

RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC
727-1**

Première édition
First edition
1982

Evaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation électrique

Première partie:

Considérations générales et procédures
d'évaluation basées sur une distribution normale

Evaluation of electrical endurance of electrical insulation systems

Part 1:

General considerations and evaluation
procedures based on normal distributions



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 727-1: 1982

Numéros des publications

Depuis le 1^{er} janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60 000.

Publications consolidées

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

Validité de la présente publication

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

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

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

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

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

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

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

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

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60 000 series.

Consolidated publications

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

Validity of this publication

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

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

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

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

Terminology, graphical and letter symbols

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

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

* See web site address on title page.

RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC
727-1**

Première édition
First edition
1982

Evaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation électrique

Première partie:

Considérations générales et procédures
d'évaluation basées sur une distribution normale

Evaluation of electrical endurance of electrical insulation systems

Part 1:

General considerations and evaluation
procedures based on normal distributions

© CEI 1982 Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

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

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

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

P

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
Articles	
1. Objet et domaine d'application	6
SECTION UN – CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES	
2. Vieillissement	6
2.1 Effets des contraintes électriques	6
2.2 Effet de l'environnement	6
3. Evaluation de la contrainte électrique en tant que facteur de vieillissement	8
3.1 Variables et aspects des essais	8
3.2 Présence d'autres facteurs	10
4. Accélération du vieillissement	10
4.1 Accélération par accroissement du niveau de contrainte	10
4.2 Accélération par accroissement de la fréquence	14
5. Mécanismes de vieillissement	14
SECTION DEUX – PROCÉDURES D'ESSAI	
6. Dispositions générales	16
7. Objets d'essai	16
8. Influence de l'environnement et de la température	18
9. Influence des matériaux associés et des produits de dégradation	18
10. Procédures de vieillissement	18
10.1 Accélération par le niveau de contrainte	20
10.2 Accélération par la fréquence	20
10.3 Tolérances sur les paramètres	20
11. Vérification des mécanismes de vieillissement	20
12. Méthodes de diagnostic et critères de fin de vie	22
13. Variantes de procédures d'essai	22
13.1 Essai continu à niveau de contrainte fixe	22
13.2 Essais à niveaux croissants de contrainte	22
13.3 Essais cycliques	22
14. Rapport – Evaluation des résultats	24
15. Interprétation des données d'essais d'endurance	24
ANNEXE A – Essai à tension croissant par paliers	26

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Object and scope	7
SECTION ONE – GENERAL CONSIDERATIONS	
2. Ageing	7
2.1 Effects of electrical stress	7
2.2 Effect of the environment	7
3. Evaluation of electrical stress as an ageing factor	9
3.1 Test variables and aspects	9
3.2 Presence of other factors	11
4. Ageing acceleration	11
4.1 Acceleration by stress level increase	11
4.2 Acceleration by frequency increase	15
5. Ageing mechanisms	15
SECTION TWO – TEST PROCEDURES	
6. General	17
7. Test objects	17
8. Influence of environment and temperature	19
9. Influence of associated materials and products of degradation	19
10. Ageing procedures	19
10.1 Acceleration by stress level	21
10.2 Acceleration by frequency	21
10.3 Tolerances on parameters	21
11. Verification of ageing mechanisms	21
12. Diagnostic methods and end-point criteria	23
13. Alternative test procedures	23
13.1 Continuous fixed stress levels	23
13.2 Increasing stress levels	23
13.3 Cyclic tests	23
14. Report – Evaluation of results	25
15. Interpretation of electrical endurance data	25
APPENDIX A – Test at step-by-step increasing voltage	27

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ÉVALUATION DE L'ENDURANCE ÉLECTRIQUE DES SYSTÈMES D'ISOLATION ÉLECTRIQUE

Première partie: Considérations générales et procédures d'évaluation basées sur une distribution normale

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

Le présent rapport a été établi par le Comité d'Etudes n° 63 de la CEI: Systèmes d'isolation.

Des projets furent discutés lors des réunions tenues à Stockholm en 1977 et à Paris en 1980. A la suite de cette dernière réunion, le projet, document 63(Bureau Central)16, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en juillet 1980.

Les Comités nationaux des pays ci-après se sont prononcés explicitement en faveur de la publication:

Afrique du Sud (République d')	Etats-Unis d'Amérique
Allemagne	Finlande
Autriche	France
Belgique	Israël
Bésil	Norvège
Bulgarie	Nouvelle-Zélande
Canada	République Démocratique Allemande
Chine	Suède
Corée République démocratique populaire de)	Tchécoslovaquie
Danemark	Turquie
Egypte	Union des Républiques Socialistes Soviétiques

Autres publications de la CEI citées dans la présente norme:

- Publications n°s 270: Mesure des décharges partielles.
- 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.
- 505: Guide pour l'évaluation et l'identification des systèmes d'isolation du matériel électrique.
- 610: Principaux aspects de l'évaluation fonctionnelle des systèmes d'isolation électriques; Mécanismes de vieillissement et procédures de diagnostic.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

EVALUATION OF ELECTRICAL ENDURANCE OF ELECTRICAL INSULATION SYSTEMS

Part 1: General considerations and evaluation procedures based on normal distributions

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 report has been prepared by IEC Technical Committee No. 63: Insulation Systems.

Drafts were discussed at the meetings held in Stockholm in 1977 and in Paris in 1980. As a result of this meeting, a draft, Document 63(Central Office)16, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in July 1980.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of publication:

Austria	Germany
Belgium	Israel
Brazil	Korea (Democratic People's Republic of)
Bulgaria	New Zealand
Canada	Norway
China	South Africa (Republic of)
Czechoslovakia	Sweden
Denmark	Turkey
Egypt	United States of America
Finland	Union of Soviet Socialist Republics
France	
German Democratic Republic	

Other IEC publications quoted in this standard:

- Publications Nos. 270: Partial Discharge Measurements.
- 493-1: Guide for the Statistical Analysis of Ageing Test Data,
Part 1: Methods Based on Mean Values of Normally Distributed Test Results.
- 505: Guide for the Evaluation and Identification of Insulation Systems of Electrical Equipment.
- 610: Principal Aspects of Functional Evaluation of Electrical Insulation Systems: Ageing Mechanisms and Diagnostic Procedures.

ÉVALUATION DE L'ENDURANCE ÉLECTRIQUE DES SYSTÈMES D'ISOLATION ÉLECTRIQUE

Première partie: Considérations générales et procédures d'évaluation basées sur une distribution normale

1. Objet et domaine d'application

Le présent rapport a pour objet de guider l'élaboration de procédures d'essais des systèmes d'isolation et de suggérer aux Comités d'Etudes de Matériels les points à prendre en considération dans la préparation des instructions spécifiques pour l'évaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation du matériel électrique.

Dans sa première section, ce rapport présente des renseignements d'ordre général relatifs à l'endurance électrique des systèmes d'isolation.

Dans sa deuxième section, il suggère des procédures d'essai pour le cas où le facteur d'influence électrique est le facteur de vieillissement dominant. Ce rapport suggère aussi des méthodes pour le traitement statistique des données d'endurance électrique normalement distribuées.

Des parties complémentaires de ce rapport traiteront des données d'endurance électrique comportant d'autres distributions statistiques.

SECTION UN – CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

2. Vieillessement

2.1 Effets des contraintes électriques

Les contraintes électriques appliquées à un système d'isolation peuvent avoir des effets de vieillissement susceptibles d'être présents soit seuls, soit en combinaison, dont les principaux sont les suivants:

- les effets des décharges partielles lorsque l'intensité du champ électrique local dépasse la rigidité diélectrique des diélectriques liquides ou gazeux adjacents au système ou inclus dans celui-ci;
- effets de cheminement;
- effets d'arborescence;
- effets d'électrolyse;
- effets, en relation avec ceux qui sont décrits ci-dessus, sur les surfaces en contact de deux matériaux isolants lorsque des champs tangentiels relativement élevés peuvent apparaître, par exemple dans des matériaux présentant des permittivités différentes.

2.2 Effet de l'environnement

L'humidité peut affecter le vieillissement électrique de diverses manières. Elle peut modifier la grandeur ou l'uniformité des conductivités superficielles ou transversales, la distribution du champ électrique, la vitesse de dégradation de l'isolation provoquée par les décharges, la tendance au cheminement et le courant de fuite.

Les matériaux de dégradation produits par les décharges dans des conditions humides peuvent se combiner avec les électrodes, les isolants et l'eau présente. Il peut en résulter une modification du régime de décharges.

EVALUATION OF ELECTRICAL ENDURANCE OF ELECTRICAL INSULATION SYSTEMS

Part 1: General considerations and evaluation procedures based on normal distributions

1. Object and scope

The purpose of this report is to guide the development of system test procedures and suggest points to be considered by the Equipment Technical Committees in the preparation of specific instructions for the evaluation of electrical endurance of insulation systems for electrical equipment.

In the first section, this report presents background information on the electrical endurance of insulation systems.

In the second section, test procedures are suggested for the case where the electrical factor of influence is a dominating ageing factor. Techniques for statistical treatment of normally distributed electrical endurance data are also suggested.

Additional parts of this report will deal with other statistical distributions of electrical endurance data.

SECTION ONE – GENERAL CONSIDERATIONS

2. Ageing

2.1 *Effects of electrical stress*

Electrical stresses applied to an insulation system may have ageing effects which can be present either alone or in combination, the main ones being:

- effects of partial discharges when the local field strength exceeds the breakdown strength in liquid or gaseous dielectrics adjacent to or included in the system;
- effects of tracking;
- effects of treeing;
- effects of electrolysis;
- effects, related to those above, on the adjacent surfaces of two insulating materials where tangential fields of relatively high values may occur, for example materials having different permittivities.

2.2 *Effect of the environment*

Humidity may affect electrical ageing in various ways. It may alter the level or uniformity of the surface and volume conductivities, the electrical field distribution, the rate of insulation degradation due to discharges, surface tracking tendencies and leakage currents.

Chemicals produced by discharges under humid conditions can combine with electrodes, insulation and humidity. The result can be a change of discharges which occurs subsequently.

L'effet de la température sur les décharges est également complexe. La stabilité des composés chimiques, l'érosion due aux décharges et l'interaction avec l'humidité peuvent complètement changer en fonction de la température. La distribution spatiale des vacuoles à l'intérieur de l'isolation peut aussi être modifiée en fonction des dilatations thermiques.

L'environnement comprend d'autres facteurs que l'humidité et la température, par exemple la pression atmosphérique, les salissures, la poussière, les fumées d'origine chimique, etc. Tous peuvent être d'importants facteurs dans le vieillissement électrique. Il est important d'évaluer le vieillissement électrique en présence de ces autres facteurs s'ils sont présents dans l'ambiance en service.

3. Evaluation de la contrainte électrique en tant que facteur de vieillissement

3.1 Variables et aspects des essais

Comme il est indiqué dans la Publication 505 de la CEI : Guide pour l'évaluation et l'identification des systèmes d'isolation du matériel électrique, des essais de vieillissement sous tension doivent être faits chaque fois que les contraintes électriques sont présumées agir comme facteur de vieillissement.

Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de donner des règles complètes et définies pour chaque cas. Les Comités d'Etudes de Matériels de la CEI doivent déterminer, lors de la préparation des procédures d'essai pour le matériel sous leur responsabilité, quels aspects des essais de vieillissement électrique présentent de l'importance pour ces cas spécifiques.

Il est important de reconnaître que les détériorations dues au vieillissement électrique dépendent dans une grande mesure de la nature des systèmes d'isolation. Les variables et les aspects qui ont souvent une importance sensible comprennent la dimension des électrodes, l'épaisseur d'isolation, la concentration des contraintes, la valeur absolue et la fréquence de la tension appliquée, le taux de défaillance aléatoire et les changements du taux de défaillance.

La contrainte électrique est généralement considérée comme un facteur de vieillissement si des décharges partielles, internes ou externes, sont présentes ou si l'on s'attend à leur apparition à la tension de service. Des décharges apparaissant seulement au moment de surtensions peuvent être prises en considération si ces surtensions apparaissent fréquemment ou si elles produisent des décharges partielles qui ne s'éteignent pas à la tension normale de service. La détermination du seuil d'extinction des décharges partielles peut être requise pour la prise en considération des contraintes électriques comme facteur de vieillissement.

Des considérations techniques, basées sur la loi de Paschen, la géométrie du système d'isolation, la permittivité des matériaux isolants et la densité des gaz dans les vacuoles ou sur les surfaces sous contrainte électrique peuvent donner une approche pour la prédétermination de l'existence possible de décharges partielles.

Une autre voie d'approche consiste à mesurer les décharges par des moyens appropriés tels que ceux décrits dans la Publication 270 de la CEI : Mesure des décharges partielles. Lorsque de telles mesures montrent l'absence de décharges partielles dans les limites appropriées de tension, et quand il peut être montré qu'aucun dommage ni aucune réaction électrochimique significative ne peut être associé avec des décharges partielles d'un niveau inférieur au seuil de détection de l'appareillage de mesure utilisé, des essais de vieillissement sous contrainte électrique peuvent ne pas être requis.

Dans quelques cas, un vieillissement électrique a été identifié au cours d'essais où aucune décharge partielle n'était apparue. Les effets de vieillissement résultant des autres aspects de la contrainte électrique, tels que les arborescences, le cheminement ou les effets électrolytiques ne peuvent généralement pas être déterminés par des méthodes de mesure simples et non destructrices appliquées au système d'isolation. Dans ce cas, l'expérience sur des systèmes similaires peut servir de guide pour la prise en considération de ces contraintes comme facteurs de vieillissement. Des essais préliminaires avant vieillissement peuvent donner des informations précieuses sur un effet de ce genre.

Temperature effects on discharges are equally complex. The stability of chemicals, the erosion effects of discharges and interaction with humidity can all change with temperature. Also spatial distribution of voids within insulation changes with thermal expansion.

The environmental conditions include many other factors beyond humidity and temperature, for example atmospheric pressure, dirt, dust, chemical fumes, etc. These are all important factors in electrical ageing. It is important to evaluate the electrical ageing in the presence of these factors if they are part of the environmental conditions in service.

3. Evaluation of electrical stress as an ageing factor

3.1 Test variables and aspects

As stated in IEC Publication 505: Guide for the Evaluation and Identification of Insulation Systems of Electrical Equipment, ageing tests under voltage should be performed whenever electrical stresses are deemed to act as an ageing factor.

In the present state of knowledge, it is not possible to give complete and definite rules for every case. IEC Equipment Technical Committees should determine, when preparing test procedures for equipment under their responsibility, which aspects of electrical ageing tests are important for those specific cases.

It is important to recognize that damaging effects of electrical ageing are very much dependent on the nature of the insulation systems. Variables and aspects which are frequently of importance include electrode size, insulation thickness, stress concentration, absolute voltage level and frequency, probable failure rate and changes in failure rate.

Electrical stress is usually considered as an ageing factor if partial discharges, internal or external, are present or expected to develop at operating voltage. Presence of discharges at overvoltage only, may be taken into account if these overvoltages occur frequently, or if they produce partial discharges not extinguished at normal operating voltage. The determination of partial discharge extinction level may be required in considering electrical stress as an ageing factor.

Technical considerations, based on Paschen's law, the geometry of the insulation system, the permittivity of the insulating materials and the density of the gas in voids, or at electrically stressed surfaces, may give an approach for the predetermination of possible existence of partial discharges.

Another approach consists in measuring these discharges by suitable methods such as those described in IEC Publication 270: Partial Discharge Measurements. When such measurements show no partial discharges over the appropriate voltage range, and when it can be shown that no damage or significant electrochemical reactions will be associated with partial discharges below the threshold of detection for the instrumentation used, ageing tests under electrical stresses may not be required.

In some cases, electrical ageing has been recognized during tests where no partial discharges appeared. Ageing effects resulting from other aspects of electrical stresses, such as treeing, tracking or electrolytic effects, cannot generally be determined by simple non-destructive measurements on an insulation system. In these cases, experience on similar systems may be a guide for the consideration of these stresses as ageing factors. Preliminary tests before ageing may give valuable information on such effects.

3.2 *Présence d'autres facteurs*

Il peut arriver que des contraintes électriques deviennent un facteur de vieillissement seulement en présence d'un autre facteur, ou après l'action de ce dernier (par exemple: température, humidité, contrainte mécanique), ces autres facteurs modifiant les caractéristiques du système de façon réversible ou irréversible.

Dans ce cas, les contraintes électriques doivent être prises en considération même si elles ne causent aucun vieillissement en dehors de l'action, simultanée ou non, de ces autres facteurs.

La méthode d'essai peut alors tenir compte de ces influences combinées. Les méthodes d'essai mettant en jeu des influences combinées sont encore dans un état de développement peu avancé. Leurs résultats ne se prêtent pas toujours à des interprétations générales.

Dans ce cas aussi, l'expérience acquise sur un matériel similaire permettra de juger de la nécessité de retenir le facteur électrique comme un facteur de vieillissement significatif pour un matériel donné.

4. **Accélération du vieillissement**

Il est souvent nécessaire, au cours des essais fonctionnels, d'accélérer le vieillissement. Deux méthodes pour l'accélération du vieillissement sont reconnues: l'accroissement du niveau de contraintes et l'accroissement de la fréquence. Ces méthodes peuvent être appliquées séparément ou simultanément.

L'effet de vieillissement de contraintes apparaissant seulement dans des circonstances particulières (surtensions) ne nécessite généralement pas d'être accéléré par le niveau de contrainte. On peut appliquer des surtensions transitoires, à des intervalles donnés, comme facteurs de vieillissement sur les échantillons en essai.

4.1 *Accélération par accroissement du niveau de contrainte*

Une large expérience a montré que, pour un système d'isolation et une procédure d'essai donnés, il est possible d'établir une relation empirique, dans les limites de la durée d'essai, entre la tension appliquée et le temps jusqu'à défaillance.

4.1.1 *Formules mathématiques*

Plusieurs formules mathématiques ont été proposées pour représenter cette relation. Comme il est probable que les phénomènes conduisant à la rupture diélectrique dépendent de la durée de l'exposition, ces formules mathématiques sont souvent considérées comme l'expression statistique des résultats. Certaines de ces formules sont données dans l'annexe A ainsi que l'application à une méthode accélérée avec accroissement de la tension par paliers.

La validité de telles formules empiriques doit être évaluée au moyen des résultats d'essais obtenus à plusieurs tensions, qui fournissent les paramètres à utiliser dans les formules.

4.1.2 *Dispersion des résultats*

On doit reconnaître que la dispersion des résultats des mesures effectuées sur un certain nombre d'échantillons fabriqués de la même manière et essayés dans les mêmes conditions est très importante. Par exemple, l'écart quadratique de la contrainte de tension correspondant à un temps jusqu'à défaillance défini et calculé à partir de la relation empirique proposée au paragraphe 4.1.1 ci-dessus, peut aller de quelques centièmes à 10% ou davantage et le rapport du temps maximal au temps minimal jusqu'à rupture pour une même tension appliquée à des échantillons similaires, peut être d'un ou plusieurs ordres de grandeur.

3.2 *Presence of other factors*

It is possible that electrical stresses will become an ageing factor only in the presence of another factor, or after the action of the latter (for instance: temperature, moisture, mechanical stress), these other factors modifying the system characteristics in a reversible or irreversible way.

In this case, electrical stresses should be taken into consideration, even if they do not create any ageing outside the action, simultaneous or not, of these other factors.

The test method may then take these combined influences into account. Test methods involving combined influences are in an early stage of development. The results do not always lend themselves to general interpretations.

In this case also, experience on similar equipment will allow a judgement to be made on the need for retaining the electrical factor as a significant ageing factor for a given equipment.

4. **Ageing acceleration**

It is often necessary to accelerate the ageing in functional testing. Two methods of accelerating electrical ageing are recognized. They are stress level increase and frequency increase. These methods may be applied separately or simultaneously.

The ageing effect of stresses occurring only in special circumstances (overvoltages) does not generally need to be accelerated by the stress level. Transient overvoltages may be applied, at intervals, as ageing factors on the test specimens.

4.1 *Acceleration by stress level increase*

Wide experience has shown that, for a given insulation system and a given test procedure, it is possible to establish an empirical relationship within the test range, between the applied voltage and the time-to-failure.

4.1.1 *Mathematical formulae*

Several mathematical formulae have been proposed for representing this relationship. As it is probable that the phenomena leading to electrical breakdown are dependent on the duration of exposure, mathematical formulae are often considered as a statistical expression of the results. Some are given in Appendix A with application to an accelerated method of step-by-step increasing voltage.

The validity of such empirical formulae shall be assessed by test results obtained at different voltages which provide the constants to be used in the formulae.

4.1.2 *Dispersion of results*

It must be recognized that the dispersion of the measurement results on a certain number of test specimens, manufactured in the same way and tested in the same conditions, is very important. For example, the calculated standard deviation of the voltage stress for a fixed time-to-failure, derived from the empirical relationship assumed in Sub-clause 4.1.1 above, may range from a few per cent to 10% or more, and the ratio of the maximum to the minimum time-to-failure for the same applied voltage on similar specimens may be of one order of magnitude or more.

4.1.3 Choix de la tension d'essai

Afin d'obtenir une représentation valable des résultats sur un graphique, il est souhaitable d'obtenir au moins trois points et de préférence quatre. Les tensions choisies doivent être dans un rapport tel que le rapport du plus élevé au plus faible des temps moyens jusqu'à défaillance soit d'environ 1 000 à 1.

Le niveau de la tension minimale à appliquer peut être choisi de telle façon que la valeur moyenne (ou la valeur médiane) des temps réels d'essai soit une fraction significative de la performance attendue. Dans de nombreux cas, une valeur de 5 % est considérée comme typique. Dans des cas spéciaux, une valeur plus faible peut être acceptable. Des indications concernant la vérification du non-changement du mécanisme de détérioration sont données à l'article 5. Quand ces vérifications ne peuvent être faites, la méthode d'accélération par la fréquence peut être utilisée (voir paragraphe 4.2).

4.1.4 Méthodes d'essai

Comme il n'est pas possible de prévoir la tension de rupture pour un temps donné, il est nécessaire de fixer les tensions d'essais V_1, V_2, V_3, V_4 , par exemple, si quatre tensions sont utilisées, de telle façon que les temps jusqu'à rupture puissent être planifiés. Les rapports $V_2/V_1, V_3/V_2$ et V_4/V_3 peuvent être déterminés par l'expérience ou des essais préliminaires sur des modèles similaires comportant le même type d'isolation à essayer. Par exemple, un rapport $V_2/V_1 = V_3/V_2 = V_4/V_3 = 1,2$ peut être choisi.

De même le rapport de la plus basse tension d'essai V_1 à la tension de service V_n peut être choisi sur la base de l'expérience ou d'essais préliminaires.

4.1.5 Temps jusqu'à perforation

La distribution des temps jusqu'à perforation d'échantillons individuels pour une tension donnée V_i peut souvent être représentée par une distribution normale (gaussienne). Quelquefois la représentation par une loi logarithmique normale est préférable: on peut consulter à ce sujet 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 de résultats d'essais normalement distribués.

D'autres distributions ont aussi été reconnues comme valables. Actuellement la distribution de Weibull est largement utilisée par de nombreux chercheurs et apparaît dans certains cas être une meilleure variante que la distribution logarithmique normale.

Dans le premier cas (distribution normale) la valeur moyenne de la distribution est généralement prise comme caractéristique représentative de la population. Une estimation de ce paramètre peut être calculée à partir de la formule:

$$t_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} t_{ij}}{n} \quad (1)$$

où t_{ij} sont les temps individuels jusqu'à perforation sous la tension V_i , et n est le nombre des échantillons essayés à la tension V_i ($j = 1, 2, \dots, n$).

Dans le second cas (distribution logarithmique normale), il est préférable d'employer la moyenne logarithmique, dont on peut obtenir une estimation à partir de la formule:

$$\log t_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} \log t_{ij}}{n} \quad (2)$$

Cette valeur est moins influencée par une valeur unique très élevée.

Dans les deux cas, la valeur médiane peut être prise comme estimation de la caractéristique représentative (moyenne arithmétique ou logarithmique des temps jusqu'à perforation). Cette valeur est égale au temps d'ordre $\frac{n+1}{2}$ si n est impair, et égale à la moyenne des temps d'ordre $\frac{n}{2}$ et $\frac{n}{2} + 1$ si n est pair.

4.1.3 Choice of test voltages

To obtain a valid representation of the results on a graph, it is desirable to obtain at least three and preferably four points. The voltages selected should be in such a ratio that the ratio of highest to lowest mean time to failure may be about 1000 to 1.

The minimum level of testing voltage to be applied may be chosen in such a way that the mean value (or median value) of the actual test times should be a significant part of the intended performance. In many cases, a value of 5% is considered as being typical. In special cases, lower figures than this may be acceptable. Indications concerning the verification of an unchanged deterioration mechanism are given in Clause 5. When this cannot be accomplished, the method of acceleration by frequency may be used (see Sub-clause 4.2).

4.1.4 Test methods

Since it is not possible to establish in advance a breakdown voltage for a given time, it is necessary to determine voltages V_1 , V_2 , V_3 and V_4 for instance, should four voltages be used, in order that the failure times at these voltages can be planned. The ratios V_2/V_1 , V_3/V_2 and V_4/V_3 may be fixed by experience or preliminary tests on similar models containing the specific type of insulation to be tested. For instance, a quotient $V_2/V_1 = V_3/V_2 = V_4/V_3 = 1.2$ may be chosen.

Similarly, the ratio of the lowest test voltage V_1 to the operating voltage V_a can be selected by experience or preliminary tests.

4.1.5 Time-to-breakdown

The distribution of the time-to-breakdown of the individual specimens at a given voltage V_i may often be represented by a normal (Gaussian) distribution. Sometimes it is better represented by a logarithmic normal distribution: see 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.

Other statistical distributions have also been found to be valuable. Currently Weibull distribution is extensively used by many researchers and appears in some cases to be a better alternative than the logarithmic normal distribution.

In the first case (normal distribution), the mean value of the distribution is usually taken as a representative characteristic of the population. An estimate of this parameter may be calculated from:

$$t_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} t_{ij}}{n} \quad (1)$$

where t_{ij} are the individual times-to-breakdown at voltage V_i and n is the number of specimens tested at voltage V_i , ($j = 1, 2, \dots, n$).

In the second case (logarithmic normal distribution), it is preferred to use the logarithmic mean value, an estimate of which is obtained from:

$$\log t_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} \log t_{ij}}{n} \quad (2)$$

This value is less influenced by a single extremely high value.

In both cases, the sample median may be taken as an estimate of the representative characteristic (arithmetic or logarithmic mean time-to-breakdown). This value is equal to time number $\frac{n+1}{2}$ if n is odd, and equal to the average of time number $\frac{n}{2}$ and time number $\frac{n}{2} + 1$ if n is even.

Cette dernière procédure fournit une estimation moins précise des paramètres de la distribution que les deux premières (c'est-à-dire avec une erreur normale supérieure), mais présente l'avantage que l'essai peut être arrêté lorsque environ la moitié des échantillons sont détruits.

Dans une expérience comportant des essais à plusieurs niveaux de tension, une seule méthode doit être utilisée pour l'estimation des paramètres de la population.

4.2 *Accélération par accroissement de la fréquence*

On admet généralement que, pour un vieillissement dû aux décharges partielles, la durée de vie à une tension donnée est inversement proportionnelle à la fréquence, aussi longtemps que le nombre de décharges par cycle est constant et que l'énergie de décharge par cycle est également constante.

Ces hypothèses ne sont valables que pour des fréquences dont la valeur limite dépend du montage, des conditions d'essai et de la nature du système d'isolation. Le niveau de cette fréquence ne peut être donné d'une façon générale. Le vieillissement dû à d'autres causes que les décharges partielles peut ne pas être accéléré suivant la même loi. Les pertes diélectriques, qui sont aussi accrues par la fréquence, ne doivent pas affecter de façon significative la température de l'échantillon. Il est important de contrôler et d'enregistrer cette température.

Comme dans le cas de l'accélération par la tension, toute accélération par la fréquence ne sera permise qu'après une étude approfondie pour en démontrer la validité. L'expérience a montré que certains systèmes d'isolation ne pouvaient valablement être exposés à des fréquences supérieures à quelques centaines de hertz tandis que d'autres semblent donner des résultats valables lorsqu'ils sont exposés à des fréquences de plusieurs milliers de hertz.

4.2.1 *Choix des fréquences*

Dans l'état actuel des connaissances et pour une fréquence de service de 50 Hz ou 60 Hz, il semble bon de ne pas dépasser une fréquence d'environ 1000 Hz sans une étude approfondie.

Dans certains cas, il est recommandé d'effectuer cet essai en complément de l'essai sous tension accrue à fréquence industrielle, qui est décrit au paragraphe 4.1.

4.2.2 *Calcul des résultats*

Comme ces essais sont effectués à tension constante, les résultats peuvent être calculés selon la méthode décrite au paragraphe 4.1.5.

La comparaison de deux essais à la même tension et à des fréquences différentes, effectués comme indiqué, permet de vérifier l'hypothèse donnée au paragraphe 4.2. Dans ce cas, les résultats d'un essai à fréquence accélérée peuvent être transformés en essai de durée de vie équivalente à fréquence industrielle.

5. **Mécanismes de vieillissement**

La Publication 610 de la CEI: Principaux aspects de l'évaluation fonctionnelle des systèmes d'isolation électriques; Mécanismes de vieillissement et procédures de diagnostic, décrit des mécanismes de vieillissement et des méthodes de vérification. Les alinéas suivants rappellent quelques aspects des mécanismes de vieillissement au cours d'essais de vieillissement électrique et quelques méthodes de vérification.

Comme l'action des décharges partielles est l'un des facteurs importants de vieillissement, il est généralement utile de mesurer leur valeur (niveau, énergie dissipée par période, débit quadratique de charges apparentes, etc.) dans les conditions de tension et de fréquence en service et dans les conditions

The latter procedure yields a less precise estimate of the distribution parameters than the first two mentioned (i.e. with a higher standard error), but has the advantage that the test may be stopped at the time when about half the specimens have failed.

In one experiment comprising tests at several voltage levels, only one method for determining the estimate of the population parameters should be used.

4.2 *Acceleration by frequency increase*

It is generally agreed that, for ageing resulting from partial discharges, the life at a given voltage is inversely proportional to the frequency, as long as the number of discharges per cycle is constant and the discharge energy per cycle is also constant.

This hypothesis is valid only up to frequency levels which depend on the test arrangement, test conditions and the nature of the insulation system. It cannot be generally stated. Ageing caused by other than partial discharges may not be accelerated according to the same law. The dielectric losses, which are increased by the frequency, should not be permitted to affect significantly the temperature of the specimen. It is important to control and record this temperature.

As in the case of acceleration by voltage, any acceleration by frequency should be permitted only after careful study to demonstrate validity. Experience has shown that certain insulation systems cannot be validly exposed to frequencies higher than a few hundred hertz whereas others appear to provide very valid data when exposed to frequencies of several thousand hertz.

4.2.1 *Choice of frequencies*

In the present state of knowledge, and for an operating frequency of 50 Hz or 60 Hz, it seems advisable not to exceed a frequency of about 1 000 Hz without careful study.

In some cases, it is recommended that this test be performed in addition to the increased voltage level test at power frequency, as described in Sub-clause 4.1.

4.2.2 *Calculation of results*

Since these tests are performed at constant voltages, the result may be calculated as in Sub-clause 4.1.5.

The comparison of two tests at the same voltage and different frequencies performed as indicated may verify the hypothesis given in Sub-clause 4.2. In this case, the result of an increased frequency test may be transformed into an equivalent power frequency life.

5. **Ageing mechanisms**

IEC Publication 610: Principal Aspects of Functional Evaluation of Electrical Insulation Systems: Ageing Mechanisms and Diagnostic Procedures, describes mechanisms of ageing and methods of verification. The following paragraphs recall some aspects of ageing mechanisms during electrical ageing and some methods of verification.

Since the action of partial discharges is one of the important ageing factors, it is generally useful to measure partial discharge values (level, discharge energy dissipated per cycle, quadratic rate of apparent charges, etc.) in operating conditions of voltage and frequency and in the testing conditions

d'essai et d'évaluer ainsi le degré d'accélération du vieillissement obtenu dans les essais. On considère souvent que des conditions normales d'accélération sont obtenues, par élévation de fréquence, si les conditions du paragraphe 4.2 sont vérifiées.

Aucune règle générale ne peut être donnée pour l'accélération par le niveau de contrainte (paragraphe 4.1) mais une attention particulière est nécessaire si une grande variation des caractéristiques des décharges partielles apparaît entre les conditions d'essai et les conditions de service.

Lorsque la méthode est applicable, l'analyse des gaz produits peut donner des renseignements sur un changement du mécanisme de vieillissement. Il est connu que les produits de dégradation par décharges partielles sont généralement composés d'hydrocarbures légers et d'oxydes de carbone, dont la nature et les proportions dépendent de l'énergie dissipée au niveau de la molécule.

De plus, l'aspect d'un échantillon vieilli après rupture diélectrique peut être comparé à celui des composants retirés d'un matériel en service. L'analyse des produits de dégradation solides peut donner une information complémentaire.

Les mêmes techniques peuvent être utilisées pour choisir d'autres conditions d'essai ou fixer le niveau d'autres facteurs d'influence.

L'expérience montre, par exemple, que les caractéristiques des décharges partielles sont fortement modifiées par la température, de même que d'autres propriétés telles que la perméabilité aux gaz produites par le vieillissement. Un essai préliminaire doit être fait pour choisir la température pendant les essais, ou pour spécifier deux températures ou davantage, ou des variations de température au cours de l'essai, de façon à reproduire autant que possible les conditions présumées en service.

SECTION DEUX – PROCÉDURES D'ESSAI

6. Dispositions générales

Les procédures d'essai pour l'évaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation pour le matériel électrique doivent inclure des observations détaillées qui fournissent une explication claire des objectifs des essais particuliers en rapport avec les besoins de l'industrie et les exigences particulières existantes.

Les Comités d'Etudes de Matériel doivent s'assurer que chaque procédure d'essai:

- a) donne des résultats statistiquement valables appuyés sur des bases scientifiques et technologiques saines;
- b) fournit des résultats indépendants de l'influence de l'opérateur;
- c) aboutit à des informations en corrélation avec les résultats de l'expérience en service d'une façon généralement acceptable.

7. Objets d'essai

Chaque fois que cela est possible, le matériel lui-même doit être utilisé pour l'évaluation des systèmes d'isolation. Cependant, lorsque la dimension et les possibilités d'essais nécessitent leur utilisation, les systèmes d'isolation peuvent être évalués sur des modèles plutôt que sur le matériel en vraie grandeur.

Les procédures d'essai doivent comporter la description des modèles lorsque des modèles sont utilisés. Un modèle peut comporter plus d'un système d'isolation ou échantillon d'essai.

thus evaluating the degree of ageing obtained during the tests. It is often considered that normal acceleration conditions are obtained by frequency acceleration, if the conditions of Sub-clause 4.2 are met.

No general rule can be given for the acceleration by voltage stress level (Sub-clause 4.1), but careful attention is necessary if a large variation of partial discharge characteristics appears between testing and operating conditions.

When applicable, analysis of evolved gas may give information on a change in the ageing mechanism. It is known that the products of degradation by partial discharges are generally composed of light hydrocarbons and carbon oxides, the nature and proportion of which are dependent on the energy dissipated at the molecular level.

Furthermore, the appearance of an aged sample after electrical breakdown may be compared to that of components removed from equipment in service. The analysis of solid degradation products could provide additional information.

These techniques may also be used to choose other conditions of test, or to select levels of other factors of influence.

Experience shows, for instance, that conditions of partial discharges are strongly modified by temperature, as well as other characteristics such as permeability to gas produced by ageing. A preliminary test should be made to choose the temperature during testing or to specify two or more temperatures or variations of temperature during the test in order to reproduce as far as possible conditions anticipated in service.

SECTION TWO – TEST PROCEDURES

6. General

Test procedures for the evaluation of electrical endurance of insulation systems for electrical equipment should include descriptive remarks providing a clear understanding of the objectives of the particular tests with respect to the industry and the special requirements that exist.

The Equipment Technical Committees should ensure that each test procedure:

- a) gives statistically consistent results based on sound scientific and engineering grounds;
- b) provides data free from bias of the tester;
- c) results in information which correlates with field experience in a generally acceptable manner.

7. Test objects

Wherever practicable, the equipment itself should be used for the evaluation of insulation systems. However, when size and convenience require their use, insulation systems may be evaluated by models rather than by full-size equipment.

Test procedures shall include descriptions of the models, if models are used; a model may include more than one insulation system or test specimen.

Les modèles doivent être faits de façon à incorporer les éléments essentiels du matériel qu'ils représentent, et en particulier ceux qui concernent les contraintes électriques. Cependant les systèmes répartiteurs de tension peuvent parfois être adaptés aux contraintes présentes pendant l'essai.

Les procédures d'essai doivent spécifier le nombre minimal de modèles et d'échantillons qui doivent être essayés dans chaque configuration particulière d'essai de vieillissement afin d'obtenir une précision statistique raisonnable. Plus grande est la dispersion des temps jusqu'à rupture des échantillons exposés à chaque niveau de contrainte électrique, plus grand doit être le nombre d'éprouvettes d'essai requis pour obtenir un degré acceptable de confiance.

Le nombre d'objets à essayer utilisé à chaque niveau d'essai doit donc être déterminé par une analyse statistique de la dispersion des temps jusqu'à défaillance, et par le degré de précision désiré pour déterminer la durée de vie moyenne. Parfois, la valeur médiane est utilisée comme estimation de cette caractéristique. Le paragraphe 4.1.5 donne des exemples de calcul du temps jusqu'à perforation.

Des essais préliminaires peuvent être inclus pour s'assurer que les objets en essais sont représentatifs du système à essayer.

8. Influence de l'environnement et de la température

Il convient de noter que les résultats d'endurance électrique réalisés dans des conditions d'environnement différentes ne sont pas directement comparables.

L'influence de la température sur l'endurance électrique est reconnue comme particulièrement importante, mais le sens de cette influence dépend des conditions d'essai et du système d'isolation. On doit s'attacher particulièrement à ce fait lorsqu'on rédige les procédures d'essai. Afin de couvrir la gamme des températures de service, on pourra spécifier des essais à deux températures ou plus.

Quand le matériel fonctionne dans des conditions atmosphériques particulières, par exemple dans une ambiance chimique particulière, dans la poussière ou dans un liquide, les conditions d'essais peuvent simuler les conditions de service. Alors, dans ces cas particuliers, la définition de l'environnement peut être incluse dans la procédure d'essai.

9. Influence des matériaux associés et des produits de dégradation

Les procédures d'essai doivent prendre en compte les effets détériorants possibles des matériaux associés sur le système d'isolation. De tels matériaux peuvent appartenir au système d'isolation ou aux parties voisines dans les éléments qui le supportent, dans le matériel lui-même, ou dans le système de refroidissement. La ventilation utilisée pendant le vieillissement des objets en essai ne doit pas affecter les mécanismes de vieillissement qui apparaissent normalement en service. On devra ainsi prêter attention à l'enlèvement ou à la rétention des produits de dégradation.

10. Procédures de vieillissement

L'objectif principal des procédures d'essai est la détermination de changements dans les caractéristiques essentielles des systèmes d'isolation lorsqu'ils sont exposés, à des degrés variés, aux contraintes électriques, d'une façon continue ou cyclique. Cela est obtenu par une exposition continue ou périodique des modèles (ou du matériel lui-même) à des contraintes électriques contrôlées.

Des facteurs de diagnostic peuvent être appliqués simultanément ou périodiquement à l'objet en essai pour évaluer tout changement de ses caractéristiques essentielles.

Models should be made to embody the essential elements of the equipment they represent, and particularly those concerning electrical stresses. However, voltage grading devices may sometimes need to be adapted to stresses used during testing.

Test procedures shall specify the minimum number of models and test specimens that are to be tested under each particular ageing condition in order to obtain reasonable statistical accuracy. The wider the spread in failure times among the specimens exposed at each electrical stress level, the larger the number of test specimens required to achieve an acceptable degree of confidence.

The number of test objects used at each stress level should, therefore, be determined by a statistical analysis of the scatter of times-to-failure and by the degree of accuracy desired in determining average specimen life. Sometimes, the median value is used as an estimate of this characteristic. Sub-clause 4.1.5 gives examples of computation of time-to-breakdown.

Preliminary tests may be included to ensure that test objects are typical of the system being tested.

8. Influence of environment and temperature

It should be noted that electrical endurance results under different environmental conditions are not directly comparable.

The influence of temperature on electrical endurance is recognized as being particularly important, but the direction of this influence depends upon the test conditions and the insulation system. Special attention should be paid to this when specifying the test procedure. To cover the range of operating temperatures, tests at two or more temperatures may be specified.

When the equipment operates under special atmospheric conditions, for example chemical, dust or in a liquid, the test conditions may simulate the service conditions. Thus, in these special cases, environmental conditioning may be included in the test procedure.

9. Influence of associated materials and products of degradation

Test procedures shall take cognizance of the possible degrading effect of associated materials on insulation systems. Such materials may be part of the insulation system or adjacent parts in the physical support, in the equipment itself or in the cooling medium. The ventilation used during the ageing of test objects should not significantly affect the ageing mechanisms normally experienced in service. Consideration should be given to removal or retention of degradation products.

10. Ageing procedures

The primary objective of test procedures is the determination of changes in the essential characteristics of insulation systems under various degrees of electrical stress exposure, either continuous or cyclic. This is accomplished by continuous or periodic exposure of models (or equipment itself) to controlled electrical stress conditions.

Diagnostic factors may be applied simultaneously or periodically to the test object to evaluate any change in essential characteristics.

Le critère de fin de vie peut être:

- la rupture diélectrique sous la tension d'essai;
- la rupture diélectrique sous une surtension appliquée périodiquement;
- l'obtention d'un niveau défini d'un facteur de diagnostic.

L'évaluation comporte fréquemment un essai d'endurance électrique accéléré dans l'ambiance spécifiée. On peut se reporter à la section un pour une plus ample information sur l'accélération par le niveau ou la fréquence de la tension appliquée.

10.1 *Accélération par le niveau de contrainte*

Pour obtenir des résultats utiles, on suggère d'évaluer tout système en essai à au moins trois niveaux de tension.

Suivant le type de matériel considéré, les procédures d'essai peuvent spécifier le rapport entre le niveau de contrainte en essai le plus faible et le niveau auquel les résultats pourront être extrapolés. Les rapports entre les différents niveaux d'essais peuvent aussi être spécifiés.

10.2 *Accélération par la fréquence*

On a trouvé pour quelques systèmes d'isolation que, pour un vieillissement causé par les décharges partielles, l'endurance électrique à une tension donnée est, d'une façon approchée, inversement proportionnelle à la fréquence. Les limites de l'accélération de la fréquence doivent être spécifiées dans les procédures d'essai. Un échauffement excessif par les pertes diélectriques doit être évité.

On suggère que des essais à fréquence accélérée soient effectués en combinaison avec des essais à contrainte accrue à la fréquence de service.

On choisit souvent le plus haut niveau de tension à fréquence accélérée égal au plus bas niveau à la fréquence de service, et on effectue des essais complémentaires à fréquence accélérée à des niveaux de tension encore plus bas. Les procédures d'essais peuvent fixer les conditions dans lesquelles il est possible d'accepter l'équivalence entre un résultat acquis à la fréquence accélérée avec les résultats d'essais à la fréquence de service, en multipliant les temps par le rapport des fréquences.

Lorsque les mécanismes de vieillissement sont bien connus, les procédures d'essai peuvent fixer les conditions dans lesquelles un essai à fréquence accélérée peut être considéré comme suffisant, sans nécessiter la comparaison avec un essai à la fréquence de service.

10.3 *Tolérances sur les paramètres*

Les spécifications des niveaux de contrainte, de fréquence et des autres conditions doivent inclure les tolérances sur les valeurs spécifiées. Il faut prendre en considération le nombre et la durée des interruptions de la tension appliquée. Dans de nombreux cas, la tension a été maintenue à $\pm 2\%$ de la valeur spécifiée avec des variations de courte durée (moins de 5 % du temps) dans des limites de $\pm 5\%$.

11. **Vérification des mécanismes de vieillissement**

Lors de l'évaluation des systèmes d'isolation au moyen d'essais fonctionnels accélérés, une importante source de conclusions erronées réside dans la difficulté à détecter le changement possible des mécanismes de vieillissement lorsque les conditions d'essai diffèrent de celles qui sont rencontrées en service. Le risque augmente en accroissant le facteur d'accélération. Pour cette raison, il est nécessaire de vérifier la présomption que les mécanismes de vieillissement sont les mêmes dans les essais et en service.

The end-point criterion can be:

- breakdown at test voltage;
- breakdown at an overvoltage which may be applied periodically;
- reaching a defined level of a diagnostic factor.

Evaluation often involves accelerated electrical endurance testing in the specified environmental conditions. See Section One for further discussion of acceleration by level and by frequency.

10.1 *Acceleration by stress level*

To obtain useful results, it is suggested that any system being evaluated should have not less than three electrical stress levels under study.

Depending on the electrical equipment involved, the test procedures may specify the ratio between the lowest test stress level and the stress level to which the results will be extrapolated. The ratios between the test stress levels may also be specified.

10.2 *Acceleration by frequency*

For some insulation systems it has been found that, for ageing due to partial discharges, the electrical endurance at a given voltage is approximately inversely proportional to frequency. The limits of frequency acceleration should be specified in the test procedures. Excessive dielectric heating should be avoided.

It is suggested that the frequency accelerated tests be performed in combination with tests at the increased stress levels at operating frequency.

The highest voltage level at the increased frequency is often selected to be equal to the lowest voltage level of the operating frequency test, with additional tests at the increased frequency performed at still lower voltage levels. Test procedures can set the conditions in which one can accept the equivalence of a high frequency result with an operating frequency test, the times being multiplied by the frequency ratio.

When the ageing mechanisms are well known, the test procedures can fix the conditions in which a test at accelerated frequency can be considered sufficient, without requiring a comparison with a test at operating frequency.

10.3 *Tolerances on parameters*

Specifications of electrical stress levels, frequency and other test conditions should include tolerances on the specified values. The number and duration of voltage interruptions should be considered. In many cases, the voltage has been maintained within $\pm 2\%$ of the specified value with short period variations (less than 5% of the time) of $\pm 5\%$.

11. **Verification of ageing mechanisms**

When evaluating insulation systems by accelerated functional tests, one important source of erroneous conclusions is the difficulty of detecting possible changes in ageing mechanisms when test conditions differ from those in service. The risk increases with increasing acceleration of the test. Because of this, it is necessary that the assumptions of the same ageing mechanisms in test and in service be verified.

Parmi les mesures et les observations qui peuvent être utiles à cet effet, on peut retenir:

- a) les pertes diélectriques;
- b) la distribution en amplitude et phase des décharges partielles;
- c) les changements de la pente de la courbe du niveau de contrainte en fonction du temps jusqu'à défaillance;
- d) les modifications de la distribution statistique des temps individuels jusqu'à défaillance;
- e) les changements dans la position des points de claquage et leur aspect.

D'autres méthodes peuvent être proposées par les Comités d'Etudes de Matériel.

Toute technique utilisée pour vérifier les mécanismes de vieillissement doit présenter un effet de vieillissement négligeable comparé à celui de l'essai lui-même.

12. Méthodes de diagnostic et critères de fin de vie

Des méthodes de diagnostic et des critères de fin de vie autres que la rupture diélectrique en cours d'essai peuvent être utiles.

Des techniques de diagnostic sont décrites dans la Publication 610 de la CEI. Les Comités d'Etudes de Matériel peuvent choisir parmi ces techniques. Les procédures d'essai devront spécifier les méthodes de diagnostic retenues. Beaucoup de ces mesures peuvent être faites sous tension, sans interrompre l'essai d'endurance. D'autres techniques de diagnostic peuvent être utilisées périodiquement, après avoir séparé les échantillons de la source de tension, par exemple, des surtensions d'épreuve pour simuler les surtensions en service.

Toutes les mesures faites à titre de diagnostic doivent avoir un effet de vieillissement négligeable comparé au vieillissement de l'essai lui-même.

13. Variantes de procédures d'essai

13.1 Essai continu à niveau de contrainte fixe

Les procédures d'essai peuvent spécifier que tous les objets en essai soient essayés à une contrainte électrique fixe jusqu'à défaillance. De ces essais, on peut tirer et interpréter les caractéristiques de temps jusqu'à défaillance à chaque niveau de contrainte (voir paragraphe 4.1.5).

13.2 Essais à niveaux croissants de contrainte

Dans des cas particuliers, il est possible d'effectuer les essais d'endurance électrique à des niveaux croissants de contrainte sur chaque objet en essai.

Des méthodes de ce type ont été décrites dans la littérature technique. Dans une telle procédure d'essai, il est nécessaire de spécifier, en complément aux autres conditions d'essais déjà mentionnées, une relation mathématique définie entre le niveau de contrainte et le temps jusqu'à défaillance et une méthode de calcul pour ramener tous les résultats d'essais à un temps commun ou une valeur de contrainte commune.

La vérification de la non-modification du mécanisme de vieillissement est particulièrement importante dans cette méthode d'essai d'endurance électrique. L'annexe A décrit un exemple d'une telle procédure.

13.3 Essais cycliques

Des niveaux de contraintes fixes ou croissantes peuvent être utilisés dans les essais cycliques. Chaque cycle d'essai doit comporter une période d'exposition à la contrainte électrique. La durée de chaque cycle doit être spécifiée.

Among measurements and observations which could be useful for this purpose are the following:

- a) dielectric losses;
- b) amplitude and time distribution of partial discharges;
- c) changes in slope of the relationship between stress level and time-to-failure;
- d) changes in statistical distribution governing individual times-to-failure;
- e) changes in location of failures and their appearance.

Other methods may be proposed by Equipment Technical Committees.

All techniques used for monitoring of ageing mechanisms should have a negligible ageing effect compared with the ageing in the test.

12. Diagnostic methods and end-point criteria

Diagnostic methods and end-point criteria other than dielectric breakdown during ageing may be useful.

Diagnostic techniques are described in IEC Publication 610. Equipment Technical Committees may choose from among these techniques. Test procedures should specify diagnostic methods chosen. Many diagnostic measurements can be made without interrupting the endurance test. Other diagnostic techniques may be used at intervals, after removing specimens from the voltage source; for example, overvoltage proof tests to simulate overvoltages in operation.

All diagnostic measurements should have a negligible ageing effect compared with the ageing in the test.

13. Alternative test procedures

13.1 *Continuous fixed stress levels*

The test procedures may specify that all test objects be tested at fixed electrical stress levels until failure. From such tests, characteristic times to failure at each stress level may be obtained and interpreted (see Sub-clause 4.1.5).

13.2 *Increasing stress levels*

In special cases, it may be possible to perform electrical endurance tests with increasing stress levels for each test object.

A number of such methods have been described in the technical literature. In such a test procedure, it is necessary to specify, in addition to all other test conditions already mentioned, a definite mathematical relationship between stress level and time to failure and a method of reducing all test results to a common time or a common stress level value.

Verification of unchanged ageing mechanisms in this method of electrical endurance testing is particularly important. Appendix A describes an example of such a procedure.

13.3 *Cyclic tests*

Either fixed or increasing stress levels may be used in cyclic tests. Each test cycle shall include an electrical stress exposure period. The duration of each cycle shall be specified.

Si des surtensions sont considérées comme des facteurs de vieillissement en service, l'application périodique de surtensions peut être spécifiée. Les procédures d'essai doivent spécifier le nombre, la durée et le niveau de ces surtensions.

14. Rapport – Evaluation des résultats

Les résultats des essais peuvent être reportés sur un graphique en utilisant des temps moyens ou médians jusqu'à rupture. Il est possible d'utiliser un papier à coordonnées log-log ou semi-logarithmique. Il est préférable d'utiliser le graphique donnant la représentation la plus linéaire. La procédure doit spécifier le type de graphique conformément à l'expérience.

Si les méthodes d'accélération par le niveau et la fréquence ont toutes deux été utilisées, on tracera les graphiques pour chaque fréquence. Dans ce cas, si les résultats obtenus à la même tension et à deux fréquences donnent un rapport des temps très sensiblement égal à l'inverse du rapport des fréquences, on obtiendra une meilleure interprétation des résultats.

15. Interprétation des données d'essais d'endurance

Les Comités d'Etudes de Matériel doivent admettre que, sur la base de l'état actuel de la technologie de l'isolation électrique, seules les évaluations comparatives peuvent être faites. Comme la Publication 505 de la CEI le reconnaît, il est souhaitable qu'en définitive on puisse procéder à des évaluations en termes absolus. Cependant, cela n'est pas possible aujourd'hui.

Lorsque, dans les résultats, les Comités d'Etudes de Matériel expriment la relation entre la contrainte électrique et le temps jusqu'à défaillance, ils doivent clairement faire apparaître que les coordonnées de cette relation utilisent le temps réel (par exemple exprimé en heures) soit dans les limites de l'essai, soit par extrapolation.

Cependant, les extrapolations ne reflètent pas nécessairement la durée de vie en service du matériel en valeur absolue.

Quand les systèmes d'isolation sont essayés suivant ces procédures d'essai, il est important pour l'uniformité des procédures d'essai de spécifier ce qui suit :

- a) les limites de contraintes électriques dans lesquelles les données d'endurance du système d'isolation peuvent être extrapolées ou la valeur à laquelle l'extrapolation doit être limitée;
- b) le traitement mathématique des données y compris une expression des limites de confiance;
- c) les limitations supplémentaires concernant l'extrapolation et l'étendue des données si la relation entre la contrainte électrique et le temps jusqu'à défaillance n'est pas linéaire dans le système de coordonnées utilisé;
- d) les valeurs de la contrainte électrique ou le temps à considérer pour l'estimation des performances des systèmes d'isolation à comparer.

Les considérations ci-dessus peuvent différer en fonction des types de matériel et de systèmes d'isolation. Les distributions statistiques appropriées et les échelles de transformation à utiliser peuvent être différentes selon les cas.

On doit spécifier des limitations particulières dans les cas où les relations «contrainte électrique en fonction du temps jusqu'à défaillance» pour deux systèmes à comparer sont franchement dissemblables et où leur représentation graphique n'est pas raisonnablement parallèle.

If overvoltages are considered as ageing factors in service of the insulation system, overvoltage application may be specified at intervals. The test procedures should specify the number, duration and level of these applications.

14. Report – Evaluation of results

The results of the tests may be reported on a graph on which mean times or median times to failure are entered. One may use log-log or semi-log co-ordinate paper. It is preferable to use the graph giving better linearity of the plot. The procedure may specify the choice according to experience.

If acceleration by level and by frequency have both been used, graphs for each frequency should be drawn. In this case, if the results at the same voltage level and two frequencies give a time ratio essentially equal to the reciprocal of the frequency ratio, the interpretation of the results is improved.

15. Interpretation of electrical endurance data

The Equipment Technical Committees should recognize that, based on the present state of the art of electrical insulation technology, only comparative evaluations may be made. As recognized in IEC Publication 505, it is desirable ultimately to be able to make evaluations in absolute terms. However, that is not possible at this time.

The Equipment Technical Committees, when assessing the relationship between electrical stress level and time-to-failure, should clearly note that the co-ordinates of these relationships will use actual values of time (for example hours) either within the test range, or extrapolated.

However, extrapolations will not necessarily reflect the operating life of the equipment in absolute terms.

When insulation systems are tested according to the test procedures, it is important for uniformity that the test procedures specify the following:

- a) the electrical stress range over which the endurance values of insulation systems may be extrapolated or the value to which the extrapolation should be limited;
- b) the mathematical treatment of the data including an expression of confidence limits;
- c) the additional limitations regarding extrapolation and the spread of data, if the relationship between electrical stress and time-to-failure is not linear in the co-ordinate system used;
- d) the values of the electrical stress or the time to be used for estimating the performance of the insulation systems being compared.

The above considerations may be different for various types of equipment and insulation systems. The appropriate statistical distributions and scale of transformations to be used may differ from case to case.

Special limitations should be specified for the case in which the relationship between electrical stress and time-to-failure for the insulation systems being compared are quite dissimilar or are not reasonably parallel.

ANNEXE A

ESSAI À TENSION CROISSANT PAR PALIERS

A1. Généralités

Les durées individuelles jusqu'à perforation d'un groupe d'échantillons identiques, essayés à la même tension, peuvent varier dans un rapport de un à dix, ou même davantage, et le quotient du temps jusqu'à défaillance le plus long par le temps moyen ou médian peut être de 3 à 1 ou plus.

Ainsi le temps jusqu'à perforation des derniers échantillons est beaucoup plus long que les temps moyens ou médians qui sont les valeurs utiles pour les essais.

Il est donc possible de raccourcir le temps d'un essai complet de tout le groupe d'échantillons par un essai à tension croissant par paliers.

Il est aussi possible d'employer une procédure combinée, par l'application d'une tension constante jusqu'à la valeur médiane des temps jusqu'à défaillance, suivie de l'application d'une tension croissant par paliers.

A2. Principe

Dans le cas d'un essai à tension croissant par paliers, il est nécessaire de choisir une loi mathématique pour le calcul des résultats.

Diverses formules mathématiques ont été proposées:

$$V^k T = A \quad (1)$$

$$(V - V_0)^k T = A \quad (1a)$$

$$V = V_0 - N \log \frac{T}{T_0} \quad (2)$$

dans lesquelles V et T sont respectivement les tensions appliquées et les temps d'application, V_0 et T_0 un couple de valeurs particulières, A , k et N étant des constantes propres au système en essai.

Diverses études théoriques ont été publiées pour justifier ces représentations mathématiques. Certains auteurs retiennent deux fonctions du type (1) avec des coefficients k et k' différents, de part et d'autre d'une certaine limite de temps.

Le présent rapport se rapporte à la loi mathématique (1) qu'on peut écrire:

$$k \log V + \log T = \log A$$

dont la représentation graphique est une droite en coordonnées log-log.

Cette procédure est applicable lorsque k , pente de la courbe d'endurance électrique en coordonnées log-log, a été approximativement déterminée par des expériences antérieures ou par un essai d'endurance électrique à tension constante conduit approximativement jusqu'au temps médian jusqu'à défaillance. Les points de fin de vie pour les échantillons les plus endurants ou pour un autre groupe non encore essayé d'échantillons similaires, peuvent être déterminés par cette procédure de tension croissant par paliers avec un gain de temps significatif.

Dans l'hypothèse où k est inconnu, d'autres méthodes qui ne nécessitent pas cette connaissance peuvent être employées. Ces méthodes sont disponibles dans la littérature mais elles sortent du cadre du présent rapport.