

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC**

61244-3

Première édition
First edition
1998-03

**Vieillissement à long terme sous rayonnement
dans les polymères –**

**Partie 3:
Procédés pour le contrôle en service
des matériaux des câbles basse tension**

Long-term radiation ageing in polymers –

**Part 3:
Procedures for in-service monitoring
of low-voltage cable materials**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61244-3:1998

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications consolidées

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

Validité de la présente publication

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

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

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

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

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

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

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

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

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

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

Validity of this publication

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

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

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

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

Terminology, graphical and letter symbols

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

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

* See web site address on title page.

RAPPORT TECHNIQUE – TYPE 2

**CEI
IEC**

TECHNICAL REPORT – TYPE 2

61244-3

Première édition
First edition
1998-03

Vieillissement à long terme sous rayonnement dans les polymères –

Partie 3: Procédés pour le contrôle en service des matériaux des câbles basse tension

Long-term radiation ageing in polymers –

Part 3: Procedures for in-service monitoring of low-voltage cable materials

© IEC 1998 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

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

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembe Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

W

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	8
Articles	
1 Domaine d'application.....	10
2 Exigences relatives à une technique de surveillance	10
3 Techniques disponibles.....	10
3.1 Essais localisés sans échantillonnage	12
3.1.1 Poinçonneur	12
3.1.2 Vitesse de propagation du son.....	14
3.1.3 Réflectance dans l'infrarouge proche	16
3.1.4 Capteur de torsion	16
3.2 Essais localisés avec microéchantillonnage.....	18
3.2.1 Spectroscopie infrarouge (IR).....	18
3.2.2 Temps d'induction de l'oxydation (OIT)	20
3.2.3 Teneur en plastifiant.....	22
3.2.4 Masse volumique.....	22
3.3 Essais globalisés avec résolution spatiale	22
3.3.1 Réflectométrie du domaine temporel (TDR)	24
3.3.2 Décharge partielle (PD)	24
3.4 Essais globalisés sans résolution spatiale	26
3.4.1 Spectrographie du domaine temporel (TDS).....	26
3.4.2 Perte diélectrique	28
3.4.3 Essais d'acceptation (passe/passe pas).....	30
3.5 Essais de suivi.....	30
4 Résumé.....	30
Tableaux	34
Figures	38
Annexe A (informative) Bibliographie	72

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
INTRODUCTION	9
Clause	
1 Scope	11
2 Requirements of a monitoring technique	11
3 Techniques available	11
3.1 Local tests without sampling	13
3.1.1 Indenter	13
3.1.2 Sonic velocity	15
3.1.3 Near infrared reflectance	17
3.1.4 Torque tester	17
3.2 Local tests with microsampling	19
3.2.1 Infrared spectroscopy (IR)	19
3.2.2 Oxidation induction time (OIT)	21
3.2.3 Plasticizer content	23
3.2.4 Density	23
3.3 Global tests with spatial resolution	23
3.3.1 Time domain reflectometry (TDR)	25
3.3.2 Partial discharge (PD)	25
3.4 Global tests without spatial resolution	27
3.4.1 Time domain spectrometry (TDS)	27
3.4.2 Dielectric loss	29
3.4.3 Pass/fail tests	31
3.5 Paced tests	31
4 Summary	31
Tables	35
Figures	39
Annex A (informative) Bibliography	73

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

VIEILLISSEMENT À LONG TERME SOUS RAYONNEMENT DANS LES POLYMÈRES –

Partie 3: Procédés pour le contrôle en service des matériaux des câbles basse tension

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) 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. 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 intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes Internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est d'élaborer des Normes internationales. Exceptionnellement, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique de l'un des types suivants.

- type 1, lorsque, en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale;
- type 2, lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou lorsque, pour une raison quelconque, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat;
- type 3, lorsqu'un comité d'études a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

Les rapports techniques de types 1 et 2 font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales. Les rapports techniques de type 3 ne doivent pas nécessairement être révisés avant que les données qu'ils contiennent ne soient plus jugées valables ou utiles.

La CEI 61244-3, rapport technique de type 2, a été établie par le sous-comité 15E: Méthodes de test, du comité d'études 15 de la CEI: Matériaux isolants.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

LONG-TERM RADIATION AGEING IN POLYMERS –**Part 3: Procedures for in-service monitoring
of low-voltage cable materials**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the 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, the IEC publishes International Standards. 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. The 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 the 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 National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances, a technical committee may propose the publication of a technical report of one of the following types:

- type 1, when the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts;
- type 2, when the subject is still under technical development or where for any other reason there is the future but not immediate possibility of an agreement on an International Standard;
- type 3, when a technical committee has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example state of the art.

Technical reports of types 1 and 2 are subject to review within three years of publication to decide whether they can be transformed into International Standards. Technical reports of type 3 do not necessarily have to be reviewed until the data they provide are considered to be no longer valid or useful.

IEC 61244-3, which is a technical report of type 2 has been prepared by subcommittee 15E: Methods of test, of IEC technical committee 15: Insulating materials.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

Projet de comité	Rapport de vote
15E/22/CDV	15E/89/RVC

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

Le présent document est publié dans la série des rapports techniques de type 2 (conformément au paragraphe G.3.2.2 de la partie 1 des Directives CEI/ISO) comme «norme prospective d'application provisoire» dans le domaine des matériaux isolants car il est urgent d'avoir des indications sur la meilleure façon d'utiliser les normes dans ce domaine afin de répondre à un besoin déterminé.

Ce document ne doit pas être considéré comme une Norme internationale. Il est proposé pour une mise en oeuvre provisoire, dans le but de recueillir des informations et d'acquérir de l'expérience quant à son application dans la pratique. Il est de règle d'envoyer les observations éventuelles relatives au contenu de ce document au Bureau Central de la CEI.

Il sera procédé à un nouvel examen de ce rapport technique de type 2 trois ans au plus tard après sa publication, avec la faculté d'en prolonger la validité pendant trois autres années, de le transformer en Norme internationale ou de l'annuler.

L'annexe A est donnée uniquement à titre d'information.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61244-3:1998

The text of this technical report is based on the following documents:

Committee Draft	Report on voting
15E/22/CDV	15E/89/RVC

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

This document is issued in the type 2 technical report series of publications (according to G.3.2.2 of Part 1 of the IEC/ISO Directives) as a prospective standard for provisional application in the field of insulating materials because there is an urgent requirement for guidance on how standards in this field should be used to meet an identified need.

This document is not to be regarded as an International Standard. It is proposed for provisional application so that information and experience of its use in practice may be gathered. Comments on the content of this document should be sent to the IEC Central Office.

A review of this type 2 technical report will be carried out not later than three years after its publication, with the options of either extension for a further three years or conversion to an International Standard or withdrawal.

Annex A is for information only.

INTRODUCTION

Les polymères sont largement utilisés comme matériaux isolants électriques (par exemple dans les câbles des circuits de commande, l'instrumentation et les câbles d'alimentation) dans les environnements exposés aux rayonnements. Dans de telles applications, il est exigé de ces matériaux qu'ils assurent leur fonction pendant toute la durée de vie de l'installation, pouvant être supérieure à 40 ans, et qu'ils résistent aux conditions accidentelles en fin de vie. Même si de nombreuses données sont disponibles concernant la tenue des matériaux isolants polymères sous rayonnement, il existe encore une certaine incertitude sur les effets à long terme d'un faible rayonnement, comme cela pourrait être le cas pour les câbles. Par conséquent des techniques sont nécessaires pour surveiller *in situ* l'état de dégradation des matériaux utilisés dans les câbles tout au long de la durée de vie de l'installation. Les techniques adaptées à la surveillance des câbles seraient également importantes pour les programmes de surveillance concernant l'extension ou le renouvellement des autorisations d'utilisation des installations. Même si ce rapport a principalement comme objectif la surveillance de l'état des câbles dans les installations nucléaires, il peut également s'appliquer à d'autres polymères. Beaucoup de ces techniques s'appliquent également au seul vieillissement thermique des polymères dans les installations conventionnelles de puissance.

INTRODUCTION

Polymers are widely used as electrical insulating materials (e.g. in cables for control, instrumentation and power) in environments in which they are exposed to radiation. In such applications, these materials may well be required to survive the full working life of the plant, which may be more than 40 years, and accident conditions at the end of working life. Although considerable data are available on the behaviour of polymeric insulating materials under irradiation, there is still some uncertainty on the effects of long-term low dose rate irradiation, such as would be experienced by cables. There is therefore a requirement for techniques for monitoring the state of degradation of cable materials *in situ* throughout the lifetime of the plant. Suitable cable monitoring techniques would also be important to surveillance programmes in support of plant life extension and licence renewal. Although this report is primarily aimed at cable condition monitoring in nuclear power plants, it can also be applied to other polymeric components. Many of the techniques are equally applicable to thermal-only ageing of polymeric components in conventional power plants.

VIEILLISSEMENT À LONG TERME SOUS RAYONNEMENT DANS LES POLYMÈRES –

Partie 3: Procédés pour le contrôle en service des matériaux des câbles basse tension

1 Domaine d'application

Le présent rapport technique résume les techniques principales de surveillance des câbles couramment reconnues dans le monde entier. Ces techniques s'adressent surtout à la surveillance de câbles à basse tension. La plupart des méthodes sont en développement et nécessitent des évaluations *in situ* avant de pouvoir être recommandées comme techniques normatives. Les avantages et les inconvénients de chaque méthode et l'état actuel de leur développement sont soulignés dans les articles suivants. Il existe deux aspects de surveillance des câbles nécessitant d'être pris en compte, les techniques adaptées à l'évaluation du vieillissement et les techniques adaptées à la surveillance des défauts dans les câbles. Les méthodes discutées peuvent, dans certains cas, être plus adaptées pour la surveillance des défauts que pour l'évaluation du niveau de dégradation des matériaux constituant le câble.

2 Exigences relatives à une technique de surveillance

Toute une gamme d'exigences serait nécessaire pour satisfaire la technique de surveillance de câbles. En pratique, aucune technique ne satisfait toutes les exigences et une gamme de techniques est vraisemblablement nécessaire. Dans chaque cas, des informations sous forme de base de données (c'est-à-dire des données relatives à des matériaux non vieillis, de même formulation et de même fabricant) sont nécessaires pour faire un plein usage de ces techniques.

La technique de surveillance idéale aurait les caractéristiques suivantes:

- non destructive;
- pouvant être utilisée en fonctionnement normal;
- ne nécessitant pas le débranchement du matériel;
- liée à un critère identifiable de dégradation;
- s'applique à une grande variété de matériaux constituant les câbles et de configuration;
- s'applique à des emplacements accessibles;
- capable d'identifier des points chauds;
- reproductible et capable de compensation pour certaines conditions d'environnement (température, humidité) ;
- peu chère pour être mise en place au lieu du remplacement périodique des câbles;
- données de référence immédiatement disponibles.

3 Techniques disponibles

Il existe une grande variété de techniques possibles en cours d'étude pour surveiller les câbles. Quelques-unes sont déjà en exploitation dans les installations, les autres sont uniquement au stade d'évaluation en laboratoire. Les méthodes peuvent être regroupées en types génériques, comme suit.

LONG-TERM RADIATION AGEING IN POLYMERS –

Part 3: Procedures for in-service monitoring of low-voltage cable materials

1 Scope

This technical report summarizes the main cable monitoring techniques which are currently being assessed worldwide. These techniques are primarily aimed at monitoring degradation of low-voltage cables. Most of the methods are at the development stage and require in-plant evaluation before they could be recommended as standard techniques. The advantages and disadvantages of each method, and its current state of development, are outlined in the following sections. There are two aspects of cable monitoring that need to be taken into account – techniques suitable for ageing evaluation and techniques suitable for monitoring faults in cables. The methods discussed may, in some cases, be more suitable for monitoring faults than for evaluating the degree of degradation of the cable materials.

2 Requirements of a monitoring technique

There is a range of requirements which the ideal cable monitoring technique would need to satisfy. In practice, no one technique will satisfy all of the requirements and a range of techniques is likely to be needed. In each case, baseline data (i.e. data on unaged material of the same formulation and manufacturer) are needed to make full use of the techniques.

The ideal monitoring technique would have the following attributes:

- non-destructive;
- capable of use during normal operation;
- not require disconnection of equipment;
- related to an identifiable degradation criterion;
- applicable to a wide range of cable materials and configuration;
- applicable at accessible locations;
- capable of identifying hot-spots;
- reproducible and capable of compensating for environmental conditions (temperature, humidity);
- less expensive to implement than periodic cable replacement;
- readily available reference data.

3 Techniques available

There is a wide range of possible techniques being considered for cable monitoring. A few are already in use in-plant, others are only at the laboratory evaluation stage. The methods can be grouped together under generic types, as follows.

Essais localisés sans échantillonnage

- poinçonneur
- vitesse du son
- réflectance de l'infrarouge proche
- essai de torsion

Essais localisés avec un micro-échantillonnage

- infrarouge
- temps d'induction d'oxydation (abréviation anglaise OIT)
- teneur en plastifiant
- masse volumique

Essais globalisés avec résolution spatiale

- réflectométrie du domaine temporel (abréviation anglaise TDR)
- décharge partielle

Essais globalisés sans résolution spatiale

- perte diélectrique
- spectrométrie du domaine temporel (abréviation anglaise TDS)
- essais d'acceptation (accepté/refusé) – résistance diélectrique, résistance d'isolement.

Essais de suivi – Allongement à la rupture

Chacun de ces types d'essai est décrit plus en détails dans les paragraphes suivants.

3.1 Essais localisés sans échantillonnage

Le terme «localisé» se réfère aux techniques donnant des informations sur l'état du câble au point de mesure uniquement et qui peuvent par conséquent laisser échapper des points défectueux. Ces méthodes peuvent uniquement être appliquées dans les zones accessibles aux hommes et sont généralement limitées à des essais sur les matériaux de gaine du câble sauf aux extrémités où l'isolement est supprimé. Si les techniques ont fait l'objet d'une bonne corrélation avec les variations de l'allongement à la rupture, elles peuvent être utilisées pour prédire le comportement des câbles. Ce type d'essai fournira des données immédiatement disponibles sur site concernant l'état du câble. Si la gaine du câble a plus tendance à se dégrader que l'isolement (ce qui est souvent vérifié), les méthodes fournissent un avertissement précoce sur la rupture du câble. Des essais de pliage localisé, à la main, peuvent donner des informations qualitatives si elles sont réalisées par du personnel expérimenté.

3.1.1 Poinçonneur

Le poinçonneur est un dispositif portatif développé par l'Institut Franklin qui mesure une propriété relative au module d'élasticité des gaines du câble et des matériaux d'isolation [1] et [2]*. Un schéma synoptique du poinçonneur est donné à la figure 1. Un système de calibre de forme connue est guidé le long de l'extérieur du câble avec une vitesse donnée (12,7 mm/min) et la courbe de la force par rapport à la distance est obtenue sur toute une gamme allant de 2 N à 9 N. La forme du calibre utilisée est la même que celle utilisée dans la norme ASTM pour l'essai de dureté [3], c'est-à-dire un cône tronqué, mais avec une surface d'extrémité égale à la moitié du cône de l'ASTM.

Les valeurs du module du poinçonneur mesurées avec le poinçonneur portatif sont à corriger selon la température pour obtenir un ensemble de données comparables quand elles sont utilisées sur site. La valeur de la compensation en température nécessaire varie avec le vieillissement du matériau constituant le câble [4], voir figure 2. Des essais pratiques dans les

* Les chiffres entre crochets renvoient à l'annexe A: Bibliographie.

Local tests without sampling

- indenter
- sonic velocity
- near infrared reflectance
- torque testing

Local tests with micro-sampling

- infrared
- oxidation induction time (OIT)
- plasticizer content
- density

Global tests with spatial resolution

- time domain reflectometry (TDR)
- partial discharge

Global tests without spatial resolution

- dielectric loss
- time domain spectrometry (TDS)
- pass/fail tests – dielectric strength, insulation resistance

Paced tests – elongation at break

Each of these types of test is described in more detail in the following subclauses.

3.1 Local tests without sampling

The term "local" refers to techniques which give information on the state of the cable at the measuring point only and are thus likely to miss defective spots. These methods can only be applied in man-accessible areas and are generally limited to tests of the cable jacket material except at terminations where the insulation is exposed. Where the techniques have been cross-correlated with changes in elongation at break, these methods have a predictive capability. This type of test will provide immediate data in-plant on the state of the cable. Where the cable jacket is more likely to degrade than the insulation (which is often true) the methods provide early warning of cable failure. Local bend tests by manipulation of the cable by hand can give qualitative information when carried out by experienced personnel.

3.1.1 Indenter

The indenter is a portable device developed by the Franklin Institute which measures a property related to the modulus of elasticity of cable jacket and insulation materials [1] [2]*. A schematic diagram of the indenter is shown in figure 1. An instrumented probe of known shape is driven against the outside of the cable at a fixed velocity (12,7 mm/min) and the slope of the force versus distance is obtained over a force range of 2 N to 9 N. The probe shape used is the same as that used in the ASTM standard for hardness testing [3], i.e. a truncated cone, but with an end area equal to half that of the ASTM cone.

The indenter modulus values measured with the portable indenter have to be corrected for temperature to obtain comparable data sets when used in-plant. The amount of temperature compensation required varies with the ageing of the cable material [4], see figure 2. Practical tests of the unit in nuclear power plants have shown that the indenter can be successfully used

* Figures in square brackets refer to the bibliography given in annex A.

installations nucléaires de puissance ont montré que le poinçonneur peut être utilisé *in situ* avec succès pour essayer des câbles placés dans des goulottes, des panneaux et des boîtes de jonction, pourvu que 7,5 cm de câble dénudés soient accessibles [4]. Dans les essais de vieillissement accéléré, une bonne corrélation a été obtenue entre les mesures du module et l'allongement à la rupture pour des câbles revêtus de polychlorure de vinyle (PVC), de polyéthylène chlorosulfuré (CSPE) et de certains élastomères [4] [5] [6]. Des exemples sont donnés aux figures 3 et 4 pour un câble d'éthylène propylène (EPR)/CSPE et pour un câble à base d'EPR (kérite FR). Le poinçonneur ne semble pas adapté à l'utilisation avec des polyoléfinés et du PVC vieilli sous rayonnement car leur module varie très peu avec le vieillissement. Des données sur des poinçonneurs plus récents indiquent que la méthode peut être utile avec ces matériaux et avec une technique modifiée [7].

Limitations

Par sa véritable nature, le poinçonneur peut uniquement mesurer les propriétés du matériau constituant le câble sur une surface limitée au voisinage de la sonde. Les valeurs obtenues peuvent indiquer une variation significative si l'épaisseur de la gaine est variable, augmentant quand l'épaisseur diminue. La structure du câble, par exemple la présence d'une armature ou d'un blindage, affecte vraisemblablement aussi la valeur du module. Pour cette raison, une base de données importante pourrait être nécessaire pour couvrir la variété des matériaux constituant les câbles et les types de constructions utilisées dans une installation de puissance type. L'utilisation du poinçonneur est limitée aux matériaux qui se durcissent ou s'assouplissent de manière significative au cours du vieillissement. Cela comprend beaucoup de types de câbles utilisés dans les plus anciennes installations.

Dans la plupart des zones contenant des câbles accessibles à un poinçonneur, on peut seulement mesurer les propriétés du matériau de la gaine. Comme les matériaux de gaine dans la plupart des installations utilisant des câbles ont tendance à se dégrader plus rapidement que les matériaux d'isolement, les mesures effectuées avec des poinçonneurs peuvent donner l'alerte avant la dégradation du câble.

3.1.2 Vitesse de propagation du son

Cette technique est en tout début de développement et, à ce jour, seuls des câbles à base de PVC ont été essayés [6]. Elle est basée sur le fait que la vitesse du son dans un support solide dépend à la fois de la densité et du module, ce qui est donné par la formule suivante:

$$C^2 = \frac{E}{\rho}$$

où

C est la vitesse de propagation du son;

E est le module d'élasticité;

ρ est la masse volumique du polymère.

Comme à la fois le module et la masse volumique peuvent varier au cours du vieillissement de matériaux constituant le câble, les variations de la vitesse de propagation du son sont supposées dépendre du vieillissement.

Le testeur utilise des transducteurs piézoélectriques pour transmettre et recevoir une série d'impulsions à 20 kHz, comme cela est indiqué schématiquement à la figure 5. La durée de la transmission du signal est reportée sur un graphique en fonction de la distance séparant le transducteur (jusqu'à quelques centimètres) pour obtenir la pente représentant cette vitesse [6]. Des mesures de vitesse de propagation du son ont été faites sur une série de câbles revêtus de PVC et sur des bandes de matériaux constituant la gaine et tirées de ces câbles. Une comparaison entre les données obtenues avec les bandes d'essai et les câbles entiers a montré que la technique dépend de la géométrie du câble, des blindages adjacents et des composants d'isolation, voir par exemple la figure 6. La vitesse de propagation du son varie également de façon considérable selon les formules de composition du PVC, par conséquent une base de données pourrait être nécessaire pour chaque type de câble utilisé dans une installation si cette technique devait être d'utilisation courante.

in situ to test cables in trays, panels and junction boxes, provided that about 7,5 cm of exposed cable are accessible [4]. In accelerated ageing tests, good correlation has been obtained between modulus measurements and elongation at break for polyvinyl chloride (PVC) jacketed cables, chlorosulphonated polyethylene (CSPE) and a range of elastomers [4] [5] [6]. Examples are shown in figures 3 and 4 for an ethylene propylene (EPR)/CSPE cable and for an EPR based cable (kerite FR) respectively. The indenter does not appear to be suitable for use with polyolefins and radiation aged PVC because their modulus changes very little with ageing. More recent indenter data indicates that the method may be usable with these materials with a modified technique [7].

Limitations:

By its very nature, the indenter can only measure the properties of the cable material over a limited area in the vicinity of the probe. The indenter modulus values obtained can show a marked variation if the jacket thickness is variable, increasing as the thickness decreases. The construction of the cable, for example the presence of armouring or shielding, is also likely to affect the modulus value. Because of this, extensive baseline data would be required to cover the range of cable materials and construction types used in a typical power plant. The indenter is limited to those materials which harden or soften significantly during ageing; this includes many of the types of cables used in older plants.

In most of the cable areas which are accessible to the indenter, only the properties of the jacket material can be measured. Since the jacket materials in most cable constructions tend to degrade more rapidly than the insulation materials, indenter measurements can still give early warning of cable degradation.

3.1.2 Sonic velocity

This technique is at an early stage of development and at present has only been tested on PVC based cables [6]. Sonic velocity testing is based on the fact that the velocity of sound in a solid medium is dependent on both the density and the modulus and is given by:

$$C^2 = \frac{E}{\rho}$$

where

C is the sonic velocity;

E is the elastic modulus;

ρ is the polymer density.

Since both modulus and density can change during ageing of cable materials, changes in sonic velocity would be expected to occur on ageing.

The tester uses piezoelectric transducers to transmit and receive a series of 20 kHz pulses, as shown schematically in figure 5. The signal transit times are plotted as a function of transducer separation distance (up to a few centimetres) to obtain the slope which represents velocity [6]. Sonic velocity measurements have been made on a series of PVC jacketed cables and on strips of jacket material cut from the cables. Comparison between the data obtained on the test strips and the complete cables has shown that the technique is dependent on the cable geometry and adjacent shielding and insulation components, see for example figure 6. The magnitude of the sonic velocity also varies considerably with different formulations of PVC, therefore baseline data would be required for each type of cable used in a plant if the technique was to be of practical use.

Limitations

Le mesureur de vitesse de propagation du son mesure les propriétés de la gaine du câble dans un petit volume compris entre les calibres du transducteur. Les mesures obtenues sont fortement dépendantes de la constitution du câble et de la composition particulière du matériau de gaine. Par conséquent, une importante base de données pourrait être nécessaire. La technique en est au début du développement et, jusqu'à ce jour, elle a uniquement été essayée sur des câbles revêtus en PVC, mais elle est encore en cours d'étude. A ce jour, elle est plus adaptée à une évaluation de laboratoire qu'à une utilisation opérationnelle, mais sa très grande sensibilité aux dégradations dues au vieillissement indique qu'elle pourrait bien être l'objet d'un développement futur d'importance.

3.1.3 Réflectance dans l'infrarouge proche

Il est connu que des modifications du spectre infrarouge des polymères surviennent avec le vieillissement, tout d'abord pour des groupes fonctionnels tels que le carbonyle (C=O), l'hydroxyle (O-H) et le carboxyle (COOH). Ces groupes fonctionnels sont normalement observés dans le spectre infrarouge de transmission, mais pour des utilisations *in situ*, une unité portable basée sur la réflectance dans l'infrarouge proche (abréviation anglaise NIR) utilisant un calibre de fibre optique pourrait être plus adaptée.

Les mesures de réflectance NIR ont été réalisées sur des câbles revêtus de PVC, pour une longueur d'onde comprise entre 1 300 nm et 2 100 nm [6], en utilisant une sonde à fibre optique collée contre l'enveloppe du câble. Des variations survenant dans la ligne de base en raison de petites variations dans la longueur du chemin optique sont souvent constatées dans le spectre d'absorption. Ces petites variations de la ligne de base peuvent être éliminées en utilisant la dérivée première du spectre d'absorption (figure 7), car cette dérivée première représente la pente du spectre d'absorption, pour chaque longueur d'onde. Il a été constaté que différentes régions du spectre IR montraient une bonne corrélation avec les variations d'allongement à la rupture des matériaux en PVC essayés; par exemple les variations dans le spectre, entre 1 640 nm et 1 650 nm, sont données à la figure 8 pour le vieillissement thermique du PVC. Cette technique utilisant des sondes à fibres optiques pour mesurer la réflectance est au début de son développement.

Limitations

Le spectre de réflectance NIR obtenu est uniquement celui d'une fine couche en surface du matériau constituant le câble en essai. Cette surface peut ne pas être représentative de l'état de dégradation du matériau dans la masse. Comme dans les autres techniques de ce type, les données sont limitées à la surface proche de la sonde. Dans l'interprétation des résultats, il faut tenir compte aussi de la présence des additifs stabilisateurs dans les polymères qui peuvent avoir des pics dans la même gamme de longueurs d'onde. La technique n'est vraisemblablement pas sensible à la géométrie ou à la constitution du câble, mais des courbes d'étalonnage pourraient être nécessaires pour chaque câble. Cette technique n'est pas, à ce jour, en cours de développement.

3.1.4 Capteur de torsion

La dégradation du matériau de la gaine du câble peut également être déterminée en utilisant une méthode de réponse à un couple de contrainte [8]. Une paire de plateaux est utilisée pour fixer la partie extérieure du câble et un angle de torsion de faible valeur, entre 5° et 10°, est appliqué à l'un des plateaux, jusqu'à une fréquence de 2 Hz. Un appareil prototype pour de telles mesures est montré à la figure 9. Les premières données relatives à la tenue des câbles PVC ont été utilisées pour optimiser les conditions d'essai de la méthode du couple de torsion. L'effet de la fréquence des torsions sur les valeurs du couple obtenu est faible pour une gamme de fréquences comprises entre 0 Hz et 2 Hz; pour le PVC, la fréquence optimale est de 0,8 Hz. A la fois pour les câbles à l'état de réception et les câbles vieillis, les valeurs du couple mesurées augmentent linéairement avec l'angle de rotation appliqué jusqu'à 10°. Pour des angles plus importants, les composants autres que la gaine du matériau auront une grande

Limitations

The sonic velocity tester measures properties of the cable jacket over a small volume between the transducer probes. The measurements obtained are strongly dependent on the cable construction and the specific formulation of the jacket material. Therefore, extensive baseline data would be required. The technique is at an early stage of development and has so far only been tested on PVC jacketed cables, but it is still under active development. At present the technique is more suited to laboratory evaluation than field use, but its high sensitivity to ageing degradation indicate that it may well be worth further development.

3.1.3 Near infrared reflectance

Changes in the infrared spectrum of polymers are known to occur with ageing, primarily in functional groups such as carbonyl (C=O), hydroxyl (O-H) and carboxyl (COOH). These functional groups are normally observed in the infrared spectrum in transmission, but for use in-plant a portable unit based on near-IR reflectance (NIR) using a fibre optic probe would be more suitable.

NIR reflectance measurements have been carried out on PVC jacketed cables in the wavelength range 1 300 nm to 2 100 nm [6] using a fibre optic probe pressed against the cable jacket. Baseline shifts arising from small changes in optical path length are often seen in the absorbance spectra. These small baseline shifts can be eliminated by using the first derivative of the absorbance spectra (figure 7), since the first derivative is the slope of the absorbance spectrum at each wavelength. Various regions of the IR spectrum were found to correlate well with changes in the elongation at break of the PVC material tested; for example, changes in the spectrum at 1 640 nm to 1 650 nm are shown in figure 8 for thermal ageing of PVC. This technique using fibre optic probes for reflectance measurements is at an early stage of development.

Limitations

The NIR reflectance spectrum obtained is only from a thin surface layer of the cable material being tested. This surface may not be representative of the state of degradation of the bulk of the material. As in the other techniques in this category, data are limited to the immediate area of the probe. Care must also be taken in interpreting the data as some stabilizing additives in polymers have peaks in the same range of wavelengths. The technique is not likely to be sensitive to the cable geometry or construction but calibration curves would be required for each cable material. This technique is not currently under active development.

3.1.4 Torque tester

The degradation of cable jacket materials can also be determined using a torque-strain response method [8]. A pair of chucks are used to grip the outside of the cable and a small angle torque, in the range 5° to 10°, is applied to one of the chucks at up to 2 Hz. A prototype apparatus for such measurements is shown in figure 9. Preliminary data on the behaviour of PVC cables have been used to optimize the test conditions for the torque method. The effect of torsion frequency on the torque values obtained is small in the frequency range 0 Hz to 2 Hz; for PVC the optimum frequency is 0,8 Hz. In both as-received and aged cables the torque values measured increase linearly with the applied torque angle up to 10°. At higher torque angles, components other than the jacket material will significantly contribute to the values obtained. For a non-destructive technique, a maximum torque angle of 10° is recommended.

influence sur les valeurs obtenues. Pour une technique non destructive, un angle de rotation maximal de 10° est recommandé. L'effet de la longueur du câble entre les plateaux a également été vérifiée. Pour des longueurs de câbles plus petites, la réponse mesurée dépendra fortement de l'isolement, des conducteurs et de tous les composants formant l'écran, attendu que si la longueur du câble augmente, la sensibilité de la réponse à un couple de contrainte diminuera. La longueur optimale du câble entre les plateaux est de 50 mm pour les câbles en PVC.

Il existe une forte corrélation entre les valeurs mesurées de couple utilisant un testeur prototype et l'allongement à la rupture, à la fois pour les matériaux vieillis thermiquement et pour les câbles soumis à des séquences de rayonnements et de vieillissements chimiques thermiques (figures 10 et 11). Une relation linéaire entre allongement et couple a été trouvée pour un grand nombre de valeurs d'allongement. Les écarts par rapport à cette relation linéaire sont uniquement observés quand une oxydation hétérogène s'est produite au cours d'essais accélérés (figure 12). L'essai de torsion est une mesure des propriétés de masse du matériau de la gaine, attendu que l'allongement à la rupture est déterminé par une rupture initiale en surface dans la couche la plus fortement oxydée du matériau. Dans la plupart des câbles des installations nucléaires, une oxydation homogène se produit vraisemblablement.

Une version portable du testeur par torsion pouvant être fixé aux sections de câbles en place dans les installations a été développée. Cela permet de récolter des données de manière non destructive sur des longueurs de câble accessibles *in situ*.

Limitations

Comme dans tous les essais localisés les mesures sont limitées aux parties humainement accessibles et aux gaines de câble. Comme la valeur des couples est affectée de manière significative par les différences dans la constitution et la géométrie des câbles, une base de données pour une grande variété de types de câbles pourrait pratiquement être nécessaire. S'il existe des conditions d'environnement propres à l'installation, augmentant le risque d'une oxydation hétérogène, la technique pourrait tendre vers une sous-estimation du degré de dégradation du matériau de la gaine.

3.2 Essai localisé avec microéchantillonnage

Ces méthodes sont également limitées aux zones accessibles à l'homme et elles fournissent principalement des informations sur les matériaux des gaines. Si elles sont recoupées avec les données d'une base de données portant sur les modifications de l'allongement à la rupture, elles sont utilisables pour prévenir le comportement des matériaux. Toutes ces techniques sont des techniques de laboratoire avec un degré variable de complexité pour le matériel nécessaire.

3.2.1 Spectroscopie infrarouge (IR)

Les variations du spectre infrarouge des polymères sont connues pour se produire avec le vieillissement, tout d'abord pour les groupes fonctionnels tels que le carbonyle (C=O), l'hydroxyle (O-H) et le carboxyle (COOH). Une autre méthode pour mesurer la réflectance *in situ* est de prélever des échantillons dans les matériaux constituant les câbles et de mesurer le spectre infrarouge en laboratoire. Ces échantillons pourraient se présenter généralement sous forme de couches minces ou de bandes de matériaux découpés en surface, mais de dimensions suffisamment petites pour ne pas affecter le fonctionnement du câble. Les variations en teneur maximale de carbonyle aux environs de 1720 nm sont les plus fréquemment utilisées pour surveiller les modifications d'état concernant les dégradations du matériau [9] [10] [11]. La figure 13 montre la variation d'absorption en carbonyle du matériau XLPE vieilli sous rayonnement et la figure 14 montre la variation du matériau XLPE vieilli chimiquement et thermiquement. Ce groupe fonctionnel est sensible aux premières étapes de la dégradation par oxydation, mais n'est pas suffisamment sensible au cours des dernières étapes quand les propriétés mécaniques sont significativement dégradées.

The effect of the length of cable between the chucks has also been investigated. At shorter cable lengths, the measured response will be strongly dependent on the insulation, conductors and any shielding components, whereas as the cable length increases, the sensitivity of the torque-strain response will decrease. The optimum cable length between chucks is 50 mm for PVC cables.

There is a strong correlation between the torque values measured using the prototype tester and elongation at break, both for thermally aged material and for cables subjected to sequential radiation and thermal chemical ageing (figures 10 and 11). A linear relationship between elongation and torque is found over a wide range of elongation values. Deviations from this linear relationship are only observed when heterogeneous oxidation has occurred in the accelerated tests (figure 12). The torsion test is a measure of the bulk properties of the jacket material whereas elongation at break is determined by crack initiation in the more highly oxidized surface layer in this material. In most cable applications in nuclear plants, homogeneous oxidation is likely to occur.

A portable version of the torsion tester which could be clamped onto sections of cable in-plant has been developed. This enables data to be taken non-destructively on accessible lengths of cable *in situ*.

Limitations

As in all local tests, measurements are limited to man-accessible areas and jacket materials. Since torque values will be significantly affected by differences in cable construction and geometry, baseline data for a wide range of cable types would be needed in practice. If there are environmental conditions in-plant which give rise to heterogeneous oxidation, the technique would tend to underestimate the degree of degradation of the jacket material.

3.2 Local tests with microsampling

These methods are also limited to man-accessible areas and mainly provide information on the jacket materials. Where they are cross-correlated with baseline data on changes in elongation at break they have a predictive capability. All of these techniques are laboratory based with a varying degree of complexity of equipment required.

3.2.1 Infrared spectroscopy (IR)

Changes in the infrared spectrum of polymers are known to occur with ageing, primarily in functional groups such as carbonyl (C=O), hydroxyl (O-H) and carboxyl (COOH). An alternative to reflectance measurements in-plant is to take samples from the cable material and measure the IR spectrum in the laboratory. Such samples would usually be in the form of scrapings or slivers of material cut from the surface, but sufficiently small to not affect the operation of the cable. Changes in the carbonyl peak at about 1 720 nm are most frequently used for monitoring changes in the state of degradation of the material [9] [10] [11]. Figure 13 shows the change in carbonyl absorbance for radiation aged XLPE and figure 14 shows the change for thermal chemical ageing of XLPE. This functional group is sensitive to the early stages of oxidative degradation but may not be sufficiently sensitive in the later stages when mechanical properties are significantly degraded.

Limitations

Les spectres IR issus des échantillons sont limités aux couches surfaciques de la gaine du câble sauf si l'isolement exposé est accessible. La profondeur du matériau échantillonné est plus grande que dans le cas des mesures de réflectance IR *in situ*, mais peut encore ne pas être représentative de la masse du matériau. La technique est limitée aux parties des câbles qui sont accessibles à l'homme pour effectuer l'échantillonnage et n'est pas très sensible aux derniers stades de la dégradation.

3.2.2 Temps d'induction de l'oxydation (OIT)

En utilisant des calorimètres différentiels à balayage (DSC), le temps mis pour obtenir une oxydation exothermique à une température constante peut être contrôlé. Dans un essai OIT, un petit échantillon de matériau est placé dans un DSC et est exposé à une température constante aux environs de 180 °C à 215 °C, dans une atmosphère d'oxygène, jusqu'à ce qu'une réaction exothermique se produise. Ce temps d'induction de l'oxydation est un indicateur de la stabilité à l'oxydation du polymère et il décroît au fur et à mesure que les antioxydants dans le polymère disparaissent. Les valeurs de l'OIT décroissent rapidement si la dose de rayonnement augmente en même temps qu'augmente le vieillissement thermique [9] [12], indiquant que les mesures de l'OIT constituent une méthode sensible pour déterminer à la fois la dégradation par l'oxydation induite thermiquement et par rayonnement.

Le mode opératoire d'essai OIT utilise des échantillons d'environ 8 mg de matériaux, passant au tamis 20. L'échantillon est immergé dans un courant d'azote tout en étant amené à la température d'essai. Une fois à la température demandée, le courant d'azote est remplacé par un courant d'oxygène et le temps nécessaire pour que les réactions exothermiques débutent est mesuré. Pour que la technique OIT soit utile, une transition nette au début du processus exothermique est nécessaire, de préférence après un chauffage sous oxygène de 20 min à 30 min pour les matériaux non vieillis.

La technique a, jusqu'à ce jour, été évaluée pour deux polymères concernant les câbles, c'est-à-dire les matériaux XLPE et EPR [9] [12]. Pour ces deux matériaux, les mesures OIT ont un bon comportement en ce sens qu'un critère de fin de vie peut être défini indépendamment de la composition du matériau. Par exemple, pour le matériau XLPE, l'allongement à la rupture sera réduit de 50 % de sa valeur absolue pour des échantillons où l'OIT est inférieur à 1 min à 200 °C. Dans les deux matériaux, les mesures OIT peuvent donner un avertissement précoce de la dégradation des câbles (figures 15 et 16). La technique OIT a été appliquée à des câbles vieillis en temps réel dans un environnement sévère dans une installation de puissance; comparée aux mêmes câbles fonctionnant dans un environnement moins sévère [9].

Une variante de la technique OIT est d'utiliser la température d'induction de l'oxydation (OI), c'est-à-dire la température à laquelle des réactions exothermiques débutent alors que la température de l'échantillon est augmentée pendant qu'il est maintenu dans un courant constant d'oxygène. On a trouvé cette méthode plus utile que l'OIT pour les isolations en élastomère telles que le matériau SBR et le butyl [8], ainsi que les isolations thermoplastiques telles que les matériaux XLPE, EPR et PEEK. Les essais de température OI sont légèrement plus faciles à réaliser que les essais OIT, en ce sens que la température d'essai isothermique ne nécessite pas d'être établie préalablement. Des variations dans la température OI de 50 °C à 100 °C ont été observées sur des matériaux constituant les câbles sévèrement dégradés. Il existe une relation entre l'OIT et la température OI. Elle peut être utilisée pour calculer l'OIT si l'énergie d'activation est connue [13].

Limitations

Comme avec toute technique de microéchantillonnage, seules les propriétés de la surface échantillonnée sont mesurées, ce qui peut ne pas être représentatif de la masse du matériau. La technique est limitée aux câbles situés dans les zones accessibles aux hommes et est généralement applicable aux matériaux des gaines des câbles plutôt qu'à leur isolement.

Limitations

IR spectra taken from samples are limited to the surface layers of the cable jacket unless exposed insulation is accessible. The depth of material sampled is greater than for the in-plant IR reflectance measurements, but may still not be representative of the bulk material. The technique is limited to those parts of the cables that are man-accessible for sampling and is not very sensitive to the later stages of degradation.

3.2.2 Oxidation induction time (OIT)

Using a differential scanning calorimeter (DSC), the time taken to the onset of exothermic oxidation at constant temperature can be monitored. In an OIT test, a small sample of material is placed in a DSC and exposed to a constant temperature in the region 180 °C to 215 °C in an oxygen atmosphere until an exothermic reaction occurs. This oxidation induction time is an indicator of the oxidative stability of the polymer and will decrease as antioxidants in the polymer are depleted. OIT values decrease rapidly with increasing radiation dose as well as increasing thermal ageing [9] [12], indicating that OIT measurements are a sensitive method for determining both thermal and radiation induced oxidative degradation.

The OIT test procedure uses samples of about 8 mg of material, ground to a size less than 20 mesh. The sample is immersed in a flow of nitrogen while being brought to the test temperature. Once at the required temperature the flow is switched to oxygen and the time needed for exothermic reactions to start is monitored. For the OIT technique to be useful, a sharp transition at the onset of the exotherm is required, preferably on a time-scale of 20 min to 30 min for the unaged material.

The technique has so far been assessed for two polymers which are relevant to cables, i.e. XLPE and EPR [9] [12]. In these two materials, OIT measurements have a fairly generic behaviour in that an end-of-life criterion can be defined which is independent of the material formulation. For example, in XLPE the elongation at break will have reduced to 50 % absolute for samples where OIT is less than 1 min at 200 °C. In both materials, OIT measurements can give early warning of cable degradation (figures 15 and 16). The OIT technique has been applied to real-time aged cables taken from a harsh environment in a power plant, compared with the same cable operating in a mild environment [9].

A variant on the OIT technique is to use oxidation induction (OI) temperature, i.e. the temperature at which exothermic reactions start as a sample is increased in temperature at a constant rate in oxygen. This method has been found to be more useful than OIT for elastomeric insulations such as SBR and butyl [8], as well as for thermoplastic insulations such as XLPE, EPR and PEEK. OI temperature tests are slightly easier to carry out than OIT tests, in that the isothermal test temperature does not need to be established initially. Changes in OI temperature of 50 °C to 100 °C have been observed in severely degraded cable materials. There is a relationship between OIT and OI temperature which can be used to calculate the OIT if the activation energy is known [13].

Limitations

As with any microsampling technique, only the properties of the surface layer sampled are measured which may not be representative of the bulk material. The technique is limited to cables in man-accessible areas and is generally applicable to cable jacketing materials rather than insulation.

3.2.3 Teneur en plastifiant

Cette technique est utile pour établir la dégradation des câbles en PVC exposés au vieillissement thermique. La teneur en plastifiant des PVC est typiquement de 20 % à 30 % en masse et peut être mesurée par extraction en portant à ébullition de l'éther éthylique. L'allongement à la rupture des échantillons vieillis thermiquement se corrèle bien avec la teneur en plastifiant au cours des premières étapes du vieillissement (figure 17) [9]. Une teneur en plastifiant inférieure à 15 % en masse indique un degré significatif de dégradation thermique. La technique a été utilisée pour les câbles installés en service à la Société HydroOntario avec de bons résultats, mais on sait qu'il n'existe pas de relation directe entre la teneur en plastifiant et la dégradation des PVC vieillis par rayonnement [14]. En général, des échantillons plus importants sont nécessaires pour déterminer la teneur en plastifiant que ceux utilisés pour les autres méthodes de microéchantillonnage.

Limitations

La technique est limitée à la composante thermique de la dégradation des câbles en PVC. Les échantillons peuvent uniquement être prélevés dans des zones accessibles aux hommes et sont par conséquent limitées principalement aux matériaux de gaine.

3.2.4 Masse volumique

La dégradation par oxydation se produit à la fois dans un environnement thermique et un environnement de rayonnement, et il en résultera une augmentation de la masse volumique du polymère. La masse volumique des petits échantillons de polymère peut être directement mesurée en utilisant une colonne à gradient de masse volumique avec des liquides adaptés à la famille de polymères. A condition que la dégradation se produise dans des conditions d'oxydation homogènes, il existe une bonne corrélation entre les variations de masse volumique et l'allongement à la rupture [15]. Certains exemples de cette corrélation pour une variété d'isolement de câbles et de matériaux de la gaine sont montrés aux figures 18 et 19.

Des conditions d'oxydation homogènes peuvent ne pas s'appliquer à tous les environnements de dégradation, par conséquent il existe une tendance, en mesurant la masse volumique, à surestimer le degré de dégradation de la masse du matériau. Si une oxydation hétérogène se produit à la fois pour un environnement de rayonnement et un environnement thermique, la surface du câble montrera le niveau le plus important d'oxydation et, par suite, la variation la plus importante de la masse volumique. Cependant, cela peut ne pas être représentatif de la masse du matériau comme le montre la figure 20 pour ce qui concerne le vieillissement sous rayonnement. La technique a cependant l'avantage de ne demander qu'un matériel simple pour réaliser les mesures.

Limitations

L'échantillonnage peut uniquement être effectué dans les zones accessibles à l'homme et est principalement limité aux matériaux de la gaine. Les échantillons en surface peuvent ne pas être représentatifs de la tenue du matériau dans la masse. D'importantes bases de données sont nécessaires pour les polymères particuliers utilisés dans les câbles.

3.3 Essais globalisés avec résolution spatiale

Le terme «globalisés» se réfère aux essais donnant des informations sur l'état d'une longueur de câble, à partir de mesures effectuées en un point, habituellement une extrémité. Ces méthodes ne sont pas limitées aux zones accessibles aux hommes et donnent habituellement des résultats *in situ*. Ces types d'essais sont d'abord utilisés pour identifier les zones endommagées des câbles, par exemple dommages durant l'installation, craquelures, extrémités corrodées, mais ne sont généralement pas bons pour évaluer l'état global des dégradations sur les matériaux constituant les câbles. Ils sont très utiles pour résoudre les problèmes mais n'ont aucune aptitude pour prédire l'évolution. En suivant l'évolution des données obtenues à intervalles de temps réguliers, il peut être possible d'identifier des variations régulières par corrélation avec une base de données sous forme d'historiogramme.

3.2.3 Plasticizer content

This is a useful technique for assessing the degradation of PVC cable materials exposed to thermal ageing. The plasticizer content of PVC is typically 20 % to 30 % by mass and can be measured by extraction in boiling ethyl ether. The elongation at break of thermally aged samples correlates well with plasticizer content in the early stages of ageing (figure 17) [9]. Plasticizer content of less than 15 % by mass indicates a significant degree of thermal degradation. The technique has been used for field service cables at Ontario Hydro with good results, but it is known that there is no direct relationship between plasticizer content and degradation for radiation-aged PVC [14]. In general, larger samples are required for determining plasticizer content than are needed for the other micro-sampling methods.

Limitations

The technique is limited to the thermal component of degradation of PVC cables. Samples can only be taken from man-accessible areas and are therefore limited mainly to jacket materials.

3.2.4 Density

Oxidative degradation occurs in both thermal and radiation environments and will give rise to increases in the density of the polymer. The density of small samples of polymer can be readily measured using a density gradient column with suitable liquids for the generic polymer type. Provided that degradation occurs under homogeneous oxidation conditions, there is a good correlation between density changes and elongation at break [15]. Some examples of this correlation for a range of cable insulation and jacket materials are shown in figures 18 and 19.

Homogeneous oxidation conditions may not apply in all degradation environments, therefore there is a tendency for the density measurements to overestimate the degree of degradation of the bulk material. Where heterogeneous oxidation occurs, both in radiation and thermal environments, the surface of the cable will show the highest degree of oxidation and hence the largest density change. However, this may not be representative of the bulk as illustrated in figure 20 for radiation ageing. The technique does however have the advantage of requiring only simple equipment to carry out measurements.

Limitations

Sampling can only be made in man-accessible areas and is limited mainly to the jacket materials. Surface samples may not be representative of the behaviour of the bulk material. Considerable baseline data are required on the specific polymers used in cables.

3.3 Global tests with spatial resolution

The term "global" refers to tests which give information on the state of a length of cable from measurements made at one point, usually a termination. These methods are not limited to man-accessible areas and usually give data in-plant. These types of test are primarily for identifying damaged areas of cable, for example installation damage, cracks, corroded terminals, but are not generally good for assessing the overall state of degradation of the cable materials. They are very useful for troubleshooting but do not have any inherent predictive capability. By trending data taken at regular intervals, it may be possible to identify gradual changes by correlation with a database of historic data.

3.3.1 Réflectométrie du domaine temporel (TDR)

La technique TDR est basée sur l'envoi d'une forme d'onde basse tension avec un temps de transition bref dans un câble et l'observation de la réflexion de la forme d'onde au niveau des discontinuités dans l'impédance du câble [16]. La différence de durée entre l'impulsion initiale et l'impulsion réfléchie donne une indication de la distance séparant l'extrémité du câble de la discontinuité.

La technique ne différencie pas entre les discontinuités produites par des artefacts, par exemple des épissures et des connexions sur des câbles, et les zones endommagées du câble. Il est alors nécessaire de générer des catalogues de spectres TDR pour chaque câble jugé intéressant dans une installation, en vue de comparaison lors de mesures ultérieures. La technique est des plus utiles pour résoudre des problèmes d'application où son aptitude à localiser la position de la discontinuité est très précieuse. La technique TDR est très sensible sur des câbles endommagés, dont l'isolation a été altérée par frottement ou craquelée, mais n'est pas bonne pour déceler de plus subtiles variations provenant de la dégradation du matériau constituant les câbles.

Utilisée comme outil pour résoudre certains problèmes, la technique TDR a été développée sur la base d'un système disponible commercialement [17], combinant la TDR avec les mesures traditionnelles de capacité, de facteur de dissipation et de résistance d'isolement pour identifier et localiser les problèmes. La figure 21 illustre un exemple de l'aptitude de TDR à repérer la position d'une discontinuité (dans ce cas, un interrupteur fermé) dans un circuit d'éclairage. Les variations d'impédance dues aux changements de la valeur de ρ apparaissent dans les circuits et sont très reproductibles. Le système peut être utilisé pour une grande variété de types de câbles avec l'appareillage correspondant, et il est utilisé dans les installations nucléaires de plusieurs pays [18].

Limitations

Il est nécessaire de débrancher le circuit avant de réaliser les essais de TDR, mais les mesures peuvent être faites avec des charges en bout (par exemple des moteurs) reliés au câble. La TDR ne peut pas détecter directement les variations dans le câble provenant de la dégradation due au vieillissement et sa résolution des dommages aux câbles est limitée, en particulier dans les câbles de grande longueur, c'est-à-dire supérieure à 20 m. La technique repose sur l'acquisition de fichiers de spectres TDR pour chaque câble dans une installation de puissance, à des fins de comparaison. La sensibilité de la technique TDR est limitée par la dégradation de la forme d'onde dans les grandes longueurs de câble et par l'impossibilité de détecter des dommages très localisés. Dans les câbles non blindés, les spectres TDR varient de manière significative si le câble est déplacé, nécessitant un nouveau spectre pour base de données à chaque fois qu'un câble est déplacé dans sa goulotte.

3.3.2 Décharge partielle (PD)

Les mesures de décharges partielles sont utilisées pour détecter les défauts tels que les vides, craquelures ou protubérances conductrices dans l'isolement des câbles. De tels défauts peuvent produire des décharges en présence d'une contrainte électrique importante et sont, en conséquence, d'abord intéressantes pour les câbles haute tension uniquement. La technique utilise une source de tension alternative variable appliquée au travers de l'isolement. Cette tension d'excitation est augmentée jusqu'à produire une décharge partielle ayant la forme d'une impulsion de courte durée. L'impulsion est détectée à la fois comme un signal direct et après réflexion en bout de câble. Le principe de la technique et la séquence des impulsions obtenues à partir d'un site de défaut unique sont illustrés de manière schématique à la figure 22 [19].

Même si la technique est simple en principe et fréquemment appliquée pour les câbles haute tension, il reste un nombre important de problèmes qui ont empêché son application pour les câbles basse tension. L'amplitude des impulsions des décharges partielles est très variable et peut être masquée par du bruit de fond électrique. Cela peut être partiellement surmonté en utilisant une instrumentation adaptée mais ne peut être entièrement éliminé.

3.3.1 Time domain reflectometry (TDR)

The TDR technique is based on sending a low-voltage waveform with a fast transition time down a cable and looking for reflection of the waveform at discontinuities in the cable impedance [16]. The time difference between the initial and reflected pulses gives an indication of the distance from the end of the cable to the discontinuity.

The technique does not differentiate between discontinuities arising from artefacts, for example cable splices and connections, and damaged areas of cable. It is therefore necessary to generate TDR signatures for each cable of interest in a plant for comparison with later measurements. The technique is of most use in troubleshooting applications where its ability to locate the position of the discontinuity is very valuable. TDR is sensitive to damaged cable, i.e. abraded or cracked insulation, but is not good at detecting the more subtle changes arising from degradation of the cable materials.

As a troubleshooting tool, the TDR technique has been developed into a commercially available system [17] which combines TDR with traditional measurements of capacitance, dissipation factor and insulation resistance to identify and locate problems. An example is shown in figure 21 the ability of TDR to locate the position of a discontinuity (in this case, a closed switch) in a lighting circuit. Variations in impedance along the circuit appear as changes in the rho value and are very reproducible. The system can be used on a wide range of cable types and attached apparatus and is in use in nuclear plants in several countries [18].

Limitations

It is necessary to disconnect the circuit before carrying out TDR tests but the measurements can be made with end loads (e.g. motors) connected to the cable. TDR cannot readily detect changes in the cable arising from ageing degradation and its resolution for damage to cables is limited, particularly in long cable lengths i.e. >20 m. The technique relies on having signature files for every cable in a power plant for comparison. The sensitivity of the TDR technique is limited by the degradation of the waveform in long cable lengths and cannot detect very localized damage. In unshielded cables, TDR signatures change significantly if the cable is moved, necessitating a repeat of baseline signatures every time a cable is moved in its tray.

3.3.2 Partial discharge (PD)

Partial discharge measurements are used to detect defects such as voids, cracks or conducting protrusions in cable insulation. Such defects can produce discharges in the presence of an applied high electrical stress and are therefore primarily of interest for high-voltage cables only. The technique uses a variable voltage a.c. source applied across the insulation. This excitation voltage is increased until partial discharge arises producing a signal in the form of a short duration pulse. The pulse is detected both as a direct signal and after reflection from the end of the cable. The principle of the technique and the sequence of pulses obtained from a single defect site are illustrated schematically in figure 22 [19].

Although the technique is simple in principle and is widely used in high-voltage cables, there are a number of problems which have prevented its application in low-voltage cables. The amplitude of the PD pulses in low-voltage cables is very variable and can be masked by electrical noise. This can be partially overcome by the use of suitable instrumentation but cannot be entirely eliminated. With signal averaging techniques to eliminate random noise signals, the technique has been successfully demonstrated in a laboratory environment [19] for shielded low-voltage cables. However, in unshielded cables, even with clearly defined model

Avec des techniques moyennant les signaux, pour éliminer les signaux de bruits aléatoires, la technique a démontré une certaine réussite dans un environnement de laboratoire [19] pour des câbles basse tension blindés. Cependant, dans les câbles non blindés, même avec des modèles de défauts clairement définis, les mesures de décharges partielles peuvent indiquer une multiplicité de sites de décharge tout le long du câble sans relation avec le défaut introduit (figure 23), en particulier s'il existe un intervalle d'air entre les conducteurs alimentés et ceux mis à la terre, utilisés pour les mesures [20].

Limitations

Les mesures de décharges partielles sont limitées, en pratique, aux câbles d'alimentation haute tension blindés et peuvent uniquement détecter les défauts tels les arborescences électriques, les craquelures et les trous d'épingle. La technique n'est pas adaptée à la détection des variations régulières dans les propriétés des câbles survenant au cours du vieillissement par radiation ou par chaleur. En raison des tensions élevées nécessaires pour générer les décharges partielles, il existe également un risque d'endommager un câble qui, autrement, ne le serait pas.

3.4 Essais globalisés sans résolution spatiale

Si elles sont corrélées avec l'allongement à la rupture, certaines de ces techniques peuvent avoir une bonne aptitude pour prédire le vieillissement des câbles. Les données d'un fichier relatif aux câbles vieillissés en accéléré sont nécessaires pour chaque matériau. Il n'existe pas de résolution spatiale pour les variations sur un câble, mais ces méthodes peuvent être sensibles aux dégradations dues au vieillissement et les données sont habituellement disponibles *in situ*. Ces techniques sont sensibles aux craquelures localisées et à l'effet de l'humidité, mais ne pourront pas indiquer l'emplacement de la zone endommagée ou humide.

3.4.1 Spectrographie du domaine temporel (TDS)

La TDS est une technique utilisée pour déterminer le spectre de fréquences de la perte diélectrique d'un matériau constituant un câble à partir de sa réponse à une excitation correspondant à un palier de tension. L'appareil utilise une configuration gardée de trois broches appliquée à l'extérieur du câble (figure 24). Un palier de tension de +100 V est appliqué au travers de la combinaison d'un échantillon et d'une capacité de référence, et le courant résultant est soumis à une analyse de transformée de Fourier rapide pour générer $\tan \delta$ en fonction de la fréquence [21]. L'appareil est capable de détecter des variations de $\tan \delta$ de un millionième et couvre une plage de fréquences comprise entre 10^{-3} Hz et 10^4 Hz.

Des études préliminaires sur les mesures de TDS [16] indiquent que les variations se produisant sous rayonnement sont facilement détectables, en particulier en bout de fréquences basses du spectre. Par exemple, les câbles coaxiaux en PVC provenant des installations nucléaires de Shippingport, à l'intérieur de la zone de confinement et de la salle de commande montrent d'importantes différences pour le facteur de perte (figure 25). Des travaux plus récents sur les câbles EPR/CSPE et les isolants EPR et XLPE [20] utilisant TDS ont montré des variations similaires. La technique est également capable de noter les variations survenant après des agressions dues à l'humidité et aux huiles [22]. Actuellement, les mesures TDS sont limitées aux laboratoires, mais les travaux se poursuivent pour développer une instrumentation adaptée pour une utilisation sur site.

Limitations

Les mesures TDS peuvent uniquement être faites avec des électrodes soigneusement appliquées ce qui peut ne pas être possible *in situ*. La technique nécessite du matériel sophistiqué et est actuellement limitée à une utilisation en laboratoire. Comme c'est une technique nécessitant l'application d'électrodes externes, elle est limitée aux zones accessibles de l'installation même si une version portable est développée. Les mesures peuvent uniquement se faire sur un câble isolé du reste du réseau.

defects, PD measurements can indicate a multiplicity of discharge sites along the cable unrelated to the introduced defect (figure 23), particularly if there is an air gap between the energized and grounded conductors used for the measurements [20].

Limitations

PD measurements are limited, in practice, to shielded high-voltage power cables and can only detect defects such as electrical trees, cracks or pinholes. The technique is not suitable for detection of the gradual changes in cable properties caused by radiation and thermal ageing. Because of the high voltages required to generate the partial discharges, there is also some concern that damage may be introduced into an otherwise undamaged cable.

3.4 Global tests without spatial resolution

When cross-correlated to elongation at break, some of these techniques can have a good predictive capability. Baseline data from accelerated aged cable is required for each material. There is no spatial resolution of changes to the cable, but these methods can be sensitive to ageing degradation and data are usually available in-plant. These techniques are sensitive to localized cracking and moisture ingress, but will not be able to indicate the location of the damaged or wet area.

3.4.1 Time domain spectrometry (TDS)

TDS is a technique for determining the frequency spectrum of the dielectric loss of a cable material from its response to a step voltage excitation. The instrument uses a guarded three terminal configuration applied to the outside of the cable (figure 24). A +100 V step voltage is applied across the combination of the test sample and a reference capacitor and the resulting current is subjected to a fast Fourier transform analysis to generate $\tan \delta$ as a function of frequency [21]. The instrument is capable of detecting changes in $\tan \delta$ of one part per million and covers a frequency range of 10^{-3} Hz to 10^4 Hz.

Preliminary studies on TDS measurements [16] indicate that changes which occur under irradiation are easily detected, particularly at the low frequency end of the spectrum. For example, PVC coaxial cable taken from the Shippingport nuclear power plant from inside containment and from the control room show large differences in the loss factor (figure 25). More recent work on EPR/CSPE cables and EPR and XLPE insulation [20] using TDS have shown similar changes. The technique is also able to pick up changes arising from moisture or oil ingress [22]. At present, TDS measurements are restricted to the laboratory, but work is ongoing to develop suitable instrumentation for in-plant use.

Limitations

TDS measurements can only be made with carefully applied electrodes which may not be practical to apply in-plant. The technique requires sophisticated equipment and at present is limited to laboratory use. Since it is a technique which requires application of external electrodes, it will be limited to man accessible areas of the plant even when a portable version is developed. Measurements can only be made with the load disconnected from the cable.

3.4.2 Perte diélectrique

Des mesures de pertes diélectriques peuvent être faites en fonction de la fréquence dans les câbles, en utilisant un appareil beaucoup plus simple que celui utilisé pour les mesures TDS et sans application d'électrodes externes [23]. En utilisant un analyseur d'impédance pour générer les signaux de fréquence fixe dans une bande allant de 20 Hz à 20 kHz, le spectre apparent de perte diélectrique peut être facilement construit. Le signal est appliqué aux conducteurs adjacents dans les câbles multiconducteurs ou entre le conducteur et le blindage dans les câbles blindés. Comme aucune électrode externe n'est utilisée, la perte dans l'ensemble du câble est déterminée à partir des mesures effectuées en extrémité de câble.

Aux basses fréquences (<100 Hz), la perte diélectrique mesurée peut être fortement dépendante des effets d'interface, en particulier pour les polymères non polaires tels que le matériau XLPE où $\tan \delta$ est petite. Dans beaucoup de polymères polaires comme l'acétate de vinyle/éthylène (EVA), les valeurs de $\tan \delta$ sont plus élevées et l'extrémité basses fréquences du spectre est plus reproductible. Il faut tenir compte de la température à laquelle les mesures de $\tan \delta$ sont faites. Comme la température d'essai augmente, les pics de relaxation auront tendance à se déplacer vers des fréquences plus élevées. Le déplacement observé du pic suit une loi d'Arrhenius en liaison avec la température et peut, par conséquent, être calculé directement. Un exemple dans lequel la température a un effet marqué sur le spectre mesuré est illustré à la figure 26 pour un câble EVA, sur toute une gamme de températures comprises entre 28 °C et 126 °C [23]. Dans les polymères comme le XLPE et le poly éther éther ketone (PEEK), où les valeurs de $\tan \delta$ sont beaucoup plus faibles que pour un matériau EVA, l'effet de la température est insignifiant. Dans une centrale nucléaire, il peut être nécessaire de réaliser des mesures alors que les câbles sont exposés aux rayonnements. L'effet du débit incident sur $\tan \delta$ a été examiné. En général, les variations dues aux rayonnements incidents en cours de mesure augmentent quand le débit augmente et sont les plus élevées pour les basses fréquences (figure 27). Cependant pour des débits inférieurs à 0,03 Gy/s, typiques des valeurs *in situ*, les effets sont négligeables [23].

Dans les câbles vieillis sous rayonnement, le spectre de $\tan \delta$ varie avec l'accroissement du vieillissement comme indiqué à la figure 28 pour un câble en PVC. Les variations sont les plus importantes aux extrémités des basses fréquences du spectre, mais c'est la bande de fréquences où il est le plus vraisemblable que des perturbations dues à la température, au taux de dose et aux effets interfaciaux existent. Pour les applications pratiques, la bande des fréquences les plus utilisées pour mesurer $\tan \delta$ dans les câbles PVC est comprise entre 200 Hz et 1 kHz. Les variations de pertes du diélectrique pour trois fréquences différentes sont comparées avec variations de l'allongement à la rupture des mêmes câbles en PVC à la figure 29 [23]. Cela montre que, pour des fréquences inférieures à 1 kHz, $\tan \delta$ augmente rapidement dans la première phase de la dégradation et se stabilise au fur et à mesure que le câble devient cassant. Ce type de mesures peut alors être utilisé comme l'avertissement précoce d'une rupture de l'isolement du câble.

Il a été montré que la technique des mesures apparentes de $\tan \delta$ utilisant un analyseur d'impédance est possible sur de grandes longueurs de câble *in situ*. Elle peut détecter des points chauds, induits à la fois thermiquement et par rayonnement, en détectant les pertes supplémentaires survenant dans la zone la plus fortement dégradée. Même si la technique est moins sensible que celle utilisant des mesures TDS, le fait que le matériel soit portatif et que son utilisation soit aisée pour les câbles de grandes longueurs la transforme en une méthode pratique pour évaluer la dégradation des câbles.

Limitations

Il est nécessaire de débrancher toutes les liaisons du câble avant d'effectuer les mesures de perte diélectrique et la technique ne peut pas être utilisée avec succès sur les câbles monoconducteurs non blindés de puissance. Dans les câbles contenant des polymères polaires, tels que les matériaux EVA, les mesures seront affectées par la température du câble. Même si les données sont obtenues sur l'état de dégradation de tout le câble, il n'y a pas de résolution spatiale.

3.4.2 Dielectric loss

Measurements of dielectric loss can be made as a function of frequency in cables using much simpler apparatus than that used for TDS measurements and without the application of external electrodes [23]. By using an impedance analyzer to generate signals of a fixed frequency over the range 20 Hz to 20 kHz, the apparent dielectric loss spectrum can be readily built up. The signal is applied to adjacent conductors in multiconductor cables or between conductor and shield in shielded cables. Since no external electrode is used, the loss in the whole cable is determined from measurements made at one end of the cable.

At low frequencies (<100 Hz) the dielectric loss measured can be strongly dependent on interfacial effects, particularly for non-polar polymers such as XLPE where $\tan \delta$ is small. In more polar polymers such as ethylene vinyl acetate (EVA), $\tan \delta$ values are higher and the low frequency end of the spectrum is more reproducible. In making $\tan \delta$ measurements the temperature at which the data are being taken must be considered. As the test temperature increases, relaxation peaks will tend to shift to higher frequencies. The observed peak shift has an Arrhenius relationship with temperature and can therefore be readily calculated. An example where temperature has a marked effect on the measured spectrum is shown in figure 26 for an EVA cable over the temperature range 28 °C to 126 °C [23]. In polymers such as XLPE and polyether ether ketone (PEEK), where $\tan \delta$ values are much smaller than in EVA, temperature effects are insignificant. In a nuclear power plant, measurements may need to be carried out while the cables are being exposed to irradiation. The effect of incident dose rate on $\tan \delta$ has been examined. In general, changes due to incident irradiation during the measurements increase as the dose rate increases and are greatest at low frequencies (figure 27). However for dose rates <0,03 Gy/s, which are typical of in-plant values, the effects are negligible [23].

In radiation aged cables, the $\tan \delta$ spectrum changes with increasing ageing, as shown in figure 28 for a PVC cable. The changes are greatest at the low frequency end of the spectrum, but this is the frequency range where there are most likely to be perturbations due to temperature, dose rate and interfacial effects. For practical applications, the most useful frequency range for $\tan \delta$ measurements in PVC cable is 200 Hz to 1 kHz. The changes in dielectric loss at three different frequencies are compared with changes in elongation at break for the same PVC cable in figure 29 [23]. This shows that $\tan \delta$ at frequencies <1 kHz increases rapidly in the early stages of degradation and then levels off as the cable becomes embrittled. This type of measurement can therefore be used as an early warning of cable failure.

The technique of apparent $\tan \delta$ measurements using an impedance analyzer has been demonstrated to be feasible on long lengths of cable in-plant. It can detect 'hot-spots', both thermal and radiation-induced by detecting the additional loss which arises from the more highly degraded area. Although the technique is less sensitive than similar data from TDS measurements, the portable nature of the equipment and its ease of use on long lengths of cable makes it a practical method of assessing cable degradation.

Limitations

It is necessary to disconnect any load from the cable before carrying out dielectric loss measurements and the technique cannot be used successfully on single conductor unshielded power cables. In cables containing polar polymers, such as EVA, the measurements will be affected by the temperature of the cable. Although data are obtained on the state of degradation of the whole cable, there is no spatial resolution.

3.4.3 Essais d'acceptation (passe/passe pas)

Les essais tels que la résistance diélectrique et la résistance d'isolement sont actuellement utilisés dans beaucoup de services publics comme moyen d'évaluation des câbles, mais leur utilité est discutable en termes de conditions de contrôle. La technique pourrait être améliorée si des méthodes utilisant des gaz ionisés dans les conduits de câbles étaient développées en vue d'une utilisation pratique. Ces essais ne permettent pas de prédire le comportement à long terme et il existe de sérieuses inquiétudes au sujet des essais à haute tension qui sont susceptibles d'introduire des dommages dans les câbles, dommages qui n'existeraient pas autrement.

Limitations

De tels essais identifient uniquement les câbles sévèrement endommagés et n'ont pas de possibilité de prédiction. Les essais réalisés à haute tension peuvent introduire des dommages dans des câbles qui ne seraient pas endommagés autrement.

3.5 Essais de suivi

Ce sont des essais réalisés sur des câbles sacrifiés, habituellement installés en des points chauds dans les installations pour obtenir un vieillissement accéléré de cette majorité du câblage. L'allongement à la rupture et les essais localisés décrits en 3.1 et 3.2 sont les paramètres généralement contrôlés. Si le programme est bien géré avec un bon contrôle de l'environnement, à la fois sur les sites où sont exposés les échantillons et dans le reste des installations, ces essais peuvent constituer un bon système d'alarme prédictif concernant la dégradation des câbles. Cependant, pour utiliser pleinement les données obtenues par un tel programme, d'importantes bases de données portant à la fois sur le vieillissement thermique et le vieillissement par rayonnement sont nécessaires.

Des exemples portent sur les programmes en cours dans l'installation nucléaire de Perry aux Etats-Unis où les essais sur les matériaux EPR, XLPE et les câbles en polyoléfine réticulés sont actuellement en cours [24], et sur le programme à long terme en cours de réalisation par Siemens sur les câbles isolés XLPE et EPR [25]. Le programme intensif qui a été réalisé sur une grande variété de matériaux en polymère dans les accélérateurs du CERN [26] concerne également la résistance à la dégradation des câbles dans les centrales électriques nucléaires.

Limitations

Cette méthode est uniquement possible si des câbles sacrifiés peuvent être installés tôt pendant le fonctionnement des centrales nucléaires dans les zones connues pour constituer des environnements relativement sévères par rapport à la plupart des installations de câbles. La méthodologie d'essai doit correspondre à la fois aux essais de base de données de référence et au programme de suivi sur des périodes d'une dizaine d'années.

Le contrôle détaillé de l'environnement à la fois aux emplacements d'essai et dans le reste de l'installation est nécessaire pour permettre d'exploiter utilement les données recueillies.

4 Résumé

Il existe une grande variété de techniques utilisées ou en cours de développement pour contrôler les conditions de service des câbles. Ces méthodes sont résumées dans le tableau 1, avec une indication de leurs principales limitations, leur état actuel et leur coût relatif. Parmi ces techniques d'essai, il existe plus d'expérience et de données pour les méthodes suivantes:

- poinçonneur;
- temps d'induction de l'oxydation (OIT);
- perte diélectrique;
- réflectométrie du domaine temporel (TDR).

3.4.3 Pass/fail tests

Tests such as dielectric strength and insulation resistance are currently used in many utilities as a means of assessing cable condition, but their usefulness is debatable in terms of condition, monitoring. The technique could be improved if methods using ionized gases in cable conduits are developed to the practical stage. The tests have no predictive capability and there is some concern that high potential tests can introduce damage into an otherwise undamaged cable.

Limitations

Such tests only identify severely damaged cable and have no predictive capability. Tests carried out at high voltage can introduce damage into an otherwise undamaged cable.

3.5 Paced tests

These are tests carried out on sacrificial cables usually installed at known hot spots within the plant to give enhanced ageing relative to the majority of the cabling. Elongation at break and the local tests described in 3.1 and 3.2 are the parameters generally monitored. If the programme is well managed with good environmental monitoring, both at the sample sites and in the rest of the plant, these can provide a good early warning system for cable degradation. However, to make full use of the data obtained in such a programme, extensive baseline data on both thermal and radiation ageing is needed.

Examples include the programmes being carried out at Perry nuclear power plant in the USA where tests on EPR, XLPE and crosslinked polyolefin cables are currently in progress [24], and the long term programme being carried out by Siemens on XLPE and EPR insulated cables [25]. The extensive programme which has been carried out on a wide range of polymeric materials in the accelerators at CERN [26] also has relevance to the degradation behaviour of cables in nuclear power plants.

Limitations

This method is only feasible if sacrificial cables can be installed early in the plant's life in areas which are known to be relatively harsh environments with respect to most cable locations. The test methodology must be consistent for both the baseline tests and the paced programme over periods of tens of years. Detailed environmental monitoring at both the test positions and the rest of the plant are required to make use of the data collected.

4 Summary

There are a wide range of techniques in use or being developed for condition monitoring in cables. These methods are summarized in table 1, with an indication of their main limitations, current status and relative cost. Of these test techniques, there is most experience and data for the following methods:

- indenter;
- oxidation induction time (OIT);
- dielectric loss;
- time domain reflectometry (TDR).

Ces techniques sont déjà en cours d'utilisation *in situ* jusqu'à un certain degré en ce qui concerne le contrôle des conditions ou la résolution de difficultés et sont vraisemblablement destinées à être les premières techniques disponibles comme méthodologies d'essai normalisées. Cependant, même ces techniques nécessitent encore des évaluations plus importantes *in situ* avant que leur potentiel soit atteint. Les autres techniques qui ont été discutées sont à un stade moins avancé de développement et nécessiteront une quantité importante d'autres travaux avant d'atteindre cet état. Le tableau 2 résume l'état actuel des quatre principales techniques en cours d'utilisation dans les installations, identifiant là où chaque méthode est la plus applicable.

Aucune technique ne sera adaptée à tous les types de matériaux constituant les câbles ou toutes les configurations de câbles, mais il existe vraisemblablement assez de techniques afin de couvrir la plupart des exigences pour contrôler les conditions dans un futur proche.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 61244-3:1998

All of the above techniques are already being used in-plant to some extent for condition monitoring or troubleshooting and are likely to be the first of the techniques to be available as standardized test methodologies. However, even these techniques still require more extensive in-plant evaluation before their full potential can be realized. The other techniques which have been discussed are at an earlier stage of development and will require a considerable amount of further work before they reach that stage. Table 2 summarizes the current status of the the four main techniques which are being used in plants, identifying where each method is most applicable.

No one technique will be suitable for all types of cable materials or cable configurations, but there are sufficient techniques likely to become available to cover most of the requirements for condition monitoring in the near future.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 61244-3:1998

Withdrawn

Tableau 1 – Résumé des techniques actuellement disponibles pour la surveillances de conditions relatives aux câbles

Technique	Paramètre mesuré	Matériaux essayés	Limitations	Etat actuel**	Coût relatif	Références
Essais de suivi	Propriétés en traction et toute autre technique	Tout matériau pour câble	Nécessite des câbles sacrifiés à installer tôt durant la vie de l'installation avec un contrôle environnemental	(1)	Elevé	24 à 26
Localisé – pas d'échantillonnage			*			
– Poinçonneur	Module d'élasticité	Elastomères, CSPE, PVC vieilli thermiquement, polyoléfinés	Ne s'applique pas au PVC vieilli par rayonnement	(1)	Modéré	1 à 7
– vitesse du son	Vitesse du son	PVC vieilli thermiquement	Dépend de la construction du câble	(3)	Modéré	6
– réflectance NIR	Réflectance IR	PVC vieilli thermiquement	Contamination de surface	(3)	Elevé	6
testeur de couple	Module	PVC	Dépend de la construction du câble	(2)	Modéré	8
Localisé – avec échantillonnage						
– spectroscopie IR	Absorption IR	XLPE, PE, SBR, EPR	Moins sensible aux derniers stades de dégradation	(2)	Elevé	9
– OIT	Début d'oxydation	XLPE, EPR, PEEK, EVA	Contamination de surface	(1)	Modéré	9 à 13
– teneur en plastifiant	Teneur en plastifiant	PVC	Limité aux composants PVC thermiquement vieillis, échantillon nécessaire plus grand	(1)	Faible	14
– masse volumique	Masse volumique	XLPE, PE, EPR, CSPE, PVC	*	(1)	Faible	15
Globalisé – avec résolution spatiale						
– réflectométrie du domaine temporel (TDR)	Différence de temps des impulsions réfléchies	La plupart des câbles	Non sensible à la dégradation due au vieillissement, résolution limitée pour les câbles de grande longueur	(1)	Elevé	16 à 18
– décharge partielle	Différence de temps des impulsions réfléchies	Câbles de puissance haute tension blindés	Sensible aux bruits de fond électriques, ne s'applique pas aux câbles de longueur supérieure à 20 m	(3)	Elevé	19,20
Globalisé – sans résolution spatiale						
– perte diélectrique	Tan δ	EVA, XLPE, PVC, PEEK, EPR, PPO	Non adapté aux câbles conducteurs uniques non blindés, la charge doit être débranchée	(1)	Modéré	23
– TDS	Tan δ	EPR, CSPE, XPPE	La charge doit être déconnectée, nécessite des électrodes externes	(2)	Elevé	16, 21, 22
* Tous les essais localisés limités aux zones accessibles à l'homme et limités aux matériaux de la gaine à l'exception des extrémités. Pour les essais localisés avec échantillonnage, toutes les techniques limitées aux propriétés de surface.						
** (1) Technique actuellement utilisée, grande expérience et beaucoup de données. (2) Technique au stade laboratoire, encore à l'étude. (3) Technique en phase de recherche, non encore en développement.						

[illegible]

Tableau 2 – Etat actuel des techniques de surveillance les plus développées

Application	Techniques de surveillance			
	Poinçonneur	Temps OI et température	Perte diélectrique	Réflexométrie du domaine temporel
Adaptée à la dégradation par vieillissement	Oui	Oui	Oui	Non
Adaptée à la résolution de problèmes	Non	Non	Non	Oui
S'applique aux nouvelles installations	Oui	Oui	Oui	Oui
S'applique aux anciennes installations	Oui	Oui	Oui	Oui
Expérience opérationnelle	Modérée	Modérée	Limitée	Importante

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 61244-3:1998

Table 2 – Current status of the most developed monitoring techniques

Application	Monitoring and techniques			
	Indenter	OI time and temperature	Dielectric loss	Time domain reflectometry
Suitable for ageing degradation	Yes	Yes	Yes	No
Suitable for troubleshooting	No	No	No	Yes
Applicable to new plants	Yes	Yes	Yes	Yes
Applicable to old plants	Yes	Yes	Yes	Yes
Field experience	Moderate	Moderate	Limited	Extensive

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 61244-3:1998

Without watermark

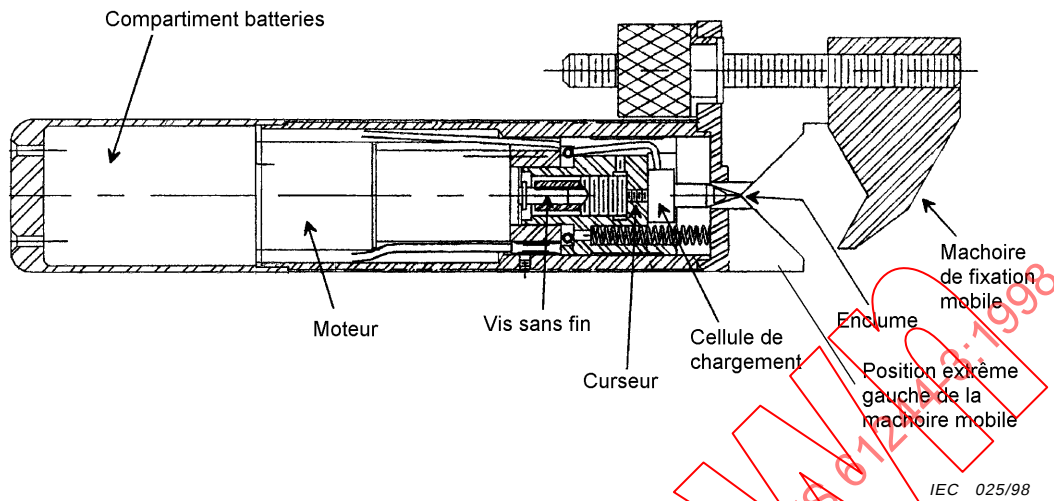
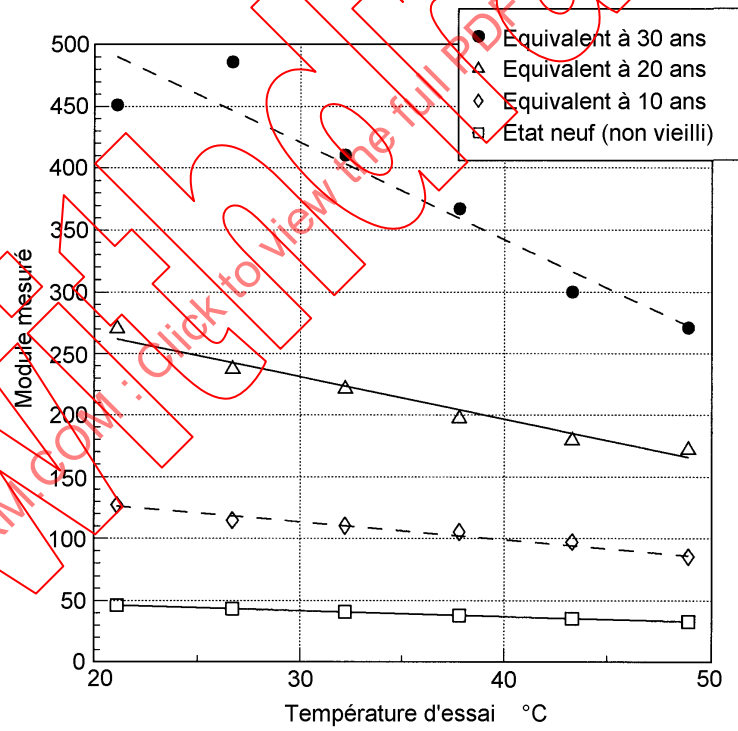


Figure 1 – Section transversale du poinçonneur [1]



IEC 026/98

Figure 2 – Effet de la température de la gaine sur le module de poinçonnement des EPR/CSPE après vieillissement thermique [4]

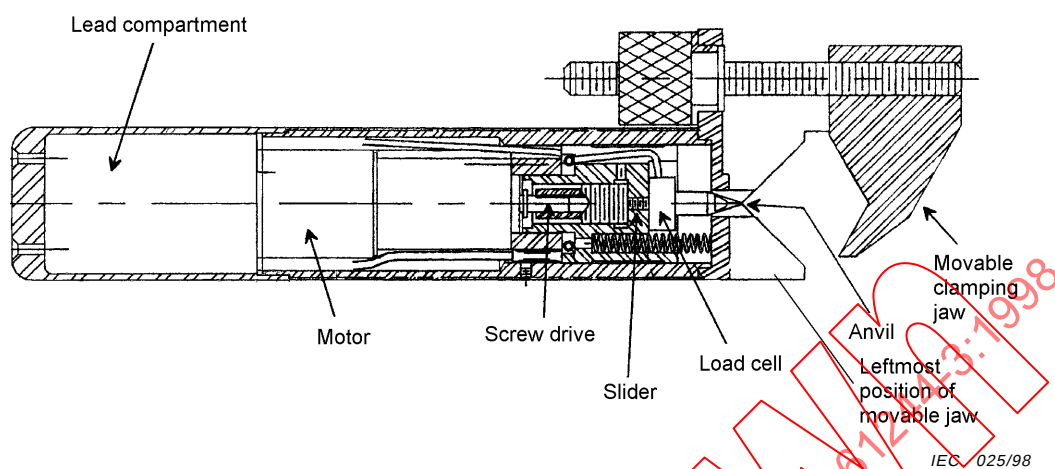


Figure 1 – Cross-section of the indenter [1]

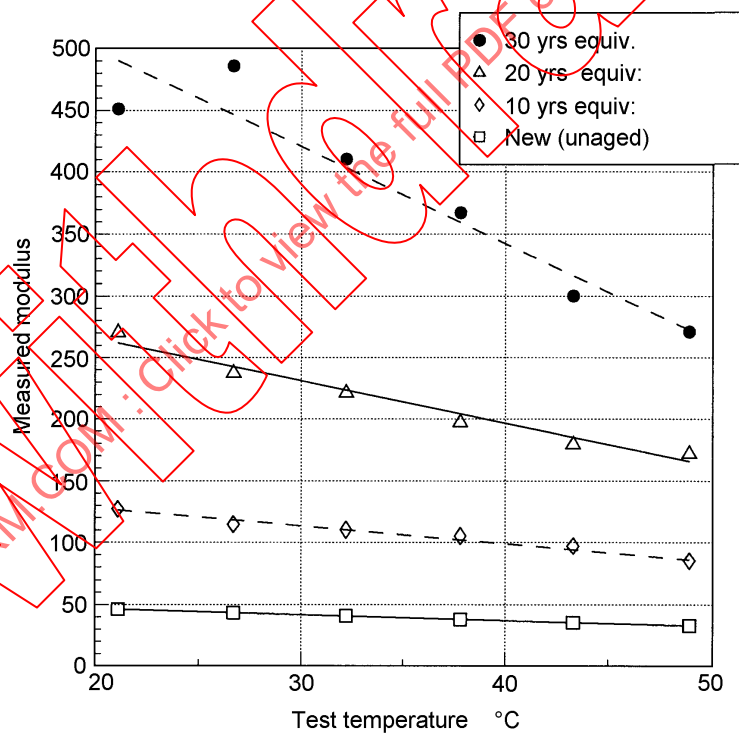


Figure 2 – Effect of jacket temperature on indenter modulus of EPR/CSPE after thermal ageing [4]

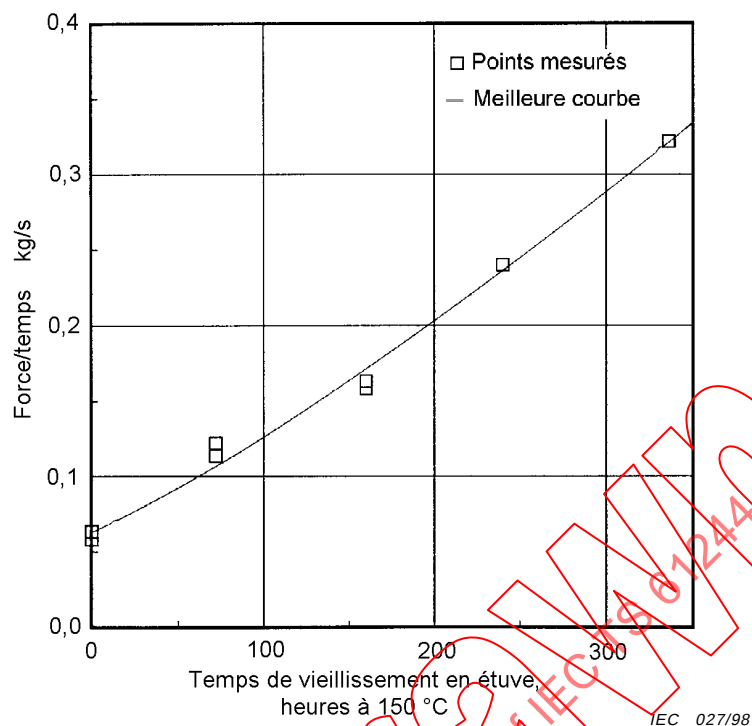


Figure 3a – Valeurs du module de poinçonnement sur les câbles vieillis thermiquement [2] – force maximale 9 N

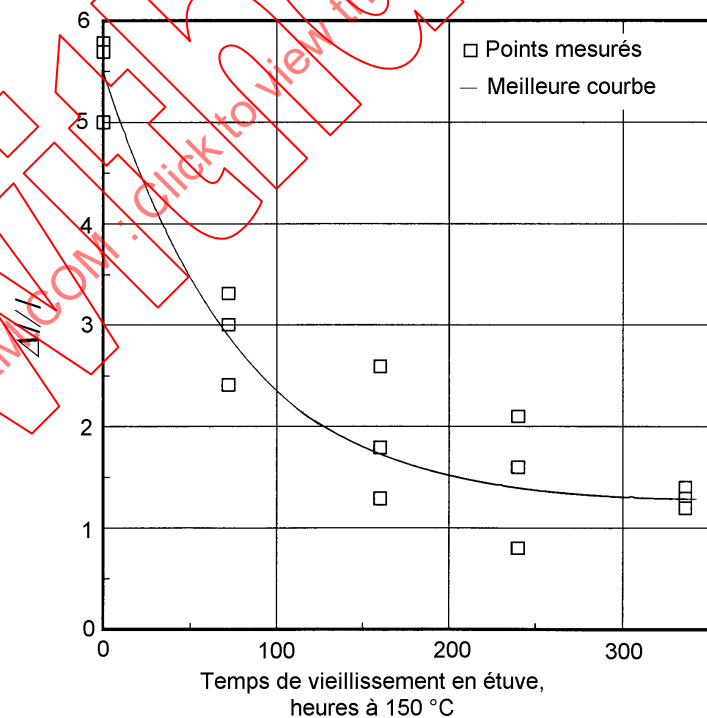


Figure 3b – Allongement à la rupture ($\Delta l/l$) en traction pour les câbles ayant subi le même vieillissement thermique [2]

Figure 3 – Résultats avec poinçonneur sur un câble EPR/CSPE

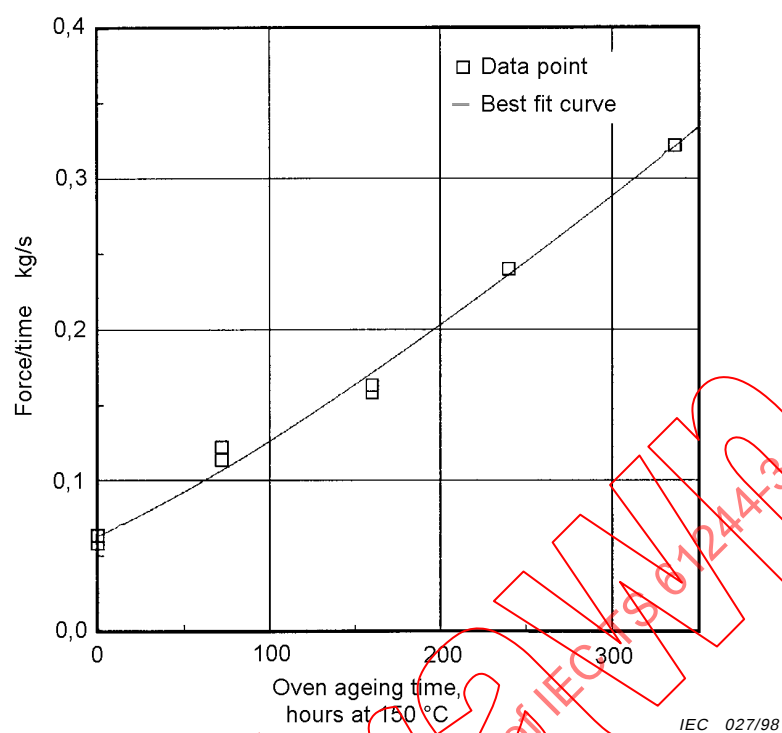


Figure 3a – Indenter modulus values on thermally aged cables [2] – Maximum force 9 N

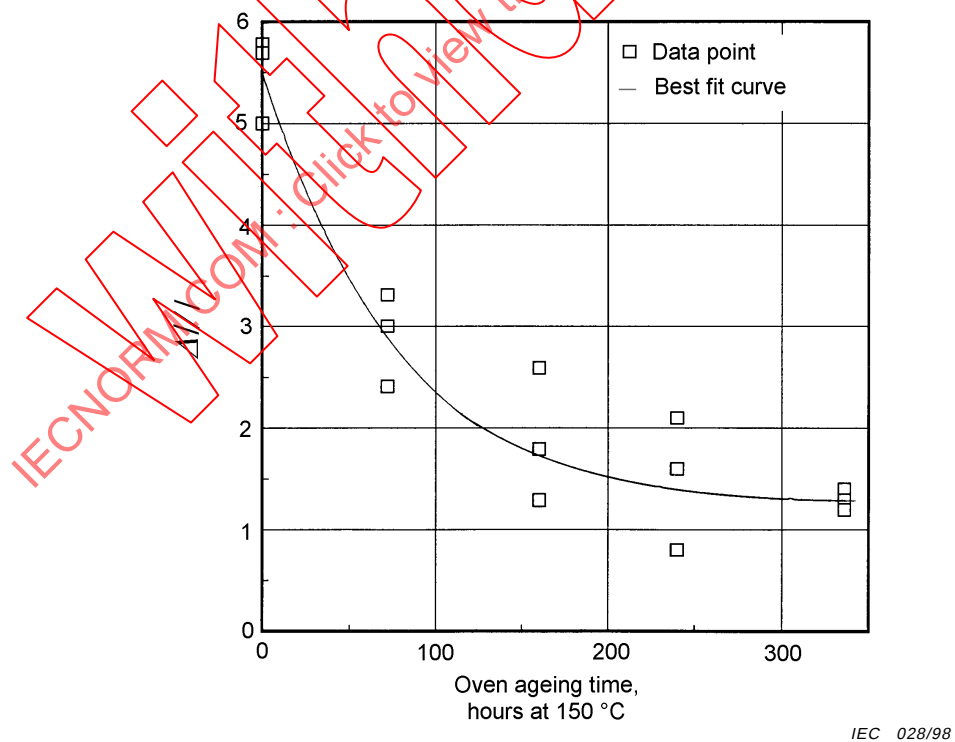


Figure 3b – Tensile elongation at break (Δ/l) values for the same thermally aged cables [2]

Figure 3 – Results with indenter on EPR/CSPE cable

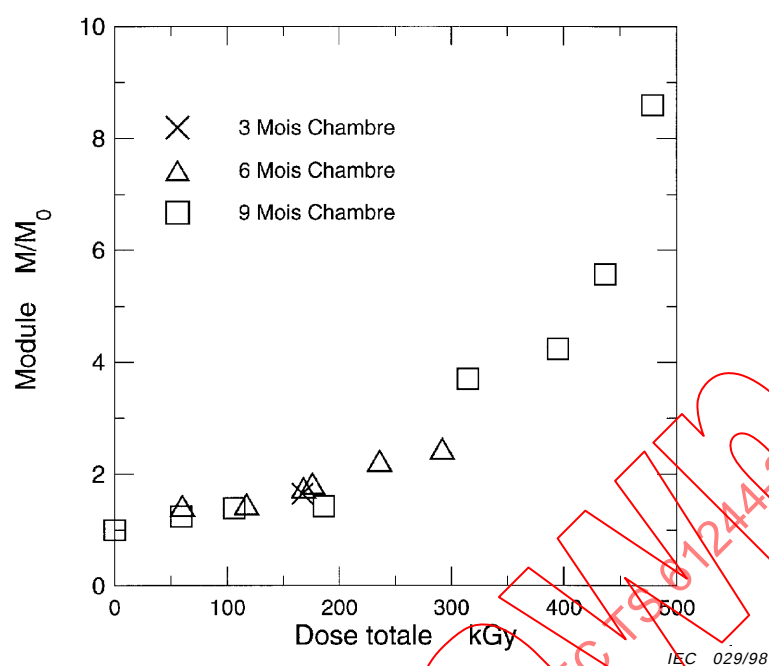


Figure 4a – Valeurs du module de poinçonnement pour les câbles vieillis sous rayonnement et thermiquement [5]

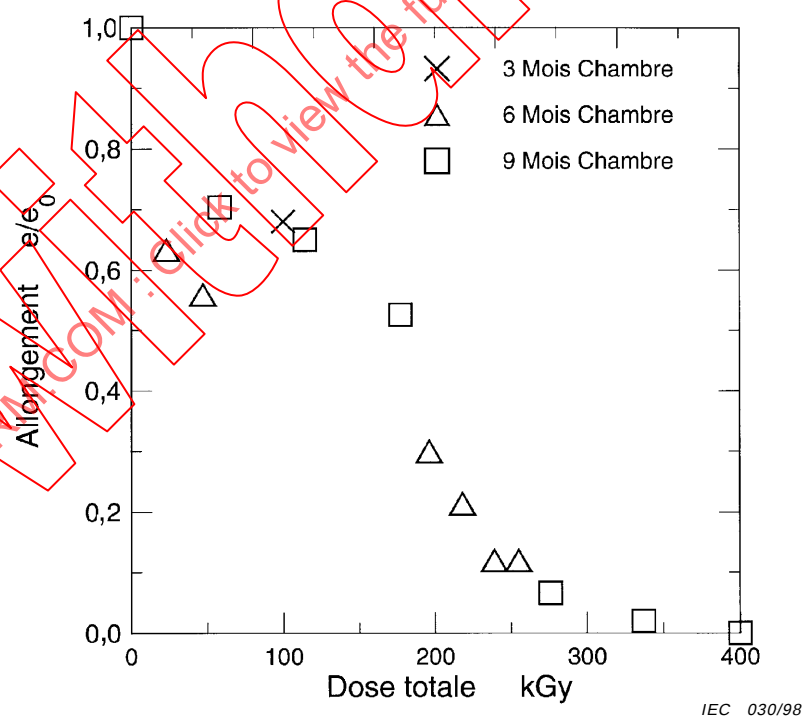


Figure 4b – Valeurs de l'allongement à la rupture en traction pour les câbles vieillis sous même rayonnement et thermiquement [5]

Figure 4 – Résultats avec poinçonneur sur un câble en kerite FR

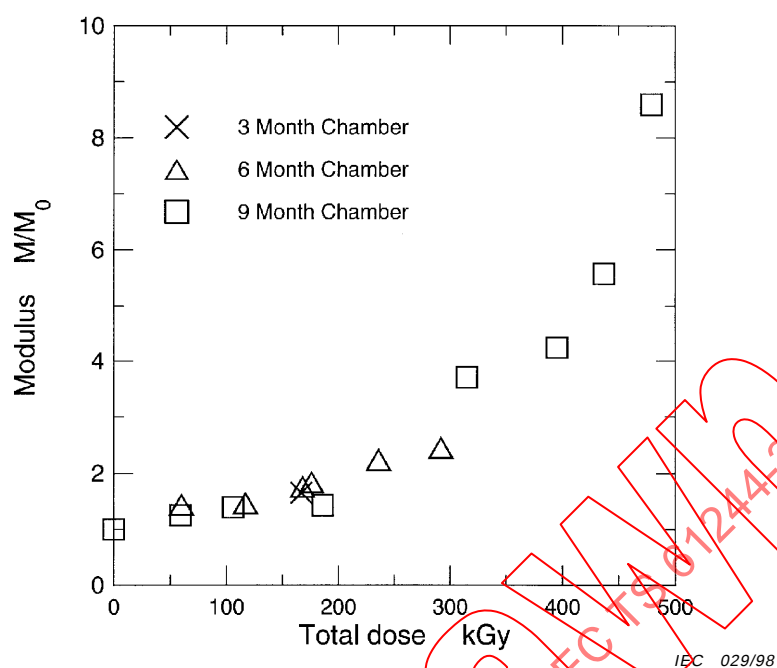


Figure 4a – Indenter modulus values for radiation and thermally-aged cables [5]

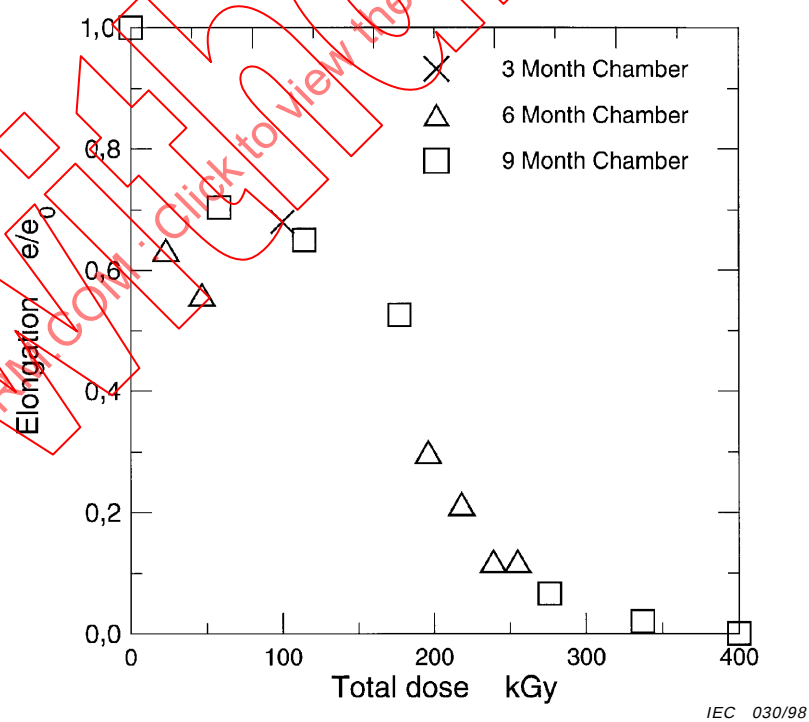


Figure 4b – Tensile elongation at break values for the same radiation and thermally aged cables [5]

Figure 4 – Results with indenter on kerite KR cable

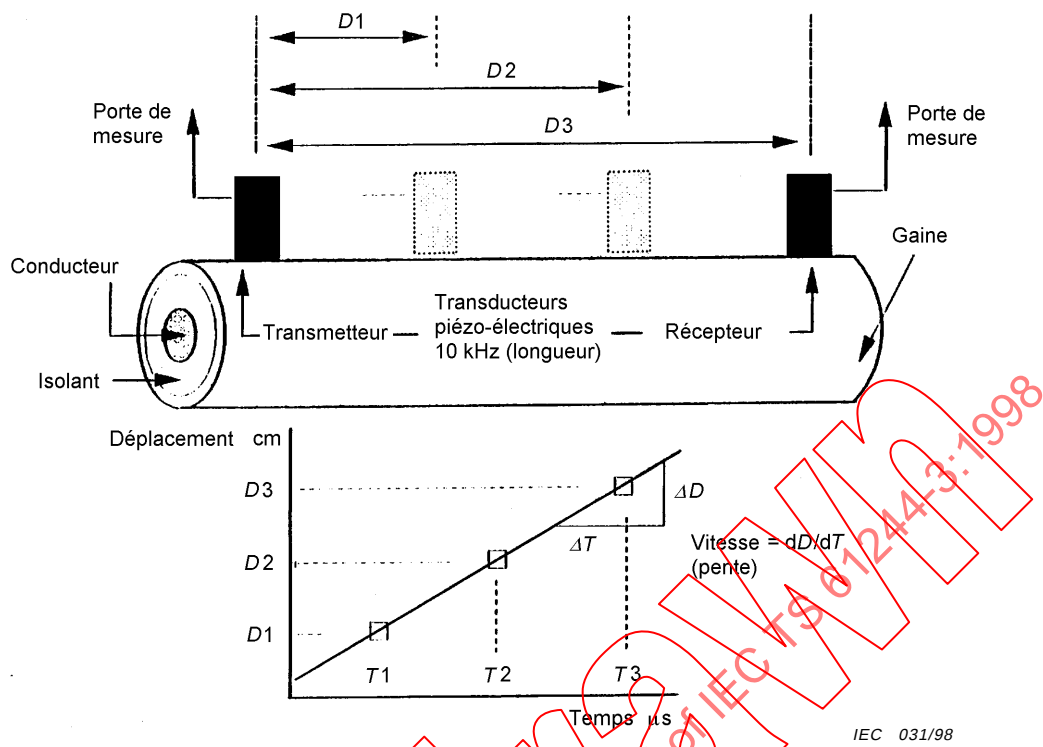
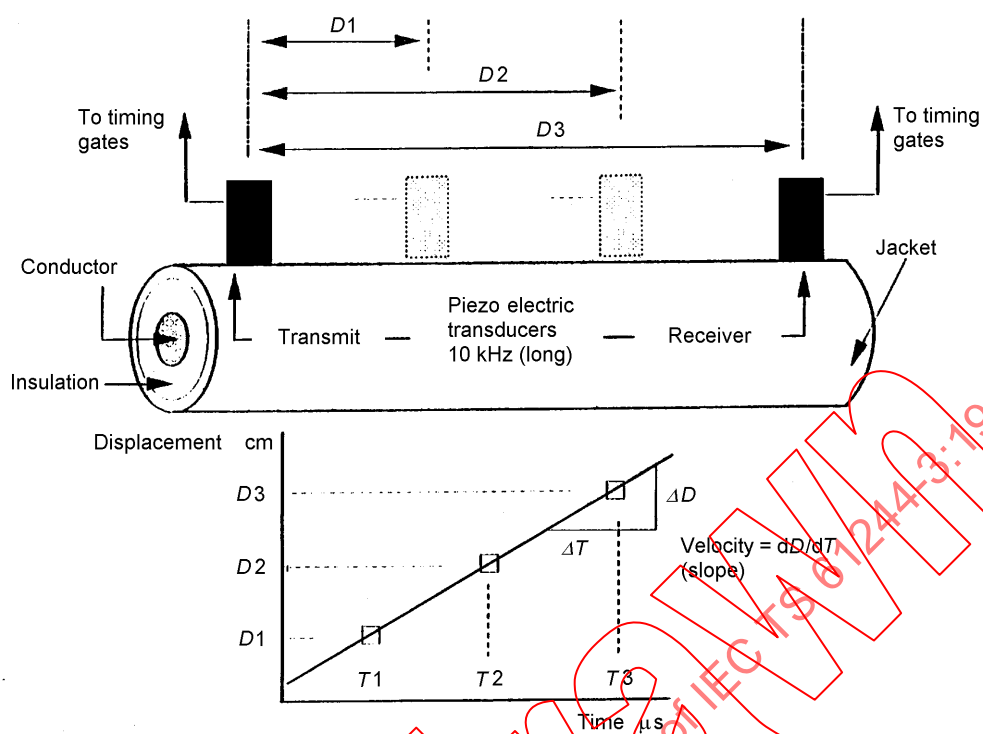


Figure 5 – Schéma indiquant les principes de fonctionnement du mesureur de la vitesse du son [6]



IEC 031/98

Figure 5 – Schematic diagram showing the operating principles of the sonic velocity meter [6]

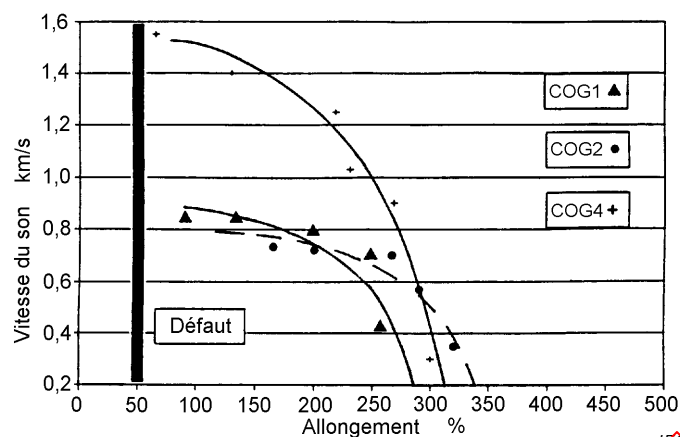
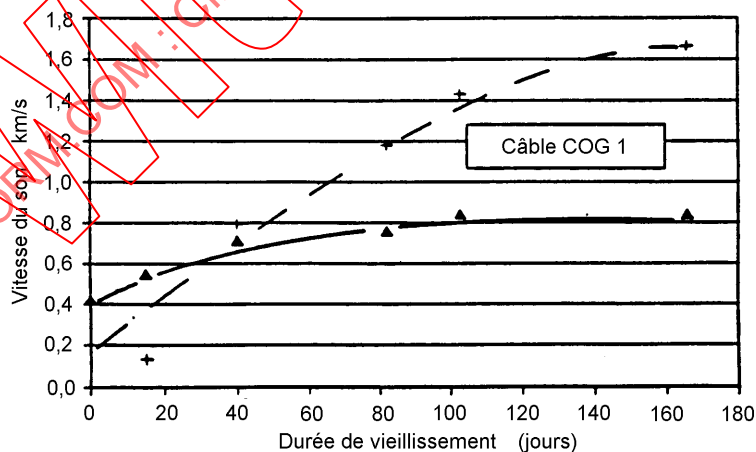
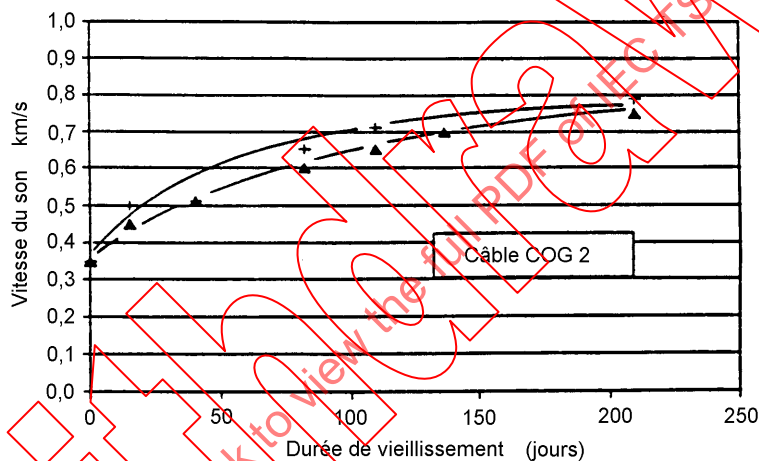


Figure 6a – Corrélation entre la vitesse du son et l'allongement à la rupture de trois matériaux de gaine en PVC [6]



▲ Bande de gaine + Câble complet * Allongement

IEC 033/98

Figure 6b – Variation de la vitesse du son en fonction de la durée de vieillissement à 120 °C pour les câbles en EPR/PVC (COG#2) et en PVC/PVC (COG#1) [6]

Figure 6 – Résultats avec essais à la vitesse du son

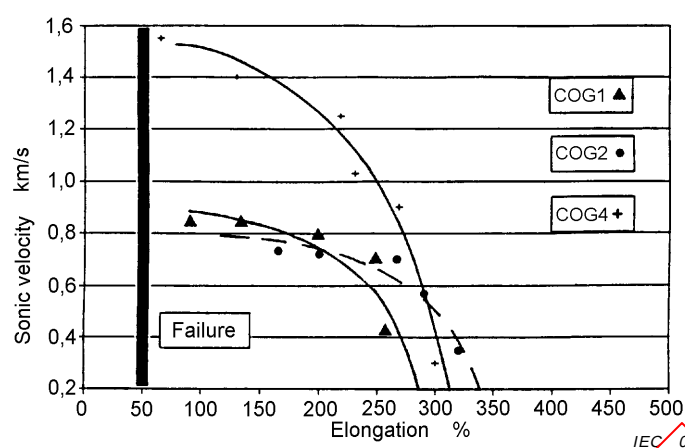
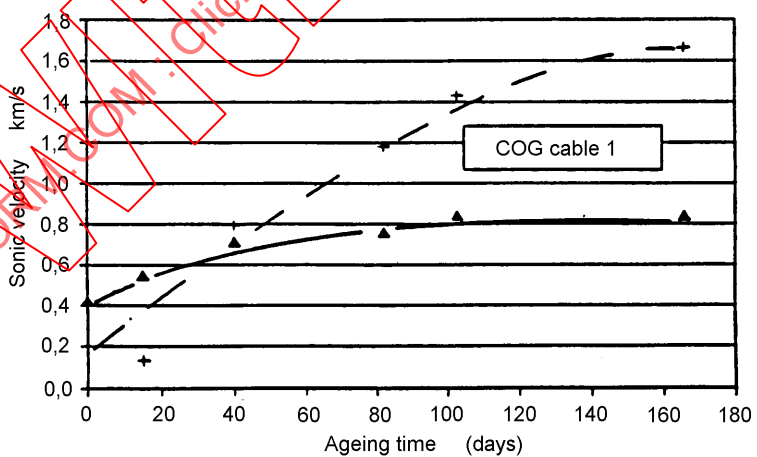
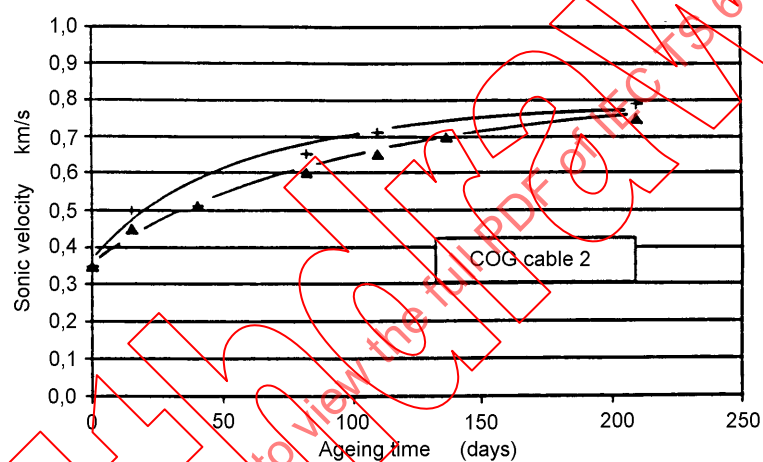


Figure 6a – Correlation of sonic velocity with elongation at break for three PVC jacket materials [6]



▲ Jacket strip + Full cable * Elongation

IEC 033/98

Figure 6b – Variation in sonic velocity with ageing time at 120 °C for EPR/PVC (COG#2) and PVC/PVC (COG#1) cables [6]

Figure 6 – Sonic velocity test results

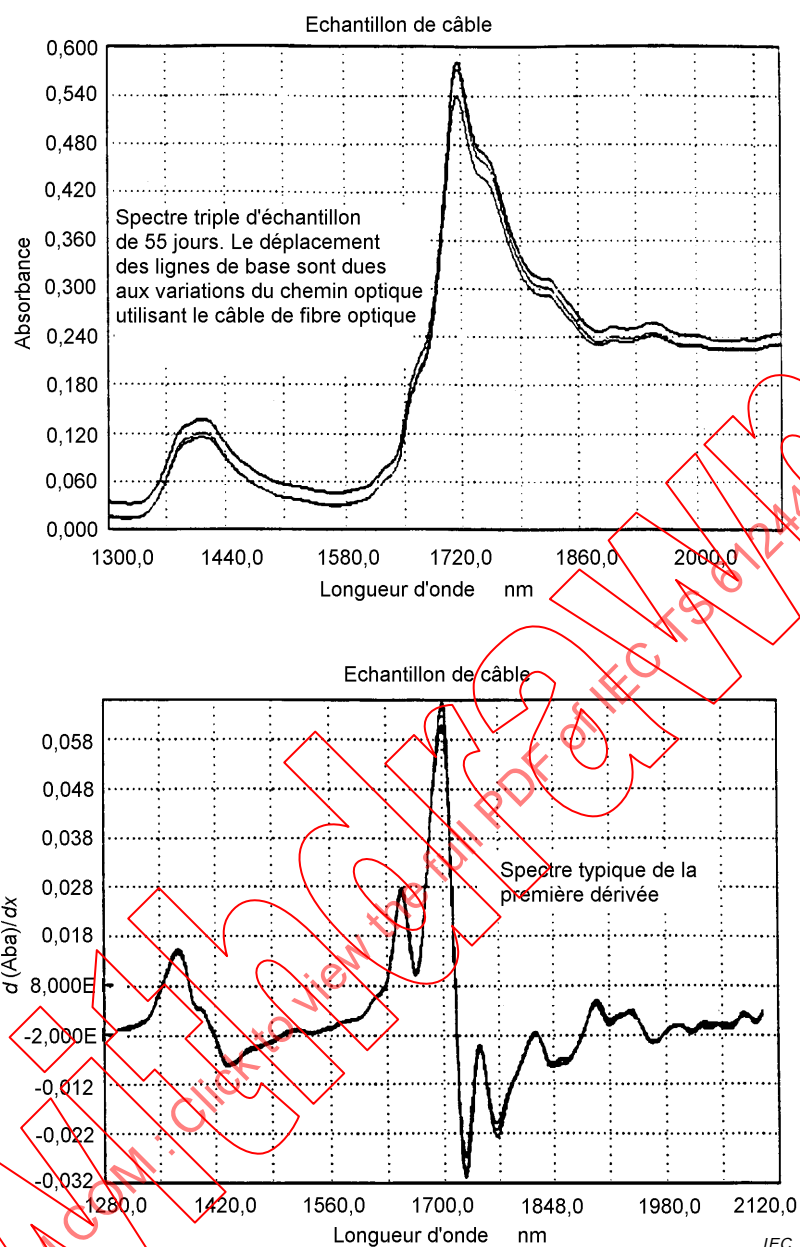


Figure 7 – Variation de l'absorption IR du PVC en fonction de la longueur d'onde et utilisation des dérivées premières pour éliminer les déplacements de lignes de base [6]

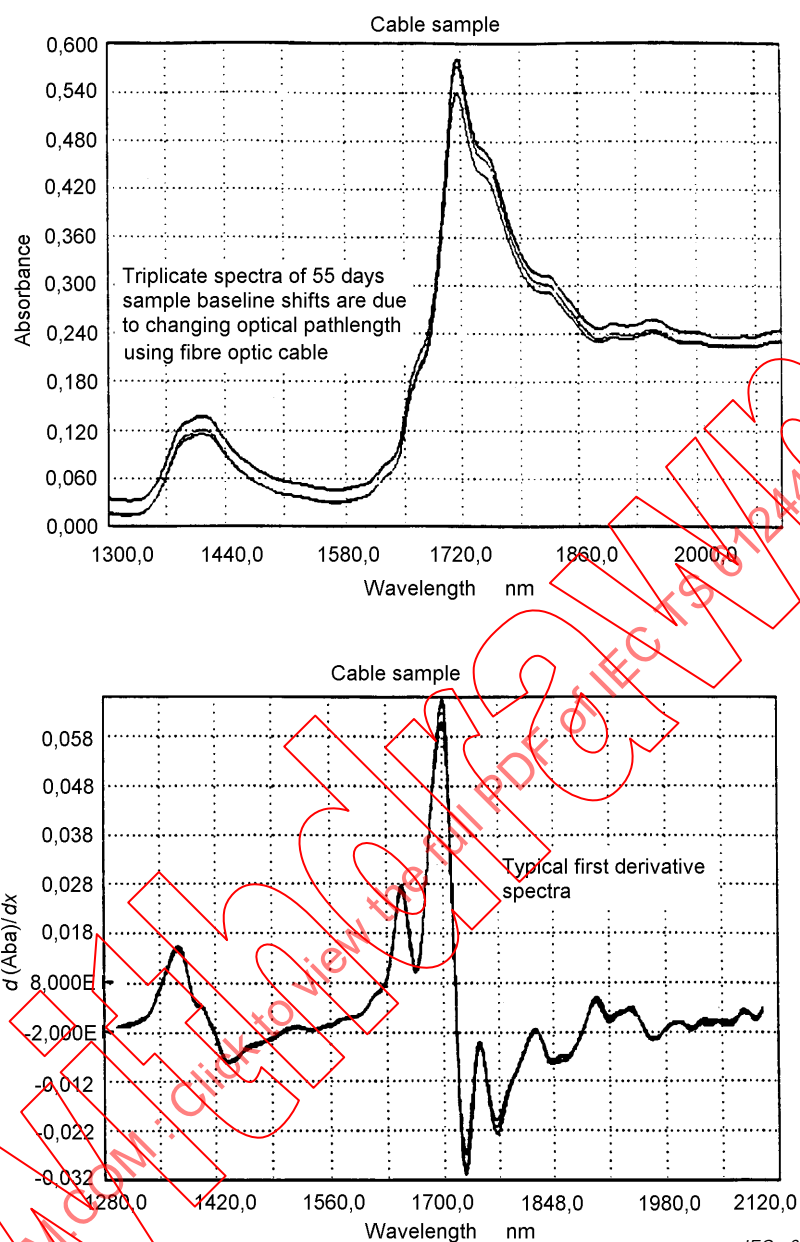


Figure 7 – Variation in IR absorbance with wavelength for PVC material and the use of first derivative to eliminate baseline shifts [6]

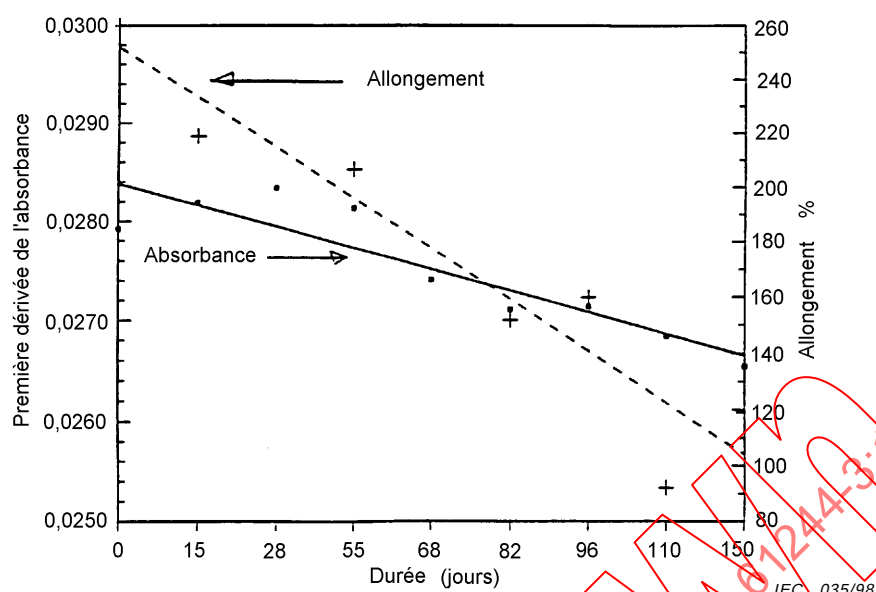


Figure 8 – Corrélation entre les dérivées premières de l'absorbance IR pour 1 640 nm à 1 650 nm et l'allongement à la rupture du PVC vieilli thermiquement à 110 °C [6]

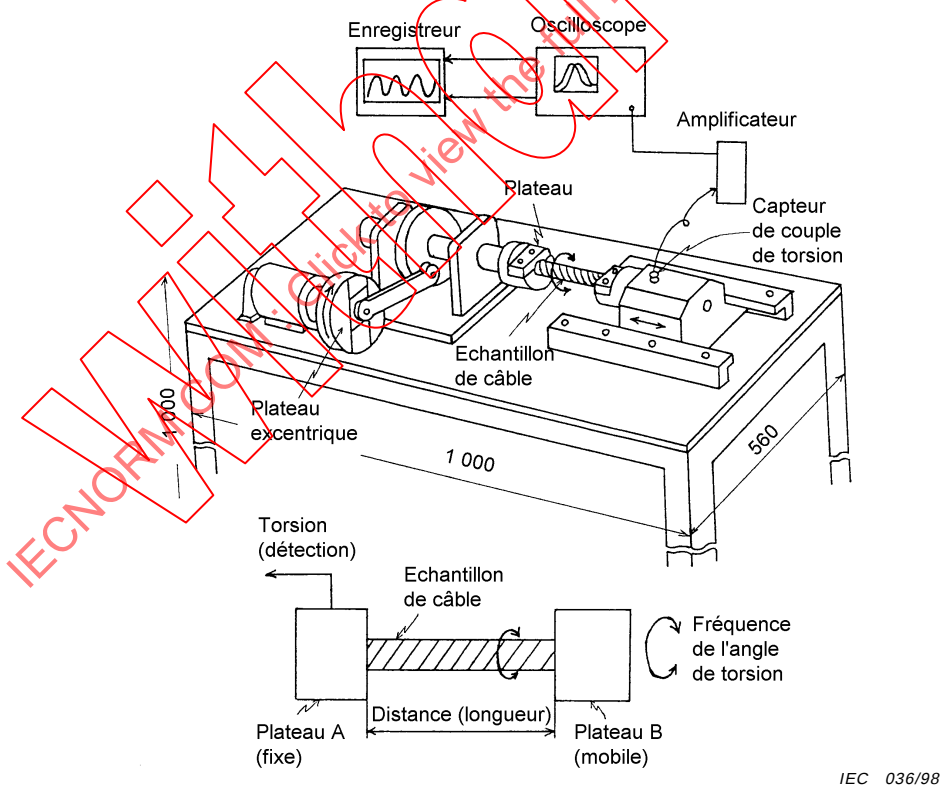


Figure 9 – Schéma du dispositif prototype pour les mesures de couple dans les câbles [8]

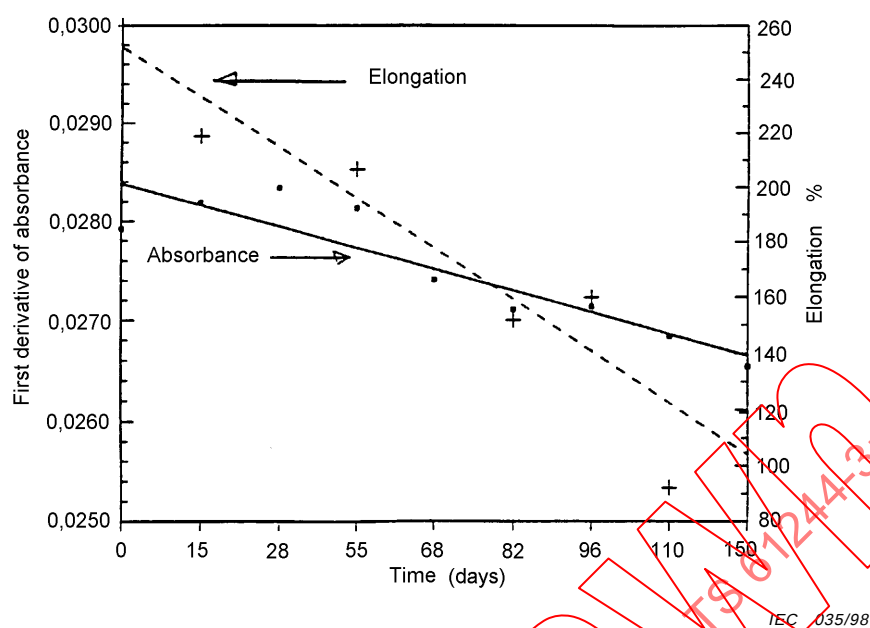


Figure 8 – Correlation of first derivative of IR absorbance at 1 640 nm to 1 650 nm and elongation at break for thermal ageing of PVC at 110 °C [6]

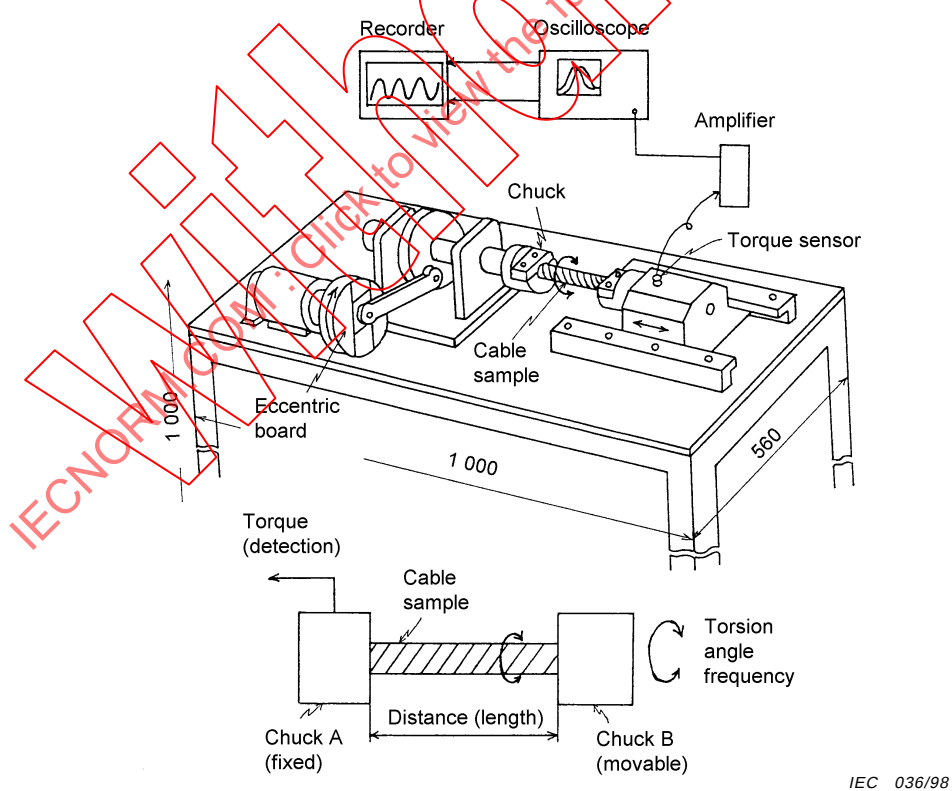


Figure 9 – Schematic diagram of prototype device for torque measurement of cables [8]

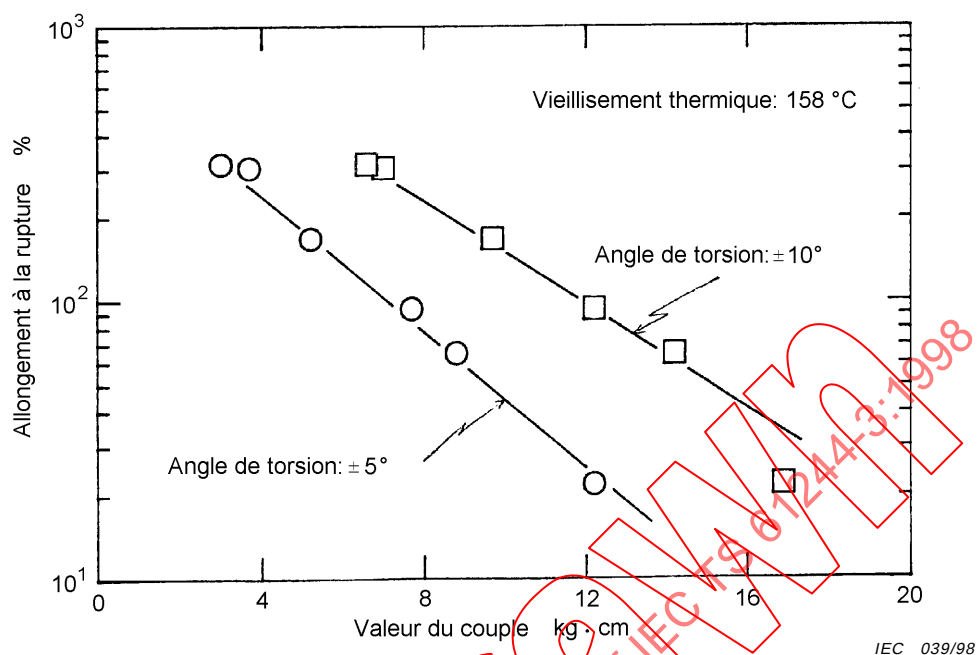


Figure 10 – Allongement à la rupture par rapport à la valeur du couple des câbles en PVC avec retardateur de flamme et vieillis thermiquement à 158 °C [8]

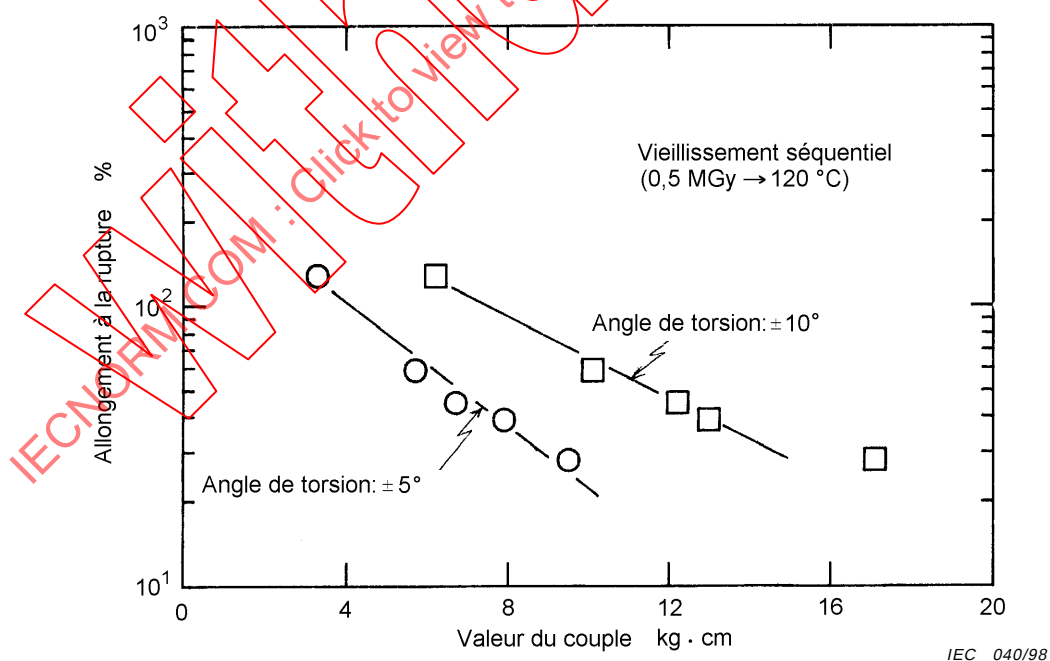


Figure 11 – Allongement à la rupture par rapport à la valeur du couple pour les câbles en PVC exposés à des séquences de vieillissement par rayonnement sous 0,5 MGy et thermiquement à 120 °C [8]

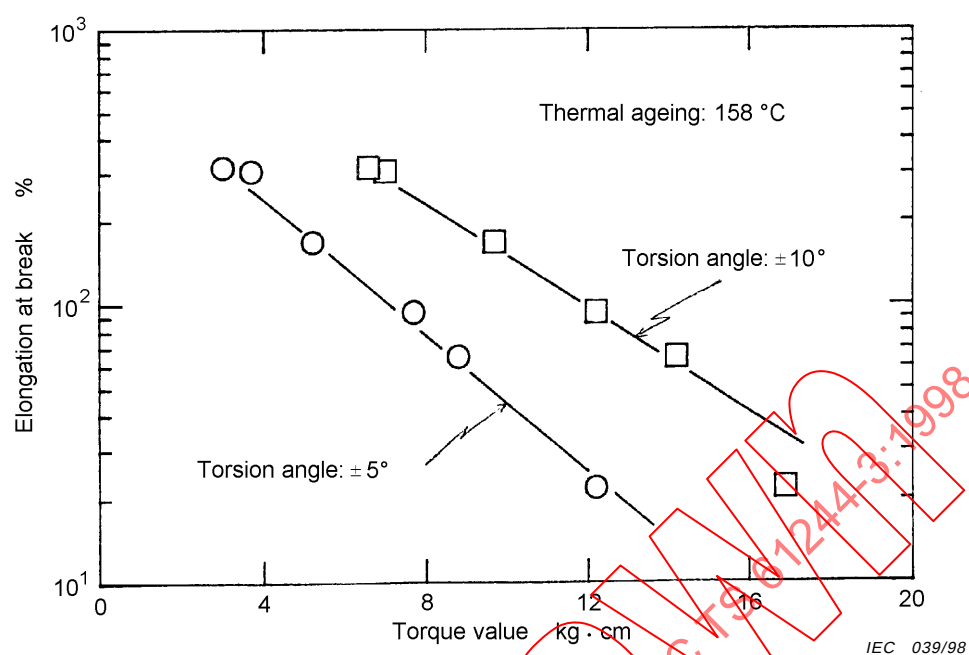


Figure 10 – Elongation at break versus torque value for flame-retardant PVC cables thermally aged at 158 °C [8]

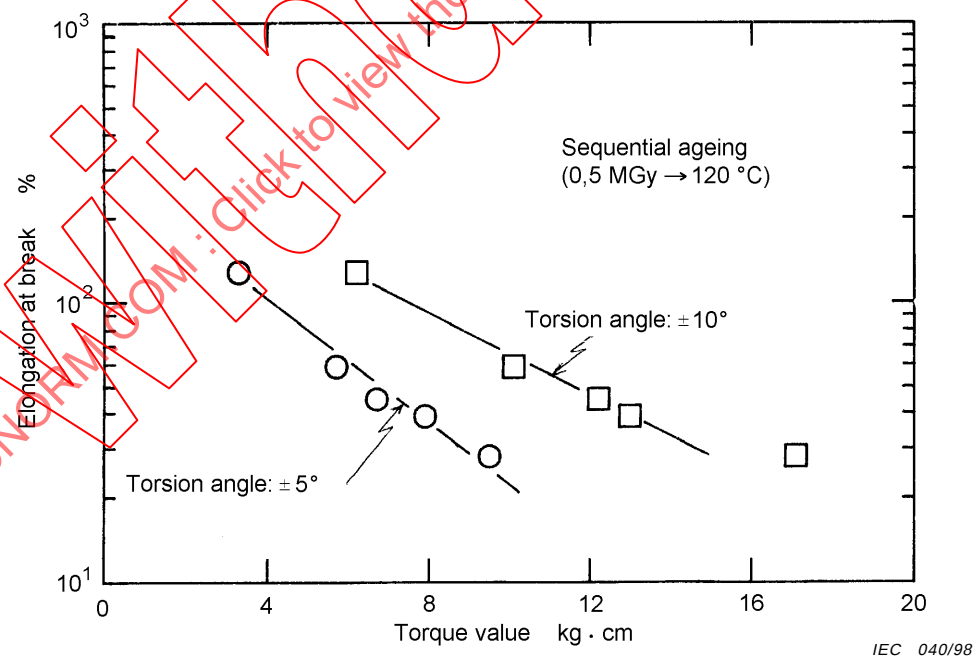


Figure 11 – Elongation at break versus torque value for PVC cables exposed to sequential radiation ageing to 0,5 MGy and thermal ageing at 120 °C [8]

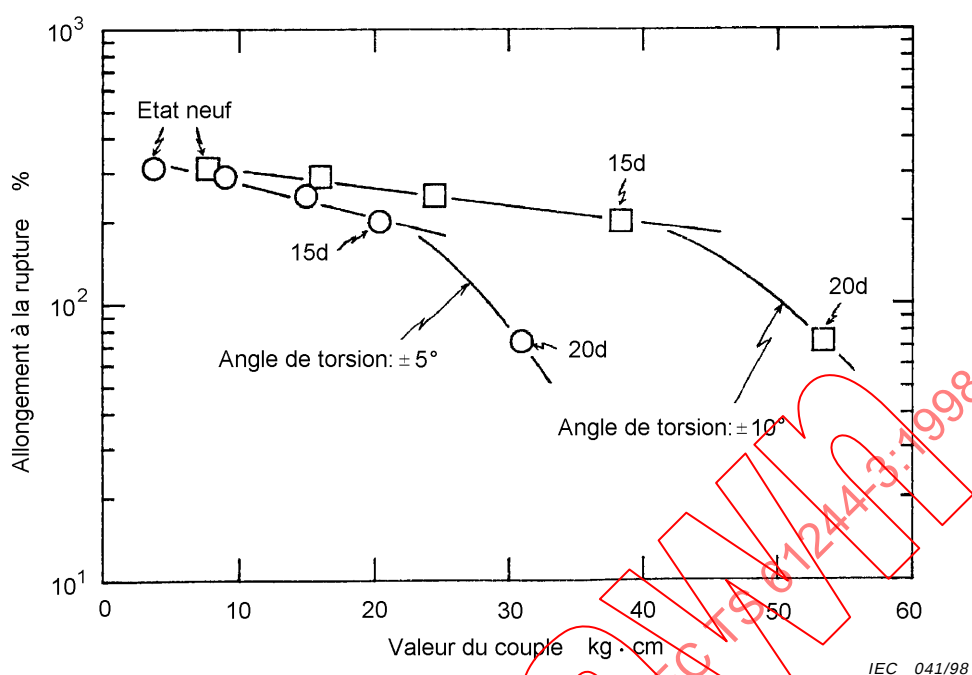


Figure 12 – Allongement à la rupture en fonction de la valeur du couple pour les câbles en PVC vieillis thermiquement à 120 °C [8]

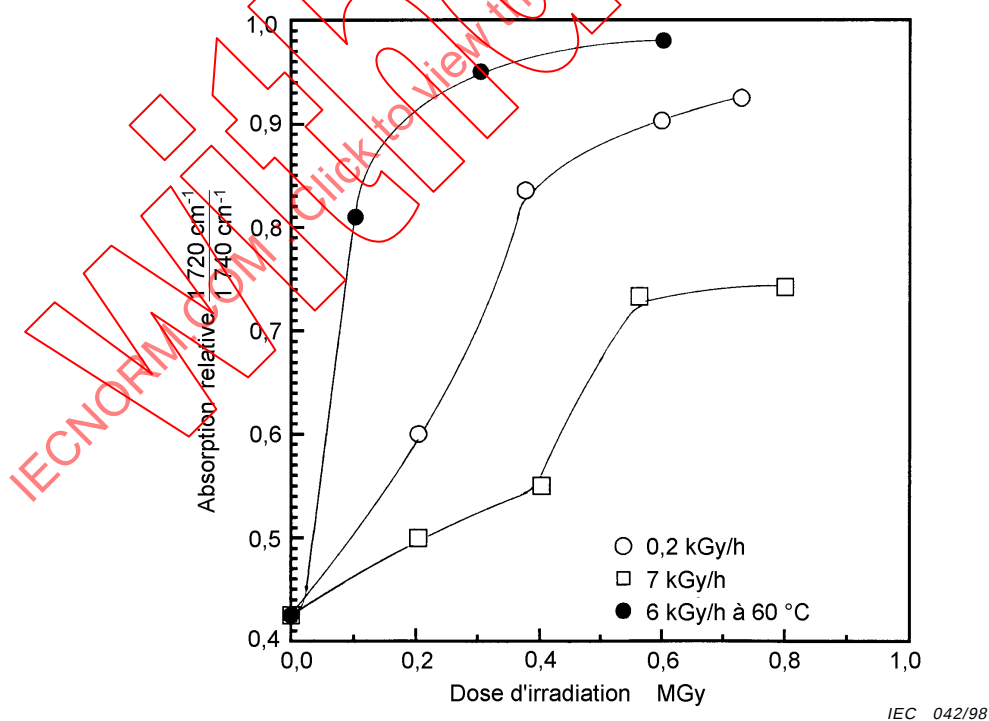


Figure 13 – Absorption de carbonyle en fonction de la dose de rayonnement pour les XLPE [11]

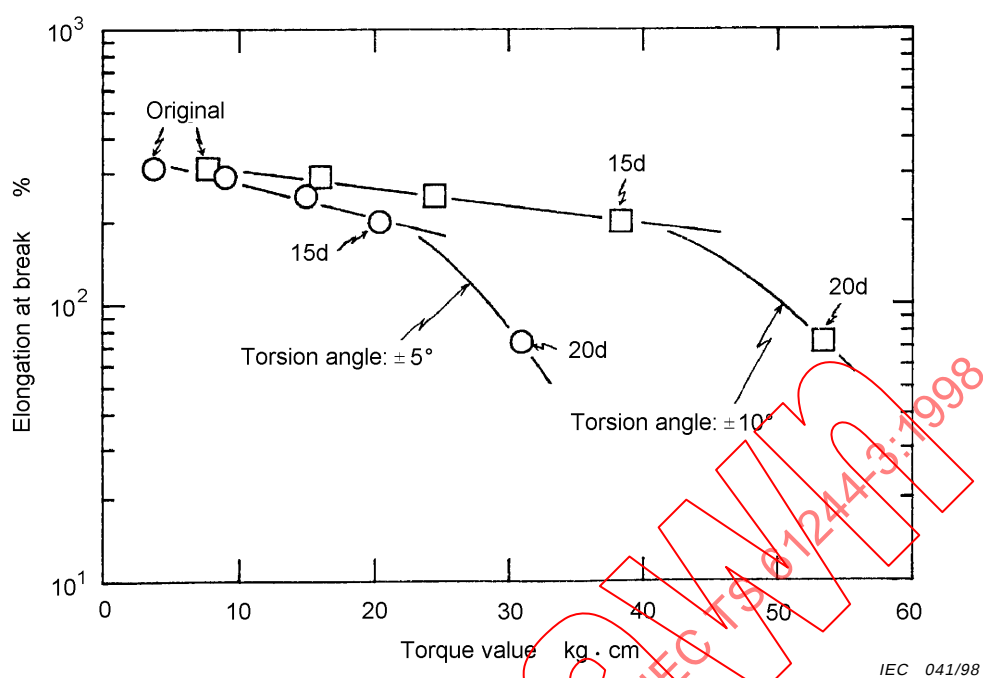


Figure 12 – Elongation at break versus torque value for PVC cables thermally aged at 120°C [8]

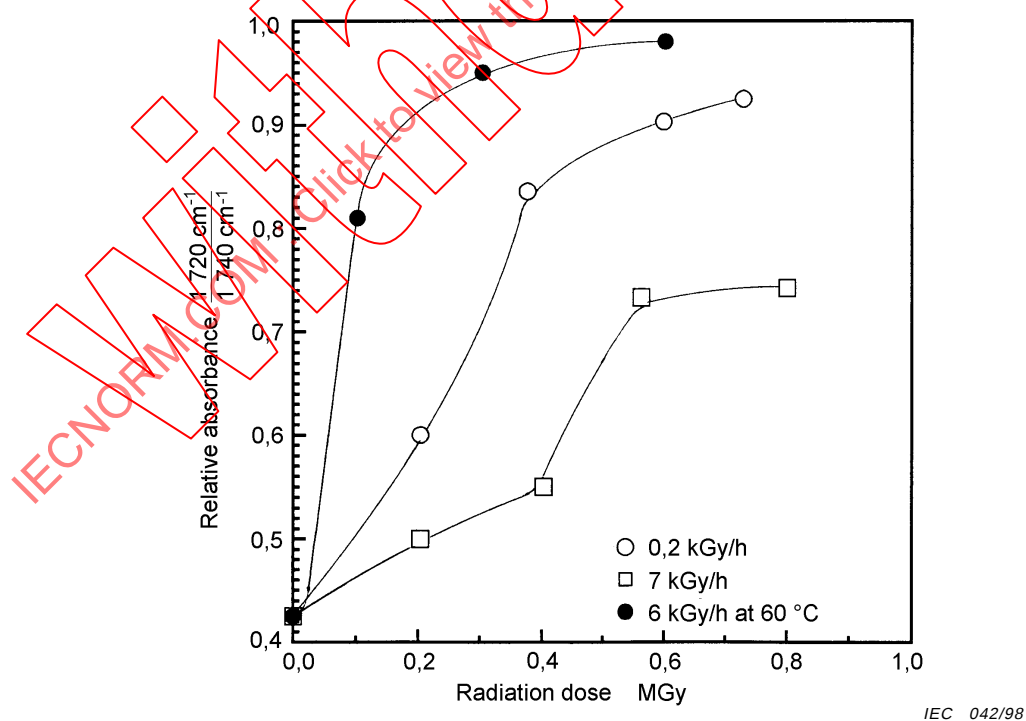


Figure 13 – Carbonyl absorbance as a function of the radiation dose for XLPE [11]

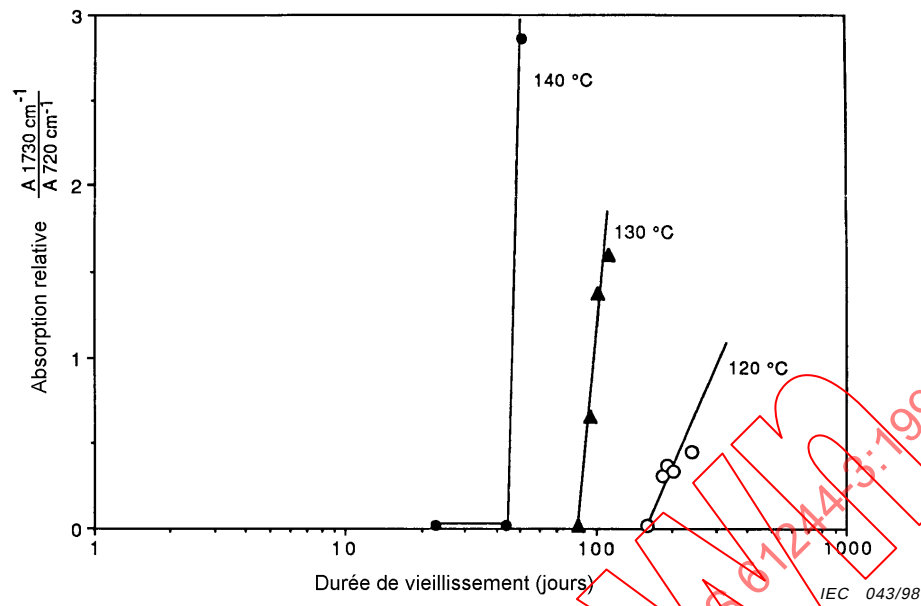


Figure 14 – Absorption de carbonyle en fonction du vieillissement thermique pour les XLPE [10]

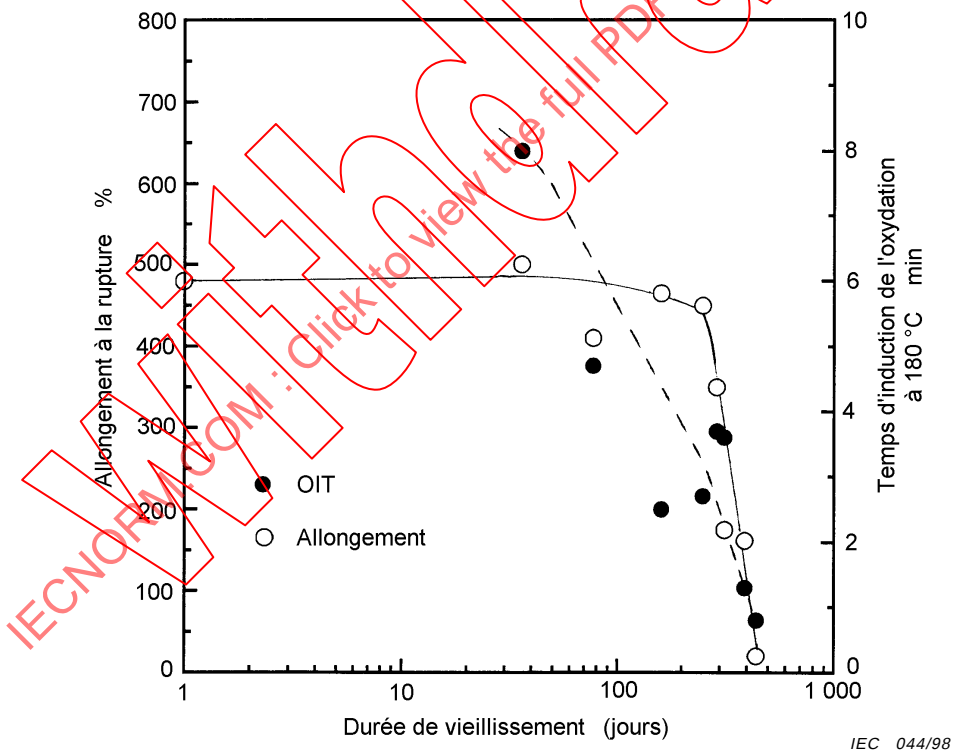


Figure 15 – Corrélation entre l'allongement à la rupture et le temps d'induction de l'oxydation pour l'isolation en matériaux XLPE non chargés vieillis à 130 °C [9]

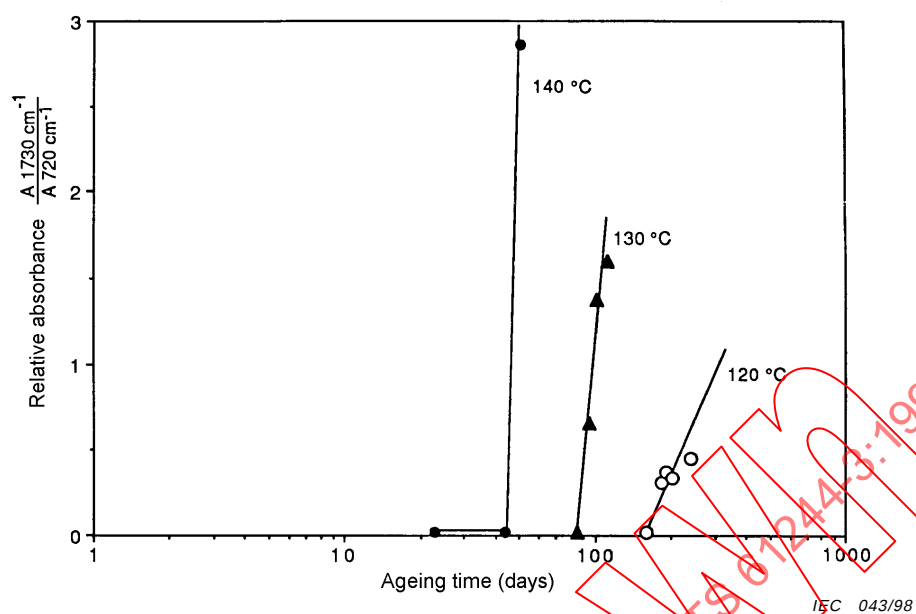


Figure 14 – Carbonyl absorbance as a function of thermal ageing for XLPE [10]

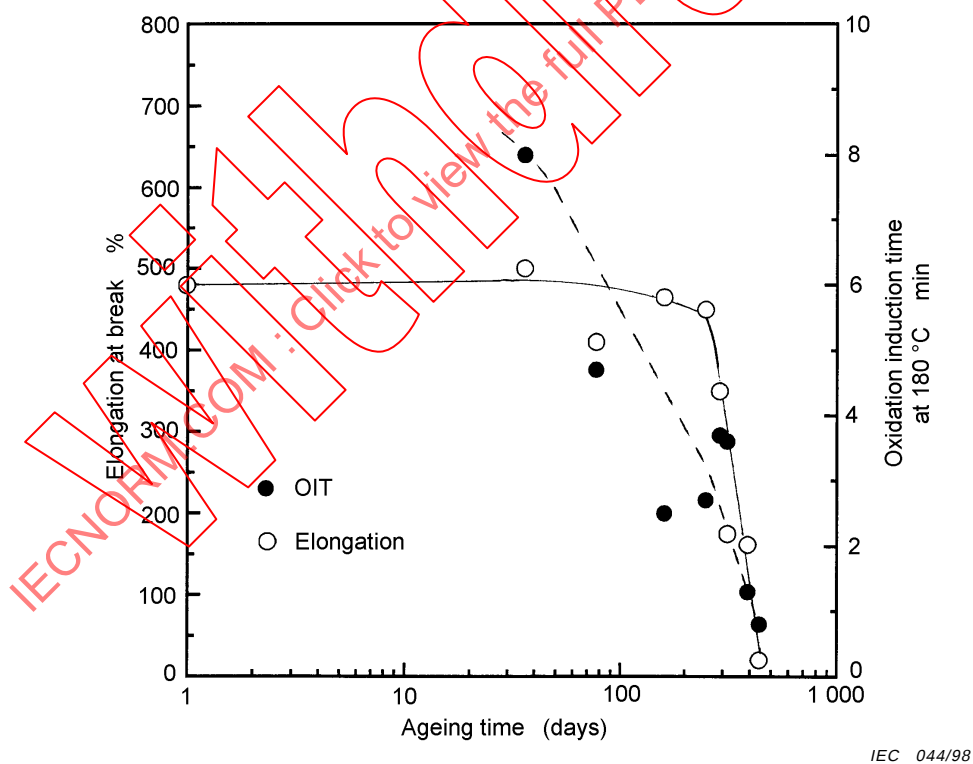
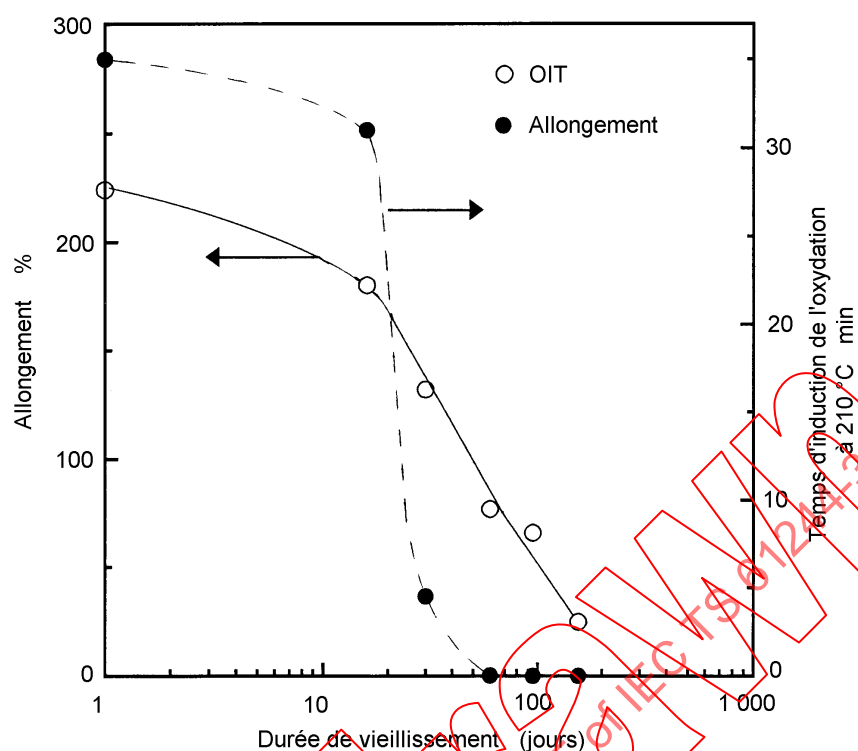
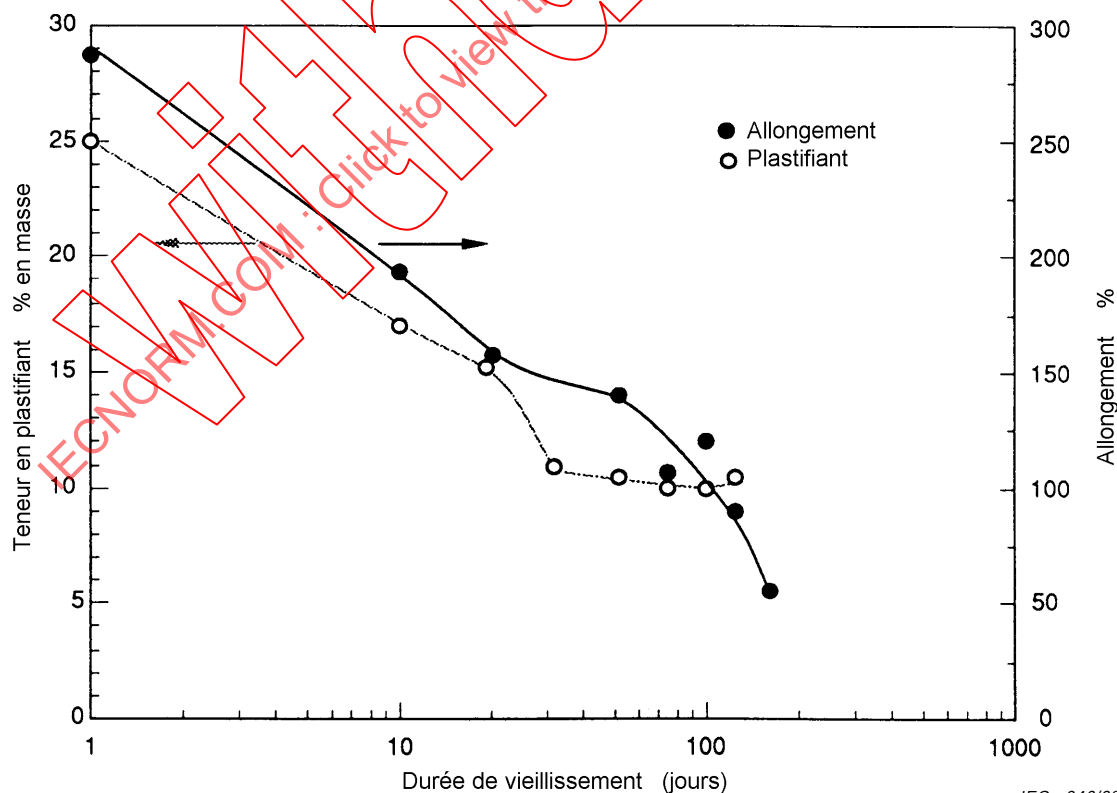


Figure 15 – Correlation between elongation at break and oxidation induction time for unfilled XLPE insulation thermally aged at 130 °C [9]



IEC 045/98

Figure 16 – Corrélation entre l'allongement à la rupture et le temps d'induction de l'oxydation pour l'isolation en matériaux EPR vieillis thermiquement à 140 °C [9]



IEC 046/98

Figure 17 – Corrélation entre l'allongement à la rupture et la teneur en plastifiant pour l'isolation en PVC vieillis thermiquement à 120 °C [9]

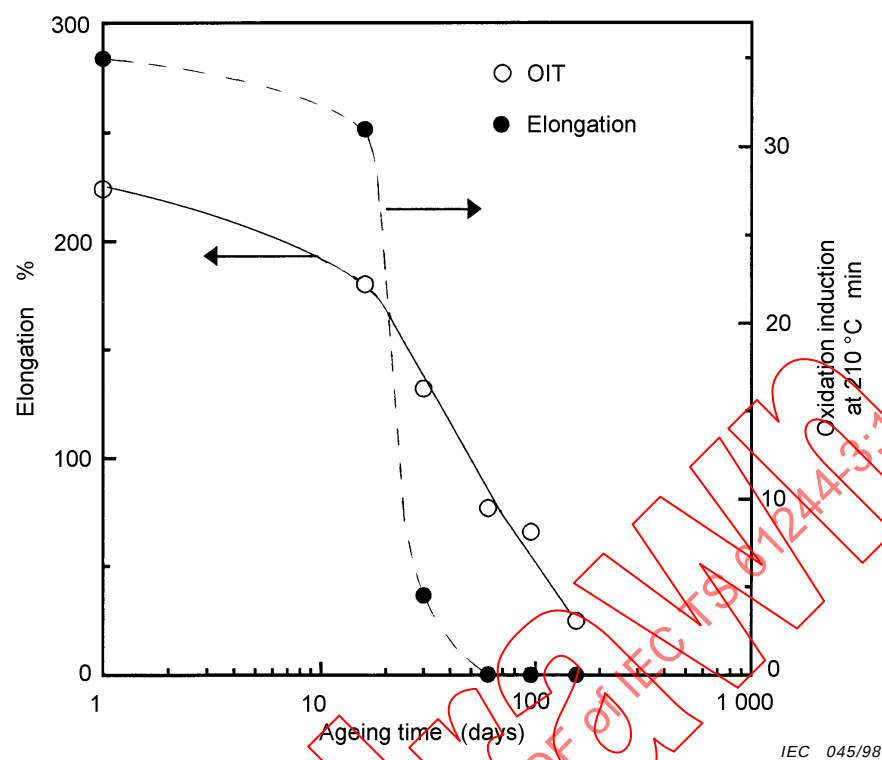


Figure 16 – Correlation between elongation at break and oxidation induction time for EPR insulation thermally aged at 140 °C [9]

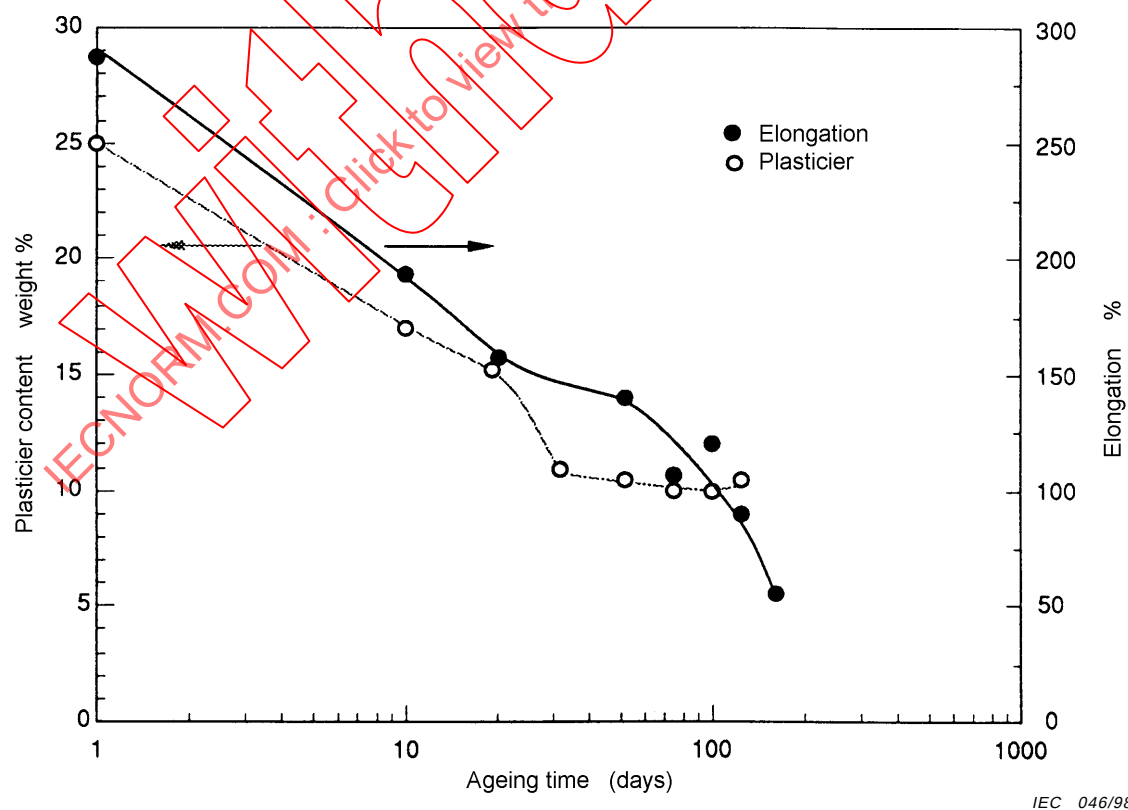


Figure 17 – Correlation between elongation at break and plasticizer content for PVC insulation thermally aged at 120 °C [9]

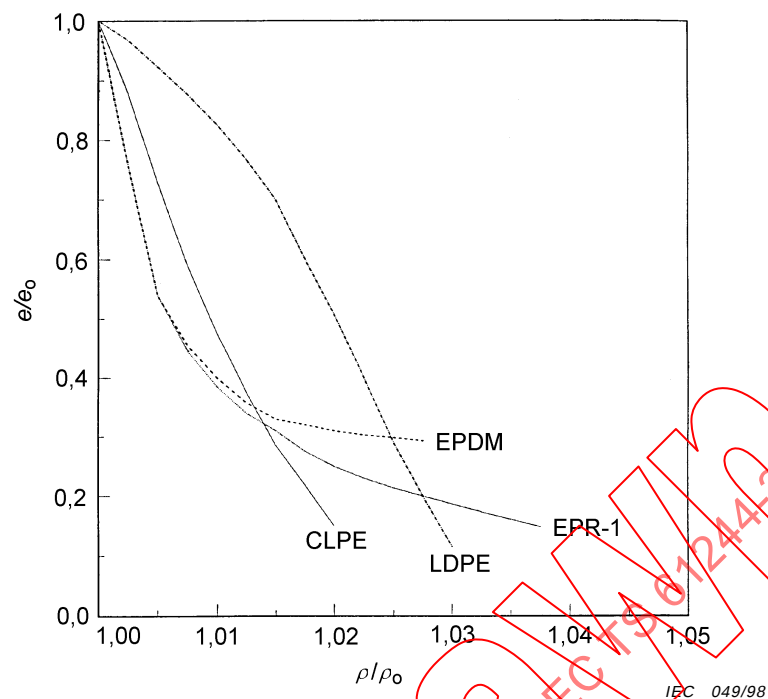


Figure 18 – Corrélation entre l'allongement à la rupture et la masse volumique pour l'isolation des câbles vieillis sous rayonnement [15]

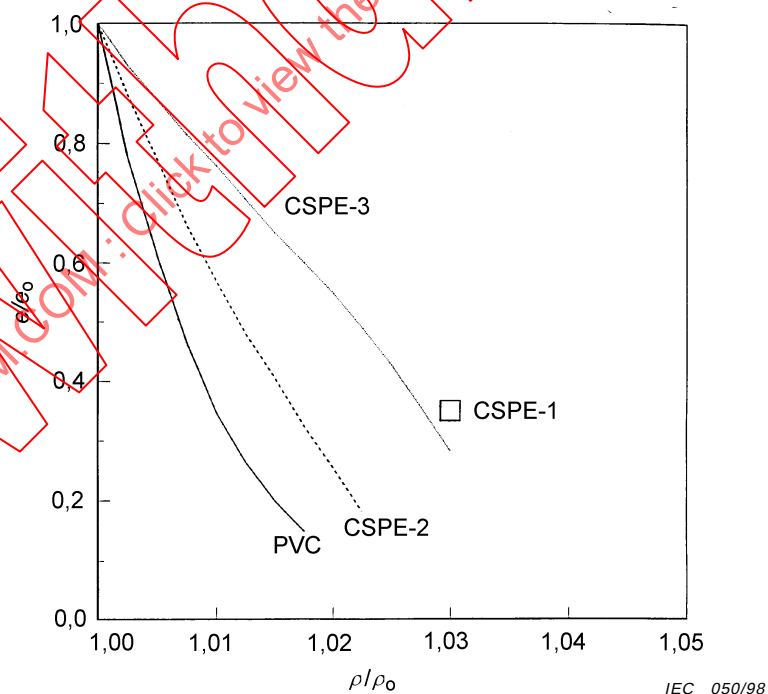


Figure 19 – Corrélation entre l'allongement à la rupture et la masse volumique pour l'isolation des gaines de câbles vieillis sous rayonnement [15]

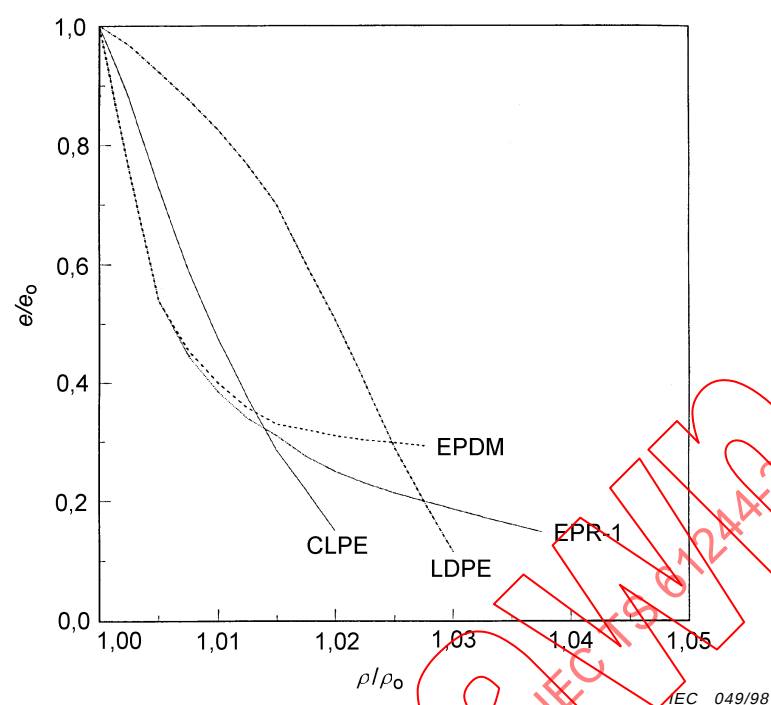


Figure 18 – Correlation between elongation at break and density for radiation-aged cable insulation [15]

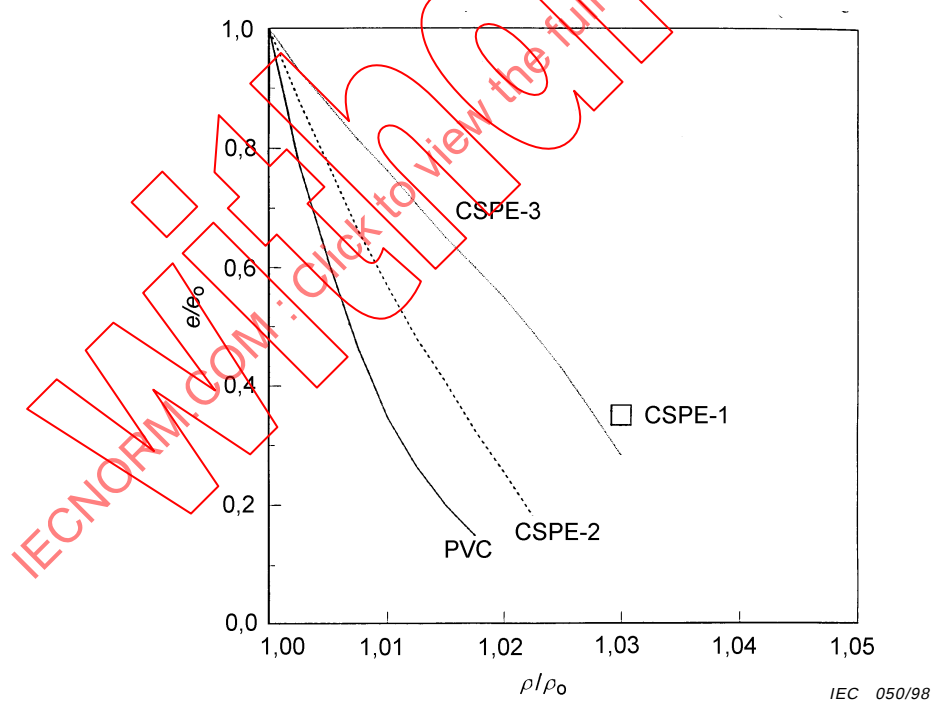


Figure 19 – Correlation between elongation at break and density for radiation-aged cable jackets [15]

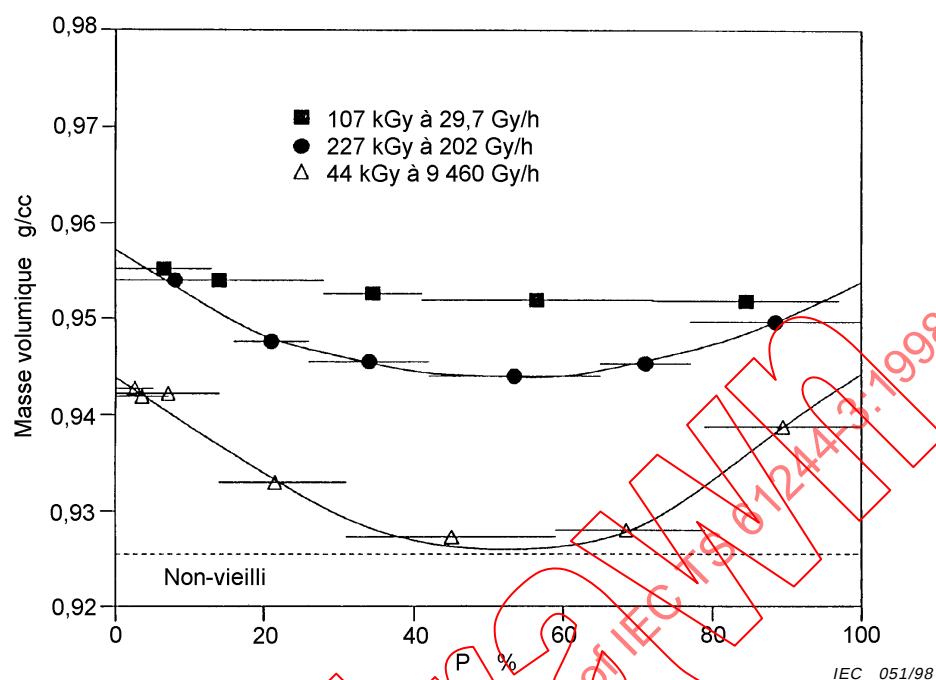


Figure 20 – Profil des masses volumiques dans l'épaisseur des matériaux XLPE non vieillis et vieillis sous rayonnement [15]

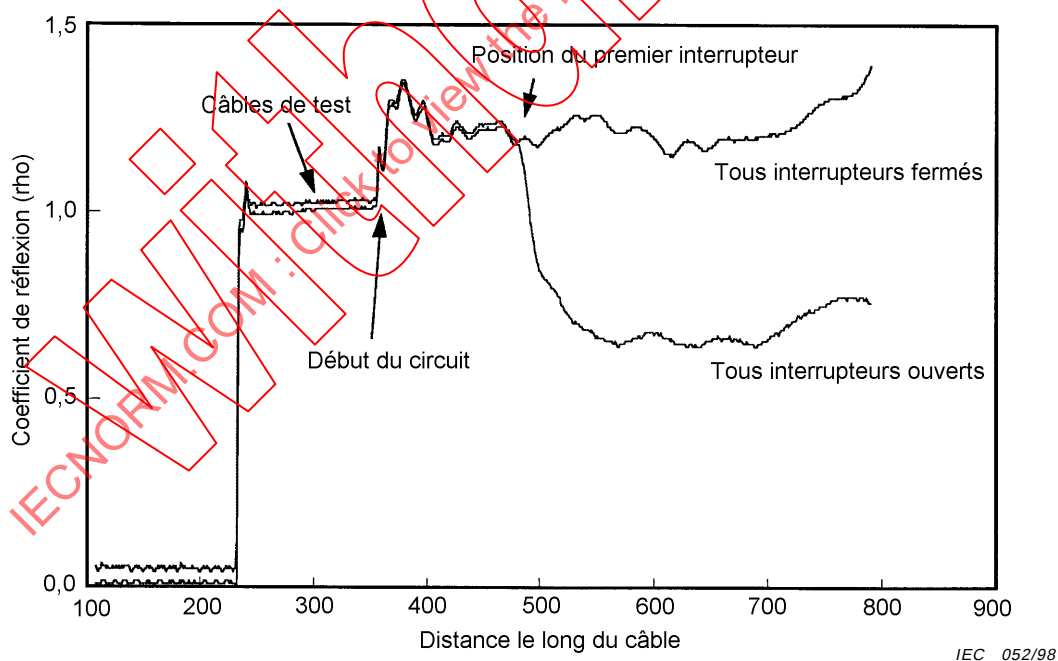


Figure 21 – Profil des spectres du domaine temporel pour un circuit d'éclairage avec interrupteurs ouverts et fermés, montrant l'emplacement du premier interrupteur

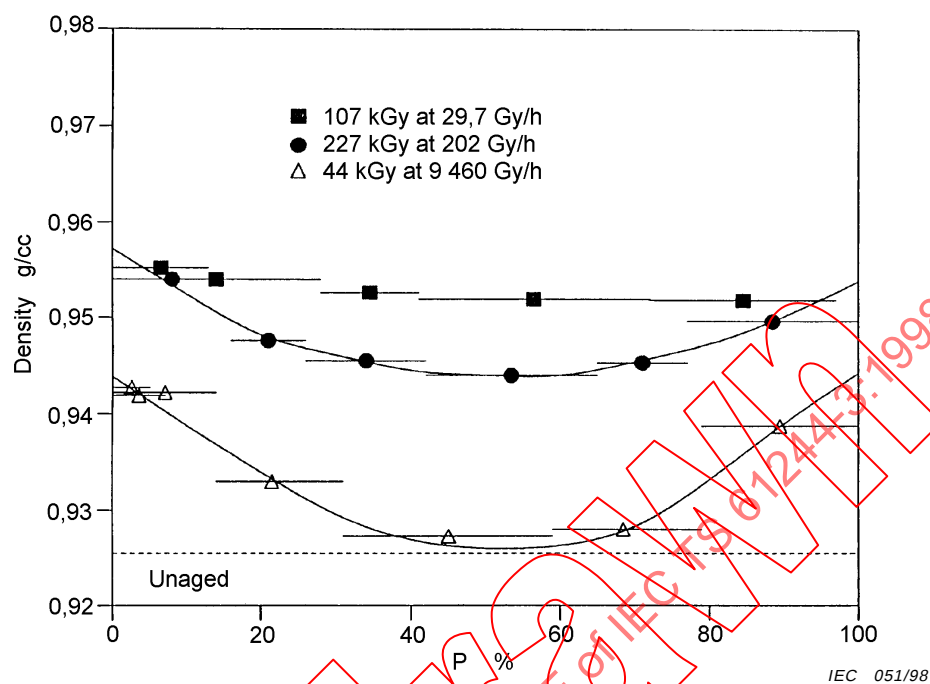


Figure 20 – Density profiles through the thickness of unaged and radiation-aged XLPE [15]

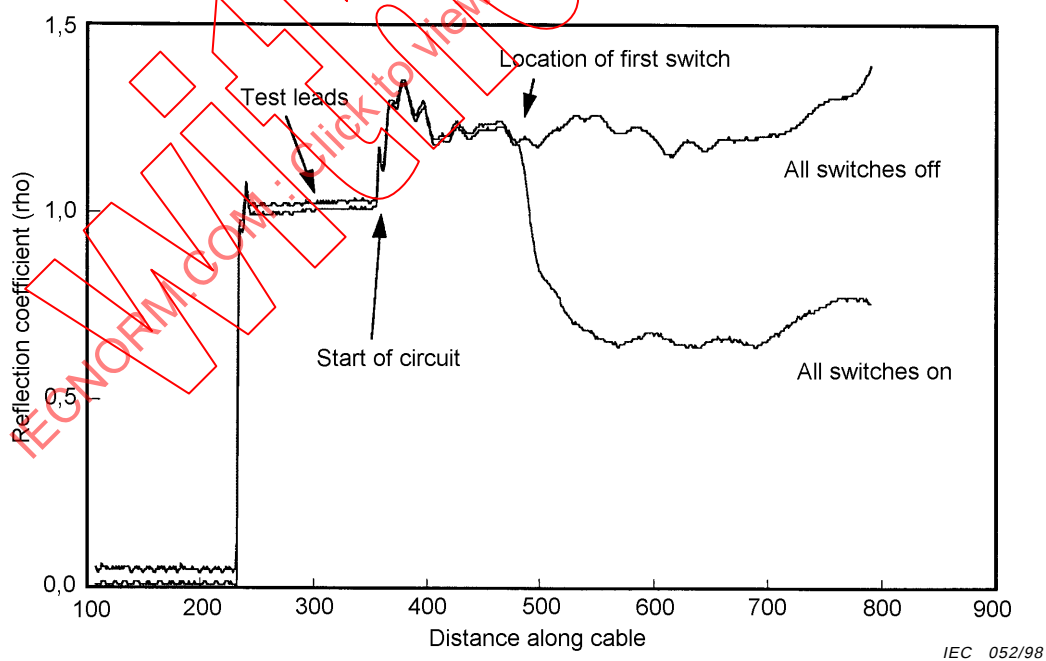
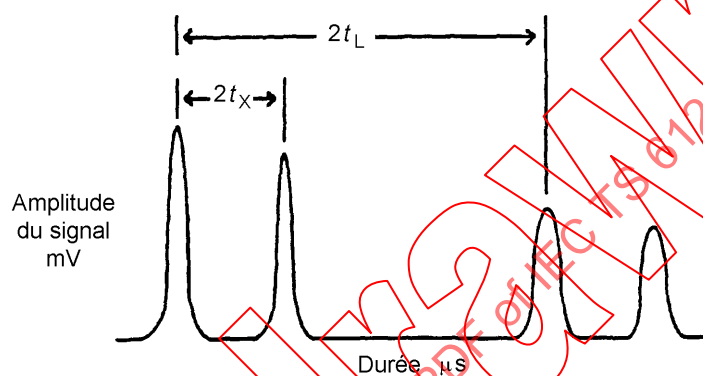
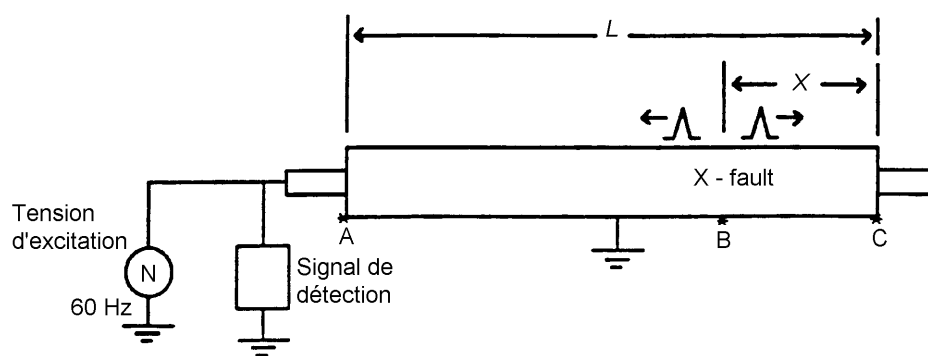
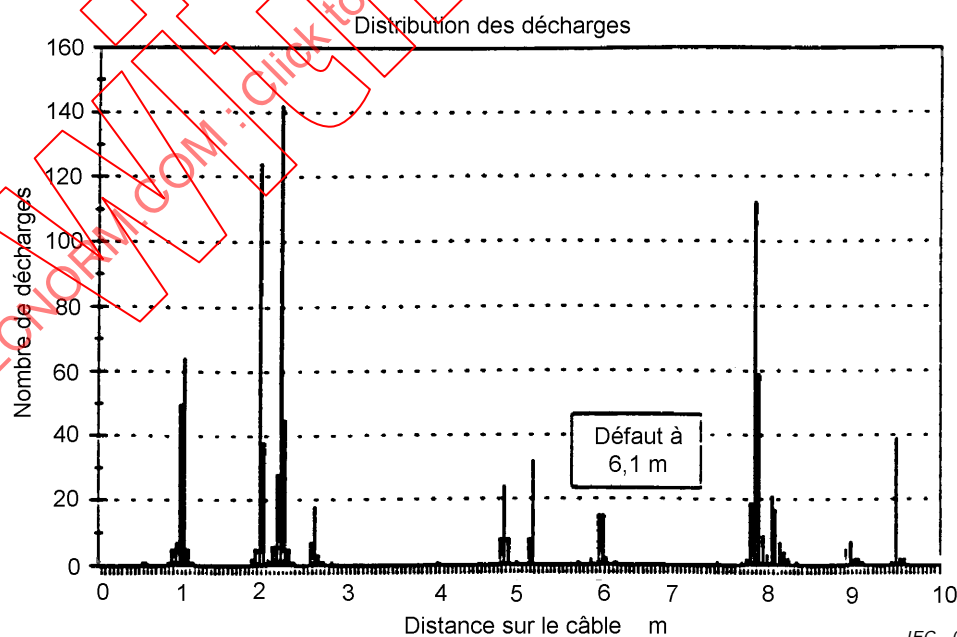


Figure 21 – Time domain signature files for a lighting circuit with switches on and off, showing location of first switch



IEC 053/98

Figure 22 – Représentation schématique d'un signal de décharge partielle se propageant dans un câble blindé et des signaux enregistrés par l'appareil de détection [19]



IEC 054/98

Figure 23 – Distribution spatiale des impulsions de décharge le long d'un câble (non blindé) contenant un défaut connu à 6,1 m [20]

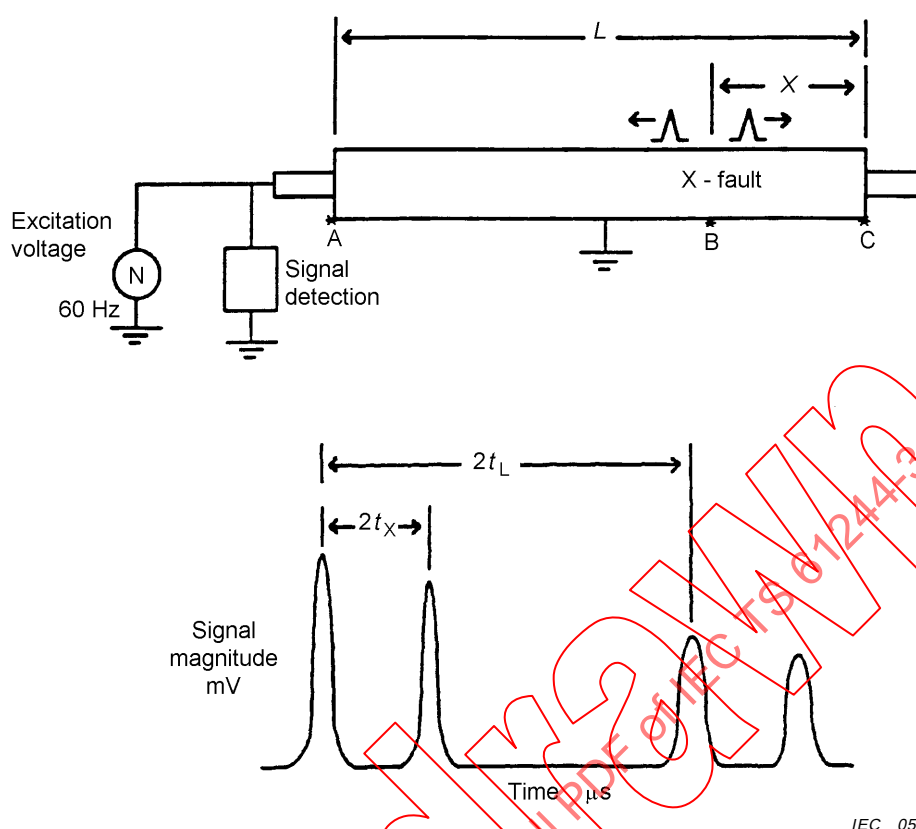


Figure 22 – Schematic representation of a partial discharge signal propagating in a shielded cable and the signals recorded by the detection instrument [19]

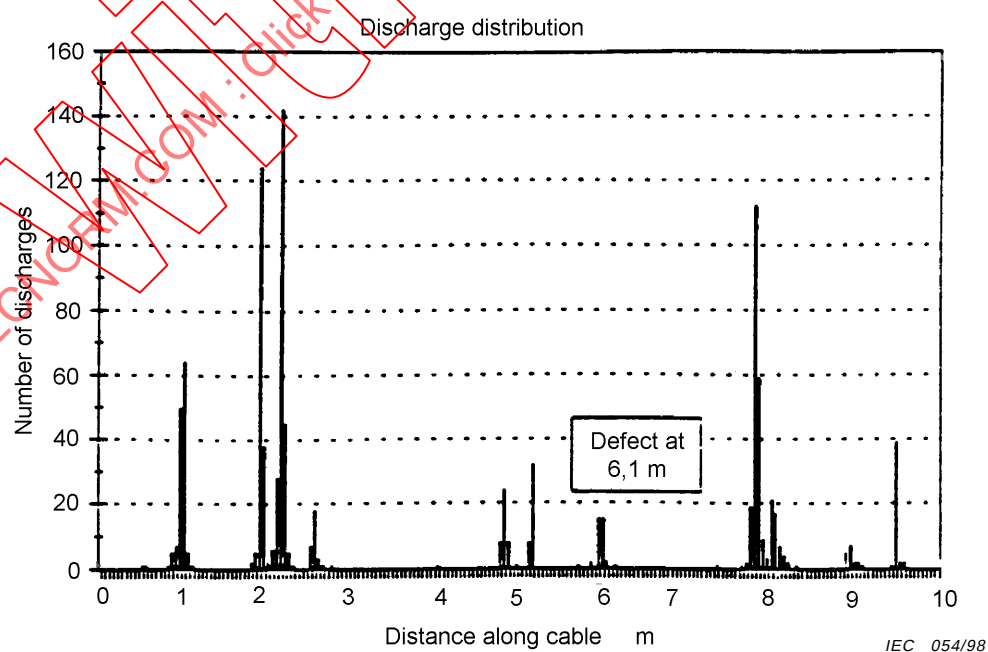
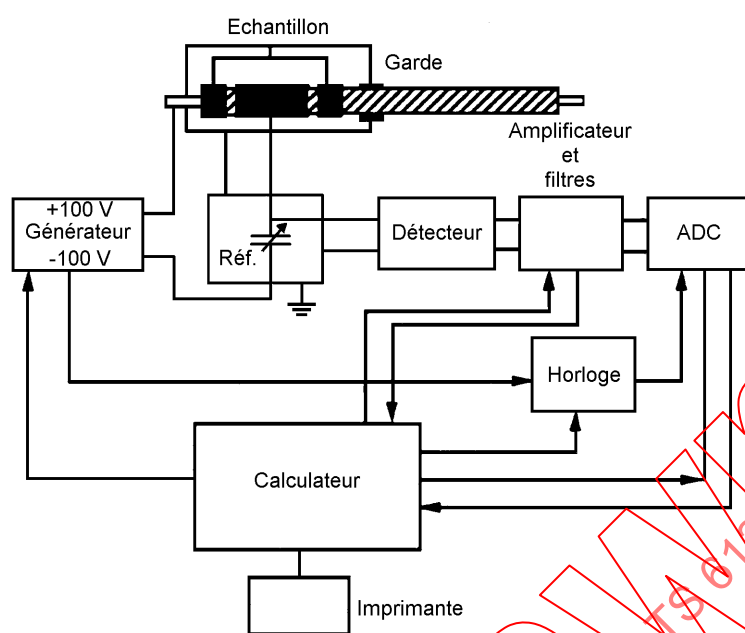
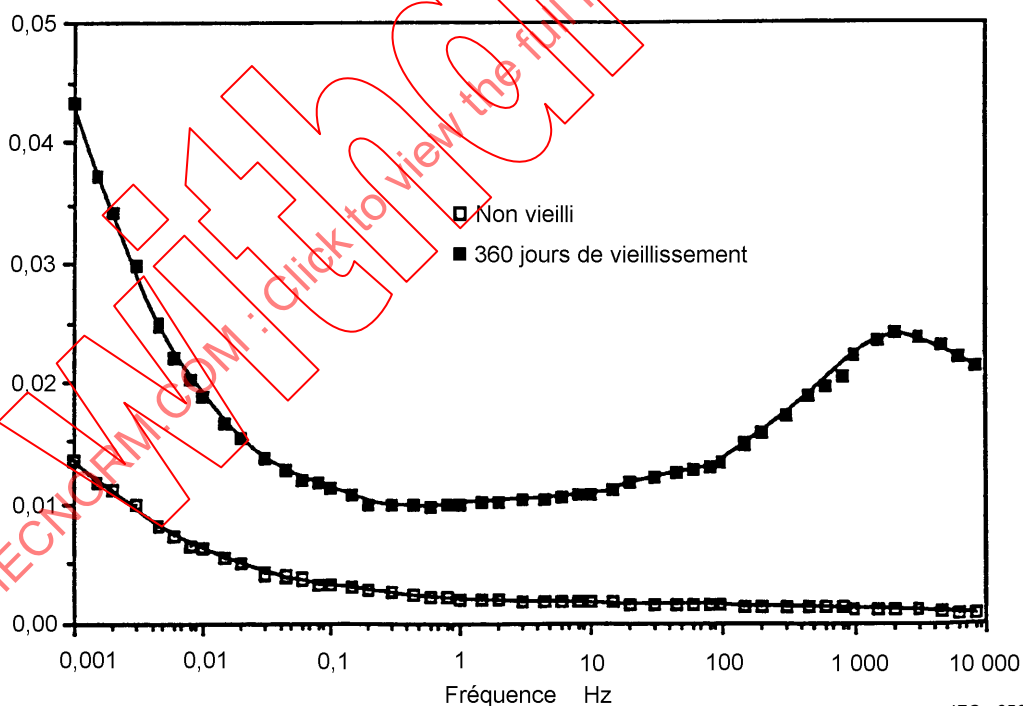


Figure 23 – Spatial distribution of discharge pulses along a cable length (unshielded) containing a known defect at 6,1 m [20]



IEC 055/98

Figure 24 – Schéma de montage pour la mesure de la spectrographie du domaine temporel [19]



IEC 056/98

Figure 25 – Mesures de la spectrographie du domaine temporel sur les câbles en EPDM/CSPE vieilliss thermiquement [19]