on the 5% level.

6.1.4 The temperatures 220 °C, 200 °C, 180 °C and 160 °C, Item (70), are chosen. The 95% confidence limits t_c , Item (83), on the corresponding values of t , Item (84), with Student's t , $t(0.95, 13) = 1.77$, Item (69), are calculated and plotted on the thermal endurance graph.

6.1.5 The coefficient of variation $CV = 0.009$, Item (97), is calculated. Since $CV < 0.015$, the calculations are continued.

6.1.6 The values $\theta_5 = 185$ and $\theta_{20} = 162$ are calculated as Item (90).

6.1.7 The 95% confidence limit $\theta_c = 182$ on θ_5 is calculated as Item (113).

6.1.8 The thermal endurance profile is

$$TEP = 162/185(182).$$

TABLEAU I

Données d'essai et calcul des variables x et y

t = temps jusqu'à dégradation en heures, $y = \lg t$.

i		1		2		3	
Nombre d'éprouvettes	n	5		5		5	
Température d'exposition	θ	220		200		180	
Température thermodynamique $(273 + \theta)$, Θ		493		473		453	
$1\,000/\Theta$	x	2,028		2,114		2,208	
Numéro de l'éprouvette	j	t	y	t	y	t	y
	1	1 100	3,04	2 400	3,38	7 410	3,87
	2	740	2,87	1 820	3,26	6 610	3,82
	3	720	2,86	1 660	3,22	6 170	3,79
	4	620	2,79	1 740	3,24	5 500	3,74
	5	910	2,96	2 700	3,43	8 910	3,95

TABLE I
Test data and calculation of the variables x and y

t = time to failure in hours, $y = \lg t$.

	i	1	2	3
Number of specimens	n	5	5	5
Exposure temperature	θ	220	200	180
Thermodynamic temperature $(273 + \theta)$,	Θ	493	473	453
$1\,000/\Theta$	x	2.028	2.114	2.208
Specimen number	j	t y	t y	t y
	1	1 100 3.04	2 400 3.38	7 410 3.87
	2	740 2.87	1 820 3.26	6 610 3.82
	3	720 2.86	1 660 3.22	6 170 3.79
	4	620 2.79	1 740 3.24	5 500 3.74
	5	910 2.96	2 700 3.43	8 910 3.95

— Page blanche —

— Blank page —

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60216-4:1980

Withdrawn

×	Points de mesure Measured points	_____	Droite de régression Regression line
○	Limite de confiance à 95% sur t 95% confidence limit on t	_____	Limite de confiance à 95% sur t 95% confidence limit on t
○	θ_5 et θ_{20} θ_5 and θ_{20}		
×	θ_c		

FIG. 1. — Graphique d'endurance thermique.
Thermal endurance graph.

TABLEAU II
Calcul du PET

		i	1	2	3
(1)	$n(i)$	pris dans le tableau I	5	5	5
(2)	$x(i)$	pris dans le tableau I	2,028	2,114	2,208
(3)	$Qx(i)$	(2) au carré	4,112 784	4,468 996	4,875 264
(4)	$y(i, j)$	pris dans le tableau I	3,04	3,38	3,87
			2,87	3,26	3,82
			2,86	3,22	3,79
			2,79	3,24	3,74
			2,96	3,43	3,95
(5)	$Qy(i, j)$	(4) au carré	9,2416	11,4244	14,9769
			8,2369	10,6276	14,5924
			8,1796	10,3684	14,3641
			7,7841	10,4976	13,9876
			8,7616	11,7649	15,6025
(6)	$Sy(i)$	(4) additionné	14,52	16,53	19,17
(7)	$SQy(i)$	(5) additionné	42,2038	54,6829	73,5235
(8)	$n(i) \cdot SQy(i)$	(1) · (7)	211,0190	273,4145	367,6175
(9)	$QSy(i)$	(6) au carré	210,8304	273,2409	367,4889
(10)	$n(i) \cdot SQDy(i)$	(8) - (9)	0,1886	0,1736	0,1286
(11)	$SQDy(i)$	(10)/(1)	0,037 72	0,034 72	0,025 72
(12)	$f(i)$	(1) - 1	4	4	4
(13)	$Rf(i)$	1/(12)	0,25	0,25	0,25
(14)	$V(1, i)$	(11)/(12)	0,009 43	0,008 68	0,006 43
(15)	$\lg V(1, i)$	$\lg$ de (14)	0,975-3	0,939-3	0,808-3
(16)	$f(i) \cdot \lg V(1, i)$	(12) · (15)	3,900-12	3,756-12	3,232-12
(17)	$My(i)$	(6)/(1)	2,90	3,31	3,83
(18)	$n(i) \cdot Qx(i)$	(1) · (3)	20,563 92	22,344 98	24,376 32
(19)	$n(i) \cdot x(i)$	(1) · (2)	10,14	10,57	11,04
(20)	$x(i) \cdot Sy(i)$	(2) · (6)	29,446 56	34,944 42	42,327 36
(21)	$QSy(i)/n(i)$	(9)/(1)	42,166 08	54,648 18	73,497 78
(22)	$SSQDy$	(11) additionné		0,098 16	
(23)	SRf	(13) additionné		0,75	
(24)	$f(1)$	(12) additionné		12	
(25)	$Rf(1)$	1/(24)		0,083	
(26)	$V(1)$	(22)/(24)		0,0082	
(27)	$\lg V(1)$	$\lg$ de (26)		0,914-3	
(28)	$L(1)$	(24) · (27)		10,968-36	
(29)	L	(16) additionné		10,888-36	
(30)	$L(1) - L$	(28) - (29)		0,080	
(31)	RF	(23) - (25)		0,67	
(32)	$RF/3(k-1)$	(31)/3(k-1)		0,11	
(33)	ϵ	1 + (32)		1,11	
(34)	χ^2	2,3 (30)/(33)		0,17	
(35)	$\chi^2(0,95, k-1)$	pris dans le tableau de A		6,0	
(36)	N	(1) additionné		15	
(37)	Sx	(19) additionné		31,75	
(38)	Mx	(37)/(36)		2,1167	
(39)	SQx	(18) additionné		67,285 22	
(40)	$N \cdot SQx$	(36) · (39)		1 009,2783	
(41)	QSx	(37) au carré		1 008,0625	
(42)	$N \cdot SQDx$	(40) - (41)		1,2158	
(43)	$SQDx$	(42)/(36)		0,081 05	
(44)	Sy	(6) additionné		50,22	
(45)	My	(44)/(36)		3,348	
(46)	$SPxy$	(20) additionné		106,718 34	

(à suivre)

TABLE II
Calculation of TEP

		i	1	2	3
(1)	$n(i)$	from Table I	5	5	5
(2)	$x(i)$	from Table I	2.028	2.114	2.208
(3)	$Qx(i)$	(2) squared	4.112 784	4.468 996	4.875 264
(4)	$y(i, j)$	from Table I	3.04	3.38	3.87
			2.87	3.26	3.82
			2.86	3.22	3.79
			2.79	3.24	3.74
			2.96	3.43	3.95
(5)	$Qy(i, j)$	(4) squared	9.2416	11.4244	14.9769
			8.2369	10.6276	14.5924
			8.1796	10.3684	14.3641
			7.7841	10.4976	13.9876
			8.7616	11.7649	15.6025
(6)	$Sy(i)$	(4) summed	14.52	16.53	19.17
(7)	$SQy(i)$	(5) summed	42.2038	54.6829	73.5235
(8)	$n(i) \cdot SQy(i)$	(1) · (7)	211.0190	273.4145	367.6175
(9)	$QSy(i)$	(6) squared	210.8304	273.2409	367.4889
(10)	$n(i) \cdot SQDy(i)$	(8) - (9)	0.1886	0.1736	0.1286
(11)	$SQDy(i)$	(10)/(1)	0.037 72	0.034 72	0.025 72
(12)	$f(i)$	(1) - 1	4	4	4
(13)	$Rf(i)$	1/(12)	0.25	0.25	0.25
(14)	$V(1, i)$	(11)/(12)	0.009 43	0.008 68	0.006 43
(15)	$\lg V(1, i)$	$\lg$ of (14)	0.975-3	0.939-3	0.808-3
(16)	$f(i) \cdot \lg V(1, i)$	(12) · (15)	3.900-12	3.756-12	3.232-12
(17)	$My(i)$	(6)/(1)	2.90	3.31	3.83
(18)	$n(i) \cdot Qx(i)$	(1) · (3)	20.563 92	22.344 98	24.376 32
(19)	$n(i) \cdot x(i)$	(1) · (2)	10.14	10.57	11.04
(20)	$x(i) \cdot Sy(i)$	(2) · (6)	29.446 56	34.944 42	42.327 36
(21)	$QSy(i)/n(i)$	(9)/(1)	42.166 08	54.648 18	73.497 78
(22)	$SSQDy$	(11) summed		0.098 16	
(23)	SRf	(13) summed		0.75	
(24)	$f(1)$	(12) summed		12	
(25)	$Rf(1)$	1/(24)		0.083	
(26)	$V(1)$	(22)/(24)		0.0082	
(27)	$\lg V(1)$	$\lg$ of (26)		0.914-3	
(28)	$L(1)$	(24) · (27)		10.968-36	
(29)	L	(16) summed		10.888-36	
(30)	$L(1) - L$	(28) - (29)		0.080	
(31)	RF	(23) - (25)		0.67	
(32)	$RF/3(k-1)$	(31)/3(k-1)		0.11	
(33)	c	1 + (32)		1.11	
(34)	χ^2	2.3 (30)/(33)		0.17	
(35)	$\chi^2(0.95, k-1)$	from Table of A		6.0	
(36)	N	(1) summed		15	
(37)	Sx	(19) summed		31.75	
(38)	Mx	(37)/(36)		2.1167	
(39)	SQx	(18) summed		67.285 22	
(40)	$N \cdot SQx$	(36) · (39)		1 009.2783	
(41)	QSx	(37) squared		1 008.0625	
(42)	$N \cdot SQDx$	(40) - (41)		1.2158	
(43)	$SQDx$	(42)/(36)		0.081 05	
(44)	Sy	(6) summed		50.22	
(45)	My	(44)/(36)		3.348	
(46)	$SPxy$	(20) summed		106.718 34	

(continued)

TABLEAU II (suite)

(47)	$N \cdot SP_{xy}$	(36) · (46)	1 600,7751	
(48)	$S_x \cdot S_y$	(37) · (44)	1 594,4850	
(49)	$N \cdot SPD_{xy}$	(47) - (48)	6,2901	
(50)	SPD_{xy}	(49)/(36)	0,419 34	
(51)	b	(50)/(43)	5,174	
(52)	$b \cdot M_x$	(51) · (38)	10,952	
(53)	a	(45) - (52)	- 7,604	
(54)	SQ_y	(21) additionné	170,3120	
(55)	$N \cdot SQ_y$	(36) · (54)	2 554,680	
(56)	QS_y	(44) au carré	2 522,048	
(57)	$N \cdot SQD_y$	(55) - (56)	32,632	
(58)	SQD_y	(57)/(36)	2,175 47	
(59)	$b \cdot SPD_{xy}$	(51) · (50)	2,169 67	
(60)	$SQDM_y$	(58) - (59)	0,005 80	
(61)	$f(2)$	$k - 2$	1	
(62)	$V(2)$	(60)/(61)	0,0058	
(63)	F	(62)/(26)	0,7	
(64)	$F(0,95, k - 2, N - k)$	pris dans le tableau de A	4,8	
(65)	$SSSQD_y$	(22) + (60)	0,103 96	
(66)	f	(36) - 2	13	
(67)	V	(65)/(66)	0,008 00	
(68)	$1/N$	$1/(36)$	0,0667	
(69)	$t(0,95, N - 2)$	pris dans le tableau de A	1,77	
(70)	θ		220	200
(71)	Θ	(70) + 273	493	473
(72)	X	$10^3/(71)$	2,028	2,114
(73)	$b \cdot X$	(51) · (72)	10,493	10,938
(74)	Y	(73) + (53)	2,889	3,334
(75)	DX	(72) - (38)	- 0,0887	- 0,0027
(76)	QDX	(75) au carré	0,007 87	0,000 01
(77)	QDX/SQD_x	(76)/(43)	0,097 10	0,000 12
(78)	C	(68) + (77)	0,1638	0,0668
(79)	$V(Y)$	(67) · (78)	0,001 31	0,000 53
(80)	$s(Y)$	racine carrée de (79)	0,036	0,023
(81)	$t \cdot s(Y)$	(69) · (80)	0,064	0,041
(82)	$Y(c)$	(74) - (81)	2,825	3,293
(83)	$t(c)$	$\lg^{-1}$ de (82)	668	1 960
(84)	t	$\lg^{-1}$ de (74)	774	2 160
(85)	T		5 000	20 000
(86)	Y	$\lg$ de (85)	3,699	4,301
(87)	$Y - a$	(86) - (53)	11,303	11,905
(88)	X	(87)/(51)	2,185	2,301
(89)	Θ	$10^3/(88)$	458	435
(90)	θ	(89) - 273	185	162
(91)	DX	(88) - (38)	0,0683	
(92)	QDX	(91) au carré	0,004 66	
(93)	QDX/SQD_x	(92)/(43)	0,0576	
(94)	C	(68) + (93)	0,1243	
(95)	$V(Y)$	(67) · (94)	0,000 99	
(96)	$s(Y)$	racine carrée de (95)	0,032	
(97)	CV	(96)/(86)	0,009	

(à suivre)

TABLE II (continued)

(47)	$N \cdot SP_{xy}$	(36) · (46)	1 600.7751			
(48)	$Sx \cdot Sy$	(37) · (44)	1 594.4850			
(49)	$N \cdot SPD_{xy}$	(47) - (48)	6.2901			
(50)	SPD_{xy}	(49)/(36)	0.419 34			
(51)	b	(50)/(43)	5.174			
(52)	$b \cdot Mx$	(51) · (38)	10.952			
(53)	a	(45) - (52)	-7.604			
(54)	SQ_y	(21) summed	170.3120			
(55)	$N \cdot SQ_y$	(36) · (54)	2 554.680			
(56)	QSy	(44) squared	2 522.048			
(57)	$N \cdot SQD_y$	(55) - (56)	32.632			
(58)	SQD_y	(57)/(36)	2.175 47			
(59)	$b \cdot SPD_{xy}$	(51) · (50)	2.169 67			
(60)	$SQDM_y$	(58) - (59)	0.005 80			
(61)	$f(2)$	$k - 2$	1			
(62)	$V(2)$	(60)/(61)	0.0058			
(63)	F	(62)/(26)	0.7			
(64)	$F(0.95, k - 2, N - k)$	from Table of A	4.8			
(65)	$SSSQD_y$	(22) + (60)	0.103 96			
(66)	f	(36) - 2	13			
(67)	V	(65)/(66)	0.008 00			
(68)	$1/N$	$1/(36)$	0.0667			
(69)	$t(0.95, N - 2)$	from Table of A	1.77			
(70)	θ		220	200	180	160
(71)	Θ	(70) + 273	493	473	453	433
(72)	X	$10^3/(71)$	2.028	2.114	2.208	2.309
(73)	$b \cdot X$	(51) · (72)	10.493	10.938	11.424	11.947
(74)	Y	(73) + (53)	2.889	3.334	3.820	4.343
(75)	DX	(72) - (38)	-0.0887	-0.0027	0.0913	0.1923
(76)	QDX	(75) squared	0.007 87	0.000 01	0.008 34	0.036 98
(77)	QDX/SQD_x	(76)/(43)	0.097 10	0.000 12	0.102 90	0.456 26
(78)	C	(68) + (77)	0.1638	0.0668	0.1696	0.5230
(79)	$V(Y)$	(67) · (78)	0.001 31	0.000 53	0.001 36	0.004 18
(80)	$s(Y)$	square root of (79)	0.036	0.023	0.037	0.065
(81)	$t \cdot s(Y)$	(69) · (80)	0.064	0.041	0.065	0.115
(82)	$Y(c)$	(74) · (81)	2.825	3.293	3.755	4.228
(83)	$t(c)$	$\lg^{-1}$ of (82)	668	1 960	5 690	16 900
(84)	t	$\lg^{-1}$ of (74)	774	2 160	6 610	22 000
(85)	T		5 000		20 000	
(86)	Y	$\lg$ of (85)	3.699		4.301	
(87)	$Y - a$	(86) - (53)	11.303		11.905	
(88)	X	(87)/(51)	2.185		2.301	
(89)	Θ	$10^3/(88)$	458		435	
(90)	θ	(89) - 273	185		162	
(91)	DX	(88) - (38)	0.0683			
(92)	QDX	(91) squared	0.004 66			
(93)	QDX/SQD_x	(92)/(43)	0.0576			
(94)	C	(68) + (93)	0.1243			
(95)	$V(Y)$	(67) · (94)	0.000 99			
(96)	$s(Y)$	square root of (95)	0.032			
(97)	CV	(96)/(86)	0.009			

(continued)

TABLEAU II (fin)

(98)	Qt	(69) au carré	3,13
(99)	$V \cdot Qt$	(67) · (98)	0,025
(100)	$V \cdot Qt/SPD_{xy}$	(99)/(50)	0,060
(101)	$b(r)$	(51) - (100)	5,114
(102)	$b(r)/b$	(101)/(51)	0,988
(103)	$b(r)/b \cdot N$	(102) · (68)	0,0659
(104)	$C(r)$	(103) + (93)	0,1235
(105)	$V(r)$	(67) · (104)	0,000 99
(106)	$s(r)$	racine carrée de (105)	0,0314
(107)	$t \cdot s(r)$	(69) · (106)	0,0556
(108)	$t \cdot s(r)/b(r)$	(107)/(101)	0,0109
(109)	DY	(86) - (45)	0,351
(110)	$DY/b(r)$	(109)/(101)	0,0086
(111)	$X(c)$	(38) + (110) + (108)	2,196
(112)	$\Theta(c)$	$10^3/(111)$	455
(113)	$\theta(c)$	(112) - 273	182

6.2 Exemple 2. Application cyclique de l'essai d'épreuve

Les essais d'un matériau s'effectuent par un essai d'épreuve, par exemple l'application d'une tension spécifiée pendant une minute conformément au tableau II de la Publication 216-2 (essai 1.1).

La gamme de températures escomptée correspondant à un temps jusqu'à dégradation extrapolé de 20 000 h est celle de 140 °C à 149 °C. On choisit trois températures d'exposition θ °C et trois durées par cycle t_p en heures dans le tableau I de la Publication 216-1, comme indiqué dans le tableau III de la présente publication.

On prépare un total d'au moins $N = 30$ éprouvettes et on les soumet préalablement à l'essai d'épreuve. On remplace les éprouvettes éventuellement défectueuses. On choisit au hasard dix éprouvettes et on les expose à chacune des trois températures, c'est-à-dire que $k = 3$ ($i = 1, 2, 3$) et $n_i = 10$ ($j = 1, 2, \dots, 10$).

Après chaque exposition pendant les temps spécifiés t_p en heures, on retire les éprouvettes de l'étuve et on les soumet à l'essai d'épreuve. Les éprouvettes ayant satisfait à l'essai sont remises dans l'étuve pour un autre cycle tandis que l'on note, pour celles qui n'ont pas satisfait à l'essai, le nombre de cycles p auxquels elles ont été exposées. On prend pour temps jusqu'à dégradation le point milieu du dernier cycle, c'est-à-dire $t = t_p \cdot (p - 0,5)$.

Le calcul des variables $y = \lg t$ et x_i , inverse de la température thermodynamique, est indiqué dans le tableau IV. Pour plus de commodité, les valeurs de x ont été multipliées par 1 000.

Les calculs se poursuivent comme dans l'exemple 1; voir tableau V, où les nombres entre parenthèses se rapportent aux points correspondants du tableau II.

TABLE II (end)

(98)	Qt	(69) squared	3.13
(99)	$V \cdot Qt$	(67) · (98)	0.025
(100)	$V \cdot Qt/SPD_{xy}$	(99)/(50)	0.060
(101)	$b(r)$	(51) - (100)	5.114
(102)	$b(r)/b$	(101)/(51)	0.988
(103)	$b(r)/b \cdot N$	(102) · (68)	0.0659
(104)	$C(r)$	(103) + (93)	0.1235
(105)	$V(r)$	(67) · (104)	0.000 99
(106)	$s(r)$	square root of (105)	0.0314
(107)	$t \cdot s(r)$	(69) · (106)	0.0556
(108)	$t \cdot s(r)/b(r)$	(107)/(101)	0.0109
(109)	DY	(86) - (45)	0.351
(110)	$DY/b(r)$	(109)/(101)	0.0686
(111)	$X(c)$	(38) + (110) + (108)	2.196
(112)	$\Theta(c)$	$10^3/(111)$	455
(113)	$\theta(c)$	(112) - 273	182

6.2 Example 2. Cyclic application of proof test

A material is tested by a proof test, for instance application of a specified voltage for one minute in accordance with Table II of IEC Publication 216-2. (Test 1.1).

The expected temperature range corresponding to an extrapolated time to failure of 20 000 h is 140 °C to 149 °C. Three exposure temperatures θ °C and three cycle times t_p hours are selected from Table I of IEC Publication 216-1, as shown in Table III of the present publication.

A total of at least $N = 30$ specimens are prepared and tested in advance by the proof test. Any failures are replaced. Ten specimens selected at random are then exposed at each of the three temperatures, that is, $k = 3$ ($i = 1, 2, 3$) and $n_i = 10$ ($j = 1, 2, \dots, 10$).

After each exposure at the specified times t_p hours, the specimens are removed from the oven and tested by the proof test. The specimens withstanding the test are restored to the oven for another cycle, while for those failing, the number of cycles, p , to which they have been exposed, is noted (Table III). The time to failure is taken as the midpoint of the last cycle, that is $t = t_p \cdot (p - 0.5)$.

The calculation of the variables $y = \lg t$, and x_i , the reciprocal thermodynamic temperature, is shown in Table IV. For convenience the values of x have been multiplied by 1 000.

The calculations then proceed as in example 1; see Table V, where the numbers in parentheses refer to the corresponding items in Table II.

TABLEAU III
Données d'essai

i	1	2	3
Température d'exposition θ	200	180	160
Durée par cycle en heures t_p	48	168	672
Numéro j	Nombre p de cycles		
1	14	7	7
2	10	13	7
3	8	7	6
4	10	6	7
5	14	9	9
6	11	8	7
7	9	11	9
8	12	12	11
9	8	6	8
10	9	10	8

TABLEAU IV
Calcul des variables x et y

i	1	2	3
n	10	10	10
θ	200	180	160
$x = \frac{10^3}{\theta + 273}$	2,114	2,208	2,309

j	t	y	t	y	t	y
1	648	2,81	1 092	3,04	4 368	3,64
2	456	2,66	2 100	3,32	4 368	3,64
3	360	2,56	1 092	3,04	3 696	3,57
4	456	2,66	924	2,97	4 368	3,64
5	648	2,81	1 428	3,15	5 712	3,76
6	504	2,70	1 260	3,10	4 368	3,64
7	408	2,61	1 764	3,25	5 712	3,76
8	552	2,74	1 932	3,29	7 056	3,85
9	360	2,56	924	2,97	5 040	3,70
10	408	2,61	1 596	3,20	5 040	3,70

TABLE III

Test data

i	1	2	3
Exposure temperature θ	200	180	160
Time in hours per cycle t_p	48	168	672
Item number j	Number of cycles p		
1	14	7	7
2	10	13	7
3	8	7	6
4	10	6	7
5	14	9	9
6	11	8	7
7	9	11	9
8	12	12	11
9	8	6	8
10	9	10	8

TABLE IV

Calculation of the variables x and y

i	1	2	3
n	10	10	10
θ	200	180	160
$x = \frac{10^3}{\theta + 273}$	2.114	2.208	2.309
j	t y		t y
1	648	2.81	1 092 3.04
2	456	2.66	2 100 3.32
3	360	2.56	1 092 3.04
4	456	2.66	924 2.97
5	648	2.81	1 428 3.15
6	504	2.70	1 260 3.10
7	408	2.61	1 764 3.25
8	552	2.74	1 932 3.29
9	360	2.56	924 2.97
10	408	2.61	1 596 3.20

TABLEAU V
Calcul du PET

	1	2	3		
(1)	10	10	10	(36)	30
(2)	2,114	2,208	2,309	(37)	66,31
(3)	4,468 995	4,875 264	5,331 481	(38)	2,2103
(4)	2,81	3,04	3,64	(39)	146,7574
	2,66	3,32	3,64	(40)	4402,7220
	2,56	3,04	3,57	(41)	4397,0161
	2,66	2,97	3,64	(42)	5,7059
	2,81	3,15	3,76	(43)	0,190 20
	2,70	3,10	3,64	(44)	94,95
	2,61	3,25	3,76	(45)	3,165
	2,74	3,29	3,85	(46)	210,864 82
	2,56	2,97	3,70	(47)	6325,9446
	2,61	3,20	3,70	(48)	6296,1345
(5)	7,8961	9,2416	13,2496	(49)	29,8101
	7,0756	11,0224	13,2496	(50)	0,993 67
	6,5536	9,2416	12,7449	(51)	5,224
	7,0756	8,8209	13,2496	(52)	11,547
	7,8961	9,9225	14,1376	(53)	-8,382
	7,2900	9,6100	13,2496		
	6,8121	10,5625	14,1376	(54)	305,713 73
	7,5076	10,8241	14,8225	(55)	9171,4119
	6,5536	8,8209	13,6900	(56)	9015,5025
	6,8121	10,2400	13,6900	(57)	155,9094
(6)	26,72	31,33	36,90	(58)	5,196 98
(7)	71,4724	98,3063	136,2210	(59)	5,190 93
(8)	714,724	983,065	1362,210	(60)	0,006 05
(9)	713,9584	981,5689	1361,6100	(61)	1
(10)	0,7656	1,4961	0,6000	(62)	0,006 05
(11)	0,076 56	0,149 61	0,060 00	(63)	0,6
(12)	9	9	9	(64)	4,2
(13)	0,111	0,111	0,111	(65)	0,292 22
(14)	0,008 51	0,016 62	0,006 67	(66)	28
(15)	0,930-3	0,221-2	0,824-3	(67)	0,010 44
(16)	8,370-27	1,989-18	7,416-27		
(17)	2,672	3,133	3,690		
(18)	44,689 95	48,752 64	53,314 81		
(19)	21,14	22,08	23,09		
(20)	56,486 08	69,176 64	85,202 10		
(21)	71,395 84	98,156 89	136,161 00		
(22)		0,28617			
(23)		0,333			
(24)		27			
(25)		0,037			
(26)		0,0106			
(27)		0,025-2			
(28)		0,675-54			
(29)		17,775-72			
(30)		0,900			
(31)		0,296			
(32)		0,05			
(33)		1,05			
(34)		1,97			
(35)		6,0			

(à suivre)

TABLE V
Calculation of TEP

	1	2	3		
(1)	10	10	10	(36)	30
(2)	2.114	2.208	2.309	(37)	66.31
(3)	4.468 995	4.875 264	5.331 481	(38)	2.2103
(4)	2.81	3.04	3.64	(39)	146.7574
	2.66	3.32	3.64	(40)	4402.7220
	2.56	3.04	3.57	(41)	4397.0161
	2.66	2.97	3.64	(42)	5.7059
	2.81	3.15	3.76	(43)	0.190 20
	2.70	3.10	3.64	(44)	94.95
	2.61	3.25	3.76	(45)	3.165
	2.74	3.29	3.85	(46)	210.864 82
	2.56	2.97	3.70	(47)	6325.9446
	2.61	3.20	3.70	(48)	6296.1345
(5)	7.8961	9.2416	13.2496	(49)	29.8101
	7.0756	11.0224	13.2496	(50)	0.993 67
	6.5536	9.2416	12.7449	(51)	5.224
	7.0756	8.8209	13.2496	(52)	11.547
	7.8961	9.9225	14.1376	(53)	-8.382
	7.2900	9.6100	13.2496		
	6.8121	10.5625	14.1376	(54)	305.713 73
	7.5076	10.8241	14.8225	(55)	9171.4119
	6.5536	8.8209	13.6900	(56)	9015.5025
	6.8121	10.2400	13.6900	(57)	155.9094
(6)	26.72	31.33	36.90	(58)	5.196 98
(7)	71.4724	98.3065	136.2210	(59)	5.190 93
(8)	714.724	983.065	1362.210	(60)	0.006 05
(9)	713.9584	981.5689	1361.6100	(61)	1
(10)	0.7656	1.4961	0.6000	(62)	0.006 05
(11)	0.076 56	0.149 61	0.060 00	(63)	0.6
(12)	9	9	9	(64)	4.2
(13)	0.111	0.111	0.111	(65)	0.292 22
(14)	0.008 51	0.016 62	0.006 67	(66)	28
(15)	0.930-3	0.221-2	0.824-3	(67)	0.010 44
(16)	8.370-27	1.989-18	7.416-27		
(17)	2.672	3.133	3.690		
(18)	44.689 95	48.752 64	53.314 81		
(19)	21.14	22.08	23.09		
(20)	56.486 08	69.176 64	85.202 10		
(21)	71.395 84	98.156 89	136.161 00		
(22)		0.28617			
(23)		0.333			
(24)		27			
(25)		0.037			
(26)		0.0106			
(27)		0.025-2			
(28)		0.675-54			
(29)		17.775-72			
(30)		0.900			
(31)		0.296			
(32)		0.05			
(33)		1.05			
(34)		1.97			
(35)		6.0			

(continued)

TABLEAU V. (fin)

(68)			0,03333	
(69)			1,70	
(70)	200	180	160	140
(71)	473	453	433	413
(72)	2,114	2,208	2,309	2,421
(73)	11,044	11,535	12,062	12,647
(74)	2,662	3,153	3,680	4,265
(75)	-0,0963	-0,0023	0,0987	0,2107
(76)	0,009 27	0,000 01	0,009 74	0,044 39
(77)	0,048 74	0,000 05	0,051 21	0,233 39
(78)	0,0821	0,0334	0,0845	0,2667
(79)	0,000 86	0,000 35	0,000 88	0,002 78
(80)	0,029	0,019	0,030	0,053
(81)	0,049	0,032	0,051	0,090
(82)	2,613	3,121	3,629	4,175
(83)	410	1 320	4 260	15 000
(84)	459	1 420	4 790	18 400
(85)	5 000	20 000		
(86)	3,699	4,301		
(87)	12,081	12,683		
(88)	2,313	2,428		
(89)	432	412		
(90)	159	139		
(91)	0,1027			
(92)	0,010 55			
(93)	0,0555			
(94)	0,0888			
(95)	0,000 93			
(96)	0,030			
(97)	0,008			
(98)	2,89			
(99)	0,030			
(100)	0,030			
(101)	5,194			
(102)	0,994			
(103)	0,0331			
(104)	0,0886			
(105)	0,000 92			
(106)	0,0303			
(107)	0,0515			
(108)	0,0099			
(109)	0,534			
(110)	0,1028			
(111)	2,323			
(112)	430			
(113)	157			

6.3 Exemple 3. Mesures destructives

Les essais du matériau s'effectuent par des mesures destructives d'une propriété, par exemple la résistance à la traction, conformément au tableau II de la Publication 216-2 (essai 2.1). Le critère de dégradation est la diminution de la résistance au-dessous de 50% de sa valeur initiale.

En se fondant sur l'expérience antérieure, on suppose que le logarithme de la résistance à la traction est une fonction linéaire du temps.

La gamme de températures escomptée correspondant à un temps jusqu'à dégradation extrapolé de 20 000 h est celle de 150 °C à 159 °C. On choisit trois températures d'exposition de θ °C et trois périodes d'exposition t_p en heures dans le tableau I de la Publication 216-1, à savoir 48 h à 210 °C, 168 h à 190 °C et 672 h à 170 °C.

TABLE V (end)

(68)			0.03333	
(69)			1.70	
(70)	200	180	160	140
(71)	473	453	433	413
(72)	2.114	2.208	2.309	2.421
(73)	11.044	11.535	12.062	12.647
(74)	2.662	3.153	3.680	4.265
(75)	-0.0963	-0.0023	0.0987	0.2107
(76)	0.009 27	0.000 01	0.009 74	0.044 39
(77)	0.048 74	0.000 05	0.051 21	0.233 39
(78)	0.0821	0.0334	0.0845	0.2667
(79)	0.000 86	0.000 35	0.000 88	0.002 78
(80)	0.029	0.019	0.030	0.053
(81)	0.049	0.032	0.051	0.090
(82)	2.613	3.121	3.629	4.175
(83)	410	1 320	4 260	15 000
(84)	459	1 420	4 790	18 400
(85)	5 000	20 000		
(86)	3.699	4.301		
(87)	12.081	12.683		
(88)	2.313	2.428		
(89)	432	412		
(90)	159	139		
(91)	0.1027			
(92)	0.010 55			
(93)	0.0555			
(94)	0.0888			
(95)	0.000 93			
(96)	0.030			
(97)	0.008			
(98)	2.89			
(99)	0.030			
(100)	0.030			
(101)	5.194			
(102)	0.994			
(103)	0.0331			
(104)	0.0886			
(105)	0.000 92			
(106)	0.0303			
(107)	0.0515			
(108)	0.0099			
(109)	0.534			
(110)	0.1028			
(111)	2.323			
(112)	430			
(113)	157			

6.3 Example 3. Destructive measurements

A material is tested by destructive measurement of a property, for instance tensile strength according to IEC Publication 216-2, Table II (Test 2.1). The end-point criterion is a decrease in strength to below 50% of the initial value.

From earlier experience it is presumed that the logarithm of the tensile strength is a linear function of time.

The expected temperature range corresponding to an extrapolated time to failure of 20 000 h is 150 °C to 159 °C. Three exposure temperatures θ °C and exposure periods t_p hours are selected from Table I of IEC Publication 216-1, namely, 48 h at 210 °C, 168 h at 190 °C, and 672 h at 170 °C.

On prépare environ 200 éprouvettes. On en choisit au hasard dix et on les vieillit pendant 48 h à 170 °C, puis on les mesure pour déterminer la valeur initiale de la résistance à la traction. Les éprouvettes restantes sont réparties par prélèvement au hasard en trois groupes que l'on expose dans trois étuves dont les températures mesurées sont 212 °C, 190 °C et 171 °C. A la fin de chaque période on mesure la résistance à la traction de cinq éprouvettes, puis on les rejette. La résistance est exprimée par $\lg p$, logarithme de la valeur mesurée divisée par la valeur initiale; le critère de dégradation devient alors $\lg p_e = \lg 0,5 = 0,6990 - 1$.

Les valeurs de $\lg p$ ainsi obtenues sont données dans le tableau VI pour les quatre temps de mesure les plus proches du point où la médiane des cinq valeurs mesurées coupe la droite de dégradation comme l'indique la figure 2, page 46, dans le cas où $\theta = 212$ °C.

A chacune des trois températures d'exposition on détermine par la méthode des moindres carrés la droite qui donne la meilleure représentation des points de mesure comme suit:

On calcule les coefficients de l'équation

$$y = a + bx,$$

où y représente $\lg p$ et x le temps de la mesure t_m comme suit

$$b = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \bar{y}_i}{\sum (x_i - \bar{x})^2},$$

$$a = \frac{\sum \bar{y}_i}{k} - b\bar{x},$$

où

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{k},$$

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

$k = 4$, nombre de temps employés dans le calcul à chaque température ($i = 1, 2, 3, 4$), et $n_i = 5$, nombre d'éprouvettes essayées à chaque temps ($j = 1, 2, \dots 5$).

Les calculs sont indiqués dans le tableau VII.

Pour chaque éprouvette on trace une droite parallèlement à celle donnant la meilleure représentation comme indiqué sur la figure 2 dans le cas où $\theta = 212$ °C. Le point où cette droite coupe la droite de dégradation est pris comme le temps individuel de l'éprouvette jusqu'à dégradation. Le temps jusqu'à dégradation peut être aussi calculé comme

$$t = t_m + \frac{\lg p_e - \lg p}{b},$$

où t_m est le temps de la mesure et $\lg p_e = 0,6990 - 1$ le critère de dégradation.

Cela signifie que si l'on suppose que l'éprouvette avait été essayée au temps t au lieu du temps t_m , la valeur mesurée aurait été p_e au lieu de la valeur mesurée réelle p .

Les temps hypothétiques jusqu'à dégradation t_{ij} obtenus de cette façon sont donnés dans le tableau VIII.

Le calcul du profil d'endurance thermique s'effectue ensuite comme dans l'exemple 1 (paragraphe 6.1) avec trois températures ($k = 3$) et 20 éprouvettes à chaque température ($n_i = 4 \cdot 5 = 20$) ou avec un total de $N = kn_i = 60$ éprouvettes.

About 200 specimens are prepared. Ten of these are selected at random and aged for 48 h at 170 °C, and then measured for determination of the initial value of the tensile strength. By random selection the remaining specimens are divided into three groups, which are exposed in three ovens, the measured oven temperatures being 212 °C, 190 °C and 171 °C. At the end of each period, five specimens are measured for tensile strength and then discarded. The strength is expressed as $\lg p$, the logarithm of the measured value divided by the initial value. The end-point criterion then becomes $\lg p_e = \lg 0.5 = 0.6990 - 1$.

The values of $\lg p$ thus obtained are given in Table VI at the four measuring times closest to the point where the median of the five measured values crosses the end-point line as shown in Figure 2, page 46, in the case of $\theta = 212$ °C.

At each of the three exposure temperatures a line which makes a best fit to the measured points is determined by the method of least squares as follows:

The coefficients in the equation

$$y = a + bx,$$

where y stands for $\lg p$ and x for time of measurement t_m , are calculated as

$$b = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \bar{y}_i}{\sum (x_i - \bar{x})^2},$$

$$a = \frac{\sum \bar{y}_i}{k} - b\bar{x},$$

where

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{k},$$

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

$k = 4$, number of times used in the calculation at each temperature, ($i = 1, 2, 3, 4$), and $n_i = 5$, number of specimens tested at each time, ($j = 1, 2, \dots 5$).

The calculations are shown in Table VII.

For each specimen a line is drawn parallel to the best fitting line as shown in Figure 2 in the case of $\theta = 212$ °C. The time where that line crosses the end-point line is taken as the individual time to failure of the specimen. The time to failure may also be calculated as

$$t = t_m + \frac{\lg p_e - \lg p}{b},$$

where t_m is the time of measurement, and $\lg p_e = 0.6990 - 1$ is the end-point criterion.

This means that if it is supposed that the specimen had been tested at time t instead of at time t_m , the measured value would have been p_e instead of the actually measured value p .

The supposed times to failure t_{ij} thus obtained are given in Table VIII.

The calculation of the thermal endurance profile then proceeds as in example 1 (Sub-clause 6.1) with three temperatures ($k = 3$) and twenty specimens at each temperature ($n_i = 4 \cdot 5 = 20$), or with a total of $N = kn_i = 60$ specimens.

Le tableau IX montre les calculs effectués à l'aide d'une calculatrice électronique de bureau avec programmes statistiques incorporés pour la détermination de la valeur moyenne, de l'écart type et des coefficients de régression linéaire.

Le profil d'endurance thermique se détermine sous la forme

$$PET = 156/174 (173)$$

TABLEAU VI

Données d'essai

θ					
212		190		171	
t_m	$\lg p$	t_m	$\lg p$	t_m	$\lg p$
288	0,834-1	1 344	0,754-1	5 376	0,711-1
	0,789-1		0,784-1		0,667-1
	0,781-1		0,769-1		0,814-1
	0,766-1		0,835-1		0,841-1
	0,743-1		0,709-1		0,726-1
336	0,752-1	1 512	0,750-1	6 048	0,748-1
	0,664-1		0,602-1		0,709-1
	0,735-1		0,750-1		0,821-1
	0,640-1		0,772-1		0,712-1
	0,737-1		0,668-1		0,641-1
384	0,635-1	1 680	0,602-1	6 720	0,649-1
	0,871-1		0,718-1		0,637-1
	0,661-1		0,599-1		0,633-1
	0,669-1		0,613-1		0,713-1
	0,696-1		0,599-1		0,667-1
432	0,619-1	1 848	0,656-1	7 392	0,529-1
	0,550-1		0,544-1		0,512-1
	0,819-1		0,506-1		0,749-1
	0,519-1		0,601-1		0,593-1
	0,601-1		0,662-1		0,760-1

Table IX shows the calculations when made on an electronic desk calculator with built-in statistical programmes for determination of mean value, standard deviation, and linear regression coefficients.

The thermal endurance profile is determined to be

$$\text{TEP} = 156/174 (173)$$

TABLE VI

Test data

θ					
212		190		171	
t_m	$\lg p$	t_m	$\lg p$	t_m	$\lg p$
288	0.834-1	1 344	0.754-1	5 376	0.711-1
	0.789-1		0.784-1		0.667-1
	0.781-1		0.709-1		0.814-1
	0.766-1		0.835-1		0.841-1
	0.743-1		0.709-1		0.726-1
336	0.752-1	1 512	0.750-1	6 048	0.748-1
	0.664-1		0.602-1		0.709-1
	0.735-1		0.750-1		0.821-1
	0.640-1		0.772-1		0.712-1
	0.737-1		0.668-1		0.641-1
384	0.635-1	1 680	0.602-1	6 720	0.649-1
	0.871-1		0.718-1		0.637-1
	0.651-1		0.599-1		0.633-1
	0.669-1		0.613-1		0.713-1
	0.696-1		0.599-1		0.667-1
432	0.619-1	1 848	0.656-1	7 392	0.529-1
	0.550-1		0.544-1		0.512-1
	0.819-1		0.506-1		0.749-1
	0.519-1		0.601-1		0.593-1
	0.601-1		0.662-1		0.760-1

TABLEAU VII

θ	212	190	171
$\bar{y}_i, i = 1$	0,7826 - 1	0,7582 - 1	0,7518 - 1
2	0,7056 - 1	0,7084 - 1	0,7262 - 1
3	0,7064 - 1	0,6262 - 1	0,6598 - 1
4	0,6216 - 1	0,5938 - 1	0,6286 - 1
$\bar{x}$	360	1 596	6 384
b	-0,001 005	-0,000 342 5	-0,000 064 88
a	0,0657	0,2183	0,1058

TABLEAU VIII

Temps hypothétiques jusqu'à dégradation t_{ij}

θ		
212	190	171
422	1 505	5 561
378	1 592	4 883
370	1 373	7 149
355	1 741	7 565
332	1 373	5 793
389	1 661	6 804
301	1 229	6 203
372	1 661	7 929
277	1 725	6 249
374	1 422	5 155
320	1 397	5 950
555	1 736	5 765
346	1 388	5 703
354	1 429	6 936
381	1 388	6 227
352	1 723	4 772
284	1 396	4 510
551	1 285	8 163
253	1 562	5 759
334	1 740	8 333

TABLE VII

θ	212	190	171
$\bar{y}_i, i = 1$	0.7826 - 1	0.7582 - 1	0.7518 - 1
2	0.7056 - 1	0.7084 - 1	0.7262 - 1
3	0.7064 - 1	0.6262 - 1	0.6598 - 1
4	0.6216 - 1	0.5938 - 1	0.6286 - 1
$\bar{x}$	360	1 596	6 384
b	-0.001 005	-0.000 342 5	-0.000 064 88
a	0.0657	0.2183	0.1058

TABLE VIII

Supposed times to failure t_{ij}

θ		
212	190	171
422	1 505	5 361
378	1 592	4 883
370	1 373	7 149
355	1 741	7 565
332	1 373	5 793
389	1 661	6 804
301	1 229	6 203
372	1 661	7 929
277	1 725	6 249
374	1 422	5 155
320	1 397	5 950
555	1 736	5 765
346	1 388	5 703
354	1 429	6 936
381	1 388	6 227
352	1 723	4 772
284	1 396	4 510
551	1 285	8 163
253	1 562	5 759
334	1 740	8 333

TABLEAU IX

$N = 60, k = 3, n_i = 20$ $f_i = n_i - 1 = 19, f_1 = kf_1 = 57, f = N - 2 = 58, c = 1 + \frac{\left(\frac{k}{f_1} - \frac{1}{f_1}\right)}{3(k-1)} = 1,0234$				
θ	212	190	171	
i	1	2	3	
$x_i = \frac{1}{\theta + 273}$	0,002 062	0,002 160	0,002 252	
$\Sigma y_{ij} = \Sigma \lg t_{ij}$	51,0831	63,5645	75,8151	
Σy_{ij}^2	130,609 655	202,066 656	287,509 901	
$\bar{y}_i = \frac{\Sigma y_{ij}}{n_i}$	2,5542	3,1782	3,7906	
$s_{1i}^2 = \frac{n_i \Sigma y_{ij}^2 - (\Sigma y_{ij})^2}{n_i f_i}$	0,007 129 0	0,002 348 6	0,005 968 5	
$s_1^2 = \frac{\Sigma s_{1i}^2}{k}$		0,005 148 7		
$\chi^2 = \frac{f_1 \ln s_1^2 - \Sigma f_i \cdot \ln s_{1i}^2}{c}$		5,8		
$\chi^2(0,95, k-1)$		6,0		
$\bar{x} = \frac{\Sigma x_i}{k}$		0,002 158		
$b = \frac{\Sigma (x_i - \bar{x}) \bar{y}_i}{\Sigma (x_i - \bar{x})^2}$		6 494		
$a = \frac{\Sigma \bar{y}_i}{k} - b\bar{x}$		-10,839		
$Y_i = a + bx_i$	2,5502	3,1864	3,7866	
$s_2^2 = \frac{\Sigma n_i (\bar{y}_i - Y_i)^2}{k-2}$		0,001 998 4		
$F = \frac{s_2^2}{s_1^2}$		0,4		
$F(0,95, k-2, f_1)$		4,0		
$s_2^2 = \frac{f_1 s_1^2 + (k-2) s_2^2}{f}$		0,005 094 4		
s		0,0714		
$t(0,95, f)$		1,68		
θ	210	190	170	150
X	0,002 070	0,002 160	0,002 257	0,002 364
$Y = a + bX$	2,606	3,186	3,820	4,513
$\Sigma n_i (x_i - \bar{x})^2$		3,6526 10 ⁻⁷		

(à suivre)

TABLE IX

$N = 60, k = 3, n_i = 20$ $f_i = n_i - 1 = 19, f_1 = kf_i = 57, f = N - 2 = 58, c = 1 + \frac{\left(\frac{k}{f_i} - \frac{1}{f_1}\right)}{3(k-1)} = 1.0234$				
θ	212	190	171	
i	1	2	3	
$x_i = \frac{1}{\theta + 273}$	0.002 062	0.002 160	0.002 252	
$\Sigma y_{ij} = \Sigma \lg t_{ij}$	51.0831	63.5645	75.8151	
Σy_{ij}^2	130.609 655	202.066 656	287.509 901	
$\bar{y}_i = \frac{\Sigma y_{ij}}{n_i}$	2.5542	3.1782	3.7906	
$s_{ii}^2 = \frac{n_i \Sigma y_{ij}^2 - (\Sigma y_{ij})^2}{n_i f_i}$	0.007 129 0	0.002 348 6	0.005 968 5	
$s_i^2 = \frac{\Sigma s_{ii}^2}{k}$		0.005 148 7		
$\chi^2 = \frac{f_1 \ln s_i^2 - \Sigma f_i \cdot \ln s_{ii}^2}{c}$		5.8		
$\chi^2(0.95, k-1)$		6.0		
$\bar{x} = \frac{\Sigma x_i}{k}$		0.002 158		
$b = \frac{\Sigma (x_i - \bar{x}) \bar{y}_i}{\Sigma (x_i - \bar{x})^2}$		6.494		
$a = \frac{\Sigma \bar{y}_i}{k} - b \bar{x}$		-10.839		
$Y_i = a + bx_i$	2.5502	3.1864	3.7866	
$s_2^2 = \frac{\Sigma n_i (\bar{y}_i - Y_i)^2}{(k-2)}$		0.001 998 4		
$F = \frac{s_2^2}{s_1^2}$		0.4		
$F(0.95, k-2, f_1)$		4.0		
$s_2^2 = \frac{f_1 s_1^2 + (k-2) s_2^2}{f}$		0.005 094 4		
s		0.0714		
$t(0.95, f)$		1.68		
θ	210	190	170	150
X	0.002 070	0.002 160	0.002 257	0.002 364
$Y = a + bX$	2.606	3.186	3.820	4.513
$\Sigma n_i (x_i - \bar{x})^2$		3.6526 10 ⁻⁷		

(continued)

TABLEAU IX (fin)

$s_y^2 = s^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{(X - \bar{x})^2}{\sum n_i (x_i - \bar{x})^2} \right]$	0,000 195	0,000 086	0,000 226	0,000 689
$Y_c = Y - ts_y$	2,582	3,171	3,794	4,468
$t_e = \lg^{-1} Y$	403	1 540	6 600	32 600
$t_c = \lg^{-1} Y_c$	382	1 480	6 230	29 400
T	5 000			20 000
$\theta = \frac{b}{\lg T - a} - 273$	174			156
$X_1 = \frac{1}{\theta + 273}$	0,002 239			0,002 331
$s_y^2 = s^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{(X_1 - \bar{x})^2}{\sum n_i (x_i - \bar{x})^2} \right]$	0,000 178			
$CV = \frac{s_y}{\lg T}$	0,004			
$b_r = b - \frac{t^2 s^2}{b \sum n_i (x_i - \bar{x})^2}$			6 487	
$s_r^2 = s^2 \left[\frac{b_r}{Nb} + \frac{(X_1 - \bar{x})^2}{\sum n_i (x_i - \bar{x})^2} \right]$	0,000 178			0,000 513
$X_c = \bar{x} + \frac{\lg T - \bar{y}}{b_r} + \frac{ts_r}{b_r}$	0,002 242			0,002 338
$\theta_c = \frac{1}{X_c} - 273$	173			155