

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
544-1**

Deuxième édition
Second edition
1994-04

**Matériaux isolants électriques –
Détermination des effets des rayonnements
ionisants –**

Partie 1:
Interaction des rayonnements et dosimétrie

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

Part 1:
Radiation interaction and dosimetry



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 544-1: 1994

Numéros des publications

Depuis le 1^{er} 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.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
544-1**

Deuxième édition
Second edition
1994-04

**Matériaux isolants électriques –
Détermination des effets des rayonnements
ionisants –**

Partie 1:
Interaction des rayonnements et dosimétrie

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

Part 1:
Radiation interaction and dosimetry

© CEI 1994 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.

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

V

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

AVA Documents
Document Sharing Hub

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	6
Articles	
1 Domaine d'application et objet	8
2 Références normatives	8
3 Définitions	8
4 Aspects généraux de l'évaluation de la tenue aux rayonnements des matériaux isolants	10
4.1 Evaluation du champ de rayonnement	10
4.2 Evaluation de la dose absorbée et du débit de dose absorbée	12
4.3 Modifications provoquées par le rayonnement et leur évaluation	12
5 Méthodes de dosimétrie	16
5.1 Généralités	16
5.2 Méthodes absolues	16
5.2.1 Rayonnements gamma	16
5.2.2 Faisceaux d'électrons	18
5.3 Méthodes relatives	20
5.4 Méthodes recommandées pour la mesure de la dose absorbée	20
6 Calcul de la dose absorbée de rayonnement X ou gamma	22
6.1 Généralités	22
6.2 Calcul de la dose absorbée à partir d'une mesure d'exposition	22
6.3 Calcul de la dose absorbée dans un matériau donné à partir de celle absorbée dans un autre matériau	24
6.4 Distribution de dose en profondeur (limites)	24
7 Méthodes d'estimation de la dose d'un rayonnement électronique	26
7.1 Généralités	26
7.2 Méthodes recommandées pour la dosimétrie des faisceaux d'électrons	28
7.3 Irradiation avec un faisceau d'électrons	30
7.4 Méthodes de mesure des distributions de dose en profondeur	30
Tableaux	36
Figures	45
Annexes	
A Epaisseur d'équilibre de particules chargées	50
B Calcul des facteurs numériques f_i	58
C Bibliographie	60

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
INTRODUCTION	7
Clause	
1 Scope and object	9
2 Normative references	9
3 Definitions	9
4 Aspects to be considered in evaluating the radiation resistance of insulating materials	11
4.1 Evaluation of the radiation field	11
4.2 Evaluation of absorbed dose and absorbed dose rate	13
4.3 Radiation-induced changes and their evaluation	13
5 Dosimetry methods	17
5.1 General	17
5.2 Absolute methods	17
5.2.1 Gamma-rays	17
5.2.2 Electron beams	19
5.3 Relative methods	21
5.4 Recommended methods for measuring absorbed dose	21
6 Calculation of absorbed dose from X- or gamma-radiation	23
6.1 General	23
6.2 Calculation of the absorbed dose from a measurement of exposure	23
6.3 Calculation of absorbed dose in one material from that in another	25
6.4 Depth-dose distribution (limitations)	25
7 Dose estimation methods for electron radiation	27
7.1 General	27
7.2 Recommended procedures for electron-beam dosimetry	29
7.3 Electron-beam irradiation	31
7.4 Methods for measuring depth-dose distributions	31
Tables	37
Figures	45
Annexes	
A Charged-particle equilibrium thickness	51
B Derivation of numerical factors f_i	59
C Bibliography	60

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX ISOLANTS ÉLECTRIQUES – DÉTERMINATION DES EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS –

Partie 1: Interaction des rayonnements et dosimétrie

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 en ce qui concerne les questions techniques, préparés par les comités d'études où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 3) Ces décisions constituent des recommandations internationales publiées sous forme de normes, de rapports techniques ou de guides et agréées comme telles 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.

La Norme internationale CEI 544-1 a été établie par le sous-comité 15B: Essais d'endurance, du comité d'études 15 de la CEI: Matériaux isolants.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 1977, et constitue une révision technique.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

DIS	Rapport de vote
15B(BC)91	15B(BC)93

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

La CEI 544 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général: *Matériaux isolants électriques – Détermination des effets des rayonnements ionisants*.

- Partie 1: 1994, Interaction des rayonnements et dosimétrie
- Partie 2: 1991, Méthodes d'irradiation et d'essai
- Partie 4: 1985, Système de classification pour l'utilisation dans un environnement sous rayonnement.

Les annexes A et B font partie intégrante de cette norme.

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTRICAL INSULATING MATERIALS –
DETERMINATION OF THE EFFECTS OF IONIZING RADIATION –****Part 1: Radiation interaction and dosimetry**

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 cooperation 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, prepared by technical committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 3) They have the form of recommendations for international use 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.

International Standard IEC 544-1 has been prepared by sub-committee 15B: Endurance tests, of IEC technical committee 15: Insulating materials.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1977 and constitutes a technical revision.

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

DIS	Report on Voting
15B(CO)91	15B(CO)93

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

IEC 544 consists of the following parts, under the general title: *Electrical insulating materials – Determination of the effects of ionizing radiation*.

- Part 1: 1994, Radiation interaction and dosimetry
- Part 2: 1991, Procedures for irradiation and test
- Part 4: 1985, Classification system for service in radiation environments

Annexes A and B form an integral part of this standard.

Annex C is for information only.

INTRODUCTION

La définition de critères appropriés pour l'évaluation de la tenue aux rayonnements des matériaux isolants est très complexe, car de tels critères dépendent des conditions d'utilisation de ces matériaux. Par exemple, si un câble isolé est plié pendant le rechargement en combustible d'un réacteur, sa durée de vie est la période durant laquelle il reçoit une dose de rayonnement suffisante pour réduire à une valeur spécifiée une ou plusieurs des propriétés mécaniques correspondantes. La température de fonctionnement, la composition de l'atmosphère environnante et le temps pendant lequel la dose totale est reçue (débit de dose ou flux) sont des facteurs importants qui déterminent également la vitesse et les mécanismes des transformations chimiques. Pour certaines applications, les modifications temporaires peuvent constituer le facteur limitatif.

Tout d'abord, il convient de définir les champs de rayonnement auxquels les matériaux sont exposés et la dose de rayonnement qu'ils sont susceptibles d'absorber. Ensuite, il est nécessaire d'établir les méthodes d'essai des propriétés mécaniques et électriques des matériaux, qui permettront de définir les détériorations dues au rayonnement et de relier ces propriétés aux conditions d'utilisation afin de mettre sur pied un système de classification approprié.

Cette première partie de la CEI 544 constitue une introduction à une série de documents consacrés aux effets des rayonnements ionisants sur les matériaux isolants. La partie 2 de la CEI 544 décrit les méthodes utilisées pour maintenir différents types de conditions d'exposition pendant l'irradiation. Elle précise aussi les contrôles qui doivent être effectués sur ces conditions pour obtenir les performances désirées. Enfin, sont définies certaines conditions importantes d'irradiation et sont spécifiées les méthodes d'essai qui sont utilisées pour déterminer les changements de propriétés ainsi que les critères de point limite correspondants. La partie 3 (CEI 544-3: 1979) a été incorporée dans la deuxième édition de la CEI 544-2. La partie 4 de la CEI 544 donne une définition d'un système de classification, catégorie par catégorie, de la tenue des matériaux isolants aux rayonnements. Ce système comporte une série de paramètres caractérisant l'aptitude à l'utilisation sous rayonnement. Il est un guide pour la sélection et le classement des matériaux isolants, et pour les spécifications de matériaux.

INTRODUCTION

The establishment of suitable criteria for the evaluation of the radiation resistance of insulating materials is very complex, since such criteria depend upon the conditions under which the materials are used. For instance, if an insulated cable is to be flexed during a refuelling operation in a reactor, the service life will be that time during which the cable receives a radiation dose sufficient to reduce to a specified value one or more of the relevant mechanical properties. Temperature of operation, composition of the surrounding atmosphere, and the time interval during which the total dose is received (dose rate or flux) are important factors which also determine the rate and mechanisms of chemical changes. In some applications, temporary changes may be the limiting factor.

Firstly, it is necessary to define the radiation fields in which materials are exposed and the radiation dose subsequently absorbed by the material. Secondly, it is necessary to establish procedures for testing the mechanical and electrical properties of materials, which will define the radiation degradation, and link those properties with application requirements in order to provide an appropriate classification system.

This part of IEC 544 is the introductory part in a series dealing with the effect of ionizing radiation on insulating materials. Part 2 of IEC 544 describes procedures for maintaining different types of exposure conditions during the irradiation. It also specifies the controls that shall be maintained over these conditions so that desired performances can be obtained. Further, it defines certain important irradiation conditions and specifies the test procedures to be used for property-change determinations and the corresponding end-point criteria. Part 3 (IEC 544-3: 1979) has been incorporated into the second edition of IEC 544-2. Part 4 of IEC 544 defines a classification system to categorize the radiation endurance of insulating materials. It provides a set of parameters characterizing the suitability for radiation service. It is a guide for the selection and indexing of insulating materials and for material specification.

MATÉRIAUX ISOLANTS ÉLECTRIQUES – DÉTERMINATION DES EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS – Partie 1: Interaction des rayonnements et dosimétrie

1 Domaine d'application et objet

La présente partie de la CEI 544 traite de manière générale des aspects à envisager lors de l'évaluation des effets des rayonnements ionisants sur tous les types de matériaux isolants organiques. Elle fournit également pour les rayons X, les rayons γ et les électrons, un guide de terminologie en dosimétrie, des méthodes de détermination de l'exposition et de la dose absorbée, ainsi que des méthodes de calcul de la dose absorbée.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 544. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de la CEI 544 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 544-2: 1991, *Guide pour la détermination des effets des rayonnements ionisants sur les matériaux isolants – Deuxième partie: Méthodes d'irradiation et d'essai*

CEI 544-4: 1985, *Guide pour la détermination des effets des rayonnements ionisants sur les matériaux isolants – Quatrième partie: Système de classification pour l'utilisation dans un environnement sous rayonnement*

3 Définitions [15]*

Pour les besoins de la présente partie de la CEI 544, les définitions suivantes s'appliquent.

3.1 exposition (X): Mesure d'un champ de rayonnement électromagnétique (rayonnement X ou γ) auquel un matériau est exposé. L'exposition est le quotient de dQ par dm , où dQ est la valeur absolue de la charge totale des ions de même signe produits dans l'air lorsque tous les électrons (négatifs et positifs) libérés par les photons dans un élément de volume d'air de masse dm sont complètement arrêtés dans l'air:

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

L'unité SI d'exposition est le coulomb par kilogramme: C/kg. L'ancienne unité est le roentgen R: $1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$.

* Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie dans l'annexe C.

ELECTRICAL INSULATING MATERIALS – DETERMINATION OF THE EFFECTS OF IONIZING RADIATION – Part 1: Radiation interaction and dosimetry

1 Scope and object

This part of IEC 544 deals broadly with the aspects to be considered in evaluating the effects of ionizing radiation on all types of organic insulating materials. It also provides, for X-rays, γ -rays, and electrons, a guide to dosimetry terminology, methods of determining exposure and absorbed dose, and methods of calculating absorbed dose.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 544. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this part of IEC 544 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 544-2: 1991, *Guide for determining the effects of ionizing radiation on insulating materials – Part 2: Procedures for irradiation and test*

IEC 544-4: 1985, *Guide for determining the effects of ionizing radiation on insulating materials – Part 4: Classification system for service in radiation environments*

3 Definitions [15]*

For the purposes of this part of IEC 544, the following definitions apply.

3.1 exposure (X): Exposure is the measure of an electromagnetic radiation field (X- or γ -radiation) to which a material is exposed. The exposure is the quotient obtained by dividing dQ by dm , where dQ is the absolute value of the total charge of the ions of one sign produced in the air when all of the electrons (and positrons) liberated by photons in air of mass dm are completely stopped in air:

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

The SI unit of exposure is the coulomb (C) per kilogram: C/kg. The old unit is the roentgen R: $1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$.

* The numbers in square brackets refer to the bibliography given in annex C.

L'exposition décrit donc l'effet d'un champ électromagnétique sur la matière en termes de l'ionisation que le rayonnement produit dans un matériau de référence, l'air.

3.2 fluence de charge électronique (Q'): Le quotient obtenu en divisant dQ par dA , dont dQ est la charge des électrons qui frappent pendant l'intervalle de temps t sur la surface dA :

$$Q' = \frac{dQ}{dA}$$

3.3 densité de courant électronique (j): Le quotient obtenu en divisant dQ' par dt , dont dQ' est la fluence de la charge électronique pendant l'intervalle de temps dt :

$$j = \frac{dQ'}{dt} = \frac{d^2Q}{dA dt}$$

3.4 dose absorbée (D): Mesure de l'énergie communiquée au matériau irradié, quelle que soit la nature du champ de rayonnement. La dose absorbée D est égale au quotient de $d\bar{e}$ par dm , où $d\bar{e}$ est l'énergie moyenne communiquée par le rayonnement ionisant à une masse de matière dm :

$$D = \frac{d\bar{e}}{dm}$$

L'unité SI est le gray (Gy). L'ancienne unité est le rad:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} (= 10^2 \text{ rad})$$

Etant donné que cette définition ne spécifie pas le matériau absorbant, le gray peut être utilisé seulement pour un matériau spécifique. La dose absorbée est déterminée en partie par la composition du matériau irradié. Par conséquent, lorsque différents matériaux sont exposés à un même champ de rayonnement, ils reçoivent habituellement des doses absorbées différentes.

3.5 débit de dose absorbée ($\dot{D}$): Le quotient obtenu en divisant dD par dt , dont dD est l'accroissement de la dose absorbée pendant l'intervalle de temps dt :

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

L'unité SI de débit de dose absorbée est le gray par seconde:

$$1 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1} (= 10^2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} = 0,36 \text{ Mrad} \cdot \text{h}^{-1})$$

4 Aspects généraux de l'évaluation de la tenue aux rayonnements des matériaux isolants

4.1 Evaluation du champ de rayonnement

Le champ de rayonnement est décrit différemment suivant les types de rayonnement.

The exposure thus describes the effect of an electromagnetic field on matter in terms of the ionization that the radiation produces in a standard reference material, air.

3.2 electron charge fluence (Q'): The quotient obtained by dividing dQ by dA , where dQ is the electron charge impinging during the time t on the area dA :

$$Q' = \frac{dQ}{dA}$$

3.3 electron current density (j): The quotient obtained by dividing dQ' by dt , where dQ' is the electron charge fluence during the time interval dt :

$$j = \frac{dQ'}{dt} = \frac{d^2Q}{dA dt}$$

3.4 absorbed dose (D): Measure of the energy imparted to the irradiated material, regardless of the nature of the radiation field. The absorbed dose D is the quotient obtained by dividing $d\bar{\epsilon}$ by dm where $d\bar{\epsilon}$ is the mean energy imparted by ionizing radiation to matter of mass dm :

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

The SI unit is the gray (Gy). The old unit is the rad:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} (= 10^2 \text{ rad})$$

Since this definition does not specify the absorbing material, the gray can be used only with reference to a specific material. The absorbed dose is determined in part by the composition of the irradiated material. When exposed to the same radiation field, therefore, different materials usually receive different absorbed doses.

3.5 absorbed dose rate ($\dot{D}$): The quotient obtained by dividing dD by dt , where dD is the increment of absorbed dose in the time interval dt :

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

The SI unit of absorbed dose rate is the gray per second:

$$1 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1} (= 10^2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} = 0,36 \text{ Mrad} \cdot \text{h}^{-1})$$

4 Aspects to be considered in evaluating the radiation resistance of insulating materials

4.1 Evaluation of the radiation field

For various types of radiation, the radiation field is described in different ways.

4.1.1 Un champ de rayonnement électromagnétique peut être défini au moyen de la densité de flux et de la distribution d'énergie des photons. Cependant, pour les rayonnements X et γ inférieurs ou égaux à 3 MeV, il est d'usage de définir le champ par ses effets d'ionisation sur l'air. Pour cela, on utilise la quantité «exposition».

4.1.2 Un champ de particules est habituellement caractérisé par la densité de courant (débit de fluence). Lorsqu'il existe une distribution de l'énergie des particules, par exemple avec les faisceaux d'électrons, il y a lieu de donner des renseignements complémentaires concernant le spectre d'énergie.

4.1.3 Dans tous les cas, le but recherché est de définir le champ de rayonnement de façon à permettre le calcul de la dose absorbée et du débit de dose dans un matériau quelconque placé dans le champ. Lorsque différents matériaux sont exposés à une même fluence de photons ou de particules, ils peuvent absorber différentes quantités d'énergie. Le premier objectif est donc de décrire des méthodes étalons de mesure des caractéristiques des champs de rayonnement auxquels les matériaux isolants sont appelés à être exposés. L'article 5 remplit cet objectif en présentant une liste des techniques de dosimétrie des rayonnements avec les références correspondantes.

4.2 *Evaluation de la dose absorbée et du débit de dose absorbée*

Des techniques ont été mises au point pour obtenir – à partir de mesures par détecteurs de rayonnement tels que chambres d'ionisation, calorimètres et dosimètres chimiques – les données permettant de calculer la dose absorbée ou le débit de dose absorbée appliqué au matériau irradié. L'article 5 traite des techniques fiables et classiques utilisées pour de telles mesures. L'article 6 présente les facteurs dépendant du matériau et de l'énergie qu'il convient d'utiliser dans les calculs de dose absorbée ou de débit de dose absorbée dans d'autres matériaux à partir des résultats de mesure pour le rayonnement X et le rayonnement γ . L'article 7 présente des méthodes d'estimation de la dose pour le rayonnement électronique.

4.3 *Modifications provoquées par le rayonnement et leur évaluation*

Bien que les différents types de rayonnement et la matière interagissent de différentes façons, le phénomène essentiel consiste dans la production d'ions et d'états d'excitation électronique des molécules qui, à leur tour, peuvent entraîner la formation de radicaux libres. Il y a aussi production, par le rayonnement, d'électrons mobiles qui sont piégés sur des sites de faible énergie potentielle. Le premier phénomène entraîne des modifications chimiques, mécaniques et électriques permanentes du matériau; le second se traduit par des modifications temporaires des propriétés électriques [10].

4.3.1 *Modifications permanentes*

Dans les matériaux polymériques, la formation de radicaux libres pendant l'irradiation entraîne des phénomènes de scission et de réticulation qui modifient la structure chimique de l'isolant, conduisant généralement à une détérioration des propriétés mécaniques. Cette détérioration des propriétés mécaniques donne souvent lieu à des modifications importantes des propriétés électriques. Cependant, il arrive parfois que des modifications considérables des propriétés électriques surviennent avant que la dégradation mécanique ne soit importante. Par exemple, une modification du facteur de dissipation ou de la permittivité peut nuire au fonctionnement d'un circuit résonnant. L'intensité des phénomènes de scission et de réticulation dépend de la dose absorbée, du débit de dose absorbée, de la géométrie du matériau et des conditions environnementales pendant l'irradiation. Etant donné que les radicaux libres décroissent parfois lentement, il peut aussi y avoir des effets post-irradiation.

4.1.1 An electromagnetic radiation field may be described in terms of photon flux density and energy distribution. However, for X- and γ -rays up to 3 MeV it is customary to characterize the field in terms of its ionizing effect on air. For this purpose, the quantity "exposure" is used.

4.1.2 A particle field is usually characterized in terms of the current density (fluence rate). When the particles have a distribution of energies, as for electron beams, additional information concerning the energy spectrum is required.

4.1.3 In all cases, the objective is to characterize the radiation field in such a way that the absorbed dose and dose rate in any material placed in the field may be calculated. When different materials are exposed to the same fluence of photons or particles, they may absorb different amounts of energy. The first objective is thus to describe standard methods and procedures for measuring the characteristics of the radiation fields to which insulating materials have to be exposed. Clause 5 meets this objective by presenting a list of radiation dosimetry techniques with the relevant references.

4.2 *Evaluation of absorbed dose and absorbed dose rate*

Techniques have been perfected to obtain – from measurements with radiation detectors such as ionization chambers, calorimeters, and chemical dosimeters – the data for calculating the absorbed dose or absorbed dose rate for a material under irradiation. Clause 5 deals with the reliable and conventional techniques of such measurements. Clause 6 contains the material- and energy-dependent factors to be used in the calculation of absorbed dose or absorbed dose rate in other materials of interest from the measured data for X- and γ -radiation, while clause 7 gives dose estimation methods for electron radiation.

4.3 *Radiation-induced changes and their evaluation*

Although the various types of radiation interact with matter in different ways, the primary process is the production of ions and electrically excited states of molecules which, in turn, may lead to the formation of free radicals. Radiation-generated mobile electrons, which become trapped at sites of low potential energy, are also produced. The first phenomenon leads to permanent chemical, mechanical, and electrical changes of the material; the second results in temporary electrical changes in performance [10].

4.3.1 *Permanent changes*

In polymeric materials, the formation of free radicals during irradiation leads to scission and cross-linking processes that modify the chemical structure of the insulation, generally leading to deterioration of the mechanical properties. This mechanical deterioration frequently gives rise to significant electrical property changes. However, important electrical property changes sometimes occur before mechanical degradation is serious. For example, a change in dissipation factor or in permittivity might become serious for the reliable functioning of a resonant circuit. The extent of scission and cross-linking processes depends on the absorbed dose, the absorbed dose rate, the material geometry, and the environmental conditions present during the irradiation. Because the free radicals sometimes decay slowly, there may also be post-irradiation effects.

4.3.1.1 Conditions environnementales et géométrie du matériau

Les conditions environnementales et la géométrie de l'éprouvette doivent être bien contrôlées et documentées durant la mesure des effets des rayonnements. Les principaux paramètres environnementaux sont notamment la température, le milieu réactif, et les contraintes mécaniques et électriques durant l'irradiation. En présence d'air, la durée d'irradiation (flux et débit de dose) constitue aussi un paramètre expérimental très important à cause des effets de diffusion de l'oxygène et des constantes de vitesse de décomposition de l'hydroperoxyde. Ces deux facteurs varient en fonction du temps. Les facteurs qui influent sur la diffusion et sur les concentrations d'équilibre de l'oxygène dans le polymère doivent être contrôlés. Ces facteurs sont: la température, la pression de l'oxygène, la géométrie du matériau et la durée d'irradiation.

Si l'effet de contraintes simultanées, par exemple une irradiation à haute température, est simulé par une application séquentielle des contraintes, on peut s'attendre à d'autres résultats. En outre, les résultats peuvent être différents si l'éprouvette est d'abord irradiée puis soumise à un vieillissement thermique ou vice versa.

4.3.1.2 Effets post-irradiation

Dans les polymères organiques, il peut se produire des effets post-irradiation imputables à la décroissance progressive de divers réactifs tels que les radicaux libres résiduels. Lors de chaque évaluation, il convient de tenir compte de ce type de comportement. Il est recommandé que les essais soient effectués à des intervalles déterminés après l'irradiation, en maintenant l'éprouvette dans une atmosphère normale de laboratoire. La réaction de l'oxygène avec les radicaux libres résiduels peut causer une dégradation supplémentaire.

4.3.2 Effets temporaires

4.3.2.1 La conduite de mesures pendant l'irradiation est hors du domaine d'application de la présente partie de la CEI 544. Malgré cela, certains aspects fondamentaux seront brièvement examinés. Les effets temporaires consistent avant tout en modifications des propriétés électriques telles que la conductivité induite, à la fois pendant l'irradiation et pendant un certain temps après l'irradiation. Par conséquent, la mesure de la conductivité induite pourrait être utilisée comme critère pour déterminer les effets temporaires du rayonnement. Ces effets sont avant tout fonction du débit de dose.

4.3.2.2 L'expérience a montré que la conductivité induite n'était généralement pas tout à fait proportionnelle au débit de dose absorbée $\dot{D}$, mais qu'elle variait comme $\dot{D}^\alpha$, où α est inférieur à l'unité. Par conséquent, la sensibilité au rayonnement est définie par la relation:

$$\sigma_i = k \dot{D}^\alpha$$

Pour déterminer k et α , au moins deux mesures sont nécessaires. Une autre difficulté provient du fait que k et α dépendent également de la dose intégrée absorbée par l'éprouvette.

4.3.2.3 La mesure de la conductivité induite est en fait très délicate car les photo-électrons et les électrons Compton dans les matériaux constituant l'électrode ont tendance à perturber le courant induit dans l'éprouvette elle-même. Les courants ioniques dans l'atmosphère ionisée introduisent également des erreurs de mesure s'ils ne sont pas éliminés. Il convient de définir des méthodes de laboratoire qui éliminent la plupart des effets perturbateurs tout en restant relativement simples.

4.3.1.1 *Environmental conditions and material geometry*

Environmental conditions and test specimen geometry shall be well controlled and documented during the measurement of radiation effects. Important environmental parameters include temperature, reactive medium, and mechanical and electrical stresses present during the irradiation. If air is present, the irradiation time (flux and dose rate) has also been demonstrated to be a very important experimental parameter because of oxygen diffusion effects and hydroperoxide breakdown rate constants. Both factors are time dependent. The conditions that influence oxygen diffusion and equilibrium concentrations in the polymer shall be controlled. These include: temperature, oxygen pressure, material geometry, and the time during which the dose is applied.

If the effect of simultaneous stresses, e.g. radiation at high temperature, is simulated by sequential stressing, other results are to be expected. Further, there can be differences in results if the sample is first irradiated and then heat aged or vice versa.

4.3.1.2 *Post-irradiation effects*

In organic polymers, there may be post-irradiation effects due to the gradual decay of various reactants, such as residual free radicals. Due allowance should be made for this type of behaviour in any evaluation procedure. The tests should be made at recorded intervals after irradiation, maintaining specimen storage in a standard laboratory atmosphere. The reaction of oxygen with residual free radicals can cause further degradation.

4.3.2 *Temporary effects*

4.3.2.1 Performing measurements during irradiation is not within the scope of this part of IEC 544. Despite this, some basic aspects will be discussed briefly. The temporary effects appear primarily as changes in electrical properties such as induced conductivity, both during and for some time after irradiation. Hence, measurement of the induced conductivity could be used as an evaluation property to determine the temporary radiation effects. These effects are primarily dose-rate dependent.

4.3.2.2 Experience has shown that the induced conductivity is usually not quite proportional to the absorbed dose rate $\dot{D}$, but varies as $\dot{D}^\alpha$, where α is smaller than unity. Hence, the radiation sensitivity is described by the relation:

$$\sigma_i = k \dot{D}^\alpha$$

To determine k and α , at least two measurements are needed. A further complication comes from the fact that k and α also depend on the integrated dose absorbed by the sample.

4.3.2.3 The measurement of the induced conductivity is actually quite delicate, since photoelectrons and Compton electrons in the electrode materials will tend to perturb the intrinsic induced current of the specimen. Ionic currents through the ionized atmosphere will also introduce errors in the measurement if they are not eliminated. Experimental procedures eliminating most of the disturbing effects, while remaining relatively simple, should be defined.

4.3.2.4 Il serait commode d'utiliser une grandeur simple, telle que la conductivité induite σ_i par unité de débit de dose, ou σ_i/σ_o , son rapport à la conductivité d'obscurité σ_o mesurée dans les mêmes conditions expérimentales, par unité de débit de dose, pour caractériser la sensibilité des matériaux aux effets temporaires.

5 Méthodes de dosimétrie

5.1 Généralités

Les méthodes absolues sont celles qui permettent de déterminer l'exposition, la densité de courant ou la dose absorbée au moyen de mesures physiques qui ne dépendent pas d'un étalonnage de l'appareil de mesure dans un champ de rayonnement connu. Cette définition n'implique pas directement la précision d'une méthode absolue. Cependant, d'après les résultats de nombreuses recherches sur les techniques de mesure et les données fondamentales des réactions induites par les rayonnements, il existe des méthodes absolues, telle la calorimétrie, qui sont largement considérées comme des étalons primaires de dosimétrie. Ces méthodes ne sont pas utilisées régulièrement pour les études des effets du rayonnement, mais elles sont disponibles dans les laboratoires des étalons nationaux et internationaux pour l'étalonnage des sources de rayonnement. La précision d'étalonnage des sources de photons est comprise entre 2 % et 3 %. Ces méthodes peuvent être utilisées pour la comparaison des résultats entre différents laboratoires.

En plus des méthodes étalons absolues, il existe de nombreux autres dosimètres qui ont été étalonnés à l'aide de ces méthodes et qui sont très largement utilisés comme dosimètres relatifs pour mesurer la dose absorbée [21]. Ces dosimètres sont basés sur une grande variété de réactions chimiques mesurables ou de transformations d'énergie résultant de l'énergie communiquée au matériau faisant l'objet de la dosimétrie, par suite de l'interaction avec le champ de rayonnement. Un grand nombre de capteurs de rayonnement tels que des films en plastique et des solides inorganiques ont été utilisés comme dosimètres. Ils sont relativement faciles à manipuler et fournissent des réponses facilement analysables. Dans bien des cas, il est nettement avantageux de les employer lorsque la précision exigée est moins rigoureuse.

5.2 Méthodes absolues

5.2.1 Rayonnements gamma

5.2.1.1 Les chambres d'ionisation à air libre sont utilisées pour mesurer une exposition X inférieure ou égale à 3 MeV; c'est-à-dire qu'elles sont conçues pour mesurer la charge dQ produite dans l'air et la masse dm d'air où les électrons ionisants sont libérés.

5.2.1.2 Les chambres d'ionisation à cavité sont des détecteurs de rayonnement qui permettent de mesurer l'exposition si $\dot{D}$ n'est pas trop élevé et si les conditions d'équilibre sont assurées [9]. Si une chambre d'ionisation à cavité est utilisée pour mesurer la dose absorbée dans un milieu particulier, la paroi et le gaz doivent être harmonisés avec ce milieu. Deux matériaux peuvent être considérés comme harmonisés pour un type particulier de rayonnement si l'absorption de ce rayonnement entraîne la même densité de flux et la même distribution d'énergie des particules ionisantes secondaires dans les deux milieux.

4.3.2.4 It would be convenient to use a simple figure such as the induced conductivity σ_i or σ_i/σ_0 , its ratio to the dark conductivity σ_0 measured in the same experimental conditions, per unit dose rate to characterize the sensitivity of the materials to temporary effects.

5 Dosimetry methods

5.1 General

Absolute methods are those that will provide a determination of the exposure, current density, or the absorbed dose by means of physical measurements that do not depend on a calibration of the instrument in a known radiation field. This definition does not directly imply the accuracy of an absolute method; but through the results of much research on the instrumental techniques and the fundamentals of the radiation-induced reactions, there are absolute methods, such as calorimetry, that are widely considered as primary dosimetry standards. These procedures are not regularly used in studies of radiation effects but are available in national and international standards laboratories for calibration of radiation sources. For photon sources, the calibration accuracy is within 2 % to 3 %. These methods can be used as reliable standards of comparison between different laboratories.

In addition to the absolute standard methods, there are many other dosimeters that have been calibrated against them and which have become extensively utilized as relative dosimeters for measuring the absorbed dose [21]. These are based on a wide variety of measurable chemical reactions or energy transformations resulting from the energy imparted to the dosimetry material as a result of the interaction with the radiation field. A large number of radiation sensors such as plastic films and inorganic solids have been used as dosimeters; these are relatively easy to handle and provide easy-to-analyse responses. In many cases, there are definite advantages in using them where the required accuracy is less stringent.

5.2 Absolute methods

5.2.1 Gamma-rays

5.2.1.1 Free-air ionization chambers are used to measure exposure X up to 3 MeV. That is, they are designed to measure the quantity of charge dQ produced in air and the mass dm of air where the ionizing electrons are liberated.

5.2.1.2 Cavity ionization chambers are radiation detectors that can be used to measure exposure if $\dot{D}$ is not too high and equilibrium conditions are ensured [9]. If a cavity ionization chamber is used to measure the absorbed dose in a particular medium, both wall and gas should be matched to this medium. Two materials may be said to be matched for a particular type of radiation if the absorption of this radiation leads to the same flux density and energy distribution of secondary ionizing particles in both media.

5.2.1.3 Les calorimètres fonctionnent en absorbant l'énergie du champ de rayonnement dans lequel ils sont disposés; ils retiennent cette énergie jusqu'à ce qu'elle soit transformée en énergie thermique et on évalue cette quantité de chaleur en mesurant l'échauffement du système [4]. La capacité calorifique du système peut être étalonnée électriquement en mesurant la puissance électrique absorbée nécessaire pour produire le même échauffement que le rayonnement. Dans certains systèmes, on a noté que la transformation de l'énergie en énergie chimique, par des réactions exo ou endochimiques, produit de légers écarts qui peuvent être corrigés. Toutefois, comme la conversion en chaleur de l'énergie du rayonnement absorbé forme un système de mesure du dépôt d'énergie presque indépendant de la qualité du rayonnement, le calorimètre constitue une méthode absolue à partir de laquelle d'autres méthodes étalons ont été étalonnées.

5.2.2 Faisceaux d'électrons

5.2.2.1 Les méthodes dosimétriques ou radiométriques permettent de déterminer la dose absorbée ou la fluence des électrons au moyen de mesures physiques sans étalonnage. Il y a deux méthodes absolues qui sont considérées comme des références dosimétriques ou radiométriques: la calorimétrie et la densitométrie de courant électronique. Ces méthodes absolues sont utilisées principalement pour l'étalonnage des dosimètres courants, et il est généralement difficile de déterminer la distribution de la dose en profondeur sans faire appel aux films dosimétriques courants.

5.2.2.2 Les calorimètres sont utilisés pour mesurer la dose absorbée ou la fluence d'énergie. La mesure de l'énergie absorbée par unité de surface de la cible permet d'étalonner la dose absorbée et de calibrer un dosimètre courant, par intégration d'une distribution relative de la dose en profondeur si la distribution relative de la dose en profondeur dans le même matériau cible a été obtenue auparavant à l'aide de dosimètres courants à haute résolution spatiale. Des méthodes quasi adiabatiques simples peuvent être utilisées comme calorimètre à absorption partielle [25] et comme calorimètre à absorption totale.

5.2.2.3 La mesure de densité de courant électronique est une méthode radiométrique [33] qui permet de mesurer la charge électronique ou le courant par unité de surface des champs de rayonnement des accélérateurs à électrons. Cette méthode n'est pas une méthode dosimétrique, mais elle permet d'étalonner la dose absorbée si l'énergie moyenne des électrons communiquée à l'absorbant de charges du densitomètre et la distribution relative de la dose en profondeur dans le même matériau absorbant ont été obtenues auparavant à l'aide d'un dosimètre courant. La coupe de Faraday a été largement utilisée pour mesurer la charge de faisceaux d'électrons, mais elle ne permet pas de mesurer avec précision la charge électronique ou le courant par unité de surface pour les larges faisceaux électroniques qui ont une distribution angulaire étendue. Une méthode simplifiée basée sur un assemblage d'absorbants en charge graphite sans chambre à vide est utile avec les larges faisceaux diffusés des accélérateurs à électrons [33, 35].

La surface absorbante effective est définie avec précision par une disposition spéciale de l'assemblage absorbant et une correction de rétrodiffusion électronique en considération de l'incidence oblique. L'influence de la charge ionisée de l'air environnant peut être évitée en minimisant la formation de champ électrique étranger autour de l'absorbant central.