

BS EN 60505:2011



BSI Standards Publication

Evaluation and qualification of electrical insulation systems

NO COPYING WITHOUT BSI PERMISSION EXCEPT AS PERMITTED BY COPYRIGHT LAW

raising standards worldwide™



National foreword

This British Standard is the UK implementation of EN 60505:2011. It is identical to IEC 60505:2011. It supersedes BS EN 60505:2004 which is withdrawn.

The UK participation in its preparation was entrusted to Technical Committee GEL/112, Evaluation and qualification of electrical insulating materials and systems.

A list of organizations represented on this committee can be obtained on request to its secretary.

This publication does not purport to include all the necessary provisions of a contract. Users are responsible for its correct application.

© BSI 2011

ISBN 978 0 580 66762 6

ICS 29.080.30

Compliance with a British Standard cannot confer immunity from legal obligations.

This British Standard was published under the authority of the Standards Policy and Strategy Committee on 30 September 2011.

Amendments issued since publication

Date	Text affected
------	---------------

EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM

EN 60505

August 2011

ICS 29.080.30

Supersedes EN 60505:2004

English version

Evaluation and qualification of electrical insulation systems
(IEC 60505:2011)

Evaluation et qualification des systèmes
d'isolation électrique
(CEI 60505:2011)

Bewertung und Kennzeichnung von
elektrischen Isoliersystemen
(IEC 60505:2011)

This European Standard was approved by CENELEC on 2011-08-15. CENELEC members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration.

Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the Central Secretariat or to any CENELEC member.

This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CENELEC member into its own language and notified to the Central Secretariat has the same status as the official versions.

CENELEC members are the national electrotechnical committees of Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus, the Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, the Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom.

CENELEC

European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung

Management Centre: Avenue Marnix 17, B - 1000 Brussels

Foreword

The text of document 112/174/FDIS, future edition 4 of IEC 60505, prepared by IEC TC 112, Evaluation and qualification of electrical insulating materials and systems, was submitted to the IEC-CENELEC parallel vote and approved by CENELEC as EN 60505:2011.

The following dates are fixed:

- latest date by which the document has to be implemented at national level by publication of an identical national standard or by endorsement (dop) 2012-05-15
- latest date by which the national standards conflicting with the document have to be withdrawn (dow) 2014-08-15

This document supersedes EN 60505:2004.

The main change with respect to EN 60505:2004 is that Annex A: Glossary is now available in an Internet version (<http://std.iec.ch/iec60505>) as well as a hardcopy version. The internet version contains an abridged text version and a multimedia supplement.

Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this document may be the subject of patent rights. CENELEC [and/or CEN] shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

Endorsement notice

The text of the International Standard IEC 60505:2011 was approved by CENELEC as a European Standard without any modification.

In the official version, for Bibliography, the following notes have to be added for the standards indicated:

IEC 60068-1	NOTE	Harmonized as EN 60068-1.
IEC 60068-2 series	NOTE	Harmonized in EN 60068-2 series.
IEC 60068-2-1	NOTE	Harmonized as EN 60068-2-1.
IEC 60068-2-2	NOTE	Harmonized as EN 60068-2-2.
IEC 60068-2-10	NOTE	Harmonized as EN 60068-2-10.
IEC 60068-2-14	NOTE	Harmonized as EN 60068-2-14.
IEC 60068-2-27	NOTE	Harmonized as EN 60068-2-27.
IEC 60112	NOTE	Harmonized as EN 60112.
IEC 60212	NOTE	Harmonized as EN 60212.
IEC 60216 series	NOTE	Harmonized in EN 60216 series.
IEC 60216-1	NOTE	Harmonized as EN 60216-1.
IEC 60243-1	NOTE	Harmonized as EN 60243-1.
IEC 60243-2	NOTE	Harmonized as EN 60243-2.
IEC 60243-3	NOTE	Harmonized as EN 60243-3.
IEC 60664-4	NOTE	Harmonized as EN 60664-4.
IEC 60270:2000	NOTE	Harmonized as EN 60270:2001 (not modified).

IEC 60371-2	NOTE	Harmonized as EN 60371-2.
IEC 60587	NOTE	Harmonized as EN 60587.
IEC 60721 series	NOTE	Harmonized in EN 60721 series.
IEC 60811-3-1	NOTE	Harmonized as EN 60811-3-1.
IEC 61033	NOTE	Harmonized as EN 61033.
IEC 61710	NOTE	Harmonized as EN 61710.
IEC 62231	NOTE	Harmonized as EN 62231.
IEC 62271-304	NOTE	Harmonized as CLC/TS 62271-304.
ISO 62	NOTE	Harmonized as EN ISO 62.
ISO 175	NOTE	Harmonized as EN ISO 175.
ISO 877-1	NOTE	Harmonized as EN ISO 877-1.
ISO 877-2	NOTE	Harmonized as EN ISO 877-2.
ISO 4611	NOTE	Harmonized as EN ISO 4611.

Annex ZA (normative)

Normative references to international publications with their corresponding European publications

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

NOTE When an international publication has been modified by common modifications, indicated by (mod), the relevant EN/HD applies.

<u>Publication</u>	<u>Year</u>	<u>Title</u>	<u>EN/HD</u>	<u>Year</u>
IEC 60216-2	-	Electrical insulating materials - Thermal endurance properties - Part 2: Determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials - Choice of test criteria	EN 60216-2	-
IEC 60216-3	-	Electrical insulating materials - Thermal endurance properties - Part 3: Instructions for calculating thermal endurance characteristics	EN 60216-3	-
IEC 60216-5	-	Electrical insulating materials - Thermal endurance properties - Part 5: Determination of relative thermal endurance index (RTE) of an insulating material	EN 60216-5	-
IEC 60493-1	-	Guide for the statistical analysis of ageing test - data - Part 1: Methods based on mean values of normally distributed test results		-
IEC 60544-1	-	Electrical insulating materials - Determination of the effects of ionizing radiation - Part 1: Radiation interaction and dosimetry	EN 60544-1	-
IEC/TS 61251	-	Electrical insulating materials - A.C. voltage endurance evaluation - Introduction	-	-
IEC 62539	-	Guide for the statistical analysis of electrical insulation breakdown data	-	-

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	9
2 Normative references	9
3 Terms and definitions	9
3.1 General terms	10
3.2 Terms related to service stresses and ageing.....	10
3.3 Terms related to testing.....	11
4 Ageing.....	12
4.1 Ageing mechanism	12
4.2 Assessment of ageing mechanisms.....	14
4.3 Electrical ageing.....	15
4.4 Thermal ageing	17
4.5 Mechanical ageing	19
4.6 Environmental ageing.....	21
4.7 Accelerated ageing.....	22
4.8 Multifactor ageing.....	23
5 Basic evaluation considerations.....	23
5.1 Elements for preparing an evaluation method.....	23
5.1.1 Object	23
5.1.2 Service conditions	23
5.1.3 Life values.....	24
5.2 Types of evaluation procedures.....	24
5.3 Choice of the test object.....	26
5.4 Experimental test procedures	26
5.5 Conclusions for standardization practices.....	27
6 Functional ageing tests.....	27
6.1 Test objects.....	27
6.1.1 Construction of test objects	27
6.1.2 Number of test objects.....	28
6.1.3 Quality assurance tests	28
6.1.4 Preconditioning subcycle	28
6.1.5 Initial diagnostic tests.....	28
6.1.6 Reference EIS	28
6.2 Test conditions.....	28
6.2.1 Continuous and cyclic testing	28
6.2.2 Levels of test stresses, ageing factors and diagnostic factors.....	29
6.3 Determination of EIS service life	29
6.3.1 Extrapolation of life test results	29
6.3.2 Comparison of life test data	29
6.4 Diagnostics	30
6.4.1 Diagnostic tests – End point criteria.....	30
6.4.2 Additional specific tests	31
6.5 Analysing the data.....	31
6.6 Test report	31
Annex A (informative) Glossary.....	32

Bibliography.....	71
Figure 1 – Ageing of an EIS	13
Figure 2 – Intrinsic/extrinsic electrical ageing of practical EIS	15
Figure 3 – Intrinsic/extrinsic thermal ageing of practical EIS	17
Figure 4 – Intrinsic/extrinsic mechanical ageing of practical EIS	20
Figure 5 – Intrinsic/extrinsic environmental ageing of practical EIS	22
Figure 6 – Elements of evaluation methods.....	23
Figure 7 – Type of evaluation procedure	25
Figure 8 – Selection of test object.....	26
Figure 9 – Establishing the test method	27
Figure A.1 – Surface abrasion damage	32
Figure A.2 – Surface enamel peeling like string	32
Figure A.3 – Scheme of the measurement set-up for the charging/discharging current.....	33
Figure A.4 – Example of sample preparation.....	33
Figure A.5 – Charging/discharging current on HDPE film	34
Figure A.6 – Property versus time behaviour, detection of threshold (end point, p_L) and maintenance time.....	35
Figure A.7 – Correspondence between the ageing plots of the property p (in red), obtained at different stress levels, and the resulting life line	35
Figure A.8 – Example of charge injection of positive carriers (holes) from the anode and of negative charge carriers (electrons) from the cathode in a PE flat specimen, detected by space charge measurement performed by PEA method	36
Figure A.9 – Stress-strain curve for a typical material	37
Figure A.10 – Scheme of measurement set- up for charging/discharging current	38
Figure A.11 – Example of sample preparation.....	38
Figure A.12 – Charging/discharging current on HDPE film	38
Figure A.13 – Charging current at 135 °C and different values of DC electrical field	39
Figure A.14 – Charging current at 120 °C and different values of DC electrical field	39
Figure A.15 – Corona at post insulator head	40
Figure A.16 – Corona on top and arcing to ground.....	40
Figure A.17 – Stages of mechanical ductile fracture (cracking) (Source unknown).....	41
Figure A.18 – Photo showing orderings in epoxy structure and void.....	42
Figure A.19 – Discharge between conductors through air.....	44
Figure A.20 – Paper insulation degraded by electrical surface discharges	44
Figure A.21 – Example of electric strength test on XLPE sample 0,2 mm thick.....	45
Figure A.22 – Two parameters Weibull plot electric strength results performed on seven XLPE specimens, 0,2 mm thick.....	45
Figure A.23 – Loss angle of a dielectric	47
Figure A.24 – Loss factor for pre-treated and thermally aged (at 110 °C and 130 °C) XLPE cables measured at 90 °C plotted vs. frequency.....	47
Figure A.25 – Field lines from a positive charge above a plane conductor.....	48
Figure A.26 – Electrical tree.....	49
Figure A.27 – EPDM ashing and erosion on fitting	50
Figure A.28 – Failing external insulation	51

Figure A.29 – Failing external insulation	51
Figure A.30 – Critical failure of solid cable insulation (XLPE) by electrical breakdown	52
Figure A.31 – Example flashover	53
Figure A.32 – Substation – Outdoor installation	54
Figure A.34 – Internal interfaces in epoxy structure and void	56
Figure A.35 – Example of craze and crack development in an inter-lamellar space under mechanical tension T	57
Figure A.36 – Water treeing	58
Figure A.37 – After 11 years in service UV and moisture impact	59
Figure A.38 – Random (amorphous) structure of a molecular chain	59
Figure A.39 – Oriented structure (semi-crystalline) of a molecular chain	59
Figure A.40 – Typical morphology of melt-grown polyethylene spherulites	60
Figure A.41 – Areas in which PD generally occur	61
Figure A.42 – Classes of defect – Internal, surface and corona PD	61
Figure A.43 – Basic PD measurement circuit	62
Figure A.44 – Examples of PD patterns relevant to internal, surface and corona PD	62
Figure A.45 – GIS research – Metal conductor protrusion	63
Figure A.46 – Internally strained epoxy – Frozen in strains in epoxy resin due to thermal stress, measured by TMA curves	64
Figure A.47 – Externally strained parts in an on-load tap changer (OLTC)	64
Figure A.48 – A material being loaded in a) compression, b) tension, c) shear	65
Figure A.49 – Effect of thermal-mechanical stresses leading to interfacial electrical tracking	66
Figure A.50 – Stress-strain curve for a typical material	66
Figure A.51 – Over crimped rod; breaks during tensile test	67
Figure A.52 – Typical installation fault	68
Figure A.53 – Surface tracking on sheds and fitting end	68
Figure A.54 – Vented trees – Initiate at interface	69
Figure A.55 – Tape wrinkling	70
Table 1 – Ageing temperatures	19
Table 2 – Cyclical and continuous procedures	30

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**EVALUATION AND QUALIFICATION
OF ELECTRICAL INSULATION SYSTEMS**
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 60505 has been prepared by IEC technical committee 112: Evaluation and qualification of electrical insulating materials and systems.

This fourth edition cancels and replaces the third edition, published in 2004, and constitutes a technical revision.

The main change with respect to the previous edition is that Annex A: Glossary is now available in an Internet version (<http://std.iec.ch/iec60505>) as well as a hardcopy version. The internet version contains an abridged text version and a multimedia supplement.

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

FDIS	Report on voting
112/174/FDIS	112/184/RVD

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.

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

The life of an electrical insulation system (EIS) or systems frequently determines the life of electrical equipment which can be affected by electrical, thermal, mechanical or environmental stresses acting either individually or in combination.

Intended, estimated or proven service life times are essential parameters for describing the life of electrical insulation systems. In the early days of electrotechnical engineering, life figures were rather vague. The limitation of the life of the insulation under thermal stress was one of the first indicators of the effect of ageing in some equipment in service. As experience in using EIS increased, it was appreciated that there was a need to select specific materials having satisfactory life time at a given temperature, to enable the required service life to be achieved and to allow for the calculation of the thermal capability of equipment.

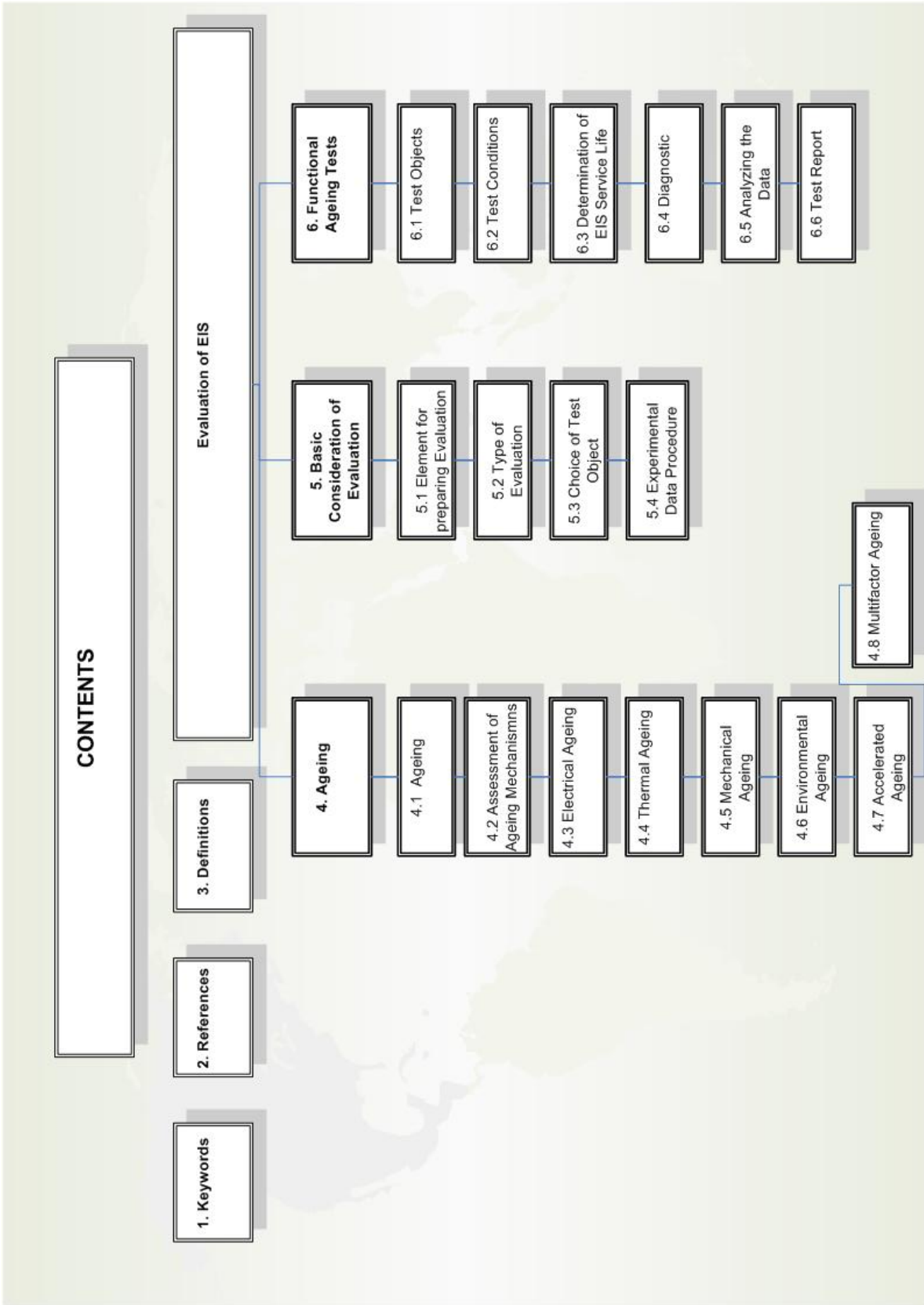
The user of this standard may evaluate existing test methods and provide correlation with his equipment. Therefore, the user of this standard is responsible for demonstrating the validity of the existing test method in accordance with the principles of this standard.

The determination of the prospective life is a fundamental task when developing and designing an EIS. Estimated service life of an EIS needs to be established for several reasons:

- for type testing when introducing a new EIS into production;
- for quality assurance of production;
- for estimating the life expectancy of new equipment;
- for estimating the remaining life for maintenance purposes.

“Ageing” focuses on the mechanisms affecting the EIS performance. “Evaluation” links these potential mechanisms by “Analysis” and “Diagnostics” to the design of a specific kind of evaluation test procedure.

The keyword structure below meets such requirements and allows an easier choice of the parts of interest.



EVALUATION AND QUALIFICATION OF ELECTRICAL INSULATION SYSTEMS

1 Scope

This International Standard establishes the basis for estimating the ageing of electrical insulation systems (EIS) under conditions of either electrical, thermal, mechanical, environmental stresses or combinations of these (multifactor stresses).

It specifies the principles and procedures that shall be followed, during the development of EIS functional test and evaluation procedures, to establish the estimated service life for a specific EIS.

This standard should be used by all IEC technical committees responsible for equipment having an EIS.

2 Normative references

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

IEC 60216-2, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 2: Determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials – Choice of test criteria*

IEC 60216-3, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 3: Instructions for calculating thermal endurance characteristics*

IEC 60216-5, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 5: Determination of relative thermal endurance index (RTE) of an insulating material*

IEC 60493-1, *Guide for the statistical analysis of ageing test data – Part 1: Methods based on mean values of normally distributed test results*

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

IEC/TS 61251, *Electrical insulating materials – AC voltage endurance evaluation – Introduction*

IEC 62539, *Guide for the statistical analysis of electrical insulation breakdown data*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

3.1 General terms

3.1.1

electrical insulation system

EIS

insulating structure containing one or more electrical insulating materials (EIM) together with associated conducting parts employed in an electrotechnical device

3.1.2

electrical insulating material

EIM

material with negligibly low electric conductivity, used to separate conducting parts at different electrical potentials

[IEC 60050-212:2010, 212-11-01, modified]

3.1.3

reference EIS

established EIS evaluated on the basis of either a known service experience record or a known comparative functional evaluation

3.1.4

candidate EIS

EIS under evaluation to determine its service capability (with regard to electrical, thermal, mechanical, environmental or multifactor stresses)

3.1.5

intended life

design life of an EIS under service conditions

3.1.6

estimated life

expected service life derived from either service experience or the results of tests performed in accordance with appropriate evaluation procedures, or both, as established by the responsible organization or technical committee

3.1.7

evaluation

establishment of relationships between service requirements and life data obtained from service experience analysis or from the results of functional tests

3.2 Terms related to service stresses and ageing

3.2.1

ageing stress

electrical, thermal, mechanical or environmental stress whose action on an EIS causes irreversible property changes

3.2.2

potentially destructive stress

stress in service which can cause the failure of the aged EIS, alone or in combination with other stresses

3.2.3

service conditions

combination of stresses and duty that are to be expected in a specific application of an electrical device

3.2.4**reference operating conditions**

service conditions of the equipment to which the test conditions of the functional test procedure are related

3.2.5**service requirements**

specified stresses, intended performance and duty of an electrical device

3.2.6**service experience**

the quantitative and/or qualitative record during service, with or without failure of an EIS

3.2.7**ageing**

irreversible changes of the properties of an EIS due to action by one or more stresses

NOTE 1 Some changes (e.g. hydrolytic changes) can be partly reversible if the ambient conditions change.

NOTE 2 Ageing leads to degradation of the EIS.

3.2.8**intrinsic ageing**

irreversible changes of fundamental properties of an EIS caused by the action of ageing factors on the EIS

3.2.9**extrinsic ageing**

irreversible changes of properties of an EIS caused by action of ageing factors on unintentionally introduced imperfections in the EIS

3.2.10**interaction**

modifications of the type or degree of ageing produced by the combination of two or more stresses relative to their ageing effect if acting individually on separate objects

3.2.11**direct interaction**

interaction between simultaneously applied stresses that differs from that occurring with sequentially applied stresses

3.2.12**indirect interaction**

interaction which occurs between simultaneously applied stresses, which remains unchanged when the factors are applied sequentially

3.3 Terms related to testing**3.3.1****functional test**

procedure to obtain information about the suitability of an EIS under specified conditions

3.3.2**test object**

sample of original equipment or part thereof, or model representing the equipment completely or partially, including the EIS, to be used in a functional test

3.3.3**accelerated ageing**

ageing resulting of an increase in the level and/or frequency of application of the stress beyond normal service conditions

3.3.4**accelerated test**

functional test applying accelerated ageing to shorten testing time

3.3.5**conditioning**

subjecting a specimen to an atmosphere of a specified relative humidity or complete immersion in water or other liquid, at a specified temperature for a specified period of time

3.3.6**prediagnostic conditioning**

variable or fixed stresses, which can be applied continuously or periodically to an EIS to enhance the ability of a functional test to detect the degree of ageing

NOTE Prediagnostic conditioning may cause additional ageing.

3.3.7**diagnostic factor**

variable or fixed stress which is applied to an EIS to establish the degree of ageing

3.3.8**diagnostic test**

periodic or continuous application of a specified level of a diagnostic factor to a test object to determine whether or when the end-point criterion has been reached

3.3.9**end-point criterion**

moment when a system is no longer able to fulfil its service purposes

3.3.10**life**

time for a property to reach the end-point criterion for objects in functional tests

3.3.11**test cycle**

in a test, repetitive period of application of one or more stresses, either sequentially or simultaneously, and of diagnostic factors

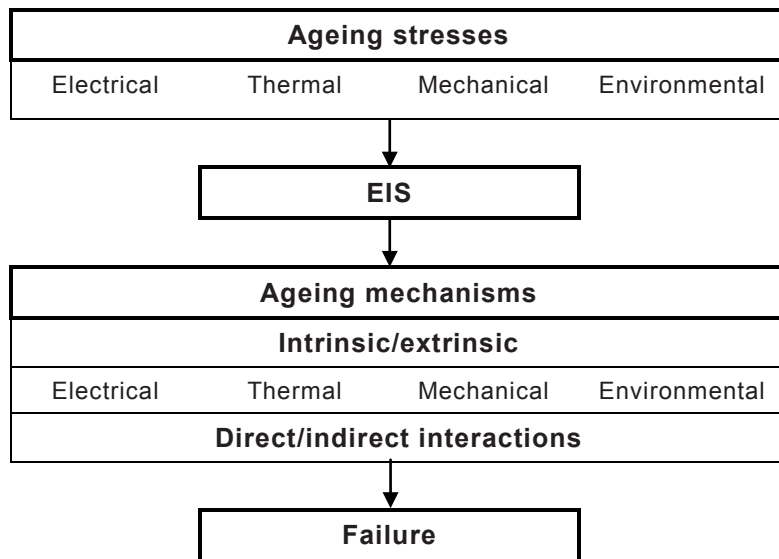
3.3.12**subcycle**

defined period within test cycle

NOTE The subcycle may be, for instance, a period of application of high temperature and humidity for influencing the system properties, or application of high voltage for diagnostic purposes

4 Ageing**4.1 Ageing mechanism**

Ageing is defined as the irreversible changes of the properties of an EIS due to action by one or more stresses. Ageing stresses may cause either intrinsic or extrinsic ageing. A schematic representation of the basic process is shown in Figure 1.



IEC 1231/11

Figure 1 – Ageing of an EIS

The type and level of contamination and/or the extent of imperfections in an EIS will, in many types of electrical apparatus, significantly affect the service performance. In general, the fewer and less severe the contaminant and/or defects in the EIS, the better is its performance. To avoid obtaining misleading results from functional tests, a candidate EIS should contain, as far as practicable, the full range of contaminants and/or defects expected when the actual system is used in service.

The ageing stresses produce electrical, thermal, mechanical or environmental ageing mechanisms that eventually lead to failure. During ageing, applied stresses, which initially do not affect the EIS, can cause additional ageing and, as a result, modify the rate of degradation.

When ageing is dominated by one ageing factor, this is referred to as single-factor ageing. Multifactor ageing occurs when more than one ageing factor substantially affects the ageing of the EIS. Ageing factors can act synergistically, i.e. there can be direct interactions between the stresses. Interactions may be either positive or negative.

The ageing of a practical EIS may be complex and failure is usually caused by a combination of ageing mechanisms, even if there is only one dominant ageing factor as, for example, in single-factor ageing.

Where experience or existing knowledge of how a specific EIS will perform in service is limited, the user of this standard shall decide whether single or multifactor test procedures are appropriate for his specific equipment or apparatus.

NOTE The classification of the operational environments of electrical equipment is dealt with in IEC publications prepared by IEC technical committee 75, and methods for environmental endurance testing of electrical equipment are described in IEC publications prepared by IEC technical committee 50 (notably IEC sub-committee 50B), see bibliography.

When speaking of environmental effects, this is understood to comprise environments other than the normal standard laboratory atmospheres specified in IEC 60212.

A number of other standards that provide methods of exposure or characterization of insulation are listed in the bibliography.

4.2 Assessment of ageing mechanisms

Figures 2, 3, 4 and 5, present four flow charts which describe respectively in some detail intrinsic and extrinsic electrical, thermal, mechanical and environmental ageing of an EIS. Each chart is based on the service experience of different types of EIS and shows possible mechanisms of deterioration and failure that can occur for the different types of ageing and the interactions between ageing factors. Although several failure mechanisms are shown, the charts are not intended to be exhaustive of mechanisms that might be found in actual service conditions of all equipment. It is important to note that ageing that leads to possible failure is usually caused by more than one mechanism.

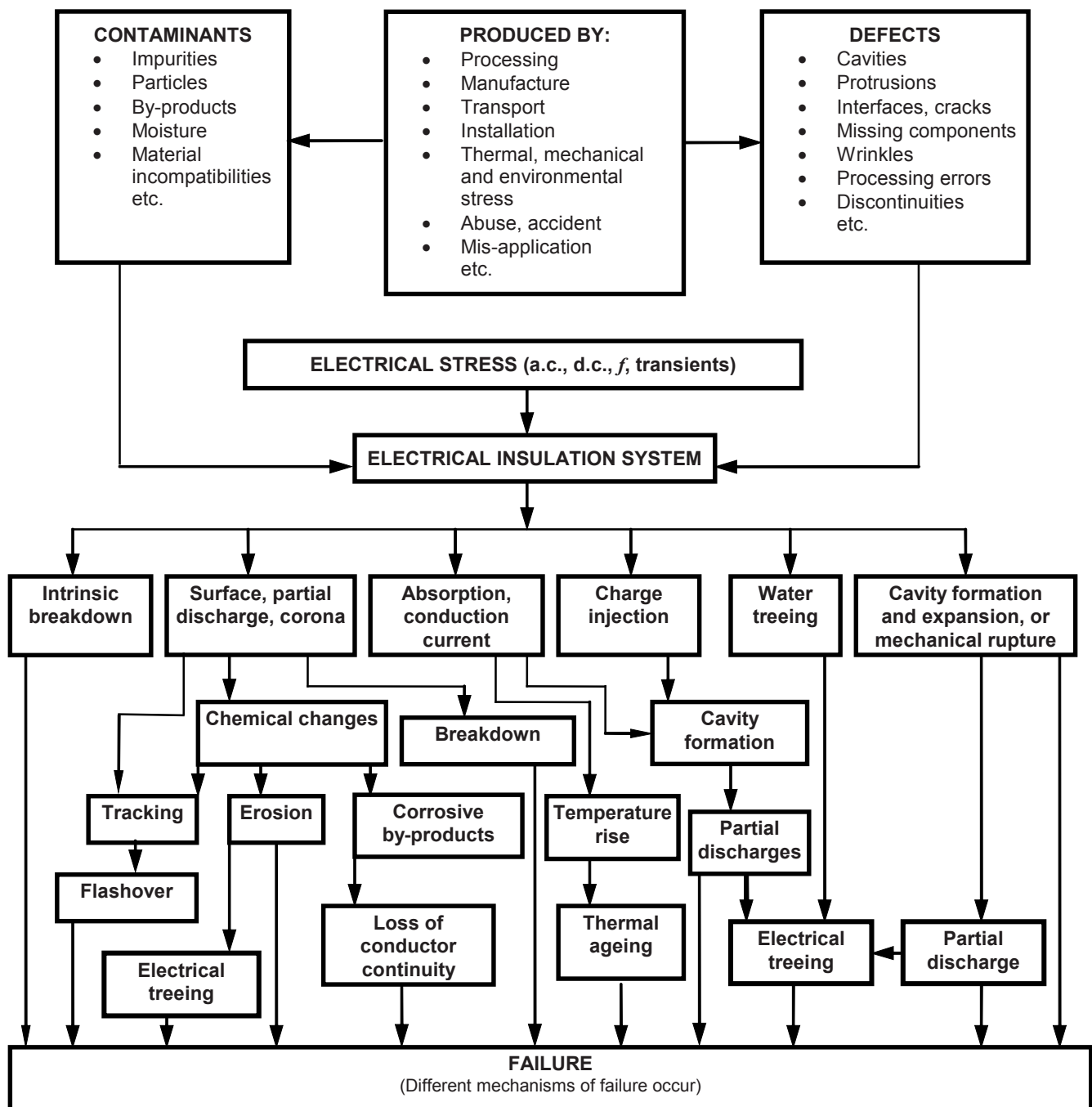
These charts should be used as follows:

- a) as a checklist to determine the ageing mechanisms of equipment and apparatus. The mechanisms can occur sequentially or simultaneously;
- b) to develop functional and accelerated ageing tests or test cycles. The magnitudes and types of applied stresses and their duration will depend upon how they affect the ageing mechanisms;
- c) to develop suitable diagnostic tests or test cycles to assess the condition of the EIS.

Based on knowledge of service experience, operating conditions and the properties of the components of the EIS under consideration, the user of this standard should select one or more charts that show the main ageing factor or factors. The various ageing mechanisms that lead to failure should be carefully examined, taking into account the levels of contaminants and defects in the EIS. A revised chart, which only includes the relevant ageing mechanisms, should then be produced as an aid in the development of the functional ageing and diagnostic test cycles.

If there is insufficient information available concerning service experience and/or the possible ageing mechanism, then the ageing conditions should be based upon the most severe levels of stresses expected in service for which the EIS has been designed.

4.3 Electrical ageing



IEC 1232/11

NOTE Other stresses may contribute to failure.

Figure 2 – Intrinsic/extrinsic electrical ageing of practical EIS

Electric ageing (either a.c., d.c. or impulse) involves:

- the effects of partial discharges when the local field strength exceeds the breakdown strength in the liquid or gaseous dielectric adjacent to, or included in, the EIS;
- the effects of tracking;
- the effects of treeing;
- the effects of electrolysis;

- e) the effects, related to those above, on adjacent surfaces of two insulating materials where tangential fields of relatively high value can occur;
- f) the effects of increased temperatures produced by high dielectric losses;
- g) the effect of space charges.

Figure 2 shows intrinsic/extrinsic electrical ageing where electrical stresses are considered to be the main ageing factor. Consider the example of a simple EIS consisting of two parallel plane conductors embedded in an insulating material. Protrusions are known to occur on the surfaces of conductors, and impurities (e.g., dust particles, etc.) can be included within the insulation. The accelerated ageing should, therefore, be carried out by using ageing factors that increase charge injection, for example by high voltage, and the diagnostic tests should be designed to enable measurement of the effect of the injected charge and/or the partial discharge characteristics.

In many practical EIS, the electrical ageing process that leads to failure is complex. No rigid mathematical models have yet been developed which predict fully how the ageing factors affect the life of an EIS. However, one empirical relationship, the inverse power model, is often used to relate a.c. and d.c. electrical stress with life. This states that:

$$L \propto V^{-n}$$

where

L is the life (time to failure or time to end-point);

V is the voltage;

n is the voltage life exponent.

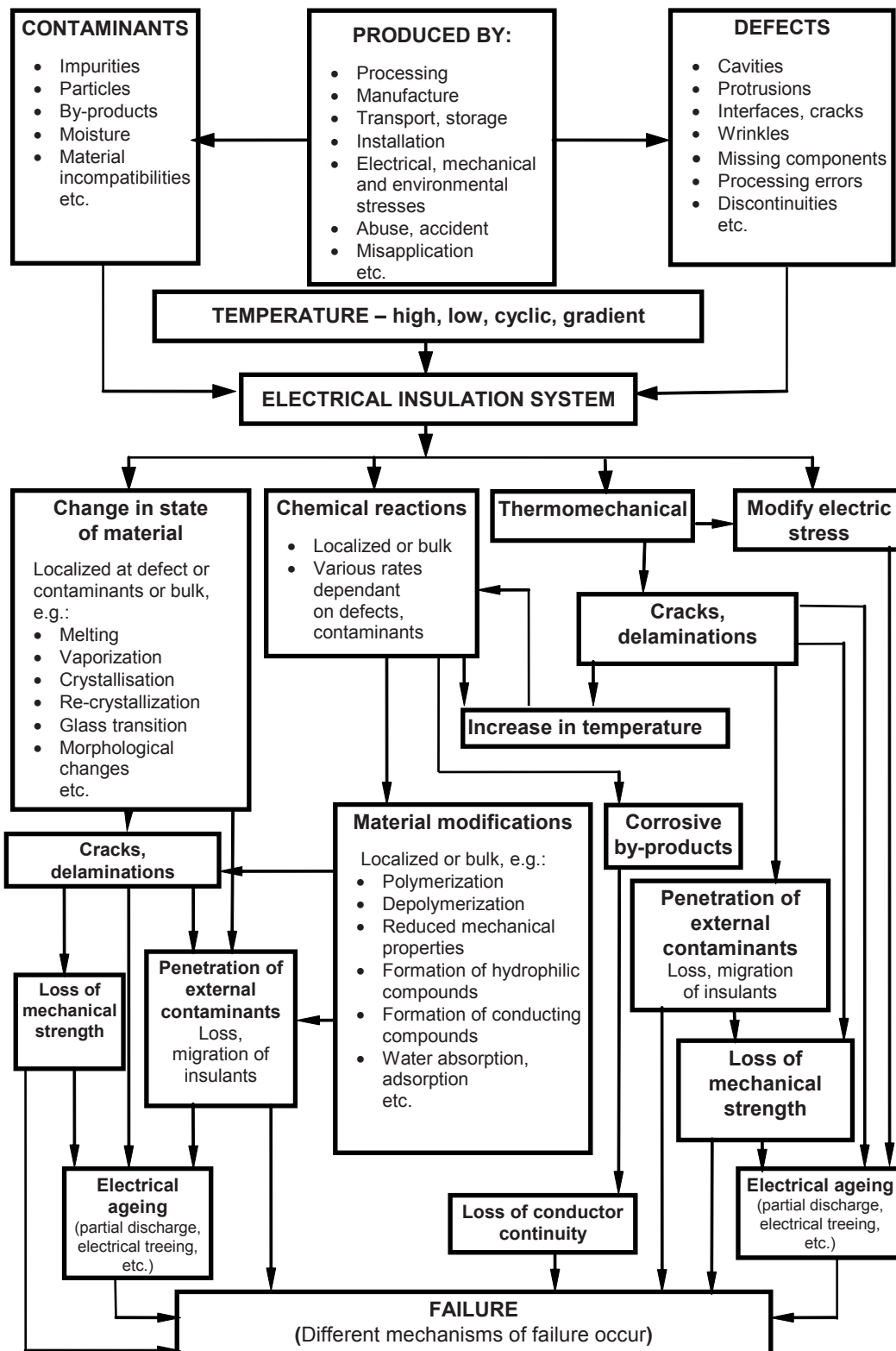
The inverse power law model predicts a linear relationship between life and voltage when plotted on log-log graph paper. Other models may be used.

Electrical ageing may also be accelerated by testing at a higher frequency than that experienced in normal service. The frequency increase shall have been shown to provide no change of the ageing mechanism, in the stress range, for either the candidate or the reference system.

In special cases it may be possible to perform electrical endurance tests with stepwise increasing stress for each test object. It is also necessary to specify a definite mathematical relationship between stress level and time to failure, as well as a method for reducing test results to a common time or a common stress level value. Either fixed or increasing stress levels may be used in cyclic tests.

For data processing and life line presentations, refer to IEC/TS 61251 and IEC 62539.

4.4 Thermal ageing



IEC 1233/11

NOTE Other stresses may contribute to failure.

Figure 3 – Intrinsic/extrinsic thermal ageing of practical EIS

Thermal ageing involves

- a) the progress of chemical and physical changes as a consequence of chemical degradation reactions, polymerization, depolymerization, diffusion, etc.,
- b) thermomechanical effects caused by the forces due to thermal expansion and/or contraction.

The increases in the rate of chemical and physical processes proceeding towards the state of thermodynamic equilibrium are the major causes of thermal ageing. Many uncomplicated ageing processes (e.g. first order chemical reactions) follow within restricted temperature intervals the Arrhenius equation, i.e.:

$$L = A \exp(-E/kT)$$

where

L is the life expectancy;

A is a constant;

E is the activation energy;

k is the Boltzmann constant;

T is the thermodynamic temperature.

The expected life at a particular temperature can be found by extrapolation of data plotted using log life versus $1/T$ coordinates. For further information, see IEC 60216-3.

The suggested values for the evaluation of the EIS can be selected from those shown in Table 1. To produce accelerated ageing, a minimum of three temperatures shall be chosen from the appropriate column in the table for the tests. The lowest temperature shall be selected such that a failure criterion will be reached after a minimum of 5 % of the intended service life of the candidate system or a minimum of 5 000 h for the lowest temperature. The next two highest temperatures shall be chosen at 20 K intervals. If more than three test temperatures are needed, then 10 K intervals may be used. Preferred ageing temperatures are listed in Table 1.

NOTE 1 Testing has confirmed that for many EIS, the life is halved for a rise in temperature, which is approximately constant within a restricted temperature range dependent on the EIM involved. For the majority of these EIS, the temperature rise halving the life has a value between 8 K to 15 K.

NOTE 2 In some cases, the above test procedure may not be optimal, for instance in the case of short-life equipment where it may lead to unrealistic high ageing temperatures.

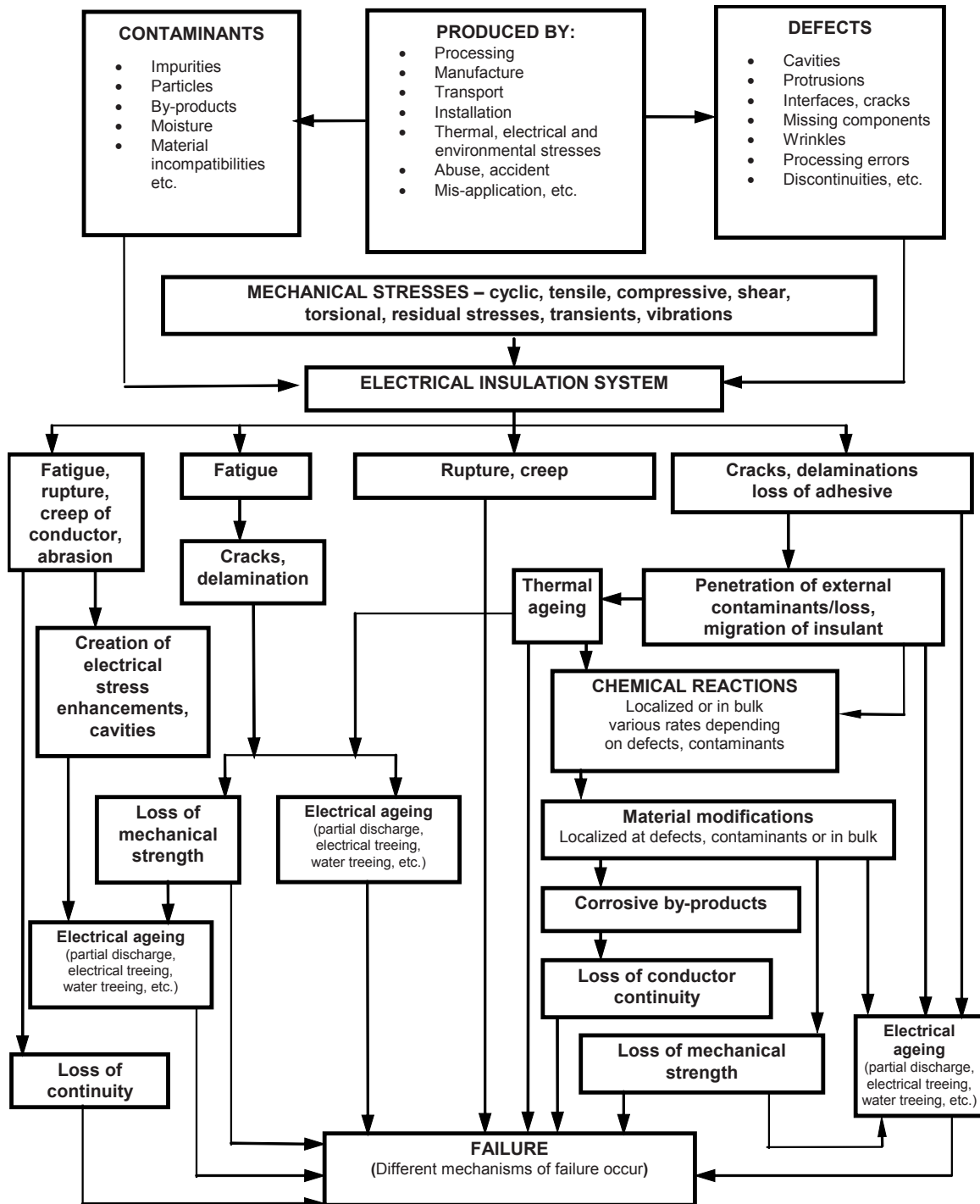
For EIS, where one or more EIM have transition temperatures (e.g. melting, boiling, crystallization), the maximum test temperature should be below the relevant transition temperature(s).

Table 1 – Ageing temperatures

Service temperatures °C	55	75	90	105	120	130	155	180	200	220	250
Thermal class	55	75	90 (Y)	105 (A)	120 (E)	130 (B)	155 (F)	180 (H)	200 (N)	220 (R)	250
Ageing temperatures °C	135	155	170	185	200	210	235	260	280	300	330
	125	145	160	175	190	200	225	250	270	290	320
	115	135	150	165	180	190	215	240	260	280	310
	105	125	140	155	170	180	205	230	250	270	300
	95	115	130	145	160	170	195	220	240	260	290
	85	105	120	135	150	160	185	210	230	250	280
	75	95	110	125	140	150	175	200	220	240	270

4.5 Mechanical ageing

Electrotechnical equipment may experience mechanical stresses from many causes during manufacture, transport, installation and operation. In certain types of equipment the presence, during operation, of mechanical stresses from electrodynamic, electromagnetic and thermal forces, has been shown to be one of the main causes of changes in their EIS.



IEC 1234/11

NOTE Other stresses may contribute to failure.

Figure 4 – Intrinsic/extrinsic mechanical ageing of practical EIS

Mechanical ageing involves

- fatigue failure of insulation components caused by a large number of low-level stress cycles,
- thermomechanical effects caused by thermal expansion and/or contraction,
- rupture of insulation by high levels of mechanical stress such as can be caused by external forces or operating conditions of the equipment,
- abrasive wear caused by relative motion between equipment components,

- insulation creep or flow under electrical, thermal or mechanical stresses,
- presence of other factors,
- types of mechanical testing

NOTE These phenomena can be localized and unevenly distributed throughout the volume of the insulation.

In practice, in many EIS, the mechanical ageing processes that lead to failure are complex, as shown by Figure 4. No rigid mathematical models have yet been developed which predict fully how the ageing factors affect the life of an EIS. However, one first approach empirical relationship is the inverse power model, which is often used to relate mechanical stresses with life:

$$L \propto M^{-m}$$

where

L is the life (time or number of cycles to failure or to end-point criterion);

M is the mechanical stress;

m is the life line exponent.

The inverse power law model predicts a linear relationship between life and voltage when plotted on log-log graph paper. Other models may be used.

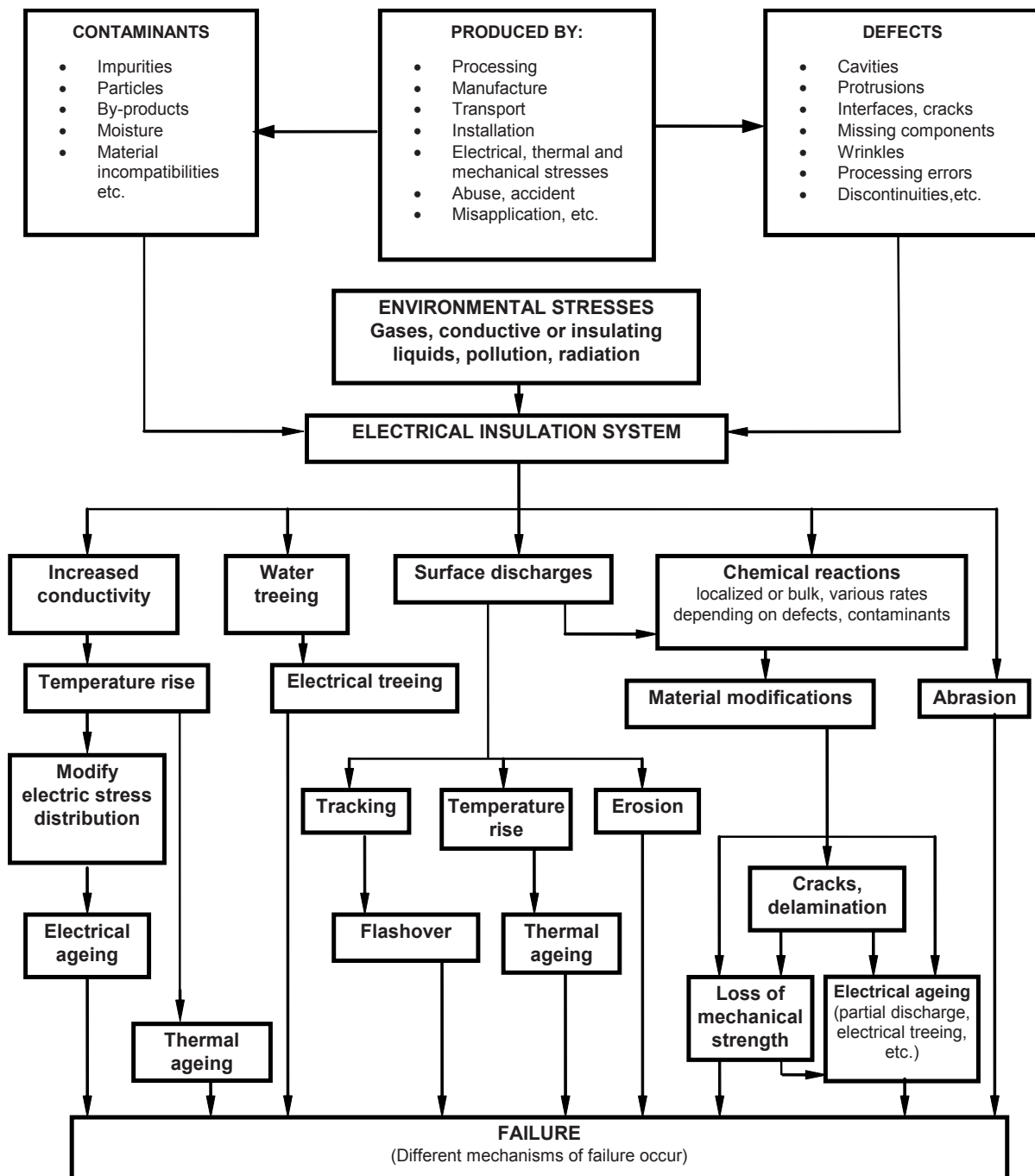
For data processing and life line presentations refer to IEC/TS 61251 and IEC 62539.

4.6 Environmental ageing

The following influences contribute to environmental ageing:

- moisture;
- oxygen;
- chemicals;
- biological agents;
- weathering;
- contaminants;
- radiation;
- aerospace conditions;
- vacuum conditions.

As there may be different mechanisms for environmental ageing (see Figure 5) there are no general models. When environmental stresses affect chemical reaction rates, then the thermal ageing model and the Arrhenius equation may be used (see 4.4)



IEC 1235/11

NOTE Other stresses may contribute to failure.

Figure 5 – Intrinsic/extrinsic environmental ageing of practical EIS

4.7 Accelerated ageing

Application of life models to fit accelerated life tests is to provide quantities for the evaluation of EIS (or performance under service conditions), particularly in relation to comparative tests performed on a reference material, of known service performance.

Among the factors that influences accelerated ageing are

- acceleration by frequency increase,
- repetition rate acceleration,
- acceleration by stress level increase.

4.8 Multifactor ageing

Multifactor ageing occurs when more than one ageing stress substantially affects the ageing of the EIS. Ageing stresses can act synergistically, that means, there can be direct interactions between the stresses. Interactions may be either positive or negative and therefore the ageing models can be very complex.

When ageing is dominated by a single stress, then refer to 4.3 to 4.5 for relevant ageing models.

5 Basic evaluation considerations

5.1 Elements for preparing an evaluation method

The preparation of methods for EIS evaluation requires careful consideration of the elements shown in Figure 6:

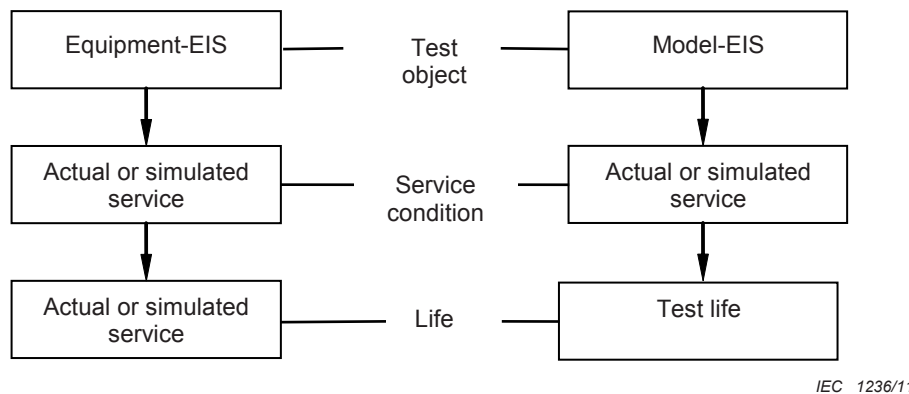


Figure 6 – Elements of evaluation methods

5.1.1 Object

The EIS object can be either a service-proven, a new (candidate) EIS, a component part or a model of the original electrical equipment. Generally, a maximum of technical information about the EIS will be advantageous, as such information may be necessary if EIS models are to be built.

5.1.2 Service conditions

Service conditions for the electrical equipment, of which the EIS forms a part, should be known, and may be available from the following:

- a) the designated stress figures when new equipment and/or an EIS are designed for special service conditions, including environment and duty;
- b) service records when a service-proven EIS has to be evaluated. Stress levels may then be defined by stress intervals or by reported maximum stress limits related to duty figures indicating the stress-time relation;
- c) the known service conditions of a reference system that has already been qualified on the basis of service records and to which a candidate EIS will be compared by parallel functional testing under comparable or even equal service conditions.

NOTE Accelerated testing requires verification of identical or equivalent ageing mechanisms compared to the mechanisms under operating service conditions.

5.1.3 Life values

Life values are related to EIS, service conditions, and user considerations. They shall be available as one of the following variants:

- a) EIS service time to failure (end-of-life defined by end-point criterion);
- b) functional test life of EIS to end-point criterion, with or without test acceleration.

NOTE The knowledge of the failure rate of any system is fundamental for system reliability inference.

5.2 Types of evaluation procedures

Depending on what source supplies the necessary data for the evaluation of a candidate EIS, three types of procedure are distinguished (see Figure 7). When selecting the test procedure, the user of this standard may use the flow chart in Figure 1, which presents, from left to right, a sequence of "performances" with decreasing influence of direct service experience and increasing influence of defined service conditions.

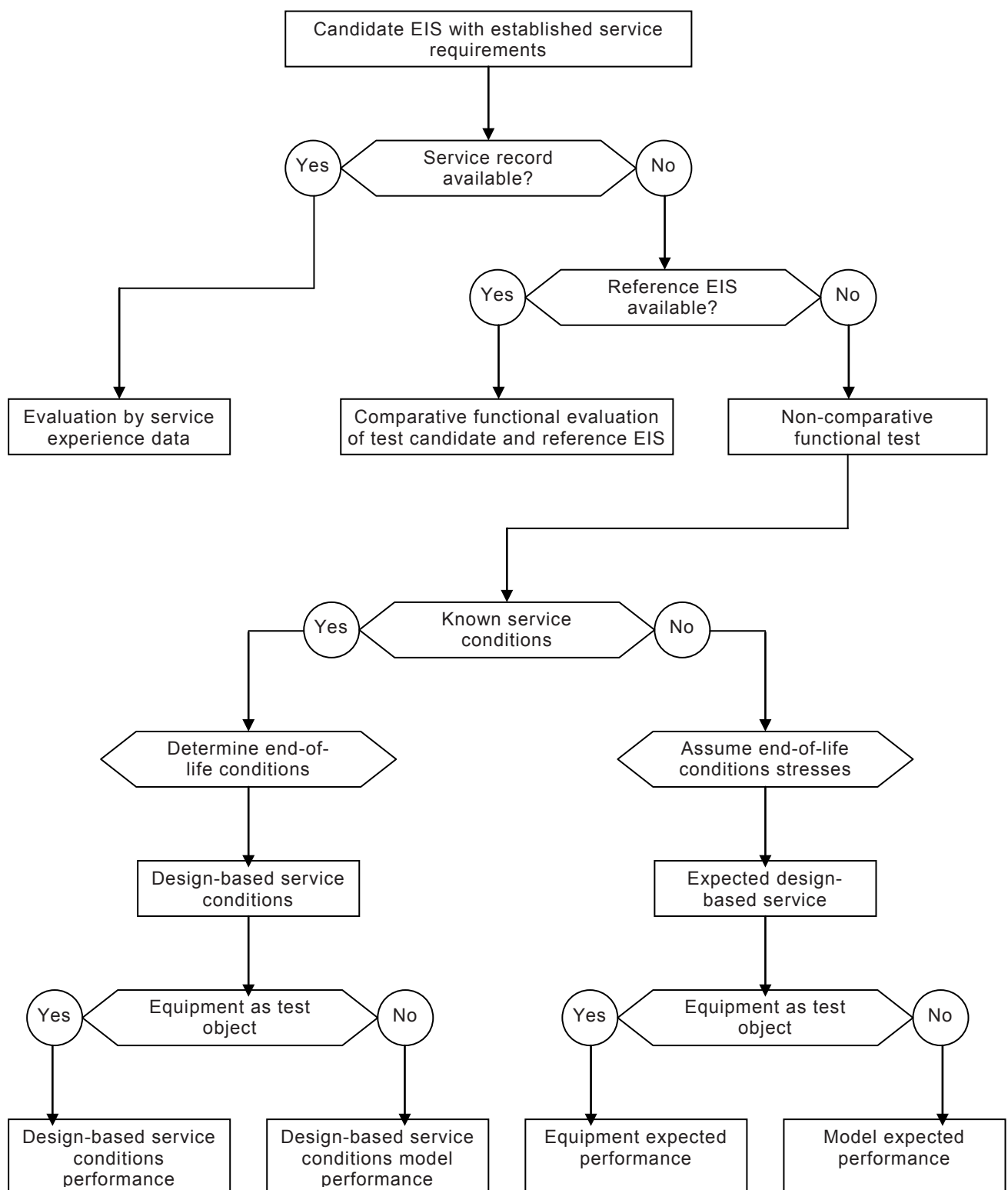


Figure 7 – Type of evaluation procedure

5.3 Choice of the test object

The choice of the test object can influence the test results and will also influence the cost of functional evaluation. The flow chart of Figure 8 demonstrates the criteria for the choice.

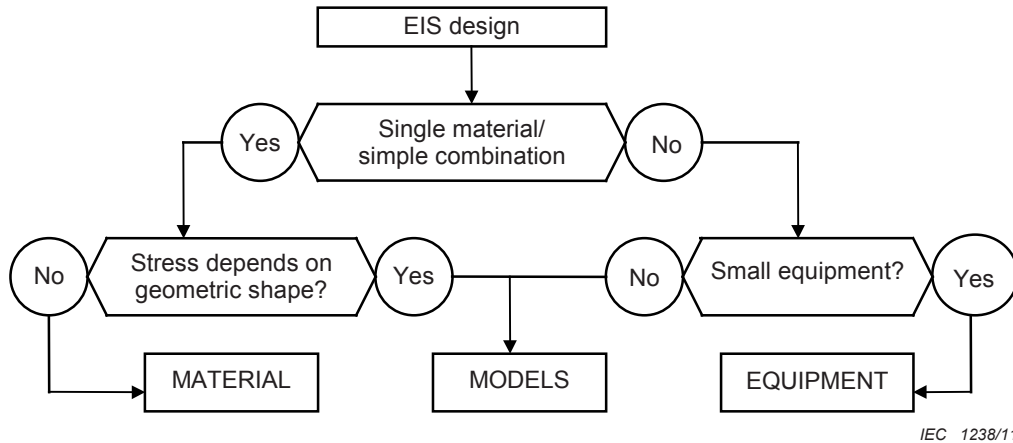


Figure 8 – Selection of test object

Depending on the size of the object and other practical considerations, a functional test on equipment, components or models can be used. If a “simple” EIS contains a single EIM or a simple combination of materials that has been thermally evaluated as a single EIM, and the stress distribution is independent of the insulating part’s shape or size, the EIS life may be derived by means of appropriate EIM endurance tests. The user of this standard should decide when such simplified procedures are appropriate.

5.4 Experimental test procedures

In functional testing, with or without a reference EIS, the test objects are submitted to specified ageing stress schedules, usually in stress cycles, to simulate service ageing. Diagnostic procedures are periodically applied to establish its progress. The complexity of the test influences the required test effort and cost. The flow diagram of Figure 9 points to three different types of tests, with increasing effort from left to right. The criteria are the number of ageing factors, the test object and possible interactions between stresses.

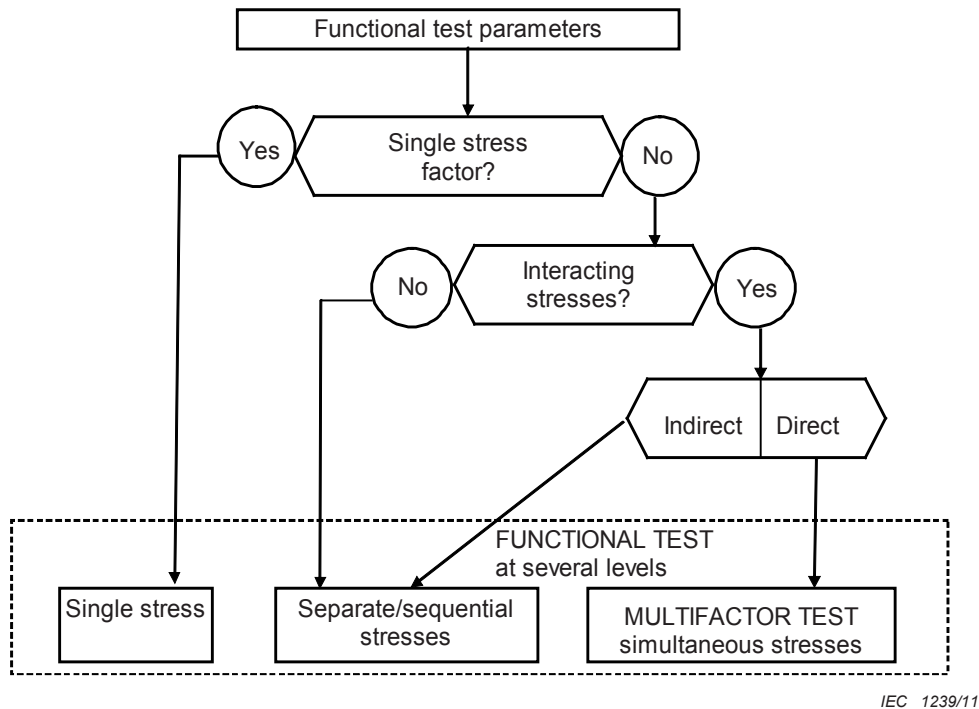


Figure 9 – Establishing the test method

5.5 Conclusions for standardization practices

Figure 8 and 9, will help the user of this standard to decide about the cases to be considered before starting development of standards for EIS evaluation.

Possible cases include the following:

- a) service experience data are available for direct evaluation; requires the formulation of special rules about the necessary information and how to analyse it;
- b) a simplified life test on an EIM; may be used when existing material test procedures are available for the candidate EIS;
- c) comparative functional testing using a model or part of the equipment as the test object; requires analysis of the ageing mechanisms under simulated service conditions in order to decide on the appropriate type of test.

In principle, comparative functional testing is possible without detailed knowledge of the ageing mechanisms. The essentials of functional testing are knowledge of the acting service stresses, their correct simulation and maintenance of the equivalence of the ageing effects.

6 Functional ageing tests

6.1 Test objects

6.1.1 Construction of test objects

Test objects shall be either complete units that incorporate the EIS or shall be models, constructed to adequately represent the configuration of the finished component to be evaluated. All objects shall be subjected to the full normal or intended manufacturing processes as far as is practicable. Where components that will use the candidate EIS have mechanical attachments in service that are considered to influence the ageing processes, these shall be simulated on the test object.

Test objects that include several internal conducting component parts that will have electric stress applied between them, either during the ageing or the diagnostic subcycle, shall be designed and constructed to enable verification of the ageing effect.

6.1.2 Number of test objects

Where feasible, a minimum of five test objects shall be aged for each of the electrical, thermal, mechanical, environmental or multifactor stress combinations included in the evaluation programme.

NOTE As a minimum number of five samples is required to reach the end-point criterion, to obtain statistically significant results, it may be necessary to include more than five samples in each sub-test.

6.1.3 Quality assurance tests

Before starting the first ageing subcycle, a visual inspection and all normal product quality assurance tests shall be carried out on all test objects.

6.1.4 Preconditioning subcycle

If appropriate, test objects should be preconditioned to better represent the condition of the EIS in service.

6.1.5 Initial diagnostic tests

Each test object shall be subjected to the diagnostic tests selected for the evaluation procedure before starting the first ageing subcycle.

6.1.6 Reference EIS

A reference EIS shall be tested using the same test procedure as that used for the candidate EIS, in the same laboratory, using the same type of test equipment. The performance of the reference EIS shall have been established either by service experience under typical operating conditions, or by appropriate functional testing in the range of the reference operating conditions.

6.2 Test conditions

6.2.1 Continuous and cyclic testing

Functional tests may be performed as a continuous ageing test if the end-point criterion is given as time to electrical or mechanical failure or breakdown, either at ageing stress level or caused by a continuously applied diagnostic stress. Alternatively, a fixed time test followed by either a breakdown or other diagnostic test can be appropriate.

More universally applicable are cyclic life tests composed of a repeated sequence of different ageing and diagnostic subcycles. This sequence of functional tests permits the application of either single or multifactor ageing tests with a minimum of unintended interference between different ageing factors and mechanisms.

The seasonal and daily variations of the outdoor environment result, to a higher or lower degree depending on the level of protection, in corresponding cyclic variations of the environmental conditions at the location of the equipment insulation.

In the absence of complete encapsulation, the risk of periodic condensation ought always to be considered. The "breathing" caused by periodic temperature variations may cause a unidirectional motion of particulate contamination from the outside to the inside of equipment that is not hermetically enclosed.

When these effects are simulated in functional tests, acceleration may be obtained through reduction of the cycle duration. A limitation is, however, given by the thermal inertia and diffusion constants of the test object and its parts.

6.2.2 Levels of test stresses, ageing factors and diagnostic factors

Test stress conditions shall consider the most severe overall stress conditions experienced in service for which the EIS is designed. These conditions need not occur necessarily at the maximum values of the individual stresses. The reference operating conditions shall be clearly defined for the evaluation procedure and the levels and types of diagnostic factors shall be pertinent to these reference operating conditions.

Stress levels for the ageing subcycles shall be selected so that the mechanisms of ageing are not significantly different from those operating at the most severe stress levels in normal service. Increasing the stress level to accelerate ageing, may be permissible when it does not significantly change the ageing mechanism.

NOTE Knowing the ageing mechanism is fundamental to establish which stresses are predominant and to refer to them to design a functional test and choose the appropriate ageing models.

Multifactor ageing tests are preferred as they best simulate normal service. When this procedure is not adopted, then either a sequential subcycle or a programme of single stress subcycles should be used.

Following each ageing subcycle, a conditioning subcycle and a diagnostic subcycle shall be performed where necessary. Failure of any part of the test specimen during a diagnostic test constitutes failure of the whole system and shall be reported as such. Electric stress shall be used as the main diagnostic factor in assessing the condition of the aged test objects. On low-voltage equipment it is often necessary to include a pre-diagnostic procedure to ensure that the electric stress, used as the diagnostic factor, helps to detect weaknesses developed during the ageing cycle.

6.3 Determination of EIS service life

6.3.1 Extrapolation of life test results

Results from testing performed at a minimum of three elevated stress levels may allow extrapolation of the stress-life-function into the range of the intended service stresses. For optimal extrapolation the coordinates of the graphical diagram of the stress/life function should be selected, whenever possible, such that a linear stress/life diagram is achieved. The degree of extrapolation should not exceed two orders of magnitude on the time scale of the log time plot.

For electrical, thermal and mechanical ageing, mathematically formulated laws of life are presented in 4.3, 4.4 and 4.5, respectively.

6.3.2 Comparison of life test data

Valid comparison testing of candidate and reference EIS requires that both systems be tested according to 6.3.1. When comparing these results, the candidate EIS may be considered an acceptable alternative if the life obtained, at selected stress levels, is comparable to or better, than the one obtained for the reference EIS.

NOTE 1 Comparable or better may mean, e.g. that the 95 % lower confidence bound of the candidate EIS falls within or above the 95 % confidence interval of the reference EIS.

NOTE 2 The significance of the test result can be assessed by means of statistical analysis (see e.g. IEC 60216-5 for thermal ageing).

This will then justify the declaration: “Candidate EIS-service life is expected to be either equal to or greater than the experienced service life of the reference EIS for the specified conditions”.

6.4 Diagnostics

6.4.1 Diagnostic tests – End point criteria

The user of this standard responsible for evaluation of an EIS for a specific type of equipment shall define the end-point criteria in either absolute or relative terms (e.g. for thermal evaluation, see IEC 60216-2 and IEC 60216-3).

The fundamental requirement for the diagnostic test procedure is that it shall include the specification of an end-point. The endurance test procedure may be cyclical or continuous, depending on the required diagnostic tests and ageing complexity, as depicted in Table 2.

Table 2 – Cyclical and continuous procedures

Case number	1	2	3	4	5	6
Procedure:	Cyclical				Continuous	
Single factor ageing	Yes	No	No	No	Yes	No
Multi-factor simultaneous ageing	No	Yes	No	No	No	Yes
Multi-factor sequential ageing	No	No	Yes	Yes	No	No
Diagnostic tests	Yes	Yes	Yes	No	No	No

Cyclical procedures, cases 1 to 4 in Table 2, are suitable when other than ageing stresses are expected to cause failure, or when the ageing stresses are being applied sequentially. They usually consist of several test cycles, each cycle being composed of subcycles.

- The ageing subcycles, conducted at elevated stress levels, serve to age the insulation on an accelerated basis. The degree of acceleration is selected in relation to the service stress level of the ageing factor.

NOTE In such cases when exceptional ageing stress levels occur in service more or less regularly (for example overload periods, raising the temperature appreciably), the ageing subcycle may be divided correspondingly into periods of lower and higher stress levels.

- After each ageing subcycle, the test specimens are subjected to a diagnostic test subcycle (except for case number 4 of Table 2), which may include voltage tests, partial discharge tests, mechanical stress tests, exposure to humidity or chemicals and other diagnostic tests. Some ageing stresses may not directly cause failure, whereas some (for example voltage) can, when acting simultaneously as ageing and diagnostic factors.

The extent and severity of the diagnostic tests should correlate with actual or expected potentially destructive stresses. For this purpose, guidelines are given in 4.3.2 that enable the user of this standard to select the appropriate test procedure. When feasible, the equipment technical committee may select the relevant test procedures to be used in its domain.

Continuous procedures, case numbers 5 and 6 in Table 2, are suitable when the ageing factor, or several ageing factors in combination, are expected simultaneously to be the most important failure-causing factor. The end-point may be the detection of a physical weakness that has developed during the period. It may also be an event or condition, such as failure during a diagnostic treatment or attainment of a limiting value of a specific property. The end-point may be characterized either by a single condition (e.g. level X of property A), or by one of several alternatives (e.g. level X of A or level Y of B, etc.) or it may be given as a combined condition (e.g. level X of A and level Y of B, etc.).

Typical criteria are given below:

- a) high-voltage proof tests at N times the normal service voltage (where N is either 1,5; 2; 3 or 4);
- b) impulse or surge proof test at S times the normal maximum service level (where S is either 1; 1,5; 2 or 3);
- c) percentage increase in incremental loss tangent, partial discharge level, etc., above the value for the system before ageing at a defined voltage or over a given voltage range;
- d) appearance of partial discharge (e.g. in solid organic insulation);
- e) leakage current above value before ageing at a defined voltage and temperature;
- f) percentage loss of a selected property.

6.4.2 Additional specific tests

Additional diagnostic tests may be necessary to define the end-point criteria of specific equipment or apparatus. When doing this, all information available from stress analysis, properties of the insulation, and failure analysis, shall be used as well as from typical operating conditions. The decision on whether to include a more comprehensive diagnostic shall be decided by the user of this standard.

6.5 Analysing the data

The specific rules for analysing the test data obtained from either single or multifactor stress evaluation programmes shall be the responsibility of the user of this standard. The level of complexity will be dependent on the type of apparatus for which the EIS has been designed. If design service parameters of the candidate EIS indicate stresses higher than those of the reference EIS, then functional tests of the candidate EIS shall reach the same EIS test-life as the reference EIS at the lower level. Analysis of the data should be carried out in accordance with Clauses 4 and 5.

For data processing and life line presentations, refer to IEC/TS 61251 and IEC 62539.

6.6 Test report

The test report should include:

- a) identification of the applicable evaluation standard;
- b) description of the EIS, including manufacturing of the specimens;
- c) description of the service experience concerning the reference system, including interactions (when necessary);
- d) identification of model, if used; or of type of coordinate system used for life data;
- e) reference operating conditions;
- f) description of any preconditioning or pre-ageing used;
- g) ageing stresses and their levels and acceleration in the tests;
- h) test sequence and duration and number of samples;
- i) diagnostic treatments, tests and measurements;
- j) end-point criteria selected;
- k) ageing curves (to confirm whether or not the candidate EIS may be accepted, the procedure for checking the linearity of the test data, specified in IEC 60493-1, shall be carried out);
- l) times to reach the end-points, individual values and medians and statistical treatment when feasible;
- m) summarized conclusion of the new system in comparison to the reference EIS.

Annex A (informative)

Glossary

A.1 General remark

This glossary contains terms and definitions taken from various sources. The glossary terms and definitions will be used in the interactive annex of this standard.

The terms and definitions can be viewed in the interactive version by mouse-over operations or clicking and shall give additional explanations during navigating through the paths of the corresponding ageing diagrams. The interactive annex is intended to act as an educational and interpreting guide to the normative part of IEC 60505.

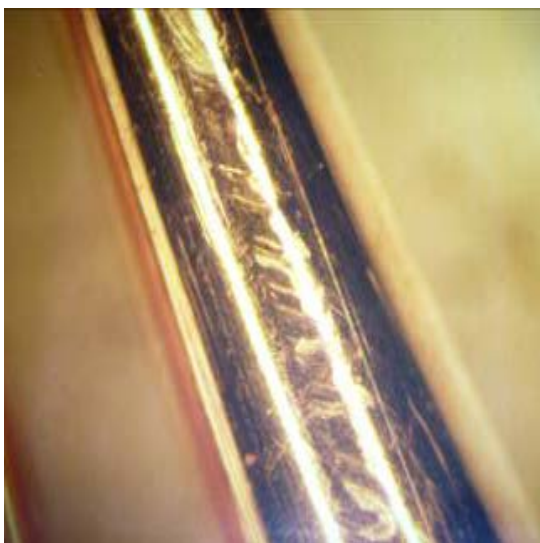
The interactive annex will be available in addition online on a server of the IEC (available at <http://std.iec.ch/iec60505>).

All illustrations given in this annex are reproduced with the permission of the authors as cited below.

A.2 Abrasion

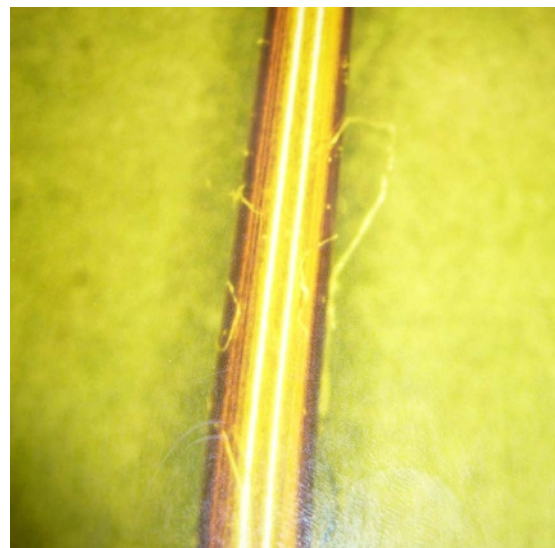
Erosion of material from a solid surface by the action of another material. Abrasion can be measured as loss of mass by the Taber abrasion test according to ISO 9352 or ASTM D 1044.

Example below, Figure A.1 and A.2: During the process of magnet wire manufacturing, the transfer machine tool is causing abrasion of the wire surface, like a capstan, resulting in surface failure.



IEC 1240/11

Figure A.1 – Surface abrasion damage



IEC 1241/11

Figure A.2 – Surface enamel peeling like string

References – Figures A.1 and A.2
SAKANO, T., *unpublished pictures*.

A.3 Absorption (chemical)

A physical or chemical phenomenon or a process in which atoms, molecules, or ions enter some bulk phase – gas, liquid or solid material. This is a different process from adsorption, since the molecules are taken up by the volume, not by surface. A more general term is “sorption” which covers adsorption, absorption, and ion exchange.

A.4 Absorption (dielectric)

Dissipation of electrical energy into thermal energy in a dielectric.

A.5 Absorption current (including electrical absorption)

The absorption current is the transient current, associated with the polarization mechanisms, that appears in a dielectric when a step voltage is applied. Indeed, applying a DC voltage to a dielectric specimen between two electrodes, the total current which flows, i , presents three components:

$$i = i_i + i_c + i_{abs}$$

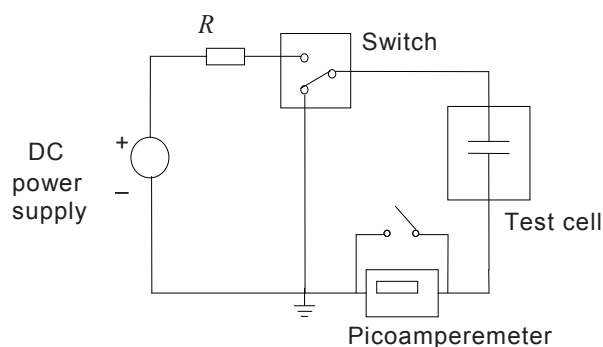
where

i_i is the charging current, associated with a change in the electric field amplitude;

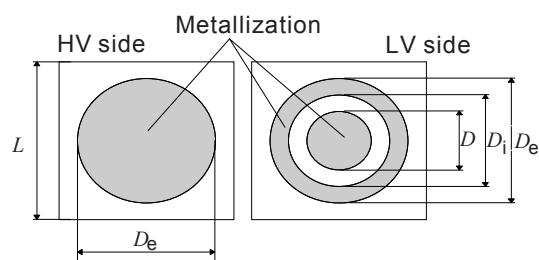
i_c is the conduction current, that is measurable in the steady state;

i_{abs} is the absorption current, related to polarization and decreasing exponentially with very slow decay time.

The absorption current can be measured through DC charging/discharging current tests, using, as an example, the measurement set-up shown in Figure A.3 and preparing the insulating sample as shown in Figure A.4. Charging/discharging current on high-density polyethylene (HDPE) is shown in Figure A.5.



IEC 1242/11



IEC 1243/11

NOTE Metallization is necessary to connect the sample to the electrodes.

Figure A.3 – Scheme of the measurement set-up for the charging/discharging current

Figure A.4 – Example of sample preparation

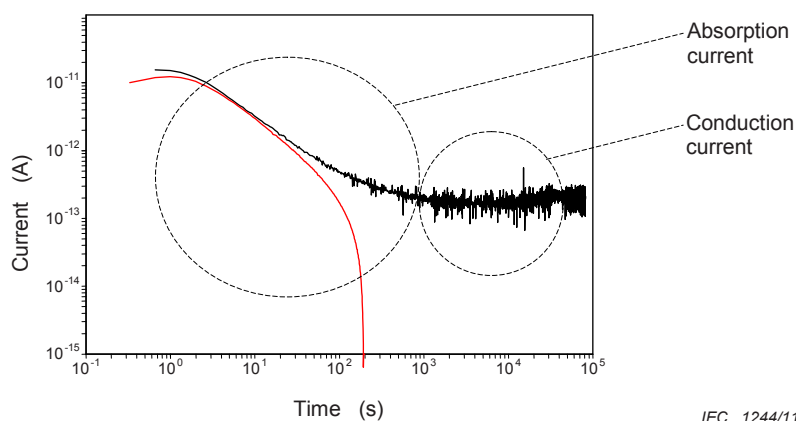


Figure A.5 – Charging/discharging current on HDPE film

References – Figures A.3, A.4 and A.5

CLARK, Frank M., *Insulating Materials for Design and Engineering Practice*, J. Wiley & Sons, 1962 (Figure A.3)

MONTANARI, G.C., MAZZANTI, G., PALMIERI, F., MOTORI, A. *Investigation of charge transport and trapping in LDPE and HDPE through space charge and conduction current measurement*, ICSD, June 2001, pp. 97-100

A.6 Adsorption

An increase in concentration of any component at the surface of a liquid or solid. Attachment of a gas, liquid or dissolved substance to a solid surface.

A.7 Ageing

Irreversible changes of the properties of EIS (electrical insulation system), that accumulates with time, due to action of one or more stresses.

A.8 Ageing (mechanical, thermal, electrical, environmental)

Irreversible changes of the properties of EIS (electrical insulation system), that accumulates with time, due to action of thermal, electrical, mechanical, environmental stresses.

Any property p , which has have a time trend correlated to the ageing state of the EIS (e.g. increasing as the electrical loss angle, or decreasing as the dielectric strength), is called diagnostic property or ageing marker.

When p reaches, under a given value of stress S_i , a certain value, known as end point p_L , the EIS has reached the end of the corresponding life L_i (see Figure A.6). The life line, intended as the time-to-failure (or time to maintenance) of the EIS, is generally plotted on a log-log graph for electrical and mechanical stresses, in a semilog graph, or Arrhenius graph, for thermal stress. The arithmetic mean or median point for each electrical ageing stress, obtained by having selected an end point value for the property P (see Figure A.7), may constitute the life line plot. Any failure time percentile can be used however.

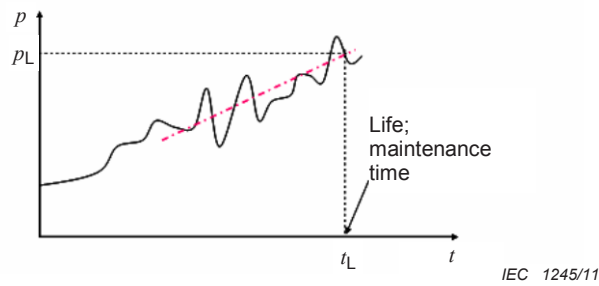


Figure A.6 – Property versus time behaviour, detection of threshold (end point, p_L) and maintenance time

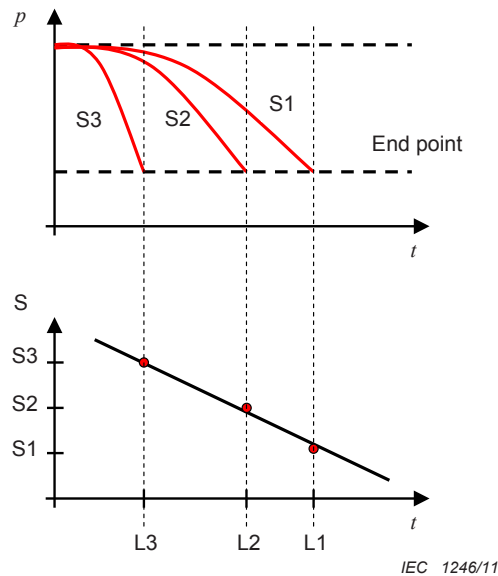


Figure A.7 – Correspondence between the ageing plots of the property p (in red), obtained at different stress levels, and the resulting life line

References – Figures A.6 and A.7

DISSADO, L.A., FOTHERGILL, J. C., *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, Peter Peregrins, London, 1992 (Figure A.6)

MONTANARI, G.C., *Insulation Diagnosis of High Voltage Apparatus by Partial Discharge Investigation*, 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials, 2006, June 2006 Page(s):1 – 11 (Figure A.7)

A.9 Bulk

Intrinsic volume – the main mass or body; the largest or principal portion. Some measurements such as resistance or dissipation factor (tan delta) give values of the bulk properties of the insulation.

A.10 By-product

A substance that is produced during the process of making, using or destroying an object, e.g. when burnt, plastic produces dangerous by-products.

A.11 Cavity

A small void or space inside a material.

A.12 Charge injection

The process by which charge carriers are forced to move into an insulating material, generally from the electrodes, under the effect of an electric field. Charges have to overcome a potential barrier to be injected. The injection mechanism is strongly affected by the electrode-insulator interface properties, and thus by the electrode-insulator contact, the temperature, the electric field amplitude and the polarity. The injected charge can be measured by various techniques, such as pulsed electro-acoustic method (PEA), laser-induced pressure pulse (LIPP), etc. An example of a charge injection is shown in Figure A.8.

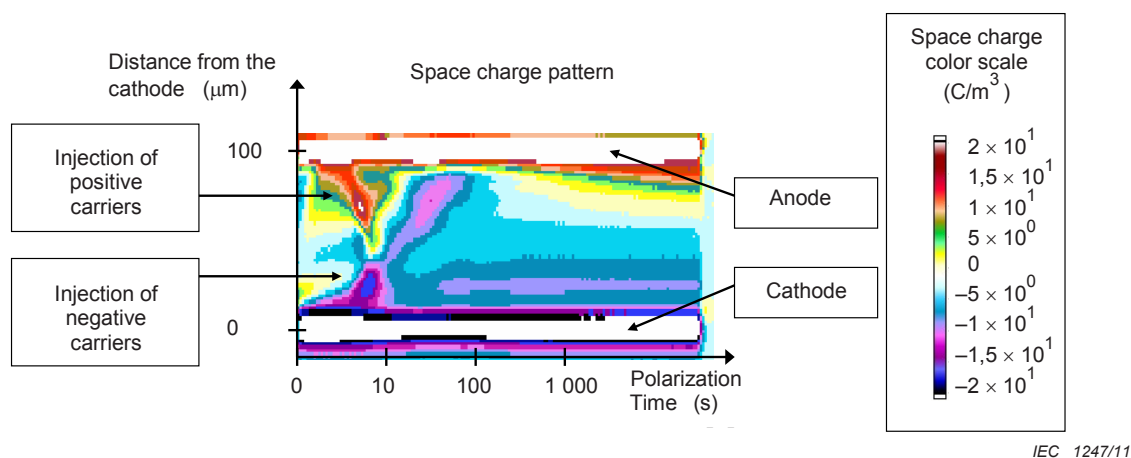


Figure A.8 – Example of charge injection of positive carriers (holes) from the anode and of negative charge carriers (electrons) from the cathode in a PE flat specimen, detected by space charge measurement performed by PEA method

References – Figure A.8

DISSADO, L.A., FOTHERGILL, J.C. *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, Peter Peregrins, London, 1992

MONTANARI, G.C., *The electrical degradation threshold of polyethylene investigated by space charge and conduction current measurements*, IEEE Trans. on Diel. El. Insul., Vol. 7, No. 3, pp. 309-315, June 2000

MONTANARI, G.C., *Dielectric material properties investigated through space charge measurements*, IEEE Trans. on Diel. El. Insul., Vol. 11, pp. 56-64, 2004

BOUFAYED, F., TEYSSÉDRE, G. LAURENT, C., LE ROY, S., DISSADO, L.A., SEGUR, P., MONTANARI, G.C., *Models of bipolar charge transport in polyethylene*, Journ. Appl. Phys., Vol. 100, pp. 104105.1-10, 2006

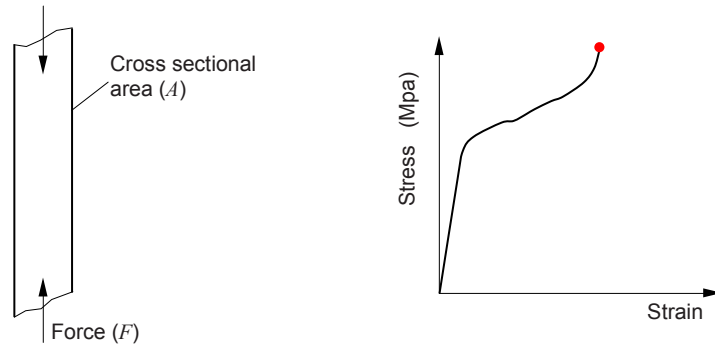
A.13 Compressive stress

Force that acts on a material in such a way that it tends to compress the material in the direction of the force.

$$\text{Compressive stress } (\sigma) = \text{Compressive force } (F) / \text{Original cross-sectional area } (A)$$

Compressive force is opposite to tensile force.

The compressive strength of a material is the value of uniaxial compressive stress reached when the material fails completely (red point on curve). A stress–strain curve would look similar to the curve shown in Figure A.9:



IEC 1248/11

Figure A.9 – Stress-strain curve for a typical material

- Yield point defines the end of the linear region.
- Below yield point $\sigma = E\varepsilon$ (Hooke's law) where E is the Young's Modulus for compression.
- Above yield point material behaves plastically and will not return to its original length once the load is removed.
- Measured in units of Pascals.

References – Figure A.9

IEC 60371-2, *Specification for insulating materials based on mica – Part 2: Methods of test*

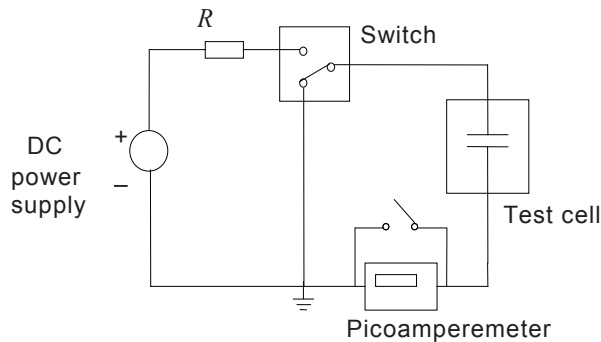
IEC/TR 62039, *Selection guide for polymeric materials for outdoor use under HV stress*

A.14 Conduction current

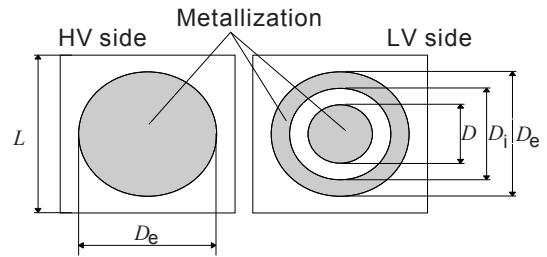
Applying a voltage step to a dielectric between two electrodes, a current flows which has three components: the charging current, that represents the fast response associated with a change in the electric field amplitude, the absorption current, associated with the polarization transient and the conduction current, which represents the steady state of the current depending upon the applied field and temperature.

The conduction current is measurable applying a d.c. voltage to an insulating specimen and waiting for the steady state, when all the contributes given by the charging and absorption currents become negligible.

The example of measurement set-up, shown in Figures A.10, A.11, and A.12 is the same used for the absorption current measurement.



IEC 1242/11

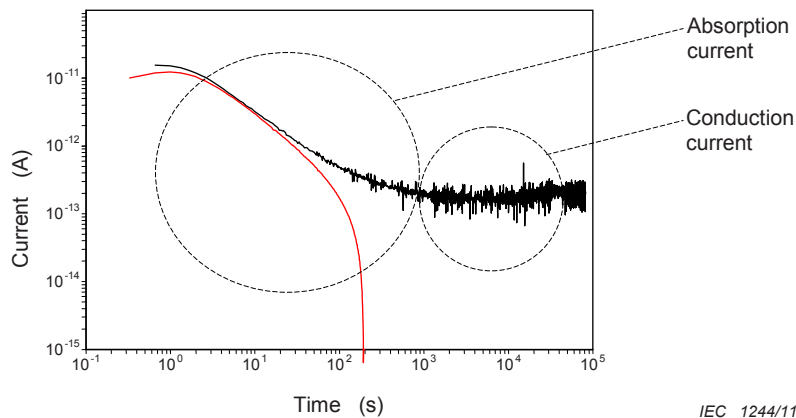


IEC 1243/11

NOTE Metallization is necessary to connect the sample to the electrodes.

Figure A.10 – Scheme of measurement set-up for charging/discharging current

Figure A.11 – Example of sample preparation



IEC 1244/11

Figure A.12 – Charging/discharging current on HDPE film

Conduction current measurements can be performed at different values of electrical field, E , in order to estimate the threshold value, E_T , after which the insulating current-voltage characteristics show a transition from ohmic behaviour (where the conductivity depends only on temperature) to high field behaviour (where space charge accumulation affects conduction mechanism).

The temperature and field dependency of conductivity, σ , are taken into account in the following equation:

$$\sigma(T, E) = A \exp\left(-\frac{\Delta U}{k_B T}\right) \frac{\sinh\langle B|E\rangle}{|E|} \quad (\text{A.1})$$

where ΔU is the thermal activation energy, k_B Boltzmann's constant and A and B are constants.

Examples of current measurements on PET films are shown in Figures A.13 and A.14, in order to emphasize the strong dependency of conductivity on temperature and electrical field.

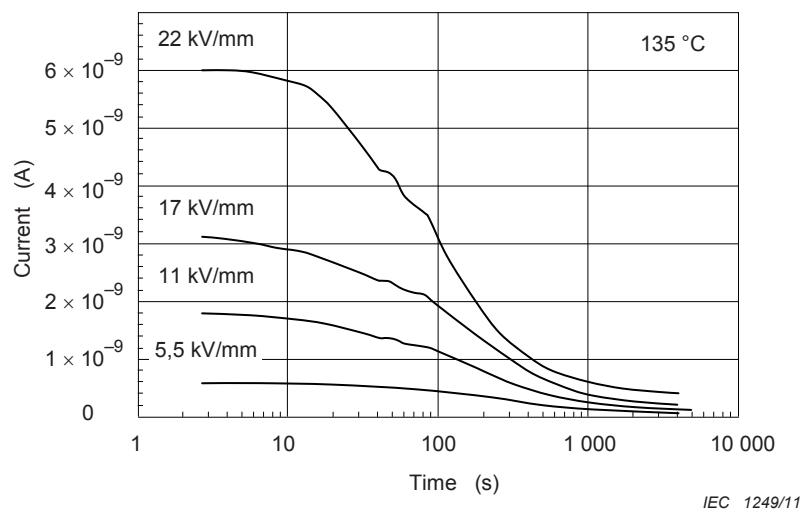


Figure A.13 – Charging current at 135 °C and different values of DC electrical field

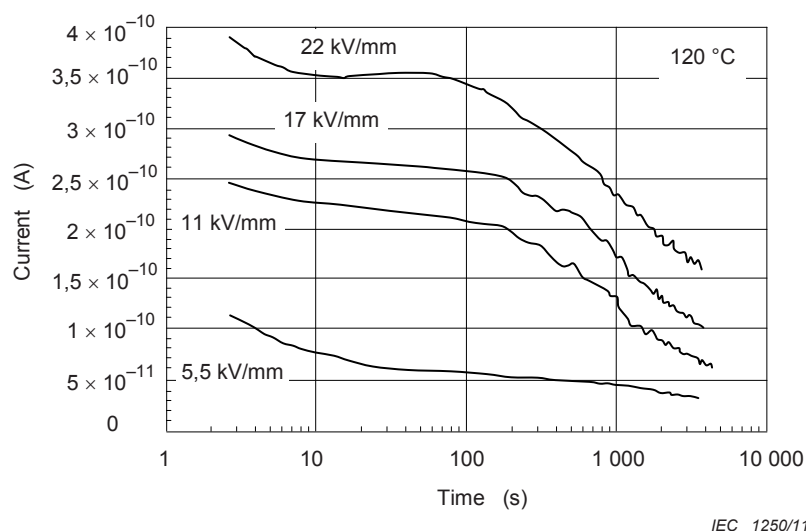


Figure A.14 – Charging current at 120 °C and different values of DC electrical field

References – Figures A.10, A.11, A.12, A.13 and A.14

CLARK, Frank M., *Insulating Materials for Design and Engineering Practice*, J. Wiley & Sons, 1962 (Figure A.10)

MONTANARI, G.C., MAZZANTI, G., PALMIERI, F., MOTORI, A. *Investigation of charge transport and trapping in LDPE and HDPE through space charge and conduction current measurement*, ICSD, June 2001, pp. 97-100 (Figure A.10)

DISSADO, L.A., FOTHERGILL, J.C., *Electrical degradation and breakdown in polymers*, Peter Peregrinus Ltd, ISBN 0-86341-196-7, 1992 (Figure A.10)

KUMAR, A., PERLMAN, M.M., *Steady-state conduction in high density polyethylene with field-dependent mobility*, Jour. App. Phys., Vol. 71, No.2, pp. 735 – 738, 1992 (Figure A.10)

MONTANARI, G.C., GHINELLO, I., MOTORI, A., DAS GUPTA, D. *An investigation of conduction mechanisms at high-field in PET*, IEEE Conf. Electr. Insul. Diel. Phen., pp. 451-454, 1997 (Figures A.10, A.13 and A.14)

BODEGA, R., MONTANARI, G.C., MORSHUIS, P.H.F., *Conduction current measurements on XLPE and EPR insulation*, IEEE Conf. Electr. Insul. Diel. Phen., pp. 101-105, 2004 (Figures A.10, A.11 and A.12)

A.15 Contaminant (impurity)

A foreign substance of material in an insulating solid, liquid or gas which usually has deleterious effect on one or more properties.

A.16 Continuity fault/discontinuity

The presence of a change of properties between two points of the same material.

A.17 Corona

According to ASTM D 1868-73, corona is a type of localized discharge resulting from transient gaseous ionization in an insulation system when the voltage stress exceeds a critical value.

Corona can occur at electrical conductors, such as HV lines. The high electrical field gradients at conductors having curved shape, sharp points or edges will lead to breakdown of the surrounding air. There exist positive and negative corona processes having different ignition and breakdown behaviour. Corona is gas ionization and is accompanied by light emission and detectable sound waves (example Figure A.15).

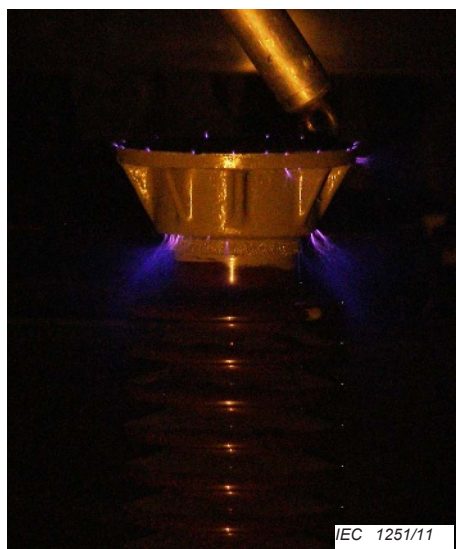


Figure A.15 – Corona at post insulator head



Figure A.16 – Corona on top and arcing to ground

References – Figures A.15 and A.16

SMIT, J. University of Technology Delft, *unpublished pictures*.

A.18 Corrosion

Surface attack or impairment caused by ionic transfer under a potential difference.

Corrosion means the breaking down of essential properties in a material due to chemical reactions with its surroundings. Corrosion also includes the dissolution of ceramic materials and can refer to discoloration and weakening of polymers by the sun's ultraviolet light.

A.19 Corrosive substance

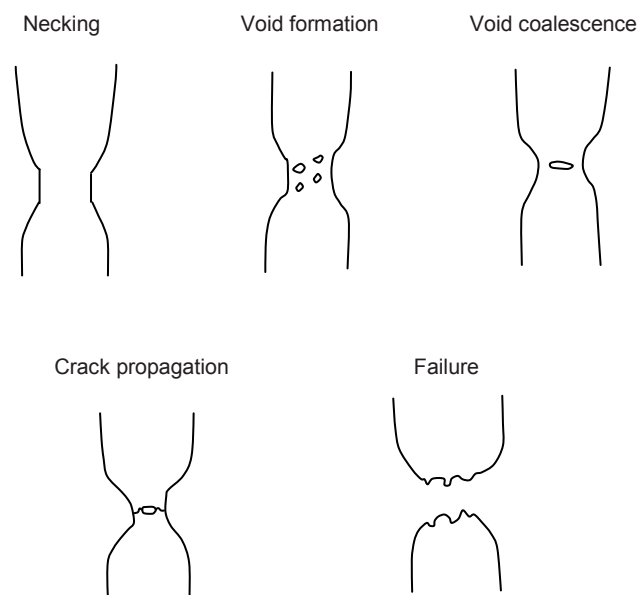
Will destroy or irreversibly damage another substance with which it comes in contact.

A.20 Crack, crack(ing)

To break, with or without quite separating into parts. The rupture of a material/insulator to depths equal to or greater than 0,1 mm.

Crack separation – there are three stages of fracture:

- Stage I, or the opening mode, is characterized by a stress perpendicular to the crack faces.
- Stage II, the sliding or forward shear stage, has a shear stress normal to the crack front.
- Stage III is the tearing stage, with a shear stress parallel to the crack front.



IEC 1253/11

Figure A.17 – Stages of mechanical ductile fracture (cracking)
(source unknown)

References – Figure A.17

IEC 60811-3-1, *Common test methods for insulating and sheathing materials of electric cables – Part 3: Methods specific to PVC compounds – Section One: Pressure test at high temperature - Tests for resistance to cracking*

A.21 Creep

Continued deformation of material under constant stress. Creep is the term used to describe the tendency of a solid material to slowly move or deform permanently under the influence of stress. It occurs as a result of long term exposure to levels of stress that are below the yield strength or ultimate strength of the material. Creep always increases with temperature.

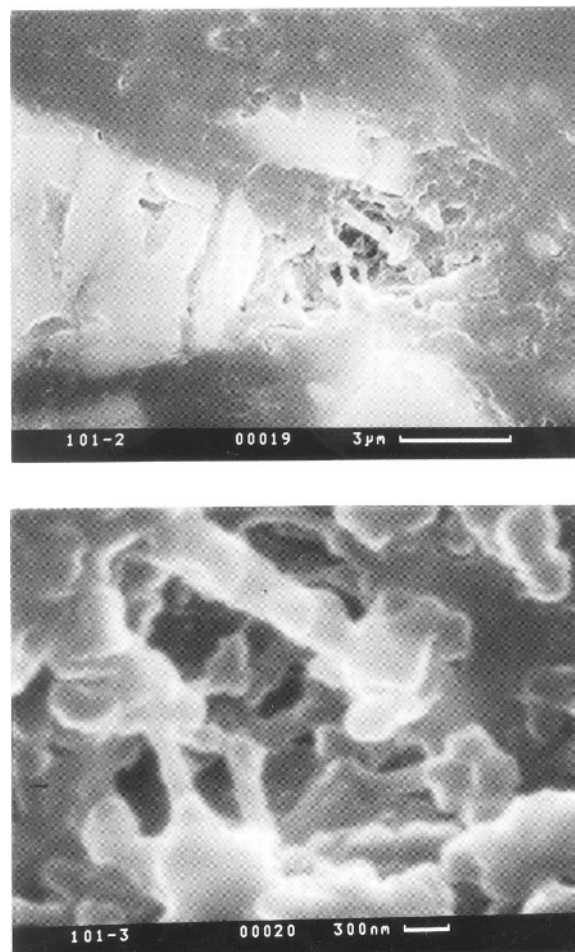
A.22 Defect

Imperfection in the state of an item (or inherent weakness) which can result in one or more failures of the item.

An imperfection, deficiency, deformity or any kind of shortcoming in the structure of a material that leads to a partial loss of functionality of that material.

An insulating material may contain a void due to improper mixing and degassing in the manufacturing stage. Depending on the shape and size of such a gas containing a void, a partial discharge may occur at a certain voltage stress.

In an epoxy resin structure, for example, the polymer chains are randomly oriented. Due to cross-linking, internal stress causes locally oriented or so-called crystallized areas with other mechanical or electrical properties. This might function as the initiation point for an internal weakness of mechanical or electrical kind.



IEC 1254/11

Figure A.18 – Photo showing orderings in epoxy structure and void

References – Figure A.18

SMIT, J.J., courtesy of KEMA, NL

A.23 Delamination

Separations of layers of material. Delamination is a mode of failure of laminated composite materials. Repeated cyclic stresses, impact, and so on can cause layers to separate, forming a mica-like structure of separate layers, with significant loss of mechanical toughness. Delamination is an insidious kind of failure as it develops inside of the material, without being obvious on the surface, much like metal fatigue.

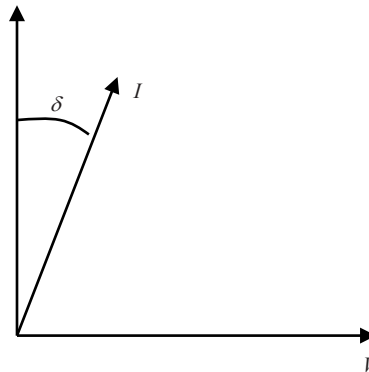
A.24 Depolymerization

A chemical process that separates a polymer in monomers or a polymeric compound. An example of depolymerization is the breakdown of cellulose paper due to thermal ageing.

A.25 Dielectric loss

The power absorbed from a time-varying electric field in a dielectric and usually dissipated as heat.

$$\begin{aligned} \tan(\delta) &= \frac{\text{Real power}}{\text{Reactive power}} \\ &= \frac{V \times I \sin(\delta)}{V \times I \cos(\delta)} \end{aligned}$$



IEC 1255/11

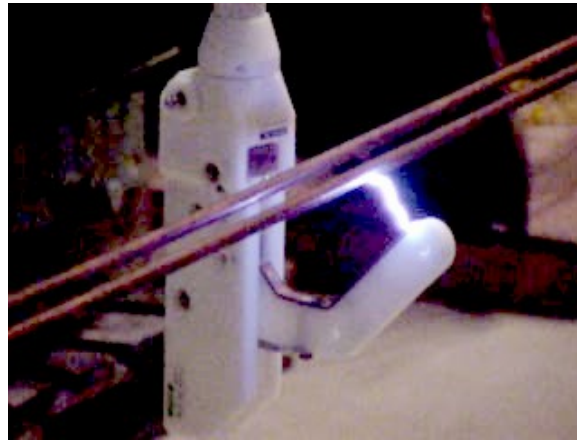
Dielectric loss angle = the value of arc tan of the dielectric dissipation factor. Dielectric loss = power absorbed from a time-varying electric field by a polarized substance, excluding absorbed power due to the conductivity of the substance.

A.26 Discharge

A discontinuous movement of electrical charges through an insulating medium, initiated by electron avalanches and supplemented by secondary processes.

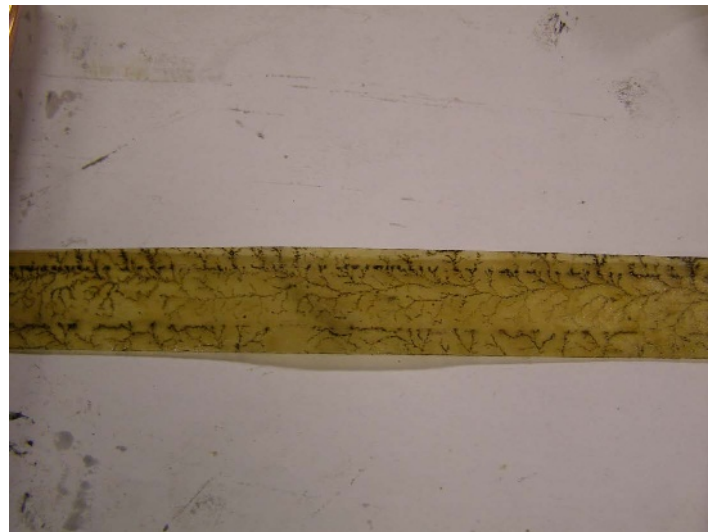
A discharge can develop into an arc, which occurs at high field emission conditions.

A so-called partial discharge occurs when a discharge is not fully bridging the insulation gap. It may cause the formation of electrical trees in the bulk or along the surface of an insulation (see tracking).



IEC 1256/11

Figure A.19 – Discharge between conductors through air



IEC 1257/11

Figure A.20 – Paper insulation degraded by electrical surface discharges

References – Figures A.19 and A.20

SMIT, J.J., Delft University of Technology, NL

A.27 Discontinuity

A discontinuity is any local separation of materials or a break (fracture) in a material.

A.28 Electric breakdown (including electrical strength)

The term ‘electric breakdown’ is used when a dielectric between two electrodes, subject to a constant or increasing voltage, loses all its insulation properties and becomes conductive, resulting in a short-circuit between the electrodes. Under sufficient electrical stress, electrical breakdown can occur within solids, liquids, or gases.

When an increasing voltage is applied to a dielectric, the minimum value of the electrical field at which the breakdown occurs, causing the rupture of the insulation material, is named ‘electric (or dielectric) strength’.

Measurements of electric strength or breakdown voltage on electrical insulating materials constitute a major characterization feature, besides being a diagnostic tool for ageing evaluation and endurance characterization. Indeed, electric strength is a property sensitive to electrical and thermal ageing, significantly influenced by degradation phenomena occurring in insulating materials.

Electric strength measurements are performed at rising voltage (with constant rate or with a step-by-step procedure) and the value obtained shall be qualified by reference to the type of voltage applied, the method of its application, the kinds of testing electrodes, the thickness of the insulation samples, the temperature and the conditioning treatment to which the material has been exposed before and during the actual test.

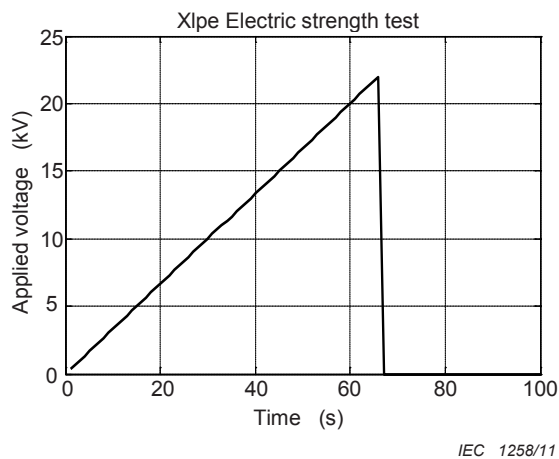


Figure A.21 – Example of electric strength test on XLPE sample 0,2 mm thick

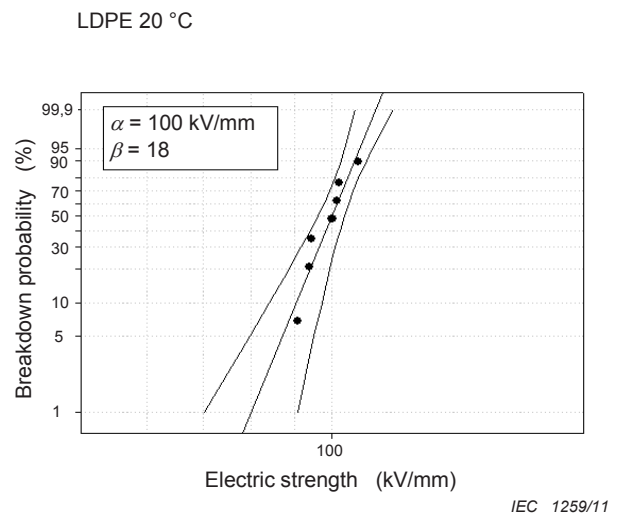


Figure A.22 – Two parameters Weibull plot electric strength results performed on seven XLPE specimens, 0,2 mm thick

The two-parameter Weibull function is generally used to process the data obtained from electric strength measurement:

$$F(E) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (\text{A.2})$$

where F is the cumulative failure probability and α and β are the scale and the shape parameters.

Some cases exist where a three parameter Weibull distribution fits better the breakdown data (e.g. the short-term voltage breakdown data), but, in the majority of the cases, the use of the two-parameter Weibull distribution is convenient as it allows simple procedures for parameter and confidence interval calculations.

References – Figure A.21

CLARK, Frank M., *Insulating Materials for Design and Engineering Practice*, J. Wiley & Sons, 1962

Electric strength tests performed at LIMAT lab., University of Bologna.

IEC 60216-1, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 1: Ageing procedures and evaluation of test results*

IEC/TS 61251, *Electrical insulating materials – AC voltage endurance evaluation – Introduction*

IEC 61710, *Power law model – Goodness-of-fit tests and estimation methods*

References – Figure A.22

Montanari, G.C. University of Bologna IT

A.29 Electric

Containing, producing, arising from, or actuated by electricity.

NOTE Examples of usage of the term 'electric': electric energy, electric lamp, electric motor, electric quantity.

A.30 Electrical insulating material (EIM)

Material with negligibly low electric conductivity, used to separate conducting parts at different electrical potentials.

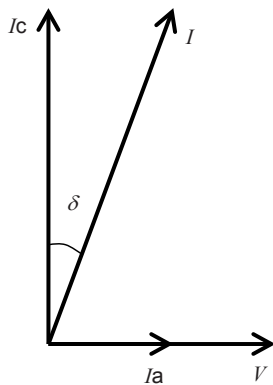
[IEC 60050-212:2010, 212-11-01, modified]

A.31 Electrical insulation system

Insulating structure containing one or more electrical insulation material (EIM) together with associated conducting parts employed in an electro technical device.

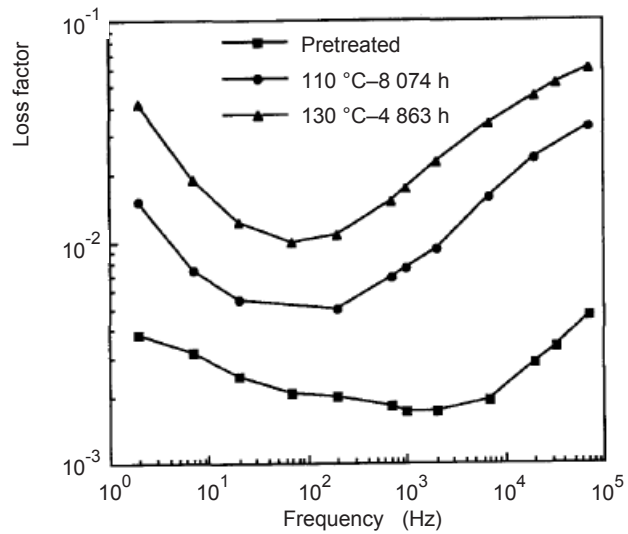
A.32 Electrical losses

Energy loss associated with an electric field in a material and usually dissipated as heat. The electrical losses of a dielectric material are given by conduction (d.c.) losses, associated with Joule effect generated by the conduction current through the dielectric, and the hysteresis losses, given by the delay of the polarization P with respect to the electric field E that creates a hysteresis loop on the $P - E$ plane and, thus, energy loss each cycle of a.c. voltage. Under a sinusoidal electric field, the current absorbed by a real dielectric material does not lead the voltage, V , by 90° , as the current of an ideal dielectric I_c , but it has an active component in phase with the voltage, I_a , as shown in Figure A.23. The actual current, I , is delayed with respect to I_c of an angle, δ , called the "loss angle" and the tangent of δ is called "loss factor". The loss factor varies as a function of temperature and frequency in a dielectric material and the variation of the loss factor spectrum of an EIS during its life can be used as ageing marker.



IEC 1260/11

Figure A.23 – Loss angle of a dielectric



IEC 1261/11

Figure A.24 – Loss factor for pre-treated and thermally aged (at 110 °C and 130 °C) XLPE cables measured at 90 °C plotted vs. frequency

References – Figures A.23 and A.24

ZAENGL, W.S., *Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. I. Theoretical considerations*, IEEE El. Ins. Magazine Vol.19 n. 5, pp. 5-19, 2003 (Figure A.23)

JONSCHER, A.K., *Dielectric relaxations in solids*, Chelsea Dielectric Press, London, 1983 (Figure A.23)

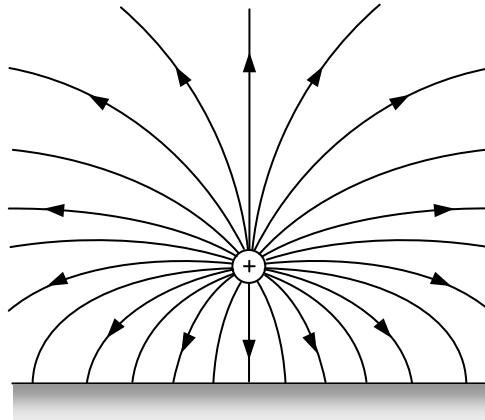
MONTANARI, G.C., DAS GUPTA, D.K., *Polarization and Space Charge Behavior of Unaged and Electrically Aged Crosslinked Polyethylene*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7 No. 4, August 2000 (Figure A.23)

MOTORI, A., SANDROLINI, F., MONTANARI, G.C., LOGGINI, M. *Electrical properties for detection of thermal ageing in XLPE cable models*, Properties and Applications of Dielectric Materials, 1991, Proceedings of the 3rd International Conference on, 8-12 July 1991 Page(s):761 - 764 vol.2

A.33 Electrical stress (a.c., d.c., f, transients)

Electric field which acts on equipment. If the stress exceeds the threshold of the electric strength of the insulation, ageing or breakdown occurs. The stress may be described by characteristics such as peak amplitude, rise time, duration or impulse.

An electric field is created in a space that surrounds a charged body, and results in a force exerted on any other charges placed within the field.



IEC 1262/11

Figure A.25 – Field lines from a positive charge above a plane conductor

References – Figure A.25

IEC 60243-1, *Electrical strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies*

IEC 60243-2, *Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 2: Additional requirements for tests using direct voltage*

IEC 60243-3, *Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 3: Additional requirements for 1,2/50 μ s impulse tests*

IEC 60664-4, *Insulation coordination for equipment within low-voltage systems – Part 4: Consideration of high-frequency voltage stress*

A.34 Electrical treeing

Treeing is an electrical pre-breakdown phenomenon. Tree-like growths, which consist of non-solid or carbonized micro-channels, can occur at stress enhancements such as protrusions, contaminants, voids or water trees subjected to electrical stress for extended time periods. The term is applied to that type of damage which progresses through electrical insulation under electrical stress so that, if visible, its path resembles the form of a tree. After initiation at a point of high and divergent stress, treeing can progress in insulation by partial discharge. Electrical trees consist of hollow channels resulting from material decomposition.



Figure A.26 – Electrical tree

Electrical tree initiation caused by injection and extraction of charges from the stress concentration into the insulation. The charge motion causes damage to the insulation and the eventual formation of a crack.

Growth of an electrical tree is by the action of partial discharges. Trees can give characteristic partial discharge patterns.

Different tree shapes depending on stress and frequency.

Electrical trees permanently lowers the AC and impulse strength of insulation.

Most extruded insulation are susceptible to electrical tree degradation.

References – Figure A.26

DISSADO, L.A., FOTHERGILL, J.C., *Electrical degradation and breakdown in polymers*, Peter Peregrinus Ltd, ISBN 0-86341-196-7, 1992

A.35 Electrical

Pertaining to electricity, but not having its properties or characteristics.

NOTE Examples of usage of this concept: electrical handbook.

A.36 Erosion

- (1) The loss of material by leakage current, corona discharge, or partial discharge. Irreversible and non-conducting degradation of the surface of the insulator that occurs by loss of material, which may be uniform, localized or tree shaped.
- (2) Deterioration occurs by the abrasive action of fluids, usually accelerated by the presence of solid particles of matter in suspension.



Figure A.27 – EPDM ashing and erosion on fitting

References – Figure A.27

HAVERKAMP, W.B., *unpublished picture*.

A.37 External

Relating to the outside of an object.

External insulation = the distances in atmospheric air, and along the surfaces in contact with atmospheric air of solid insulation of the equipment which are subject to electric stresses and to the effects of atmospheric and other external conditions such as pollution, humidity, vermin, etc.

(Internal insulation comprises solid, liquid or gaseous parts of insulation which are protected from the atmosphere).



IEC 1265/11

Figure A.28 – Failing external insulation –Example 1



IEC 1266/11

Figure A.29 – Failing external insulation –Example 2

Reference – Figures A.28 and A.29

Source: http://9engineer.com/index.php?m=article&a=show&article_id=2186 (2011-01-09)

A.38 Extrinsic electrical ageing

Irreversible changes of properties of an EIS caused by action of ageing factors on unintentionally introduced imperfections in the EIS.

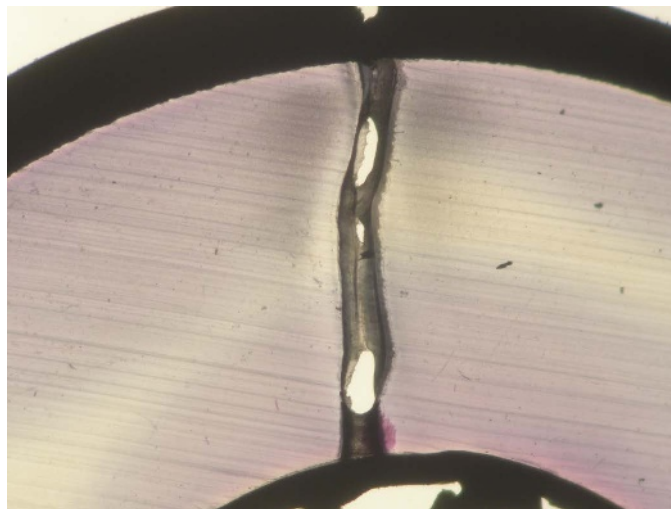
A.39 Failure

Inability of an EIS or EIM to perform satisfactorily in service. The termination of the ability of an item to perform a required function. Failure isn't necessarily the electrical breakdown of the insulation function. In general, a criterion for the loss of dielectric performance of an EIS has to be set, beyond which reliable functioning is considered unacceptable. For instance, this could be the level of dielectric losses, partial discharges or specific gas in oil level at given conditions.

ageing failure;
wearout failure
critical failure

Failure whose probability of occurrence increases with the passage of time, as a result of processes inherent in the item.

Failure which is assessed as likely to result in injury to persons, significant material damage or other unacceptable consequences



IEC 1267/11

Figure A.30 – Critical failure of solid cable insulation (XLPE) by electrical breakdown

References – Figure A.30

STEENNIS, E.F., courtesy of KEMA, NL.

A.40 Fatigue

Degradation of material when submitted to repeated cycles of strain or stress below its tensile strength.

Mechanical examples: fatigue cracks on fibre reinforced polymeric rods of an OLTC of a power transformer; HV line connectors.

A.41 Flashover

Breakdown between electrodes in a gas or a liquid or in vacuum, at least partly along the surface of solid insulation.

NOTE The presence of carbonized channels or punctures through the specimen distinguishes tests where breakdown occurred, from others where flashover occurred.

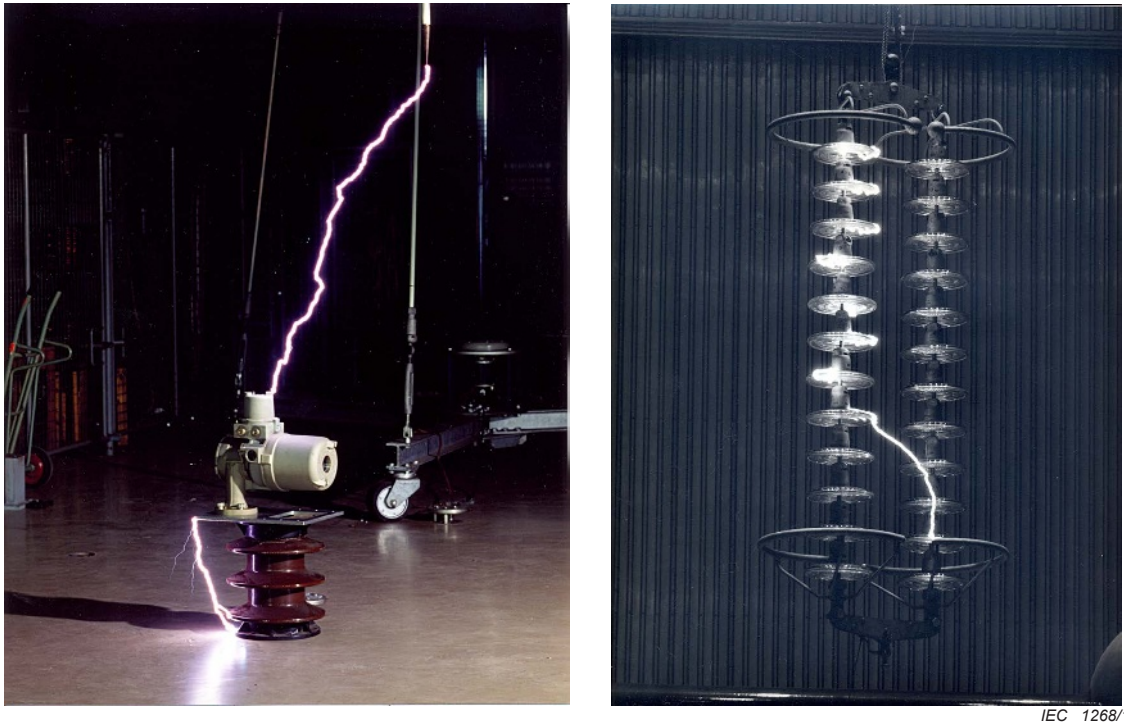


Figure A.31 – Example flashover

References – Figure A.31

SMIT, J.J., Delft University of Technology, NL.

A.42 Gradient

A graded change in the magnitude of a scalar function, e.g. temperature or voltage.

A.43 Installation

The whole of a system of machines, apparatus and accessories, sometimes including the buildings and grounds on which they are located, when set up and arranged for practical working, as in electric lighting, transmission of power, etc.

A.44 Substation installation



IEC 1269/11

Figure A.32 – Substation – Outdoor installation

References – Figure A.32

Siemens Press Pictures, Siemens AG, Munich/Berlin

A.45 Insulation, extruded

Insulation consisting generally of one layer of a thermoplastic or thermosetting material and applied by an extrusion process.

In extruded cables, the insulation is extruded along with a semiconducting layer (carbon filled polymer) which is extruded directly over the conductor. Another semiconducting layer is extruded over the insulation. The layers can be extruded in one process (triple head extrusion) or in two processes (tandem).

A.46 Insulation, laminated

Insulation formed in layers typically from tapes. Typically, the tapes are either cellulose paper or polypropylene or a combination of the two. The tapes are impregnated with an insulating fluid to increase the electrical breakdown strength by the elimination of any gas in the fibrous tape or the butt gaps between adjacent layers. Paper tapes are used as insulation of power transformers and medium-voltage and high-voltage transmission class cables. Polypropylene paper laminate (PPL) is used in high-voltage transmission cables.

Impregnated paper insulation is one of the oldest types of insulation for high-voltage cables, with some cables being in operation for more than 80 years.

A.47 Insulation

Material with a high electrical resistance that separates conductive parts at different electrical potentials. Insulation can be gaseous, for example air or SF₆, liquid, for example, mineral, synthetic or silicone oil, or solid, for example, porcelain, epoxy resin, polyethylene.

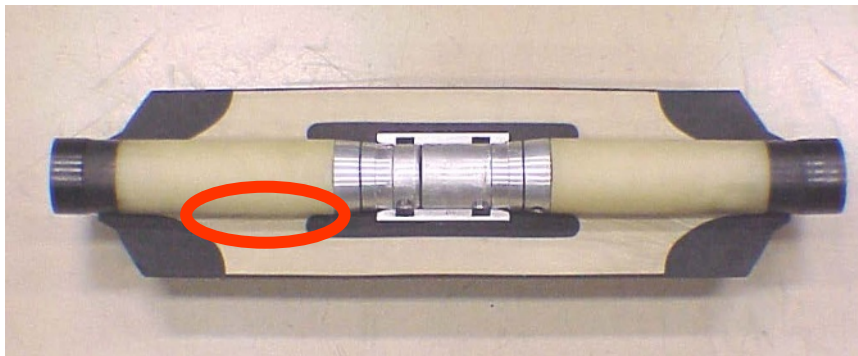
Important properties of insulation in practical equipment are

- high electrical breakdown strength,
- low electrical conductivity,
- high thermal conductivity,
- thermal stability,
- good mechanical properties
- easy to manufacture
- good long term performance

A.48 Interface

A surface forming a common boundary between two materials.

Macroscopic and microscopic interfaces are important for dielectric evaluation, because both are a major reason for deviating or exceptional properties. For example, in HV cable joints, different insulation materials have macroscopic interfaces. As in Figure A.33, the XLPE cable insulation faces the silicon rubber enclosing material of the joint. Improper roughness/flatness quality of the interface layer causes local electrical stresses due to which interfacial tracking finally leads to breakdown.



IEC 1270/11

Figure A.33 – HV cable joints different insulation materials

Microscopic interfaces exist in composite materials such as filled polymers, e.g. quartz filled particles having microscopic interfaces with epoxy resin matrix, which can be made visible by electron-microscopy tools(photo). In the case of nanocomposites, the filler particles are of nanometer size, which can provide exceptional improvements of thermal/mechanical/electrical properties as a consequence of the large effective surface of interface present in the material. These properties may surpass the values obtained for the constituent materials.

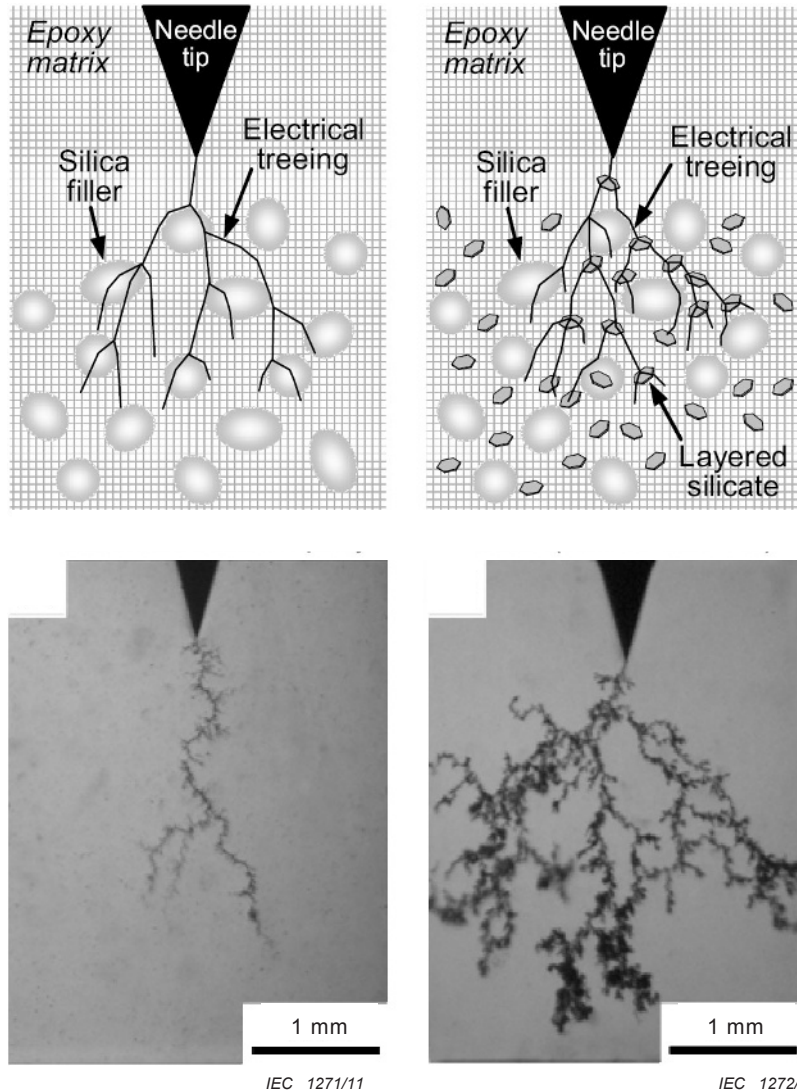


Figure A.34a – Conventional filled epoxy

Figure A.34b – NNMC (OMLS 1,5 vol %)

Figure A.34 – Internal interfaces in epoxy structure and void

References – Figures A.33 and A.34

Courtesy of Prysmian (Figure A.33)

IMAI, T.; SAWA, F.; OZAKI, T.; SHIMIZU, T.; KIDO, R.; KOZAKO, M.; TANAKA, T., *Effects of Nano- and Micro-filler Mixture on Electrical Insulation Properties of Epoxy Based Composites, Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, 2006 (Figure A.34)

A.49 Intrinsic breakdown

Short time electrical breakdown occurring in the absence of microscopic or macroscopic defects in the insulating material. The intrinsic breakdown can be caused by mechanical, electrical or thermal mechanisms, in which an overstress causes the breakdown of the EIS. Typical mechanisms for the intrinsic breakdown are the self-propagating crack opening due to mechanical stress orthogonal to the direction of the applied field (Figure A.35) and the electron avalanche multiplication mechanism, via scattering events. Intrinsic electrical breakdown can be measured by tests under impulsive voltage.

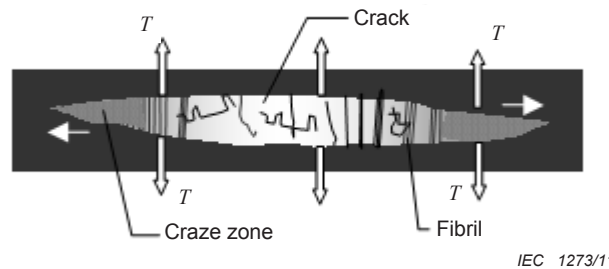


Figure A.35 – Example of craze and crack development in an inter-lamellar space under mechanical tension T

References – Figure A.35

JONES, J.P., LLEWELLYN, J.P. and LEWIS, T.J. *The Contribution of Field-Induced Morphological Change to the Electrical Aging and Breakdown of Polyethylene*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, No. 5; October 2005

SERRA, S., MONTANARI, G.C. and MAZZANTI, G. *Theoretical model of inception mechanism and growth of defect-induced damages in XLPE cable*, J. Appl. Phys., Vol. 98, pp. 034102.1-034102.15, 2005

CLARK, Frank M., *Insulating Materials for Design and Engineering Practice*, John Wiley, 1962

A.50 Intrinsic electrical ageing

Ageing under the influence of the material itself, i.e. under normal operating condition and in absence of defects. In properly designed EIS the intrinsic ageing rate is usually very slow and it can be neglected, in general, under normal operation stresses.

A.51 Loss

Reduction in the capability of an object to a level which results in the gradual loss of equipment capability to perform its intended function.

Loss of insulation integrity, for instance due to 50 % length of water treeing, which in turn leads to electrical treeing and breakdown of the cable immediately.



Figure A.36 – Water treeing

IEC 1274/11

References – Figure A.36

STEENNIS, E.F., courtesy of KEMA, NL.

A.52 Melting

Melting is a process that results in the phase change of a substance from a solid to a liquid state.

The internal energy of a solid substance is increased (typically by the application of heat) to a specific temperature (called the melting point) at which it changes to the liquid phase.

Substances melt at a constant temperature, the melting point. Further increases in temperature (even with continued application of energy) do not occur until the substance is molten.

The melting of a solid insulation results in a sudden change of the mechanical properties.

A.53 Moisture

Water dispersed as vapour in a gas, condensed on a surface, or absorbed in a solid or a liquid.



IEC 1275/11

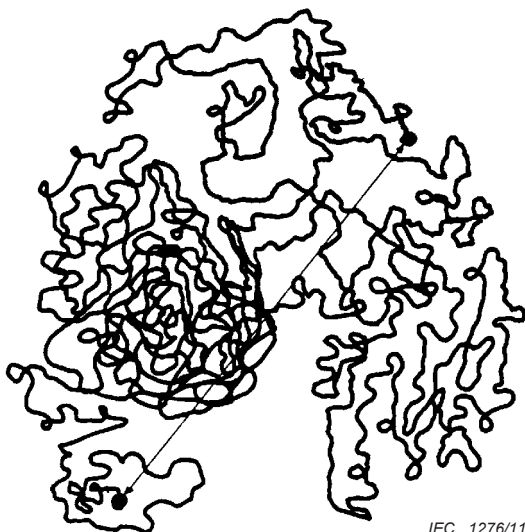
Figure A.37 – After 11 years in service UV and moisture impact

References – Figure A.37

HAVERKAMP, W.B., *unpublished picture*.

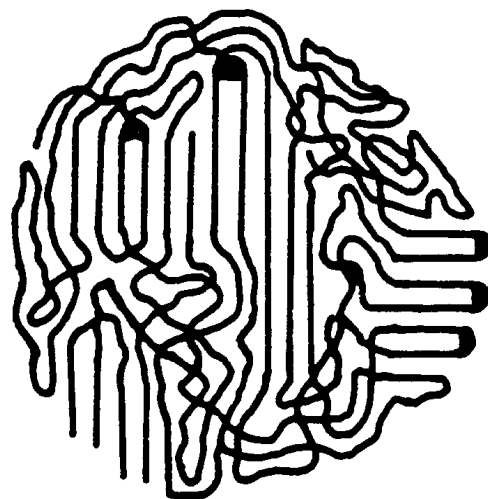
A.54 Morphology

The form and structure of a material/substance. When the chains of molecules of a material are arranged randomly the material has an amorphous morphology. However, when the chains are arranged in parallel or in some other orderly arrangement, the morphology is semi-crystalline as in many thermoplastic polymers.



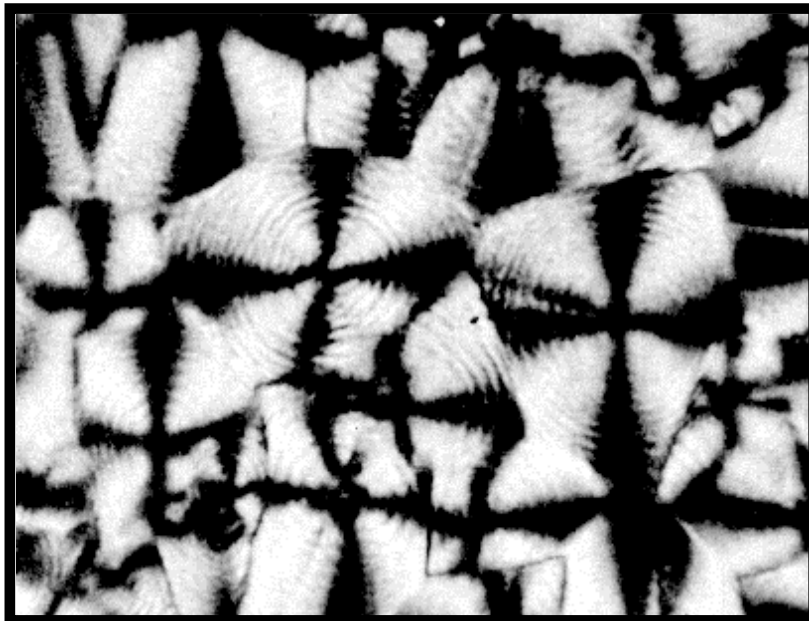
IEC 1276/11

Figure A.38 – Random (amorphous) structure of a molecular chain



IEC 1277/11

Figure A.39 – Oriented structure (semi-crystalline) of a molecular chain



IEC 1278/11

Figure A.40 – Typical morphology of melt-grown polyethylene spherulites

References – Figures A.38, A.39 and A.40

LI, Christopher Y.; *Polymer Thermal Analysis*, Presentation Drexel University, 2002

A.55 Partial discharge (including partial discharge pulse and surface discharge)

A partial discharge (PD), is a localized electrical breakdown that only partially bridges the insulation between conductors and which can or cannot occur adjacent to a conductor.

Discharges take place in voids within the solid or liquid dielectric, in gases and also along the boundary between different insulating materials. A PD occurs when the following two conditions are satisfied:

- a free electron is available in the gas inside the void to start the electron avalanche;
- the field inside the cavity exceeds the inception field.

The latter condition occurs when the energy acquired by an electron, accelerated by the electric field in the free path between two subsequent impacts with gas molecules or atoms, is on average large enough to ionize a new molecule or atom.

PD are generally low but concentrated energetic phenomena which have, however, energy large enough to create a local damage in organic dielectrics (breaking of polymeric chains, leading to oxidation and formation of acids) and to cause erosion of the dielectric material, resulting, after accumulation of the damage, in insulation system failure.

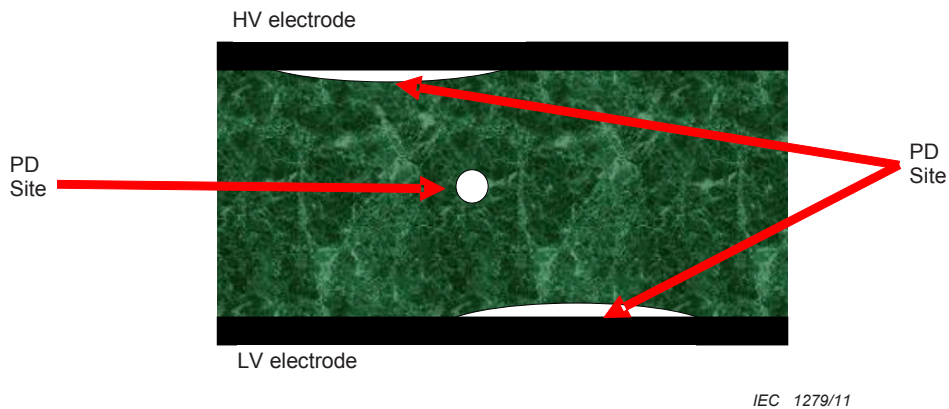


Figure A.41 – Areas in which PD generally occur

Defects occurring in insulation systems can be grouped into three macro-classes:

- internal PD, occurring in gas filled cavities surrounded by solid dielectric or by solid dielectric and metallic electrodes involving significant components of electrical fields orthogonal to the electrode surfaces;
- surface PD, that develop on surfaces of solid insulating materials involving significant field component tangential to the surface;
- corona PD, which are produced in open air (gas).

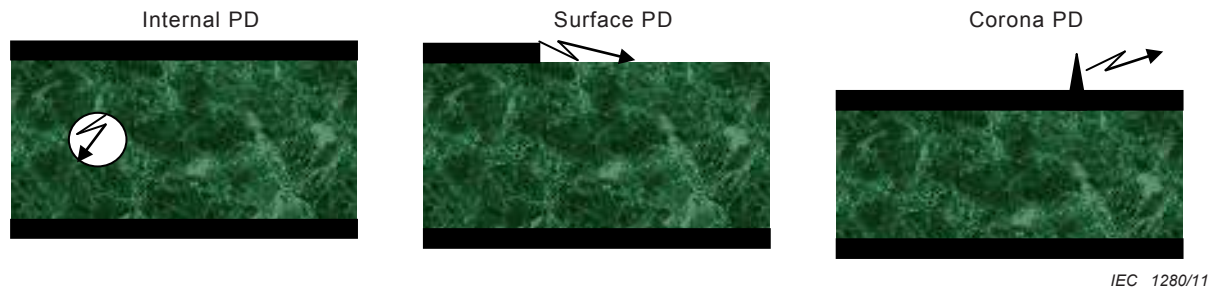


Figure A.42 – Classes of defect – Internal, surface and corona PD

The application of PD diagnosis to electrical systems represents a fundamental tool for quality control and risk assessment of electrical apparatuses, for which it is of fundamental importance to be able to identify the type of PD source and reject noise.

Digital signal analysis is the basic tool of PD identification and diagnosis as every PD event generates a pulse having a large frequency content (from the MHz to the GHz range) which propagates from the PD site through the lowest impedance path.

In general, the measurement system records electrical signals associated with the pulsive discharge current leaving the equipment under test (EUT), as the voltage drop on some detection impedance (generally a 50 Ω resistor) or the current at the secondary winding of a current transformer.

An amount of charge can be sometimes associated with the local voltage drop at the PD site that is not directly measurable. Indeed, from the voltage drop at EUT it may be possible to calculate the apparent charge value, Q , that is an underestimation of the amount of charge locally involved at the PD site. This charge quantity represents that charge which, if injected within a very short time between the terminals of the EUT in a specified test circuit, would give the same reading on the measuring instrument as the PD current pulse itself (calibration

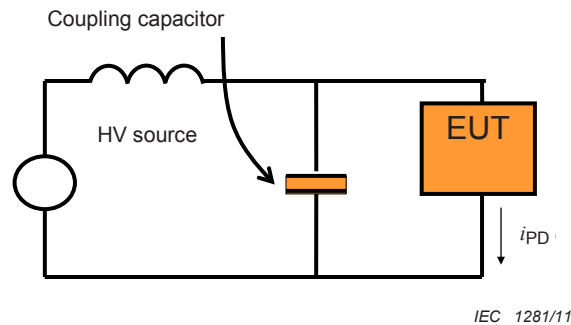


Figure A.43 – Basic PD measurement circuit

Standards (e.g. IEC 60270) provide operative methods to estimate the PD apparent charge through calibration procedures that allows the apparent charge, expressed in pC, to be estimated by multiplying the voltage peak of the detected PD pulses by a calibration constant.

In order to acquire PD pulses, it is necessary to use a low-impedance path to force the PD current (high-frequency components) out the equipment under test (EUT), generally through a coupling capacitor connected in parallel to the EUT as shown in Figure 3 (sometimes in on-field measurements it is possible to exploit stray lines capacitances or connection cable capacitance).

As PD are random events, with stochastic arrival times (and phases) and magnitudes, the information conveyed by a single PD event is often synthesized acquiring a large amount of these three parameters (arrival time, t , arrival phase, φ , and magnitude Q). This information is represented in the so-called PD pattern (see examples in Figure 4), and evaluates some statistical indicator to draw information from the process (identification of the type of source generating PD).

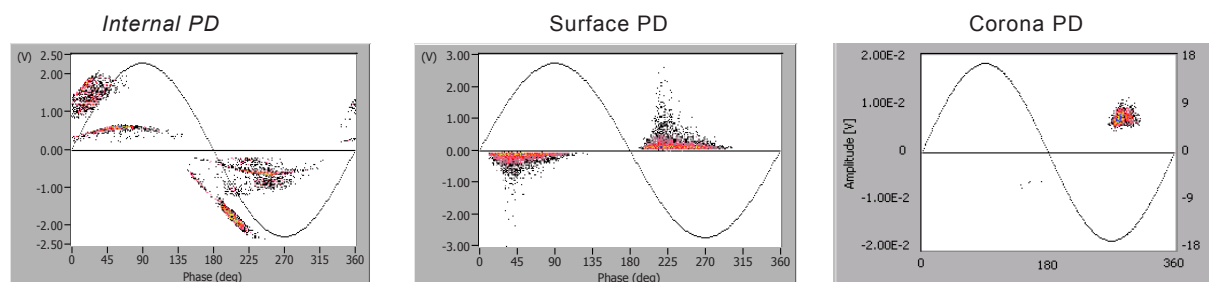


Figure A.44 – Examples of PD patterns relevant to internal, surface and corona PD

References – Figures A.41, A.42, A.43 and A.44

CAVALLINI, A., CONTI, M., CONTIN, A., MONTANARI, G.C., *Advanced PD inference in on-field measurements. II. Identification of defects in solid insulation systems*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 10, June 2003, pp. 528 – 538 (Figure A.41)

MONTANARI, G.C., *Partial discharge measurements: becoming a fundamental tool for quality control and risk assessment of electrical systems?*, IEEE Int. Symp. Electr. Insul., pp. 281-285, 2006

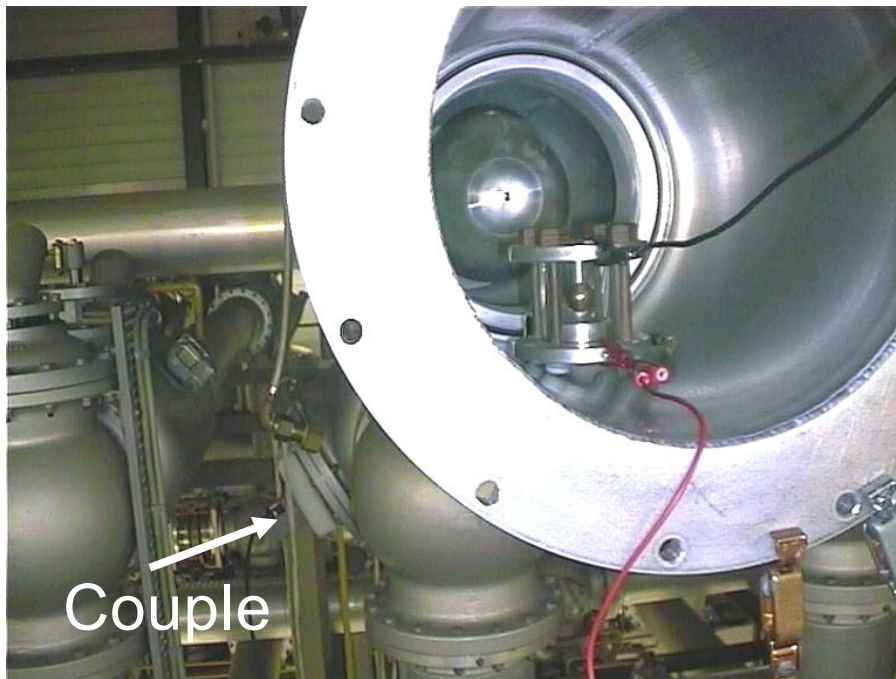
IEC 60270:2000, *High voltage test techniques – Partial discharge measurements* (Figure A.41)

A.56 Polymerization

A chemical process that combines several monomers to form a polymer or polymeric compound.

A.57 Protrusion

Projection that sticks out from a surface or interface.



IEC 1283/11

Figure A.45 – GIS research – Metal conductor protrusion

References – Figure A.45

BARTNIKAS, R., EICHHORN, R.M., *Electrical Properties of Solid Insulating Materials*, ASTM, STP783, CCCN 82-70637, 1983

FOTHERGILL, J.C., DISSADO, L., *Space Charge in Solid Dielectrics*, The Dielectrics Society, ISBN 09533538 0 X, 1998

SMIT, J.J., Delft University of Technology, NL

A.58 Shear stress

Mechanical force that acts on a material in such a way that the material wants to move in a lateral direction. The stress is parallel or tangential to a face of the material.

The formula for shear stress (τ) in a direct shear is:

$$\tau = \frac{V}{A}$$

where

V is the shear force at that location, measured in newtons;

A is the area of section parallel with the shear force, measured in square metres.

References

IEC 60371-2, *Specification for insulating materials based on mica - Part 2: Methods of test*

IEC/TR 62039, *Selection guide for polymeric materials for outdoor use under HV stress*

A.59 Storage +(transport)

The condition to which a device may be subject between the time of construction and time of installation. Also included are the conditions that may exist during shutdown.

NOTE No permanent physical damage or impairment of operating characteristics should take place under these conditions, but minor adjustments may be needed to restore performance to normal.

A.60 Strain

Non-dimensional quantity indicating the change in a unit length of a material resulting from an applied stress.

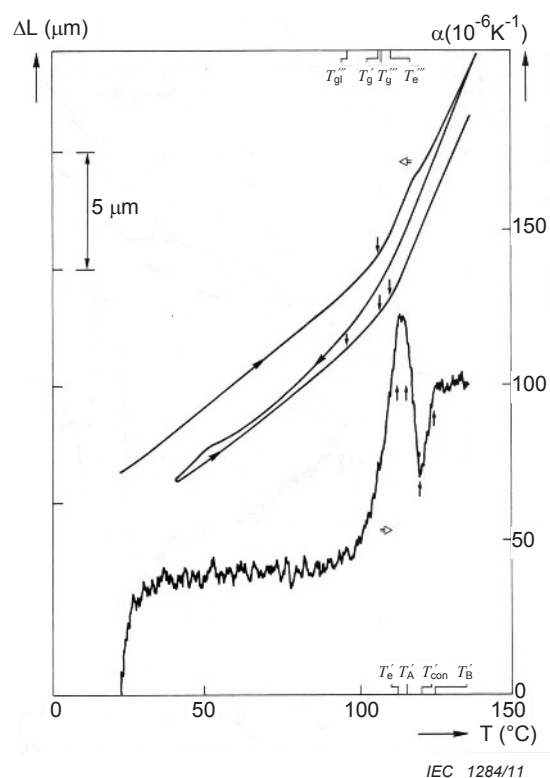


Figure A.46 – Internally strained epoxy – Frozen in strains in epoxy resin due to thermal stress, measured by TMA curves



Figure A.47 – Externally strained parts in an on-load tap changer (OLTC)

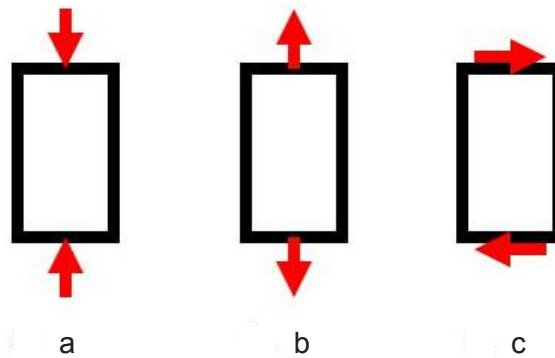
References – Figures A.46 and A.47

SMIT, J.J., courtesy of KEMA, NL.

A.61 Strength

Property by which materials or EIS withstand the application of a force. Depending on the applied stress, different strength terms can be defined for a single material:

- yield strength is the lowest stress that gives permanent deformation in a material;
- compressive strength is a limit state of compressive stress that leads to compressive failure;
- tensile strength or ultimate tensile strength is a limit state of tensile stress that leads to tensile failure;
- fatigue strength is a measure of the strength of a material or a component under cyclic loading;
- impact strength, it is the capability of the material in withstanding by the suddenly applied;
- electric strength (see definition).



IEC 1286/11

Figure A.48 – A material being loaded in a) compression, b) tension, c) shear

References – Figure A.48

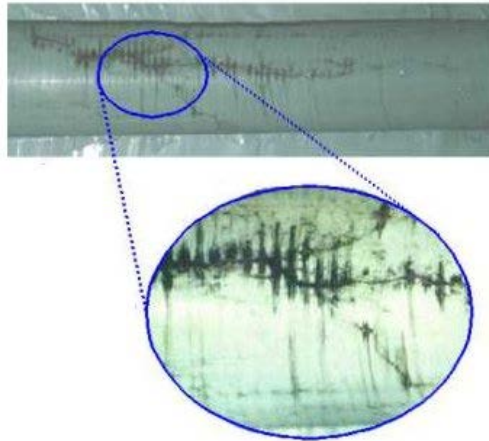
BEER, F.P., JOHNSTON, E.R., et al, *Mechanics of Materials*, 3rd edition, McGraw-Hill, 2001

TIMOSHENKO S., *Strength of Materials*, 3rd edition, Krieger Publishing Company, 1976

A.62 Stress

The force, or combination of forces, which produces a strain; force exerted in any direction or manner between contiguous bodies, or parts of bodies, and taking specific names according to its direction, or mode of action.

Influence put on material or EIS that can age it or make it lose its intended function.



IEC 1287/11

Figure A.49 – Effect of thermal-mechanical stresses leading to interfacial electrical tracking

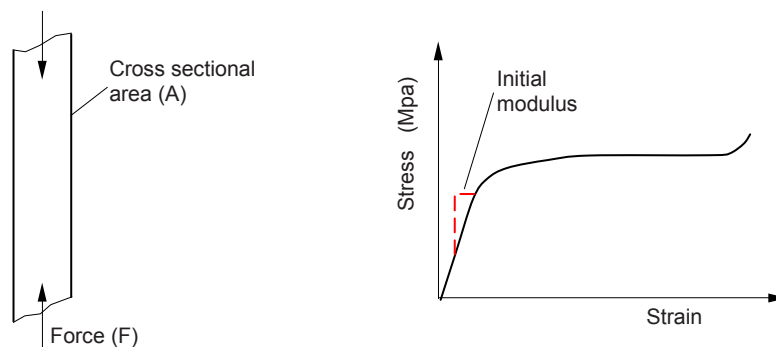
References – Figure A.49

SMIT, J.J., courtesy of KEMA, NL.

A.63 Tensile stress

Mechanical force that acts on a material in such a way that it tends to elongate the material in the direction of the force.

Tensile stress (σ) = Tensile force (F)/original cross-sectional area (A)

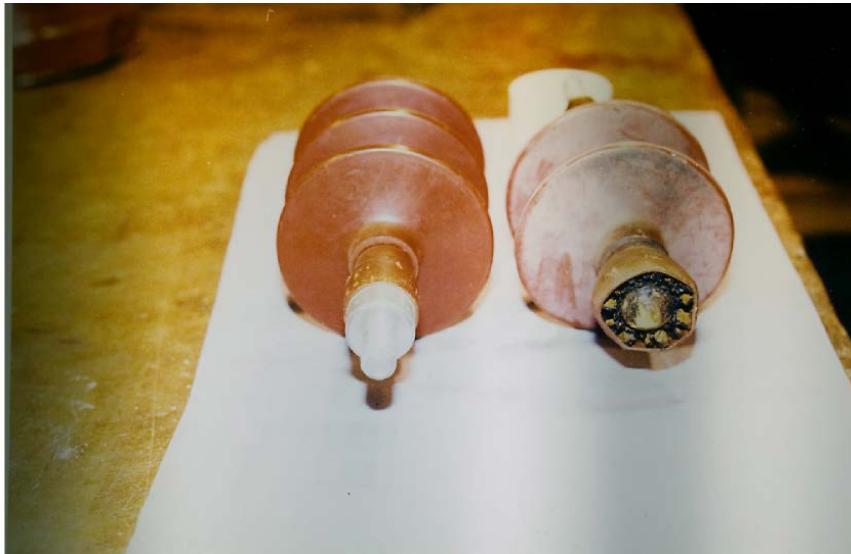


IEC 1288/11

Tensile stress (σ) = F/A

Figure A.50 – Stress-strain curve for a typical material

- Linear region terminates at the yield point
- Below yield point $\sigma = E\varepsilon$ where E refers to the Young's Modulus for tension.
- Above this point material behaves plastically and will not return to its original length once the load is removed.
- Measured in units of Newton/m² (Pascals)



IEC 1289/11

Figure A.51 – Over crimped rod – Breaks during tensile test

References – Figures A.50 and A.51

IEC 60371-2, *Specification for insulating materials based on mica – Part 2: Methods of test*

IEC/TR 62039, *Selection guide for polymeric materials for outdoor use under HV stress*

ODIAN, George, *Principles of Polymerization*, 3rd ed., J. Wiley, New York, 1991, p34

HAVERKAMP, W.B., *unpublished pictures* (Figure A.51)

A.64 Torsion

Twisting or turning of a material due to an applied torque.

For solid or hollow shafts of uniform circular cross-section and constant wall thickness, the torsion relations are as follows:

$$\frac{T}{J} = \frac{\tau}{R} = \frac{G\phi}{l}$$

where

T is the torque (N×m);

R is the radius of the shaft;

Φ is the angle of twist in radians;

τ is the torsion;

l is the length of the object the torque is being applied to or over;

G is the shear modulus or more commonly the modulus of rigidity and is usually given in gigapascals (GPa) ;

J is the torsion constant for the section . It is identical to the polar moment of inertia for a round shaft or concentric tube only. For other shapes J shall be determined by other means.

References

IEC 62231, *Composite station post insulators for substations with a.c. voltages greater than 1 000 V up to 245 kV – Definitions, test methods and acceptance criteria*

IEC 61033, *Test methods for the determination of bond strength of impregnating agents to an enamelled wire substrate*

A.65 Tracking

Progressive formation of conducting paths, which are produced on the surface or along interfaces within a solid insulating material, due to the combined effects of electric stress and electrolytic contamination.

- Over time a partially conductive, branching 2D trees can occur along the surface of a highly stressed dielectric, or across a dielectric surface that has been contaminated by dust or mineral salts. These partially conductive trails can grow until they cause complete failure of the dielectric surface.
- Electrical tracking, sometimes called dry banding, is a typical failure mechanism for electrical power insulators that are subjected to salt spray contamination along coastlines.



IEC 1290/11

NOTE Joints were wanted to be perfect and insulated the lug barrel with tracking sleeve. As a consequence, tracking and crazing are visible on the black material.

Figure A.52 – Typical installation fault



IEC 1291/11

Figure A.53 – Surface tracking on sheds and fitting end

References – Figures A.52 and A.53

HAVERKAMP, W.B., *unpublished pictures*.

IEC 60112, *Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials*

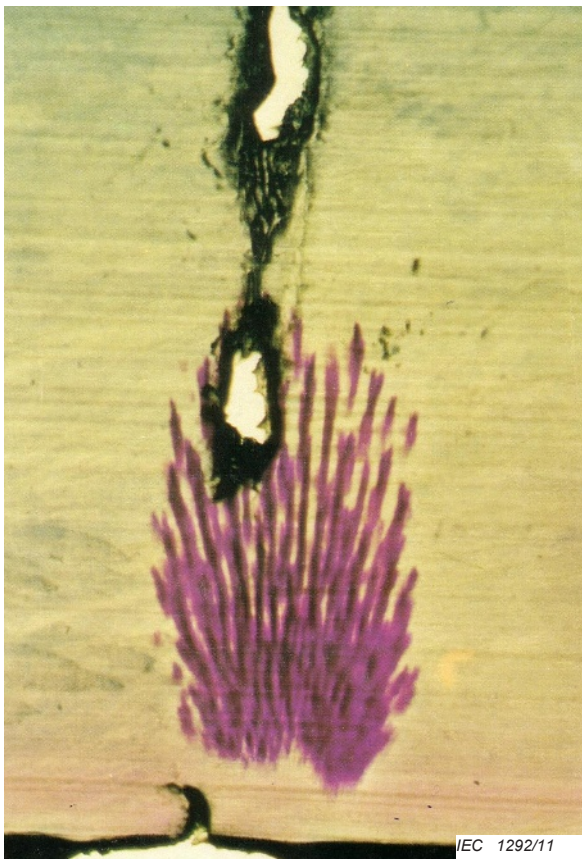
IEC 60587, *Electrical insulating materials used under severe ambient conditions – Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion*

A.66 Vibration

Oscillatory movement of a material or part of a material or EIS with time. Vibration refers to mechanical oscillations around an equilibrium point and may be periodic or random.

A.67 Water treeing

Chemically modified in the presence of moisture, dendritic pattern of electro-oxidation that can occur at stress enhancements such as protrusions, contaminants or voids in polymeric materials subjected to electrical stress and moisture. At the site of a water tree, the insulation is degraded, partial discharge is not present and complete insulation breakdown may subsequently occur when the water tree induces an electrical tree. The water tree growth under service conditions is a very slow process, usually taking many years to completely penetrate the insulation from the inside or outside. While there have been no cases documented of partial discharge detectable in the field from water trees, water trees can convert to electrical trees as a result of a lightning impulse, switching surges or excessive test voltage levels, thereby initiating partial discharge (refer to IEEE P400).



Effect of formation of

- a Bow-tie originating at contaminants or voids within the insulation.
- b Trees occur in extruded insulations such as polyethylene and rubber.
- c Usually grow in the direction of the stress.
- d Large number of trees increases the capacitance, AC dielectric loss, DC leakage current of the insulation.
- e Final failure due to electrical tree (PD) from the water tree initiation of an electrical tree.
- f Water trees lower the AC and impulse breakdown voltage.
- g Breakdown voltage increases if trees allowed to dry.

Figure A.54 – Vented trees – Initiate at interface

References – Figure A.54

IEEE P400.2™ - 2004, *Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)*

DISSADO, L.A., FOTHERGILL, J.C., *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, Peter Peregrins, Ltd, ISBN 0-86341-196-7, London, 1992

STEENNIS, E.F., courtesy of KEMA.

A.68 Wrinkle

Small unwanted fold, for example, in laminated insulation. Wrinkles reduce the electrical strength of laminated insulation and should be avoided.

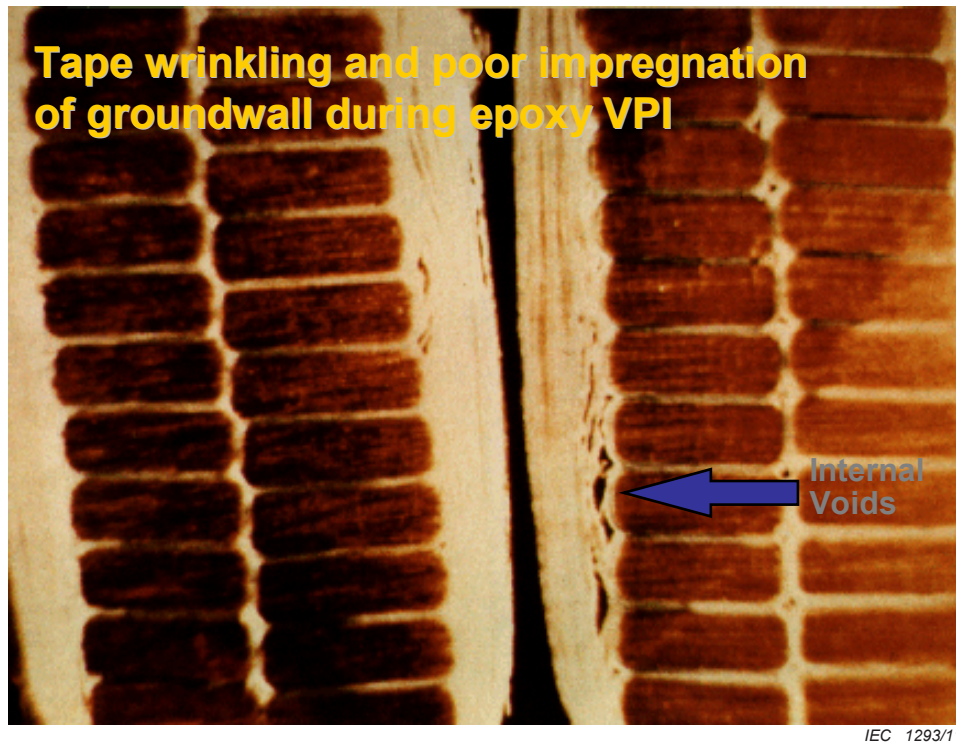


Figure A.55 – Tape wrinkling

References – Figure A.55

STONE, G., courtesy of Iris Power.

Bibliography

IEC 60050-212:2010, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 212: Insulating solids, liquids and gases*

IEC 60068-1, *Environmental testing – Part 1: General and guidance*

IEC 60068-2 (all parts), *Environmental testing – Part 2: Tests*

IEC 60068-2-1, *Environmental testing – Part 2-1: Tests – Test A: Cold*

IEC 60068-2-2, *Environmental testing – Part 2-2: Tests – Test B: Dry heat*

IEC 60068-2-10, *Environmental testing. – Part 2: Tests – Test J and guidance : Mould growth*

IEC 60068-2-14, *Environmental testing – Part 2-14: Tests – Test N: Change of temperature*

IEC 60068-2-27, *Environmental testing – Part 2-27: Tests – Test Ea and guidance: Shock*

IEC 60112, *Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials*

IEC 60212, *Standard conditions for use prior to and during testing of solid electrical insulating materials*

IEC 60216 (all parts), *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties*

IEC 60216-1, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 1: Ageing procedures and evaluation of test results*

IEC 60243-1, *Electrical strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies*

IEC 60243-2, *Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 2: Additional requirements for tests using direct voltage*

IEC 60243-3, *Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 3: Additional requirements for 1,2/50 μ s impulse tests*

IEC 60664-4, *Insulation coordination for equipment within low-voltage systems – Part 4: Consideration of high-frequency voltage stress*

IEC 60270:2000, *voltage test techniques – Partial discharge measurements*

IEC 60371-2, *Specification for insulating materials based on mica – Part 2: Methods of test*

IEC 60587, *Electrical insulating materials used under severe ambient conditions – Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion*

IEC 60721 (all parts), *Classification of environmental conditions*

IEC 60811-3-1, *Common test methods for insulating and sheathing materials of electric cables – Part 3: Methods specific to PVC compounds – Section One: Pressure test at high temperature – Tests for resistance to cracking*

IEC 61033, *Test methods for the determination of bond strength of impregnating agents to an enamelled wire substrate*

IEC 61710, *Power law model – Goodness-of-fit tests and estimation methods*

IEC/TR 62039, *Selection guide for polymeric materials for outdoor use under HV stress*

IEC 62231, *Composite station post insulators for substations with a.c. voltages greater than 1 000 V up to 245 kV – Definitions, test methods and acceptance criteria*

IEC 62271-304, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 304: Design classes for indoor enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV up to and including 52 kV to be used in severe climatic conditions*

ISO 62, *Plastics – Determination of water absorption*

ISO 175, *Plastics – Methods of test for the determination of the effects of immersion in liquid chemicals*

ISO 877-1, *Plastics – Methods of exposure to solar radiation – Part 1: General guidance*

ISO 877-2, *Plastics – Methods of exposure to solar radiation – Part 2: Direct weathering and exposure behind window glass*

ISO 1431-1, *Rubber, vulcanized or thermoplastic – Resistance to ozone cracking – Part 1: Static and dynamic strain testing*

ISO 1663, *Rigid cellular plastics – Determination of water vapour transmission properties*

ISO 4611, *Plastics – Determination of the effects of exposure to damp heat, water spray and salt mist*

ISO/TR 7620, *Rubber materials – Chemical resistance*

ISO 9352, *Plastics – Determination of resistance to wear by abrasive wheels*

ASTM D 750-06, *Test method for rubber deterioration in carbon arc or weathering apparatus*

ASTM D 1044-08, *Standard Test Method for Resistance of Transparent Plastics to Surface Abrasion*

ASTM D 1868-07, *Standard Test Method for Detection and Measurement of Partial Discharge (Corona) Pulses in Evaluation of Insulation Systems*

CLARK, Frank M., *Insulating Materials for Design and Engineering Practice*, J. Wiley & Sons, 1962

MONTANARI, G.C., MAZZANTI, G., PALMIERI, F., MOTORI, A., *Investigation of charge transport and trapping in LDPE and HDPE through space charge and conduction current measurement, ICSD, June 2001, pp. 97-100*

DISSADO, L.A., FOTHERGILL, J.C., *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, Peter Peregrins Ltd, ISBN 0-86341-196-7, London, 1992

MONTANARI, G.C., *The electrical degradation threshold of polyethylene investigated by space charge and conduction current measurements*, IEEE Trans. on Diel. El. Insul., Vol. 7, No. 3, pp. 309-315, June 2000

MONTANARI, G.C., *Dielectric material properties investigated through space charge measurements*, IEEE Trans. on Diel. El. Insul., Vol. 11, pp. 56-64, 2004

BOUFAYED, F., TEYSSÉDRE, G., LAURENT, C., LE ROY, S., DISSADO, L.A., SEGUR, P., MONTANARI, G.C., *Models of bipolar charge transport in polyethylene*, Journ. Appl. Phys., Vol. 100, pp. 104105.1-10, 2006

KUMAR, A., PERLMAN, M.M., *Steady-state conduction in high density polyethylene with field-dependent mobility*, Jour. App. Phys., Vol. 71, No.2, pp. 735 – 738, 1992

MONTANARI, G.C., GHINELLO, I., MOTORI, A., DAS GUPTA, D. *An investigation of conduction mechanisms at high-fielding PET*, IEEE Conf. Electr. Insul. Diel. Phen., pp. 451-454, 1997

BODEGA, R., MONTANARI, G.C., MORSHUIS, P.H.F., *Conduction current measurements on XLPE and EPR insulation*, IEEE Conf. Electr. Insul. Diel. Phen., pp. 101-105, 2004

LOEB, L. B., *Electrical Coronas – Their Basic Physical Mechanisms*, University of California Press, Berkeley and Los Angeles, pp. 579-607 (1965)

Electric strength tests performed at LIMAT lab., University of Bologna

ZAENGL, W.S., *Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. I. Theoretical considerations*, IEEE El. Ins. Magazine Vol.19 n°.5, pp. 5-19, 2003

JONSCHER, A.K., *Dielectric relaxations in solids*, Chelsea Dielectric Press, London, 1983

MONTANARI, G. C., DAS GUPTA, D.K., *Polarization and Space Charge Behavior of Unaged and Electrically Aged Crosslinked Polyethylene*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7 No. 4, August 2000

MOTORI, A., SANDROLINI, F., MONTANARI, G.C., LOGGINI, M. *Electrical properties for detection of thermal aging in XLPE cable models*, *Properties and Applications of Dielectric Materials*, 1991, Proceedings of the 3rd International Conference on, 8-12 July 1991 Page(s):761 - 764 vol.2

IMAI, T., SAWA, T., OZAKI, T., SHIMIZU, T., KIDO, R., KOZAKO, M. TANAKA, T., *Effects of Nano- and Micro-filler Mixture on Electrical Insulation Properties of Epoxy Based Composites* (2006)

JONES, J.P., LLEWELLYN, J.P. and LEWIS, T.J., *The Contribution of Field-Induced Morphological Change to the Electrical Aging and Breakdown of Polyethylene*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, No. 5; October 2005

SERRA, S., MONTANARI, G.C. and MAZZANTI, G. *Theoretical model of inception mechanism and growth of defect-induced damages in XLPE cable*, J. Appl. Phys., Vol. 98, pp. 034102.1-034102.15, 2005

AVALLINI, A., CONTI, M., CONTIN, A., MONTANARI, G.C., *Advanced PD inference in on-field measurements. II. Identification of defects in solid insulation systems*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 10, June 2003, pp. 528 – 538

MONTANARI, G.C., *Partial discharge measurements: becoming a fundamental tool for quality control and risk assessment of electrical systems?*, IEEE Int. Symp. Electr. Insul., pp. 281-285, 2006

BARTNIKAS, R., EICHHORN, R.M., *Electrical Properties of Solid Insulating Materials*, ASTM, STP783, CCCN 82-70637, 1983

FOTHERGILL, J.C., DISSADO, L., *Space Charge in Solid Dielectrics*. The Dielectrics Society, ISBN 09533538 0 X, 1998

BEER, F.P., JOHNSTON E.R., et al, *Mechanics of Materials*, 3rd edition, McGraw-Hill, 2001

TIMOSHENKO, S., *Strength of materials*, 3rd edition, Krieger Publishing Company, 1976

ODIAN, G. *Principles of Polymerization*, 3rd ed., J. Wiley, New York, 1991, p34

IEEE P400.2™ - 2004: *Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)*

TIPLER, PAUL. A., *Physics for Scientists and Engineers*

LI, Christopher Y., *Polymer Thermal Analysis*, Presentation Drexel University, 2002

STONE, G., courtesy of Iris Power

HAVERKAMP, W., *unpublished pictures*

SAKANO, T. *unpublished pictures*

STEENNIS, E.F., courtesy of KEMA, NL

SMIT, J.J., courtesy of KEMA, NL

Courtesy of Prysmian

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	79
INTRODUCTION.....	81
1 Domaine d'application	83
2 Références normatives.....	83
3 Termes et définitions	84
3.1 Termes généraux	84
3.2 Termes relatifs aux contraintes en service et au vieillissement.....	84
3.3 Termes relatifs aux essais.....	85
4 Vieillissement	87
4.1 Mécanismes de vieillissement	87
4.2 Estimation des mécanismes de vieillissement.....	88
4.3 Vieillissement électrique	89
4.4 Vieillissement thermique.....	91
4.5 Vieillissement mécanique	93
4.6 Vieillissement environnemental	95
4.7 Vieillissement accéléré.....	96
4.8 Vieillissement multifactoriel	97
5 Considérations d'évaluation de base	97
5.1 Éléments pour préparer une méthode d'évaluation	97
5.1.1 Objet	97
5.1.2 Conditions de service	97
5.1.3 Valeurs de durée de vie.....	98
5.2 Types de procédures d'évaluation	98
5.3 Choix de l'objet d'essai.....	100
5.4 Procédures expérimentales d'essai	100
5.5 Conclusions pour l'exercice de la normalisation.....	101
6 Essais fonctionnels de vieillissement.....	101
6.1 Objets d'essai.....	101
6.1.1 Construction des objets d'essai	101
6.1.2 Nombre d'objets d'essai.....	102
6.1.3 Essais d'assurance de la qualité.....	102
6.1.4 Sous-cycle de pré-conditionnement	102
6.1.5 Essais initiaux de diagnostic.....	102
6.1.6 SIE de référence	102
6.2 Conditions d'essai	102
6.2.1 Essais continus et cycliques	102
6.2.2 Niveaux de contraintes d'essai, facteurs de vieillissement et facteurs de diagnostic	103
6.3 Détermination de la durée de vie en service du SIE.....	103
6.3.1 Extrapolation de la durée de vie en essai	103
6.3.2 Comparaison des données de durée de vie	103
6.4 Diagnostic	104
6.4.1 Essais de diagnostic – Critères de point limite	104
6.4.2 Essais spécifiques additionnels	105
6.5 Analyse des données	105
6.6 Rapport d'essai	105

Annexe A (informative) Glossaire.....	107
Bibliographie.....	148
Figure 1 – Vieillessement d'un SIE.....	87
Figure 2 – Vieillessement électrique intrinsèque/extrinsèque des SIE pratiques.....	89
Figure 3 – Vieillessement thermique intrinsèque/extrinsèque des SIE pratiques.....	91
Figure 4 – Vieillessement mécanique intrinsèque/extrinsèque des SIE pratiques.....	94
Figure 5 – Vieillessement environnemental intrinsèque/extrinsèque des SIE pratiques.....	96
Figure 6 – Éléments des méthodes d'évaluation.....	97
Figure 7 – Type de procédure d'évaluation.....	99
Figure 8 – Choix de l'objet d'essai.....	100
Figure 9 – Établissement de la méthode d'essai.....	101
Figure A.1 – Dommage par abrasion de la surface.....	107
Figure A.2 – Enduit de la surface pelant comme une chaîne.....	107
Figure A.3 – Plan du montage de mesure pour le courant de charge/décharge.....	108
Figure A.4 – Exemple de préparation d'échantillon.....	108
Figure A.5 – Courant de charge/décharge sur un film de PEhd.....	109
Figure A.6 – Comportement de la propriété en fonction du temps, détection de seuil (point limite p_L) et temps de maintenance.....	110
Figure A.7 – Correspondance entre les relevés de vieillessement pour la propriété p (en rouge), obtenus à différents niveaux de contrainte, et la ligne de vie qui en résulte.....	110
Figure A.8 – Exemple d'injection de charge de porteurs positifs (lacunes) à partir de l'anode et de porteurs de charge négative (électrons) à partir de la cathode dans une éprouvette plate en PE, détectés par la mesure de la charge d'espace par la méthode PEA.....	111
Figure A.9 – Courbe contrainte-déformation pour un matériau type.....	112
Figure A.10 – Plan du montage de mesure pour le courant de charge/décharge.....	113
Figure A.11 – Exemple de préparation d'échantillon.....	113
Figure A.12 – Courant de charge/décharge sur un film de PEhd.....	113
Figure A.13 – Courant de charge à 135 °C et à différentes valeurs du champ électrique en c.c.....	114
Figure A.14 – Courant de charge à 120 °C et à différentes valeurs du champ électrique en c.c.....	114
Figure A.15 – Effet de couronne à la partie métallique supérieure de l'isolateur.....	116
Figure A.16 – Effet de couronne à la partie supérieure et production d'arc vers la terre.....	116
Figure A.17 – Stades de la fracture ductile mécanique (fissuration) (source inconnue).....	117
Figure A.18 – Photo des séquences de la structure époxy et vide.....	118
Figure A.19 – Décharge entre conducteurs à travers l'air.....	119
Figure A.20 – Isolation en papier dégradée par les décharges superficielles électriques.....	120
Figure A.21 – Exemple d'essai de rigidité diélectrique sur un échantillon de XLPE (polyéthylène réticulé) de 0,2 mm d'épaisseur.....	121
Figure A.22 – Résultats des essais de mesure de rigidité diélectrique par courbe de Weibull à deux paramètres réalisés sur sept éprouvettes de XLPE de 0,2 mm d'épaisseur.....	121
Figure A.23 – Angle de pertes d'un diélectrique.....	123

Figure A.24 – Facteur de pertes pour les câbles en XLPE prétraités et XLPE, mesuré à 90 °C et tracé en fonction de la fréquence thermiquement vieillis (à 110 °C et 130 °C).....	123
Figure A.25 – Lignes de champ à partir d'une charge positive au-dessus d'un conducteur plan	124
Figure A.26 – Arborescence électrique	125
Figure A.27 – Calcination d'EPDM et érosion sur raccord	126
Figure A.28 – Isolation externe défaillante – Exemple 1	127
Figure A.29 – Isolation externe défaillante – Exemple 2	127
Figure A.30 – Défaillance critique d'une isolation solide de câble (XLPE) par claquage électrique.....	128
Figure A.31 – Exemple de contournement.....	129
Figure A.32 – Sous-station – Installation en extérieur	130
Figure A.33 – Matériels d'isolation différents dans les jonctions de câbles HT	131
Figure A.34 – Interfaces internes dans une structure époxy et vide.....	132
Figure A.35 – Exemple de fendillement et de craquelure dans un espace interlamellaire sous la tension mécanique T	133
Figure A.36 – Arborescence d'eau	134
Figure A.37 – Impact des UV et de l'humidité après 11 ans de service.....	135
Figure A.38 – Structure aléatoire (amorphe) d'une chaîne moléculaire.....	135
Figure A.39 – Structure orientée (semi-cristalline) d'une chaîne moléculaire	135
Figure A.40 – Typical morphology of melt-grown polyethylene spherulites	136
Figure A.41 – Zones où se produisent en général les décharges partielles	137
Figure A.42 – Classes de défaut – Décharges partielles interne, superficielle et de couronne	137
Figure A.43 – Circuit de base pour la mesure des décharges partielles.....	138
Figure A.44 – Exemples de motifs de décharges partielles pertinents pour les décharges partielles internes, superficielles et de couronne.....	138
Figure A.45 – Recherche de GIS – Saillie d'un conducteur métallique	139
Figure A.46 – Époxy déformé intérieurement – Déformations gelées dans une résine époxy en raison de contraintes thermiques, mesurées par des courbes TMA.....	141
Figure A.47 – Pièces déformées extérieurement dans un OLTC (changeur de prise en charge)	141
Figure A.48 – Matériel chargé en a) compression, b) traction, c) cisaillement.	142
Figure A.49 – Effet des contraintes thermiques-mécaniques conduisant à un cheminement électrique interfacial	142
Figure A.50 – Courbe contrainte-déformation T pour un matériau type.....	143
Figure A.51 – Barre excessivement pincée – Se brise au cours de l'essai de traction	143
Figure A.52 – Défaut d'installation type.....	145
Figure A.53 – Cheminement superficiel sur ailettes et extrémité de raccord).....	145
Figure A.54 – Arborescences aérées – Naissent à l'interface	146
Figure A.55 – Formation de rides d'une bande	147
Tableau 1 – Températures de vieillissement	93
Tableau 2 – Procédures cycliques et continues.....	104

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**ÉVALUATION ET QUALIFICATION
DES SYSTÈMES D'ISOLATION ÉLECTRIQUE**

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 60505 a été établie par le comité d'études 112 de la CEI: Évaluation et qualification des systèmes et matériaux d'isolement électrique.

Cette quatrième édition annule et remplace la troisième édition, parue en 2004, dont elle constitue une révision technique.

La principale modification par rapport à l'édition précédente est que l'Annexe A: Glossaire, est désormais disponible en version internet (disponible à l'adresse <http://std.iec.ch/iec60505>)¹ ainsi qu'en version imprimée. Cette version internet consiste en une version textuelle abrégée et un complément multimédia.

1) Disponible en anglais seulement.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
112/174/FDIS	112/184/RVD

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.

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

La durée de vie d'un (de) système(s) d'isolation électrique (SIE) détermine souvent la durée de vie du matériel électrique, qui peut être affectée par des contraintes électriques, thermiques, mécaniques ou environnementales, agissant individuellement ou en combinaison.

Les durées de vie en service envisagées, estimées ou prouvées sont des paramètres essentiels pour décrire la durée de vie de systèmes d'isolation électrique. Dans les premiers temps de l'ingénierie électrotechnique, les données de durée de vie étaient plutôt vagues. La limitation de la durée de vie de l'isolation sous contrainte thermique était l'un des premiers indicateurs de l'effet du vieillissement de certains matériels en service. Lorsque l'expérience dans l'utilisation des SIE s'est accrue, il est apparu un besoin de sélectionner des matériaux spécifiques présentant une durée de vie satisfaisante à une température donnée, pour permettre d'obtenir la durée de vie requise en service et permettre le calcul de l'aptitude thermique du matériel.

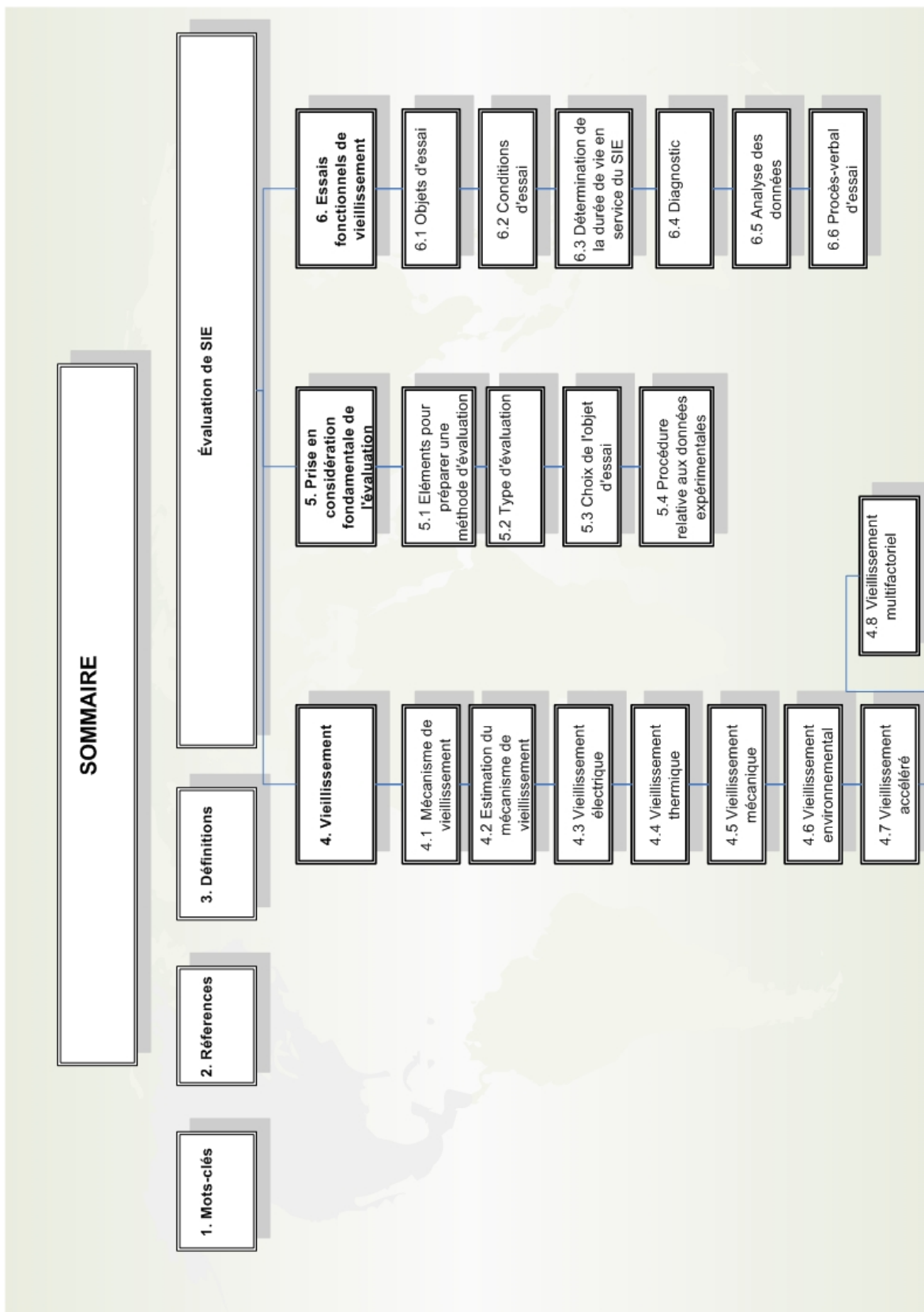
L'utilisateur de la présente norme peut évaluer les méthodes d'essai existantes et fournir la corrélation avec ce matériel. Ainsi, il est de la responsabilité de l'utilisateur de la présente norme de démontrer la validité de la méthode d'essai existante conformément aux principes de cette norme.

La détermination de la durée de vie envisagée est une tâche fondamentale dans le développement et la conception d'un SIE. Il est nécessaire d'établir la durée de vie en service estimée d'un SIE pour plusieurs raisons:

- pour les essais de type, lorsqu'un nouveau SIE est introduit dans la production;
- pour l'assurance qualité de la production;
- pour estimer l'espérance de vie d'un nouveau matériel;
- pour estimer la durée de vie restante aux fins de maintenance.

Le "vieillessement" est axé sur les mécanismes affectant les performances du SIE. "L'évaluation" relie ces mécanismes potentiels par le biais de "l'Analyse" et du "Diagnostic" à la conception d'une sorte spécifique de procédure d'essai d'évaluation.

La structure de mots-clés ci-dessous satisfait à ces exigences et permet de choisir plus facilement les pièces d'intérêt.



ÉVALUATION ET QUALIFICATION DES SYSTÈMES D'ISOLATION ÉLECTRIQUE

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale établit les bases de l'estimation du vieillissement des systèmes d'isolation électrique (SIE) dans des conditions de contraintes électriques, thermiques, mécaniques, environnementales ou de combinaisons de ces contraintes (contraintes multifactorielles).

Elle spécifie les principes et les procédures qui doivent être suivis, au cours du développement d'essais fonctionnels ou de procédures d'évaluation des SIE, pour établir la durée de vie estimée d'un SIE spécifique.

Il convient que tous les comités d'études de la CEI responsables de matériels ayant un SIE utilisent la présente norme.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. 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 60216-2, *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique – Partie 2: Détermination des propriétés d'endurance thermique de matériaux isolants électriques – Choix de critères d'essai*

CEI 60216-3, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 3: Instructions for calculating thermal endurance characteristics* (disponible en anglais seulement)

CEI 60216-5, *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique – Partie 5: Détermination de l'indice d'endurance thermique relatif (RTE) d'un matériau isolant*

CEI 60493-1, *Guide pour l'analyse statistique de données d'essais de vieillissement – Partie 1: Méthodes basées sur les valeurs moyennes de résultats d'essais normalement distribués*

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

CEI 60664 (toutes les parties), *Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension*

CEI/TS 61251, *Electrical insulating materials – AC voltage endurance evaluation – Introduction* (disponible en anglais seulement)

CEI 62539, *Guide for the statistical analysis of electrical insulation breakdown data* (disponible en anglais seulement)

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.1 Termes généraux

3.1.1

système d'isolation électrique

SIE

structure isolante, comprenant un ou plusieurs matériaux isolants électriques (MIE) avec les parties conductrices associées, utilisée dans un dispositif électrotechnique

3.1.2

matériau isolant électrique

MIE

matériau de conductivité électrique faible pratiquement négligeable, utilisé pour séparer des pièces conductrices portées à des potentiels différents

[CEI 60050-212:2010, 212-11-01, modifiée]

3.1.3

SIE de référence

SIE reconnu et évalué, soit sur la base d'une expérience en service connue et enregistrée, soit sur la base d'une évaluation fonctionnelle comparative connue

3.1.4

SIE candidat

SIE en cours d'évaluation pour déterminer son aptitude en service (en ce qui concerne les contraintes électriques, thermiques, mécaniques, environnementales ou multifactorielles)

3.1.5

durée de vie envisagée

durée de vie projetée d'un SIE dans les conditions de service

3.1.6

durée de vie estimée

durée de vie attendue, obtenue à partir soit de l'expérience en service, soit des résultats d'essais effectués en conformité avec des procédures appropriées d'évaluation, ou des deux, tel qu'établi par l'organisation ou le comité technique responsable

3.1.7

évaluation

établissement de relations entre les exigences de service et les données de durée de vie obtenues à partir de l'analyse de l'expérience en service ou des résultats d'essais fonctionnels

3.2 Termes relatifs aux contraintes en service et au vieillissement

3.2.1

contrainte de vieillissement

contrainte électrique, thermique, mécanique ou environnementale dont l'action sur un SIE provoque des changements irréversibles des propriétés

3.2.2

contrainte potentiellement destructive

contrainte en service qui peut causer la défaillance d'un SIE ayant subi un vieillissement, seule ou combinée à d'autres contraintes

3.2.3**conditions de service**

combinaison de contraintes et de fonction qui sont à prévoir dans une application spécifique d'un matériel électrique

3.2.4**conditions de fonctionnement de référence**

conditions de service du matériel auquel sont liées les conditions de la procédure de l'essai fonctionnel

3.2.5**exigences de service**

contraintes spécifiées, performance attendue et fonction d'un matériel électrique

3.2.6**expérience en service**

enregistrement quantitatif et/ou qualitatif durant le service, avec ou sans défaillance d'un SIE

3.2.7**vieillissement**

changements irréversibles des propriétés d'un SIE dus à l'action d'une ou de plusieurs contraintes

NOTE 1 Certains changements (par exemple les hydrolyses) peuvent être partiellement réversibles si les conditions ambiantes changent.

NOTE 2 Le vieillissement conduit à une dégradation du SIE.

3.2.8**vieillissement intrinsèque**

changements irréversibles de propriétés fondamentales d'un SIE, causés par l'action de facteurs de vieillissement sur le SIE

3.2.9**vieillissement extrinsèque**

changements irréversibles des propriétés d'un SIE, produits par l'action de facteurs de vieillissement sur des imperfections introduites involontairement dans le SIE

3.2.10**interaction**

modifications du type ou du degré de vieillissement, produites par la combinaison de deux ou de plusieurs contraintes et relatives à leur effet de vieillissement si elles agissaient individuellement sur des objets séparés

3.2.11**interaction directe**

interaction entre contraintes appliquées simultanément, qui diffère de celle qui se produit avec des contraintes appliquées séquentiellement

3.2.12**interaction indirecte**

interaction qui se produit entre des contraintes appliquées simultanément et qui reste inchangée quand les facteurs sont appliqués séquentiellement

3.3 Termes relatifs aux essais**3.3.1****essai fonctionnel**

procédure pour obtenir des informations sur la convenance d'un SIE dans des conditions spécifiées

3.3.2

objet d'essai

échantillon d'un matériel original, partie de celui-ci, ou modèle représentant partiellement ou complètement ce matériel, comprenant le SIE, destiné à être utilisé dans un essai fonctionnel

3.3.3

vieillissement accéléré

vieillissement résultant d'un accroissement du niveau et/ou de la fréquence d'application des contraintes au-delà des conditions normales de service

3.3.4

essai accéléré

essai fonctionnel qui applique un vieillissement accéléré pour réduire la durée d'essai

3.3.5

conditionnement

exposition d'une éprouvette à une atmosphère d'une humidité relative spécifiée ou immersion complète de cette éprouvette dans de l'eau ou tout autre liquide, à une température donnée et durant un temps donné

3.3.6

conditionnement de pré-diagnostic

application continue ou périodique de contraintes variables ou fixes à un SIE pour accroître la capacité d'un essai fonctionnel à détecter le degré de vieillissement

NOTE Le conditionnement de pré-diagnostic peut causer un vieillissement supplémentaire.

3.3.7

facteur de diagnostic

contrainte variable ou fixe appliquée à un SIE pour établir le degré de vieillissement

3.3.8

essai de diagnostic

application périodique ou continue d'un niveau spécifié d'un facteur de diagnostic à un objet d'essai pour déterminer si et à quel moment le critère de point limite a été atteint

3.3.9

critère de point limite

moment où un système n'est plus capable de remplir ses fonctions

3.3.10

durée de vie

durée pour qu'une propriété atteigne le critère de point limite pour des objets dans des essais fonctionnels

3.3.11

cycle d'essai

dans un essai, période d'application répétitive d'une ou de plusieurs contraintes, soit séquentiellement, soit simultanément, et de facteurs de diagnostic

3.3.12

sous-cycle

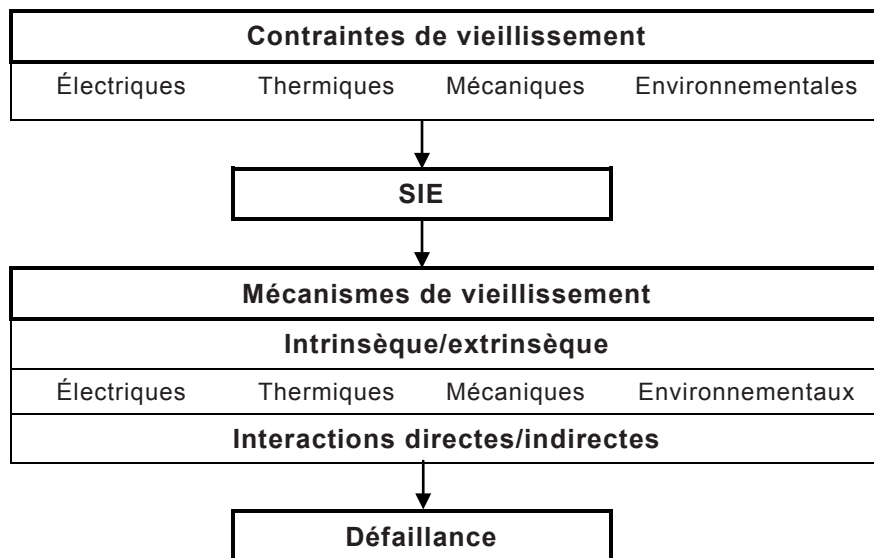
période définie du cycle d'essai

NOTE Le sous-cycle peut être, par exemple, une période d'application de température élevée et d'humidité pour influencer les propriétés du système, ou d'application de haute tension à des fins de diagnostic.

4 Vieillissement

4.1 Mécanismes de vieillissement

Le vieillissement est défini comme le changement irréversible des propriétés d'un SIE en raison de l'action d'une ou de plusieurs contraintes. Les contraintes de vieillissement peuvent causer un vieillissement intrinsèque ou extrinsèque. Une représentation schématique du processus de base est donnée à la Figure 1.



IEC 1231/11

Figure 1 – Vieillissement d'un SIE

Le type et le niveau de contamination et/ou l'importance des imperfections dans un SIE affecteront de façon significative la performance en service de nombreux types de matériel électrique. En général, moins nombreux et moins sévères seront les contaminants et/ou les défauts dans le SIE, meilleure sera sa performance. Pour éviter d'obtenir des résultats trompeurs à partir d'essais fonctionnels, il convient qu'un SIE candidat contienne, dans la mesure du possible, la gamme complète de contaminants et/ou de défauts attendus lorsque le système réel est utilisé en service.

Les contraintes de vieillissement produisent des mécanismes de vieillissement électriques, thermiques, mécaniques ou environnementaux qui finalement conduisent à la défaillance. Au cours du vieillissement, des contraintes appliquées, qui initialement n'affectaient pas le SIE, peuvent provoquer un vieillissement supplémentaire et, par conséquent, modifier la vitesse de dégradation.

Lorsque le vieillissement est dominé par un facteur de vieillissement, on est dans un cas de vieillissement unifactoriel. Le vieillissement multifactoriel se produit lorsque plus d'un facteur de vieillissement affecte substantiellement le vieillissement du SIE. Les facteurs de vieillissement peuvent agir en synergie, c'est-à-dire qu'il peut y avoir des interactions directes entre les contraintes. Les interactions peuvent être positives ou négatives.

Le vieillissement d'un SIE en pratique peut être complexe et la défaillance est habituellement causée par une combinaison de mécanismes de vieillissement, même s'il n'y a qu'un seul facteur de vieillissement dominant comme dans un vieillissement unifactoriel.

Lorsque l'expérience ou la connaissance existante de la manière dont un SIE spécifique peut se comporter en service est limitée, l'utilisateur de la présente norme doit décider si des

procédures d'essai unifactorielles ou multifactorielles sont appropriées pour son appareillage ou son matériel spécifique.

NOTE La classification des environnements de fonctionnement des matériels électriques est traitée dans les publications CEI établies par le comité d'études 75 de la CEI et les méthodes d'essais de l'endurance à l'environnement sont décrites dans les publications CEI établies par le comité d'études 50 de la CEI (essentiellement le sous-comité 50B), voir la bibliographie.

Dans les effets de l'environnement, on intègre les environnements autres que ceux des atmosphères normales des laboratoires spécifiées dans la CEI 60212.

D'autres normes qui fournissent des méthodes d'exposition ou de caractérisation des isolations sont données dans la bibliographie.

4.2 Estimation des mécanismes de vieillissement

Les Figures 2, 3, 4 et 5 présentent quatre organigrammes, qui décrivent avec quelques détails les vieillissements intrinsèques et extrinsèques d'un SIE, électrique, thermique, mécanique et environnemental respectivement. Chaque organigramme est fondé sur l'expérience en service de différents types de SIE et montre les mécanismes possibles de détérioration et de défaillance qui peuvent se produire pour les différents types de vieillissement et les interactions entre facteurs de vieillissement. Bien que plusieurs mécanismes de défaillance soient présentés, ils n'ont pas la prétention d'être des organigrammes exhaustifs des mécanismes que l'on peut trouver dans les conditions réelles de service de tout matériel. Il est important de noter que le vieillissement qui aboutit finalement à une défaillance est habituellement causé par plus d'un mécanisme.

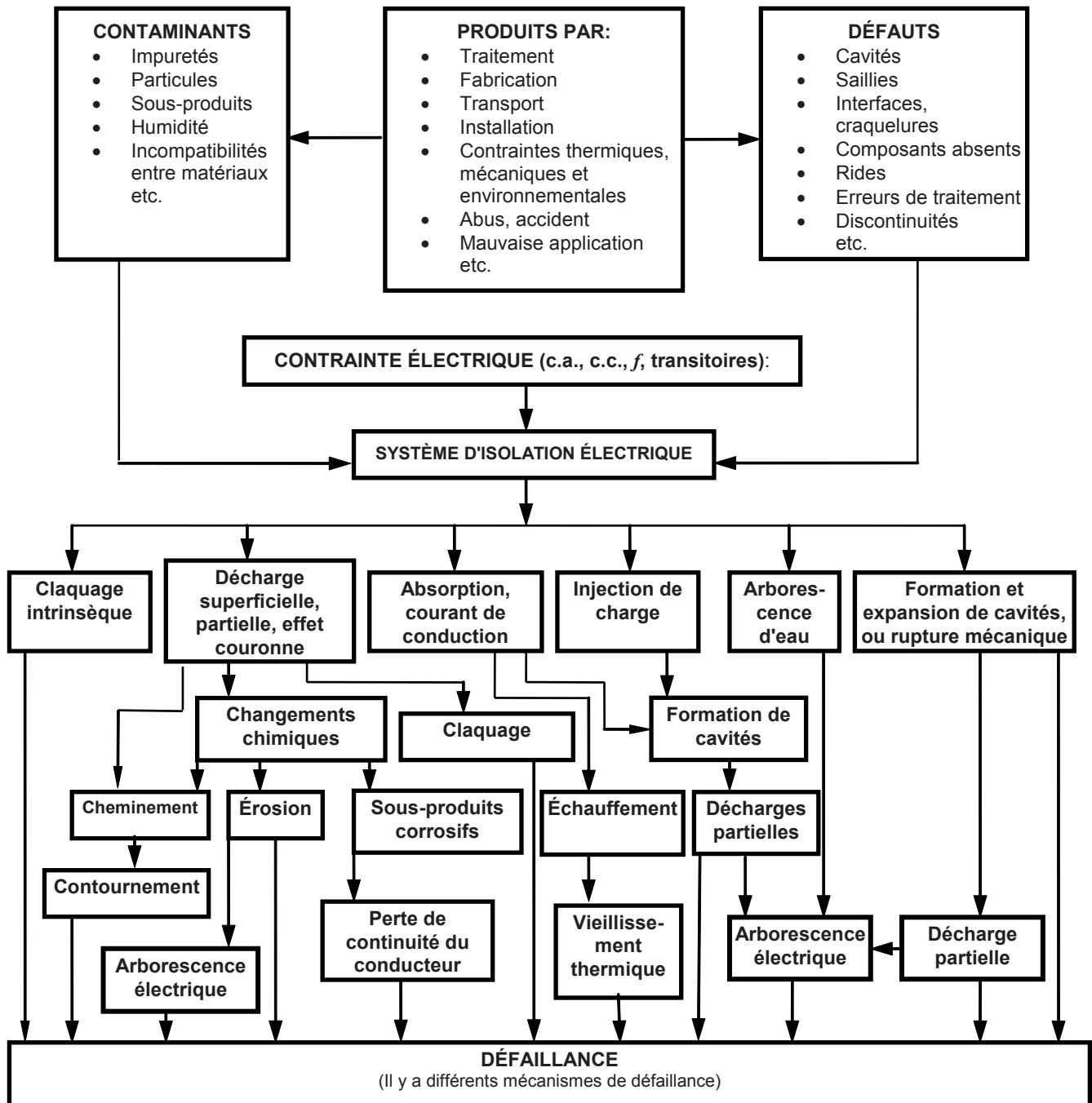
Il convient d'utiliser ces organigrammes comme suit:

- a) comme listes de contrôle pour déterminer les mécanismes de vieillissement du matériel et de l'appareil. Les mécanismes peuvent se produire séquentiellement ou simultanément;
- b) pour développer des essais ou cycles d'essais de vieillissement fonctionnels et accélérés. La grandeur et le type des contraintes appliquées et leur durée dépendront de la manière dont elles affectent les mécanismes de vieillissement;
- c) pour développer des essais ou des cycles d'essais de diagnostic appropriés pour estimer la condition du SIE.

Sur la base d'une connaissance de l'expérience en service, des conditions de fonctionnement et des propriétés des composants du SIE considéré, il convient que l'utilisateur de la présente norme choisisse un ou plusieurs organigrammes qui présentent le ou les principaux facteurs de vieillissement. Il convient que les différents mécanismes de vieillissement qui aboutissent à la défaillance soient examinés soigneusement en prenant en compte les niveaux de contaminants et de défauts dans le SIE. Il convient qu'un organigramme révisé, qui ne comprend que les mécanismes appropriés de vieillissement, soit produit comme aide dans le développement des cycles d'essais de vieillissement fonctionnels et de diagnostic.

En l'absence d'informations suffisantes disponibles sur l'expérience en service et/ou les mécanismes possibles de vieillissement, il convient de fonder les conditions de vieillissement sur les niveaux de contrainte les plus sévères attendus en service pour lequel le SIE a été conçu.

4.3 Vieillesse électrique



IEC 1232/11

NOTE D'autres contraintes peuvent contribuer à la défaillance.

Figure 2 – Vieillesse électrique intrinsèque/extrinsèque des SIE pratiques

Le vieillissement électrique (alternatif, continu ou par impulsions) comprend:

- les effets des décharges partielles lorsque l'intensité du champ local dépasse la rigidité diélectrique dans le diélectrique liquide ou gazeux adjacent au SIE ou inclus dans le SIE;
- les effets du cheminement;
- les effets de l'arborescence;
- les effets de l'électrolyse;

- e) les effets, liés aux précédents, sur les surfaces adjacentes de deux matériaux isolants où des champs tangentiels de valeur relativement élevée peuvent se présenter;
- f) les effets de l'accroissement de température produit par des pertes diélectriques élevées;
- g) l'effet des charges d'espace.

La Figure 2 présente le vieillissement électrique intrinsèque/extrinsèque lorsque les contraintes électriques sont considérées comme le principal facteur de vieillissement. Considérons l'exemple d'un simple SIE composé de deux conducteurs parallèles noyés dans un matériau isolant. Il est connu que des protubérances se rencontrent à la surface des conducteurs et que des impuretés (par exemple particules de poussière, etc.) peuvent être incluses dans l'isolation. Il convient que le vieillissement accéléré soit donc effectué en utilisant des facteurs de vieillissement qui accroissent l'injection de charges, par exemple une haute tension, et que les essais de diagnostic soient conçus pour permettre la mesure de l'effet des caractéristiques de charges injectées et/ou de décharges partielles.

En pratique, dans beaucoup de SIE, le processus de vieillissement électrique qui mène à la défaillance est complexe. Jusqu'à présent aucun modèle mathématique rigide n'a été développé qui prédise pleinement comment les facteurs de vieillissement affectent la durée de vie d'un SIE. Cependant, une fonction empirique, le modèle de puissance inverse, est souvent utilisée pour lier la contrainte électrique alternative et la contrainte électrique continue avec la durée de vie. Celle-ci énonce que:

$$L \propto V^{-n}$$

où

L est la durée de vie (temps jusqu'à défaillance ou temps jusqu'au point limite);

V est la tension;

n est l'exposant de durée de vie en tension.

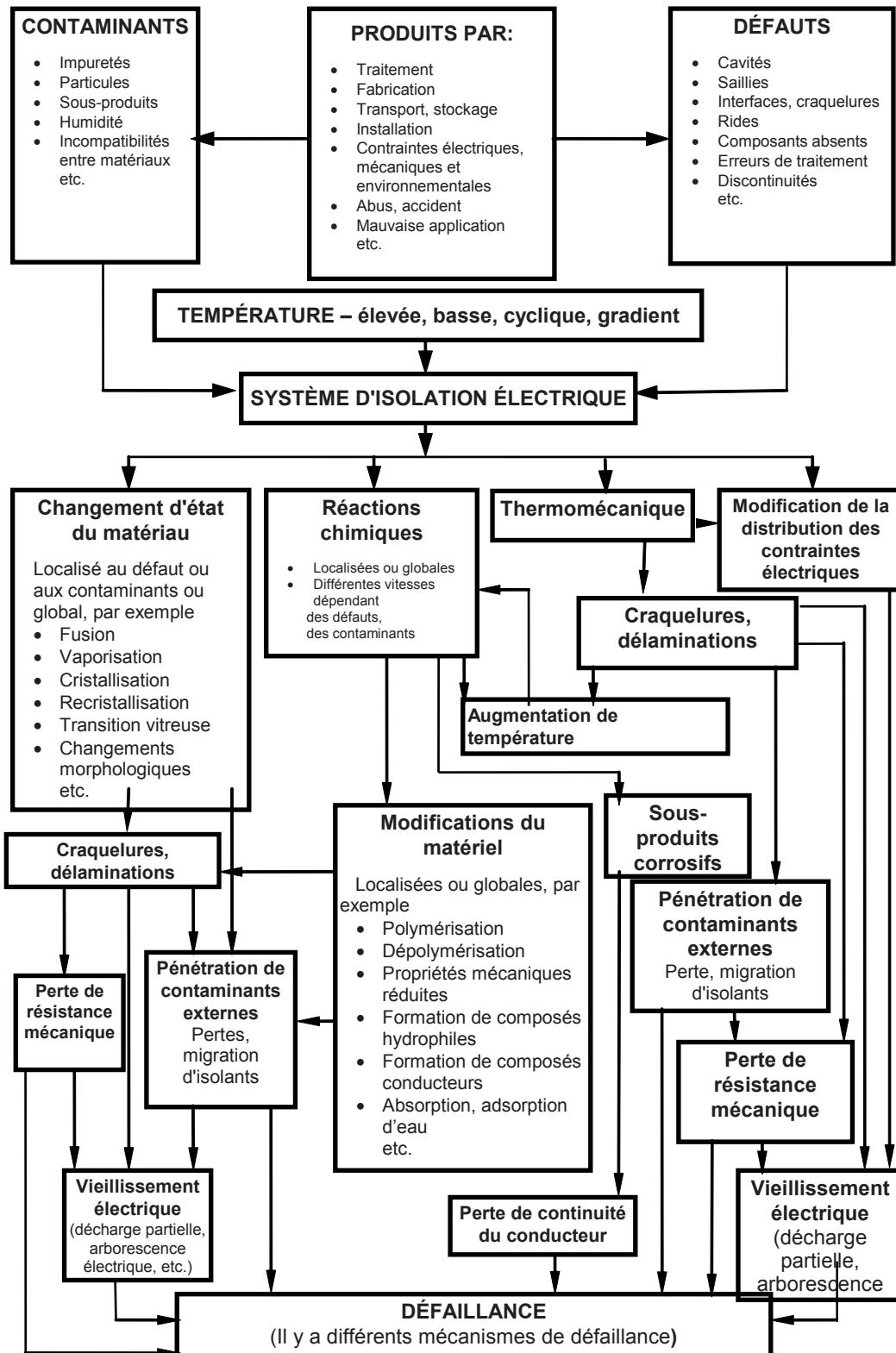
Le modèle de loi de puissance inverse prédit une relation linéaire entre la durée de vie et la tension lorsqu'on la trace sur un papier graphique logarithmique. D'autres modèles peuvent être utilisés.

Le vieillissement électrique peut aussi être accéléré par des essais à plus haute fréquence que celle en service normal. Il doit être démontré que l'augmentation de la fréquence ne change pas le mécanisme de vieillissement, dans la plage des contraintes, ni sur le système candidat ni sur le système de référence.

Dans des cas spécifiques, il peut être possible de réaliser des essais d'endurance électriques en augmentant par paliers la contrainte pour chaque objet d'essai. Il est également nécessaire de spécifier une relation mathématique définie entre le niveau de contrainte et le temps nécessaire pour atteindre la défaillance, ainsi qu'une méthode de réduction des résultats d'essai à une valeur de durée ou de niveau de contrainte commune. Des niveaux de contrainte fixes ou croissants peuvent être utilisés dans les essais cycliques.

Pour la présentation du traitement de données et des lignes de vie, se référer à la CEI/TS 61251 et à la CEI 62539.

4.4 Vieillesse thermique



IEC 1233/11

NOTE D'autres contraintes peuvent contribuer à la défaillance.

Figure 3 – Vieillesse thermique intrinsèque/extrinsèque des SIE pratiques

Le vieillissement thermique comprend

- a) l'évolution des changements chimiques et physiques qui résultent des réactions de dégradation chimiques, de la polymérisation, de la dépolymérisation, de la diffusion, etc.,
- b) les effets thermomécaniques causés par les forces dues à l'expansion et/ou la contraction thermique.

Les augmentations de vitesse des processus chimiques et physiques allant vers l'état d'équilibre thermodynamique sont les causes principales de vieillissement thermique. De nombreux processus de vieillissement simples (par exemple réactions chimiques du premier ordre) suivent, dans les limites d'intervalles de température réduits, l'équation d'Arrhénius, à savoir:

$$L = A \exp(-E/kT)$$

où

L est l'espérance de vie;

A est une constante;

E est l'énergie d'activation;

k est la constante de Boltzmann;

T est la température absolue.

La durée de vie attendue à une température particulière peut être obtenue par l'extrapolation des données tracées en utilisant des coordonnées logarithmiques de durée de vie en fonction de $1/T$. Pour plus d'information, voir la CEI 60216-3.

Des valeurs conseillées pour l'évaluation du SIE peuvent être choisies à partir du Tableau 1. Pour produire un vieillissement accéléré, au moins trois températures doivent être choisies pour les essais dans la colonne appropriée du tableau. La température la plus basse doit être choisie de telle manière qu'un critère de défaillance soit atteint après un minimum de 5 % de la durée de vie attendue en service du système candidat ou après un minimum de 5 000 h pour la température la plus basse. Les deux plus hautes températures suivantes doivent être choisies à des intervalles de 20 K. Si plus de trois températures d'essai sont nécessaires, des intervalles de 10 K peuvent être utilisés. Les températures préférentielles de vieillissement sont données dans le Tableau 1.

NOTE 1 Des essais ont confirmé que pour de nombreux SIE, la durée de vie est divisée par deux pour une augmentation de la température approximativement constante dans les limites d'une plage de températures réduite en fonction des MIE concernés. Pour la majorité de ces SIE, l'augmentation de température qui divise la durée de vie par deux a une valeur comprise entre 8 K et 15 K.

NOTE 2 Dans certains cas, la procédure d'essai indiquée ci-dessus peut ne pas être optimale, par exemple dans le cas de matériel à durée de vie courte pour lesquels elle peut donner des températures de vieillissement tellement élevées qu'elles sont impossibles en pratique.

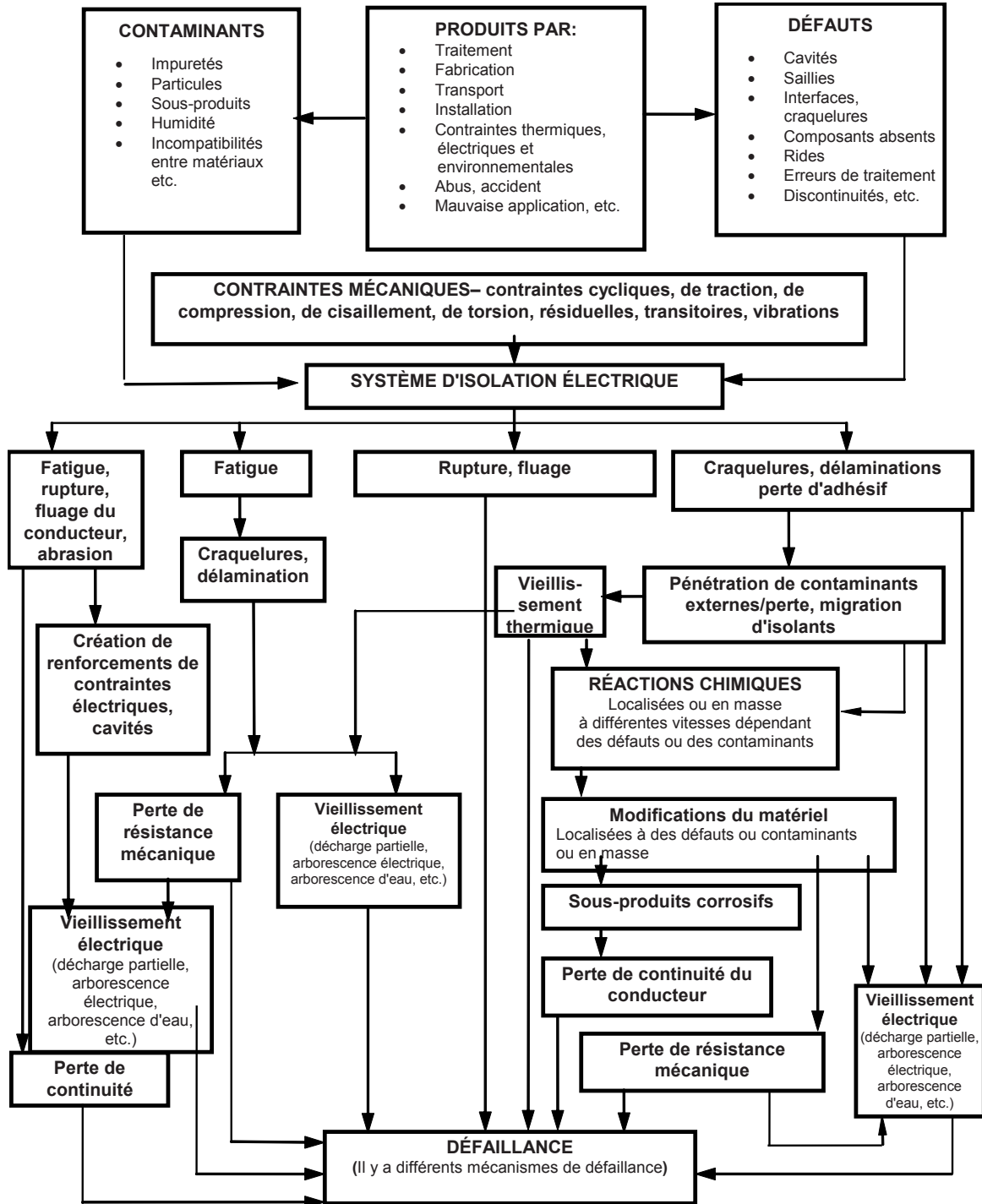
Pour les SIE, dont un ou plusieurs MIE ont des températures de transition (par exemple fusion, ébullition, cristallisation), il convient que la température d'essai maximale soit inférieure au(x) température(s) de transition correspondante(s).

Tableau 1 – Températures de vieillissement

Températures en service °C	55	75	90	105	120	130	155	180	200	220	250
Classe de température	55	75	90 (Y)	105 (A)	120 (E)	130 (B)	155 (F)	180 (H)	200 (N)	220 (R)	250
Températures de vieillissement °C	135	155	170	185	200	210	235	260	280	300	330
	125	145	160	175	190	200	225	250	270	290	320
	115	135	150	165	180	190	215	240	260	280	310
	105	125	140	155	170	180	205	230	250	270	300
	95	115	130	145	160	170	195	220	240	260	290
	85	105	120	135	150	160	185	210	230	250	280
	75	95	110	125	140	150	175	200	220	240	270

4.5 Vieillissement mécanique

Le matériel électrotechnique peut être soumis à des contraintes mécaniques dont l'origine peut être la fabrication, le transport, l'installation et le fonctionnement. Pour certains types de matériels, il a été prouvé que la présence, pendant le fonctionnement, de contraintes mécaniques causées par des forces électrodynamiques, électromagnétiques ou d'origine thermique était l'une des causes principales du vieillissement de leur SIE.



IEC 1234/11

NOTE D'autres contraintes peuvent contribuer à la défaillance.

Figure 4 – Vieillessement mécanique intrinsèque/extrinsèque des SIE pratiques

Le vieillissement mécanique entraîne

- la défaillance par fatigue de composants de l'isolation, causée par un grand nombre de cycles de contraintes de faible niveau,
- des effets thermomécaniques causés par expansion et/ou contraction thermique,
- la rupture de l'isolation par de hauts niveaux de contraintes mécaniques telles que celles causées par des forces externes ou des conditions de fonctionnement du matériel,
- l'usure par abrasion causée par le mouvement relatif entre composants du matériel,

- le glissement ou l'écoulement de l'isolation sous contraintes électriques, thermiques ou mécaniques,
- présence d'autres facteurs,
- types d'essais mécaniques.

NOTE Ces phénomènes peuvent être localisés et irrégulièrement distribués dans le volume de l'isolation.

Dans la pratique, dans beaucoup de SIE, les processus de vieillissement mécanique qui mènent à la défaillance sont complexes (voir la Figure 4). Jusqu'à présent, aucun modèle mathématique rigide n'a été développé qui prédise pleinement la manière dont les facteurs de vieillissement affectent la durée de vie d'un SIE. Cependant, une fonction empirique dans une première approche est le modèle de puissance inverse, qui est souvent utilisé pour lier les contraintes mécaniques avec la durée de vie:

$$L \propto M^{-m}$$

où

L est la durée de vie (temps ou nombre de cycles jusqu'à défaillance ou jusqu'au critère de point limite);

M est la contrainte mécanique;

m est l'exposant de la ligne de vie.

Le modèle de loi de puissance inverse prédit une relation linéaire entre la durée de vie et la tension lorsqu'on la trace sur un papier graphique logarithmique. D'autres modèles peuvent être utilisés.

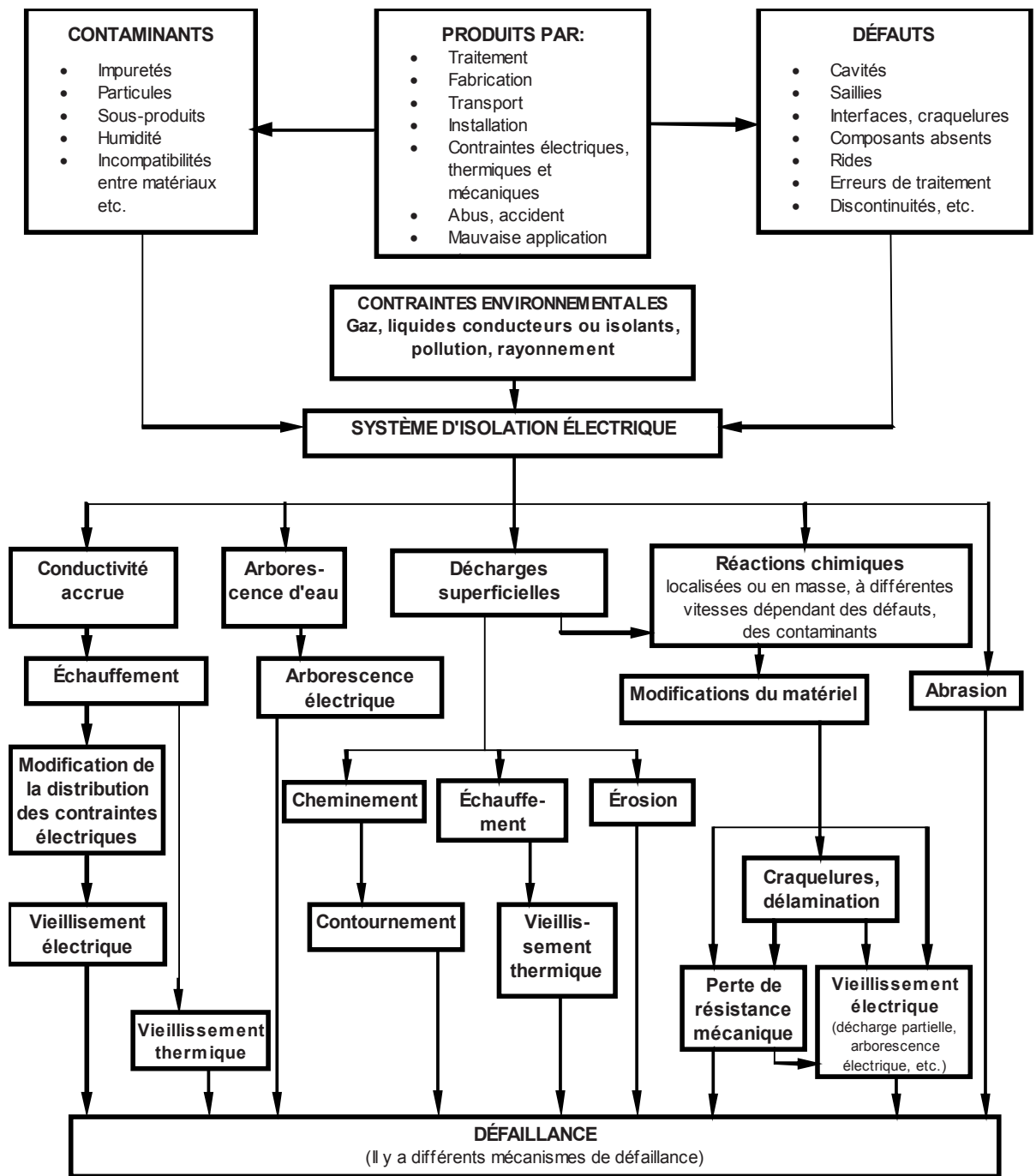
Pour la présentation du traitement de données et des lignes de vie, se référer à la CEI/TS 61251 et à la CEI 62539.

4.6 Vieillissement environnemental

Les influences ci-après contribuent au vieillissement environnemental:

- humidité;
- oxygène;
- produits chimiques;
- agents biologiques;
- exposition aux intempéries;
- contaminants;
- rayonnement;
- conditions aérospatiales;
- conditions de vide.

Comme il peut exister différents mécanismes de vieillissement environnemental (voir Figure 5), il n'existe pas de modèles généraux. Lorsque des contraintes environnementales affectent la vitesse des réactions chimiques, le modèle du vieillissement thermique et l'équation d'Arrhénius (voir 4.4) peuvent être utilisés.



NOTE D'autres contraintes peuvent contribuer à la défaillance.

Figure 5 – Vieillessement environnemental intrinsèque/extrinsèque des SIE pratiques

4.7 Vieillessement accéléré

L'application de modèles de durée de vie adaptés aux essais de vieillissement accéléré permet d'obtenir des grandeurs pour l'évaluation des SIE (ou des performances dans les conditions de service), particulièrement par rapport aux essais comparatifs réalisés sur un matériau de référence ayant des performances en service connues.

Les facteurs qui influencent le vieillissement accéléré sont notamment

- accélération par augmentation de la fréquence,

- accélération du taux de répétition,
- accélération par augmentation du niveau de contrainte.

4.8 Vieillesse multifactoriel

Le vieillissement multifactoriel se produit lorsque plus d'une contrainte de vieillissement affecte substantiellement le vieillissement du SIE. Les contraintes de vieillissement peuvent agir en synergie, c'est-à-dire qu'il peut y avoir des interactions directes entre les contraintes. Les interactions peuvent être positives ou négatives. Par conséquent, les modèles de vieillissement peuvent être très complexes.

Lorsque le vieillissement est dominé par une seule contrainte, se référer au 4.3 à 4.5 pour les modèles applicables.

5 Considérations d'évaluation de base

5.1 Éléments pour préparer une méthode d'évaluation

La préparation de méthodes pour l'évaluation d'un SIE demande un examen soigneux des éléments montrés à la Figure 6:

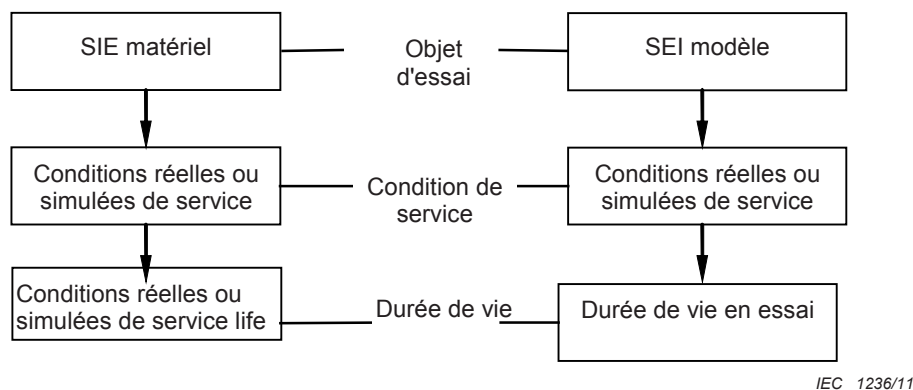


Figure 6 – Éléments des méthodes d'évaluation

5.1.1 Objet

Le SIE objet est soit un système éprouvé en service, un nouveau SIE (candidat), une partie de composant, ou un modèle du matériel électrique original. En général, il sera intéressant d'obtenir un maximum d'informations techniques sur le SIE, puisque cela peut être nécessaire si des SIE modèles doivent être fabriqués.

5.1.2 Conditions de service

Il convient de connaître les conditions de service du matériel électrique dont le SIE est une partie; celles-ci peuvent être disponibles à partir des informations suivantes:

- les valeurs fixées des contraintes lorsqu'un matériel et/ou un SIE nouveaux sont conçus pour des conditions spéciales de service, y compris environnement et charge;
- les données de service lorsqu'un SIE éprouvé en service doit être évalué. Les niveaux de contrainte peuvent alors être définis par des intervalles de contrainte ou par des limites de contrainte maximale enregistrées, liées aux valeurs de charge, indiquant la relation temps-contrainte;
- les conditions connues de service d'un système de référence qui a déjà été qualifié sur la base de données de service et auquel un SIE candidat sera comparé grâce à des essais fonctionnels parallèles dans des conditions de service comparables voire égales.

NOTE Les essais accélérés exigent la vérification de mécanismes de vieillissement identiques ou équivalents aux mécanismes dans les conditions de fonctionnement en service.

5.1.3 Valeurs de durée de vie

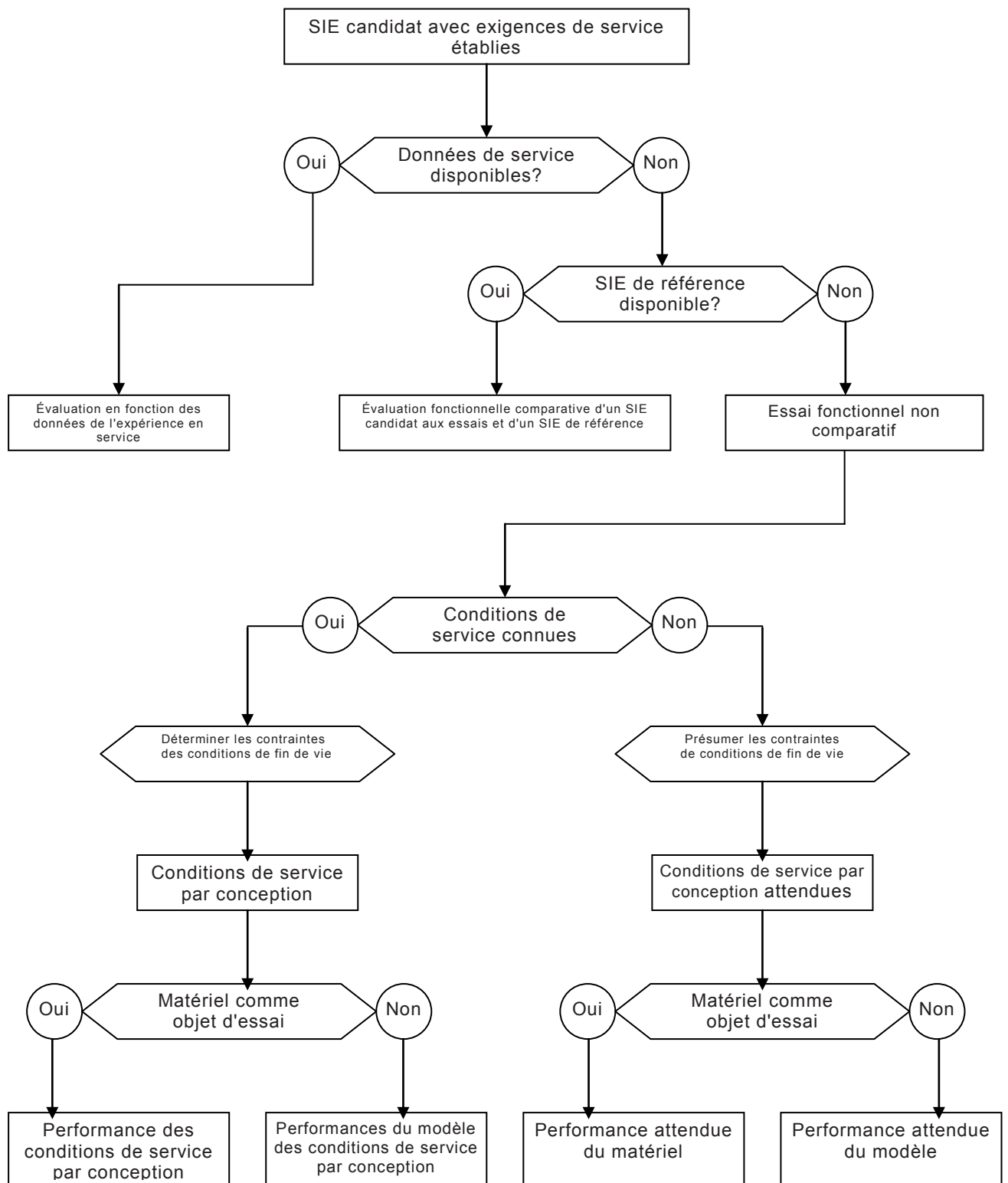
Les valeurs de durée de vie sont liées au SIE, aux conditions de service, et aux considérations de l'utilisateur. Elles doivent être disponibles sous la forme de l'une des variantes suivantes:

- a) temps jusqu'à défaillance du SIE en service (fin de vie définie par un critère de fin de vie);
- b) durée de vie en essai fonctionnel d'un SIE par rapport au critère de fin de vie avec ou sans essai accéléré.

NOTE La connaissance du taux de défaillance d'un système quelconque est fondamentale pour l'inférence de la fiabilité d'un système.

5.2 Types de procédures d'évaluation

En fonction de l'origine des données nécessaires pour l'évaluation d'un SIE candidat, on distingue trois types de procédures (voir Figure 7). Lors du choix de la procédure d'essai, l'utilisateur de la présente norme peut utiliser l'organigramme de la Figure 1, qui présente, de gauche à droite, une série de "performances" par influence décroissante de l'expérience en service directe et par influence croissante des conditions de service définies.



IEC 1237/11

Figure 7 – Type de procédure d'évaluation

5.3 Choix de l'objet d'essai

Le choix de l'objet d'essai peut influencer les résultats de l'essai et influencera aussi le coût de l'évaluation fonctionnelle. L'organigramme de la Figure 8 montre les critères pour le choix.

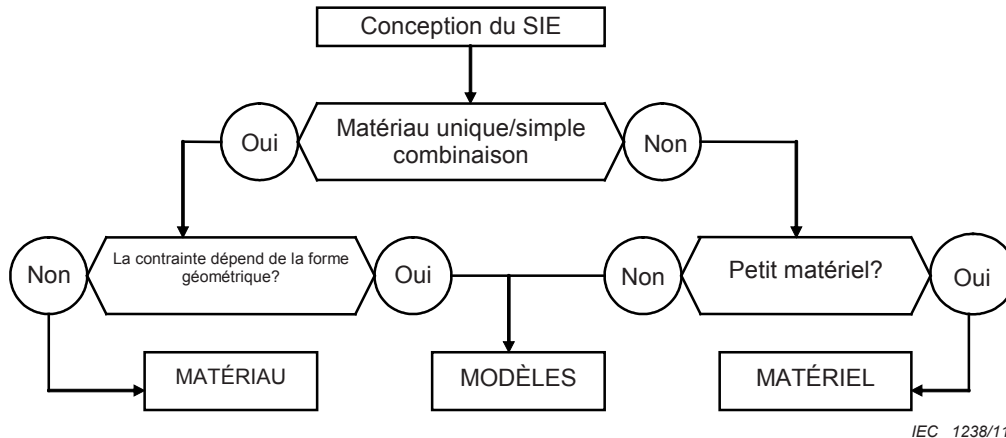


Figure 8 – Choix de l'objet d'essai

Suivant la taille de l'objet et d'autres considérations pratiques, on utilisera un essai fonctionnel sur du matériel, sur des composants ou sur des modèles. Si un «simple» SIE contient un matériau MIE unique ou une simple combinaison de matériaux, qui a été évaluée thermiquement comme un MIE unique, et la distribution de contraintes est indépendante de la forme ou de la taille de la partie isolante, la durée de vie du SIE peut être déduite au moyen d'essais d'endurance appropriés sur MIE. Il convient que l'utilisateur de la présente norme statue sur les cas où de telles procédures simplifiées sont appropriées.

5.4 Procédures expérimentales d'essai

Dans les essais fonctionnels, avec ou sans SIE de référence, les objets d'essai sont soumis à des programmes spécifiés de contraintes de vieillissement, habituellement en cycles de contraintes, pour simuler le vieillissement en service. Des procédures de diagnostic sont appliquées périodiquement pour établir la progression du vieillissement. La complexité de l'essai détermine l'effort et le coût nécessaires pour l'essai. L'organigramme de la Figure 9 conduit à trois types différents d'essai, avec des efforts croissants de la gauche vers la droite. Les critères sont le nombre de facteurs de vieillissement, l'objet d'essai et les interactions possibles entre contraintes.

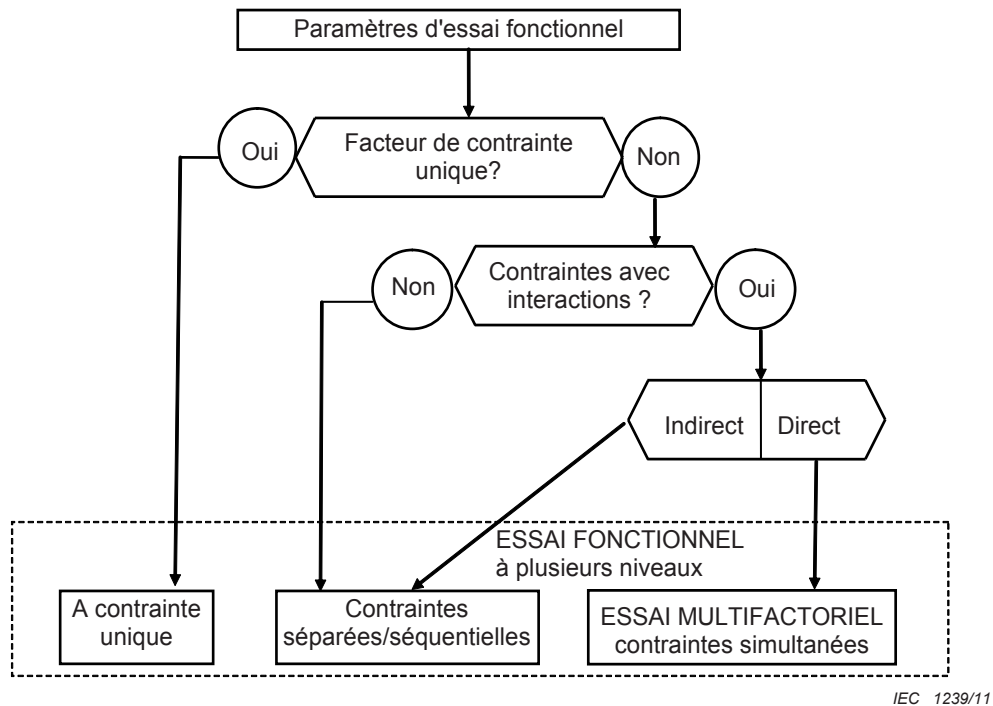


Figure 9 – Établissement de la méthode d'essai

5.5 Conclusions pour l'exercice de la normalisation

Les Figures 8 et 9 aideront l'utilisateur de la présente norme à décider des cas à prendre en compte avant de commencer le développement de normes pour l'évaluation d'un SIE.

Les cas possibles sont les suivants:

- des données d'expérience en service sont disponibles pour une évaluation directe; ce cas requiert la formulation de règles spéciales sur l'information nécessaire et la manière de l'analyser;
- un essai simplifié de durée de vie sur un MIE; peut être utilisé lorsque des procédures existantes d'essai de matériau sont disponibles pour le SIE candidat;
- des essais fonctionnels comparatifs utilisant un modèle ou une partie du matériel comme objet d'essai; ils requièrent l'analyse des mécanismes de vieillissement dans des conditions de service simulées afin de décider du type approprié de l'essai.

En principe, les essais fonctionnels comparatifs sont possibles sans connaissance détaillée des mécanismes de vieillissement. L'essentiel pour les essais fonctionnels est de connaître les contraintes agissant en service, de les simuler correctement et de maintenir l'équivalence des effets de vieillissement.

6 Essais fonctionnels de vieillissement

6.1 Objets d'essai

6.1.1 Construction des objets d'essai

Les objets d'essai doivent être des unités complètes incorporant le SIE ou être des modèles construits pour représenter convenablement la configuration du composant fini à évaluer. Tous les objets doivent être soumis, dans la mesure du possible, aux processus de fabrication complets normaux ou attendus. Lorsque les composants qui utilisent le SIE candidat ont, en service, des fixations mécaniques qui sont censées influencer les processus de vieillissement, celles-ci doivent être simulées sur l'objet d'essai.

Les objets d'essai qui comprennent plusieurs parties composantes conductrices internes, avec une contrainte électrique appliquée entre elles, soit pendant le vieillissement soit pendant le sous-cycle de diagnostic, doivent être conçus et construits pour permettre la vérification de l'effet de vieillissement.

6.1.2 Nombre d'objets d'essai

Lorsque cela est applicable, cinq objets d'essai au minimum doivent être vieillis pour chacune des combinaisons de contraintes électriques, thermiques, mécaniques, environnementales ou multifactorielles comprises dans le programme d'évaluation.

NOTE Sachant qu'au moins cinq échantillons sont nécessaires pour atteindre le critère de point limite, il peut être nécessaire d'inclure plus de cinq échantillons dans chaque sous-essai pour obtenir des résultats valides d'un point de vue statistique.

6.1.3 Essais d'assurance de la qualité

Avant de commencer le premier sous-cycle de vieillissement, une inspection visuelle et tous les essais normaux d'assurance de qualité de produit doivent être effectués sur tous les objets d'essai.

6.1.4 Sous-cycle de pré-conditionnement

Si cela est approprié, il convient que les objets d'essai soient préconditionnés pour mieux représenter la condition du SIE en service.

6.1.5 Essais initiaux de diagnostic

Chaque objet d'essai doit être soumis aux essais de diagnostic choisis pour la procédure d'évaluation avant de commencer le premier sous-cycle de vieillissement.

6.1.6 SIE de référence

Un SIE de référence doit être essayé en utilisant la même procédure d'essai que celle pour le SIE candidat, dans le même laboratoire, avec le même type de matériel d'essai. La performance du SIE de référence doit avoir été établie soit par expérience en service dans des conditions typiques de fonctionnement soit par des essais fonctionnels appropriés dans la gamme des conditions de fonctionnement de référence.

6.2 Conditions d'essai

6.2.1 Essais continus et cycliques

Les essais fonctionnels peuvent être effectués sous forme d'essai continu de vieillissement si le critère de point limite est donné par un temps jusqu'à défaillance ou claquage électrique ou mécanique, soit à un niveau de contrainte de vieillissement soit causé par une contrainte de diagnostic appliquée de façon continue. Sinon, un essai à temps fixe suivi par un essai de claquage ou tout autre essai de diagnostic peut être approprié.

Plus universellement applicables sont les essais cycliques de durée de vie composés d'une séquence répétée de différents sous-cycles de vieillissement et de diagnostic. Cette séquence d'essais fonctionnels permet l'application d'essais de vieillissement unifactoriels ou multifactoriels avec un minimum d'interférences involontaires entre différents facteurs et mécanismes de vieillissement.

Les variations saisonnières et quotidiennes de l'environnement extérieur donnent à un degré plus ou moins élevé suivant le niveau de protection, des variations cycliques correspondant à des conditions environnementales à l'emplacement de l'isolation du matériel.

En l'absence d'encapsulation complet, le risque de condensation périodique devrait toujours être pris en compte. La "respiration" causée par les variations périodiques de température

peut causer un mouvement unidirectionnel de contamination particulière de l'extérieur vers l'intérieur du matériel qui n'est pas hermétiquement fermé.

Lorsque ces effets sont simulés dans les essais fonctionnels, l'accélération peut être obtenue par une réduction de la durée du cycle. Une limitation est toutefois donnée par l'inertie thermique et les constantes de diffusion de l'objet d'essai et de ses parties.

6.2.2 Niveaux de contraintes d'essai, facteurs de vieillissement et facteurs de diagnostic

Les conditions de contrainte d'essai doivent prendre en compte les conditions les plus sévères de contrainte globale expérimentées en service pour lesquelles le SIE est conçu. Ces conditions ne se produisent pas nécessairement aux valeurs maximales des contraintes individuelles. Les conditions de fonctionnement de référence doivent être clairement définies pour la procédure d'évaluation et les niveaux et types de facteurs de diagnostic doivent être appropriés à ces conditions de fonctionnement de référence.

Les niveaux de contrainte pour les sous-cycles de vieillissement doivent être choisis de telle façon que les mécanismes de vieillissement ne soient pas significativement différents de ceux agissant aux niveaux de contraintes les plus sévères en service normal. L'augmentation du niveau de contrainte pour accélérer le vieillissement peut être permise lorsqu'elle ne change pas significativement le mécanisme de vieillissement.

NOTE La connaissance du mécanisme du vieillissement est fondamentale pour établir lesquelles des contraintes sont prédominantes et pour s'y référer afin de concevoir un essai fonctionnel et choisir les modèles de vieillissement appropriés.

Les essais de vieillissement multifactoriels sont préférables parce qu'ils simulent au mieux le service normal. Lorsque cette procédure n'est pas adoptée, il convient d'utiliser soit un sous-cycle séquentiel soit un programme de sous-cycles à contrainte unique.

A la suite des sous-cycles de vieillissement, un sous-cycle de conditionnement et un sous-cycle de diagnostic doivent être effectués, si nécessaire. La défaillance de toute partie de l'éprouvette pendant un essai de diagnostic constitue une défaillance du système entier et doit être noté comme tel. La contrainte électrique doit être utilisée comme principal facteur de diagnostic pour évaluer la condition des objets d'essai vieillis. Sur le matériel à basse tension, il est souvent nécessaire d'inclure une procédure de pré-diagnostic pour s'assurer que la contrainte électrique, utilisée comme facteur de diagnostic, sert à détecter une faiblesse développée pendant le cycle de vieillissement.

6.3 Détermination de la durée de vie en service du SIE

6.3.1 Extrapolation de la durée de vie en essai

Les résultats d'essais effectués à au moins trois niveaux élevés de contrainte peuvent permettre d'extrapoler la fonction contrainte-durée de vie dans la gamme des contraintes envisagées en service. Pour une extrapolation optimale, il convient de choisir, dans la mesure du possible, les coordonnées du schéma de la fonction contrainte-durée de vie de façon à former un schéma linéaire contrainte-durée de vie. Il convient que le degré d'extrapolation ne dépasse pas deux ordres de grandeur sur l'échelle du temps de la courbe logarithmique temps.

Pour le vieillissement électrique, le vieillissement thermique et le vieillissement mécanique, des lois de durée de vie formulées mathématiquement sont respectivement présentées dans en 4.3, 4.4 et 4.5.

6.3.2 Comparaison des données de durée de vie

Les essais de comparaison d'un SIE candidat et d'un SIE de référence requièrent pour leur validité que les deux systèmes soient essayés conformément à 6.3.1. En comparant ces résultats, le SIE candidat peut être considéré comme variante acceptable si la durée de vie

obtenue, à des niveaux de contrainte choisis, est comparable ou supérieure à celle obtenue pour le SIE de référence.

NOTE 1 Comparable ou supérieure peut signifier, par exemple, que la limite de confiance inférieure de 95 % du SIE candidat se situe à l'intérieur ou au-dessus de l'intervalle de confiance de 95 % du SIE de référence.

NOTE 2 La signification du résultat d'essai peut être évaluée au moyen d'une analyse statistique (voir par exemple la CEI 60216-5 pour le vieillissement thermique).

Cela justifiera alors la déclaration: «La durée de vie en service du SIE candidat est censée être égale ou supérieure à la durée de vie vérifiée en service du SIE de référence dans les conditions spécifiées».

6.4 Diagnostic

6.4.1 Essais de diagnostic – Critères de point limite

L'utilisateur de la présente norme, responsable de l'évaluation d'un SIE pour un type spécifique de matériel, doit définir les critères de point limite en termes absolus ou en termes relatifs (par exemple en cas d'évaluation thermique, voir la CEI 60216-2 et la CEI 60216-3).

L'exigence fondamentale pour la procédure de diagnostic est qu'elle doit inclure la spécification d'un point limite. La procédure d'essai d'endurance peut être cyclique ou continue, selon les essais de diagnostic requis et la complexité du vieillissement, comme indiqué au Tableau 2.

Tableau 2 – Procédures cycliques et continues

Numéro de cas	1	2	3	4	5	6
Procédure:	Cyclique				Continue	
Vieillissement à un seul facteur	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
Vieillissement à plusieurs facteurs simultanés	Non	Oui	Non	Non	Non	Oui
Vieillissement à plusieurs facteurs séquentiels	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non
Essais de diagnostic	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non

Les procédures cycliques, cas 1 à 4 dans le Tableau 2, sont appropriées lorsqu'il est vraisemblable que des contraintes autres que celles de vieillissement causent une défaillance ou lorsque les contraintes de vieillissement sont appliquées de manière séquentielle. Elles se composent généralement de plusieurs cycles d'essai, chaque cycle étant composé de sous-cycles.

- Les sous-cycles de vieillissement, conduits à des niveaux de contrainte élevés, servent à vieillir l'isolation de manière accélérée. Le degré d'accélération est choisi en relation avec le niveau de contrainte en service du facteur de vieillissement.

NOTE Dans les cas où des niveaux exceptionnels de contrainte de vieillissement se produisent plus ou moins régulièrement en service (par exemple périodes de surcharge, augmentant sensiblement la température), le sous-cycle de vieillissement peut être divisé également en périodes de niveaux de contrainte plus ou moins élevés.

- Après chaque sous-cycle de vieillissement, les éprouvettes sont soumises à un sous-cycle d'essai de diagnostic (sauf dans le cas du numéro 4 du Tableau 2), qui peut comprendre des essais de tension, des essais de décharges partielles, des essais de contrainte mécanique, une exposition à l'humidité ou à des agents chimiques et d'autres essais de diagnostic. Certaines contraintes de vieillissement peuvent ne pas causer directement une défaillance, alors que d'autres (par exemple la tension) le peuvent, quand ils agissent simultanément comme facteurs de vieillissement et de diagnostic.

Il convient que l'importance et la sévérité des essais de diagnostic soient en corrélation avec les contraintes potentiellement destructives réelles ou attendues. Dans ce but, des lignes directives sont données en 4.3.2 pour permettre à l'utilisateur de la présente norme de choisir la procédure d'essai appropriée. Si cela est réalisable, le comité d'études de matériel peut choisir les procédures d'essai pertinentes à utiliser dans son domaine.

Les procédures continues, les cas des numéros 5 et 6 au Tableau 2, sont appropriées lorsqu'il est vraisemblable que le facteur de vieillissement, ou plusieurs facteurs de vieillissement en combinaison, sont simultanément le plus important facteur de défaillance. Le point limite peut être la détection d'une faiblesse physique qui s'est développée au cours de la période. Il peut aussi s'agir d'un événement ou d'une condition, comme par exemple une défaillance au cours d'un traitement de diagnostic ou l'atteinte d'une valeur limite d'une propriété spécifique. Le point limite peut être caractérisé par une condition unique (par exemple niveau X d'une propriété A), ou par l'une de plusieurs possibilités (par exemple, niveau X de A ou niveau Y de B, etc.), ou il peut être donné par une combinaison de conditions (par exemple, niveau X de A et niveau Y de B, etc.).

Des critères typiques sont indiqués ci-après:

- a) essais d'épreuve à haute tension à N fois la tension normale en service (N est égal à 1,5; 2; 3 ou 4);
- b) essai d'épreuve à impulsion ou choc à S fois le niveau maximal normal en service (où S est égal à 1; 1,5; 2 ou 3);
- c) augmentation en pourcentage de la tangente différentielle de pertes, du niveau de décharges partielles, etc., au-dessus de la valeur pour le système avant vieillissement à une tension définie ou dans une gamme de tensions définie;
- d) apparition de décharge partielle (par exemple dans l'isolation organique solide);
- e) valeur du courant de fuite au-dessus de la valeur avant vieillissement à une tension et à une température définies;
- f) pourcentage de perte d'une propriété choisie.

6.4.2 Essais spécifiques additionnels

Des essais spécifiques additionnels peuvent être nécessaires pour définir les critères de point limite d'un matériel ou d'un appareil spécifique. Pour ce faire toutes les informations disponibles à partir de l'analyse de contrainte, des propriétés de l'isolation et de l'analyse de défaillance ainsi que des conditions types de fonctionnement. La décision d'inclure un diagnostic plus complet doit être prise par l'utilisateur de la présente norme.

6.5 Analyse des données

L'établissement de règles spécifiques pour l'analyse des données d'essai obtenues à partir de programmes d'évaluation à contrainte unique ou multifactorielle doit être de la responsabilité de l'utilisateur de la présente norme. Le niveau de complexité dépendra du type d'appareil pour lequel le SIE a été conçu. Si les paramètres de service pour lesquels le SIE candidat a été conçu indiquent des contraintes supérieures à celles du SIE de référence, les essais fonctionnels du SIE candidat doivent atteindre la même durée de vie en essai que le SIE de référence au niveau inférieur. Il convient d'effectuer l'analyse des données conformément aux Articles 4 et 5.

Pour la présentation du traitement de données et des lignes de vie, se référer à la CEI/TS 61251 et à la CEI 62539.

6.6 Rapport d'essai

Il convient que le rapport d'essai comprenne:

- a) l'identification de la norme d'évaluation applicable;

- b) la description du SIE, incluant la fabrication des éprouvettes;
- c) la description de l'expérience en service concernant le système de référence, y compris les interactions (le cas échéant);
- d) l'identification du modèle, si utilisé; ou du type de système de coordonnées utilisé pour les données de durée de vie;
- e) les conditions de fonctionnement de référence;
- f) la description de tout pré-conditionnement ou pré-vieillessement utilisé;
- g) les contraintes de vieillissement, leurs niveaux et leur accélération dans les essais;
- h) la séquence et la durée d'essai et le nombre d'échantillons;
- i) les traitements, les essais et les mesures de diagnostic;
- j) les critères de point limite choisis;
- k) les courbes de vieillissement (pour confirmer si oui ou non le SIE candidat peut être accepté, on doit suivre la procédure spécifiée dans la CEI 60493-1 pour vérifier la linéarité des données d'essai);
- l) les temps pour atteindre les points limites, les valeurs individuelles et médianes et le traitement statistique si possible;
- m) conclusion résumée du nouveau système en comparaison avec le SIE de référence.

Annexe A (informative)

Glossaire

A.1 Remarques générales

Le présent glossaire contient des termes et définitions issus de sources diverses. Les termes et définitions du glossaire seront utilisés dans l'annexe interactive de la présente Norme.

Les termes et définitions peuvent être visualisés dans la version interactive par des opérations de mouse-over («survol à la souris») ou en cliquant et doivent donner des explications complémentaires au cours de la navigation à travers des chemins dans les diagrammes de vieillissement correspondants. L'annexe interactive vise à servir de guide d'éducation et d'interprétation pour la partie normative de la CEI 60505.

L'annexe interactive sera en outre disponibles en ligne sur le serveur de la CEI (disponible à l'adresse <http://std.iec.ch/iec60505>)².

Toutes les illustrations dans la présente annexe sont reproduites avec la permission des auteurs cités ci-dessous.

A.2 Abrasion

Érosion d'un matériau d'une surface solide sous l'action d'un autre matériau L'abrasion peut être mesurée comme étant une perte de masse par l'essai d'abrasion de Taber conformément à l'ISO 9352 ou à l'ASTM D 1044.

Exemple ci-dessous, Figures A.1 et A.2: Au cours du processus de fabrication de fils magnétiques, la machine-outil de transfert provoque l'abrasion de la surface du fil, comme un cabestan, conduisant à la défaillance de surface.



IEC 1240/11

Figure A.1 – Dommage par abrasion



IEC 1241/11

Figure A.2 – Enduit de la surface peinant

²) Disponible en anglais seulement.

de la surface

comme une chaîne

Références – Figures A.1 et A.
SAKANO, T., *images non-publiés.*

A.3 Absorption (chimique)

Phénomène physique ou chimique ou processus dans lequel des atomes, molécules ou ions entrent dans une certaine phase volumineuse – gaz, liquide ou matériau solide. Il s'agit d'un processus qui diffère de l'adsorption car les molécules sont prises par le volume et non par la surface. Un terme plus général est «sorption» qui couvre l'adsorption, l'absorption et l'échange d'ions.

A.4 Absorption (diélectrique)

Dissipation de l'énergie électrique en énergie thermique dans un diélectrique.

A.5 Courant d'absorption (y compris l'absorption électrique)

Le courant d'absorption est le courant transitoire, associé aux mécanismes de polarisation, qui apparaît dans un diélectrique lorsqu'une tension d'échelon est appliquée. En fait, en appliquant une tension en courant continu à une éprouvette diélectrique entre deux électrodes, le courant total qui circule, i , présente trois composantes:

$$i = i_i + i_c + i_{\text{abs}}$$

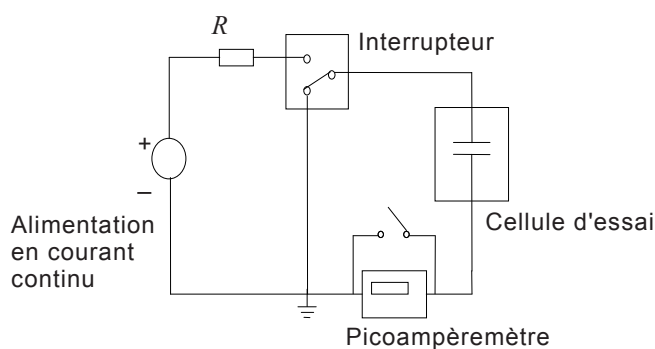
où

i_i est le courant de charge, associé à une variation de l'amplitude du champ électrique;

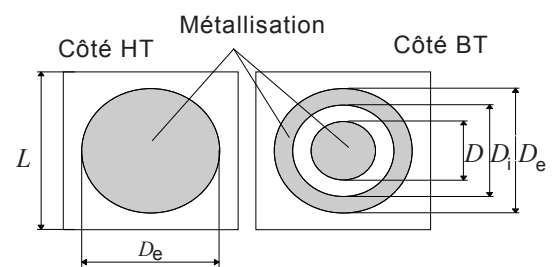
i_c est le courant de conduction qui est mesurable en régime établi;

i_{abs} est le courant d'absorption lié à la polarisation et décroissant exponentiellement avec un temps de déclin très lent.

Le courant d'absorption peut être mesuré par des essais de courant de charge/décharge, en utilisant comme exemple, le montage de mesure montré à la Figure A.3 et en préparant l'échantillon isolant comme montré à la Figure A.4. Le courant de charge/décharge sur du PEhd est montré à la Figure A.5.



IEC 1242/11



IEC 1243/11

NOTE La métallisation est nécessaire pour relier l'échantillon aux électrodes.

Figure A.3 – Plan du montage de mesure pour le courant de charge/décharge

Figure A.4 – Exemple de préparation d'échantillon

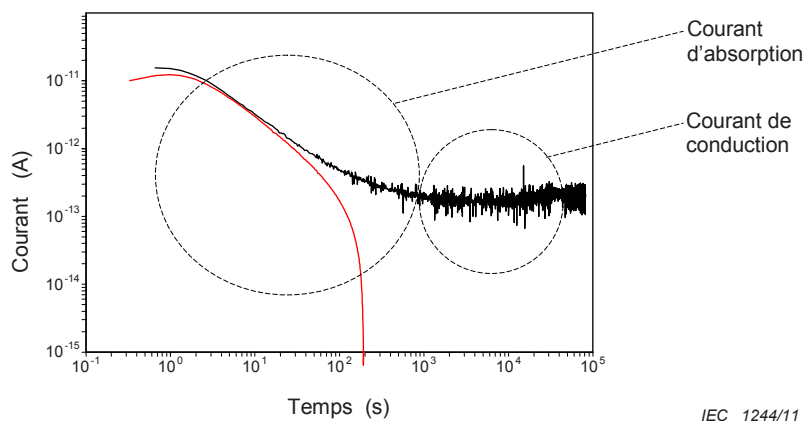


Figure A.5 – Courant de charge/décharge sur un film de PEHd

Références – Figures A.3, A.4 et A.5

CLARK, Frank M., *Insulating Materials for Design and Engineering Practice*, J. Wiley & Sons, 1962 (Figure A.3)

MONTANARI, G.C., MAZZANTI, G., PALMIERI, F., MOTORI, A. *Investigation of charge transport and trapping in LDPE and HDPE through space charge and conduction current measurement*, ICSD, June 2001, pp. 97-100

A.6 Adsorption

Augmentation de la concentration de n'importe quel composant à la surface d'un liquide ou d'un solide. Fixation d'un gaz, d'un liquide ou d'une substance dissoute à une surface solide.

A.7 Vieillessement

Changements irréversibles des propriétés d'un SIE (système d'isolation électrique), qui s'accumulent au fil du temps, en raison de l'action d'une ou plusieurs contraintes.

A.8 Vieillessement (mécanique, thermique, électrique, environnemental)

Changements irréversibles des propriétés d'un SIE (système d'isolation électrique), qui s'accumulent au fil du temps, en raison de l'action de contraintes thermiques, électriques, mécaniques, environnementales.

Toute propriété p , qui a une tendance temporelle corrélée à l'état de vieillessement du SIE (par exemple, augmentant comme l'angle de perte électrique, ou diminuant comme la rigidité diélectrique), est appelée propriété de diagnostic ou marqueur de vieillessement.

Lorsque p atteint, sous une valeur donnée de la contrainte S_i , une certaine valeur connue comme point limite p_L , le SIE a atteint la fin de la durée de vie correspondante L_i (voir Figure A.6). La ligne de vie, censée être le temps jusqu'à défaillance (ou temps jusqu'à maintenance) du SIE, est généralement tracée sur un graphe log-log pour les contraintes électriques et mécaniques, sur un graphe semi-logarithmique ou sur un graphe d'Arrhenius pour la contrainte thermique. La moyenne arithmétique ou le point médian pour chaque contrainte de vieillessement électrique, obtenu(e) en ayant sélectionné une valeur de point limite pour la propriété P (voir Figure A.7), peut constituer le tracé de la ligne de vie. N'importe quel percentile du temps de défaillance peut toutefois être utilisé.

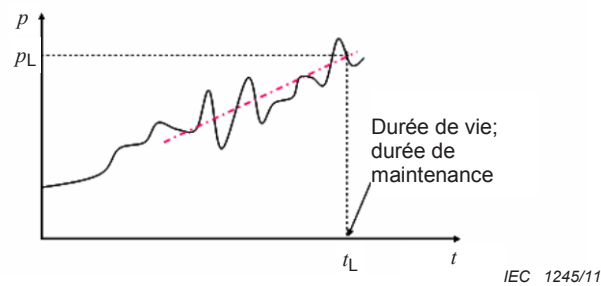


Figure A.6 – Comportement de la propriété en fonction du temps, détection de seuil (point limite p_L) et temps de maintenance

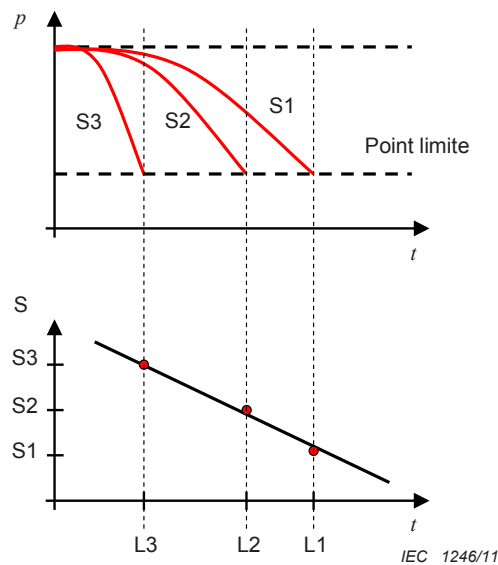


Figure A.7 – Correspondance entre les relevés de vieillissement pour la propriété p (en rouge), obtenus à différents niveaux de contrainte, et la ligne de vie qui en résulte

Références – Figures A.6 et A.7

DISSADO, L.A., FOTHERGILL, J. C., "Electrical Degradation and Breakdown in Polymers", Peter Peregrins, London, 1992 (Figure A.6)

MONTANARI, G.C., "Insulation Diagnosis of High Voltage Apparatus by Partial Discharge Investigation", Properties and applications of Dielectric Materials, 2006. 8th International Conference on, June 2006 Page(s):1 – 11 (Figure A.7)

A.9 Volume, global

Volume intrinsèque – la masse principale ou le corps principal; la portion principale ou la plus grande. Certaines mesures telles que la résistance ou le facteur de dissipation (tan delta) donnent des valeurs des propriétés globales de l'isolation

A.10 Sous-produit

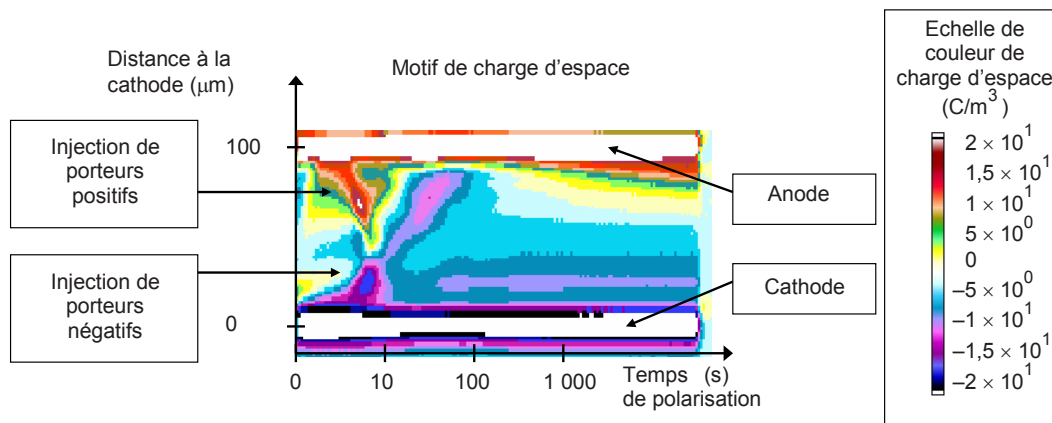
Substance produite au cours du processus de fabrication, d'utilisation ou de destruction d'un objet, par exemple lorsqu'il est brûlé, le plastique produit des sous-produits dangereux.

A.11 Cavité

Petit vide ou espace à l'intérieur d'un matériau.

A.12 Injection de charge

Processus par lequel des porteurs de charge sont forcés de pénétrer dans un matériau isolant, généralement à partir d'électrodes, sous l'effet d'un champ électrique. Pour être injectées, les charges doivent surmonter une barrière de potentiel. Le mécanisme d'injection est fortement affecté par les propriétés de l'interface électrode-isolateur, la température, l'amplitude du champ électrique et la polarité. La charge injectée peut être mesurée par diverses techniques, telles que la méthode électroacoustique pulsée (PEA)³, la méthode de l'onde de pression induite par laser (laser-induced pressure pulse, LIPP), etc. Un exemple d'injection de charge est montré à la Figure A.8.



IEC 1247/11

Figure A.8 – Exemple d'injection de charge de porteurs positifs (lacunes) à partir de l'anode et de porteurs de charge négative (électrons) à partir de la cathode dans une éprouvette plate en PE, détectés par la mesure de la charge d'espace par la méthode PEA

Références – Figure A.8

DISSADO, L.A., FOTHERGILL, J.C. *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, Peter Peregrins, London, 1992

MONTANARI, G.C., *The electrical degradation threshold of polyethylene investigated by space charge and conduction current measurements*, IEEE Trans. on Diel. El. Insul., Vol. 7, No. 3, pp. 309-315, June 2000

MONTANARI, G.C., *Dielectric material properties investigated through space charge measurements*, IEEE Trans. on Diel. El. Insul., Vol. 11, pp. 56-64, 2004

BOUFAYED, F., TEYSSÉDRE, G. LAURENT, C., LE ROY, S., DISSADO, L.A., SEGUR, P., MONTANARI, G.C., *Models of bipolar charge transport in polyethylene*, Journ. Appl. Phys., Vol. 100, pp. 104105.1-10, 2006

³ PEA = Pulsed electro-acoustic method.

A.13 Contrainte de compression

Force qui agit sur un matériel avec une tendance à le comprimer dans la direction de la force.

Contrainte de compression (σ) = Force de compression (F)/Section d'origine (A)

La force de compression s'oppose à la force de traction.

La résistance à la compression d'un matériau est la valeur de la contrainte de compression uniaxiale atteinte lorsque le matériau rompt complètement (point rouge sur la courbe). Une courbe contrainte-déformation ressemble à la courbe montrée à la Figure A.9:

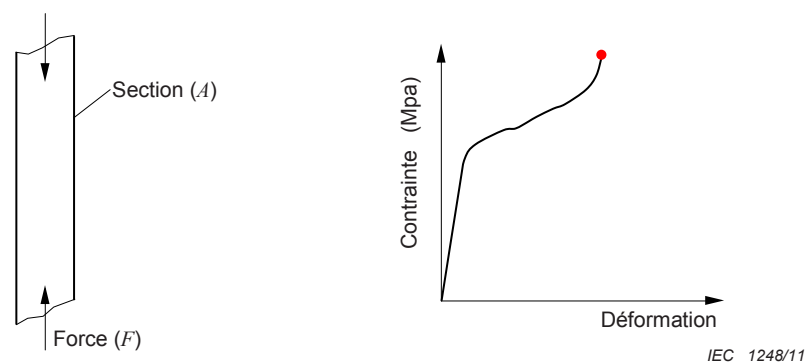


Figure A.9 – Courbe contrainte-déformation pour un matériau type

- La limite d'élasticité définit la fin de la région linéaire.
- En dessous de la limite d'élasticité, $\sigma = E\varepsilon$ (Loi de Hooke) où E est le module de Young pour la compression.
- Au-dessus de la limite d'élasticité, le matériau a un comportement plastique et ne retournera pas à sa longueur initiale lorsque la charge sera retirée.
- L'unité de mesure est le pascal.

Références – Figure A.9

CEI 60371-2, *Spécification pour les matériaux isolants à base de mica - Partie 2: Méthodes d'essais*

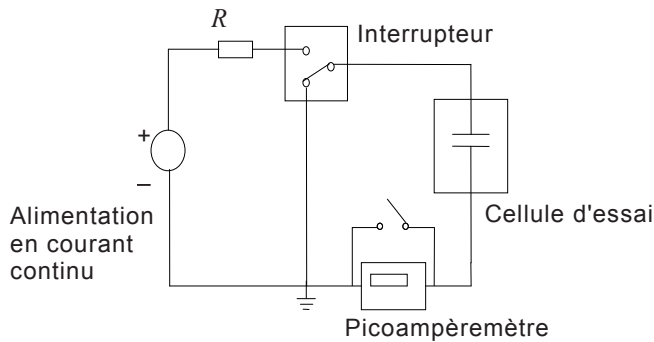
CEI/TR 62039, *Selection guide for polymeric materials for outdoor use under HV stress* (disponible en anglais seulement)

A.14 Courant de conduction

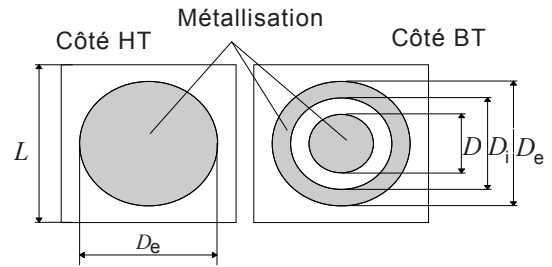
En appliquant un échelon de tension à un diélectrique entre deux électrodes, il circule un courant ayant trois composantes: le courant de charge, qui représente la réponse rapide associée à une variation d'amplitude du champ électrique, le courant d'absorption, associé au transitoire de polarisation et le courant de conduction, qui représente le régime établi du courant dépendant du champ appliqué et de la température.

Le courant de conduction est mesurable en appliquant une tension c.c. à une éprouvette isolante et en attendant le régime établi, où toutes les contributions apportées par les courants de charge et d'absorption deviennent négligeables. .

L'exemple de montage de mesure, montré aux Figures A.10, A.11, et A.12, est le même que celui utilisé pour la mesure du courant d'absorption.



IEC 1242/11

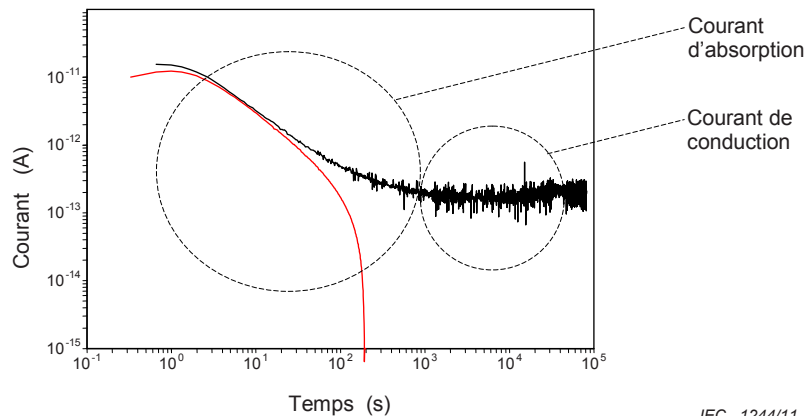


IEC 1243/11

NOTE La métallisation est nécessaire pour relier l'échantillon aux électrodes.

Figure A.10 – Plan du montage de mesure pour le courant de charge/décharge

Figure A.11 – Exemple de préparation d'échantillon



IEC 1244/11

Figure A.12 – Courant de charge/décharge sur un film de PEhd

Les mesures du courant de conduction peuvent être réalisées à différentes valeurs du champ électrique, E , afin d'estimer la valeur de seuil, E_T , après laquelle les caractéristiques courant-tension d'isolation montrent une transition d'un comportement ohmique (dans lequel la conductivité dépend seulement de la température) vers un comportement de champ élevé (dans lequel l'accumulation de charges d'espace affecte le mécanisme de conduction).

La dépendance de la conductivité par rapport à la température et au champ; σ , est prise en compte dans l'équation suivante:

$$\sigma(T, E) = A \exp\left(-\frac{\Delta U}{k_B T}\right) \frac{\sinh\langle B|E\rangle}{|E|} \quad (\text{A.1})$$

où ΔU est l'énergie d'activation thermique, k_B la constante de Boltzmann et A et B sont des constantes.

Les exemples de mesures du courant sur des films PET à sont illustrés aux Figures A.13 et A.14 pour souligner la forte dépendance de la conductivité par rapport à la température et au champ électrique.

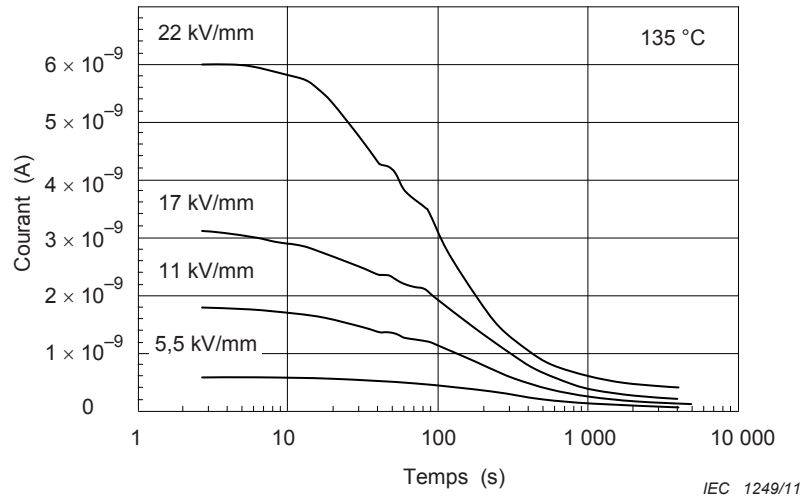


Figure A.13 – Courant de charge à 135 °C et à différentes valeurs du champ électrique en c.c.

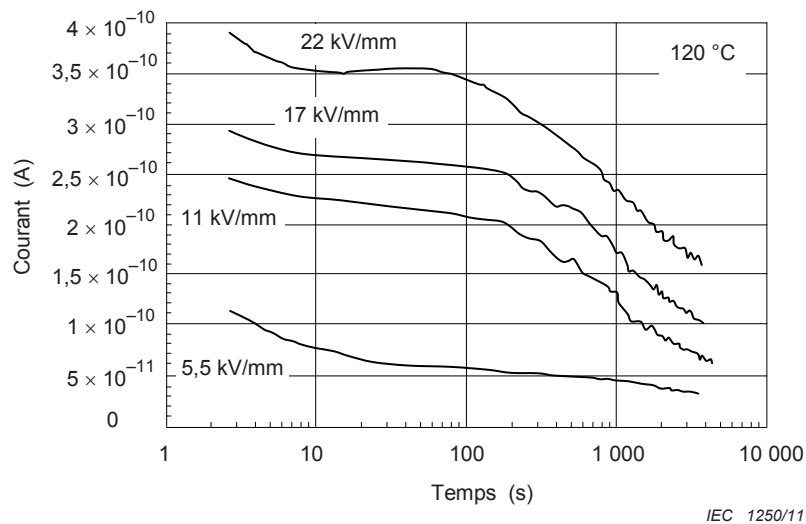


Figure A.14 – Courant de charge à 120 °C et à différentes valeurs du champ électrique en c.c.

Références – Figures A.10, A.11, A.12, A.13 et A.14

CLARK, Frank M., *Insulating Materials for Design and Engineering Practice*, J. Wiley & Sons, 1962 (Figure A.10)

MONTANARI, G.C., MAZZANTI, G., PALMIERI, F., MOTORI, A. *Investigation of charge transport and trapping in LDPE and HDPE through space charge and conduction current measurement*, ICSD, June 2001, pp. 97-100 (Figure A.10)

DISSADO, L.A., FOTHERGILL, J.C., *Electrical degradation and breakdown in polymers*, Peter Peregrinus Ltd, ISBN 0-86341-196-7, 1992 (Figure A.10)

KUMAR, A., PERLMAN, M.M., *Steady-state conduction in high density polyethylene with field-dependent mobility*, Jour. App. Phys., Vol. 71, No.2, pp. 735 – 738, 1992 (Figure A.10)

MONTANARI, G.C., GHINELLO, I., MOTORI, A., DAS GUPTA, D. *An investigation of conduction mechanisms at high-fielding PET*, IEEE Conf. Electr. Insul. Diel. Phen., pp. 451-454, 1997 (Figure A.10, A.13 et A.14)

BODEGA, R., MONTANARI, G.C., MORSHUIS, P.H.F., *Conduction current measurements on XLPE and EPR insulation*, IEEE Conf. Electr. Insul. Diel. Phen., pp. 101-105, 2004 (Figure A.10, A.11 et A.12)

A.15 Contaminant (impureté)

Substance étrangère de matériau dans un solide, liquide ou gaz isolant qui a habituellement un effet nuisible sur une ou plusieurs propriétés.

A.16 Défaut de continuité/discontinuité

Présence d'une variation de propriétés entre deux points du même matériau.

A.17 Effet de couronne

Selon l'ASTM D1868-73, l'effet de couronne est un type de décharge localisée résultant d'une ionisation gazeuse transitoire dans un système d'isolation lorsque la contrainte de tension électrique dépasse une valeur critique.

L'effet couronne peut se produire au niveau de conducteurs, tels que les lignes à haute tension. Les forts gradients de champ électrique au niveau des conducteurs ayant une forme courbe, des pointes aiguës ou des arêtes vives conduisent à un claquage de l'air environnant. Il existe des processus de couronne négatifs et positifs qui ont des comportements d'inflammation et de claquage différents. L'effet couronne est une ionisation de gaz et il s'accompagne d'émission de lumière et d'ondes sonores détectables (exemple à la Figure A.15).

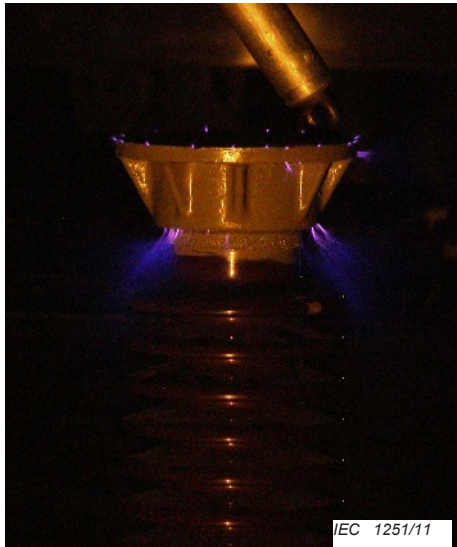


Figure A.15 – Effet de couronne à la partie métallique supérieure de l'isolateur

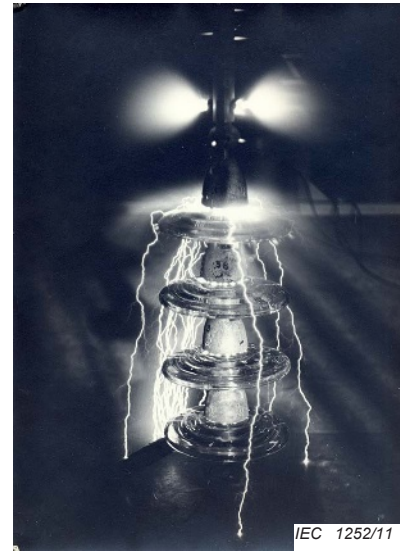


Figure A.16 – Effet de couronne à la partie supérieure et production d'arc vers la terre

Références – Figures A.15 et A.16

SMIT, J. University of Technology Delft, *images non-publiés*.

A.18 Corrosion

Attaque ou altération de la surface causée par un transfert ionique sous une différence de potentiel.

La corrosion signifie la dégradation de propriétés essentielles dans un matériau en raison de réactions chimiques avec son environnement. La corrosion comprend également la dissolution des matériaux céramiques et peut se référer à la décoloration et à l'affaiblissement de polymères par la lumière ultraviolette du soleil.

A.19 Substance corrosive

Détruit ou endommagera de manière irréversible une autre substance avec laquelle elle est entrée en contact.

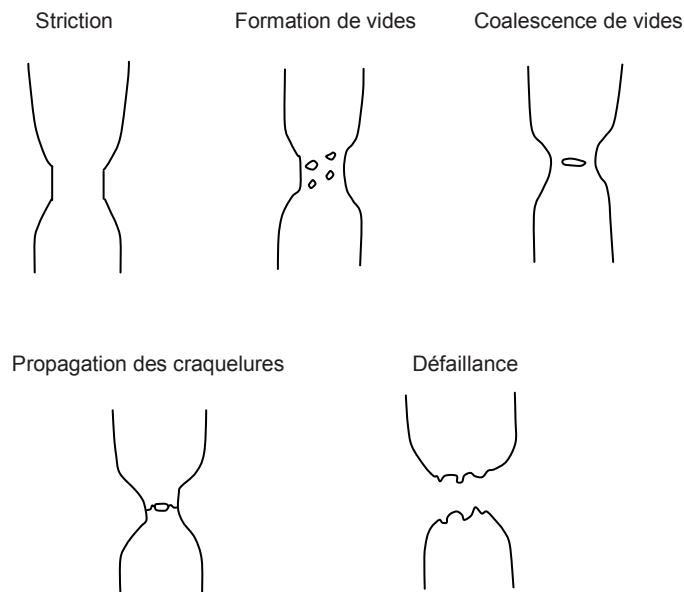
A.20 Fissurer, craquelure

Briser, avec ou sans séparation en parties. Rupture d'un matériau/isolateur à des profondeurs supérieures ou égales à 0,1 mm.

Séparation de craquelure – Il y a trois stades de fracture:

- Le stade I, ou mode d'ouverture, est caractérisé par une contrainte perpendiculaire aux faces de la craquelure.
- Le stade II, stade de cisaillement direct ou de glissement, a une contrainte de cisaillement perpendiculaire au front de craquelure.

- Le stade III est le stade du déchirement, avec une contrainte de cisaillement parallèle au front de craquelure.



IEC 1253/11

Figure A.17 – Stades de la fracture ductile mécanique (fissuration)
(source inconnue)

Références– Figure A.17

CEI 60811-3-1, *Méthodes d'essais communes pour les matériaux d'isolation et de gainage des câbles électriques – Troisième partie: Méthodes spécifiques pour les mélanges PVC – Section un: Essai de pression à température élevée – Essais de résistance à la fissuration*

A.21 Fluage

Déformation continue d'un matériau soumis à une contrainte constante. Le fluage est le terme utilisé pour décrire la tendance d'un matériau solide à se déplacer lentement ou se déformer de façon permanente sous l'influence de contraintes. Il résulte d'une exposition à long terme à des niveaux de contrainte qui sont en dessous de la limite d'élasticité ou résistance à la rupture du matériau. Le fluage augmente toujours avec la température.

A.22 Défaut

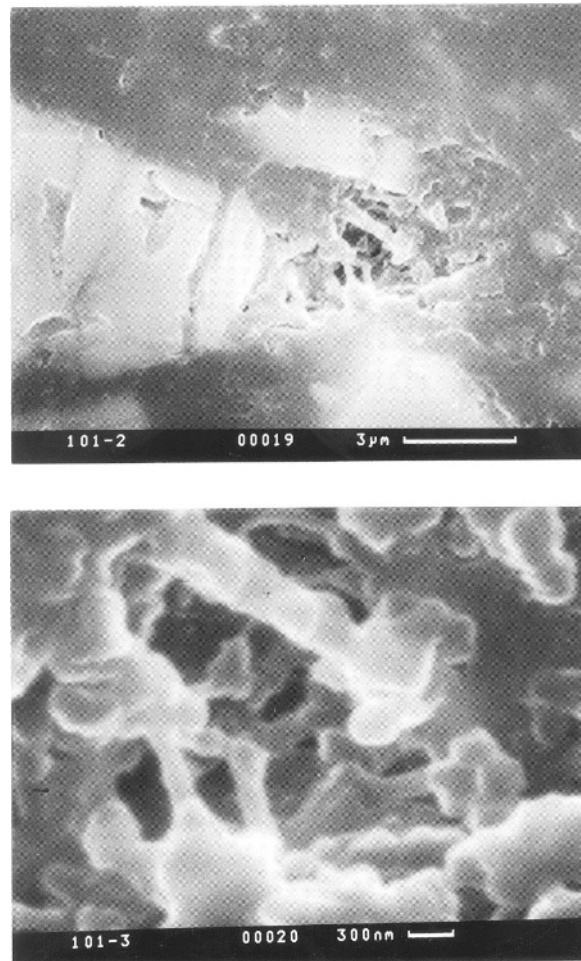
Imperfection de l'état d'une entité (ou faiblesse inhérente) qui peut conduire à une ou plusieurs défaillances de l'entité.

Une imperfection, lacune, malformation ou sorte quelconque d'insuffisance de la structure d'un matériau qui conduit à la perte partielle de la fonction du matériau en question.

Un matériel isolant peut contenir un vide en raison d'un malaxage et d'un dégazage incorrects au stade de la fabrication. Selon la forme et la taille de ce vide contenant du gaz, une décharge partielle peut se produire à une certaine contrainte de tension électrique.

Par exemple, dans une structure de résine époxy, les chaînes polymères sont orientées de façon aléatoire. En raison de la réticulation, la contrainte interne produit des zones orientées

localement ou dites cristallisées avec d'autres propriétés mécaniques ou électriques. Cela peut agir comme point d'initiation d'une faiblesse interne de type mécanique ou électrique.



IEC 1254/11

Figure A.18 – Photo des séquences de la structure époxy et vide

Références – Figure A.18

SMIT, J.J., avec l'autorisation de KEMA, NL

A.23 Délamination

Séparations des couches de matériau. La délamination est un mode de défaillance des matériaux composites stratifiés. Les contraintes cycliques, choc, etc. provoquent la séparation des couches, avec formation d'une structure telle le mica de couches distinctes, avec perte sensible de ténacité mécanique. La délamination est une forme insidieuse de défaillance à l'intérieur du matériau, sans présenter de signe évident à la surface, ressemblant en cela beaucoup à la fatigue du métal

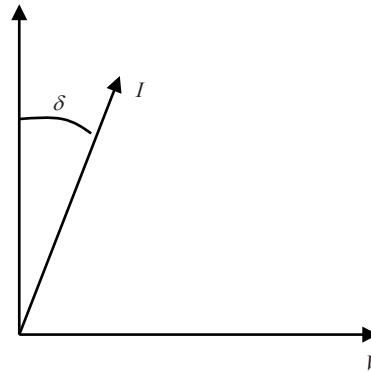
A.24 Dépolymérisation

Processus chimique qui sépare un polymère en monomères ou un composé polymérique. Un exemple de dépolymérisation est la décomposition du papier de cellulose due au vieillissement thermique.

A.25 Perte diélectrique

Puissance provenant d'un champ électrique variable dans le temps absorbée par un diélectrique et habituellement dissipée sous forme de chaleur.

$$\begin{aligned} \text{Tan}(\delta) &= \frac{\text{Puissance réelle}}{\text{Puissance réactive}} \\ &= \frac{V \times I \sin(\delta)}{V \times I \cos(\delta)} \end{aligned}$$



IEC 1255/11

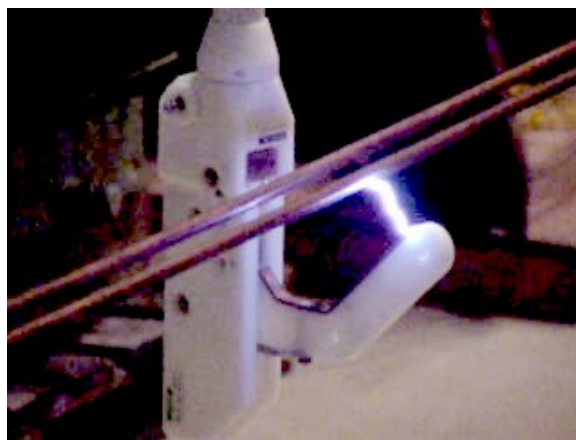
Angle de pertes diélectriques = la valeur de l'arc tangente du facteur de dissipation diélectrique. Pertes diélectriques = puissance provenant d'un champ électrique variable dans le temps et absorbée par une substance polarisée, à l'exclusion de la puissance absorbée due à la conductivité de la substance.

A.26 Décharge

Mouvement discontinu de porteurs de charges à travers un milieu isolant, initialement déclenché par des avalanches électroniques et accentué par des processus secondaires.

Une décharge peut se développer en un arc, qui se produit à des conditions d'émission par effet de champ intense.

Une dite décharge partielle se produit lorsqu'une décharge ne ponte pas entièrement le dégagement de l'isolation. Elle peut provoquer la formation d'arborescences électriques dans le volume ou le long de la surface d'une isolation (voir cheminement).



IEC 1256/11

Figure A.19 – Décharge entre conducteurs à travers l'air



IEC 1257/11

Figure A.20 – Isolation en papier dégradée par les décharges superficielles électriques

Références – Figures A.19 et A.20

SMIT, J.J., Delft University of Technology, NL

A.27 Discontinuité

Une discontinuité est toute séparation locale de matériaux ou une cassure (fracture) dans un matériau.

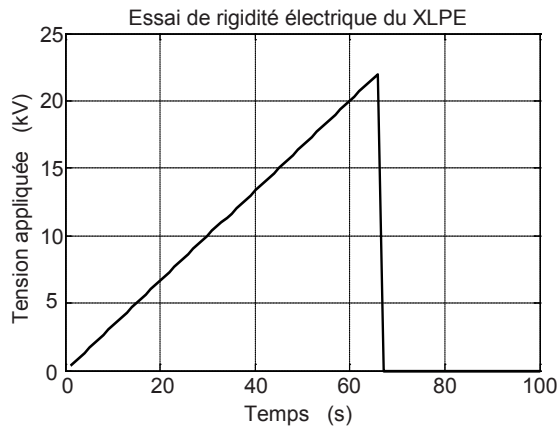
A.28 Claquage électrique (y compris la rigidité diélectrique)

Le terme 'claquage électrique' est utilisé lorsqu'un diélectrique entre deux électrodes, soumis à une tension constante ou croissante, perd toutes ses propriétés isolantes et devient conducteur, entraînant un court-circuit entre les électrodes. Sous une contrainte électrique suffisante, le claquage électrique peut se produire à l'intérieur de solides, de liquides ou de gaz.

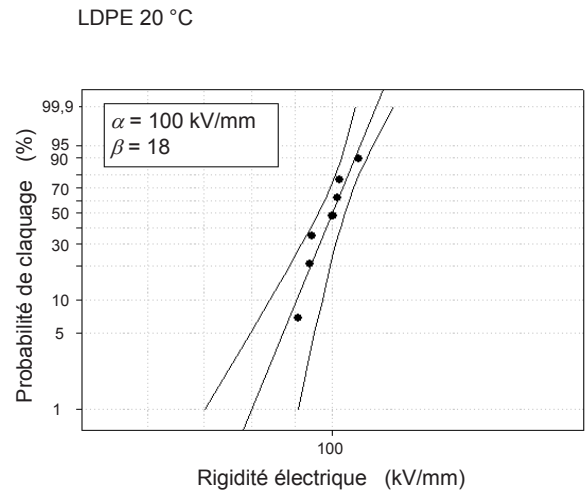
Lorsqu'une tension croissante est appliquée à un diélectrique, la valeur minimale du champ électrique à laquelle le claquage se produit, entraînant la rupture du matériau d'isolation, est appelée 'rigidité diélectrique'.

La mesure de la rigidité diélectrique ou de la tension de claquage sur des matériaux d'isolation électrique constitue un élément de caractérisation majeur en plus d'être un outil de diagnostic pour l'évaluation du vieillissement et la caractérisation de l'endurance. En fait, la rigidité diélectrique est une propriété sensible au vieillissement électrique et thermique, considérablement influencée par les phénomènes de dégradation qui se produisent dans les matériaux isolants.

La mesure de la rigidité diélectrique est effectuée à tension croissante (à taux constant ou avec une procédure pas à pas) et la valeur obtenue doit être qualifiée par référence au type de tension appliquée, à la méthode de son application, aux types d'électrodes d'essai, à l'épaisseur des échantillons d'isolation, à la température et au traitement de conditionnement auxquels le matériau a été exposé avant et pendant l'essai réel.



IEC 1258/11



IEC 1259/11

Figure A.21 – Exemple d'essai de rigidité diélectrique sur un échantillon de XLPE (polyéthylène réticulé) de 0,2 mm d'épaisseur

Figure A.22 – Résultats des essais de mesure de rigidité diélectrique par courbe de Weibull à deux paramètres réalisés sur sept éprouvettes de XLPE de 0,2 mm d'épaisseur

La fonction de Weibull à deux paramètres est généralement utilisée pour traiter des données obtenues à parti d'une mesure de rigidité diélectrique:

$$F(E) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (\text{A.2})$$

où F est la probabilité de défaillance cumulée et α et β are sont les paramètres d'échelle et de forme.

Il existe certains cas où la distribution de Weibull à trois paramètres s'ajuste le mieux aux données de claquage (par exemple données de tension de claquage à court terme). Toutefois, dans la majorité des cas, l'utilisation de la distribution de Weibull à deux paramètres est commode car elle permet des procédures simples pour le calcul de paramètres et d'intervalles de confiance.

Références – Figure A.21

CLARK, Frank M., *Insulating Materials for Design and Engineering Practice*, J. Wiley & Sons, 1962

Electric strength tests performed at LIMAT lab., University of Bologna.

CEI 60216-1, *Matériaux électriques isolants – Propriétés d'endurance thermique – Partie 1: Méthodes de vieillissement et évaluation des résultats d'essai*

CEI 61251, *Matériaux isolants électriques – Évaluation de l'endurance à la tension alternative – Introduction*

CEI 61710, *Modèle de loi en puissance – Test d'adéquation et méthodes d'estimation des paramètres*

Références – Figure A.22

Montanari, G.C. University of Bologna IT

A.29 Électrique

Contenant, produisant, découlant de l'électricité, ou actionné par l'électricité.

NOTE Exemples d'utilisation du terme 'électrique': énergie électrique, lampe électrique, moteur électrique, grandeur électrique.

A.30 Matériau isolant électrique (MIE)

Matériau de conductivité électrique faible pratiquement négligeable, utilisé pour séparer des pièces conductrices portées à des potentiels différents.

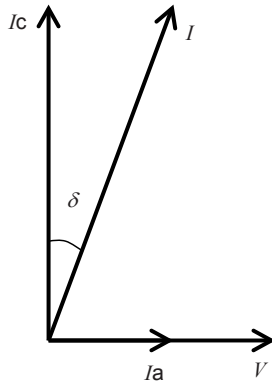
[CEI 60050-212:2010, 212-11-01, modifiée]

A.31 Système d'isolation électrique

Structure isolante, comprenant un ou plusieurs matériaux isolants électriques (MIE) avec les parties conductrices associées, utilisée dans un dispositif électrotechnique.

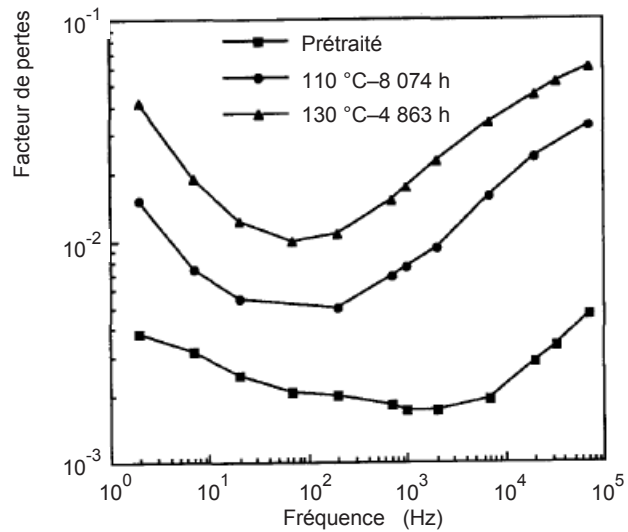
A.32 Pertes électriques

Perte d'énergie qui est associée à un champ électrique dans un matériau et qui est habituellement dissipée sous forme de chaleur. Les pertes électriques d'un matériau diélectrique sont données par les pertes par conduction (courant continu), associées à l'effet Joule généré par le courant de conduction à travers le diélectrique, et les pertes par hystérésis, données par le retard de la polarisation P par rapport au champ électrique E qui crée une boucle d'hystérésis sur le plan $P - E$ et, donc, une perte d'énergie à chaque cycle de tension alternative. Dans un champ électrique sinusoïdal, le courant absorbé par un matériau diélectrique réel n'a pas une avance de 90° sur la tension, V , comme le courant d'un diélectrique idéal I_c , mais il a une composante active en phase avec la tension, I_a , comme montré à la Figure A.23. Le courant réel, I , est retardé par rapport à I_c d'un angle, δ , qui est appelé «angle de pertes» et la tangente de δ est appelée «facteur de pertes». Le facteur de pertes varie en fonction de la température et de la fréquence dans un matériau diélectrique et la variation du spectre du facteur de pertes pour un SIE au cours de sa durée de vie peut être utilisée comme marqueur de vieillissement.



IEC 1260/11

Figure A.23 – Angle de pertes d'un diélectrique



IEC 1261/11

Figure A.24 – Facteur de pertes pour les câbles en XLPE prétraités et XLPE, mesuré à 90 °C et tracé en fonction de la fréquence thermiquement vieillis (à 110 °C et 130 °C)

Références – Figures A.23 et A.24

ZAENGL, W.S., *Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. I. Theoretical considerations*, IEEE El. Ins. Magazine Vol.19 n. 5, pp. 5-19, 2003 (Figure A.23)

JONSCHER, A.K., *Dielectric relaxations in solids*, Chelsea Dielectric Press, London, 1983 (Figure A.23)

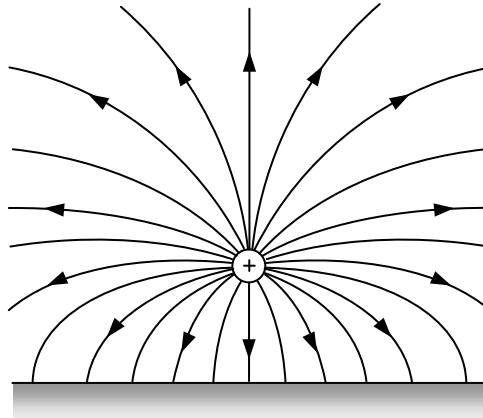
MONTANARI, G. C., DAS GUPTA, D.K., *Polarization and Space Charge Behavior of Unaged and Electrically Aged Crosslinked Polyethylene*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7 No. 4, August 2000 (Figure A.23)

MOTORI, A., SANDROLINI, F., MONTANARI, G.C., LOGGINI, M. *Electrical properties for detection of thermal aging in XLPE cable models*, Properties and Applications of Dielectric Materials, 1991, Proceedings of the 3rd International Conference on, 8-12 July 1991 Page(s):761 - 764 vol.2

A.33 Contrainte électrique (c.a., c.c., f, transitoires)

Champ électrique qui agit sur le matériel. Si la contrainte dépasse le seuil de la rigidité diélectrique de l'isolation, il se produit un vieillissement ou un claquage. La contrainte peut être décrite par des caractéristiques telles que l'amplitude de crête, le temps de montée, la durée ou l'impulsion.

Il se crée un champ électrique dans l'espace qui entoure un corps chargé et il en résulte une force exercée sur toutes les autres charges placées dans le champ.



IEC 1262/11

Figure A.25 – Lignes de champ à partir d'une charge positive au-dessus d'un conducteur plan

Références – Figure A.25

CEI 60243-1, *Rigidité diélectrique des matériaux isolants – Méthodes d'essai – Partie 1: Essais aux fréquences industrielles*

CEI 60243-2, *Rigidité diélectrique des matériaux isolants – Méthodes d'essai – Partie 2: Exigences complémentaires pour les essais à tension continue*

CEI 60243-3, *Rigidité diélectrique des matériaux isolants – Méthodes d'essai – Partie 3: Prescriptions complémentaires pour les essais aux ondes de choc 1,2/50 μ s*

CEI 60664-4, *Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension – Partie 4: Considérations sur les contraintes de tension à haute fréquence*

A.34 Arborescence électrique

L'arborescence est un phénomène électrique de préclaquage. Des croissances telles des arbres, constituées de microcanaux carbonisés ou autres que solides, peuvent se produire à des renforcements de contrainte tels que saillies, contaminants, vides ou arborescences d'eau soumis à des contraintes électriques pendant des durées prolongées. Le terme est appliqué au type de dommage qui progresse à travers l'isolation électrique sous contrainte électrique de telle façon que, s'il est visible, son trajet ressemble à la forme d'un arbre. Après initiation en un point de contrainte élevée et divergente, l'arborescence peut progresser dans l'isolation par décharge partielle. Les arborescences électriques consistent en des canaux creux qui résultent de la décomposition du matériau.



- Initiation d'arborescences électriques due à l'injection et à l'extraction de charges à partir de la concentration de contraintes dans l'isolation. Le mouvement des charges occasionne des dommages à l'isolation et provoque la formation finale d'une fissure.

La croissance d'une arborescence électrique est réalisée par l'action de décharges partielles. Les arborescences peuvent donner des motifs caractéristiques des décharges partielles.

Différentes formes d'arborescence en fonction de la contrainte et de la fréquence.

Les arborescences électriques abaissent en permanence la résistance de l'isolation au courant alternatif et aux ondes de chocs.

La plupart des isolations extrudées sont susceptibles de dégradation par les arborescences électriques.

Figure A.26 – Arborescence électrique

Références – Figure A.26

DISSADO, L.A., FOTHERGILL, J.C., *Electrical degradation and breakdown in polymers*, Peter Peregrinus Ltd, ISBN 0-86341-196-7, 1992

A.35 D'électricité

Relatif à l'électricité, mais n'ayant ni ses propriétés ni ses caractéristiques.

NOTE Exemples d'emploi de ce concept: manuel d'électricité.

A.36 Érosion

- (1) Perte de matière par courant de fuite, décharge en couronne ou décharge partielle. Dégradation irréversible et non conductrice de la surface de l'isolateur qui se produit par perte de matière, qui peut être uniforme localisée ou de forme arborescente.
- (2) La détérioration se produit par l'action abrasive de fluides, habituellement accélérée par la présence de particules solides de matière en suspension.



Figure A.27 – Calcination d'EPDM et érosion sur raccord

Références – Figure A.27

HAVERKAMP, W.B., *unpublished pictures*.

A.37 Externe

Relatif à l'extérieur d'un objet.

Isolation externe = les distances dans l'air atmosphérique et le long des surfaces en contact avec l'air atmosphérique d'une isolation solide qui sont soumises à des contraintes électriques et aux effets des conditions atmosphériques et autres conditions externes telles que la pollution, l'humidité, les ravageurs, etc.

(L'isolation interne est constituée des parties solides, liquides ou gazeuses de l'isolation qui sont protégées de l'atmosphère).



IEC 1265/11

Figure A.28 – Isolation externe défailante – Exemple 1

IEC 1266/11

Figure A.29 – Isolation externe défailante – Exemple 2**Références – Figures A.28 et A.29**

Source: http://9engineer.com/index.php?m=article&a=show&article_id=2186 (2011-01-09)

A.38 Vieillessement électrique extrinsèque

Changements irréversibles des propriétés d'un SIE, produits par l'action de facteurs de vieillissement sur des imperfections introduites involontairement dans le SIE.

A.39 Défaillance

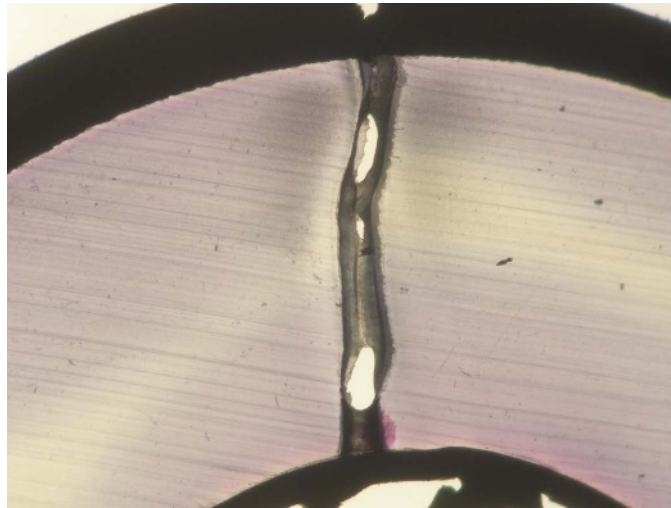
Incapacité d'un SIE ou d'un MIE à accomplir ses fonctions de manière satisfait en service. La cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. La défaillance n'est pas nécessairement le claquage électrique de la fonction d'isolation. En général, un critère pour la perte de performance diélectrique d'un SIE doit être fixé, au-delà duquel le fonctionnement fiable est considéré inacceptable. Par exemple, cela pourrait être le niveau des pertes diélectriques, décharges partielles ou le niveau d'un gaz spécifique dans l'huile dans des conditions données.

**défaillance par vieillissement ;
défaillance par usure**

Défaillance dont la probabilité d'occurrence augmente avec le temps, par suite de processus inhérents à l'entité.

défaillance critique

Défaillance considérée comme susceptible de causer des blessures à des personnes ou des dégâts matériels importants, ou de conduire à d'autres conséquences jugées inacceptables.



IEC 1267/11

Figure A.30 – Défaillance critique d'une isolation solide de câble (XLPE) par claquage électrique

Références – Figure A.30

STEENNIS, E.F., avec l'autorisation de KEMA, NL.

A.40 Fatigue

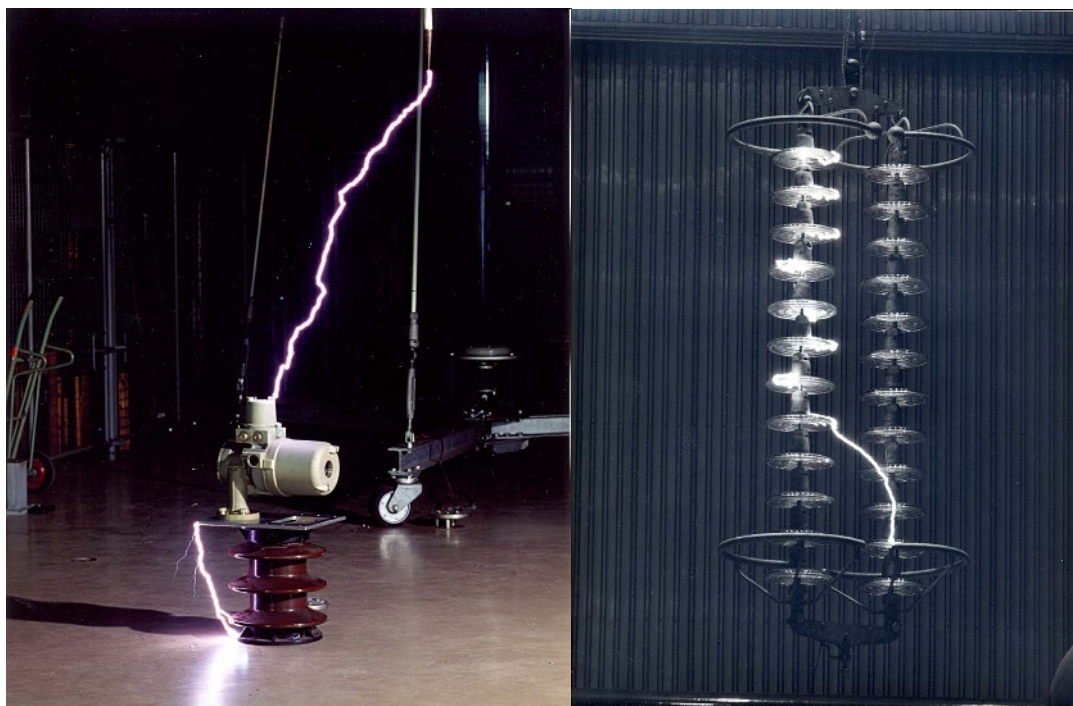
Dégradation d'un matériau lorsqu'il est soumis à des cycles répétés de déformation ou de contrainte en dessous de sa résistance à la traction.

Exemples mécaniques: fissurations de fatigue sur une barre de polymère renforcé aux fibres d'un OLTC (changeur de prise en charge) d'un transformateur de puissance; connecteur de ligne HT.

A.41 Contournement

Claquage entre des électrodes, dans un gaz, un liquide ou le vide, au moins en partie le long de la surface d'une isolation solide.

NOTE La présence de canaux carbonisés ou de perforations à travers l'éprouvette distingue les essais où un claquage s'est produit des autres où un contournement s'est produit.



IEC 1268/11

Figure A.31 – Exemple de contournement

Références – Figure A.31

SMIT, J.J., Delft University of Technology, NL.

A.42 Gradient

Variation graduelle de la grandeur d'une fonction scalaire, par exemple la température ou la tension électrique.

A.43 Installation

L'ensemble d'un système de machines, d'appareils et d'accessoires, parfois y compris les bâtiments et les terrains sur lesquels ils sont situés, lorsqu'ils sont montés et agencés pour un travail pratique, comme dans l'éclairage électrique, la transmission de puissance, etc.

A.44 Installation d'un sous-station



Figure A.32 – Sous-station – Installation en extérieur

IEC 1269/11

Références – Figure A.32

Siemens Press Pictures, Siemens AG, Munich/Berlin.

A.45 Isolation, extrudée

Isolation consistant généralement en une couche d'un matériau thermoplastique ou thermodurcissable et obtenue par extrusion.

Dans les câbles extrudés, l'isolation est extrudée avec une couche semiconductrice (polymère rempli de carbone) qui est extrudé directement par-dessus le conducteur. Une autre couche semiconductrice est extrudée par-dessus l'isolation. Les couches peuvent être extrudées en un seul processus (extrusion triple tête) ou en deux processus (tandem).

A.46 Isolation, stratifiée

Isolation formée de couches typiquement à partir de bandes. Typiquement, les bandes sont du papier de cellulose ou du polypropylène ou une combinaison des deux. Les bandes sont imprégnées d'un fluide isolant pour augmenter la résistance au claquage électrique par l'élimination de tout gaz présent dans la bande fibreuse ou les déjoints entre couches adjacentes. Les bandes de papier sont utilisées comme isolation pour les transformateurs de puissance et pour les câbles de transmission moyenne tension et haute tension. Le stratifié de papier au polypropylène (PPL) est utilisé dans les câbles de transmission haute tension.

L'isolation par papier imprégné est l'un des plus anciens types d'isolation dans les câbles haute tension, certains de ces câbles étant en service depuis plus de 80 ans.

A.47 Support isolant

Matériau de haute résistance électrique qui sépare des parties conductrices à différents potentiels électriques. L'isolation peut être gazeuse (l'air ou SF₆, par exemple), liquide (huile minérale, synthétique ou silicone, par exemple) ou solide (porcelaine, résine époxy, polyéthylène, par exemple).

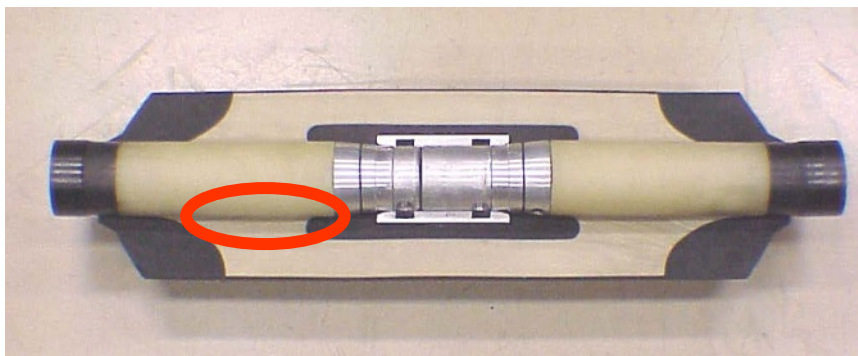
Dans la pratique, les propriétés importantes de l'isolation dans un matériel sont

- résistance élevée au claquage électrique,
- faible conductivité électrique,
- conductivité thermique élevée,
- stabilité thermique,
- bonnes propriétés mécaniques;
- facile à fabriquer
- bonne performance à long terme.

A.48 Interface

Surface formant une frontière commune entre deux matériaux.

Les interfaces macroscopiques et microscopiques sont importantes pour l'évaluation du diélectrique car elles sont une cause majeure de propriétés déviantes ou exceptionnelles. Par exemple, dans les jonctions de câbles HT, des matériaux d'isolation différents ont des interfaces macroscopiques. Comme dans la Figure A.33, l'isolation de câbles en XLPE se trouve en face du matériel enveloppe en caoutchouc silicone de la jonction. Une qualité inadéquate en termes de rugosité/planéité de la couche d'interface produit des contraintes électriques locales qui font que le cheminement interfacial conduit finalement à un claquage.



IEC 1270/11

Figure A.33 – Matériaux d'isolation différents dans les jonctions de câbles HT

Les interfaces microscopiques existent dans les matériaux composites tels que les polymères chargés, par exemple, particules remplies de quartz ayant des interfaces microscopiques avec la matrice de résine époxy, qui peuvent être rendues visibles par des outils de microscopie électronique (photo). Dans le cas des nanocomposites, les particules de charge sont nanométriques, ce qui peut assurer des améliorations exceptionnelles des propriétés thermiques/mécaniques/électriques en raison de la grande surface efficace de l'interface présente dans le matériel. Ces propriétés peuvent surpasser les valeurs obtenues pour les matériaux constitutifs.

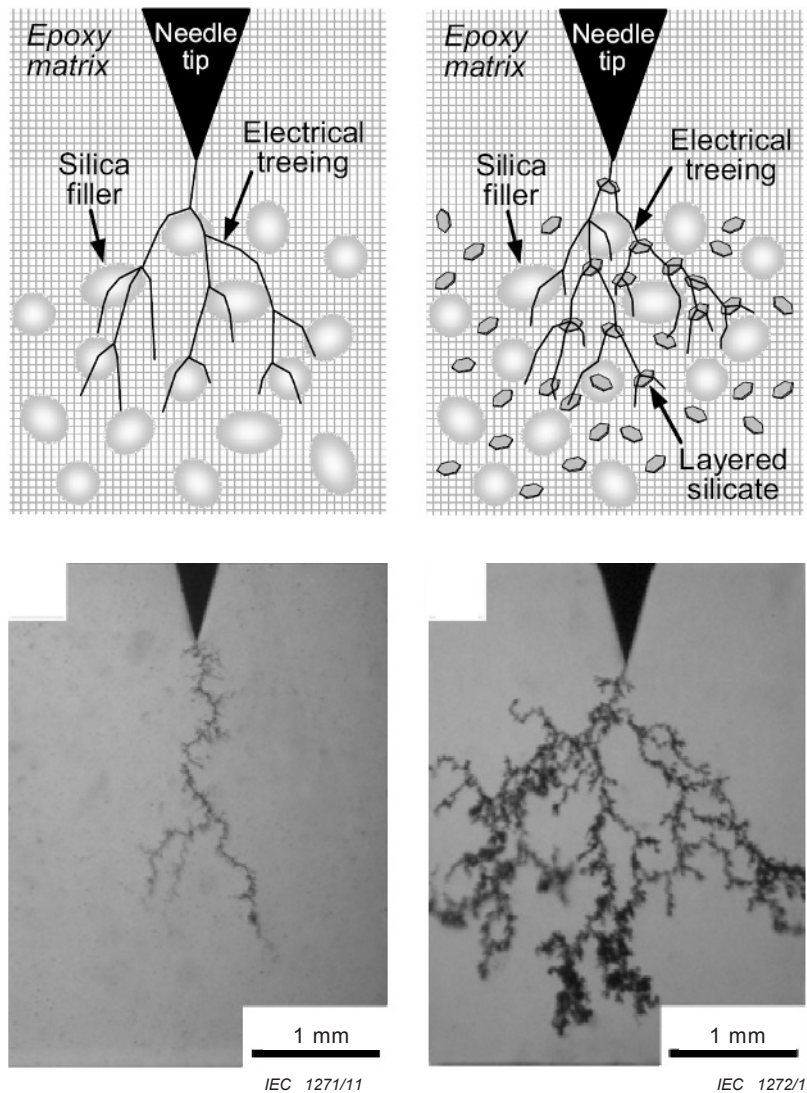


Figure A.34a – Époxy conventionnelle rempli

Figure A.34b – NNMC (OMLS 1,5 vol %)

Figure A.34 – Interfaces internes dans une structure époxy et vide

Références – Figures A.33 et A.34

Courtesy of Prysmian (Figure A.33)

IMAI, T.; SAWA, F.; OZAKI, T.; SHIMIZU, T.; KIDO R; KOZAKO, M.; TANAKA, T., *Effects of Nano- and Micro-filler Mixture on Electrical Insulation Properties of Epoxy Based Composites, Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, 2006 (Figure A.34)

A.49 Claquage intrinsèque

Claquage électrique de courte durée qui se produit en l'absence de défauts microscopiques ou macroscopiques dans le matériel isolant. Le claquage intrinsèque peut être dû à des mécanismes mécaniques, électriques ou thermiques, dans lesquels une contrainte excessive provoque le claquage du SIE. Les mécanismes types pour le claquage intrinsèque sont l'ouverture de la fissure autopropagatrice du fait de contraintes mécaniques orthogonales à la direction du champ appliqué (Figure A.35) et le mécanisme de multiplication d'avalanches électroniques, via des événements de diffusion. Le claquage électrique intrinsèque peut être mesuré par des essais sous tension de choc.

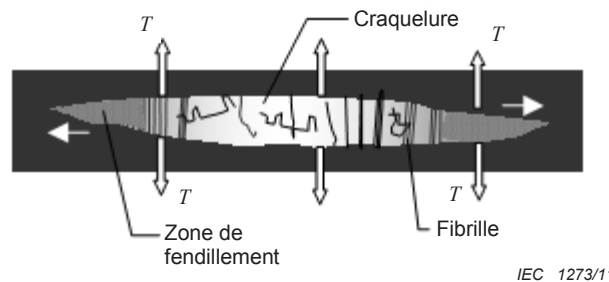


Figure A.35 – Exemple de fendillement et de craquelure dans un espace interlamellaire sous la tension mécanique T

Références – Figure A.35

JONES, J.P., LLEWELLYN, J.P. and LEWIS, T.J. *The Contribution of Field-Induced Morphological Change to the Electrical Aging and Breakdown of Polyethylene*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, No. 5; October 2005

SERRA, S., MONTANARI, G.C. and MAZZANTI, G. *Theoretical model of inception mechanism and growth of defect-induced damages in XLPE cable*, J. Appl. Phys., Vol. 98, pp. 034102.1-034102.15, 2005

CLARK, Frank, M. *Insulating Materials for Design and Engineering Practice*, John Wiley, 1962

A.50 Vieillessement électrique intrinsèque

Vieillessement sous l'influence du matériau lui-même, c'est-à-dire dans des conditions normales de fonctionnement et en l'absence de défauts. Dans un SIE correctement conçu la vitesse de vieillessement intrinsèque est habituellement très lente et peut être négligée, en général, sous des contraintes de fonctionnement normales.

A.51 Perte

Diminution de la capacité d'un objet à un niveau qui conduit à la perte graduelle de la capacité du matériel à accomplir sa fonction prévue.

Perte de l'intégrité de l'isolation, par exemple due à une longueur d'arborescence d'eau de 50 %, qui a son tour conduit immédiatement à l'arborescence électrique et au claquage du câble.



IEC 1274/11

Figure A.36 – Arborescence d'eau

Références – Figure A.36

STEENNIS, E.F., avec l'autorisation de KEMA, NL.

A.52 Fusion

La fusion est un processus qui conduit à un changement de phase d'une substance la faisant passer de l'état solide à l'état liquide.

L'énergie interne d'une substance solide est accrue (typiquement par application de la chaleur) à une température spécifique (appelée point de fusion) à laquelle elle passe à la phase liquide.

Les substances fondent à une température constante, le point de fusion. Aucune autre augmentation de la température (même avec application permanente d'énergie) ne se produit jusqu'à ce que la substance ait fondu.

La fusion d'une isolation solide conduit à une brusque modification des propriétés mécaniques.

A.53 Humidité

Eau dispersée sous forme de vapeur dans un gaz, condensée sur une surface, ou absorbée dans un solide ou un liquide.



Figure A.37 – Impact des UV et de l'humidité après 11 ans de service

Références – Figure A.37

HAVERKAMP, W.B., *image non-publiés*.

A.54 Morphologie

La forme et la structure d'un matériau ou d'une substance. Lorsque les chaînes de molécules d'un matériau sont disposées de façon aléatoire, le matériau a une morphologie amorphe. Par contre, lorsque les chaînes sont disposées en parallèle ou en un agencement ordonné, la morphologie est semi-cristalline comme dans de nombreux polymères thermoplastiques.



Figure A.38 – Structure aléatoire (amorphe) d'une chaîne moléculaire

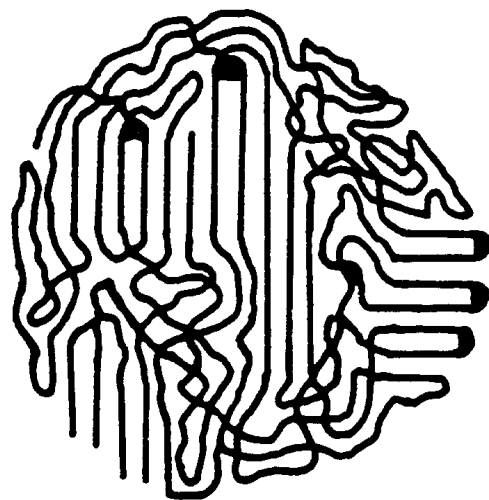
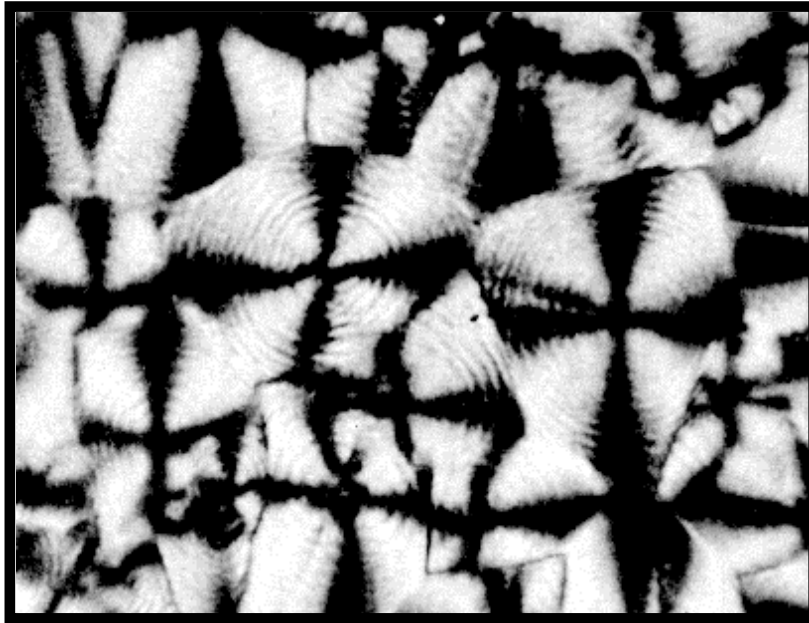


Figure A.39 – Structure orientée (semi-cristalline) d'une chaîne moléculaire



IEC 1278/11

Figure A.40 – Typical morphology of melt-grown polyethylene spherulites

Références – Figures A.38, A.39 et A.40

LI, Christopher Y., *Polymer Thermal Analysis*, Presentation Drexel University, 2002

A.55 Décharge partielle (y compris l'impulsion de décharge partielle et la décharge superficielle)

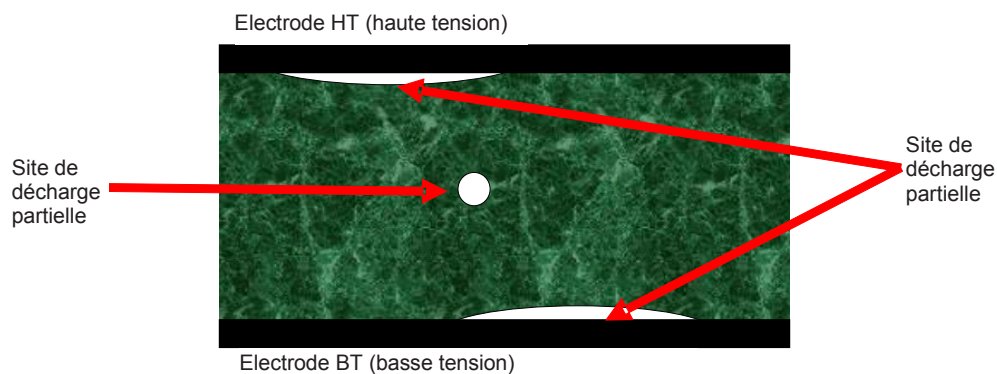
Une décharge partielle est un claquage électrique localisé dont le trajet se développe sur une partie seulement de l'isolation entre des conducteurs et qui peut ou ne peut pas se produire au voisinage d'un conducteur.

Les décharges ont lieu dans des vides à l'intérieur des diélectriques solides ou liquides, dans des gaz et aussi le long de la frontière entre différents matériels isolants. Une décharge partielle se produit lorsque les deux conditions suivantes sont remplies:

- un électron libre est disponible dans le gaz à l'intérieur du vide pour lancer l'avalanche électronique;
- le champ à l'intérieur de la cavité dépasse le champ de seuil.

La seconde condition se produit lorsque l'énergie acquise par un électron, accéléré par le champ électrique dans le libre parcours entre deux chocs ultérieurs avec les atomes ou molécules de gaz est en moyenne suffisamment élevée pour ioniser une nouvelle molécule ou un nouvel atome.

Les décharges partielles sont en général des phénomènes d'énergie faible mais concentrée qui ont toutefois une énergie suffisamment élevée pour occasionner des dommages locaux dans les diélectriques organiques (rupture de chaînes polymères, conduisant à l'oxydation et à la formation d'acides) et pour provoquer l'érosion du matériel diélectrique, avec comme conséquence la défaillance du système d'isolation suite à l'accumulation des dommages.

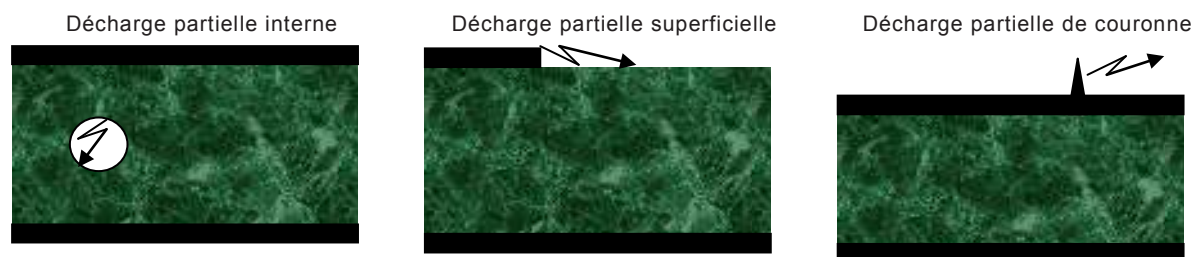


IEC 1279/11

Figure A.41 – Zones où se produisent en général les décharges partielles

Les défauts dans les systèmes d'isolation peuvent être groupés en trois macroclasses:

- les décharges partielles internes, survenant dans des cavités remplies de gaz entourées de diélectrique solide ou de diélectrique solide et d'électrodes métalliques impliquant des composantes significative de champs électriques orthogonales aux surfaces des électrodes;
- les décharges partielles superficielles qui se développent sur les surfaces des matériaux isolants solides impliquant une composante de champ tangente à la surface;
- les décharges partielles de couronne, qui sont produites à l'air libre (gaz).



IEC 1280/11

Figure A.42 – Classes de défaut – Décharges partielles interne, superficielle et de couronne

L'application du diagnostic des décharges partielles à des systèmes électriques représente un outil fondamental pour le contrôle qualité et l'évaluation du risque des appareils électriques, pour lesquels il est d'importance primordiale de pouvoir identifier le type de source de décharges partielles et rejeter le bruit.

L'analyse de signal numérique est l'outil de base de l'identification et du diagnostic des décharges partielles car chaque décharge partielle crée une impulsion ayant un grand contenu de fréquences (allant des MHz aux GHz) qui se propage à partir du site des décharges partielles en empruntant le chemin d'impédance la plus faible.

En général, le système de mesure enregistre des signaux électriques associés au courant de choc de décharge quittant le matériel en essai (EUT)⁴, comme chute de tension sur une certaine impédance de détection (en général une résistance de 50 Ω) ou comme courant à l'enroulement secondaire d'un transformateur de courant.

⁴ EUT = Equipment under test.

Une quantité de charge peut parfois être associée à la chute de tension locale au site de décharges partielles qui n'est pas directement mesurable. En fait, à partir de la chute de tension au niveau de l'EUT, il peut être possible de calculer la valeur apparente de la charge, Q , qui est une sous-estimation de la quantité de charge impliquée localement au site des décharges partielles. Cette quantité de charge représente la charge qui, si elle était injectée en un temps très bref entre les bornes de l'EUT dans un circuit d'essai spécifié, donnerait le même relevé sur l'instrument de mesure que l'impulsion de courant de décharge partielle elle-même (procédure d'étalonnage).

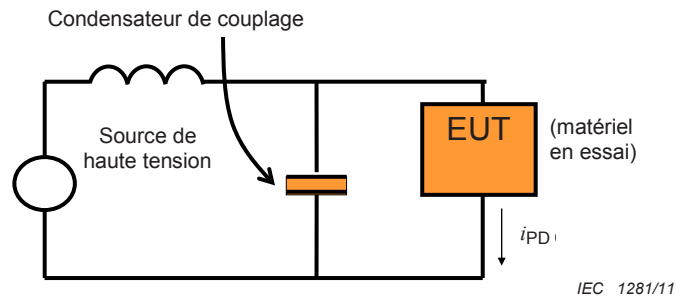


Figure A.43 – Circuit de base pour la mesure des décharges partielles

Des normes (par exemple la CEI 60270) fournissent des méthodes opérationnelles pour estimer au moyen de procédures d'étalonnage la charge apparente des décharges partielles, exprimée en pC, en multipliant la tension de crête des impulsions détectées des décharges partielles par une constante d'étalonnage.

Pour acquérir les impulsions des décharges partielles, il est nécessaire d'utiliser un trajet de faible impédance pour expulser de force le courant des décharges partielles (composantes de haute fréquence) hors de l'équipement en essai (EEE), en général à travers un condensateur de couplage raccordé en parallèle à l'EEE, comme illustré dans la Figure 3 (parfois dans des mesures sur le terrain, il est possible d'exploiter les capacités parasites des lignes ou la capacité du câble de connexion).

Comme les décharges partielles sont des événements aléatoires, avec des temps (et phases) d'arrivée et grandeurs stochastiques, les informations acheminées par un seul événement de décharge partielle sont souvent synthétisées en acquérant une grande quantité de ces trois paramètres (temps d'arrivée, t , phase d'arrivée, φ , et grandeur Q). Ces informations sont représentées dans le dit motif de décharges partielles (voir les exemples à la Figure 4), et évaluées dans un certain indicateur statistique pour extraire de l'information du processus (identification du type de source générant les décharges partielles).

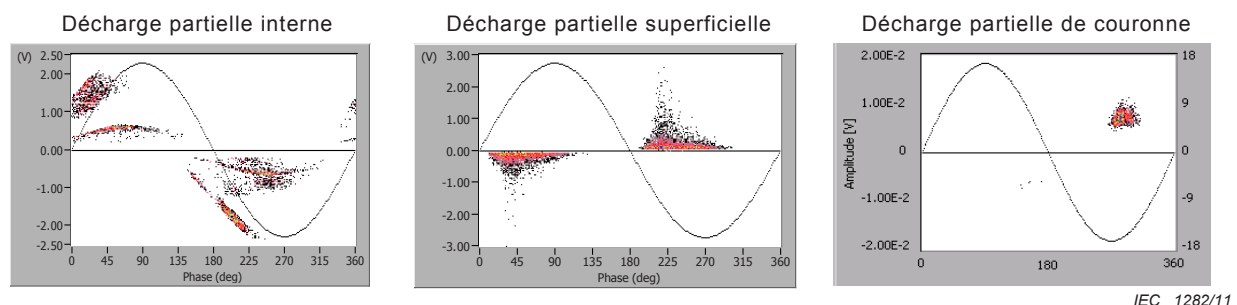


Figure A.44 – Exemples de motifs de décharges partielles pertinents pour les décharges partielles internes, superficielles et de couronne

Références – Figures A.41, A.42, A.43 et A.44

CAVALLINI, A., CONTI, M., CONTIN, A., MONTANARI, G.C., *Advanced PD inference in on-field measurements. II. Identification of defects in solid insulation systems*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 10, June 2003, pp. 528 – 538 (Figure A.41)

MONTANARI, G.C., *Partial discharge measurements: becoming a fundamental tool for quality control and risk assessment of electrical systems?*, IEEE Int. Symp. Electr. Insul., pp. 281-285, 2006

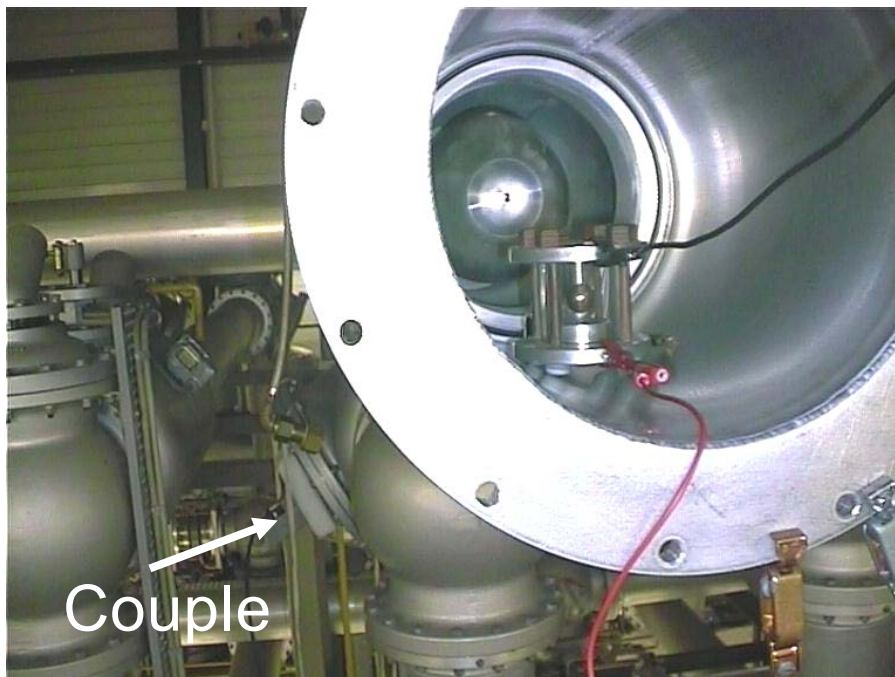
CEI 60270:2000, *Techniques des essais à haute tension – Mesures des décharges partielles* (Figure A.41)

A.56 Polymérisation

Processus chimique qui combine plusieurs monomères pour former un polymère ou un composé polymérique

A.57 Saillie

Protubérance dépassant d'une surface ou d'une interface.



IEC 1283/11

Figure A.45 – Recherche de GIS – Saillie d'un conducteur métallique

Références – Figure A.45

BARTNIKAS, R., EICHHORN, R.M., *Electrical Properties of Solid Insulating Materials*, ASTM, STP783, CCCN 82-70637, 1983

FOTHERGILL, J.C., DISSADO, L., *Space Charge in Solid Dielectrics*, The Dielectrics Society, ISBN 09533538 0 X, 1998

SMIT, J.J., Delft University of Technology, NL

A.58 Contrainte de cisaillement

Force mécanique qui agit sur un matériel de telle manière que le matériel veut se déplacer dans le sens latéral. La contrainte est parallèle ou tangentielle à la face du matériel.

La formule pour la contrainte de cisaillement (τ) en cisaillement direct est:

$$\tau = \frac{V}{A}$$

où

V est la force de cisaillement en l'emplacement en question, mesurée en newtons;

A est l'aire de section parallèle à la force de cisaillement, mesurée en mètres carrés.

Références

CEI 60371-2, *Spécification pour les matériaux isolants à base de mica - Partie 2: Méthodes d'essais*

CEI/TR 62039, *Selection guide for polymeric materials for outdoor use under HV stress* (disponible en anglais seulement)

A.59 Stockage +(transport)

Etat auquel un dispositif peut être soumis entre le temps de la construction et le temps de l'installation. Y sont également incluses les conditions qui peuvent exister pendant un arrêt.

NOTE Ni dommage physique ni altération permanente des caractéristiques de fonctionnement ne doivent se produire dans ces conditions mais des réajustements mineurs peuvent être nécessaires pour recouvrer la performance normale.

A.60 Déformation

Grandeur sans dimension indiquant le changement dans une unité de longueur d'un matériel résultant de l'application d'une contrainte.

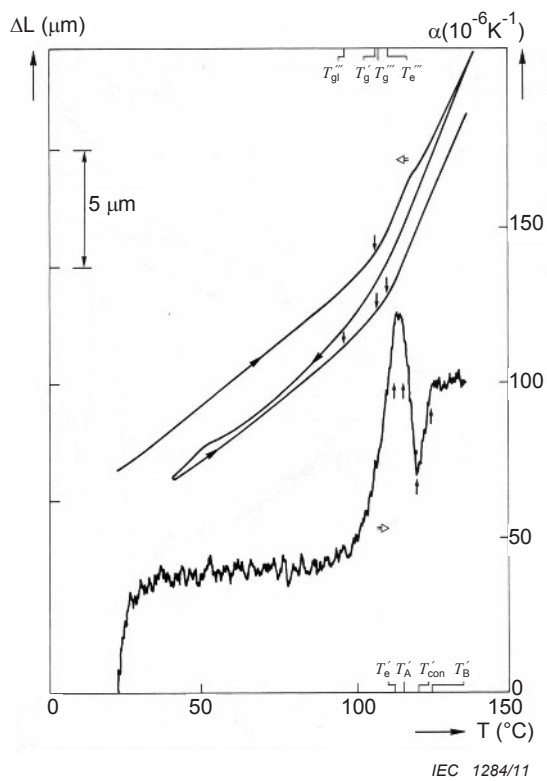


Figure A.46 – Époxy déformé intérieurement – Déformations gelées dans une résine époxy en raison de contraintes thermiques, mesurées par des courbes TMA

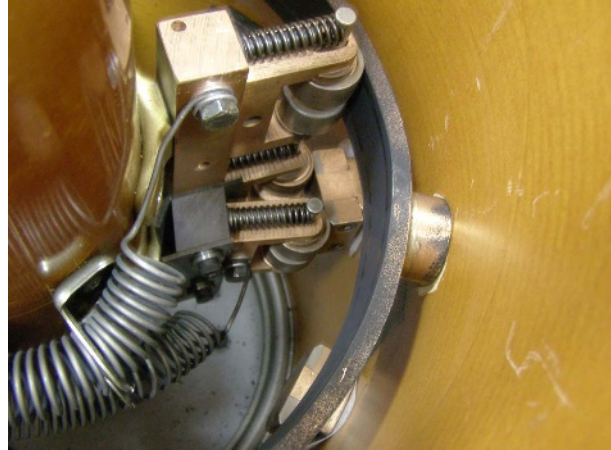


Figure A.47 – Pièces déformées extérieurement dans un OLTC (changeur de prise en charge)

Références – Figures A.46 et A.47

SMIT, J.J., avec l'autorisation de KEMA, NL.

A.61 Résistance

Propriété par laquelle les matériels ou SIE résistent à l'application d'une force. En fonction de la contrainte appliquée, différents termes résistance peuvent être définis dans le même matériel:

- la résistance à la rupture est la contrainte la plus faible qui provoque une déformation permanente dans un matériel;
- résistance à la compression est l'état limite de la contrainte de compression qui conduit à une défaillance par compression;
- la résistance à la traction ou résistance ultime à la traction est un état limite de contrainte de traction qui conduit à une rupture de traction;
- la résistance à la fatigue est une mesure de la résistance d'un matériau ou d'un composant soumis à une mise en charge cyclique;
- la résistance aux chocs est la capacité du matériau à supporter l'application soudaine d'une force;
- rigidité diélectrique (voir définition).

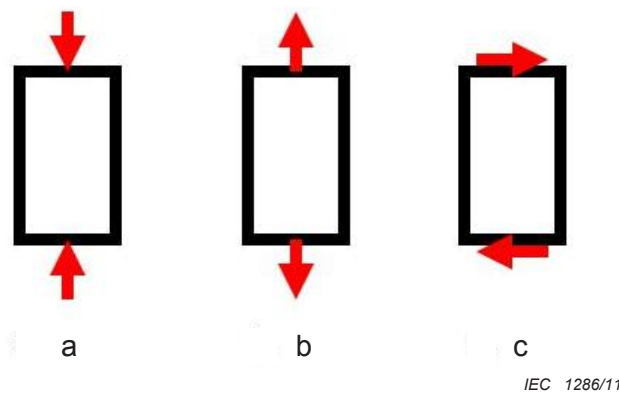


Figure A.48 – Matériel chargé en a) compression, b) traction, c) cisaillement.

Références – Figure A.48

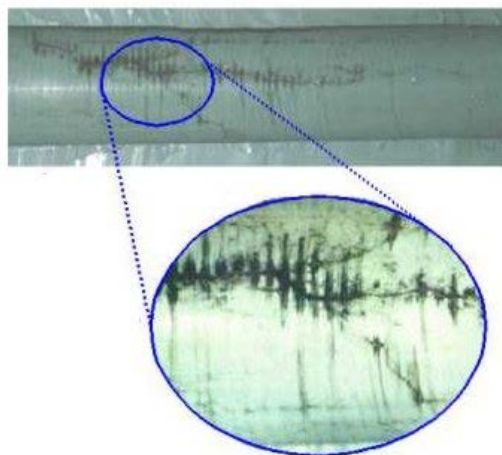
BEER, F.P., JOHNSTON, E.R., et al, *Mechanics of Materials*, 3rd edition, McGraw-Hill, 2001

TIMOSHENKO S., *Strength of Materials*, 3rd edition, Krieger Publishing Company, 1976

A.62 Contrainte

Force ou combinaison de forces qui produit une déformation; force exercée dans toute direction ou d'une manière quelconque entre des corps, ou parties de corps, contigus et appelée de plusieurs noms spécifiques en fonction de sa direction ou de son mode d'action.

Influence placée sur un matériel ou SIE qui peut le vieillir ou lui faire perdre sa fonction prévue.



IEC 1287/11

Figure A.49 – Effet des contraintes thermiques-mécaniques conduisant à un cheminement électrique interfacial

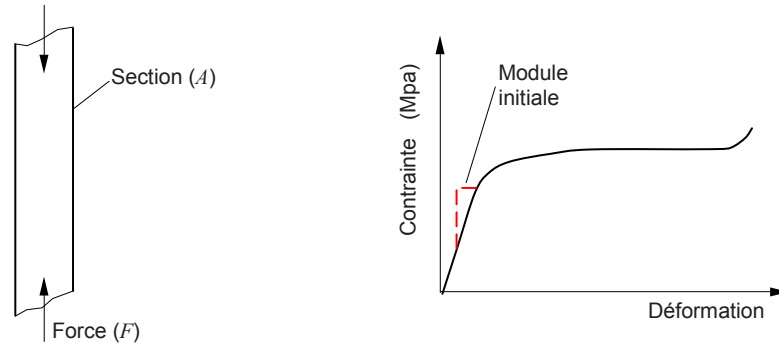
Références – Figure A.49

SMIT, J.J., avec l'autorisation de KEMA, NL.

A.63 Contrainte de traction

Force mécanique qui agit sur un matériel avec une tendance à l'allonger dans la direction de la force.

Contrainte de traction (σ) = Force de traction (F)/section d'origine (A)



IEC 1288/11

Contrainte de traction (σ) = F/A

Figure A.50 – Courbe contrainte-déformation pour un matériau type

- La région linéaire se termine à la limite d'élasticité.
- En dessous de la limite d'élasticité, $\sigma = E\varepsilon$ où E se rapporte au module de Young pour la traction.
- Au-dessus de cette limite, le matériau a un comportement plastique et ne retournera pas à sa longueur initiale lorsque la charge sera retirée.
- L'unité de mesure est en newton par mètre carré (Pascals)



IEC 1289/11

Figure A.51 – Barre excessivement pincée – Se brise au cours de l'essai de traction

Références – Figures A.50 et A.51

CEI 60371-2, *Spécification pour les matériaux isolants à base de mica – Partie 2: Méthodes d'essais*

CEI/TR 62039, *Selection guide for polymeric materials for outdoor use under HV stress* ((disponible en anglais seulement)

ODIAN, G. Principles of Polymerization, 3rd ed., J. Wiley, New York, 1991, p34

HAVERKAMP, W.B., *images non-publiés* (Figure A.51)

A.64 Torsion

Torsion ou rotation d'un matériel en raison de l'application d'un couple.

Pour les arbres pleins ou creux de section circulaire et d'épaisseur constante, les relations de torsion sont les suivants:

$$\frac{T}{J} = \frac{\tau}{R} = \frac{G\phi}{l}$$

où

T est le couple (N×m);

R est le rayon de l'arbre;

r est la distance au centre de rotation;

ϕ est l'angle de torsion en radians;

τ est la torsion;

l est la longueur de l'objet auquel ou sur lequel le couple est appliqué;

G est le module de cisaillement ou plus communément le module de rigidité et il est habituellement donné gigapascals (GPa);

J est la constante de torsion pour la section. Il est identique au moment d'inertie polaire pour un arbre ou tube concentrique rond seulement Pour les autres formes, J doit être déterminé par d'autres moyens.

Références

CEI 62231, *Isolateurs supports composites rigides à socle destinés aux postes à courant alternatif de tensions supérieures à 1 000 V jusqu'à 245 kV – Définitions, méthodes d'essai et critères d'acceptation*

CEI 61033, *Méthodes d'essai pour la détermination du pouvoir agglomérant des agents d'imprégnation sur fil émaillé*

A.65 Cheminement

Formation progressive de chemins conducteurs, qui sont produits sur la surface ou le long des surfaces dans un matériau isolant solide, en raison des effets combinés des contraintes électriques et de la contamination électrolytique.

- Au fil du temps, des arborescences 2D ramifiées partiellement conductrices peuvent apparaître le long de la surface d'un diélectrique fortement contraint ou à travers une surface diélectrique qui a été contaminée par la poussière ou des sels minéraux. Ces chemins partiellement conducteurs peuvent se développer jusqu'à causer la ruine complète de la surface diélectrique.

- Le cheminement électrique, parfois appelé *dry banding* (formation de bandes à sec), est un mécanisme de défaillance type pour les isolateurs de puissance électrique qui sont soumis à la contamination par le brouillard salin le long des côtes.



IEEC 1290/11



IEC 1291/11

NOTE Les poseurs de joints ont voulu être parfaits et ont isolé le fût de cosse avec un manchon de cheminement. La conséquence en est qu'un cheminement et une craquelure sont visibles sur le matériau noir (Haverkam)

Figure A.52 – Défaut d'installation type

Figure A.53 – Cheminement superficiel sur ailettes et extrémité de raccord)

Références – Figures A.52 et A.53

HAVERKAMP, W.B., *images non-publiés*.

CEI 60112, *Méthode de détermination des indices de résistance et de tenue au cheminement des matériaux isolants solides*

CEI 60587, *Matériaux isolants électriques utilisés dans des conditions ambiantes sévères – Méthodes d'essai pour évaluer la résistance au cheminement et à l'érosion*

A.66 Vibration

Mouvement oscillatoire d'un matériel ou d'une partie de matériel ou SIE au fil du temps. La vibration se réfère à des oscillations mécaniques autour d'un point d'équilibre et elle peut être périodique ou aléatoire.

A.67 Arborescence d'eau

Motif dendritique d'électro-oxydation modifié chimiquement en présence d'humidité, qui peut se produire aux renforcements de contrainte, comme par exemple les saillies, contaminants ou vides dans des matériaux polymères soumis à des contraintes électriques et à l'humidité. Au site d'une arborescence d'eau, l'isolation est détériorée, la décharge partielle n'a pas lieu et le claquage de l'isolation totale peut se produire ultérieurement lorsque l'arborescence d'eau induit une arborescence électrique. La croissance de l'arborescence d'eau dans les conditions de service est un processus très lent, nécessitant habituellement de nombreuses années pour pénétrer complètement dans l'isolation à partir de l'intérieur ou de l'extérieur.

Alors qu'il n'existe aucun cas documenté de décharge partielle détectable sur le terrain à partir d'arborescences d'eau, les arborescences d'eau peuvent se transformer en arborescences électriques par suite de chocs de foudre, de surtensions de manœuvre ou de niveaux excessifs de tension d'essai et de ce fait initier une décharge partielle (voir IEEE P400).

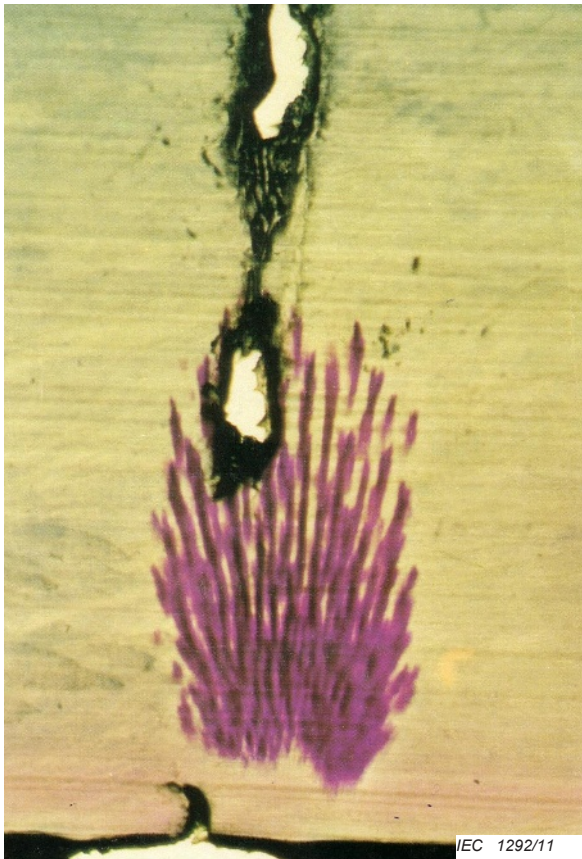


Figure A.54 – Arborescences aériées – Naissent à l'interface

Effet de la formation de

- a Nœud papillon provenant de contaminants ou de vides dans l'isolation.
- b Des arborescences se produisent dans des isolations telles que le polyéthylène et le caoutchouc.
- c Se développent habituellement dans la direction de la contrainte.
- d Un grand nombre d'arborescences augmente la capacité, les pertes diélectriques en courant alternatif, le courant continu de fuite de l'isolation.
- e Défaillance finale en raison de l'initiation d'une arborescence électrique par transformation d'une arborescence d'eau en arborescence électrique (décharge partielle).
- f Les arborescences d'eau abaissent la tension de claquage au choc et en courant alternatif.
- g La tension de claquage augmente si on laisse les arborescences sécher.

Références – Figure A.54

IEEE P400.2™ - 2004, *Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)*

DISSADO, L.A., FOTHERGILL, J.C., *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, Peter Peregrins, Ltd, ISBN 0-86341-196-7, London, 1992

STEENNIS, E.F., Avec l'autorisation de KEMA.

A.68 Ride

Petit pli indésirable, par exemple, dans une isolation stratifiée. Les rides réduisent la rigidité diélectrique des isolations stratifiées et il convient de les éviter.

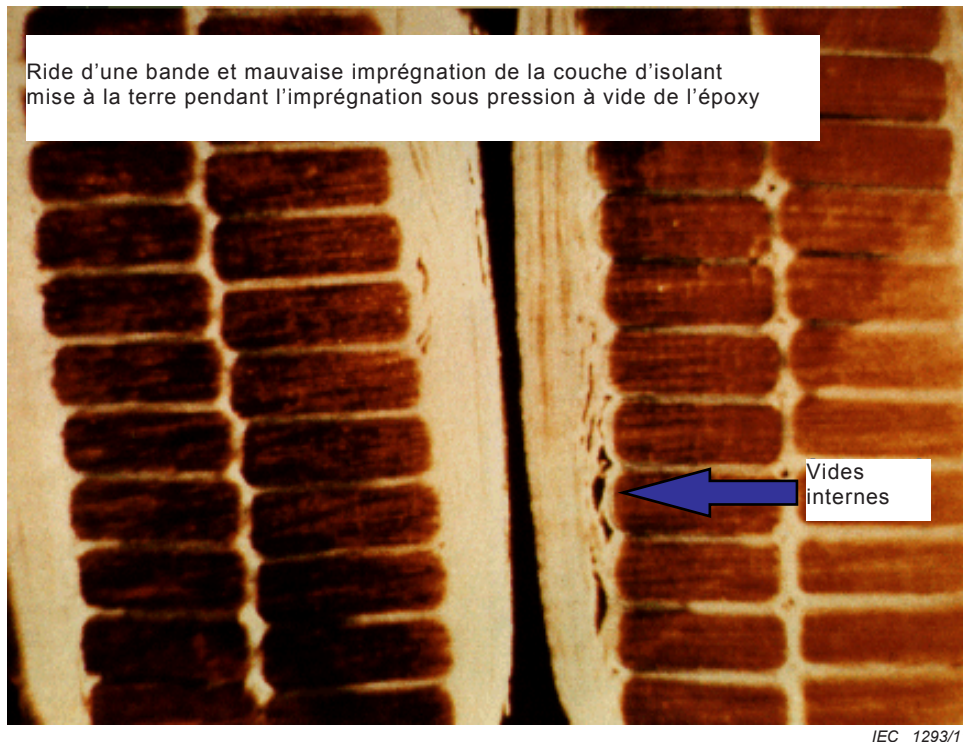


Figure A.55 – Formation de rides d'une bande

Références – Figure A.55

STONE, G., avec l'autorisation de Iris Power.

Bibliographie

CEI 60050-212:2010, *Vocabulaire Électrotechnique International (VEI) – Chapitre 212: Isolants solides, liquides et gazeux*

CEI 60068-1, *Essais d'environnement – Partie 1: Généralités et guide*

CEI 60068-2 (toutes les parties), *Essais d'environnement – Partie 2: Essais*

CEI 60068-2-1, *Essais d'environnement – Partie 2-1: Essais – Essais A: Froid*

CEI 60068-2-2, *Essais d'environnement – Partie 2-2: Essais – Essais B: Chaleur sèche*

CEI 60068-2-10: *Essais d'environnement. – Partie 2: Essais – Essai J et guide: Moisissures*

CEI 60068-2-14, *Essais d'environnement – Partie 2-14: Essais – Essais N: Variation de température*

CEI 60068-2-27, *Essais d'environnement – Partie 2-27: Essais – Essais Ea et Guide: Chocs*

CEI 60112, *Méthode de détermination des indices de résistance et de tenue au cheminement des matériaux isolants solides*

CEI 60212: *Conditions normales à observer avant et pendant les essais de matériaux isolants électriques solides*

CEI 60216 (toutes les parties), *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique*

CEI 60216-1, *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique – Partie 1: Méthodes de vieillissement et évaluation des résultats d'essai*

CEI 60243-1, *Rigidité diélectrique des matériaux isolants – Méthodes d'essai – Partie 1: Essais aux fréquences industrielles*

CEI 60243-2, *Rigidité diélectrique des matériaux isolants – Méthodes d'essai – Partie 2: Exigences complémentaires pour les essais à tension continue*

CEI 60243-3, *Rigidité diélectrique des matériaux isolants – Méthodes d'essai – Partie 3: Prescriptions complémentaires pour les essais aux ondes de choc 1,2/50 μ s*

CEI 60664-4, *Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension – Partie 4: Considérations sur les contraintes de tension à haute fréquence*

IEC 60270:2000, *Techniques des essais à haute tension – Mesures des décharges partielles*

CEI 60371-2, *Spécification pour les matériaux isolants à base de mica – Partie 2: Méthodes d'essais*

CEI 60587, *Matériaux isolants électriques utilisés dans des conditions ambiantes sévères – Méthodes d'essai pour évaluer la résistance au cheminement et à l'érosion*

CEI 60721 (toutes les parties) *Classification des conditions d'environnement*

CEI 60811-3-1, *Méthodes d'essais communes pour les matériaux d'isolation et de gainage des câbles électriques – Troisième partie: Méthodes spécifiques pour les mélanges PVC – Section un: Essai de pression à température élevée – Essais de résistance à la fissuration*

CEI 61033, *Méthodes d'essai pour la détermination du pouvoir agglomérant des agents d'imprégnation sur fil émaillé*

IEC 61710, *Modèle de loi en puissance – Test d'adéquation et méthodes d'estimation des paramètres*

CEI/TR 62039, *Selection guide for polymeric materials for outdoor use under HV stress* (disponible en anglais seulement)

CEI 62231, *Isolateurs supports composites rigides à socle destinés aux postes à courant alternatif de tensions supérieures à 1 000 V jusqu'à 245 kV – Définitions, méthodes d'essai et critères d'acceptation*

CEI 62271-304, *Appareillage à haute tension – Partie 304: Classes de construction pour l'appareillage d'intérieur sous enveloppe pour tensions assignées à partir de 1 kV jusqu'à 52 kV inclus pour usage sous conditions climatiques sévères*

ISO 62, *Plastiques – Détermination de l'absorption d'eau*

ISO 877-1, *Plastics – Methods of exposure to solar radiation – Part 1: General guidance*

ISO 877-2, *Plastics – Methods of exposure to solar radiation – Part 2: Direct weathering and exposure behind window glass*

ISO 175, *Plastiques – Méthodes d'essai pour la détermination des effets de l'immersion dans des produits chimiques liquides*

ISO 1431-1, *Caoutchouc vulcanisé ou thermoplastique – Résistance au craquelage par l'ozone – Partie 1: Essai sous allongement statique et dynamique*

ISO 1663, *Rigid cellular plastics – Determination of water vapour transmission properties* (disponible en anglais seulement)

ISO 4611, *Plastiques – Détermination des effets d'une exposition à la chaleur humide, au brouillard d'eau et au brouillard salin*

ISO/TR 7620, *Rubber materials – Chemical resistance* (disponible en anglais seulement)

ISO 9352, *Plastiques – Détermination de la résistance à l'usure par galets abrasifs*

ASTM D 750-06, *Test method for rubber deterioration in carbon arc or weathering apparatus*

ASTM D 1044-08, *Standard Test Method for Resistance of Transparent Plastics to Surface Abrasion*

ASTM D 1868-07, *Standard Test Method for Detection and Measurement of Partial Discharge (Corona) Pulses in Evaluation of Insulation Systems*

CLARK, Frank M., *Insulating Materials for Design and Engineering Practice*, J. Wiley & Sons, 1962

MONTANARI, G.C., MAZZANTI, G., PALMIERI, F., MOTORI, A., *Investigation of charge transport and trapping in LDPE and HDPE through space charge and conduction current measurement*, ICSD, June 2001, pp. 97-100

DISSADO, L.A., FOTHERGILL, J.C., *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, Peter Peregrinus Ltd, ISBN 0-86341-196-7, London, 1992

MONTANARI, G.C., *The electrical degradation threshold of polyethylene investigated by space charge and conduction current measurements*, IEEE Trans. on Dielect. El. Insul., Vol. 7, No. 3, pp. 309-315, June 2000

MONTANARI, G.C., *Dielectric material properties investigated through space charge measurements*, IEEE Trans. on Dielect. El. Insul., Vol. 11, pp. 56-64, 2004

BOUFAYED, F., TEYSSÉDRE, G., LAURENT, C., LE ROY, S., DISSADO, L.A., SEGUR, P., MONTANARI, G.C., *Models of bipolar charge transport in polyethylene*, Journ. Appl. Phys., Vol. 100, pp. 104105.1-10, 2006

KUMAR, A., PERLMAN, M.M., *Steady-state conduction in high density polyethylene with field-dependent mobility*, Jour. App. Phys., Vol. 71, No.2, pp. 735 – 738, 1992

MONTANARI, G.C., GHINELLO, I., MOTORI, A., DAS GUPTA, D. *An investigation of conduction mechanisms at high-fielding PET*, IEEE Conf. Electr. Insul. Dielect. Phen., pp. 451-454, 1997

BODEGA, R., MONTANARI, G.C., MORSHUIS, P.H.F., *Conduction current measurements on XLPE and EPR insulation*, IEEE Conf. Electr. Insul. Dielect. Phen., pp. 101-105, 2004

LOEB, L.B., *Electrical Coronas – Their Basic Physical Mechanisms*, University of California Press, Berkeley and Los Angeles, 1965, pp. 579-607 (1965)

Electric strength tests performed at LIMAT lab., University of Bologna

ZAENGL, W.S., *Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. I. Theoretical considerations*, IEEE El. Ins. Magazine Vol.19 no.5, pp. 5-19, 2003

JONSCHER, A.K., *Dielectric relaxations in solids*, Chelsea Dielectric Press, London, 1983

MONTANARI, G. C., DAS GUPTA, D.K., *Polarization and Space Charge Behavior of Unaged and Electrically Aged Crosslinked Polyethylene*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7 No. 4, August 2000

MOTORI, A., SANDROLINI, F., MONTANARI, G.C., LOGGINI, M., *Electrical properties for detection of thermal aging in XLPE cable models*, *Properties and Applications of Dielectric Materials*, 1991, Proceedings of the 3rd International Conference on, 8-12 July 1991 Page(s):761 - 764 vol.2

IMAI, T., SAWA, T., OZAKI, T., SHIMIZU, T., KIDO, R., KOZAKO, M. TANAKA, T., *Effects of Nano- and Micro-filler Mixture on Electrical Insulation Properties of Epoxy Based Composites (2006)*

JONES, J.P., LLEWELLYN, J.P. and LEWIS, T.J., *The Contribution of Field-Induced Morphological Change to the Electrical Aging and Breakdown of Polyethylene*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, No. 5; October 2005

SERRA, S., MONTANARI, G.C. and MAZZANTI, G., *Theoretical model of inception mechanism and growth of defect-induced damages in XLPE cable*, J. Appl. Phys., Vol. 98, pp. 034102.1-034102.15, 2005

AVALLINI, A., CONTI, M., CONTIN, A., MONTANARI, G.C., *Advanced PD inference in on-field measurements. II. Identification of defects in solid insulation systems*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 10, June 2003, pp. 528 – 538

MONTANARI, G.C., *Partial discharge measurements: becoming a fundamental tool for quality control and risk assessment of electrical systems?*, IEEE Int. Symp. Electr. Insul., pp. 281-285, 2006

BARTNIKAS, R., EICHHORN, R.M., *Electrical Properties of Solid Insulating Materials*, ASTM, STP783, CCCN 82-70637, 1983

FOTHERGILL, J.C., DISSADO, L., *Space Charge in Solid Dielectrics*, The Dielectrics Society, ISBN 09533538 0 X, 1998

BEER, F.P., JOHNSTON E.R., et al, *Mechanics of Materials*, 3rd edition, McGraw-Hill, 2001

TIMOSHENKO S., *Strength of materials*, 3rd edition, Krieger Publishing Company, 1976

ODIAN, G., *Principles of Polymerization*, 3rd ed., J. Wiley, New York, 1991, p34

IEEE P400.2™ – 2004, *Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)*

TIPLER, PAUL. A., *Physics for Scientists and Engineers*

LI, Christopher Y., *Polymer Thermal Analysis*, Presentation Drexel University, 2002

STONE, G., courtesy of Iris Power

HAVERKAMP, W., *unpublished pictures*

Sakano, T. *unpublished pictures*

Steennis, E.F., avec l'autorisation de KEMA, NL

Smit, J.J., avec l'autorisation de KEMA, NL

Avec l'autorisation de Prysmian

British Standards Institution (BSI)

BSI is the independent national body responsible for preparing British Standards and other standards-related publications, information and services.

It presents the UK view on standards in Europe and at the international level.

It is incorporated by Royal Charter.

Revisions

British Standards are updated by amendment or revision. Users of British Standards should make sure that they possess the latest amendments or editions.

It is the constant aim of BSI to improve the quality of our products and services. We would be grateful if anyone finding an inaccuracy or ambiguity while using this British Standard would inform the Secretary of the technical committee responsible, the identity of which can be found on the inside front cover.

Tel: +44 (0)20 8996 9001 Fax: +44 (0)20 8996 7001

BSI offers Members an individual updating service called PLUS which ensures that subscribers automatically receive the latest editions of standards.

Tel: +44 (0)20 8996 7669 Fax: +44 (0)20 8996 7001

Email: plus@bsigroup.com

Buying standards

You may buy PDF and hard copy versions of standards directly using a credit card from the BSI Shop on the website www.bsigroup.com/shop. In addition all orders for BSI, international and foreign standards publications can be addressed to BSI Customer Services.

Tel: +44 (0)20 8996 9001 Fax: +44 (0)20 8996 7001

Email: orders@bsigroup.com

In response to orders for international standards, it is BSI policy to supply the BSI implementation of those that have been published as British Standards, unless otherwise requested.

Information on standards

BSI provides a wide range of information on national, European and international standards through its Knowledge Centre.

Tel: +44 (0)20 8996 7004 Fax: +44 (0)20 8996 7005

Email: knowledgecentre@bsigroup.com

Various BSI electronic information services are also available which give details on all its products and services.

Tel: +44 (0)20 8996 7111 Fax: +44 (0)20 8996 7048

Email: info@bsigroup.com

BSI Subscribing Members are kept up to date with standards developments and receive substantial discounts on the purchase price of standards. For details of these and other benefits contact Membership Administration.

Tel: +44 (0)20 8996 7002 Fax: +44 (0)20 8996 7001

Email: membership@bsigroup.com

Information regarding online access to British Standards via British Standards Online can be found at www.bsigroup.com/BSOL

Further information about BSI is available on the BSI website at www.bsigroup.com/standards

Copyright

Copyright subsists in all BSI publications. BSI also holds the copyright, in the UK, of the publications of the international standardization bodies. Except as permitted under the Copyright, Designs and Patents Act 1988 no extract may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means – electronic, photocopying, recording or otherwise – without prior written permission from BSI. This does not preclude the free use, in the course of implementing the standard of necessary details such as symbols, and size, type or grade designations. If these details are to be used for any other purpose than implementation then the prior written permission of BSI must be obtained. Details and advice can be obtained from the Copyright & Licensing Manager.

Tel: +44 (0)20 8996 7070

Email: copyright@bsigroup.com

BSI Group Headquarters

389 Chiswick High Road London W4 4AL UK

Tel +44 (0)20 8996 9001

Fax +44 (0)20 8996 7001

www.bsigroup.com/standards