

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
RAPPORT DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC REPORT

Publication 792-1

Première édition — First edition

1985

**Essais fonctionnels à plusieurs facteurs
de systèmes d'isolation électrique**

Première partie: Procédures d'essai

**The multi-factor functional testing
of electrical insulation systems**

Part 1: Test procedures



© CEI 1985

Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

3, rue de Vanemé

Genève, Suisse

Révision de la présente publication

Le contenu technique des publications de la C.E.I. 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 pouvant être obtenus auprès des Comités nationaux de la C.E.I. et en consultant les documents ci-dessous :

- Bulletin de la C.E.I.
- Annuaire de la C.E.I.
- Catalogue des publications de la C.E.I.
Publié annuellement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la Publication 50 de la C.E.I. : Vocabulaire Electro-technique International (VEI), 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 VEI peuvent être obtenus sur demande.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit repris du VEI, 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 C.E.I., le lecteur consultera :

- la Publication 27 de la C.E.I. : Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique ;
- la Publication 617 de la C.E.I. : Symboles graphiques pour schémas.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit repris des Publications 27 ou 617 de la C.E.I., soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Publications de la C.E.I. établies par le même Comité d'Etudes

L'attention du lecteur est attirée sur la page 3 de la couverture, qui énumère les publications de la C.E.I. 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
- IEC Yearbook
- Catalogue of IEC Publications
Published yearly

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC Publication 50: International Electrotechnical Vocabulary (IEV), 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 IEV will be supplied on request.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV 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 617: Graphical symbols for diagrams.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC Publications 27 or 617, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

IEC publications prepared by the same Technical Committee

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

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
RAPPORT DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC REPORT

Publication 792-1

Première édition — First edition

1985

**Essais fonctionnels à plusieurs facteurs
de systèmes d'isolation électrique**

Première partie: Procédures d'essai

**The multi-factor functional testing
of electrical insulation systems**

Part 1: Test procedures



© CEI 1985

Droits de reproduction réservés — Copyright all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque
forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la
photocopie et les microfilms, sans l'autorisation écrite de l'auteur.

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 Varembé
Genève, Suisse

Price
Price fr.s. 40.—

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
INTRODUCTION	6
 SECTION UN — GUIDE PRÉLIMINAIRE POUR L'ÉLABORATION DE PROCÉDURES D'ESSAI FONCTIONNEL À PLUSIEURS FACTEURS 	
Articles	
1. Objet et domaine d'application	8
2. Termes et définitions	8
3. Élaboration de procédures d'essai à plusieurs facteurs	10
4. Considérations relatives à la spécification de la procédure d'essai	14
 SECTION DEUX — INTRODUCTION AUX ESSAIS FONCTIONNELS À PLUSIEURS FACTEURS 	
5. Complexité des essais fonctionnels à plusieurs facteurs	22
6. Exemples d'interaction entre facteurs d'influence	24

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	3
INTRODUCTION	7

SECTION ONE — A TENTATIVE GUIDE FOR THE PREPARATION
OF MULTI-FACTOR FUNCTIONAL TESTING PROCEDURES

Clause

1. Scope and object	9
2. Terms and definitions	9
3. Preparation of multi-factor test procedures	11
4. Considerations regarding the specification of the test procedure	15

SECTION TWO — ESSAY ON MULTI-FACTOR FUNCTIONAL TESTING

5. Different complexity of multi-factor functional tests	23
6. Examples of interaction between factors of influence	25

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ESSAIS FONCTIONNELS À PLUSIEURS FACTEURS
DE SYSTÈMES D'ISOLATION ÉLECTRIQUE

Première partie : Procédures d'essai

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CIE en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Études où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 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 CIE exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CIE, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CIE 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'Études n° 63 de la CIE: Systèmes d'isolation.

Le texte de ce rapport est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
63(BC)20	63(BC)23

Pour de plus amples renseignements, consulter le rapport de vote mentionné dans le tableau ci-dessus.

Les publications suivantes de la CIE sont citées dans le présent rapport:

Publications n° 505 (1975): Guide pour l'évaluation et l'identification des systèmes d'isolation du matériel électrique.

- 610 (1978): Principaux aspects de l'évaluation fonctionnelle des systèmes d'isolation électriques: Mécanismes de vieillissement et procédures de diagnostic.
- 611 (1978): Guide pour la préparation de procédures d'essai pour l'évaluation de l'endurance thermique des systèmes d'isolation électrique.
- 727-1 (1982): Évaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation électrique, Première partie: Considérations générales et procédures d'évaluation basées sur une distribution normale.
- 791 (1984): Évaluation des performances de systèmes d'isolation à partir de l'expérience en service et des résultats d'essais fonctionnels.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**THE MULTI-FACTOR FUNCTIONAL TESTING
OF ELECTRICAL INSULATION SYSTEMS**
Part 1: Test procedures

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees in 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.

The text of this report is based upon the following documents:

Six Months' Rule	Report on Voting
63(11)70	63(11)73

Further information can be found in the Report on Voting indicated in the table above.

The following IEC publications are quoted in this report:

- Publication Nos. 505 (1975): Guide for the Evaluation and Identification of Insulation Systems of Electrical Equipment.
- 610 (1978): Principal Aspects of Functional Evaluation of Electrical Insulation Systems: Ageing Mechanisms and Diagnostic Procedures.
- 611 (1978): Guide for the Preparation of Test Procedures for Evaluating the Thermal Endurance of Electrical Insulation Systems.
- 727-1 (1982): Evaluation of Electrical Endurance of Electrical Insulation Systems, Part 1: General Considerations and Evaluation Procedures Based on Normal Distributions
- 791 (1984): Performance Evaluation of Insulation Systems Based on Service Experience and Functional Tests.

ESSAIS FONCTIONNELS À PLUSIEURS FACTEURS DE SYSTÈMES D'ISOLATION ÉLECTRIQUE

Première partie : Procédures d'essai

INTRODUCTION

Dans la Publication 505 de la C E I : Guide pour l'évaluation et l'identification des systèmes d'isolation du matériel électrique, on souligne que « l'une des caractéristiques des essais fonctionnels est l'application à l'objet en essai de tous les facteurs d'influence concernés » et que « de façon idéale, les contraintes agissant simultanément en service devraient être appliquées simultanément ». Toutefois, au moment de la rédaction de la Publication 505 de la C E I, l'opinion générale était que l'on ne disposait généralement pas de procédures d'essai appropriées et que l'établissement de telles procédures serait une entreprise beaucoup trop complexe et difficile. A cette époque, l'état des connaissances nécessaires pour l'établissement de procédures d'essai à plusieurs facteurs était insuffisant pour permettre la rédaction de publications de la C E I sur ce sujet.

Plusieurs constatations importantes s'imposent :

- Il existe actuellement un savoir-faire considérable concernant les essais à plusieurs facteurs ;
- Ce savoir-faire s'accroît et se répand rapidement ;
- Les utilisateurs et les fabricants de divers types de matériel électrique s'intéressent de plus en plus aux essais fonctionnels à plusieurs facteurs pour les systèmes d'isolation de leur matériel, afin de valider leurs évaluations des performances en service.

Les questions de fiabilité et de durée de vie satisfaisante du matériel électrique conçu et produit économiquement ont de plus en plus incité les fabricants et les utilisateurs, ainsi que leurs Comités de normalisation, à étudier des méthodes d'évaluation de l'isolation plus perfectionnées que les méthodes d'essai classiques les plus simples ou que le seul renvoi à des tables de classification. Le besoin de comprendre les vrais mécanismes du vieillissement et de la défaillance de l'isolation en service, et de les simuler correctement dans des essais en laboratoire, a conduit à de nouvelles approches en ce qui concerne les méthodes de vieillissement, les procédures de diagnostic et l'interprétation finale des résultats des essais. Comme l'isolation du matériel en service est habituellement soumise à l'action de plusieurs facteurs d'influence, des essais à plusieurs facteurs sont envisagés dans de nombreux cas.

Les Comités d'Etudes qui étudient la possibilité d'élaborer des procédures d'essai à plusieurs facteurs de leurs systèmes d'isolation trouveront dans ce rapport des énoncés de problèmes techniques et de solutions pratiques qui pourront leur servir de guide ou, tout au moins, d'aide-mémoire. Ce rapport insiste particulièrement sur deux aspects : la simulation réaliste du vieillissement en service dans un essai fonctionnel et l'importance d'élaborer des essais aussi simples et pratiques que possible.

Ce rapport comporte plusieurs parties. Cette première partie se compose de deux sections. La section un prend la forme d'un guide préliminaire destiné à stimuler les recherches d'application par les Comités d'études de matériels. La rédaction d'un guide définitif pour les essais fonctionnels à plusieurs facteurs de systèmes d'isolation et la date de sa future mise au point dépendront des résultats de ces recherches. Le Comité d'Etudes n° 63 suivra ces études en vue d'utiliser cette expérience pour la rédaction d'un guide définitif.

La section deux constitue une introduction aux essais à plusieurs facteurs servant à expliquer la section un.

THE MULTI-FACTOR FUNCTIONAL TESTING OF ELECTRICAL INSULATION SYSTEMS

Part 1: Test procedures

INTRODUCTION

In IEC Publication 505: *Guide for the Evaluation and Identification of Insulation Systems of Electrical Equipment*, it is emphasized that valid functional tests require "the application of all relevant factors of influence to the test object" and that "ideally, stresses that act at the same time in service should be applied simultaneously". However, the consensus when preparing IEC Publication 505 was that the required test procedures were not generally available and would be far too complex and difficult to undertake. The state-of-the-art at that time for specifying multi-factor test procedures was inadequate for IEC publications.

Several important findings became evident:

- A considerable amount of know-how on multi-factor testing actually exists.
- This know-how is rapidly expanding in breadth as well as in depth.
- Users and manufacturers of different kinds of electrical equipment are showing increasing interest in multi-factor functional testing of the insulation systems of their equipment in order to validate assessments of service performance.

The concerns of the reliability and adequate service life of economically designed and manufactured electrical equipment have increasingly motivated manufacturers and users, and their Standards Committees, to consider more advanced methods of insulation evaluation than the simplest conventional test methods, or mere reference to classification tables. The need of comprehending the actual ageing and failure mechanisms of the insulation in service and of their appropriate simulation in laboratory tests is leading to new approaches regarding the methods of ageing and diagnostic procedures and the final interpretation of the test results. Since equipment insulation in service usually is subjected to the actions of several factors of influence, a multi-factor test will in many cases be considered.

In this report, Technical Committees which are considering the need to develop multi-factor testing procedures for their insulation systems, will find descriptions of technical problems and practical possibilities which may be helpful for their purpose either as guidance or, at least, as a check list. The emphasis of this report particularly concerns two matters: the realistic modelling of service ageing in a functional test, and the concern that tests be as simple and practical as possible.

This report consists of several parts. Part 1 consists of two sections. Section One is drafted in the form of a tentative guide to stimulate application studies by equipment Technical Committees. The form of a definitive guide for the multi-factor functional testing of insulation systems and the time of its further development will be influenced by the outcome of such studies. Technical Committee No. 63 will follow these studies for the purpose of using this experience in the development of a definitive guide.

Section Two is written as an informative essay introducing the subject and serving to explain Section One.

SECTION UN — GUIDE PRÉLIMINAIRE POUR L'ÉLABORATION DE PROCÉDURES D'ESSAI FONCTIONNEL À PLUSIEURS FACTEURS

1. Objet et domaine d'application

Le présent rapport doit servir de guide aux Comités d'Études de matériels pour l'élaboration de procédures d'essai fonctionnel de leurs systèmes d'isolation particuliers. Il renferme des directives concernant les essais fonctionnels des systèmes d'isolation utilisés dans le matériel électrique de longue durée de vie exposé à plus d'un facteur d'influence en service.

Note. — L'utilité d'un guide semblable pour le matériel électrique de courte durée de vie est actuellement à l'étude.

Ce guide donne des recommandations en ce qui concerne la séquence des opérations et des détails concernant les procédures nécessaires à la spécification des essais.

Le domaine d'application de ce rapport ne couvre pas la simulation du vieillissement en service par un ou plusieurs essais à facteur unique de vieillissement sur des échantillons différents. Les guides applicables à ces cas sont :

- La Publication 611 de la CEI: Guide pour la préparation de procédures d'essai pour l'évaluation de l'endurance thermique des systèmes d'isolation électrique, traitant du vieillissement thermique;
- La Publication 727-1 de la CEI: Évaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation électrique, Première partie: Considérations générales et procédures d'évaluation basées sur une distribution normale, traitant du vieillissement électrique;
- La Publication XXX de la CEI, traitant du vieillissement mécanique.

2. Termes et définitions

Le présent rapport introduit de nouveaux termes qui s'ajoutent aux termes déjà définis dans la Publication 505 de la CEI. Ils sont illustrés à la figure 1, page 24.

2.1 Interaction

Modification du type ou du degré de vieillissement, produite par la combinaison de deux ou plusieurs facteurs d'influence, par rapport à la somme de leurs effets de vieillissement lorsqu'ils agissent individuellement sur des objets distincts.

Notes 1. — Par effet de vieillissement, on entend toute modification précoce de l'isolation due au vieillissement, par exemple, modification de la composition chimique.

2. Habituellement, la mesure de modifications de propriétés physiques est utilisée pour décrire le «degré de vieillissement». Toutefois, elles peuvent dépendre des effets de vieillissement suivant des relations très complexes. Par conséquent, les modifications de propriétés physiques peuvent ne pas être additives, comme le sont les effets de vieillissement (par définition), même en l'absence d'interaction.
3. — La définition ci-dessus diffère de la définition acceptée en statistique.

2.2 Interaction directe

Interaction entre facteurs d'influence appliqués simultanément, qui diffère de celle qui a lieu lorsque les facteurs d'influence sont appliqués séquentiellement. Les facteurs produisant une interaction directe ne sont pas nécessairement des facteurs de vieillissement.

SECTION ONE – A TENTATIVE GUIDE FOR THE PREPARATION OF MULTI-FACTOR FUNCTIONAL TESTING PROCEDURES

1. Scope and object

This report is intended for use by Equipment Technical Committees as a guide when developing functional test procedures for their specific insulation systems. It contains guidelines for the functional testing of insulation systems for use in long-life electrical equipment exposed to more than one factor of influence in service.

Note. – The need for a similar guide for short-life electrical equipment is under study.

This guide contains recommendations regarding the sequence of actions and details of the procedures required for the specification of such tests.

Simulation of service ageing by one or several single-factor tests on separate specimens is not within the scope of this report. In such cases the pertinent guides are:

IEC Publication 611: Guide for the Preparation of Test Procedures for Evaluating the Thermal Endurance of Electrical Insulation Systems, for thermal ageing.

- IEC Publication 727-1: Evaluation of Electrical Endurance of Electrical Insulation Systems, Part 1: General Considerations and Evaluation Procedures Based on Normal Distributions, for electrical ageing.
- IEC Publication XXX, for mechanical ageing.

2. Terms and definitions

In this report new terms are introduced. These are in addition to the terms already defined in IEC Publication 505. They are illustrated in Figure 1, page 25.

2.1 Interaction

Modification of the type or degree of ageing produced by the combination of two or more factors of influence relative to the sum of their ageing effects if acting individually on separate objects.

Notes 1. – Ageing effects are understood to be any primary changes in the insulation due to ageing, e.g., changes in chemical composition.

2. – Usually, changes in physical properties are measured and used to describe the "degree of ageing". However, they may depend on the ageing effects in a very complicated manner. Therefore, even when interactions are absent, the changes in physical properties may not be additive as are the ageing effects (by definition).
3. – The above definition differs from the accepted statistical definition of "interaction".

2.2 Direct interaction

Interaction between simultaneously applied factors of influence, which differs from that occurring with sequentially applied factors of influence. Factors producing direct interaction are not necessarily ageing factors.

2.3 Interaction Indirecte

Interaction entre facteurs d'influence appliqués simultanément, qui reste essentiellement inchangée lorsque les facteurs d'influence sont appliqués séquentiellement. Une interaction indirecte ne peut provenir que de facteurs de vieillissement.

3. Elaboration de procédures d'essai à plusieurs facteurs

Afin d'établir les principes sur lesquels sera fondée la procédure d'évaluation d'un système d'isolation de matériel, le Comité d'Etudes devra examiner la documentation disponible relative à l'expérience en service, aux défaillances, à l'expérience acquise pendant la mise au point de systèmes d'isolation, aux pratiques courantes de conception, etc. Le Comité d'Etudes devra fonder sa procédure d'évaluation sur l'information disponible, de façon que le risque d'invalidation des résultats due à des relations inconnues soit réduit à un niveau raisonnable.

On peut élaborer des procédures séquentielles, dans lesquelles on donne un choix de plusieurs opérations consécutives à l'opération précédente, de façon à couvrir chaque résultat possible. Comme autre approche, le Comité peut favoriser des recherches ou des essais destinés à acquérir les connaissances fondamentales nécessaires à la spécification d'une procédure d'essai à plusieurs facteurs. Comme exemples de sujets présentant un intérêt particulier, il faut mentionner l'identification des facteurs de vieillissement et leur importance relative, et l'identification des interactions entre facteurs et leur nature. Ces connaissances permettent d'élaborer des essais techniquement valables qui soient aussi pratiques et simples que possible; c'est là une préoccupation centrale de ce rapport.

3.1 Principes généraux

Des essais fonctionnels à plusieurs facteurs sont nécessaires :

- si plus d'un facteur de vieillissement peut influencer notablement sur la performance du système d'isolation, si l'on sait ou soupçonne que des modifications des propriétés considérées ne sont pas additives, ou si l'absence d'interaction entre facteurs n'est pas absolument certaine;
- si l'on sait ou soupçonne qu'il existe une interaction directe entre au moins un facteur de vieillissement et un autre facteur d'influence.

Les facteurs agissant simultanément en service sont simulés plus sûrement par un essai simultané. La disponibilité d'installations de vieillissement peut toutefois conduire au choix d'essais séquentiels. Cette approche est valable à condition que les interactions entre les facteurs soient indirectes ou totalement absentes.

Même dans le cas où l'on considère comme appropriés des essais distincts à facteur unique — ce dont on ne peut habituellement pas être absolument certain — un essai séquentiel sur les mêmes échantillons peut, dans de nombreux cas, être préférable à une série d'essais indépendants à facteur unique, pour les mêmes facteurs d'influence, sur des lots différents de sujets d'essai. Même s'il faut prendre garde que l'application séquentielle de facteurs accélérés ne crée pas de mécanismes de défaillance qui ne se produisent pas en service, cette méthode permet de réduire l'effort consacré aux essais tout en laissant agir les interactions indirectes comme dans les conditions de service.

Ces considérations sont illustrées à la figure 1, page 24.

Dans la préparation de procédures d'essai de sélection en vue d'établir l'absence, ou la présence, et le type d'interactions significatives, il peut être utile d'appliquer des méthodes statistiques. Ces méthodes sont examinées dans la deuxième partie (en préparation).

2.3 *Indirect interaction*

Interaction between simultaneously applied factors of influence, which remains essentially unchanged when the factors are applied sequentially. Indirect interaction can only be caused by ageing factors.

3. Preparation of multi-factor test procedures

To establish the foundation upon which the evaluation procedure for the equipment insulation system will be based, the Technical Committee should review the available evidence regarding service experience, records of failures, experience gained during the development of the insulation systems, common design practice, etc. The Technical Committee should base its evaluation procedure on available knowledge in such a way that the risk of unknown relationships invalidating the results is reasonably reduced.

Sequential procedures may be developed in which alternative consequential actions are listed to cover each possible outcome of a preceding action. As another approach, the Committee may instigate research or tests to establish basic knowledge required for the specification of a multi-factor test procedure. Examples of subjects which are of particular concern are: the identification of the ageing factors and their relative importance, and the identification of interactions between factors and their nature. Such knowledge enables the development of technically sound tests which also are maximally practical and simple; a central concern of this report.

3.1 *General principle*

Multi-factor functional tests are needed:

- when more than one ageing factor can substantially affect the performance of the insulation system, and changes in relevant properties are known or suspected to be non-additive, or the absence of factor interaction is not confidently known;
- when direct interaction between at least one ageing factor and another factor of influence is known or suspected to exist.

Simultaneous service factors are most reliably simulated by a simultaneous test. Availability of ageing facilities may, however, lead to the consideration of a sequential test as an alternative. This approach is valid on condition that the interactions between the factors are of the indirect type or completely absent.

Even in the case when separate single-factor tests are considered to be adequate — which may be presumed but usually is not confidently known — a sequential test on the same test objects may, in many cases, be preferable to a series of independent single-factor tests for the same factors of influence on different batches of test objects. While care must be exercised to ensure that sequential application of the accelerated factors does not produce failure mechanisms that do not occur in service, this method has the potential of reducing testing effort while allowing indirect interactions to occur as in service.

The above considerations are illustrated in Figure 1, page 25.

When preparing screening test procedures to establish the absence, or presence, and kind of significant interactions, the application of statistical methods may be helpful. Such methods are reviewed in Part 2 (in preparation).

3.2 *Choix des conditions de service à simuler*

Le Comité d'Etudes doit identifier les facteurs de vieillissement et les autres facteurs d'influence qui affectent, ou que l'on soupçonne d'affecter, la durée de vie de l'isolation en service. Les facteurs de vieillissement et leurs mécanismes devraient être classés par ordre d'importance, et tout changement à cet ordre au cours de la vie de l'isolation devrait être noté. On devrait aussi établir l'ordre d'apparition des facteurs (simultanément, séquentiellement), ainsi que l'information concernant les temps relatifs de fonctionnement et les niveaux de contrainte en service (valeurs assignées, moyennes ou de surcharge; phénomènes transitoires; contraintes pendant les périodes d'arrêt, etc.).

Il est recommandé de définir un ensemble de conditions de service de référence d'après la liste ci-dessus, afin de sélectionner les conditions d'essai de vieillissement. Les conditions de service de référence devraient spécifier les facteurs, leurs niveaux de contrainte, leur séquence et les temps relatifs de fonctionnement.

Pour faciliter la spécification d'essais aussi simples que possible, il peut être utile d'examiner séparément les différentes conditions de service qui se produisent toujours à des temps différents, suivant une certaine séquence ou au hasard. Ces conditions peuvent être, par exemple: la mise en marche, des variations de la charge normale, différents types de fonctionnement anormal (surcharge, phénomènes transitoires), les arrêts brusques, les arrêts prolongés, l'entreposage et le transport. Dans certains cas, il peut être utile d'introduire des variations cycliques, comme le jour et la nuit ou les saisons. Une telle approche permet d'identifier assez facilement les combinaisons réelles de facteurs externes d'environnement et de facteurs internes dépendant de la charge. Les connaissances d'un spécialiste peuvent alors permettre d'estimer quels facteurs et quelles combinaisons de facteurs sont essentiels.

3.3 *Interaction entre facteurs d'influence*

Il importe de connaître les mécanismes physiques réels de la détérioration de l'isolation pour permettre une conception judicieuse et rationnelle des essais fonctionnels. La connaissance de la présence et de la nature des interactions entre facteurs peut aussi permettre d'introduire des simplifications de la procédure de vieillissement dans une reproduction à l'échelle des conditions de service.

Le vieillissement résultant de facteurs simultanés en service peut être simulé par une application simultanée de ces facteurs dans un essai. Cela est nécessaire dans le cas d'interaction directe. Si l'on sait que l'interaction est indirecte, l'application séquentielle de ces facteurs est une variante valable qui peut être choisie afin de réduire la charge des essais.

La meilleure façon de simuler un vieillissement dû à l'action séquentielle de facteurs en service est d'appliquer successivement ces facteurs dans un essai à plusieurs facteurs. Il est préférable que le Comité d'Etudes détermine la présence et la nature des interactions entre facteurs en se fondant sur l'expérience en service et sur la connaissance des mécanismes réels de dégradation de l'isolation.

Notes 1. — Une interaction peut accélérer ou ralentir le taux de vieillissement.

2. La possibilité d'une interaction entre la température et l'environnement ne doit pas être rejetée sans vérification appropriée ou une expérience considérable, même dans les cas où ces deux facteurs ne sont pas censés produire d'interaction directe.

3. — L'article 6 décrit brièvement les interactions entre facteurs d'influence.

3.2 *Service conditions to be simulated*

The Technical Committee should identify the ageing factors and the other factors of influence which are known or supposed to affect the life of the insulation in service. The ageing factors and mechanisms should be ranked according to their importance, and changes of this order during the life history of the insulation should be noted. The order of occurrence of the factors (simultaneously, sequentially) should be established as well as information regarding relative operating times and factor stress levels in service (rated; average; overload conditions; transients; stresses during rest periods, etc.).

It is recommended to define a set of *reference service conditions* based on the listing above, for purposes of selecting test ageing conditions. The reference service conditions should specify factors, their stress levels, sequence and relative operating times.

To facilitate the specification of as simple a test as possible, it may be helpful to separately consider different service conditions which always occur at different times, in a certain sequence or randomly. Such conditions may, for example, be: starting, normal load changes, different kinds of anomalous operation (overload, transients), stops, prolonged rest, storage and transportation. In some cases, cyclic variations like day and night or the seasons may be relevant. The actual combinations of external environmental factors with load-dependent internally generated factors may relatively easily be identified through such an approach. Expert knowledge may then permit an estimation of which factors and combinations are essential.

3.3 *Interaction between factors of influence*

Knowledge of the actual physical mechanisms of insulation deterioration is important to a good and rational design of functional tests. Knowledge regarding the presence and kind of interaction between factors may also permit simplifications of the ageing procedure to be introduced relative to the scaled reproduction of the service situation.

Ageing by simultaneous factors in service can be modelled by their simultaneous application in a test. This becomes a necessity in the case of their direct interaction. If the interaction is known to be indirect then a sequential application of these factors is a valid alternative which may be preferred in order to reduce the testing effort.

Ageing by sequential action of factors in service can best be simulated in a multi-factor test by their sequential application. The Technical Committee should preferably identify the presence and kind of interaction between factors on the basis of service experience and of evidence regarding the actual mechanisms of insulation degradation.

Notes 1. - Interaction may accelerate or slow down the rate of ageing.

2. - Temperature and environment (as possible interacting factors) should not be disregarded without a proper control or extensive experience, even in cases where they are not known to produce direct interaction.

3. - A review of interactions between factors of influence is given in Clause 6.

3.4 Types de procédures d'essai

Les essais fonctionnels de systèmes d'isolation destinés au matériel de longue durée de vie ne peuvent être que comparatifs, dans l'état actuel des connaissances.

Trois cas peuvent se présenter lorsqu'il s'agit de comparer un système d'isolation à l'étude et un système de référence pour lequel des données existent :

a) *Qualification pour des conditions de service identiques :*

C'est le cas le plus simple. Toutes les procédures de vieillissement et de diagnostic seront, dans ce cas, les mêmes pour le système à l'étude et le système de référence. L'exposition simultanée des deux systèmes dans les mêmes installations est recommandée afin de réduire la dispersion des résultats.

b) *Surclassement pour supporter des niveaux plus élevés de contraintes autres que de vieillissement :*

Les procédures de vieillissement seront identiques pour les deux systèmes. Les procédures de diagnostic diffèrent quant aux niveaux des contraintes appliquées, et peut-être aussi quant aux facteurs de diagnostic. La combinaison et la séquence des facteurs de diagnostic devraient être aussi semblables que possible, tout en maintenant une simulation appropriée des conditions de service de référence.

c) *Surclassement pour supporter des niveaux plus élevés de contrainte de vieillissement :*

Dans ce cas, les procédures de diagnostic devraient rester essentiellement identiques. Les procédures de vieillissement différeront quant aux niveaux des contraintes appliquées, mais la nature, la combinaison et la succession des facteurs appliqués pour vieillir les échantillons seront les mêmes.

4. Considérations relatives à la spécification de la procédure d'essai

4.1 Procédure de vieillissement

4.1.1 Principes généraux

L'essai de vieillissement accéléré est souvent effectué de façon cyclique. Chaque cycle peut contenir les sous-cycles suivants :

- sous-cycles de vieillissement à facteur unique ;
- sous-cycles de vieillissement à plusieurs facteurs avec application simultanée des facteurs respectifs ;
- sous-cycles de diagnostic.

4.1.2 Sous-cycles de vieillissement à facteur unique

Dans ces sous-cycles, les éprouvettes du système d'isolation sont exposées à un seul facteur à la fois.

3.4 *Types of test procedures*

The functional testing of insulation systems for use in long service life equipment can, in the present state-of-the-art, only be of a comparative nature.

Three possible cases can be distinguished when the candidate insulation system is compared with a known reference system with a documented service record:

a) *Qualification for identical service conditions:*

This is the simplest case. All ageing and diagnostic procedures will be identical in this case for the candidate and reference systems. Simultaneous exposure in the same facilities is recommended to reduce dispersion of results.

b) *Upgrading to withstand higher levels of non-ageing stresses:*

The ageing procedures for both systems will be identical. The diagnostic procedures will differ with regard to the applied stress levels, possibly also with regard to the diagnostic factors. The combination and sequence of diagnostic factors should be as similar as possible, still retaining correct simulation of the reference service conditions.

c) *Upgrading to withstand higher ageing stress levels:*

In this case the diagnostic procedures remain essentially identical. The ageing procedures will differ with regard to the applied stress levels, but the kinds, combinations and sequences of factors applied to age the specimens should be the same.

4. *Considerations regarding the specification of the test procedure*

4.1 *Ageing procedure*

4.1.1 *General principles*

The accelerated ageing test is usually performed in a cyclic manner. Each cycle may contain the following sub-cycles:

- single-factor ageing sub-cycles;
- multi-factor ageing sub-cycles with simultaneous application of the respective factors;
- diagnostic sub-cycles.

4.1.2 *Single-factor ageing sub-cycles*

In these sub-cycles the insulation system specimens are exposed to only one factor at a time.

Les facteurs de vieillissement de ces sous-cycles sont les facteurs des conditions de référence (paragraphe 3.2) qui agissent, en service, séquentiellement et en l'absence de tout autre facteur de vieillissement simultané à interaction directe. S'il existe des facteurs simultanés qui ne produisent que des interactions indirectes, chacun de ces facteurs peut aussi être appliqué dans un sous-cycle de vieillissement à facteur unique.

Pour chaque facteur, on effectuera un sous-cycle intensifiant le facteur en question. On attribuera aux autres facteurs une valeur nulle ou produisant un effet négligeable.

4.1.3 *Sous-cycles de vieillissement à plusieurs facteurs*

Dans ces sous-cycles, au moins deux facteurs sont appliqués simultanément aux éprouvettes d'essai. Il est souhaitable que l'augmentation du niveau de chaque facteur contribue de façon égale au taux de vieillissement. Pour le choix des niveaux ou des fréquences, il peut être profitable d'utiliser l'information relative au vieillissement à facteur unique du système d'isolation en question. L'accélération combinée peut être significativement différente, en raison d'une interaction. Il faut donc choisir des valeurs modérées d'accélération individuelle.

4.1.4 *Sous-cycles de diagnostic*

Ces sous-cycles comprennent souvent une séquence de traitements dont les buts sont en partie différents. Par exemple :

- des traitements potentiellement destructifs destinés à révéler la dégradation, par exemple par des vibrations mécaniques qui peuvent créer des fissures dans une isolation devenue fragile ;
- un conditionnement, par exemple par humidification, destiné à augmenter l'effet discriminant d'épreuve consécutive ;
- des essais de diagnostic potentiellement destructifs (épreuves), par exemple une application brève d'une tension spécifique ;
- la détermination d'une ou plusieurs propriétés par des moyens destructifs ou non destructifs.

D'autres considérations concernant la sélection de ces traitements et les points limites correspondants sont données au paragraphe 4.3.

4.1.5 *Longueur des cycles*

Normalement, les accélérations et les longueurs de cycle sont choisies de façon à provoquer la défaillance d'environ la moitié des échantillons au cours des dix premiers cycles d'essais à facteur unique (ou, tout au moins, dans l'essai à facteur unique pour lequel l'effet de vieillissement est le plus prononcé). Lorsque les essais à plusieurs facteurs sont ensuite effectués, plus de la moitié des échantillons devraient subir une défaillance au cours des dix premiers cycles de vieillissement.

D'autres essais de diagnostic peuvent être effectués après le dernier cycle prévu (dixième cycle ou après la défaillance de la moitié des échantillons), afin d'obtenir plus d'informations sur l'état du système d'isolation à la fin des essais de vieillissement.

Ageing factors in these sub-cycles are those factors from the reference conditions (Sub-clause 3.2) which act in service in a sequential manner and without any other simultaneously acting ageing factor producing direct interaction. If simultaneous factors are known to produce only indirect interaction, then each of them may also be applied in a single-factor ageing sub-cycle.

For each factor, one sub-cycle with the respective factor intensified shall be performed. To other factors, zero or a value producing negligible effects is given.

4.1.3 *Multi-factor ageing sub-cycles*

In these sub-cycles two or more factors are applied simultaneously to the test specimens. If possible, the action of each factor should be increased to produce equal contributions to the ageing rate. When choosing the levels or frequencies, available information regarding the single-factor ageing of the insulation system may be useful. Combined acceleration may be significantly different as a consequence of interaction. Therefore, moderate values of the individual accelerations should be selected.

4.1.4 *Diagnostic sub-cycles*

These sub-cycles often comprise a sequence of treatments with partly different purposes as, for example:

- potentially destructive treatments to reveal degradation, for example by mechanical vibration which may cause embrittled insulation to develop cracks;
- conditioning, for example by humidification, to amplify the discerning capacity of a subsequent proof test;
- potentially destructive diagnostic tests (proof tests), for example the brief application of a specified voltage;
- non-destructive or destructive determinations of one or more properties.

Further considerations regarding the selection of these treatments and of corresponding end-points are given in Sub-clause 4.3.

4.1.5 *Cycle lengths*

Normally, the accelerations and cycle lengths should be chosen so that about one-half of the test objects will fail within ten cycles of single-factor tests (or at least in such a single-factor test where the ageing effect is strongest). Then, when the multi-factor tests are carried out, more than half of the test objects would be expected to fail within ten ageing cycles.

Additional diagnostic tests may be performed after the last planned cycle (10th cycle or when half of the test objects have failed), in order to increase the information on the state of the insulation system at the end of the ageing tests.

Il faut veiller à ce que les variations des propriétés concernées au cours de n'importe quel sous-cycle ne soient pas excessives, car de grandes variations peuvent induire des mécanismes imprévus.

4.2 *Accélération des essais*

On choisit pour chaque facteur de vieillissement des valeurs d'accélération en niveau ou en fréquence, et ces valeurs restent constantes pendant toute la durée des cycles. Une façon commode de choisir les valeurs d'accélération de la contrainte et, par conséquent, le degré d'intensification du facteur unique de chaque sous-cycle, est d'utiliser les résultats d'essais antérieurs à facteur unique.

Il est recommandé d'appliquer à peu près le même degré d'accélération à chaque contrainte. Se reporter aussi au paragraphe 4.1.3.

4.3 *Facteurs de diagnostic et critères points limites*

Le choix de la séquence de traitements individuels formant le sous-cycle de diagnostic (voir paragraphe 4.1.4) doit être guidé par les connaissances concernant les mécanismes de vieillissement en service. Il est recommandé d'utiliser les facteurs autres que de vieillissement et les niveaux de conditions de service de référence mentionnés au paragraphe 3.2. Dans de nombreuses applications, la séquence donnée au paragraphe 4.1.4 est satisfaisante: traitements potentiellement destructifs — traitements de conditionnement — épreuves et/ou détermination de propriétés.

La procédure de diagnostic doit spécifier le point limite. Celui-ci peut être, pendant un sous-cycle de vieillissement, la défaillance physique de l'éprouvette, qui peut se révéler immédiatement ou pendant le sous-cycle de diagnostic suivant. Cela peut aussi être un événement ou un état, tel que la défaillance due à un traitement de diagnostic ou la limite d'une propriété. Le point limite peut être caractérisé par une condition unique (par exemple le niveau a de la propriété A), par l'une ou l'autre de plusieurs possibilités (niveau a de A ou niveau b de B, etc.) ou par une combinaison de conditions (niveau a de A et niveau b de B, etc.). L'analyse des défaillances, l'analyse des contraintes et/ou des essais appropriés peuvent permettre de déterminer les critères de points limites appropriés.

4.4 *Évaluation des résultats d'essais*

La méthode la plus directe pour évaluer les résultats d'essais fonctionnels du système d'isolation à l'étude et du système d'isolation de référence est de comparer les temps d'essai nécessaires pour atteindre les valeurs choisies des critères points limites. Si, selon le niveau de confiance spécifié par le Comité d'Études de matériaux, il n'y a aucune différence statistiquement significative entre les distributions des temps pour atteindre les critères points limites des éprouvettes à l'étude et celles de référence, on peut conclure que les deux systèmes d'isolation sont équivalents pour l'essai effectué.

Il arrive parfois que l'on n'observe aucune défaillance, ou un nombre insuffisant de défaillances, au cours du nombre prévu de cycles. Deux possibilités s'offrent alors: soit de poursuivre les cycles jusqu'à ce qu'il se produise un nombre suffisant de défaillances pour permettre une analyse statistique, soit d'effectuer d'autres essais de diagnostic conçus pour faire apparaître l'étendue de la détérioration des systèmes d'isolation à l'étude et de référence par rapport aux critères points limites choisis.

Care should be taken that changes in relevant properties during any sub-cycle are not excessive, since large changes may produce unexpected mechanisms.

4.2 *Acceleration of tests*

Fixed accelerated values of level and/or frequency are selected for every ageing factor and remain constant for the duration of the repetitive test cycles. Selection of the stress acceleration values and thus the degree of single-factor intensification for each test sub-cycle are most conveniently determined by the results of earlier single-factor experiments.

For each stress, approximately the same degree of acceleration should be recommended. See also Sub-clause 4.1.3.

4.3 *Diagnostic factors and end-point criteria*

The selection of the sequence of the individual treatments comprising the diagnostic sub-cycle (see Sub-clause 4.1.4) should be guided by available knowledge regarding the ageing mechanisms in service. It is recommended to use the non-ageing factors and levels of the reference service conditions mentioned in Sub-clause 3.2. In many applications the sequence indicated in Sub-clause 4.1.4 has been found to be satisfactory, i.e., potentially destructive treatments — conditioning treatments — proof tests and/or determination of property values.

The diagnostic procedure must comprise the specification of an end-point. This may be the physical failure, during an ageing sub-cycle, of the test object which may be revealed immediately or during the next diagnostic sub-cycle. It may also be an event or condition, such as failure due to a diagnostic treatment or the attainment of a property limit. The end-point may be characterized by a single condition (e.g. level a of property A), or by one of several alternatives (level a of A, or level b of B, etc.) or it may be given as a combined condition (level a of A and level b of B, etc.). Relevant end-point criteria may be found through failure analysis, stress analysis and/or appropriate tests.

4.4 *Evaluation of test results*

The most straightforward method of evaluating the results of functional testing of the candidate and reference insulation systems is to compare their test times to reach selected end-point criteria. If there is no statistically significant difference, on a confidence level specified by the equipment Technical Committee, between the distributions of the times to reach the end-point criteria for the candidate and reference test objects, then it may be concluded that they are equivalent in the test used.

Sometimes, however, there are no failures, or an insufficient number of failures, within the planned number of test cycles. Two possibilities then exist: either continue testing cycles until a sufficient number of failures occur for statistical analysis, or carry out additional diagnostic tests designed to reveal the extent of deterioration in the insulation systems being compared in relation to the end-point criteria selected.

Deux types d'essais de diagnostic peuvent être utilisés. En général, la présentation des résultats sous la forme de courbes donnant les propriétés choisies des systèmes d'isolation en fonction de la durée de l'essai fournit plus d'informations. Ces déterminations de propriétés peuvent être faites par des essais destructifs ou non destructifs. Lorsque les modifications de propriétés, mesurées par des essais non destructifs, sont choisies comme critères d'évaluation de la détérioration de l'isolation, elles peuvent être comparées, pour le système d'isolation à l'étude et pour celui de référence, après chaque cycle d'essai fonctionnel, en utilisant chaque fois les mêmes éprouvettes. Cette procédure exige que le critère point limite soit relié de façon appropriée aux modifications de propriétés.

Si des essais de diagnostic destructifs servent à déterminer la détérioration progressive des propriétés des systèmes d'isolation au cours d'essais cycliques fonctionnels de vieillissement, il faut disposer d'un nombre suffisant d'éprouvettes du système à l'étude et du système de référence pour permettre une analyse statistique convenable des défaillances. Dans ce cas, on retire périodiquement de l'essai fonctionnel un nombre prédéterminé d'éprouvettes suivant un plan spécifiant le nombre de cycles de vieillissement à effectuer pour chaque degré de vieillissement pour lequel on veut obtenir des données. Normalement, un groupe d'éprouvettes ne sera retiré qu'après exposition à tous les sous-cycles du dernier cycle de vieillissement prévu pour ce groupe. Ici encore, l'évaluation se fait en comparant les données des essais de chaque système, exprimées numériquement ou graphiquement.

Pour les essais de diagnostic tant destructifs que non destructifs, il importe de fournir des données provenant d'éprouvettes non soumises au vieillissement, de façon à indiquer les conditions initiales dans les données numériques et les graphiques.

Voir aussi les paragraphes 3.4, 3.5 et 3.6, de la Publication 505 de la CIE, le paragraphe 2.4 de la Publication 610 de la CIE: Principaux aspects de l'évaluation fonctionnelle des systèmes d'isolation électriques: Mécanismes de vieillissement et procédures de diagnostic, ainsi que la Publication 791 de la CIE: Evaluation des performances de systèmes d'isolation à partir de l'expérience en service et des résultats d'essais fonctionnels.

4.5 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit, en principe, comprendre:

- une description des systèmes d'isolation;
- une description de l'expérience en service du système de référence, y compris des interactions (au besoin);
- les conditions de référence;
- les facteurs de vieillissement et leurs niveaux dans les essais; l'accélération dans les essais à facteur unique pour chaque facteur;
- la séquence des essais;
- les traitements de diagnostic, les essais et les mesures;
- les critères points limites choisis;
- les courbes de vieillissement;
- les temps nécessaires pour atteindre les points limites, les valeurs individuelles et médianes et, si possible, le traitement statistique;
- l'identification du nouveau système par rapport au système de référence.

Two types of diagnostic tests may be used. In general, presentation of the results in the form of curves for selected properties of the insulation systems versus test duration can be more informative. These property determinations can be made by either non-destructive or destructive tests. When property changes measured by non-destructive tests are selected as criteria for insulation deterioration, they can be compared for the candidate and reference insulation system after every cycle of functional testing, using the same specimens each time. This procedure requires that the end-point criteria be appropriately related to the change in properties.

When destructive diagnostic tests are selected as the method of determining progressive deterioration of insulation system properties during cyclic ageing functional tests, it will be necessary to provide a sufficient number of test objects containing the candidate and reference insulation systems for proper statistical evaluation of the failure data. In this case a planned number of test objects are removed periodically from functional testing according to a schedule of ageing cycles to be completed for each degree of ageing for which property data are desired. Normally, a group of test objects will be removed only after exposure to all the sub-cycles of the last ageing cycle they are scheduled to complete. Again, the testing results, expressed in figures or graphs for each system, may be compared to make the evaluation.

For both non-destructive and destructive diagnostic property tests it is important to provide measurements on unaged test objects so that initial conditions may be recorded in figures and graphs.

See also Sub-clauses 3.4, 3.5 and 3.6 of IEC Publication 505, Sub-clause 2.4 of IEC Publication 610: Principal Aspects of Functional Evaluation of Electrical Insulation Systems: Ageing Mechanisms and Diagnostic Procedures, as well as IEC Publication 791: Performance Evaluation of Insulation Systems Based on Service Experience and Functional Tests.

4.5 Test report

The test report should include:

- description of the insulation systems;
- description of the service experience concerning the reference system, including interactions (when necessary);
- reference conditions;
- ageing factors and their levels in the tests. Single-factor acceleration of each factor;

- test sequence;
- diagnostic treatments, tests and measurements;
- end-point criteria selected;
- ageing curves;
- times to reach the end-points, individual values and medians, statistical treatment when feasible;
- identification of the new system in comparison to the reference system.

SECTION DEUX – INTRODUCTION AUX ESSAIS FONCTIONNELS À PLUSIEURS FACTEURS

5. Complexité des essais fonctionnels à plusieurs facteurs

Les systèmes d'isolation électrique sont toujours exposés en service à plusieurs facteurs; on trouve toujours la combinaison d'au moins trois facteurs: température, environnement et contrainte électrique. Cette combinaison peut ou non donner lieu à un vieillissement interactif, que l'on peut définir de la façon suivante: lorsque les effets de vieillissement produits par les facteurs d'influence diffèrent de la somme des effets de vieillissement produits séparément par chacun des facteurs, on dit qu'il se produit un vieillissement interactif. La cause de cette anomalie de combinaison des effets de vieillissement séparés est appelée «interaction».

Dans ce contexte, le terme «effet de vieillissement» sert à décrire des modifications primaires de l'isolation, par exemple des modifications de la composition chimique par suite de réactions de vieillissement ou de phénomènes de diffusion. Les modifications de propriétés physiques, qui servent souvent à déterminer le degré de vieillissement, peuvent dépendre de ces modifications primaires (effets de vieillissement) d'une façon très complexe. Par conséquent, les modifications de propriétés physiques peuvent ne pas être additives, comme le sont (par définition) les effets de vieillissement, en l'absence d'interaction.

L'aspect de l'interaction des facteurs qui intéresse les essais fonctionnels des systèmes d'isolation est la distinction entre interactions directe et indirecte. Cette distinction est contenue dans les définitions des paragraphes 2.2 et 2.3, qui, toutefois, ne l'expliquent pas. En termes plus physiques, une interaction directe est une modification, causée par le second facteur, du taux de dégradation produit par le premier facteur. L'interaction indirecte est causée par le second facteur lui-même. Dans le cas de l'interaction indirecte, toutefois, ce n'est pas la présence du second facteur, mais plutôt ses effets irréversibles sur l'état de l'isolation, qui sont la cause de la modification du vieillissement par le premier facteur. Cette interaction peut provenir soit d'un changement d'intensité du premier facteur, soit d'une modification de ses effets de vieillissement à intensité constante.

Il existe déjà une expérience considérable portant sur plusieurs aspects des essais à plusieurs facteurs. Notons que de nombreux types de matériels électriques subissent en fait des contraintes à plusieurs facteurs. Toutefois, on a négligé les autres facteurs lorsqu'on savait que le vieillissement thermique était dominant.

Lorsqu'il importe de procéder à des essais à plusieurs facteurs, la simulation des conditions de service peut encore être effectuée par des procédures simplifiées.

Lorsque le matériel en service subit des facteurs agissant simultanément, le vieillissement peut être simulé dans un essai fonctionnel par une application simultanée ou successive des facteurs, suivant le genre d'interaction entre les facteurs.

Enfin, lorsque le matériel subit des facteurs agissant séquentiellement, la simulation exige un essai séquentiel, quelle que soit la façon dont le vieillissement aurait lieu sous l'influence de ces facteurs s'ils agissaient simultanément. Par exemple, le matériel électronique de puissance fonctionnant en charge pendant un certain temps et qui est arrêté périodiquement pendant un temps assez long pour absorber de l'humidité puis remis en service, subit périodiquement un cycle d'échauffement et un cycle d'humidification.

SECTION TWO — ESSAY ON MULTI-FACTOR FUNCTIONAL TESTING

5. Different complexity of multi-factor functional tests

All electrical insulations are exposed in service to multi-factor situations: the combination of, at least, temperature, environment and electrical stress is always present. This may or may not give rise to interactive ageing which can be defined as follows: when the ageing effects produced by the factors of influence differ from the sum of the ageing effects produced by each factor in isolation, then interactive ageing is said to take place. The cause of the departure from combination of the separate ageing effects shall be called "interaction".

In this context, the term "ageing effect" is used to describe primary changes in the insulation, for example changes in chemical composition as a consequence of ageing reactions or diffusion phenomena. Changes in physical properties, which often are used to describe the degree of ageing, may depend on these primary changes (ageing effects) in a complicated manner. Therefore, the changes in physical properties may not be additive as the ageing effects are (by definition) when interactions are absent.

The aspect of factor interaction that is of interest to the concerns of the functional testing of insulation systems is the distinction between direct and indirect interaction. This is borne out by the definitions of Sub-clauses 2.2 and 2.3 which, however, are not explanatory. In more physical terms, direct interaction is a change, caused by the second factor, of the rate of the degradation produced by the first factor. Direct interaction is caused by the second factor itself. In the case of indirect interaction, however, it is not the presence of the second factor but rather its irreversible effects on the state of the insulation, which are the cause of the modification of the ageing by the first factor. Such interaction can occur either due to a change of the intensity of the first factor or due to a change of its ageing effects at constant intensity.

Considerable experience already exists in several aspects of multi-factor testing. It is to be noted that many kinds of electrical equipment in reality experience multi-factor stressing. However, where the dominance of thermal ageing was well known, the other factors were neglected.

When multi-factor testing is important, modelling of service situations may still be achieved by simplified procedures.

When equipment in service experiences simultaneously-acting factors, the ageing can be simulated by either simultaneous or sequential application of the factors in a functional test, depending on the kind of interaction between the factors.

On the other hand, when equipment experiences sequentially-acting factors, the modelling requires a sequential test irrespective of how ageing by these factors would proceed if they had been acting simultaneously. For example, power electronic equipment operating under load, for a period of time, and periodically shut down for an interval long enough to absorb humidity and then return to service, experiences a periodic temperature cycle and a humidity cycle.

La figure 1 illustre les choix de procédures d'essai pouvant conduire à des évaluations valables, dans différents cas de combinaisons de facteurs selon la connaissance des interactions.

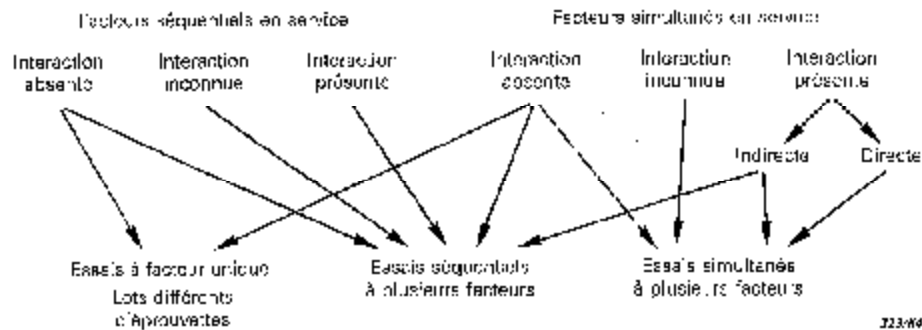


FIG. 1. — Diagramme pour le choix d'une procédure d'essai valable suivant les relations connues ou observées expérimentalement entre facteurs en service.

6. Exemples d'interaction entre facteurs d'influence

Les paragraphes qui suivent résument brièvement un certain nombre de mécanismes assez bien connus d'interaction entre facteurs d'influence. Ce résumé n'est en aucune façon complet, il n'est qu'un recueil d'exemples plus ou moins typiques.

En service, n'importe laquelle de ces interactions, et d'autres encore, peut prédominer dans le vieillissement du système d'isolation d'un type particulier de matériel pendant toute sa durée de vie. Il peut aussi arriver que plus d'une interaction existe en même temps. Un autre aspect très important, que révèle un examen attentif des défaillances en service de l'isolation de différents types de matériel, est la possibilité de modifications profondes des mécanismes de vieillissement et du principal facteur de vieillissement à un moment donné de la vie de l'isolation. Par exemple, le vieillissement graduel causé par un facteur prédominant (en interaction, peut-être, avec d'autres facteurs) peut modifier irréversiblement l'état de l'isolation de telle façon que la dégradation produite par un autre facteur devienne prédominante. Cela peut arriver parce que la première modification intensifie soit le second facteur, soit son action à niveau constant. Des effets similaires peuvent aussi être produits par des modifications réversibles de l'état du système d'isolation : par exemple les transformations qui se produisent à certaines températures, telles la fusion, la transition vitreuse, etc.

6.1 Vieillissement thermique

Le principal aspect du vieillissement thermique concerne l'évolution des transformations chimiques et physiques à cause des réactions chimiques de dégradation, de la polymérisation, de la diffusion, etc. Ce sont des processus liés à une vitesse de réaction allant vers l'état d'équilibre thermodynamique.

Si le vieillissement thermique normal produit un composé instable, ce dernier peut réagir avec d'autres espèces chimiques pour influencer ainsi sur la vitesse globale de réaction chimique, et par conséquent sur le vieillissement thermique.

Les autres aspects sont liés à l'apparition de contraintes mécaniques dues à des gradients permanents, transitoires ou périodiques de température. Ils peuvent donc être considérés aussi bien comme vieillissement thermique que comme vieillissement mécanique.

Figure 1 illustrates the choices of test procedure which may produce valid evaluations in different cases of factor combination and knowledge regarding interactions.

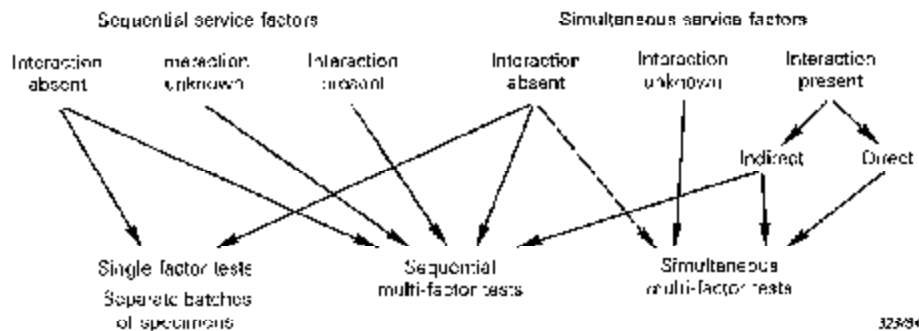


FIG. 1. — Diagram for choosing a valid test procedure consistent with known or experimentally observed service relationships.

6. Examples of interaction between factors of influence

A number of relatively well known mechanisms of interaction between factors of influence are briefly reviewed below. This review is by no means exhaustive but is merely a collection of more or less typical examples.

In actual service any of these examples, as well as other cases of interaction, may dominate the ageing of an insulation system in a particular type of equipment during its entire life. It may, however, also happen that more than one of these interactions exist at the same time. A very important aspect which is proven by the careful examination of service failures in quite different types of equipment, is the possibility of drastic changes of ageing mechanism and of the main ageing factor some time during the life of the insulation. For example, gradual ageing caused by one dominating factor (possibly with interaction from other factors) may irreversibly change the condition of the insulation in such a way that degradation produced by a different factor becomes dominant. This may result because the primary change intensifies either the second factor, or its action at constant level. Similar effects may also be produced by reversible changes of the state of the insulation system, for example, the transformations which occur at certain temperatures such as melting, glass transition, etc.

6.1 Thermal ageing

The main aspects of thermal ageing involves the progress of chemical and physical changes as a consequence of chemical degradation reactions, polymerization, diffusion, etc. These are rate processes proceeding towards the state of thermodynamic equilibrium.

If the normal thermal ageing generates an unstable component, this component may react with the other chemical species serving to influence the overall chemical reaction rate, and hence the thermal ageing.

Other aspects are related to the occurrence of mechanical stresses due to permanent, transitory or periodic temperature gradients. This might be considered under the heading of either thermal or mechanical ageing.

6.1.1 Interaction de E

La principale interaction de la contrainte électrique consiste normalement à accroître la température. Ces interactions se répartissent en deux groupes :

- 1) Augmentation de température et modification des gradients thermiques dus aux pertes diélectriques. Celles-ci dépendent de la tension, de la fréquence et des propriétés des matériaux. Dans les cas extrêmes, il peut en résulter une instabilité thermique. Ce sont des interactions *directes*. Dans les conditions d'essai, il faut prendre en considération l'accroissement moyen ou le plus élevé de température pour déterminer la température d'essai.
- 2) Le vieillissement électrique, en particulier par décharges partielles et, dans une certaine mesure, par cheminement, en plus de ses effets immédiats, produit aussi des agents (espèces chimiquement actives produites à partir du gaz dans lequel a lieu la décharge, radicaux libres et ions dans les zones touchées de l'isolation) qui peuvent influencer significativement sur les processus liés à une vitesse de réaction. Ces interactions peuvent être *directes* et/ou *indirectes*, suivant la durée de vie des agents actifs dans l'environnement réel.

6.1.2 Interaction de A

Si l'on considère que le mécanisme de vieillissement thermique comporte généralement un processus chimique, il est évident que la composition de l'environnement du système d'isolation a une grande importance.

Par exemple, sa concentration en oxygène aura un effet direct sur l'oxydation. De même, l'humidité peut avoir un effet important sur le vieillissement thermique. Dans le cas d'environnements spéciaux, ou lorsque le système d'isolation comprend des fluides isolants, les produits de dégradation de ces environnements ou de ces fluides peuvent être chimiquement actifs. C'est le cas des agents qui peuvent être présents en service normal ou par suite d'avaries (défaillance des circuits de refroidissement, contamination par des lubrifiants, etc.).

Il faut aussi reconnaître l'importance croissante des rayonnements.

Suivant le cas, les effets des facteurs d'environnement peuvent être *directs* ou *indirects*.

6.1.3 Interaction de M

L'influence du vieillissement mécanique peut être illustrée par l'effet d'une délamination d'une structure d'isolation stratifiée sur le transfert de chaleur à travers cette isolation. Cela peut augmenter considérablement la température locale et son effet sur les processus liés à une vitesse de réaction, les gradients de température et leurs effets mécaniques. Ces effets sont surtout *indirects*.

6.1.4 Interaction de E et A

Il peut arriver que l'action combinée de la contrainte électrique et de l'environnement influe sur le vieillissement thermique, dans le cas, par exemple, d'un processus électrolytique ou de cheminement.

6.1.1 Interaction of E

The main interaction of electrical stress normally contributes to temperature increase. Such interactions generally fall into two groups:

- 1) Increased temperature and modified thermal gradients due to dielectric losses. These depend on voltage, frequency, and on material properties. In extreme cases thermal instability may occur. This is a *direct* interaction. In test conditions, the average or highest temperature increase should be taken into account when determining the test temperature.
- 2) Electrical ageing, in particular by partial discharges and to some degree by tracking, in addition to its immediate effects also produces agents (chemically active species from the gas in which discharges occur, free radicals and ions in affected areas of the insulation) which may significantly affect the rate processes. These interactions may be of the *direct* and/or *indirect* type, depending on the life of the active agents in the actual environment.

6.1.2 Interaction of A

Considering that a chemical process is generally included in the mechanism of thermal ageing, it is evident that the composition of the environment of the insulation system will be important.

For example, its oxygen content will have a direct action on oxidation. Also, moisture can have an important effect on thermal ageing. When special environments are involved, or when insulating fluids are part of the insulation system, degradation products of these environments or fluids may be chemically active. This is the case with agents which may be present in normal service or due to accidents (failure of cooling circuits, contamination by lubricants, etc.).

The increasing importance of radiation should be recognized.

Depending on the case, the effects of the environmental factors are either *direct* or *indirect*.

6.1.3 Interaction of M

The influence of mechanical ageing can be illustrated by the effect of a delamination of a layered insulation structure on the heat transfer through this insulation. This may considerably increase the local temperature with a resulting effect on rate processes, and temperature gradients and their mechanical effects. Such effects are mainly *indirect*.

6.1.4 Interaction of E and A

It can happen that the combined action of electrical stress and environment play a role in thermal ageing, for example, if an electrolytic or tracking process is involved.

6.2 Vieillessement électrique

On sait que tous les autres facteurs d'influence, y compris les rayonnements, peuvent avoir un effet sur le vieillissement électrique. A cause de la grande diversité des mécanismes de vieillissement et des interactions possibles, seuls quelques exemples choisis sont donnés ici.

6.2.1 Interaction de T

C'est probablement le cas d'interaction entre facteurs d'influence qui a été le plus étudié. Elle peut prendre différents aspects :

- 1) Effets sur les causes du vieillissement électrique : la température ou le vieillissement thermique peuvent changer considérablement la tension d'apparition des décharges partielles et leur intensité grâce à des processus réversibles ou irréversibles (modification de la configuration des vacuoles par suite d'une différence de dilatation thermique entre les pièces conductrices et l'isolation, modification de la pression des gaz dans les vacuoles, modification de la conductivité de surface, etc.).
- 2) Effets sur les propriétés d'endurance du système d'isolation : la dégradation causée par des décharges partielles d'une intensité donnée peut être modifiée parce que certaines propriétés des matériaux sont dépendantes de la température.

Suivant le cas, les interactions peuvent être *directes* ou *indirectes*.

6.2.2 Interaction de A

Il est bien connu que les décharges partielles sont influencées d'une façon importante par la nature et la pression des gaz dans lesquelles elles apparaissent. Par ailleurs, les propriétés électriques des systèmes d'isolation sont sensibles à l'humidité, et cela peut influencer significativement sur le vieillissement électrique. Des processus électrolytiques peuvent résulter de conditions atmosphériques particulières. Dans la plupart des cas, ces interactions sont *directes*.

6.2.3 Interaction de M

La dégradation mécanique menant à un changement de configuration peut provoquer des décharges partielles dans de nouvelles vacuoles ou modifier l'intensité des décharges dans les vacuoles existantes si leur forme est modifiée. C'est une interaction *indirecte*.

6.2.4 Interaction de T et M

Tout comme il a été mentionné plus haut, les contraintes thermomécaniques peuvent avoir une grande importance dans l'apparition de défauts d'isolation et, par conséquent, de décharges partielles. Il s'agit d'une interaction *indirecte*.

6.3 Vieillessement dû à l'environnement

Dans la plupart des cas, le vieillissement dû à l'environnement est en corrélation avec les processus liés à une vitesse de réaction, mentionnés à l'alinéa traitant du vieillissement thermique.

6.2 *Electrical ageing*

It is known that all other factors of influence, including radiation, can affect electrical ageing. In view of the diversity of the ageing mechanisms and also of the possible interactions, some selected examples only are given here.

6.2.1 *Interaction of T*

This is probably the most extensively studied case of interaction between factors of influence. It can have different aspects:

- 1) Effects on the causes of electrical ageing: temperature or thermal ageing can drastically change the partial discharge inception voltage and intensity through reversible or irreversible processes (change of void configuration as a consequence of different thermal expansion of conductors and insulation, of gas pressure in a void, of surface conductivity, etc.).
- 2) Effects on the endurance properties of the insulation system: the degradation caused by partial discharges of a given intensity may change due to temperature-dependent material properties.

Whether these interactions are *direct* or *indirect* depends on the case at hand.

6.2.2 *Interaction of A*

It is well known that the nature and pressure of the surrounding gas is of great importance for partial discharges. Also, the dielectric properties of insulation systems are sensitive to moisture, and this can significantly affect electrical ageing. Electrolytic processes can be produced due to particular atmospheric conditions. These interactions are in most cases of the *direct* type.

6.2.3 *Interaction of M*

The mechanical degradation which leads to a change of conformation may produce partial discharges in new voids or change the discharge intensity in existing voids when their shape is changed. This is an *indirect* interaction.

6.2.4 *Interaction of T and M*

In the same way as stated above, thermo-mechanical stresses can be of importance for the development of faults in the insulation, with resulting partial discharges. This is an *indirect* interaction.

6.3 *Environmental ageing*

Environmental ageing is in most cases correlated with rate processes as discussed under thermal ageing.

L'importance croissante des rayonnements dans les processus de vieillissement des systèmes d'isolation doit être reconnue. Les interactions peuvent être *directes* et *indirectes*, suivant la nature des rayonnements et leur intensité.

6.3.1 Interaction de *T*

La température produit une interaction directe décisive. Elle peut aussi avoir un effet indirect en amenant un agent actif sur les sites de réaction.

La formation de fissures, de quelque origine que ce soit, peut avoir pour effet d'amener des agents actifs dans des régions internes. En permettant, par exemple, la migration d'eau, cela pourrait, dans ces régions, faire de l'hydrolyse une réaction prédominante.

6.3.2 Interaction de *E*

La présence d'un champ électrique, même à basse tension, peut modifier complètement le processus de vieillissement dû à l'environnement, en particulier en introduisant des mécanismes électrolytiques. Il s'agit d'une interaction *directe*.

6.3.3 Interaction de *M* (ou *M + T*)

Le vieillissement mécanique (et thermomécanique) peut produire des interfaces, qui peuvent amener des agents de l'environnement (par exemple l'eau) sur de nouveaux sites. Ces interactions sont *indirectes*.

6.4 Vieillessement mécanique

6.4.1 Interactions de *T*, *E*, *A* et leurs combinaisons

L'interaction avec le vieillissement mécanique s'applique plus particulièrement aux effets de la température.

A cause des différences de dilatation thermique, l'action de la température seule peut induire des contraintes mécaniques (ou thermomécaniques). Les cycles thermiques peuvent alors causer un vieillissement mécanique important.

Le vieillissement thermique, électrique, ou celui dû à l'environnement, peuvent influer sur les propriétés mécaniques de façon à modifier les effets du vieillissement mécanique (par exemple fragilisation, plastification). De même, la présence de poussières peut provoquer une abrasion et une usure des surfaces externes. Ce sont des interactions *indirectes*.

The increasing importance of radiation to the ageing processes of an insulation system should be recognized. Both *direct* and *indirect* interaction may occur, depending on the nature of the radiation and its intensity.

6.3.1 *Interaction of T*

Temperature produces a decisive *direct* interaction. It may also have an *indirect* effect by bringing an active agent to the place of reaction.

The formation of cracks for any reason may bring active products to internal regions. This might, for example, make hydrolysis a dominating reaction in this region by permitting migration of water.

6.3.2 *Interaction of E*

The presence of an electrical field, even at low voltage, is able to completely change the process of environmental ageing, in particular by the introduction of electrolytic mechanisms. This is a direct interaction.

6.3.3 *Interaction of M (or M + T)*

Mechanical (and thermomechanical) ageing may produce interfaces, which may bring environmental agents (e.g. water) to new places. Such interactions are *indirect*.

6.4 *Mechanical ageing*

6.4.1 *Interaction of T, E, A and their combinations*

Interaction with mechanical ageing applies particularly to the effect of temperature.

Due to differential expansion, mechanical (or thermomechanical) stresses can be induced by the action of temperature alone. Thermal cycling may then produce a significant mechanical ageing.

Thermal, environmental and electrical ageing may influence mechanical properties in ways which change the effects of mechanical ageing (e.g., embrittlement, plastification). Also, the presence of dust may produce abrasion and wear on external surfaces. Such effects are *indirect* interactions.

**Publications de la CEI préparées
par le Comité d'Études n° 63**

- 505 (1975) Guide pour l'évaluation et l'identification des systèmes d'isolation du matériel électrique.
- 610 (1978) Principaux aspects de l'évaluation fonctionnelle des systèmes d'isolation électrique: mécanismes de vieillissement et procédures de diagnostic.
- 611 (1978) Guide pour la préparation de procédures d'essai pour l'évaluation de l'endurance thermique des systèmes d'isolation électrique.
- 727 — Evaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation électriques.
- 727-1 (1982) Première partie: Considérations générales et procédures d'évaluation basées sur une distribution normale.
- 791 (1984) Evaluation des performances de systèmes d'isolation à partir de l'expérience en service et des résultats d'essais fonctionnels.
- 791 — Essais fonctionnels à plusieurs facteurs de systèmes d'isolation électrique.
- 792-1 (1984) Première partie: Procédures d'essai.

**IEC publications prepared
by Technical Committee No. 63**

- 505 (1975) Guide for the evaluation and identification of insulation systems of electrical equipment.
- 610 (1978) Principal aspects of functional evaluation of electrical insulation systems: Ageing mechanisms and diagnostic procedures.
- 611 (1978) Guide for the preparation of test procedures for evaluating the thermal endurance of electrical insulation systems.
- 727 — Evaluation of electrical endurance of electrical insulation systems.
- 727-1 (1982) Part 1: General considerations and evaluation procedures based on normal distributions.
- 791 (1984) Performance evaluation of insulation systems based on service experience and functional tests.
- 792 — The multi-factor functional testing of electrical insulation systems.
- 792-1 (1984) Part 1: Test procedures.