

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Electrical insulating materials – Determination of the effects of ionizing radiation –

Part 5: Procedures for assessment of ageing in service

Matériaux isolants électriques – Détermination des effets des rayonnements ionisants –

Partie 5: Procédures pour l'estimation du vieillissement en service



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2011 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, 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 either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

The IEC on-line Catalogue enables you to search by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details twice a month all new publications released. Available on-line and also by email.

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00



IEC 60544-5

Edition 2.0 2011-12

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Electrical insulating materials – Determination of the effects of ionizing radiation –

Part 5: Procedures for assessment of ageing in service

Matériaux isolants électriques – Détermination des effets des rayonnements ionisants –

Partie 5: Procédures pour l'estimation du vieillissement en service

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

S

ICS 17.240; 29.035.01

ISBN 978-2-88912-836-5

CONTENTS

FOREWORD.....	3
INTRODUCTION.....	5
1 Scope and object.....	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	7
4 Background	7
4.1 General.....	7
4.2 Diffusion limited oxidation (DLO)	7
4.3 Dose rate effects (DRE)	8
4.4 Accelerated radiation ageing	8
4.5 Accelerated thermal ageing	9
5 Approaches to ageing assessment	9
6 Identifying components of concern	9
6.1 General.....	9
6.2 Priorities for ageing management	9
6.3 Environmental monitoring	10
6.4 Localized severe environments	10
6.5 Worst case components	10
7 Condition monitoring techniques.....	10
7.1 General.....	10
7.2 Establishing correlation curves for CM methods	11
7.3 CM methods.....	11
7.4 Using CM for short-term troubleshooting	11
7.5 Using CM for long-term degradation assessment.....	13
8 Predictive modelling	14
9 Sample deposit.....	15
9.1 General.....	15
9.2 Requirements of a deposit.....	15
9.3 Pre-ageing samples for a deposit	15
9.4 Installation of an sample deposit	15
9.5 Testing of samples from the deposit	16
9.6 Determination of sampling intervals.....	16
9.7 Real time aged materials.....	17
Annex A (informative) Example of a CM correlation curve	18
Annex B (informative) Use of a deposit	19
Bibliography.....	20
Figure 1 – Development of ageing data on changes in tensile elongation and a condition indicator (e.g. indenter modulus) – Schematic.....	12
Figure 2 – Correlation curve derived from data in Figure 1 – Schematic.....	13
Figure 3 – Estimation of elongation from a correlation curve	14
Figure 4 – Modification of sampling interval dependent on values of the CM indicator.....	17
Figure A.1 – Correlation curve for indenter modulus against tensile elongation for a CSPE cable jacket material [18].....	18

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ELECTRICAL INSULATING MATERIALS – DETERMINATION OF THE EFFECTS OF IONIZING RADIATION –

Part 5: Procedures for assessment of ageing in service

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60544-5 has been prepared IEC technical committee TC 112: Evaluation and qualification of electrical insulating materials and systems.

This second edition cancels and replaces the first edition, published in 2003, and constitutes an editorial revision to align it with standards recently developed by SC 45A as well as with other parts in the IEC 60544 series.

The text of this standard is based on the following documents:

CDV	Report on voting
112/171/CDV	112/191/RVC

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all parts in the IEC 60544 series, published under the general title *Electrical insulating materials – Determination of the effects of ionizing radiation*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

Organic and polymeric materials provide a significant proportion of the insulation used in electrical systems. These materials are sensitive to the effects of irradiation and the response varies widely between different types. It is therefore important to be able to assess the degree of degradation of these insulating materials during their service lifetimes. This part of IEC 60544 provides recommended procedures for assessing ageing of insulating materials in service.

There are a number of approaches to the assessment of ageing of polymer-based components exposed to radiation environments [1–4]¹. These are based on the better understanding of the factors affecting ageing degradation which has been developed over several decades. In nuclear power plants, qualification programmes are normally used for selection of components, including those based on polymeric materials. These initial qualification procedures, such as IEEE-323 [5] and IEEE-383 [6], were originally written before there was sufficient understanding of ageing mechanisms. Most of the methods discussed in this part of IEC 60544 are therefore used to supplement the initial qualification process.

This part is the fifth in a series dealing with the effect of ionizing radiation on insulating materials.

Part 1 (Radiation interaction and dosimetry) constitutes an introduction dealing very broadly with the problems involved in evaluating radiation effects. It also provides guidance to dosimetry terminology, several methods of determining exposure and absorbed dose, and methods of calculating absorbed dose in any specific material from the dosimetry method applied.

Part 2 (Procedures for irradiation and test) describes procedures for maintaining seven different types of exposure conditions during irradiation. It also specifies the controls that should be maintained over these conditions so that when test results are reported, reliable comparisons of material performance can be made. In addition, it defines certain important irradiation conditions and test procedures to be used for property change determinations and corresponding end-point criteria.

Part 3 has been incorporated into the second edition of IEC 60544-2.

Part 4 (Classification system for service in radiation environments) provides a recommended classification system for categorizing the radiation endurance of insulation materials.

¹ Figures in square brackets refer to the bibliography.

ELECTRICAL INSULATING MATERIALS – DETERMINATION OF THE EFFECTS OF IONIZING RADIATION –

Part 5: Procedures for assessment of ageing in service

1 Scope and object

This part of IEC 60544 covers ageing assessment methods which can be applied to components based on polymeric materials (e.g. cable insulation and jackets, elastomeric seals, polymeric coatings, gaiters) which are used in environments where they are exposed to radiation.

The object of this standard is aimed at providing methods for the assessment of ageing in service. The approaches discussed in the following clauses cover ageing assessment programmes based on condition monitoring (CM), the use of sample deposits in severe environments and sampling of real-time aged components.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60544-1, *Electrical insulating materials – Determination of the effects of ionizing radiation – Part 1: Radiation interaction and dosimetry*

IEC 60544-2, *Guide for determining the effects of ionizing radiation on insulating materials – Part 2: Procedures for irradiation and test*

IEC 61244-1, *Determination of long-term radiation ageing in polymers – Part 1: Techniques for monitoring diffusion-limited oxidation*

IEC 61244-2, *Determination of long-term radiation ageing in polymers – Part 2: Procedures for predicting ageing at low dose rates*

IEC 60780, *Nuclear power plants – Electrical equipment of the safety system – Qualification*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following abbreviations, taken from IEC 60780, apply.

BWR	Boiling water reactor
CBQ	Condition based qualification
CM	Condition monitoring
CSPE	Chlorosulphonated polyethylene
DBE	Design basis event
DLO	Diffusion limited oxidation
DRE	Dose rate effect
DSC	Differential scanning calorimeter
EPR	Ethylene propylene rubber
EQ	Environmental qualification
EVA	Ethylene vinyl acetate copolymer
IM	Indenter modulus
LOCA	Loss of coolant accident
NPP	Nuclear power plant
OIT	Oxidation induction time
OITP	Oxidation induction temperature
PE	Polyethylene
PVC	Polyvinyl chloride
PWR	Pressurized water reactor
TGA	Thermo-gravimetric analysis
VVER	Water-cooled, water-moderated energy reactor (type of pressurized water reactor developed by Russia)
XLPE	Cross-linked polyethylene

4 Background

4.1 General

There are a number of factors that need to be considered when assessing ageing of polymeric components in radiation environments. In the following clauses some of these factors are briefly discussed and references made to more detailed information.

To accelerate radiation-ageing environments, the normal approach is to increase the radiation dose rate, often combined with an increase in temperature. The two most important potential complications arising from such increases involve diffusion-limited oxidation, which is described in 4.2, and chemical dose rate effects (DRE), which are described in 4.3. The implications of these factors on the use and interpretation of condition monitoring (CM) techniques are also discussed. Accelerated ageing programmes are briefly discussed in 4.4 and 4.5.

4.2 Diffusion limited oxidation (DLO)

When polymers are exposed to an oxygen-containing environment (e.g. air), some oxygen will be dissolved in the material. In the absence of oxygen-consuming reactions (oxidation), the amount of dissolved oxygen will be proportional to the oxygen partial pressure surrounding the polymer (well known from Henry's Law). Ageing will lead to oxidation reactions in the polymer, whose rate will increase significantly as the dose rate and temperature of ageing are

increased. If the rate of consumption of dissolved oxygen in the polymer is faster than the rate at which oxygen can be replenished by diffusion from the surrounding atmosphere, the concentration of dissolved oxygen in the interior regions will decrease with time (the oxygen concentration at the sample surface will remain at its equilibrium value). The reduction in internal oxygen concentration can lead to reduced or negligible oxidation, referred to as diffusion limited oxidation.

The importance of this effect is dependent on the sample thickness (thinner samples giving smaller DLO effects) and the ratio of the oxygen consumption rate to the oxygen permeability coefficient P , which is the product of the oxygen diffusion and solubility parameters. Accelerated radiation environments involve increases in dose rates, which increase the oxygen consumption rate. If the temperature remains constant as the dose rate is increased, the oxygen permeability coefficient will be unchanged. This means that DLO effects will become more important as the dose rate is raised. These effects are described in more detail in IEC 61244-1.

The effects of DLO may also need to be considered when carrying out CM measurements. This is not an issue for the many CM techniques which measure properties at ambient temperature, such as those based on density and modulus measurements. On the other hand, several CM techniques such as oxidation induction time (OIT) and thermogravimetric analysis (TGA) use quite elevated temperatures during the measurements. For these techniques, it is quite possible to have DLO effects present during measurement of the CM parameter. For this reason, detailed test methods for CM have been developed [8] to ensure that the sample preparation and test procedure avoid DLO effects. DLO shall be addressed when developing correlation curves for CM methods, to ensure that representative data are obtained for both radiation and thermal ageing.

4.3 Dose rate effects (DRE)

The existence of radiation dose-rate effects and methods for dealing with these effects are described in IEC 61244-2. Generally, DRE are separated into two types. The first type, which is commonly observed in accelerated radiation-ageing experiments, is due to the DLO effects described in 4.2. These DLO-based effects represent a physical, geometry-dependent DRE.

The second type, of interest to the current discussion, concerns chemical DRE. Such chemically based DRE are much less common. A documented case of chemical DRE is found in PVC and low density polyethylene materials, caused by the slow breakdown of hydroperoxide intermediate species in the oxidation reaction [10]. The existence of such chemical DRE shall be checked at the start of any accelerated ageing programme.

4.4 Accelerated radiation ageing

Accelerated ageing programmes in the laboratory tend to use acceleration factors much lower than are normally used in equipment qualification. This may avoid some of the problems associated with DLO and DRE. The ageing produced may then be a better simulation of the long term ageing that occurs under service conditions. The data that are obtained in accelerated ageing tests can be used with predictive models to enable assessments to be made of the behaviour of the materials under service conditions.

Accelerated ageing programmes require a matrix of test data to be generated over a range of environmental conditions as described in IEC 61244-2. As a minimum, data are needed for at least 3 different dose rates at the normal operating temperature but additional data on thermal ageing and radiation ageing at elevated temperature enables better use to be made of the available predictive modelling methods. The dose rates and temperatures used for accelerated ageing should be selected using the principles described in IEC 60544-2 to ensure that homogeneous oxidation occurs. For each environmental condition used, test data shall be obtained at several different ageing times, the longest of which should be sufficient to introduce significant degradation. A typical test programme could take more than 18 months to complete, dependent on the radiation resistance of the materials being tested.

The data required in the test matrix are determined by the type of component being evaluated. The appropriate test parameters are given in IEC 60544-2 for various types of polymeric material.

4.5 Accelerated thermal ageing

When carrying out thermal ageing as part of an accelerated ageing programme, it is important that an appropriate value of the activation energy is used in assessing the temperature and timescale of the accelerated test. In some materials, the ageing mechanism at high temperatures is different to that which would occur under plant conditions and in many materials the activation energy decreases significantly at lower temperatures [10,11].

Samples which have been exposed to accelerated thermal ageing shall be allowed to stabilize before any CM tests are carried out. Some polymeric materials are hygroscopic and show a marked dependence of their properties on the moisture content [8]. This is primarily of concern for a few materials used in older nuclear plant, but may also be important for those CM methods that are sensitive to the moisture content of the material.

5 Approaches to ageing assessment

There are a number of complementary methods available for ageing assessment as described in their respective clauses. Each of these methods has its own advantages and limitations. Selection of one or more of the methods will be dependent on the requirements of the individual users.

Several approaches to ageing assessment in-service are described in this standard. These are:

- identifying components of concern to prioritize the application of ageing management programmes (see Clause 6);
- condition monitoring to assess the condition of materials which have aged for extended time periods under actual use environments (see Clause 7);
- predictive modelling to use data from laboratory based accelerated ageing programmes to estimate ageing under real-time ageing conditions (see Clause 8);
- sample deposit to provide samples for the measurement of ageing under real-time ageing conditions (see Clause 9).

6 Identifying components of concern

6.1 General

Within a nuclear power plant there are many components containing polymeric insulating materials, e.g. there are >1 000 km of electrical cables in a typical NPP. It is not practical to assess the ageing of every individual component, and many will not be exposed to significant environmental ageing conditions. It is therefore necessary to prioritize any ageing management programme by identifying those components which are of most concern.

6.2 Priorities for ageing management

Not all components have the same priority for ageing management. In general, those components performing safety functions during and following an accident are of most concern, together with those important to continued operation. Any components outside of these categories would initially be assigned to a low priority for ageing management activities.

The normal operating environment of the components shall be examined to identify the expected impact of the environment on their ageing. Those components identified as being

subject to severe ageing are assigned the highest priority, whereas those subject to moderate ageing can then be assigned to a medium priority.

For this prioritization to be carried out effectively, environmental monitoring is essential (see 6.2), combined with knowledge of the ageing behaviour of the components. Initial assessment may make use of design calculations for temperatures and dose rates. The ageing information may come from equipment qualification data or from supplementary accelerated ageing tests carried out in the laboratory.

6.3 Environmental monitoring

Ageing of insulating materials in a NPP is dominated by temperature, radiation dose and radiation dose rate for organic and polymeric materials. A major requirement for ageing management is a detailed knowledge of the actual temperatures and dose rates at locations within the plant where high priority components are situated.

The temperature and dose rate distribution within the plant shall be obtained using temperature recorders and dosimeters. Operational fluctuations and seasonal variations shall be included by carrying out these measurements over several fuel cycles. It may be necessary to repeat such measurements when changes are made to the plant, e.g. power upgrades.

Small self-contained temperature recorders are available and are a practical and flexible method for localized temperature recording to supplement bulk temperature monitoring equipment that is already installed in the plant.

Radiation monitoring is best achieved with alanine dosimeters, which are suitable for long term measurements. These dosimeters are not significantly affected by temperature, can be sealed to avoid the influence of humidity and are suitable for monitoring over a wide dose range. The radicals formed under irradiation in alanine are stable over time periods in excess of a year and can be measured using electron spin resonance (IEC 60544-1).

6.4 Localized severe environments

Identification of localized severe environments (hotspots) where high priority components are located is an important aspect of ageing assessment. Such locations can be identified in a number of ways, including interviews of plant personnel, operational reviews, review of plant layout drawings and plant walkdowns [11,12]. Each will provide a different perspective on hotspot conditions. Feedback from plant maintenance personnel is an important aspect of identifying early signs of degradation.

6.5 Worst case components

Having prioritized the components most likely to be affected by ageing, carried out environmental monitoring and identified localized severe environments, the components will have been assigned to either a high, medium or low priority for further ageing management. All components assigned to a high priority shall be subject to ageing management activities such as CM or planned replacement.

The evaluation process can be refined as more information becomes available. For example, if CM of high priority cables indicates that degradation is much less severe than expected, it may be appropriate to move these components to a lower priority category.

7 Condition monitoring techniques

7.1 General

CM techniques are used to assess the condition of materials which have aged for extended time periods under actual use environments, such as in nuclear power plants, accelerators,

reprocessing plants, etc. The approach makes use of test methods which have been shown to correlate well with ageing degradation.

CM in ageing assessment can be used in a number of ways, ranging from short term trouble shooting to long term on-going qualification programmes.

7.2 Establishing correlation curves for CM methods

In order to use CM methods effectively, it is important to develop correlation curves between the monitoring parameter measured and the prime indicator of degradation or functionality. For polymeric cable materials, the prime indicator of degradation is generally considered to be tensile elongation at break, since changes in electrical properties are small before physical failure of the cable in many cases. In seal materials, the compression set has proved to be a useful indicator of the degradation in sealing properties introduced by ageing. Suitable degradation parameters for other components are given in IEC 60544-2.

Correlation curves shall be determined by measurements of the prime indicator and the relevant CM parameter on samples aged under identical conditions, as shown schematically in Figure 1. The measurements shall cover a range of degradation levels, from the unaged condition to a severely degraded condition. It is recommended that at least 5 sets of data at different ageing times be used in establishing the correlation curve (Figure 2), preferably for several different temperatures and radiation dose rates. An example of a correlation curve for a CSPE cable sheath material is given in Annex A.

Correlation curves are normally established using accelerated testing. Such tests shall be carried out using the procedures described in IEC 60544-2. Alternatively, correlation curves can be established as part of the sample deposit procedure for ageing assessment, as described in Clause 9, or as part of the initial equipment qualification process.

7.3 CM methods

There is a wide range of methods which have been evaluated for CM of polymeric components, particularly for cable materials [4]. Of the many methods examined, several have been identified as being potentially suitable for practical use. Measurement standards for the most developed of these methods are described in detail in the various parts of IEC 62582 [8]. For these methods, data correlating the monitoring parameter with degradation of the polymeric component have been built up and the practical limitations explored. The most developed methods are

- indenter modulus,
- oxidation induction time (OIT) and oxidation induction temperature (OITP),
- elongation at break.

NOTE There are many other methods which have been investigated for CM and suitable measurement standards for some of these are expected to be developed over the next few years. A number of these are described in IAEA-NP-T-3.6 [4].

Visual inspection (including tactile and other sensory inspection) is a qualitative monitoring method which can be a valuable tool in assessing localized ageing degradation within nuclear plant using walkdowns. The practical considerations for in-plant visual inspections (walkdowns) are described in more detail in [11,12].

Electrical methods for assessing degradation in cable systems and their associated end-devices are described in IEC 62465 [14]. These methods primarily relate to cable systems (connectors, penetrations etc.) rather than degradation of the insulating materials.

7.4 Using CM for short-term troubleshooting

In short-term tests, the emphasis of CM is in identifying the extent of a problem or in demonstrating that a problem does not exist. For example, the indenter has been used to

determine the extent of damage to cables from degradation arising from damaged thermal insulation on a steam line near a cable in a BWR nuclear power plant. By carrying out indenter measurements along this cable, a profile of the damaged area was obtained. This enabled replacement of a limited section of cable rather than replacing the entire cable run.

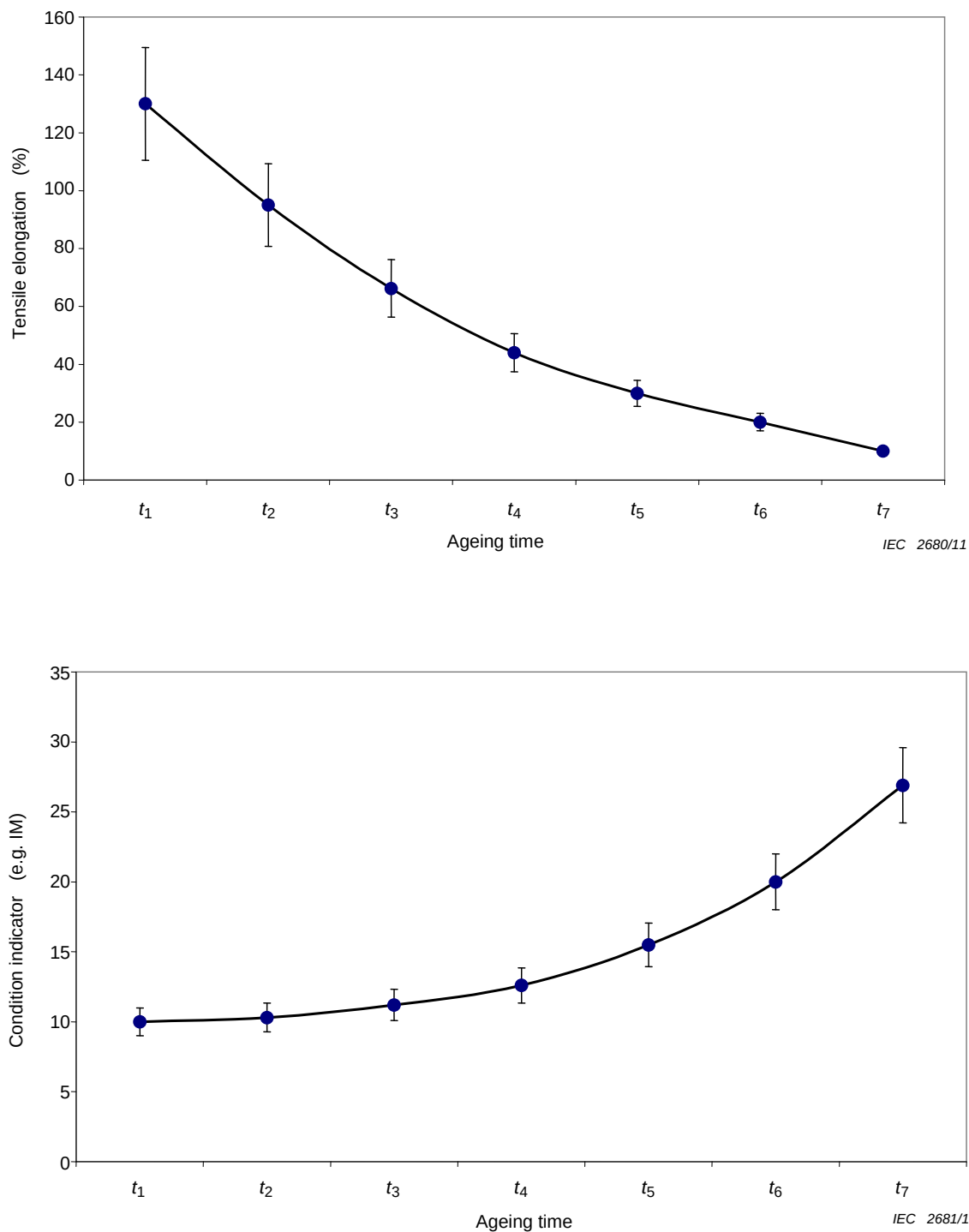


Figure 1 – Development of ageing data on changes in tensile elongation and a condition indicator (e.g. indenter modulus) – Schematic

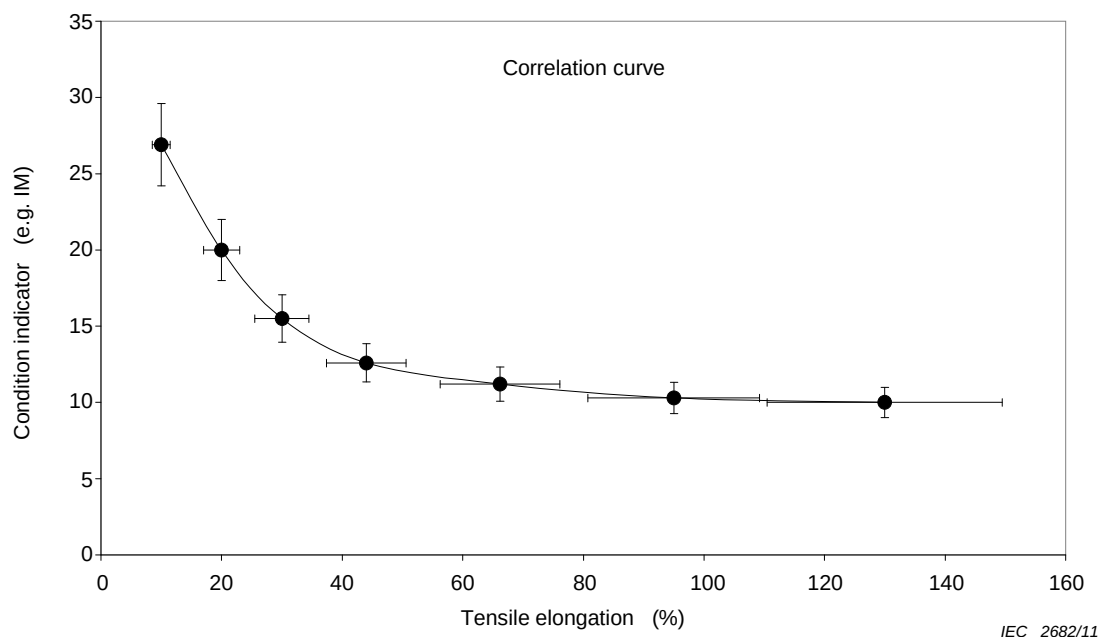


Figure 2 – Correlation curve derived from data in Figure 1 – Schematic

In some cases, the use of design criteria (e.g. calculation of self-heating of power cable from current loading) can be very conservative, indicating that the insulation would be expected to show significant degradation. Checks on the component using CM methods can be used to demonstrate that the materials have not degraded to the extent predicted, avoiding unnecessary replacement. This is particularly important where a short qualified life has been determined during EQ.

7.5 Using CM for long-term degradation assessment

CM methods can also be used in on-going test programmes which span the lifetime of the plant. Typical uses of CM methods in such programmes are

- trending of component condition relative to a qualified condition determined during initial EQ procedures,
- comparison of CM data with predictive modelling, based on accelerated ageing data in the laboratory and a knowledge of the environmental conditions seen by the component,
- monitoring of components in a sample deposit located in a severe environment in the plant (this is most frequently used for cables and small electrical components).

Figure 3 illustrates how the elongation at break can be estimated from a CM parameter such as indenter modulus.

Condition based qualification (CBQ) is becoming the recommended method for equipment qualification for new NPPs [12, 13]. For this approach to EQ to be used, CM techniques shall be applied during the pre-ageing phase of qualification to determine the shape of the ageing curve and the limiting value of CM parameters at which the component can survive a DBE, i.e. the qualified condition. Trending of the condition of the component relative to this qualified condition is an essential part of CBQ.

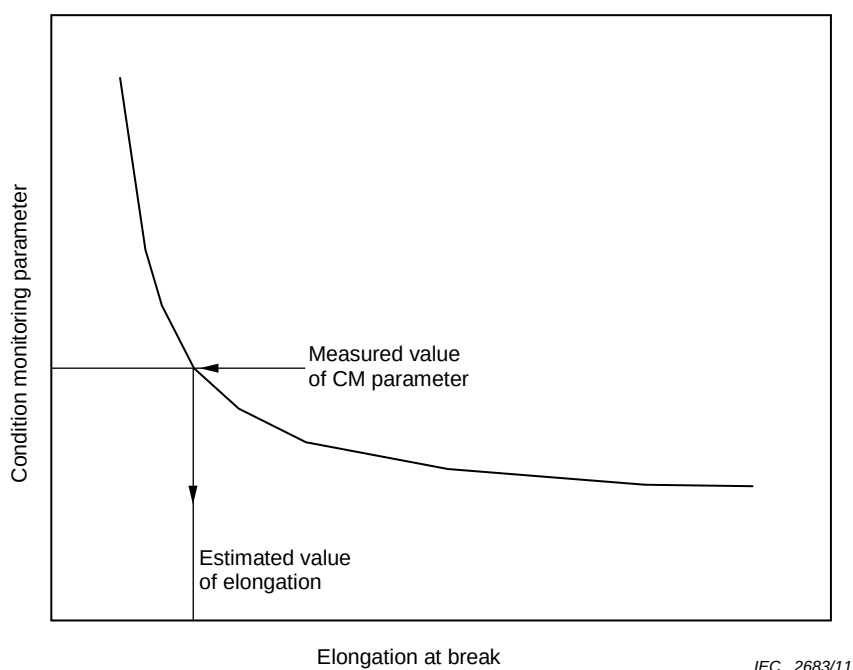


Figure 3 – Estimation of elongation from a correlation curve

8 Predictive modelling

Data obtained during laboratory accelerated ageing tests can be used to generate model parameters for predictive ageing models, such as those described in IEC 61244-2. These models can be used to predict the degradation of specific materials under various ageing conditions of temperature and radiation dose rate. By using the data obtained from environmental monitoring of the actual temperatures and dose rates in the plant, the degradation expected to occur in real-time ageing can be assessed.

This approach can also be used to estimate the effect of changes in the environmental conditions, e.g. a short-term increase in temperature arising from damage to thermal insulation on a nearby steam pipe.

The detailed accelerated ageing tests required to obtain the model parameters are most likely to be carried out on materials for use in new plant. The use of such models combined with design data on environmental conditions can be used during the design phase of new plant to identify potential problem areas where re-siting of equipment would be appropriate, e.g. re-routing of a cable run to avoid a localized hotspot.

Three predictive models which make use of a matrix of accelerated ageing data are described in detail in IEC 61244-2, together with the limitations and data requirements for use of these models:

- a power law model that has proved useful for materials exposed to radiation environments where thermal ageing is negligible;
- a time dependent superposition model which can model combined thermal and radiation ageing for those materials with a single dominant ageing mechanism;
- a dose dependent superposition model which is particularly useful in the low dose rate radiation ageing range where thermal ageing is important, and for materials with complex ageing behaviour.

9 Sample deposit

9.1 General

The testing of materials from a sample deposit in the plant is an alternative approach to assessment of ageing in service. This makes use of samples specifically installed in the plant for destructive testing and/or CM as part of an ageing management programme.

Assessment of the long-term properties of components using a sample deposit has advantages over accelerated ageing programmes. Its use means that the components age under real plant conditions but can, nevertheless, be checked and monitored without impairing plant operation. Such deposits are often installed in an area of the plant which has a relatively severe environment compared with most other areas where such materials are used. In this case, the sample in the deposit will age more rapidly and therefore will have a lead time over the bulk of the material in the plant.

Most deposits are primarily used for evaluation of cables and small electrical components and are mainly set up in a plant which has been in operation for less than 5 years. However, a deposit can also be of use in an older plant, provided that the samples are pre-aged using accelerated ageing before installation in the deposit. Samples in deposits are particularly useful for on-going qualification programmes.

9.2 Requirements of a deposit

A major prerequisite for the implementation of a sample deposit is a good knowledge of the radiation dose and temperature distribution at the deposit position and at positions in the plant where the material being tested is in routine use.

Environmental monitoring can be used to select a position in the plant that is exposed to a higher dose than most of the real positions. It may even be possible to find a location where the temperature is also similar to the maximum design temperature. Experience has shown that the loop line between the reactor pressure vessel and the steam generator is suitable for this purpose in pressurized water reactors (PWRs) and the reactor water clean-up system in boiling water reactors (BWRs). In VVER type reactors, the main circulation pipe, either hot or cold leg, is also a suitable location for a deposit.

In selecting a position for the deposit, care shall be taken to ensure that the environmental conditions at the deposit will produce degradation which simulates real conditions. In particular, care shall be taken in exposing some XLPE and EPR based components to radiation ageing at elevated temperature if their normal use is at lower temperatures. These materials can show a reverse temperature effect [15,16,17], with degradation occurring more rapidly at the lower temperatures. For XLPE materials, the deposit shall be at the lowest ambient temperature normally seen in plant operations.

9.3 Pre-ageing samples for a deposit

When a deposit is set up in a NPP which has been in operation for more than 5 years, it will be necessary to pre-age the samples to be placed in the deposit to a level equivalent to the actual age of the plant. The accelerated ageing used to pre-age the samples shall use low acceleration factors. The temperature and dose rate being simulated shall be based on the actual values in the plant, as determined from environmental monitoring (see 6.3).

9.4 Installation of an sample deposit

The deposit shall be arranged so that the samples are exposed to a reasonably uniform radiation field (e.g. if using the loop line in a PWR as the radiation source, they are kept at a constant distance from the loop). This can be readily done by using cable trays strapped to the circumference of the loop line. The specific design of the deposit can easily be adapted to the local conditions in the plant. Samples shall be placed in a single layer to avoid self-shielding.

The deposit needs to be equipped with a representative selection of the materials (e.g. cable samples, small electrical components) used in radiation environments. The number and type of samples required needs to be sufficient to ensure that enough material is available for the scheduled removal of samples over the required period of up to 60 years (for a deposit in a new plant). It is prudent to include extra samples to allow for future improvements in CM methods. Annex B illustrates the type of samples usually included in a deposit.

In assessing the number and type of samples required, the intervals at which samples are to be removed and the tests those are to be performed need to be established. For example, for cables, samples of about 0,3 m to 0,5 m in length are quite satisfactory for measurements of tensile elongation at break. Most of the CM methods currently available are non-destructive or need only small amounts of material; however, electrical tests will need longer lengths. If samples are required for a DBE test with electrical measurements, a minimum length of 3 m is required. Any whole cable samples included in a deposit shall have their ends sealed.

The deposit shall be fitted with dosimeters to record the profile of the radiation dose within the deposit and temperature monitoring is also required. This environmental monitoring shall be continued over at least two years to get a representative picture of the long-term environmental conditions within the deposit. Care shall be taken to ensure that there is a free flow of air into the deposit. Suitable contamination protection is desirable but shall not restrict air access.

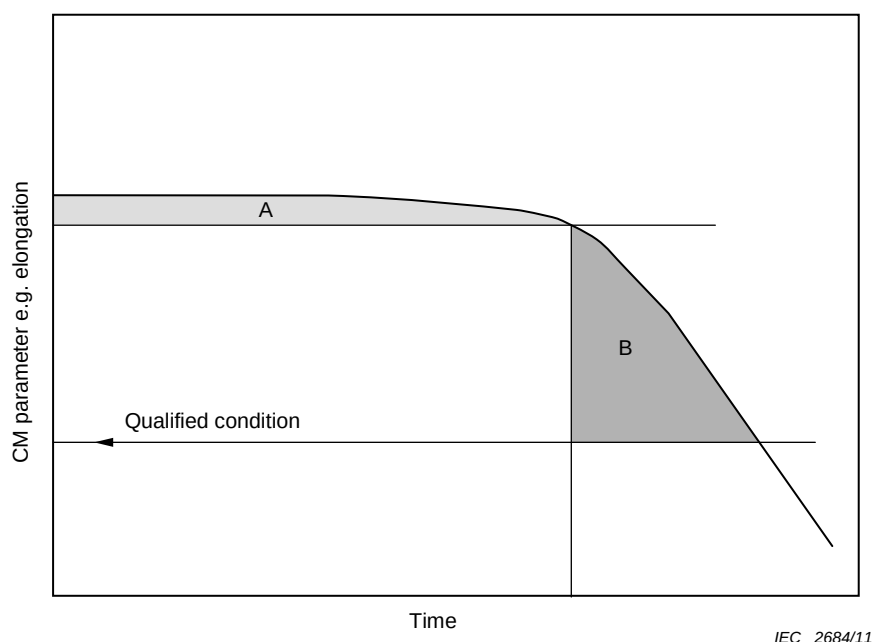
9.5 Testing of samples from the deposit

Initially, baseline data for all of the materials installed in the deposit shall be determined using unaged material. This baseline data shall utilize all of the CM tests which will be used on the materials in the deposit.

At regular intervals, samples will be removed for destructive tests (e.g. tensile elongation measurements) or subjected to CM tests. The test intervals will generally be limited by the accessibility of the sample deposit. In most plants, the deposit will only be available for access when the plant is shut down. The type of testing schedule required is illustrated in Annex B.

9.6 Determination of sampling intervals

For the cable types currently in use, it is reasonable to remove the first samples from the deposit 5 years after the start of plant operation, since the type and qualification tests that have already been performed provide an acceptable confidence interval for at least this period. The recommended interval between tests for a deposit in a new plant is 5 to 8 years. This interval shall be decreased if the materials are showing signs of more rapid degradation than expected. Once degradation starts to be observed the sampling interval shall be reduced, as indicated in Figure 4. A revised sampling interval of 1 to 2 years is then recommended. The precise boundaries of zones A and B illustrated schematically in Figure 4 shall be defined by the degradation curve for the specific material and by the qualified condition for that material.



NOTE In zone A, samples are taken at 5 to 8 year intervals; in zone B, the interval is decreased to 1-2 years.

Figure 4 – Modification of sampling interval dependent on values of the CM indicator

9.7 Real time aged materials

The deposit method is primarily suitable for new plants where unaged samples are readily available for the material types that are to be included in the deposit. For older plants, where unaged samples are not available for use in a deposit, an alternative is to evaluate the actual long-term ageing behaviour by removing samples from the plant. The disadvantages of this sampling procedure are that it constitutes an intervention into the plant and that the samples have to be replaced with suitably qualified materials. However, it may be necessary to use this method if, for special reasons, validated results have to be available within a short time (e.g. for older plants without existing EQ).

If there are data available on environmental conditions within the plant, a position can be selected where the material has been exposed to the worst case condition. For cable materials, such positions are usually in the direct vicinity of the loop lines (PWR) or in the reactor water cleanup system (BWR). Cable samples from real positions are normally irradiated quite inhomogeneously, e.g. a cable run converging on the loop line. Before removing the cable sample, the dose distribution shall be determined and the cable location identified clearly in a reproducible manner to allow the test results to be interpreted correctly.

CM methods that are non-destructive or use only micro-samples can be used to evaluate ageing degradation where sample removal for destructive testing is not practical. Baseline data are still required.

Annex A (informative)

Example of a CM correlation curve

An example of a correlation curve in Figure A.1 for a CSPE cable material, shows the correlation between indenter measurements and changes in the tensile elongation at break obtained during an accelerated ageing programme [18]. A good correlation has been obtained for both radiation and thermal ageing of this CSPE material. This correlation curve also illustrates the degree of scatter that is likely to be observed in real data.

In-plant CM measurements on this material using the indenter can be compared with the predicted degradation that allows residual life to be estimated. The predicted degradation is obtained from use of ageing models (such as those described in IEC 61244-2), combined with knowledge of the environmental conditions in the plant. Alternatively, the condition can be compared to a qualified condition determined during EQ.

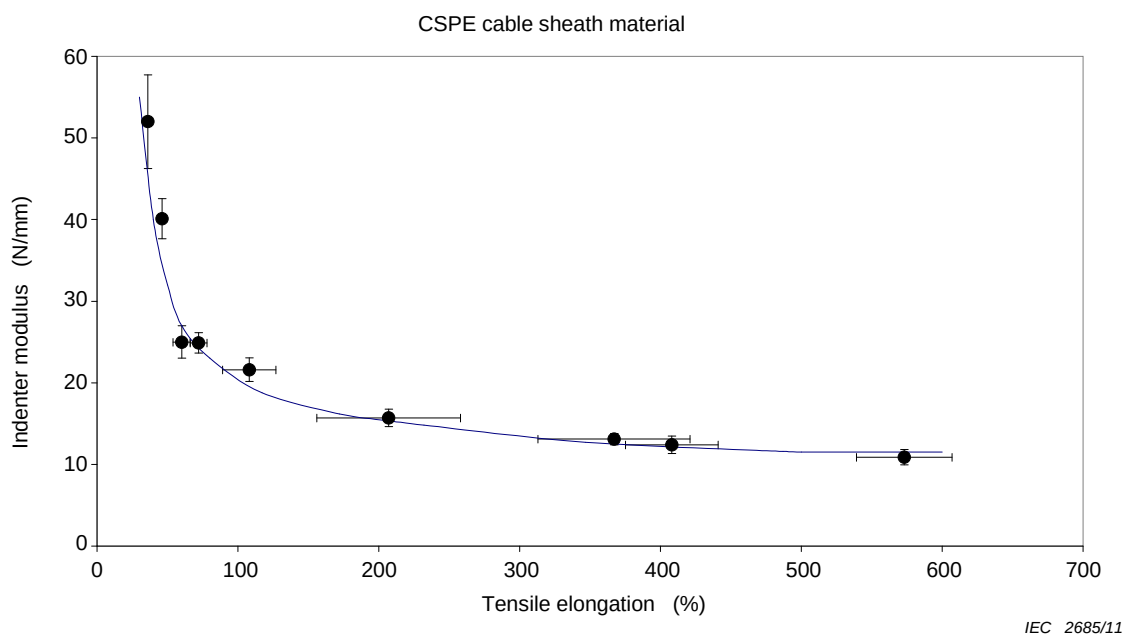


Figure A.1 – Correlation curve for indenter modulus against tensile elongation for a CSPE cable jacket material [18]

Annex B **(informative)**

Use of a deposit

B.1 Typical sample in a deposit

A number of sample deposits have been installed in NPPs, mainly for cable materials. The detail of what is included in the deposits will vary from plant to plant but some typical examples are illustrated below.

A typical cable deposit might include the following types of samples:

- batches of pre-prepared dumb-bell samples for elongation tests;
- short sections of whole cable (typically 0,3 m to 0,5 m in length) for indenter and other CM measurements (these samples can also be used for preparation of dumb-bell samples after ageing);
- longer sections of whole cable (typically 1 m to 2 m in length) for periodic electrical tests;
- whole cable (typically 3 m in length) for future DBE testing.

Alternatively, longer lengths of cable can be utilized in a deposit and short lengths cut off for elongation tests and other CM tests at intervals.

B.2 Typical testing schedule for a deposit

For a plant cable deposit, the testing schedule could take the following form:

- Samples are removed for CM measurements on each component type. Initially these CM tests should be non-destructive (e.g. indenter or other CM techniques, as appropriate to the component type) or require only small samples (e.g. OIT tests), to preserve the material in the deposit.

The amount of material available in a deposit is often very limited, it is therefore important to conserve material as much as possible in the early stages of its use.

- If the non-destructive or micro-sample tests indicate that degradation is starting to occur, samples for elongation at break tests should be removed and tested.
- The values of the CM parameters are compared with the baseline data for that component. If significant degradation has occurred, additional tests may be carried out e.g. a DBE test.

It is important that the CM measurements are carried out using the methods specifically recommended for ageing management programmes, e.g. see [8].

Bibliography

- [1] IAEA-TECDOC-932, *Pilot study on the management of ageing of instrumentation and control rod cables*, Results of a co-ordinated research programme 1993-1995, IAEA, Vienna, March 1997
- [2] AEAT-6577:2000, *Management of ageing of in-containment I&C cables: Final report of the phase II IAEA co-ordinated research programme*, ed. S.G. Burnay
- [3] IAEA-TECDOC-1188, *Assessment and management of ageing of major nuclear power plant important to safety: In-containment instrumentation and control cables*, IAEA, Vienna, December 2000
- [4] IAEA-NP-T-3.6, *Guidelines for qualification and ageing management of I&C cables in current and future nuclear power generating plant*, IAEA, Vienna, December 2010
- [5] IEEE Std 323, *Qualifying class 1E equipment for nuclear power generating stations*
- [6] IEEE 383-1974, *Standard for type test of class 1E electrical cables, field splices and connections for nuclear power generating station*
- [7] IEEE Std 383:2003, *Qualifying class 1E electric cables and field splices for nuclear power generating stations (replaces IEEE 282-1974)*
- [8] IEC/IEEE 62582 (all parts), *Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Electrical equipment condition monitoring methods*
- [9] GILLEN, K.T., CLOUGH, R.L., *Combined environment ageing effects: Radiation-thermal degradation of PVC and PE*, J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed., 19, 2041 (1981)
- [10] SEGUCHI, T., TAMURA, K., OHSHIMA, T., SHIMADA, A. & KUDOH, H. *Degradation mechanisms of cable insulation materials on radiation-thermal ageing in radiation environments*, Radiat. Phys. Chem. Vol. 80, pp.268 – 273, 2011
- [11] JNES-SS-0903, *Assessment of cable ageing for nuclear power plant*, July 2009
- [12] EPRI 1003317 (2002), *Cable system ageing management*, TOMAN, G.J.
- [13] EPRI-1003663 (2003), *Integrated cable system ageing management guidance*, G. TOMAN, G.J.
- [14] IEC 62465, *Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Management of ageing of electrical cable systems*
- [15] CELINA, M., GILLEN, K.T., WISE, J. and CLOUGH, R.L. *Anomalous Aging Phenomena in a Crosslinked Polyolefin Cable Insulation*, Radiat. Phys. Chem., 48, 613 (1996)
- [16] CELINA, M., GILLEN, K.T., WISE, J. and CLOUGH, R.L., *Inverse Temperature and Annealing Phenomena During Degradation of Crosslinked Polyolefins*, Polym. Degrad. Stabil., 61, 231 (1998)
- [17] BURNAY, S.G. & DAWSON, J., *Reverse temperature effect during radiation ageing of XLPE cable insulation material*, Proceedings of International Conference on "Ageing studies and lifetime extension of materials", 12-14 July 1999, St. Catherine's College, Oxford, UK, Kluwer/Plenum Press.
- [18] BURNAY, S.G., unpublished data (reproduced courtesy of Institute of Nuclear Safety Systems, Japan)
- [19] IEC 60544-4, *Electrical insulating materials – Determination of the effects of ionizing radiation – Part 4: Classification system for service in radiation environments*
- [20] IEC/TS 61244-3, *Determination of long-term radiation ageing in polymers – Part 3: Procedures for in-service monitoring of low-voltage cable materials*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	24
INTRODUCTION.....	26
1 Domaine d'application et objet.....	27
2 Références normatives.....	27
3 Termes et définitions	28
4 Contexte.....	28
4.1 Généralités.....	28
4.2 Oxydation limitée par diffusion (DLO)	28
4.3 Effets de débit de dose (DRE)	29
4.4 Vieillissement accéléré par rayonnement.....	29
4.5 Vieillissement thermique accéléré	30
5 Approches pour l'évaluation du vieillissement.....	30
6 Identification des composants importants	31
6.1 Généralités.....	31
6.2 Priorités pour la gestion du vieillissement.....	31
6.3 Surveillance de l'environnement	31
6.4 Environnement sévères localisés	32
6.5 Composants dans le cas le plus défavorable	32
7 Techniques de contrôle des conditions	32
7.1 Généralités.....	32
7.2 Établissement des courbes de corrélation pour les méthodes de CM.....	32
7.3 Méthodes de CM	33
7.4 Utilisation du CM pour le dépannage à court terme	33
7.5 Utilisation du CM pour l'évaluation de la dégradation à long terme	35
8 Modélisation prédictive	36
9 Dépôt d'échantillons	37
9.1 Généralités.....	37
9.2 Exigences d'un dépôt	37
9.3 Pré-vieillissement d'échantillons pour un dépôt	38
9.4 Installation d'un dépôt d'échantillons	38
9.5 Essais des échantillons provenant du dépôt	38
9.6 Détermination des intervalles d'échantillonnage	39
9.7 Matériaux vieillis en temps réel	39
Annexe A (informative) Exemple de courbe de corrélation de CM	41
Annexe B (informative) Utilisation d'un dépôt.....	42
Bibliographie.....	43
Figure 1 – Développement des données de vieillissement sur des modifications d'allongement à la rupture et indicateur de condition (par exemple, module « indenter ») – Courbe	34
Figure 2 – Courbe de corrélation dérivée des données de la Figure 1 – Courbe.....	35
Figure 3 – Estimation de l'allongement d'après une courbe de corrélation.....	36
Figure 4 – Modification de l'intervalle d'échantillonnage en fonction des valeurs de l'indicateur de CM.....	39

Figure A.1 – Courbe de corrélation pour module « indenter » par rapport à l'allongement à la rupture pour un matériau de gaine de câble en CSPE [18]	41
--	----

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX ISOLANTS ÉLECTRIQUES – DÉTERMINATION DES EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS –

Partie 5: Procédures pour l'estimation du vieillissement en service

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60544-5 a été établie par le comité d'études CE 112 de la CEI: Évaluation et qualification des systèmes et matériaux d'isolement électrique.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition, publiée en 2003, dont elle constitue une éditoriale révisée destinée à aligner ce document avec des normes récemment élaborées au sein du SC 45A, ainsi qu'avec d'autres parites de la série CEI 60544.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

CDV	Rapport de vote
112/171/CDV	112/191/RVC

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 60544, publiées sous le titre général *Matériaux isolantes électriques – Détermination des effets des rayonnements ionisants*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

Les matériaux organiques et polymères représentent une proportion significative des isolations utilisées dans des systèmes électriques. Ces matériaux sont sensibles aux effets d'irradiation et la réponse varie beaucoup entre différents types. Par conséquent, il importe d'être en mesure d'évaluer le degré de dégradation de ces matériaux isolants pendant leur durée de vie en service. La présente partie de la CEI 60544 fournit des procédures recommandées pour évaluer le vieillissement des matériaux isolants en service.

Il existe un certain nombre d'approches pour l'évaluation du vieillissement de composants à base de polymère exposés aux environnements sous rayonnement [1–4]¹. Elles sont fondées sur une meilleure compréhension des facteurs affectant la dégradation liée au vieillissement qui s'est développée au cours de plusieurs décennies. Dans une installation nucléaire, des programmes de qualification sont en règle générale utilisés pour la sélection des composants, y compris ceux à base de matériaux polymères. Ces procédures de qualification initiales, telles que l'IEEE-323 [5] et l'IEEE-383 [6], ont été écrites à l'origine avant de disposer d'une compréhension suffisante des mécanismes de vieillissement. La plupart des méthodes examinées dans la présente partie de la CEI 60544 sont, de ce fait, utilisées pour compléter le processus initial de qualification.

La présente partie est la cinquième d'une série traitant de l'effet du rayonnement ionisant sur les matériaux isolants.

La Partie 1 (Interaction des rayonnements et dosimétrie) constitue une introduction traitant très largement des problèmes liés à l'évaluation des effets de rayonnement. Elle fournit également des lignes directrices pour la terminologie de la dosimétrie, plusieurs méthodes de détermination de l'exposition et de dose absorbée, et des méthodes de calcul de dose absorbée dans tout matériau spécifique à partir de la méthode de dosimétrie appliquée.

La Partie 2 (Méthodes d'irradiation et d'essai) décrit des méthodes pour le maintien de sept différents types de conditions d'exposition pendant l'irradiation. Elle spécifie également les contrôles qu'il convient de maintenir sur ces conditions de telle manière que lorsque les résultats d'essai sont présentés dans un rapport, des comparaisons fiables de performance de matériaux puissent être établies. D'ailleurs, elle définit certaines conditions importantes d'irradiation et des méthodes d'essai à utiliser en vue de déterminations de changement de propriétés et des critères correspondants de point limite.

La Partie 3 a été incorporée dans la deuxième édition de la CEI 60544-2.

La Partie 4 (Système de classification pour l'utilisation dans un environnement sous rayonnement) fournit un système de classification recommandé pour établir des catégories de tenue au rayonnement des matériaux d'isolation.

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la bibliographie.

MATÉRIAUX ISOLANTS ÉLECTRIQUES – DÉTERMINATION DES EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS –

Partie 5: Procédures pour l'estimation du vieillissement en service

1 Domaine d'application et objet

Le présent partie de la CEI 60544 couvre les méthodes d'évaluation du vieillissement pouvant être appliquées aux composants à base de matériaux polymères (par exemple, des gaines et isolations de câble, des joints en élastomère, des revêtements polymères, des gaines) qui sont utilisés dans des environnements où ils sont exposés aux rayonnements.

L'objet de la présente norme est destiné à fournir des méthodes d'évaluation du vieillissement en service. Les approches examinées dans les articles qui suivent couvrent les programmes d'évaluation de vieillissement fondés sur le contrôle des conditions (CM), l'utilisation de dépôt d'échantillons dans des environnements sévères et l'échantillonnage de composants vieillis en temps réel.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60544-1, *Matériaux isolants électriques – Détermination des effets des rayonnements ionisants – Partie 1: Interaction des rayonnements et dosimétrie*

CEI 60544-2, *Guide pour la détermination des effets des rayonnements ionisants sur les matériaux isolants – Deuxième partie: Méthodes d'irradiation et d'essai*

CEI 61244-1, *Détermination du vieillissement à long terme sous rayonnement dans les polymères – Partie 1: Techniques pour contrôler l'oxydation limitée par diffusion*

CEI 61244-2, *Détermination du vieillissement à long terme sous rayonnement dans les polymères – Partie 2: Méthodes pour prédire le vieillissement à faible débit de dose*

CEI 60780, *Centrales nucléaires – Équipements électriques de sûreté – Qualification*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les abréviations suivantes, tirées de la CEI 60780, s'appliquent.

BWR	Réacteur à eau bouillante
CBQ	Qualification basée sur les conditions
CM	Contrôle des conditions
CSPE	Polyéthylène chlorosulfoné
DBE	Événement de base de la conception
DLO	Oxydation limitée par diffusion
DRE	Effets de débit de dose
DSC	Calorimétrie à balayage différentiel
EPR	Caoutchouc éthylène-propylène
EQ	Qualification environnementale
EVA	Copolymère à base d'éthylène-acétate de vinyle
IM	Module « indenter
LOCA	Accident de perte de réfrigérant
NPP	Centrale nucléaire
OIT	Temps d'induction à l'oxydation
OITP	Température d'induction à l'oxydation
PE	Polyéthylène
PVC	Polychlorure de vinyle
PWR	Réacteurs à eau sous pression
TGA	Analyse thermogravimétrique
VVER	Réacteur ralenti à l'eau et refroidi par eau (type de réacteur à eau sous pression mis au point par la Russie)
XLPE	Polyéthylène réticulé

4 Contexte

4.1 Généralités

Il existe un certain nombre de facteurs qu'il est nécessaire de prendre en considération lors de l'évaluation du vieillissement des composants polymères dans un environnement sous rayonnement. Dans les articles suivants, certains de ces facteurs sont brièvement examinés et il est fait référence à des informations plus détaillées.

Pour accélérer les conditions de vieillissement sous rayonnement, l'approche normale est d'augmenter le débit de dose de rayonnement, souvent combiné à une augmentation de la température. Les deux conséquences potentielles les plus importantes provenant de telles augmentations concernent l'oxydation limitée par diffusion, qui est décrite en 4.2, et les effets de débit de dose chimique (DRE), qui sont décrits en 4.3. Les conséquences de ces facteurs sur l'utilisation et l'interprétation des techniques de contrôle des conditions (CM) sont également examinées. Les programmes de vieillissement accéléré sont évoqués brièvement en 4.4 et 4.5.

4.2 Oxydation limitée par diffusion (DLO)

Lorsque des polymères sont exposés à un environnement contenant de l'oxygène (par exemple, de l'air), une certaine quantité d'oxygène se dissout dans le matériau. En l'absence

de réactions consommant de l'oxygène (oxydation), la quantité d'oxygène dissout est proportionnelle à la pression partielle d'oxygène à la surface du polymère (bien connu par la Loi de Henry). Le vieillissement conduit à des réactions d'oxydation dans le polymère, dont la vitesse augmente significativement alors que le débit de dose et la température du vieillissement sont augmentés. Si la vitesse de consommation d'oxygène dissout dans le polymère est plus rapide que la vitesse à laquelle l'oxygène peut être réapprovisionné par diffusion provenant de l'atmosphère ambiante, la concentration d'oxygène dissout dans les régions intérieures diminue avec le temps (la concentration en oxygène à la surface d'échantillon demeure à sa valeur d'équilibre). La diminution de la concentration en oxygène interne peut conduire à une oxydation réduite ou négligeable, qui est désignée sous le nom d'oxydation limitée par diffusion.

L'importance de cet effet dépend de l'épaisseur de l'échantillon (les échantillons plus minces donnant des effets de DLO plus petits) et du rapport de la vitesse de consommation en oxygène au coefficient P de perméabilité à l'oxygène, qui est le produit de la diffusion d'oxygène et des paramètres de solubilité. Les conditions de vieillissement accéléré sous rayonnement concernent des augmentations de débits de dose, ce qui augmente le débit de consommation d'oxygène. Si la température demeure constante alors que le débit de dose est augmenté, le coefficient de perméabilité à l'oxygène est inchangé. Ceci signifie que les effets de DLO deviennent plus importants lorsqu'on augmente le débit de dose. Ces effets sont décrits de façon plus approfondie dans la CEI 61244-1.

Il peut être nécessaire de prendre en considération les effets de DLO lors de l'exécution des essais de CM. Ce n'est pas un problème pour de nombreuses techniques CM qui mesurent les propriétés à la température ambiante, telles que celles fondées sur les mesures de densité et de module. D'autre part, plusieurs techniques CM telles que le temps d'induction à l'oxydation (OIT) et l'analyse thermogravimétrique (TGA) utilisent des températures plutôt élevées au cours des mesures. Pour ces techniques, il est tout à fait possible de voir des effets de DLO présents pendant la mesure du paramètre de CM. Pour cette raison, des méthodes d'essai détaillées pour le CM ont été élaborées [8] pour s'assurer que la préparation des échantillons et la procédure d'essai évitent les effets de la DLO. La DLO doit être abordée en développant les courbes de corrélation pour les méthodes de CM, pour s'assurer que des données représentatives sont obtenues tant pour le vieillissement sous rayonnement que pour le vieillissement thermique.

4.3 Effets de débit de dose (DRE)

Les effets du débit de dose de rayonnement et des méthodes pour traiter ces effets sont décrits dans la CEI 61244-2. Généralement, les DRE sont séparés en deux types. Le premier type, qui est usuellement observé dans des expériences de vieillissement accéléré par rayonnement, est dû aux effets de DLO décrits en 4.2. Ces effets fondés sur la DLO représentent un DRE physique, dépendant de la géométrie.

Le second type, intéressant pour la présente explication, concerne le DRE chimique. De tels DRE à base chimique sont bien moins communs. On trouve un cas documenté de DRE chimique dans les matériaux en polyéthylène basse densité et PVC (Polychlorure de vinyle), causé par la lente rupture de l'espèce intermédiaire hydroperoxyde provenant de la réaction d'oxydation [10]. L'existence de ce DRE chimique doit être vérifiée au début de tout programme de vieillissement accéléré.

4.4 Vieillissement accéléré par rayonnement

Des programmes de vieillissement accéléré en laboratoire ont tendance à utiliser des facteurs d'accélération bien inférieurs à ceux que l'on utilise normalement dans la qualification d'équipement. Cela peut éviter certains problèmes associés à la DLO et au DRE. Le vieillissement obtenu peut alors être une meilleure simulation du vieillissement à long terme qui a lieu dans des conditions de service. Les données obtenues dans les essais de vieillissement accéléré peuvent être utilisées avec des modèles prédictifs permettant d'évaluer le comportement des matériaux dans les conditions de service.

Les programmes de vieillissement accéléré exigent une matrice de données d'essai, à produire sur une gamme de conditions environnementales, comme le décrit la CEI 61244-2. Au minimum, des données sont nécessaires pour au moins trois différents débits de dose à la température de fonctionnement normal, mais des données supplémentaires sur le vieillissement thermique et le vieillissement sous rayonnement à température élevée permet de faire un meilleur usage des méthodes de modélisation prédictive disponibles. Il convient de sélectionner les débits de dose et les températures utilisés pour le vieillissement accéléré en utilisant les principes décrits dans la CEI 60544-2 pour assurer une oxydation homogène. Pour chaque condition environnementale utilisée, des données d'essai doivent être obtenues à différentes périodes de vieillissement, dont il convient que la plus longue soit suffisante pour obtenir une dégradation significative. La réalisation d'un programme d'essai type pourrait prendre plus de 18 mois, en fonction de la tenue au rayonnement des matériaux en essai.

Les données requises dans la matrice d'essai sont déterminées par le type de composant évalué. Les paramètres d'essai appropriés sont fournis dans la CEI 60544-2 pour divers types de matériaux polymères.

4.5 Vieillissement thermique accéléré

Lorsqu'on effectue un vieillissement thermique au sein d'un programme de vieillissement accéléré, il est important d'utiliser une valeur appropriée de l'énergie d'activation pour évaluer la température et l'échelle de temps de l'essai accéléré. Dans certains matériaux, le mécanisme de vieillissement aux hautes températures est différent de celui qui se produirait dans des conditions sur site et dans un grand nombre de matériaux, l'énergie d'activation diminue de manière significative aux températures inférieures [10,11].

Avant d'effectuer les essais de CM, on doit laisser se stabiliser les échantillons ayant été exposés à un vieillissement thermique accéléré. Certains matériaux polymères sont hygroscopiques et montrent une dépendance marquée de leurs propriétés à la teneur en humidité [8]. Ceci est principalement un souci pour quelques matériaux utilisés dans les anciennes installations nucléaires, mais peut également être important pour les méthodes de CM sensibles à la teneur en humidité du matériau.

5 Approches pour l'évaluation du vieillissement

Il existe un certain nombre de méthodes complémentaires disponibles pour l'évaluation du vieillissement et décrites dans des articles respectifs. Chacune de ces méthodes possède ses propres avantages et limites. La sélection d'une ou plusieurs des méthodes dépend des exigences des utilisateurs individuels.

Plusieurs approches pour l'évaluation du vieillissement en service sont décrites dans la présente norme. Il s'agit:

- de l'identification des composants importants pour la priorité de l'application des programmes de gestion de vieillissement (voir Article 6)
- du contrôle des conditions pour évaluer l'état de matériaux ayant été vieillis pendant des durées prolongées dans des environnements d'utilisation réels (voir Article 7);
- de la modélisation prédictive pour utiliser les données de programmes de vieillissement accélérés de laboratoire, pour estimer le vieillissement dans des conditions de vieillissement en temps réel (voir Article 8);
- du dépôt d'échantillons fournissant des échantillons pour la mesure du vieillissement dans des conditions de vieillissement en temps réel (voir Article 9).

6 Identification des composants importants

6.1 Généralités

Dans une centrale nucléaire, il existe un grand nombre de composants contenant des matériaux isolants polymères, il y a par exemple plus de 1 000 km de câbles électriques dans une NPP (centrale nucléaire) type. Il n'est pas possible d'évaluer le vieillissement de chacun des composants et un grand nombre d'entre eux ne sont pas exposés à des conditions significatives de vieillissement lié à l'environnement. Il est donc nécessaire d'affecter une priorité à tout programme de gestion de vieillissement en identifiant les composants qui sont les plus importants.

6.2 Priorités pour la gestion du vieillissement

Tous les composants n'ont pas la même priorité pour la gestion du vieillissement. En général, les composants impliqués dans des fonctions de sécurité pendant et à la suite d'un accident sont les plus importants, ainsi que ceux qui sont importants pour la poursuite de l'exploitation. On assigne une priorité basse à tous les composants qui n'entrent pas dans ces catégories, pour les activités de gestion de vieillissement.

L'environnement de fonctionnement normal des composants doit être examiné pour identifier l'impact attendu de l'environnement sur leur vieillissement. La plus haute priorité est assignée aux composants identifiés comme étant sujets à un vieillissement important, tandis qu'une priorité moyenne est assignée aux composants sujets à un vieillissement modéré.

Pour effectuer cette affectation de priorité de manière efficace, une surveillance de l'environnement est essentielle (voir 6.2), combinée à une connaissance du comportement de vieillissement des composants. Une évaluation initiale peut utiliser les calculs de conception pour les températures et les débits de dose. Les informations de vieillissement peuvent provenir de données de qualification de matériel ou d'essais de vieillissement accéléré supplémentaires exécutés en laboratoire.

6.3 Surveillance de l'environnement

Le vieillissement des matériaux isolants dans une NPP est dominé par la température, la dose de rayonnement et le débit de dose de rayonnement pour les matériaux organiques et polymères. Une exigence essentielle pour la gestion du vieillissement est une connaissance détaillée des températures et des débits de dose réels aux emplacements où sont situés les composants de haute priorité dans l'installation.

La distribution de température et de débit de dose dans l'installation doit être obtenue en utilisant des enregistreurs de température et des dosimètres. Les fluctuations d'exploitation et les variations saisonnières doivent être incluses en exécutant ces mesures sur plusieurs cycles de carburant. Il peut s'avérer nécessaire de répéter ces mesures lorsque des modifications sont apportées à l'installation, par exemple des changements de niveau de puissance.

Des petits enregistreurs de température autonomes sont disponibles et constituent une méthode pratique et souple pour l'enregistrement de températures localisées pour compléter l'appareillage encombrant de surveillance de la température, qui est déjà installé dans l'installation.

On obtient une meilleure surveillance du rayonnement avec des dosimètres à alanine, qui sont adaptés à des mesures à long terme. Ces dosimètres ne sont pas significativement affectés par la température, ils peuvent être étanchéifiés pour éviter l'influence de l'humidité et ils conviennent pour effectuer une surveillance sur une large gamme de doses. Les radicaux formés lors d'une irradiation dans l'alanine sont stables pendant des durées dépassant un an et ils peuvent être mesurés en utilisant la résonance paramagnétique électronique (CEI 60544-1).

6.4 Environnement sévères localisés

L'identification des environnements sévères localisés (points chauds) où sont situés des composants de haute priorité est un aspect important de l'évaluation du vieillissement. Ces emplacements peuvent être identifiés d'un certain nombre de façons, incluant des entretiens avec le personnel de l'installation, des revues opérationnelles, des revues de plans d'implantation de l'installation et des explorations de l'installation [11,12]. Chacune fournira une perspective différente des conditions des points chauds. Le retour de la part du personnel de maintenance de l'installation est un aspect important pour l'identification des signes précoces de dégradation.

6.5 Composants dans le cas le plus défavorable

Ayant affecté une priorité aux composants les plus susceptibles d'être affectés par le vieillissement, effectué une surveillance de l'environnement et identifié des environnements sévères localisés, une priorité haute, moyenne ou basse sera assignée aux composants pour la gestion ultérieure du vieillissement. Tous les composants auxquels est assignée une priorité haute doivent faire l'objet d'activités de gestion de vieillissement telles que CM ou remplacement planifié.

Le processus d'évaluation peut être amélioré à mesure qu'un plus grand nombre d'informations deviennent disponible. Si par exemple un CM de câbles de haute priorité indique qu'une dégradation est beaucoup plus sévère que ce qui est attendu, il peut s'avérer approprié de mettre ces composants dans une catégorie de priorité inférieure.

7 Techniques de contrôle des conditions

7.1 Généralités

Des techniques de CM sont utilisées pour évaluer la condition des matériaux ayant vieilli durant des périodes de temps prolongées dans des environnements d'utilisation réelle, comme dans des centrales nucléaires, des accélérateurs, des installations de retraitement, etc. L'approche fait usage de méthodes d'essai qui ont démontré une bonne corrélation avec la dégradation sous vieillissement.

Le CM dans l'évaluation du vieillissement peut être utilisé de diverses façons, allant de la résolution des difficultés à court terme aux programmes de qualification permanents à long terme.

7.2 Établissement des courbes de corrélation pour les méthodes de CM

Afin d'utiliser efficacement les méthodes de CM, il est important de développer des courbes de corrélation entre le paramètre de contrôle mesuré et l'indicateur principal de dégradation ou de fonctionnalité. Pour des matériaux de câbles polymères, l'indicateur principal de dégradation est généralement considéré comme un allongement à la rupture, étant donné que, en général, les modifications des propriétés électriques sont petites avant une défaillance physique du câble. Dans les matériaux de joints, le jeu de compression s'est avéré être un indicateur utile de la dégradation des propriétés d'étanchéité introduite par le vieillissement. Des paramètres de dégradation adaptés pour d'autres composants sont fournis dans la CEI 60544-2.

Les courbes de corrélation doivent être déterminées à partir des mesures de l'indicateur principal et du paramètre de CM correspondant pour des échantillons vieillis dans des conditions identiques, illustrées sous forme d'une courbe en Figure 1. Les mesures doivent couvrir une gamme de niveaux de dégradation, allant de l'état non vieilli à un état de dégradation sévère. Il est recommandé que cinq jeux de données au moins à des périodes de vieillissement différentes soient utilisés en établissant la courbe de corrélation (Figure 2), de préférence pour plusieurs températures et débits de dose de rayonnement différents. Un

exemple de courbe de corrélation pour le matériau d'une gaine de câble en CSPE (Polyéthylène chlorosulfoné) est donné à l'Annexe A.

Les courbes de corrélation sont normalement établies au moyen d'essais accélérés. Ces essais doivent être effectués en utilisant les procédures décrites dans la CEI 60544-2. En variante, des courbes de corrélation peuvent être établies dans le cadre de la procédure de dépôt d'échantillons en vue de l'évaluation du vieillissement, ainsi que le décrit l'Article 9, ou en tant que partie du processus de qualification initial de l'appareillage.

7.3 Méthodes de CM

Une large gamme de méthodes ont été évaluées pour le CM des composants polymères, en particulier pour les matériaux de câble [4]. Parmi les nombreuses méthodes examinées, plusieurs ont été identifiées comme potentiellement adaptées à une utilisation pratique. Les normes de mesures pour les plus élaborées de ces méthodes sont décrites en détail dans les diverses parties de la CEI 62582 [8]. Pour ces méthodes, des données permettant la corrélation du paramètre de contrôle avec la dégradation du composant polymère ont été accumulées et les limites pratiques ont été explorées. Les méthodes les plus développées sont

- module « indenter »,
- temps d'induction à l'oxydation (OIT) et température d'induction à l'oxydation (OITP),
- allongement à la rupture

NOTE Un grand nombre d'autres méthodes ont été étudiées pour le CM et on s'attend à ce que des normes de mesures appropriées pour certaines d'entre elles soient élaborées dans les prochaines années. Un grand nombre d'entre elles sont décrites dans le document de l'AIEA-NP-T-3.6 [4].

Une inspection visuelle (incluant une inspection tactile et par d'autres sens) est une méthode de contrôle qualitative pouvant être un outil précieux pour évaluer une dégradation localisée due au vieillissement dans une centrale nucléaire en utilisant une exploration. Les considérations pratiques pour les inspections visuelles dans l'installation (explorations) sont décrites plus en [11,12].

Des méthodes électriques pour évaluer la dégradation des systèmes de câbles et de leurs dispositifs d'extrémité associés sont décrites dans la CEI 62465 [14]. Ces méthodes concernent principalement les systèmes de câbles (connecteurs, pénétrations, etc.) plutôt que la dégradation des matériaux isolants.

7.4 Utilisation du CM pour le dépannage à court terme

Dans les essais à court terme, l'objet principal du CM est l'identification de l'étendue d'un problème ou bien la démonstration de la non-existence d'un problème. Par exemple, l'« indenter » a été utilisé pour déterminer l'étendue des dommages subis par des câbles du fait d'une dégradation provenant d'une isolation thermique endommagée sur une conduite de vapeur près d'un chemin de câble, dans une centrale nucléaire BWR. En effectuant des mesures « indenter » le long de ce câble, on a obtenu un profil de la zone endommagée. Ceci a permis le remplacement d'une section limitée de câble plutôt que de remplacer le chemin de câble tout entier.

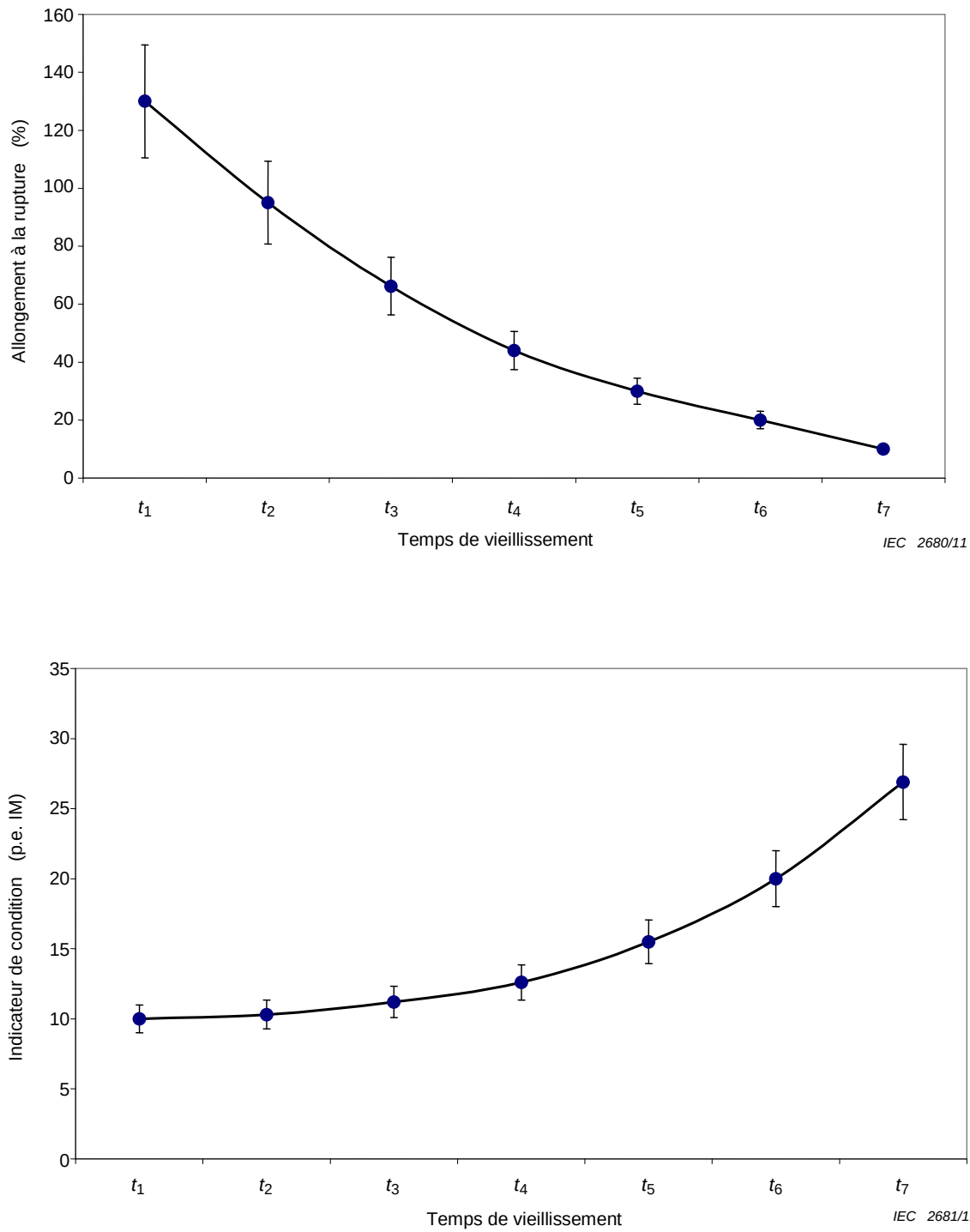


Figure 1 – Développement des données de vieillissement sur des modifications d'allongement à la rupture et indicateur de condition (par exemple, module « indenter ») – Courbe

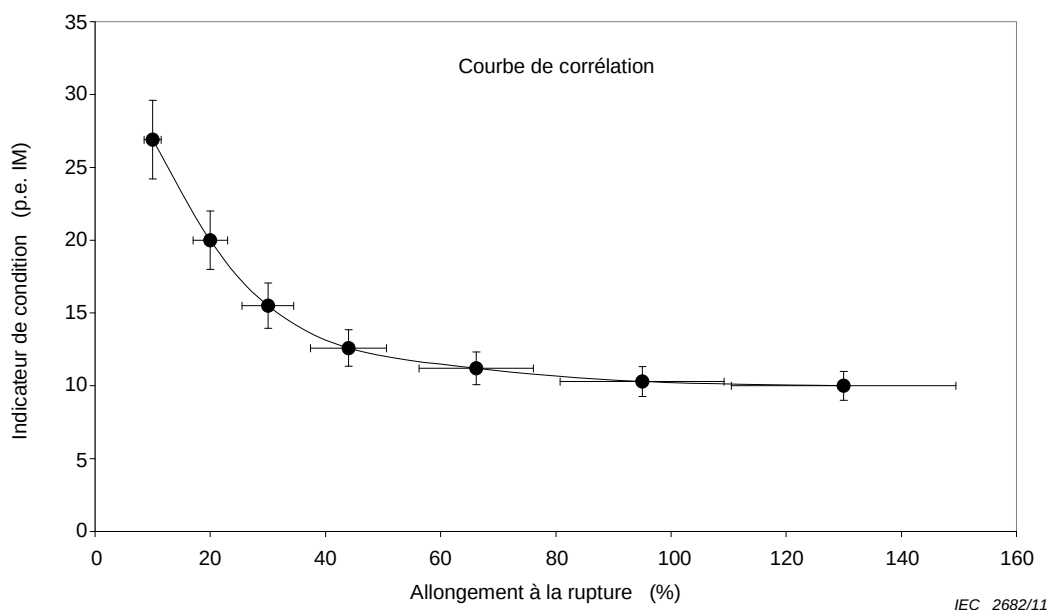


Figure 2 – Courbe de corrélation dérivée des données de la Figure 1 – Courbe

Dans certains cas, l'utilisation de critères de conception (par exemple, le calcul d'auto-échauffement du câble de puissance à partir de la charge de courant) peut être très prudente, en indiquant qu'on s'attend à ce que l'isolation présente généralement une dégradation significative. Des vérifications sur le composant utilisant des méthodes de CM peuvent être utilisées pour démontrer que les matériaux n'ont pas été dégradés au niveau de prédiction, et pour éviter un remplacement superflu. Ceci est particulièrement important lorsqu'une durée de vie qualifiée courte a été déterminée pendant l'EQ (Qualification environnementale).

7.5 Utilisation du CM pour l'évaluation de la dégradation à long terme

Les méthodes de CM peuvent également être utilisées dans des programmes d'essai permanents qui peuvent couvrir la durée de vie de l'installation. Les utilisations types des méthodes de CM dans de tels programmes sont

- l'orientation des conditions des composants par rapport à une condition qualifiée déterminée pendant les méthodes d'EQ initiales,
- la comparaison des données de CM avec le modèle de prédiction, fondée sur des données de vieillissement accéléré dans le laboratoire et une connaissance des conditions environnementales rencontrées par le composant,
- le contrôle des composants dans un dépôt d'échantillons situé dans un environnement sévère de l'installation (ceci est utilisé le plus fréquemment pour des câbles et des petits composants électriques).

La Figure 3 illustre la façon dont l'allongement à la rupture peut être estimé à partir d'un paramètre de CM tel que le module d'indenter.

La qualification basée sur les conditions (CBQ) devient la méthode recommandée pour la qualification d'un appareillage pour les nouvelles NPP [12,13]. Pour utiliser cette approche de l'EQ, des techniques de CM doivent être appliquées pendant la phase de qualification de pré-vieillessement pour déterminer la forme de la courbe de vieillissement et la valeur limite des paramètres de CM pour laquelle le composant peut survivre à un DBE (Événement de base par conception), c'est-à-dire la condition qualifiée. Faire tendre la condition du composant par rapport à cette condition qualifiée est une partie essentielle de la CBQ.

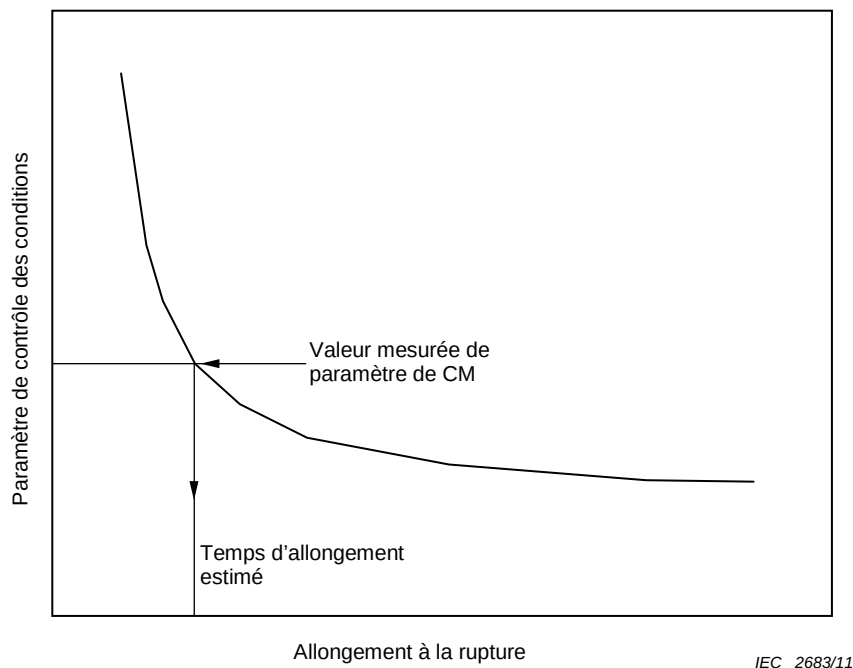


Figure 3 – Estimation de l'allongement d'après une courbe de corrélation

8 Modélisation prédictive

Les données obtenues pendant les essais de vieillissement accéléré en laboratoire peuvent être utilisées pour générer des paramètres de modèle pour les modèles de vieillissement prédictif, tels que ceux qui sont décrits dans le CEI 61244-2. Ces modèles peuvent être utilisés pour prédire la dégradation de matériaux spécifiques dans diverses conditions de température et de débit de dose de rayonnement de vieillissement. En utilisant les données obtenues par le contrôle de l'environnement des températures réelles et des débits de dose dans le CN, la dégradation à laquelle on s'attend dans un vieillissement en temps réel peut être évaluée.

On peut également utiliser cette approche pour estimer l'effet des modifications des conditions d'environnement, par exemple une augmentation à court terme de la température provenant de dommages de l'isolation thermique sur un tuyau de vapeur proche.

Les essais de vieillissement accéléré détaillés requis pour obtenir les paramètres de modèle doivent très probablement être exécutés sur les matériaux utilisés dans les nouvelles installations. L'utilisation de ces modèles combinée avec des données de conception des conditions d'environnement peut être utilisée pendant la phase de conception d'une nouvelle installation pour identifier les zones de problèmes potentiels lorsqu'une relocalisation de l'appareillage est appropriée, par exemple un nouvel acheminement de chemin de câble pour éviter un point chaud localisé.

Trois modèles prédictifs faisant usage d'une matrice de données de vieillissement accéléré sont décrits en détail dans la CEI 61244-2, ainsi que les limitations et les exigences des données pour l'utilisation de ces modèles:

- un modèle de loi en puissance qui s'est révélé utile pour les matériaux exposés à des environnements de rayonnement où le vieillissement thermique est négligeable;
- un modèle de superposition en fonction du temps, qui peut modéliser un vieillissement combiné thermique et par rayonnement pour les matériaux ayant un mécanisme de vieillissement dominant unique;

- un modèle de superposition dépendant de la dose qui est particulièrement utile dans la plage de vieillissement de rayonnement de débit de dose faible où le vieillissement thermique est important et pour les matériaux ayant un comportement de vieillissement complexe.

9 Dépôt d'échantillons

9.1 Généralités

L'essai des matériaux provenant d'un dépôt d'échantillons dans l'installation constitue une variante pour l'approche de l'évaluation du vieillissement en service. On utilise ainsi des échantillons installés spécifiquement dans l'installation pour des essais destructifs et/ou de CM dans le cadre d'un programme de gestion du vieillissement.

L'évaluation des propriétés à long terme des composants au moyen d'un dépôt d'échantillons revêt des avantages par rapport aux programmes de vieillissement accélérés. Son utilisation implique que les composants vieillissent dans des conditions réelles d'installation mais peuvent, néanmoins, être vérifiés et contrôlés sans empêcher le fonctionnement de l'installation. De telles consignations sont souvent installées dans une zone de l'installation dont l'environnement est relativement sévère comparé à la plupart des autres zones où de tels matériaux sont utilisés. Dans ce cas, l'échantillon dans le dépôt vieillira plus rapidement et, de ce fait, connaîtra un temps d'attente sur la masse du matériau dans l'installation.

La plupart des dépôts sont essentiellement utilisés pour l'évaluation des câbles et de petits composants électriques et sont principalement montés dans une installation qui fonctionne depuis moins de 5 ans. Toutefois, un dépôt peut également être utilisé dans une installation plus ancienne, à condition que les échantillons aient été vieillis au préalable en utilisant un vieillissement accéléré avant installation dans le dépôt. Les échantillons dans les dépôts sont particulièrement utiles pour les programmes de qualification en cours.

9.2 Exigences d'un dépôt

La condition préalable principale pour la mise en œuvre d'un dépôt d'échantillons est une bonne connaissance de la dose de rayonnement et de la répartition de température à l'emplacement de la consignation et aux emplacements dans l'usine où le matériau en essai est utilisé de façon courante.

La surveillance de l'environnement peut être utilisée pour sélectionner une position dans l'installation qui est exposée à une dose supérieure à la plupart des positions réelles. Il peut même être possible de trouver un emplacement où la température est également similaire à la température de conception maximale. L'expérience a démontré que la ligne en boucle entre la cuve sous pression de réacteur et le générateur de vapeur est adaptée à cet objet dans les réacteurs à eau sous pression (PWR) et le système de nettoyage à eau de réacteur dans les réacteurs à eau bouillante (BWR). Dans les réacteurs de type VVER (réacteur ralenti à l'eau et refroidi par eau), le tuyau de circulation principal, que ce soit un tronçon chaud ou froid, est également un emplacement approprié pour un dépôt.

En sélectionnant une position pour la consignation, on doit veiller à ce que les conditions d'environnement à la consignation produisent une dégradation qui simule les conditions réelles. En particulier, on doit veiller à exposer les composants à base de XLPE (polyéthylène réticulé) et EPR (caoutchouc éthylène-propylène) au vieillissement sous rayonnement à température élevée si leur utilisation normale est faite à des températures plus faibles. Ces matériaux peuvent présenter un effet de température inverse [15,16,17], avec une dégradation ayant lieu plus rapidement à des températures inférieures. Pour certains matériaux de XLPE, la consignation doit être à la température ambiante la plus faible normalement rencontrée lors d'exploitations de l'installation.

9.3 Pré-vieillessement d'échantillons pour un dépôt

Lorsqu'un dépôt est mis en place dans une NPP ayant été en exploitation pendant plus de 5 ans, il est nécessaire d'effectuer un pré-vieillessement des échantillons à placer dans le dépôt à un niveau équivalent à l'âge réel de l'installation. Le vieillissement accéléré utilisé pour le pré-vieillessement des échantillons doit utiliser de faibles facteurs d'accélération. La température et le débit de dose simulés doivent être basés sur les valeurs réelles dans l'installation, telles qu'elles sont déterminées à partir de la surveillance de l'environnement (voir 6.3).

9.4 Installation d'un dépôt d'échantillons

La consignation doit être disposée de telle manière que les échantillons soient exposés à un champ de rayonnement raisonnablement uniforme (par exemple, si la ligne en boucle dans un PWR est utilisée comme la source de rayonnement, ils doivent être maintenus à distance constante de la boucle). Il peut être aisé de le réaliser en utilisant des chemins de câble sanglés à la circonférence de la ligne en boucle. La conception spécifique de la consignation peut être aisément adaptée aux conditions locales de l'installation. Des échantillons doivent être placés dans une simple couche pour éviter l'autoprotection.

La consignation nécessite d'être équipée d'une sélection représentative des matériaux (par exemple, des échantillons de câble, des petits composants électriques) utilisés dans des environnements sous rayonnement. Le nombre et le type d'échantillons exigés doivent être suffisants pour s'assurer qu'un matériau en quantité suffisante sera disponible pour le retrait programmé d'échantillons sur la période requise pouvant atteindre 60 ans (concernant une consignation dans une nouvelle installation). Il est prudent d'inclure des échantillons supplémentaires pour de futures améliorations des méthodes de CM. L'Annexe B illustre le type d'échantillons habituellement inclus dans un dépôt.

En évaluant le nombre et le type d'échantillons requis, il est nécessaire d'établir les intervalles auxquels les échantillons doivent être enlevés et les essais prévus qui doivent être réalisés. Par exemple, pour des câbles, des échantillons d'environ 0,3 m à 0,5 m de longueur sont tout à fait satisfaisants pour des mesures de l'allongement à la rupture. La plupart des méthodes de CM actuellement disponibles sont non destructives ou ne nécessitent que de petites quantités de matériaux; les électriques nécessitent toutefois de plus grandes longueurs. Si des échantillons sont requis pour un essai de DBE avec des mesures électriques, une longueur minimale de 3 m est requise. Tous les échantillons de câbles complets inclus dans un dépôt doivent avoir leurs extrémités obturées.

Le dépôt doit être équipé de dosimètres pour enregistrer le profil de la dose de rayonnement à l'intérieur de la consignation et un contrôle de la température est également requis. Le contrôle d'environnement doit être poursuivi pendant au moins deux ans pour obtenir une image représentative des conditions d'environnement à long terme dans le dépôt. On doit veiller à ce qu'il existe un courant d'air libre dans la consignation. Une protection adaptée contre la contamination est souhaitable mais ne doit pas restreindre l'accès de l'air.

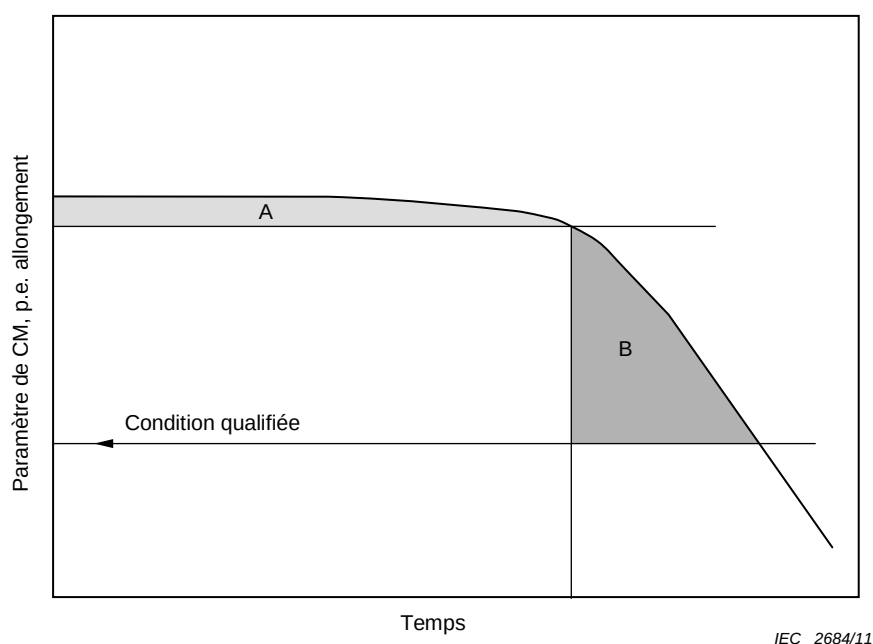
9.5 Essais des échantillons provenant du dépôt

Initialement, les données de base pour tous les matériaux installés dans le dépôt doivent être déterminées en utilisant un matériau non vieilli. Ces données de base doivent utiliser tous les essais de CM qui seront utilisés sur les matériaux dans le dépôt.

A intervalles réguliers, des échantillons seront enlevés en vue d'essais destructifs, (par exemple, des mesures d'allongement à la rupture) ou soumis aux essais de CM. Les intervalles d'essai sont généralement limités par l'accessibilité du dépôt d'échantillons. Dans la plupart des installations, le dépôt est uniquement disponible à l'accès lorsque l'installation est fermée. Le type de programme d'essai requis est illustré à l'Annexe B.

9.6 Détermination des intervalles d'échantillonnage

Pour les types de câble couramment utilisés, il est raisonnable d'enlever les premiers échantillons du dépôt 5 ans après le début de l'exploitation de l'installation, étant donné que les essais de type et de qualification qui ont déjà été réalisés fournissent un intervalle de confiance acceptable pour cette période au moins. L'intervalle recommandé entre les essais pour un dépôt dans une nouvelle installation est de 5 à 8 ans. On doit diminuer cet intervalle si les matériaux présentent des signes de dégradation plus rapide que ce qui est attendu. Lorsqu'on commence à observer une dégradation, l'intervalle d'échantillonnage doit être réduit, comme indiqué à la Figure 4. Un intervalle d'échantillonnage révisé de 1 à 2 ans est alors recommandé. Les limites précises des zones A et B illustrées schématiquement à la Figure 4 doivent être définies par la courbe de dégradation pour le matériau spécifique et par la condition qualifiée pour ce matériau.



NOTE Dans la zone A, des échantillons sont prélevés par intervalles de 5 à 8 ans; dans la zone B, on diminue les intervalles à 1 à 2 ans.

Figure 4 – Modification de l'intervalle d'échantillonnage en fonction des valeurs de l'indicateur de CM

9.7 Matériaux vieilliss en temps réel

La méthode de dépôt est principalement adaptée aux nouvelles installations où des échantillons non vieilliss sont facilement disponibles pour les types de matériaux destinés à être inclus dans le dépôt. Pour les installations plus anciennes, lorsque des échantillons non vieilliss ne sont pas disponibles pour être utilisés dans un dépôt, une alternative consiste à évaluer le comportement réel en vieillissement à long terme en retirant les échantillons de l'installation. Les inconvénients de cette méthode d'échantillonnage résident dans le fait qu'elle constitue une intervention dans l'installation et que les échantillons doivent être remplacés au moyen de matériaux qualifiés de façon appropriée. Cependant, il peut être nécessaire d'utiliser cette méthode si, pour des raisons spéciales, les résultats validés doivent être disponibles dans un délai réduit (par exemple, pour des installations plus anciennes où il n'existe pas d'EQ).

S'il existe des données disponibles sur des conditions environnementales à l'intérieur de l'installation, une position peut être sélectionnée où le matériau a été exposé aux conditions les plus défavorables. Pour les matériaux de câble, de telles positions sont habituellement à proximité des lignes en boucle (PWR) ou dans le système de nettoyage à eau de réacteur (BWR). Les échantillons de câble des positions réelles sont normalement irradiés de façon

plutôt non homogène, par exemple un chemin de câble convergeant sur une ligne en boucle. Avant d'enlever l'échantillon de câble, on doit déterminer la répartition de dose et l'emplacement du câble clairement identifié d'une manière reproductible pour permettre une interprétation correcte des résultats d'essai.

Des méthodes de CM qui ne sont pas destructives ou qui utilisent seulement des microéchantillons peuvent être utilisées pour évaluer la dégradation de vieillissement lorsque le retrait d'échantillons pour essai destructif n'est pas réalisable. Des données de référence sont toujours requises.

Annexe A (informative)

Exemple de courbe de corrélation de CM

A titre d'exemple, une courbe de corrélation sur la Figure A.1 pour un matériau de câble en CSPE présente la corrélation entre les mesures « indenter » et les modifications de l'allongement à la rupture, obtenue dans un programme de vieillissement accéléré [18]. Une corrélation correcte a été obtenue tant pour le vieillissement sous rayonnement, que pour le vieillissement thermique de ce matériau de CSPE. Cette courbe de corrélation illustre également le degré de dispersion que l'on observera probablement sur des données réelles.

Les mesures de CM sur site de ce matériau au moyen de l'« indenter » pourraient être comparées avec la dégradation prévue pour permettre l'estimation de la durée de vie résiduelle. La dégradation prévue est obtenue par l'utilisation des modèles de vieillissement (tels que ceux qui sont décrits dans la CEI 61244-2), combinée à la connaissance des conditions d'environnement sur site. En variante, on peut comparer la condition à une condition qualifiée déterminée en utilisant l'EQ.

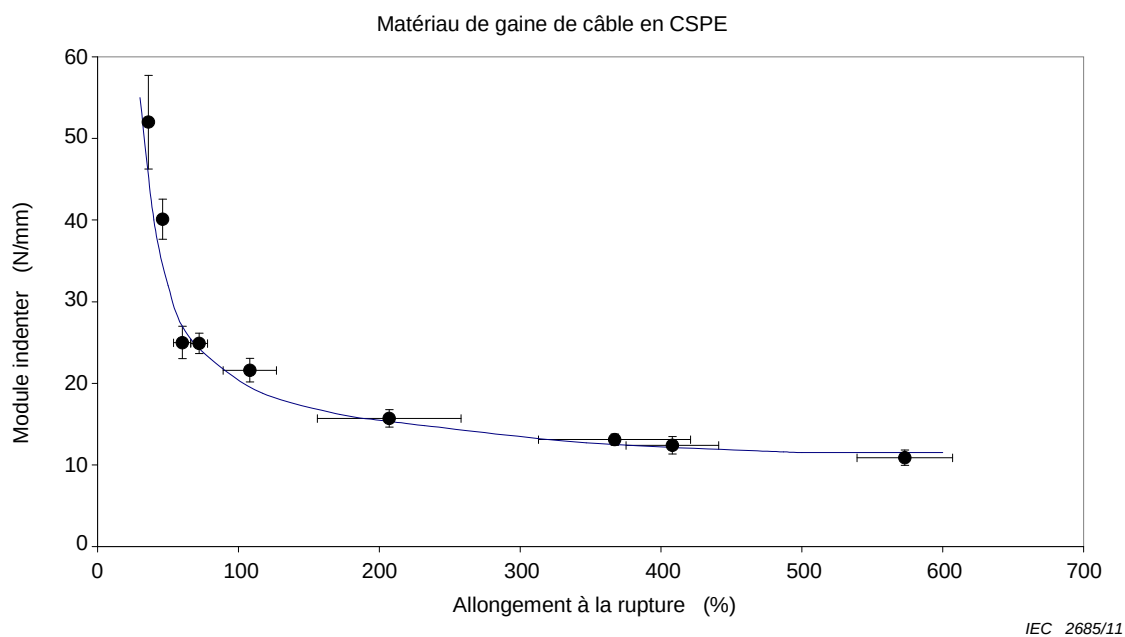


Figure A.1 – Courbe de corrélation pour module « indenter » par rapport à l'allongement à la rupture pour un matériau de gaine de câble en CSPE [18]

Annexe B (informative)

Utilisation d'un dépôt

B.1 Échantillon type dans un dépôt

Un certain nombre de dépôts d'échantillons ont été installés dans les NPP, principalement pour des matériaux de câble. Le détail de ce qui est inclus dans les dépôts varie d'une installation à une autre mais certains exemples types sont illustrés ci-dessous.

Un dépôt de câble type peut inclure les types d'échantillons suivants:

- lots d'échantillons en haltères préparés à l'avance pour les essais d'allongement;
- courtes sections de câble complet (généralement d'une longueur de 0,3 m à 0,5 m) pour « indenter » et autres mesures de CM (ces échantillons peuvent également être utilisés pour la préparation d'échantillons en haltères après vieillissement);
- sections plus longues de câble complet (d'une longueur généralement de 1 m à 2 m) pour les essais électriques périodiques;
- câble complet (d'une longueur généralement de 3 m) pour futur essai de DBE.

En variante, de plus grandes longueurs de câble peuvent être utilisées dans un dépôt et de courtes longueurs découpées pour les essais d'allongement et autres essais de CM par intervalles

B.2 Programme d'essai type pour un dépôt

Pour un dépôt de câbles de l'installation, le programme d'essai pourrait prendre la forme suivante:

- Des échantillons sont enlevés des mesures de CM pour chaque type de composant. il convient que ces essais de CM soient initialement non destructifs (par exemple, « indenter » ou autres techniques de CM, comme approprié au type de composant) ou ne nécessitent que de petits échantillons (par exemple, essais d'OIT), pour conserver le matériau dans le dépôt.

La quantité de matériau disponible dans un dépôt est souvent très limitée, il est donc important de conserver le matériau autant que possible aux étapes précoces de son utilisation.

- Si des essais non destructifs ou de microéchantillons indiquent qu'une dégradation commence à se produire, il convient d'enlever et de soumettre à essai les échantillons pour les essais d'allongement à la rupture.
- Les valeurs de paramètres de CM sont comparées aux données de référence pour ce composant. Si une dégradation significative s'est produite, des essais supplémentaires peuvent être effectués, par exemple, un essai de DBE.

Il est important d'effectuer les mesures de CM en utilisant les méthodes recommandées spécifiquement pour les programmes de gestion de vieillissement, voir par exemple [8].

Bibliographie

- [1] IAEA-TECDOC-932, *Pilot study on the management of ageing of instrumentation and control rod cables*, Results of a co-ordinated research programme 1993-1995, IAEA, Vienna, March 1997
- [2] AEAT-6577:2000, *Management of ageing of in-containment I&C cables: Final report of the phase II IAEA co-ordinated research programme*, ed. S.G. Burnay
- [3] IAEA-TECDOC-1188, *Assessment and management of ageing of major nuclear power plant important to safety: In-containment instrumentation and control cables*, IAEA, Vienna, December 2000
- [4] IAEA-NP-T-3.6, *Guidelines for qualification and ageing management of I&C cables in current and future nuclear power generating plant*, IAEA, Vienna, December 2010
- [5] IEEE Std 323, *Qualifying class 1E equipment for nuclear power generating stations*
- [6] IEEE 383-1974, *Standard for type test of class 1E electrical cables, field splices and connections for nuclear power generating station*
- [7] IEEE Std 383-2003, *Qualifying class 1E electric cables and field splices for nuclear power generating stations (replace IEEE 282-1974)*
- [8] IEC/IEEE 62582 (all parts), *Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Electrical equipment condition monitoring methods*
- [9] GILLEN, K.T., CLOUGH, R.L., *Combined environment ageing effects: Radiation-thermal degradation of PVC and PE*, J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed., 19, 2041 (1981)
- [10] SEGUCHI, T., TAMURA, K., OHSHIMA, T., SHIMADA, A. & KUDOH, H. *Degradation mechanisms of cable insulation materials on radiation-thermal ageing in radiation environments*, Radiat. Phys. Chem. Vol. 80, pp.268 – 273, 2011
- [11] JNES-SS-0903, *Assessment of cable ageing for nuclear power plant*, July 2009
- [12] EPRI 1003317 (2002), *Cable system ageing management*, TOMAN, G.J.
- [13] EPRI-1003663 (2003), *Integrated cable system ageing management guidance*, G. TOMAN, G.J.
- [14] IEC 62465, *Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Management of ageing of electrical cable systems*
- [15] CELINA, M., GILLEN, K.T., WISE, J. and CLOUGH, R.L. *Anomalous Aging Phenomena in a Crosslinked Polyolefin Cable Insulation*, Radiat. Phys. Chem., 48, 613 (1996)
- [16] CELINA, M., GILLEN, K.T., WISE, J. and CLOUGH, R.L., *Inverse Temperature and Annealing Phenomena During Degradation of Crosslinked Polyolefins*, Polym. Degrad. Stabil., 61, 231 (1998)
- [17] BURNAY, S.G. & DAWSON, J., *Reverse temperature effect during radiation ageing of XLPE cable insulation material*, Proceedings of International Conference on "Ageing studies and lifetime extension of materials", 12-14 July 1999, St. Catherine's College, Oxford, UK, Kluwer/Plenum Press.
- [18] BURNAY, S.G., unpublished data (reproduced courtesy of Institute of Nuclear Safety Systems, Japan)
- [19] CEI 60544-4, *Matériaux isolants électriques – Détermination des effets des rayonnements ionisants – Partie 4: Système de classification pour l'utilisation dans un environnement sous rayonnement*
- [20] CEI/TS 61244-3, *Determination of long-term radiation ageing in polymers – Part 3: Procedures for in-service monitoring of low-voltage cable materials* (disponible en anglais seulement)

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch