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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

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 Varembé 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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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 R = 2,58 x 10^{-4} C/kg.

---

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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 d*Q* by d*m*, where d*Q* 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 d*m* 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 R = $2{,}58 \times 10^{-4}$ C/kg.

---

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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 $d\bar{\varepsilon}$ par dm, où $d\bar{\varepsilon}$ est l'énergie moyenne communiquée par le rayonnement ionisant à une masse de matière dm:

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

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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$\bar{\varepsilon}$ by dm where d$\bar{\varepsilon}$ is the mean energy imparted by ionizing radiation to matter of mass dm:

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

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

4.3.2.4 It would be convenient to use a simple figure such as the induced conductivity σ_i or σ_i/σ_o, its ratio to the dark conductivity σ_o 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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

5.2.1.3 Calorimeters operate by absorbing energy from the radiation field in which they are placed; they retain this energy until it is converted to thermal energy and this heat quantity is evaluated by measuring the rise in temperature of the system [4]. The heat capacity of the system may be calibrated electrically by measuring the amount of electrical power input required to produce the same temperature rise as the radiation. In some systems, the conversion of energy into chemical form by exochemical or endochemical reactions has been noted to produce slight deviations for which corrections can be made. However, since the conversion of absorbed radiation energy to heat establishes a system that measures energy deposition almost independent of radiation quality, the calorimeter constitutes an absolute method against which other standard methods have been calibrated.

5.2.2 *Electron beams*

5.2.2.1 Dosimetric or radiometric methods will provide a determination of absorbed dose or electron fluence by means of physical measurements without any calibration. There are two absolute methods that are considered as dosimetric or radiometric references: the one is calorimetry, and the other electron current densitometry. These absolute methods are used mainly for calibration of routine dosimeters, and it is generally difficult to determine depth-dose distribution without the use of routine film dosimeters.

5.2.2.2 The calorimeters are used to measure absorbed dose or energy fluence. Measurement of the absorbed energy per unit area of the target enables the calibration of absorbed dose and of a routine dosimeter by integrating a relative depth-dose distribution, if the relative depth-dose distribution in the same target material is given by using the routine dosimeters with high spatial resolution. Simple quasi-adiabatic methods can be used as a partial-absorption type [25] and a total-absorption type calorimeter.

5.2.2.3 The electron current density measurement is a radiometric method [33] to measure electron charge or current per unit area of radiation fields of electron accelerators. This method is not a dosimetric method, but enables the calibration of absorbed dose, if the mean electron energy impinging on the charge absorber of the densitometer and the relative depth-dose distribution in the same absorber material are given by using a routine dosimeter. The Faraday cup has been widely used for charge measurement of electron beams, but it is not suitable for giving accurate values of electron charge or current per unit area for broad electron beams with wide angular distribution. A simplified method using an assembly of graphite charge absorbers without a vacuum chamber is useful for scattered broad beams from electron accelerators [33], [35].

The effective absorbing area is accurately defined by special arrangement of the absorber assembly and electron backscattering correction in consideration of oblique incidence. The influence of ionized charge of the surrounding air can be avoided by minimizing extraneous electric field formation around the centre absorber.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

5.3 *Méthodes relatives*

5.3.1 La dosimétrie par conversion chimique est basée sur le principe que l'irradiation provoque certaines réactions dont le taux est directement proportionnel à la dose absorbée. La méthode au sulfate ferreux (dosimètre de Fricke) est un étalon bien défini de ce type et elle est la plus fiable. Elle est largement utilisée et convient pour les comparaisons entre différents laboratoires [4], [9], [1]. D'autres méthodes sont de grande importance car elles permettent d'étendre la gamme d'utilisation de la méthode au sulfate ferreux. Le dosimètre de type aminoacide (alanine) est recommandé par l'AIEA comme étalon de transfert [28], [29], [20]. Les matières plastiques, colorées ou non, constituent aussi de bons dosimètres chimiques [18], [22], [23], [34], [32].

5.3.2 La photoluminescence et la thermoluminescence constituent d'autres méthodes relatives basées sur des effets physiques [3], [26], [8].

5.3.3 L'utilisation effective de dosimètres relatifs est limitée à des conditions semblables à celles dans lesquelles ils ont été étalonnés, si les réponses des dosimètres varient en fonction des conditions environnementales (température et humidité avant et après l'irradiation, atmosphère, lumière, etc.), du débit de dose et du spectre de rayonnement. Les autres sources d'imprécision sont l'instabilité avant et après l'irradiation, les variations d'un lot à un autre, la non-linéarité des caractéristiques de réponse, les variations de taille, les impuretés ou les effets chimiques, etc.

5.3.4 Dans certains cas, les constantes ou les courbes d'étalonnage obtenues avec des rayons γ peuvent être appliquées aux faisceaux d'électrons, si les caractéristiques de dosimétrie ne dépendent pas de la différence des paramètres d'irradiation entre les faisceaux γ et les faisceaux d'électrons, tels que le spectre d'énergie électronique, le débit de dose, la durée de l'irradiation, la température durant l'irradiation, etc.

5.4 *Méthodes recommandées pour la mesure de la dose absorbée*

5.4.1 Le tableau 1 donne une liste non limitative des méthodes absolues et secondaires avec quelques-unes de leurs caractéristiques telles que:

- la gamme des doses absorbées et des débits de dose absorbée;
- l'influence de l'énergie du rayonnement;
- l'influence de la température ou de l'humidité;
- le matériau et l'épaisseur du film ou de la cible;
- le type d'indication;
- les observations d'ordre pratique;
- les références bibliographiques.

5.4.2 Une difficulté inhérente à la dosimétrie de doses absorbées élevées ou de débits de dose absorbée élevés, comme cela est habituel lors de l'irradiation de matériaux isolants, vient de la possibilité de perturbations ou de détériorations produites sur des éléments des dosimètres sous l'effet des rayonnements (par exemple détérioration des isolateurs des chambres d'ionisation).

Des essais et procédés spéciaux peuvent être requis afin d'éviter des inconvénients de ce genre. Les méthodes indiquées sont décrites plus en détail ailleurs [4] et dans les références du tableau 1.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

5.3 *Relative methods*

5.3.1 Chemical conversion dosimetry is based on the principle that certain reactions take place upon irradiation to an extent directly proportional to the absorbed dose. The ferrous sulfate (Fricke dosimeter) method is a well-defined standard of this type and is the most reliable. It is widely used and suitable for comparisons between different laboratories [4], [9], [1]. Other systems are very important because of their utility in extending the range of the ferrous sulfate method. The amino acid type (alanine) dosimeter is recommended by IAEA as a transfer standard [28], [29], [20]. Plastics, dyed or undyed, are also suitable as chemical dosimeters [18], [22], [23], [34], [32].

5.3.2 Other relative methods based on physical effects are photoluminescence or thermoluminescence [3], [26], [8].

5.3.3 Effective utilization of relative dosimeters is limited to conditions similar to those under which they have been calibrated, if the dosimeters show variations in response to environmental conditions (temperature and humidity before and after irradiation, atmosphere, light, etc.), dose rate, and radiation spectrum. Other imprecisions are due to instability before and after irradiation, batch-to-batch variation, non-linearity in the response characteristics, size variation, impurity or chemical effects, etc.

5.3.4 In some cases calibration constants or calibration curves obtained with γ-rays can be applied for electron beams if the dosimetry characteristics do not depend on the difference of irradiation parameters between γ-rays and electron beams, such as electron energy spectrum, dose rate, irradiation time, temperature during irradiation, etc.

5.4 *Recommended methods for measuring absorbed dose*

5.4.1 Table 1 gives a non-exhaustive list of absolute and secondary methods with some of their characteristics, such as:

- range of absorbed doses and absorbed dose rates;
- influence of the radiation energy;
- influence of temperature or humidity;
- material and thickness of film or target;
- type of read-out;
- observations of practical interest;
- bibliographical references.

5.4.2 A difficulty inherent in the dosimetry at high absorbed doses or high absorbed dose rates, such as is customary with the irradiation of insulating materials, arises from possible radiation effects or damage produced in parts of the dosimeters (e.g. damage to insulators of ionization chambers).

Special tests and procedures may be required to avoid disturbances of this type. More complete reviews of most of the methods listed can be found in [4] and in the references in table 1.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6 Calcul de la dose absorbée de rayonnement X ou gamma

6.1 *Généralités*

La dose absorbée est le paramètre à utiliser pour décrire les effets des rayonnements sur les matériaux isolants.

La présente méthode recommandée décrit une technique de calcul de la dose absorbée dans un matériau à partir de la connaissance du champ de rayonnement X ou γ et de la composition du matériau [1], [2]. A partir de la dose absorbée par un matériau, on peut calculer la dose absorbée par tout autre matériau exposé au même champ de rayonnement.

6.2 *Calcul de la dose absorbée à partir d'une mesure d'exposition [13], [14]*

6.2.1 La dose absorbée est devenue la base de comparaison des effets de différents rayonnements, et il est devenu nécessaire d'évaluer la dose absorbée induite dans le matériau irradié. L'exposition mesurée à l'air libre, à l'emplacement de l'éprouvette, peut alors être utilisée comme information de base en vue du calcul de la dose absorbée. Les paragraphes suivants contiennent les formules à appliquer dans ces calculs. Les tableaux 2 et 3 donnent les facteurs numériques nécessaires ainsi que des exemples de calcul.

6.2.2 La dose absorbée D_m dans un matériau m est calculée à partir de l'équation:

$$D_m = f_m X \qquad (1)$$

où le facteur numérique f_m est le quotient de la dose absorbée par unité d'exposition. Le facteur f_m est calculé en fonction de la composition du matériau et des facteurs numériques f_i correspondant aux éléments i à l'aide de l'équation

$$f_m = \sum_i a_i f_i \qquad (2)$$

où

a_i est la fraction massique de l'élément i dans le matériau;

f_i est la dose absorbée par l'élément i par unité d'exposition.

6.2.3 Le tableau 2 donne les valeurs de f_i en J/C pour des énergies de photon comprises entre 0,1 MeV et 3,0 MeV pour les éléments indiqués (voir l'annexe B pour le calcul des valeurs de f_i). Les valeurs de f_i ne sont valables que dans des conditions d'équilibre des particules chargées (voir l'annexe A pour explication).

Le tableau 3 donne les valeurs de f_m calculées selon l'équation (2), pour quelques matériaux utilisés couramment, à des niveaux d'énergie de photon de 1 MeV et 0,1 MeV.

6.2.4 Pour divers composés organiques irradiés par des photons d'énergie comprise entre 0,5 MeV et 1,5 MeV, l'équation (2) donnant f_m peut être approchée comme suit:

$$f_m = (32{,}9a_H - 1{,}94a_F - 1{,}55a_{Cl} - 1{,}16a_P + 33{,}7)\ \text{J/C}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6 Calculation of absorbed dose from X- or gamma-radiation

6.1 *General*

The absorbed dose is the parameter for use in relating the effects of radiation in insulating materials.

This recommended practice presents a technique for calculating the absorbed dose in a material from the knowledge of the X- or γ-radiation field and the composition of the material [1], [2]. From the absorbed dose in one material, the absorbed dose in any other material exposed to the same radiation field may be calculated.

6.2 *Calculation of the absorbed dose from a measurement of exposure* [13], [14]

6.2.1 Absorbed dose has become the basis for comparison of effects of different radiations and it has become necessary to determine the absorbed dose deposited in the irradiated material. The exposure measured in free air at the location of the specimen may then be utilized as the basic information from which the absorbed dose is to be calculated. The following subclauses contain the formulae to be used in this calculation. Tables 2 and 3 supply the necessary numerical factors and give examples for calculation.

6.2.2 The absorbed dose D_m in a material m is calculated with the equation:

$$D_m = f_m X \qquad (1)$$

where the numerical factor f_m is the quotient of absorbed dose per unit exposure. To calculate f_m, the composition of the material and the numerical factors f_i for the included elements i are needed according to the equation:

$$f_m = \sum_i a_i f_i \qquad (2)$$

where

a_i is the mass fraction of element i in the material

f_i is the absorbed dose per unit exposure for element i.

6.2.3 Table 2 gives values of f_i in J/C for photon energies between 0,1 MeV and 3,0 MeV for the elements listed (see annex B for the derivation of f_i values). The values of f_i are valid only under conditions of charged-particle equilibrium (see annex A for explanation).

Table 3 gives the values of f_m calculated with equation (2) for some of the commonly used materials for photon energy levels of 1 MeV and 0,1 MeV.

6.2.4 For various organic compounds irradiated at photon energies in the range between 0,5 MeV and 1,5 MeV, equation (2) for f_m may be approximated as:

$$f_m = (32{,}9a_H - 1{,}94a_F - 1{,}55a_{Cl} - 1{,}16a_P + 33{,}7)\ \text{J/C}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6.3 *Calcul de la dose absorbée dans un matériau donné à partir de celle absorbée dans un autre matériau*

6.3.1 Les facteurs numériques peuvent aussi être employés pour la comparaison de la dose absorbée par différents milieux, sans référence à l'exposition, à condition que cette dernière soit constante. Dans l'équation (B.2) de l'annexe B, on peut voir que, pour une exposition constante, le rapport entre les valeurs de f_m pour deux milieux quelconques est égal au rapport de leurs coefficients massiques d'absorption d'énergie $(\mu_{en}/\rho)_m$; donc, ce rapport est égal à celui des doses absorbées. La dose absorbée dans le milieu 1, D_1, peut être calculée à partir de la dose absorbée D_2 dans le milieu 2 en fonction des facteurs numériques f_1 et f_2 à l'aide de l'équation suivante:

$$D_1 = \frac{f_1}{f_2} \cdot D_2 \qquad (3)$$

6.3.2 Lorsqu'on emploie la dosimétrie chimique, le changement chimique mesuré peut être converti directement en dose absorbée. En utilisant le rapport des valeurs de f_m, il est possible de calculer la dose absorbée dans n'importe quel matériau à partir de la dose absorbée dans un dosimètre chimique si l'on connaît l'énergie des photons incidents (compte tenu des limites indiquées en 6.4).

6.3.3 Par exemple, si la mesure de la dose absorbée par un dosimètre de Fricke donne D_{Fricke} = 5 Gy pour une exposition de 1 h dans une source de rayonnement de ^{60}Co, et si l'on désire déterminer la dose absorbée par une éprouvette de polyéthylène dans la même source pendant 1 h, on procède de la manière suivante.

Le dosimètre de Fricke a pour fractions massiques: a_H = 0,11; a_O = 0,88 et a_S = 0,013. Le tableau 2 donne les valeurs de f_i pour une énergie de photons de 1,0 MeV. En portant les valeurs de a_i et de f_i dans l'équation (2), on obtient f_{Fricke} = 37,4 J/C. D'après le tableau 3, f_{PE} = 38,2 J/C et, d'après l'équation (3), la dose absorbée dans le polyéthylène est égale à:

$$D_{PE} = \frac{f_{PE}}{f_{Fricke}} \times D_{Fricke} = 1{,}02 \times 5 \text{ Gy} = 5{,}1 \text{ Gy}$$

6.3.4 De la même façon, les facteurs numériques indiqués au tableau 3 peuvent être utilisés pour convertir la dose absorbée par un matériau quelconque figurant dans le tableau en dose absorbée par tout autre matériau qui y figure à condition que l'énergie du rayonnement incident soit de 0,1 MeV ou comprise entre 0,5 MeV et 1,5 MeV.

6.4 *Distribution de dose en profondeur (limites)*

6.4.1 Etant donné que la distribution de dose absorbée dans l'éprouvette soumise à l'irradiation varie et qu'elle est fonction de l'épaisseur de l'éprouvette, de sa masse volumique ainsi que de l'énergie du rayonnement incident, il est nécessaire de fixer la variation de dose que l'on peut admettre lorsqu'il y a pénétration du rayonnement dans l'éprouvette. Les dispositifs d'irradiation utilisés le plus couramment ont des sources de rayonnement d'énergie comprise entre 0,5 MeV et 1,5 MeV. Si, pour une source ponctuelle, on fixe arbitrairement une limite de 25 % pour la différence entre la dose absorbée à l'entrée et la dose absorbée à la sortie de l'éprouvette (25 % d'atténuation à travers l'éprouvette), l'épaisseur de l'éprouvette est limitée à 2,8 cm pour un rayonnement de 0,5 MeV, et à 5,0 cm pour un rayonnement de 1,5 MeV, en admettant qu'il n'y a pas de facteur d'accroissement, une éprouvette de masse volumique égale à 1 g/cm^3 et un rayonnement unidirectionnel (voir annexe A). Pour d'autres géométries de source (par exemple les sources en plaque), ces épaisseurs seront significativement différentes.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6.3 *Calculation of absorbed dose in one material from that in another*

6.3.1 The numerical factors are also applicable for the comparison of absorbed dose in different media without reference to the exposure, provided the latter is held constant. From equation (B.2) in annex B, it is seen that, for constant exposure, the ratio between the f_m values for any two media equals the ratio between their mass energy-absorption coefficients $(\mu_{en}/\rho)_m$; hence the ratio equals the ratio between the absorbed doses. The absorbed dose in medium 1, D_1, can be calculated from the absorbed dose D_2 in medium 2 using the numerical factors f_1 and f_2 by the equation:

$$D_1 = \frac{f_1}{f_2} \cdot D_2 \qquad (3)$$

6.3.2 When chemical dosimetry is employed, the measured chemical change may be converted directly to the absorbed dose. By utilizing the ratio of f_m values, one can calculate the absorbed dose in any material from a knowledge of the absorbed dose in a chemical dosimeter when the incident photon energy is known (within the limitations stated in 6.4).

6.3.3 For example, if one measures an absorbed dose in the Fricke dosimeter to be D_{Fricke} = 5 Gy for a 1 h exposure in a ^{60}Co irradiator and it is desired to determine the absorbed dose in a specimen of polyethylene in the same irradiator for 1 h, one proceeds as follows.

The Fricke dosimeter has mass fractions of a_H = 0,11; a_O = 0,88, and a_S = 0,013, respectively. Table 2 gives the f_i values for 1,0 MeV photon energy. Substituting the a_i and f_i values in equation (2), one obtains f_{Fricke} = 37,4 J/C. From table 3, f_{PE} = 38,2 J/C and with equation (3) the absorbed dose in polyethylene is equal to:

$$D_{PE} = \frac{f_{PE}}{f_{Fricke}} \times D_{Fricke} = 1{,}02 \times 5 \text{ Gy} = 5{,}1 \text{ Gy}$$

6.3.4 In the same way, the numerical factors in table 3 may be used to convert the absorbed dose in any material listed to the absorbed dose in any other material listed provided the energy of the incident radiation is either 0,1 MeV or between 0,5 MeV and 1,5 MeV.

6.4 *Depth-dose distribution (limitations)*

6.4.1 Since the absorbed dose distribution through the specimen being irradiated will vary and is a function of the thickness of the specimen, its density, and the energy of the incident radiation, it is necessary to decide how much variation in dose one is willing to tolerate as the radiation penetrates the specimen. The most commonly used irradiation facilities have radiation sources in the energy range of 0,5 MeV to 1,5 MeV. If, for a point source, one arbitrarily sets a limit of 25 % for the difference between the absorbed dose at the front and rear of the specimen (25 % attenuation through the specimen), then the specimen thickness is limited to 2,8 cm for 0,5 MeV and 5,0 cm for 1,5 MeV radiation, assuming no build-up, a specimen of unit density equal to 1 g/cm^3 and unidirectional radiation (see annex A). For other source geometries (e.g. slab sources) these thicknesses will be significantly different.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6.4.2 La figure A.3, dans l'annexe A, donne une courbe de l'épaisseur en fonction de l'énergie pour une atténuation de 10 % et 25 % à travers une éprouvette de masse volumique égale à 1 g/cm^3 pour un rayonnement unidirectionnel. Les courbes se déplacent vers la gauche pour des matériaux de masse volumique plus élevée et vers la droite pour des matériaux de masse volumique plus faible. L'épaisseur exacte pour une atténuation de 10 % ou 25 % dans l'éprouvette est le quotient de la valeur obtenue à la figure A.3 par le rapport entre la densité d'électrons de l'éprouvette et 3,3 x 10^{23} g^{-1}. Etant donné que les courbes sont calculées à partir de la seule atténuation et que l'on néglige le facteur géométrique d'accroissement dans les éprouvettes de plus grande épaisseur, les courbes représentent l'atténuation maximale pour une énergie et une épaisseur données, et pour un rayonnement unidirectionnel. Un rayonnement non unidirectionnel donne une plus grande atténuation.

7 Méthodes d'estimation de la dose d'un rayonnement électronique

7.1 *Généralités*

7.1.1 Dans le présente article, des méthodes d'estimation de la dose délivrée par un faisceau d'électrons sont recommandées principalement pour une plage d'énergies des électrons allant de plusieurs centaines de keV à quelques MeV et pour une plage de doses allant du kGy au MGy.

7.1.2 Le champ de rayonnement d'un faisceau d'électrons est habituellement caractérisé par le spectre d'énergie des électrons et la densité de courant électronique, qui est la charge des électrons frappant une unité de surface du plan irradié par unité de temps. Dans un accélérateur d'électrons fonctionnant normalement, avec balayage du faisceau, la densité de courant électronique instantanée en un point donné du plan irradié varie périodiquement suivant la fréquence de balayage. En pratique, le champ de rayonnement est caractérisé par l'énergie moyenne des électrons transmis à travers la fenêtre du faisceau et l'espace libre, ainsi que par la moyenne de la densité de courant électronique calculée sur une période de balayage. L'énergie moyenne des électrons à la surface de l'éprouvette, E_m, est calculée à partir de l'équation suivante:

$$E_m = E_0 - \Delta E_w - \Delta E_a \qquad (4)$$

où E_0 est l'énergie initiale des électrons avant incidence sur la fenêtre du faisceau et ΔE_w et ΔE_a sont respectivement les pertes d'énergie moyennes des électrons transmis dans la fenêtre et l'espace d'air. Chaque perte d'énergie est approximativement égale au produit du pouvoir d'arrêt par collision et de l'épaisseur exprimée en g/cm^2, ou évaluée grossièrement à l'aide de l'équation (6) lorsque l'épaisseur est beaucoup plus petite que la portée des électrons.

7.1.3 La distribution de la densité de courant électronique moyenne dans le champ de rayonnement détermine approximativement la distribution latérale du débit de dose absorbée moyen dans le matériau. La distribution latérale dans la direction perpendiculaire à l'axe de balayage du champ de rayonnement a habituellement un profil gaussien. La largeur à mi-hauteur de la distribution gaussienne dépend de l'énergie des électrons, du numéro atomique et de l'épaisseur de la fenêtre, ainsi que de l'épaisseur de l'espace d'air entre la fenêtre et l'éprouvette à irradier. Dans le cas d'une irradiation stationnaire, l'uniformité de la dose latérale dépend principalement de la distribution de la densité de courant électronique moyenne. Dans le cas d'une irradiation avec un système transporteur se déplaçant à vitesse constante, la distribution de la dose latérale est uniforme dans le matériau si l'intensité du faisceau balayé est uniforme dans la direction de l'axe de balayage.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6.4.2 Figure A.3, in annex A, is a plot of thickness as a function of energy of a sample for 10 % and 25 % attenuation through a specimen of unit density equal to 1 g/cm^3 for unidirectional radiation. The curves will shift to the left for higher-density material and to the right for lower-density material. The accurate thickness for 10 % or 25 % attenuation in the specimen will be the value obtained from figure A.3 divided by the ratio of the electron density of the specimen to 3,3 × 10^{23} g^{-1}. Since the curves are calculated on the basis of attenuation only, and build-up in the thicker specimens is neglected, the curves represent a maximum attenuation for a given energy and thickness, and for unidirectional radiation. Non-unidirectional radiation results in larger attenuation.

7 Dose estimation methods for electron radiation

7.1 *General*

7.1.1 In this clause, dose estimation methods for electron beams are recommended mainly for an electron energy range of several hundred keV to several MeV and for a dose range of kGy to MGy.

7.1.2 The radiation field of an electron beam is usually characterized in terms of electron energy spectrum and electron current density, which is the electron charge impinging on a unit area of the irradiated plane per unit time. In the usual operation of an electron accelerator with a beam scanner, the instantaneous electron current density at the point of interest in the irradiated plane changes periodically depending on the scanning frequency. Practically, the radiation field is characterized in terms of the mean energy of electrons transmitted through the beam window and the air gap, and of the electron current density averaged over a scanning period. The mean electron energy at the surface of the sample, E_m, is evaluated by the following equation:

$$E_m = E_0 - \Delta E_w - \Delta E_a \qquad (4)$$

where E_0 is the initial electron energy before incidence on the beam window, and ΔE_w and ΔE_a are the mean energy losses of the transmitted electrons in the beam window and the air gap, respectively. Each energy loss is roughly equal to the product of the collision stopping power and the thickness expressed in g/cm^2, or roughly evaluated by equation (6) when the thickness is much smaller than the electron range.

7.1.3 The distribution of the mean electron current density in the radiation field determines approximately the lateral distribution of mean absorbed dose rate in the material. The lateral distribution in the direction normal to the scanning axis of the radiation field usually has a Gaussian profile. The full width at half maximum of the Gaussian distribution depends on the electron energy, the atomic number and the thickness of the beam window, and the air-gap distance from the beam window to the specimen to be irradiated. For stationary irradiation, the lateral dose uniformity in the material is determined mainly by the distribution of the mean electron current density. Irradiation using a conveyor system moving with constant velocity provides a uniform lateral dose distribution in the material, if the scanned beam intensity is uniform in the direction of the scanning axis.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

7.1.4 Dans le cas de l'irradiation stationnaire, on estime habituellement que la moyenne du débit de dose pendant la période de balayage est égale au débit de dose moyen. Deux facteurs compliquent cette estimation: i) le chevauchement du faisceau, ii) le mouvement de l'éprouvette sur un système transporteur.

7.1.5 L'uniformité de la dose dans tout le matériau est déterminée par la distribution de dose en profondeur qui habituellement ne dépend pas de la distribution de dose latérale dans la plaque de matériau. Une distribution typique de dose en profondeur dans un matériau homogène, obtenue avec les accélérateurs à électrons, est illustrée à la figure 1. La distribution de dose en profondeur comporte deux régions: une où la dose s'accumule et une région où la dose décroît. La portée utile, R_u, augmente de façon approximativement linéaire avec l'énergie de l'électron lorsqu'elle est supérieure à 1 MeV, mais la variation de la dose avec la profondeur est beaucoup plus importante dans les irradiations avec des faisceaux d'électrons qu'avec des rayons γ. Le rapport entre la dose à la surface et la dose maximale, ainsi que la portée utile, dépendent de plusieurs paramètres d'irradiation tels que l'énergie des électrons, la composition atomique du matériau, l'épaisseur de la fenêtre, l'épaisseur de l'espace d'air, etc. Dans les conditions d'irradiation typiques, le rapport est de 0,6 – 0,8 pour une énergie des électrons supérieure à 1 MeV.

7.1.6 La distribution de dose en profondeur dans le matériau par unité de fluence électronique peut être calculée comme un élément de la fonction de dépôt d'énergie, $I(z)$, dans une plaque d'absorbant à trois couches (fenêtre, couche d'air et éprouvette) [31], [17], lorsqu'une plaque de matériau est déplacée dans le champ de rayonnement, perpendiculairement à la direction de balayage du faisceau, en supposant qu'un faisceau d'électrons mono-énergétique et plan parallèle frappe perpendiculairement la fenêtre. Un exemple de résultats du calcul de $I(z')$ (z' = épaisseur totale des trois couches) pour une plaque de polyéthylène exposée à des électrons de 1 MeV est donné à la figure 2. La différence entre les valeurs de $I(z')$ pour les trois couches n'est pas équivalente à la différence entre les valeurs de la dose absorbée. La figure 3 compare les distributions relatives de dose en profondeur pour des matériaux isolants types, qui ont été mesurées dans les mêmes conditions d'irradiation. L'écart entre les isolants organiques types n'est pas négligeable. Il est dû à la différence entre les pouvoirs massiques d'arrêt par collision [7] et les pouvoirs massiques de diffusion multiple [16], qui dépend principalement de la teneur en hydrogène et du numéro atomique effectif <Z>.

7.2 *Méthodes recommandées pour la dosimétrie des faisceaux d'électrons*

7.2.1 Le tableau 1 donne une liste de méthodes absolues et relatives avec certaines de leurs caractéristiques principales. La liste recommandée de contrôle pour les méthodes de dosimétrie inclut les éléments suivants [12]:

1) énergie des électrons en relation avec l'épaisseur de l'éprouvette;

2) plage de doses à couvrir lors de l'essai;

3) débit de dose moyen en relation avec l'échauffement dans l'éprouvette et la durée d'irradiation permise pour l'essai;

4) uniformité de la dose dans l'éprouvette, requise pour l'essai:

   a) limite permise pour l'uniformité de la dose dans l'épaisseur,

   b) limite permise pour l'uniformité latérale de la dose dans l'éprouvette;

5) méthode d'irradiation, en tenant compte du nombre d'éprouvettes, de leur taille, de l'échauffement et de l'uniformité de la dose dans l'éprouvette (irradiation stationnaire ou par balayage);

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

7.1.4 For stationary irradiation, the dose rate averaged over the scanning period is usually estimated to be the mean dose rate. Two factors complicate its estimation: i) overlapping of the beam, ii) the movement of the sample on a conveyor system.

7.1.5 Dose uniformity throughout the material is determined by the depth-dose distribution, which is usually independent of the lateral dose distribution in the slab layer of the material. A typical depth-dose distribution in a homogeneous material obtained with electron accelerators is shown in figure 1. The depth-dose distribution is characterized by two depth regions: a dose build-up region and a dose declining region. The useful range R_u roughly increases linearly with electron energy when it is higher than 1 MeV, but the dose variation with depth is much larger in electron-beam irradiations than in γ-ray irradiations. The ratio of the surface dose to the peak dose and the useful range depend on several irradiation parameters such as electron energy, atomic composition of the material, thickness of the beam window, the air-gap distance, etc. In typical irradiating conditions, the ratio is 0,6 – 0,8 for electron energy higher than 1 MeV.

7.1.6 The depth-dose distribution in the material per unit electron fluence can be calculated as a part of energy deposition function, $I(z)$, in a three-layer slab absorber (beam window, air layer, and the specimen) [31], [17], when a slab-layer material is moved through the radiation field in the direction perpendicular to the direction of the beam scanning, assuming that a monoenergetic and plane-parallel electron beam impinges normally on the beam window. An example of calculated results of $I(z')$ (z' = total depth in three layers) for a slab layer of polyethylene exposed to 1 MeV electrons is shown in figure 2. The difference of $I(z')$ between the three layers is not equivalent to the difference of absorbed dose. Figure 3 shows a comparison of relative depth-dose distributions for typical insulating materials which were measured for the same irradiation conditions. The difference between typical organic insulators is not negligible, which is due to the difference of the mass collision stopping power [7] and the mass multiple scattering power [16] that depends mainly on the content of hydrogen and the effective atomic number <Z>.

7.2 *Recommended procedures for electron-beam dosimetry*

Table 1 gives a list of absolute and relative methods with some of their main characteristics. A recommended check list for dosimetry procedures includes the following [12]:

l) electron energy in relation to thickness of the specimen;

2) dose range to be covered in the test;

3) mean dose rate in relation to temperature rise in the specimen and irradiation time allowed for the test;

4) dose uniformity within the specimen required for the test:

   a) limit allowed for dose uniformity within the thickness,

   b) limit allowed for lateral dose uniformity within the specimen;

5) irradiation method, taking into consideration the number of specimens, their size, the temperature rise, and the dose uniformity in the specimen (stationary or scanned irradiation);

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6) exactitude et limite de précision requises pour la dosimétrie;

7) choix des dosimètres, d'après les critères de sélection suivants:

a) plage de doses mesurables,

b) épaisseur du dosimètre donnant une résolution spatiale définie de la mesure de la dose,

c) précision ou reproductibilité à des niveaux de dose spécifiés,

d) variation de la réponse dans les plages de débits de dose prévues,

e) variation limitée de la réponse, pendant et après l'irradiation, avec les conditions environnementales (effet de la lumière, de la température, de l'humidité, des gaz, du stockage),

f) permanence de la mesure ou stabilité de l'indication de dose,

g) existence d'une méthode de mesure étalon bien conçue et éprouvée,

h) simplicité de la méthode de manipulation et de lecture,

i) existence d'un lecteur de dose destiné exclusivement au dosimètre,

j) reproductibilité entre les différents lots,

k) coût;

8) autres paramètres d'irradiation, tels que courant de faisceau, largeur de balayage, épaisseur de l'espace d'air, vitesse du transporteur, contre-plaque pour l'irradiation, température, humidité, débit de dose instantané, effet de rétrodiffusion, incidence oblique des électrons, accumulation de charges dans l'isolant, etc.).

7.3 *Irradiation avec un faisceau d'électrons*

7.3.1 L'irradiation unilatérale d'une éprouvette de matériau isolant à l'aide d'un faisceau d'électrons est généralement réalisée de deux manières, illustrées à la figure 4, afin de tenir compte de la variation de dose dans l'éprouvette due à la distribution de dose en profondeur: a) avec l'éprouvette et une contre-plaque en matériau équivalent et b) avec l'éprouvette intercalée entre deux plaques en matériau équivalent. Il est recommandé que l'épaisseur totale de l'ensemble soit plus grande que la portée des électrons. Une irradiation bilatérale est effectuée pour des éprouvettes épaisses en comparaison de la portée des électrons.

7.3.2 La tension d'accélération est essentiellement choisie de façon à obtenir l'uniformité de dose requise dans l'épaisseur de l'éprouvette. Le courant de faisceau et les autres conditions d'irradiation telles que l'épaisseur de l'espace d'air, les paramètres de balayage du faisceau, les paramètres mécaniques de balayage du système transporteur, etc. sont habituellement choisis de façon que l'élévation de température dans l'éprouvette pendant l'irradiation soit minimale et que le rayonnement soit utilisé de façon optimale.

7.4 *Méthodes de mesure des distributions de dose en profondeur*

7.4.1 La mesure des distributions de dose en profondeur dans les matériaux isolants choisis est la mesure la plus courante en dosimétrie de faisceau électronique. Il y a deux méthodes fondamentales de mesure de la dose en profondeur à l'aide de films dosimétriques dans une pile de matériaux isolants et de matériaux isolants en forme de coin, chaque méthode ayant plusieurs variantes, comme le montre la figure 5.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

6) accuracy and precision limit required in the dosimetry;

7) selection of dosimeters using the following criteria:

a) measurable dose range,

b) thickness of dosimeter giving a defined spatial resolution of the dose reading,

c) precision or reproducibility at specified dose levels,

d) variation of response within the expected dose-rate ranges,

e) limited variation of response during and after irradiation with environmental conditions (effect of light, temperature, humidity, gases, storage),

f) permanence of reading or stability of dose indication,

g) availability of well-developed and proven standard measurement procedure,

h) simplicity of handling and read-out procedure,

i) availability of dose reader for exclusive use of the dosimeter,

j) reproducibility between different batches,

k) cost;

8) other irradiation parameters (beam current, scan width, air-gap distance, conveyor speed, backplate for irradiation, temperature, humidity, instantaneous dose rate, backscattering effect, oblique electron incidence, charge accumulation in the insulator, etc.).

7.3 *Electron-beam irradiation*

7.3.1 One-sided electron-beam irradiation of a specimen of the insulating materials is usually conducted in two sample arrangements, shown in figure 4, taking into consideration the dose variation within the specimen due to the depth-dose distribution: a) specimen and a backplate of the equivalent material; and b) specimen sandwiched between two plates of the equivalent material. The total thickness of the irradiation set-up should be greater than the electron range. Two-sided irradiation is conducted for specimens which are thick compared with the electron range.

7.3.2 Acceleration voltage is basically chosen to satisfy the requirement of dose uniformity within the specimen thickness. Beam current and other irradiating conditions such as air-gap distance, beam-scanning parameters, mechanical scanning parameters of the conveyor system, etc. are usually chosen to minimize temperature rise in the specimen during irradiation and to optimize the radiation utilization efficiency.

7.4 *Methods for measuring depth-dose distributions*

7.4.1 Measurement of depth-dose distributions in the insulating materials of interest is the most typical practice in electron-beam dosimetry. There are two basic methods for depth-dose measurement using film dosimeters in a stack of insulating materials and wedge-shaped insulating materials, each with a few variations as shown in figure 5.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

7.4.2 Dans la méthode de l'empilement uniforme (figure 5a), les films dosimétriques eux-mêmes sont empilés comme les matériaux isolants équivalents sur une hauteur supérieure à la portée des électrons. Cette méthode donne la distribution de dose en profondeur dans le matériau dosimétrique; elle peut être utilisée avec les matériaux qui ont une composition similaire à celle du film. C'est probablement la seule méthode de mesure de la distribution de dose en profondeur pour les faisceaux électroniques de faible énergie (< 300 keV).

7.4.3 Dans la méthode de l'empilement alterné (figure 5b), les films dosimétriques et les plaques d'un matériau isolant équivalent ayant une composition similaire à celle du film sont empilés alternativement. Cette méthode peut être utilisée avec des faisceaux d'électrons ayant une énergie relativement élevée.

7.4.4 Dans la méthode d'insertion décalée (figure 5c), de petits morceaux de film dosimétrique sont insérés dans la pile de matériaux isolants équivalents de telle sorte que les films dosimétriques ne se superposent pas.

7.4.5 Lorsque les matériaux isolants empilés sont exposés uniformément à des faisceaux d'électrons dans la direction latérale, la dose absorbée D_i dans les matériaux isolants est donnée par l'équation:

$$D_i = f \cdot D_d = \frac{(S/\rho)_{col,i}}{(S/\rho)_{col,d}} D_d \qquad (5)$$

où D_d est la dose absorbée dans le matériau dosimétrique, $(S/\rho)_{col,i}$ et $(S/\rho)_{col,d}$ sont respectivement les moyennes des pouvoirs d'arrêt massiques par collision des matériaux isolants et du matériau dosimétrique, calculées sur le spectre approximatif d'énergie des électrons pour les deux matériaux [24].

Les tableaux 4 et 5 montrent les propriétés fondamentales de quelques matériaux isolants importants et d'autres matériaux, ainsi que le pouvoir d'arrêt massique des électrons dans les matériaux. Le spectre d'énergie des électrons pour les films dosimétriques insérés dépend de la profondeur dans la pile de matériaux isolants et il n'est généralement pas facile d'évaluer le spectre à chaque profondeur. Néanmoins, le rapport f ne varie que légèrement avec l'énergie sur la plage d'énergies utilisée dans les essais de tenue aux rayonnements des matériaux isolants, comme le montre le tableau 5. Une estimation grossière de l'énergie moyenne du spectre électronique dans le matériau dosimétrique est suffisante pour évaluer le rapport f avec la précision voulue. L'énergie moyenne des électrons, E_n, en fonction de la profondeur dans des matériaux isolants types équivalents à l'eau, est calculée approximativement à l'aide de l'équation:

$$E_n = E_m (1 - z/R_{ex}) \qquad (6)$$

où E_m est l'énergie des électrons incidents (MeV), z est la profondeur dans les matériaux isolants (g/cm^2) et R_{ex} la portée des électrons extrapolée (g/cm^2) qui est définie pour les courbes de transmission électronique en incidence normale sur les matériaux isolants [30]. Les portées des électrons extrapolées sont données dans le tableau 6 pour plusieurs matériaux importants en fonction de l'énergie des électrons. Les pouvoirs d'arrêt massiques de matériaux composites et de composés peuvent être trouvés dans les références [12] et [7].

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

7.4.2 In the uniform stack method (see figure 5a), dosimeter films themselves are stacked as the equivalent insulating materials up to a thickness greater than the electron range. This method gives the depth-dose distribution in the dosimeter material, and can be applied for materials with a composition similar to the film. This may be the only method to measure the depth-dose distribution for low-energy electron beams (< 300 keV).

7.4.3 In the alternate stack method (see figure 5b), dosimeter films and slab layers of an equivalent insulating material that has a composition similar to the film are stacked alternately. This method may be applied for relatively high-energy electron beams.

7.4.4 In the shift insertion method (see figure 5c), small chips of dosimeter films are inserted into the stack of equivalent insulating materials in such a way that the dosimeter films do not overlap.

7.4.5 When the stacked insulating materials are uniformly exposed to electron beams in the lateral direction, the absorbed dose D_i in the insulating materials of interest is given by the formula:

$$D_i = f \cdot D_d = \frac{(S/\rho)_{col,i}}{(S/\rho)_{col,d}} D_d \qquad (5)$$

where D_d is the absorbed dose in the dosimeter material, $(S/\rho)_{col,i}$ and $(S/\rho)_{col,d}$ are the electron mass collision stopping power of the insulating materials and the dosimeter material, respectively, averaged over the approximate electron energy spectrum for the two materials [24].

Tables 4 and 5 show the basic properties of some important insulating materials and of other materials, and the mass stopping power for electrons in the materials. The electron energy spectrum for the inserted dosimeter films depends on the depth in the stacked insulating materials and generally it is not easy to evaluate the spectrum at each depth. However, the ratio f is only slightly energy dependent over the energy range of interest in radiation resistance tests of insulating materials as shown in table 5. Rough estimation of the average energy of the electron spectrum in the dosimeter material of interest provides sufficient information to evaluate the ratio f with appropriate accuracy. The mean electron energy, E_n, as a function of depth in typical water-equivalent insulating materials, is roughly estimated by the formula:

$$E_n = E_m (1 - z/R_{ex}) \qquad (6)$$

where E_m is the energy of incident electrons (MeV), z the depth in the insulating materials (g/cm^2), and R_{ex} the extrapolated electron range (g/cm^2) which is defined for electron transmission curves normally incident on the insulating materials [30]. The extrapolated electron ranges are listed for several important materials in table 6 as a function of electron energy. Mass stopping powers for composite materials and compounds can be found in reference [12] and [7].

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

7.4.6 Dans la méthode du coin linéaire (voir figure 5d), un film dosimétrique est intercalé entre deux matériaux isolants équivalents, dont celui qui est placé le plus haut a la forme d'un coin linéaire. La distribution de dose en profondeur dans le matériau dosimétrique est mesurée à l'aide d'une trace densito-spectrophotométrique sur le film dosimétrique irradié. La distribution de dose en profondeur dans le matériau isolant est obtenue par conversion de la dose à l'aide de l'équation (5).

7.4.7 Dans la méthode du coin en escalier (figure 5e), le matériau isolant supérieur du sandwich a la forme d'un coin en escalier. La méthode du coin linéaire a deux inconvénients pratiques, en particulier avec la dosimétrie de faisceau électronique d'énergie relativement faible. En premier lieu, il est difficile de préparer un coin linéaire de faible dimension avec un angle aigu et, en second lieu, la détermination de la profondeur absolue dans les matériaux isolants est entachée d'incertitude. Le coin en escalier à angle aigu peut être fabriqué avec plusieurs films en matériau isolant surperposés de différentes longueurs. Bien que l'on obtienne un profil discontinu de dose en profondeur, exactement comme une fonction en escalier, la distribution est déterminée en fonction de la profondeur précise dans les matériaux isolants.

7.4.8 Un autre problème réside dans l'accumulation de charges dans les coins épais induite par l'irradiation par un faisceau d'électrons. Cette accumulation de charges donne naissance à un champ électrique interne de grande intensité qui peut empêcher la pénétration des électrons incidents [11]. L'accumulation de charges est beaucoup moins grande dans les films empilés que dans une masse de matériau isolant de même épaisseur en raison des fuites électriques relativement importantes à la surface des films.

--`,,`,-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

7.4.6 In the linear-wedge method (see figure 5d), a dosimeter film is sandwiched between two equivalent insulating materials, the upper of which is in the shape of a linear wedge. The depth-dose distribution in the dosimeter material is measured by a densito-spectrophotometric trace on the irradiated dosimeter film. The depth-dose distribution in the insulator is given by dose conversion with equation (5).

7.4.7 In the stepped wedge method (see figure 5e), the upper insulating material of the sandwich is in the shape of a stepped wedge. The linear wedge method has two practical disadvantages especially in relatively low-energy electron-beam dosimetry; one is the difficulty in preparing a small linear wedge with an acute angle, and the other is the uncertainty in determining absolute depth in the insulating materials. The stepped wedge with an acute angle can be prepared using a number of insulating material films of different lengths in layers. Although it results in a discontinuous depth-dose profile just like a step function, the distribution is determined as a function of accurate depth in the insulating materials.

7.4.8 Another problem is charge accumulation in thick wedges induced by electron-beam irradiation, giving rise to strong internal electric field which may suppress the penetration of incident electrons [11]. The charge accumulation is much less in stacked films than in the bulk insulating materials of the same thickness, because of a relatively large amount of electric leakage along the surface of the films.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Tableau 1 – Méthodes courantes recommandées pour la mesure de la dose absorbée

Méthode	Type de lecture	Dose (Gy)	Débit de dose (Gy/s)	Energie	Température	Observations	Références
Méthodes absolues							
Calorimètres	Température	10^{-1} à 10^{4}	De 3×10^{-3} à environ $1,5 \times 10^{4}$	Indépendante de l'énergie	Aucun effet	Type adiabatique tout à fait approprié. Haute précision avec des capteurs à thermistance. Lecture électrique directe bien appropriée aux champs de grande intensité	[4] [27]
Chambre d'ionisation à cavité	Courant électrique		D'une valeur très faible à 3×10^{2}	Spécifiée par le fabricant	Aucun effet	Dispositifs disponibles dans le commerce. Lecture électrique directe. Méthode très sensible appropriée à la mesure de faibles doses et de faibles débits de dose	[9] [33] [35]
Méthodes relatives							
Conversion chimique							
Sulfate ferreux (dosimètre de Fricke)	Spectrophotométrie	4×10^{-2} à 4×10^{2}	Jusqu'à 30	Indépendante de l'énergie dans la plage 0,66 MeV à 16 MeV	Faible effet dans la plage 0 °C à 50 °C pendant l'irradiation, très sensible pour le relevé spectrophotométrique	Facile à préparer en laboratoire	[4] [1] [9]
Sulfate cérique	Spectrophotométrie	5×10^{2} à 10^{7}	Jusqu'à 10^{7}	Similaire à celui du sulfate ferreux	Petit effet	Sensible aux impuretés	
Evolution de gaz							
Polyéthylène	Dégagement de gaz hydrogène	10^{2} à 10^{7}	De 3×10^{-3} à 3×10^{2}	Indépendante	En dessous de 80 °C	Lecture simple	

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Table 1 – Current methods recommended for measuring absorbed dose

Method	Type of read-out	Dose range (Gy)	Dose-rate range (Gy/s)	Energy	Temperature	Comments	Reference
Absolute methods							
Calorimeters	Temperature	10^{-1} to 10^{4}	From 3×10^{-3} to about $1,5 \times 10^{4}$	Independent of energy	No effect	Adiabatic type most acceptable. High precision with thermistor sensors. Direct electric reading well suited for high-intensity fields	[4] [27]
Cavity-type ionization chamber	Electric current		From very low to 3×10^{2}	Specified by manufacturer	No effect	Commercially available devices. Direct electric reading. Very sensitive method well suited for low-dose and dose-rate measurements	[9] [33] [35]
Relative methods							
Chemical conversion							
Ferrous sulfate (Fricke dosimeter)	Spectrophotometry	4×10^{-2} to 4×10^{2}	Up to 30	Independent of energy in the range of 0,66 MeV to 16 MeV	Small effect in the range 0 °C to 50 °C during irradiation, very sensitive for spectrophotometric read-out	Easily prepared in the laboratory	[4] [1] [9]
Ceric sulfate	Spectrophotometry	5×10^{2} to 10^{7}	Up to 10^{7}	Similar to ferrous sulfide	Small effect	Sensitive to impurities	
Gas evolution							
Polyethylene	Hydrogen gas yield	10^{2} to 10^{7}	From 3×10^{-3} to 3×10^{2}	Independent	Below 80 °C	Easy read-out	

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Tableau 1 – Méthodes courantes recommandées pour la mesure de la dose absorbée *(suite)*

Méthode	Type de lecture	Dose (Gy)	Débit de dose (Gy/s)	Energie	Température	Observations	Références
Densité optique							
Polyméthacrylate de méthyle, coloré ou non	Spectrophotométrie	2×10^3 à 3×10^4	Au moins jusqu'à 100		Léger effet		[5] [36]
Film radiochromique	Spectrophotométrie	10^3 à 10^6	Au moins jusqu'à 10^4		Aucun effet jusqu'à 50 °C	Sensible à la lumière UV	[18] [22] [23]
Film au triacétate de cellulose	Spectrophotométrie	10 à 3×10^5	Au moins jusqu'à 10^7		Aucun effet		[34] [32]
Photoluminescence							
Verre au phospate activé à l'argent	Luminescence	10^{-4} à 10^2	Au moins jusqu'à 10^7	Réponse de 10 à 30 fois plus élevée pour une exposition de 30 keV à 1,2 MeV, suivant le type et la taille des morceaux de verre utilisés. Amélioré par un écran	On doit appliquer des facteurs de correction lorsque la température diffère de 25 °C	Appareils de lecture et choix de verres disponibles dans le commerce	[3] [9] [6]
Thermoluminescence							
Fluorure de lithium	Luminescence	10^{-4} à 3×10^2	Au moins jusqu'à 5×10^2	Réponse environ 1,5 fois plus élevée pour une exposition à 50 keV qu'à 1,2 keV	Pointe de luminescence stable dans le temps à 210 °C	Appareils de lecture et matériaux de qualité dosimétrique disponibles dans le commerce. Ne convient pas aux champs mixtes de rayonnements gamma et neutronique	[19] [9] [26] [8] [6]
Radicaux libres							
Alanine	Spectrométrie RPE	5×10^{-1} à 10^6			Léger effet	Très bonnes stabilité et reproductibilité	[28] [29] [20]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Table 1 – Current methods recommended for measuring absorbed dose *(continued)*

Method	Type of read-out	Dose range (Gy)	Dose-rate range (Gy/s)	Energy	Temperature	Comments	Reference
Optical density							
Polymethylmethacrylate, dyed and undyed	Spectrophotometry	2×10^3 to 3×10^4	Up to 100		Small effect		[5] [36]
Radiochromic film	Spectrophotometry	10^3 to 10^6	Up to 10^4 at least		No effect up to 50 °C	Sensitive to UV light	[18] [22] [23]
Cellulose triacetate film	Spectrophotometry	10 to 3×10^5	Up to 10^7 at least		No effect		[34] [32]
Photoluminescence							
Silver-activated phosphate glass	Luminescence	10^{-4} to 10^2	Up to 10^7 at least	10 to 30 times greater response for exposure at 30 keV to 1,2 MeV, depending on type and size of glass pieces used. Improved by shielding	Must apply correction factors for exposure deviations from 25 °C	Read-out instruments and selection of glasses available commercially	[3] [9] [6]
Thermoluminescence							
Lithium fluoride	Luminescence	10^{-4} to 3×10^2	Up to 5×10^2 at least	Approximately 1,5 times greater response for exposure at 50 keV than at 1,2 keV	Time-stable glow peak at 210 °C	Read-out instruments and dosimetry-grade material are available commercially. Unsuitable for mixed γ and neutron fields	[19] [9] [26] [8] [6]
Free radicals							
Alanine	ESR spectrometry	5×10^{-1} to 10^6			Small effect	Very good stability and reproducibility	[28] [29] [20]

Tableau 2 – Facteurs numériques f_i (dose absorbée par unité d'exposition) en J/C, pour le calcul de la dose absorbée lors de l'exposition, pour les éléments entrant dans la composition des matériaux isolants – calculés à partir de l'équation (B4) de l'annexe B
(Pour utiliser les anciennes unités CGS, rad et roentgen, voir la note de l'annexe B).

Table 2 – Numerical factors f_i (absorbed dose per unit exposure) in J/C, for calculating the absorbed dose from exposure for elements included in insulating materials – Calculated with equation (B4) in annex B
(For using the old CGS units, rad and roentgen see note in annex B)

Energie des photons *Photon energy* (MeV)	H	C	N	O	F	Si	S	Cl	P
0,10	59,3	31,1	32,4	33,8	34,7	64,7	87,2	99,2	72,9
0,15	64,7	33,0	33,4	33,8	32,7	41,1	47,3	48,8	42,2
0,20	66,3	33,6	33,6	34,1	32,3	36,7	38,8	38,8	36,7
0,30	66,7	33,7	33,8	33,8	31,9	34,6	35,2	36,8	33,9
0,40	66,7	33,6	33,7	33,7	31,9	34,0	34,3	33,1	32,0
0,50	66,7	33,7	33,7	33,7	31,9	33,6	34,0	32,7	32,7
0,60	66,7	33,7	33,7	33,7	32,0	33,7	33,8	32,5	32,7
0,80	66,7	33,6	33,7	33,7	31,9	33,6	33,4	32,3	32,7
1,0	66,7	33,6	33,7	33,7	31,9	33,4	33,7	32,1	32,4
1,5	66,7	33,7	33,7	33,7	31,8	33,7	33,6	31,9	32,4
2,0	66,7	33,7	33,7	33,7	31,9	33,8	33,8	32,4	32,8
3,0	65,1	33,5	33,7	33,8	32,2	34,5	34,5	33,5	33,5

Exemple d'application

Supposons que l'on doive calculer le facteur numérique f_{PTFE} correspondant à une énergie de photons de 1 MeV pour le polytétrafluoréthylène. Le polytétrafluoréthylène (PTFE) a pour formule empirique $(CF_2)_n$ (en négligeant les extrémités de chaîne, la non-saturation et les impuretés); par conséquent, les fractions massiques de C et F sont respectivement $a_C = 0,24$ et $a_F = 0,76$.

Le tableau 2 donne $f_C = 33,6$ J/C et $f_F = 31,9$ J/C pour des photons de 1 MeV. En introduisant ces valeurs dans l'équation (2), on obtient:

$$f_{PTFE} = (0,24 \times 33,6) + (0,76 \times 31,9) = 32,3 \text{ J/C}$$

Example of application

For polytetrafluorethylene, the numerical factor f_{PTFE} for 1 MeV photon energy shall be calculated. Polytetrafluoroethylene (PTFE) has the approximated formula $(CF_2)_n$ (disregarding chain ends, unsaturation, and impurities); hence, the mass fractions of C and F are $a_C = 0,24$ and $a_F = 0,76$ respectively.

Table 2 gives $f_C = 33,6$ J/C and $f_F = 31,9$ J/C for 1 MeV photons. Substituting these values in equation (2) gives:

$$f_{PTFE} = (0,24 \times 33,6) + (0,76 \times 31,9) = 32,3 \text{ J/C}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Tableau 3 – Facteurs numériques f_m (dose absorbée par unité d'exposition) en J/C, pour le calcul de la dose absorbée lors de l'exposition, pour quelques matériaux isolants importants et d'autres composés
(Pour utiliser les anciennes unités CGS, rad et roentgen, voir la note de l'annexe B).

Table 3 – Numerical factors f_m (absorbed dose per unit exposure) in J/C, for calculating the absorbed dose from exposure for some important insulating materials and other compounds
(For using the old CGS units, rad and roentgen see note in annex B)

Matériau/*Material*		f_m (J/C)	
		1 Mev	0,1 MeV
Polystyrène/Polystyrene	$(CH)_n$	36,4	33,3
Polyéthylène/Polyethylene	$(CH_2)_n$	38,2	34,9
Polyamide-6	$(C_6H_{11}ON)_n$	36,8	34,5
Polydimethyl siloxane	$(C_2H_6OSi)_n$	36,0	47,0
Polysulfure d'éthylène/ Ethylene polysulfide	$(C_2H_4S_4)_n$	34,9	77,9
Copolymère de chlorure de vinylidène/ Vinylidene chloride copolymer	$(C_4H_5Cl_3)_n$	33,7	77,5
Polytétrafluoroéthylène/ Polytetrafluoroethylene	$(CF_2)_n$	32,3	33,8
Polychlorotrifluoroéthylène/ Polychlorotrifluoroethylene	$(C_2F_3Cl)_n$	32,2	53,5
Polychlorure de vinyle/Polyvinyl chloride	$(C_2H_3Cl)_n$	34,5	70,5
Polychlorure de vinylidène/ Polyvinylidene chloride	$(C_2H_2Cl_2)_n$	33,3	81,4
Polyvinyl pyrrolidone	$(C_6H_9NO)_n$	36,4	33,7
Polycarbazol de vinyle/ Polyvinyl carbazole	$(C_{14}H_{11}N)_n$	35,7	32,9
Polyacétate de vinyle/ Polyvinyl acetate	$(C_4H_6O_2)_n$	36,0	34,1
Polyméthacrylate de méthyle/ Polymethyl methacrylate	$(C_5H_8O_2)_n$	36,4	34,1
Phosphate de tributyle/ Tributyl phosphate	$(C_4H_9)_3PO_4$	36,8	39,5
Dosimètre de Fricke/Fricke dosimeter	–	37,4	37,2

NOTE – Les données correspondant à 1 MeV sont utilisables dans la plage de 0,5 MeV à 1,5 MeV environ. Ces données peuvent aussi être utilisées pour les rayons gamma émis par ^{60}Co et ^{137}Cs, et pour des rayons X de 2 MeV à 3 MeV.

NOTE – The data for 1 MeV are valid in the range from 0,5 MeV to 1,5 MeV approximately. These data may also be used for ^{60}Co and ^{137}Cs γ-rays and for 2 MeV to 3 MeV X-rays.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Tableau 4 – Propriétés fondamentales de quelques matériaux isolants importants et d'autres matériaux

Table 4 – Basic properties of some important insulating materials and other materials

Matériau *Material*	Formule chimique *Chemical formula*	<Z> = [1]	<A> = [2]	Masse volumique *Density* (g/cm^3)
Carbone (graphite)/ Carbon (graphite)	C	6	12,011	2,25
Eau/Water	H_2O	7,22	13,00	1,00
Air (sec)/Air (dry)		7,38	14,77	$1,205 \times 10^{-3}$
Polyamide (Nylon-6)	$(C_6H_{11}ON)_n$	5,92	10,80	1,14
Polyéthylène/Polyethylene	$(CH_2)_n$	5,28	9,26	0,94
Polyéthylène téréphtalate/ Polyethyleneterephthalate	$(C_{10}H_8O_4)_n$	6,46	12,41	1,40
Polyméthacrylate de méthyle/ Polymethylmethacrylate	$(C_5H_8O_2)_n$	6,24	11,56	1,19
Polystyrène/Polystyrene	$(CH)_n$	5,61	10,44	1,06
Polytétrafluoroéthylène/ Polytetrafluoroethylene	$(CF_2)_n$	8,28	17,25	2,20
Polychlorure de vinyle/ Polyvinylchloride	$(C_2H_3Cl)_n$	12,00	23,43	1,30
Polypropylène/Polypropylene	$(C_3H_5)_n$	5,39	10,66	0,90
Polycarbonate	$(C_{16}H_{14}O_3)_n$	6,10	12,16	1,20

NOTES

1 Numéro atomique équivalent

2 Masse atomique équivalente

Les grandeurs <Z> et <A> pour un composé ou un mélange sont données par

$$<Z> = \Sigma_j W_j Z_j \text{ and } <A> = <Z> (\Sigma_j W_j Z_j/A_j)^{-1}$$

où W_j, Z_j et A_j sont respectivement la masse, le numéro atomique et la masse atomique du $j^{ième}$ constituant atomique.

NOTES

1 Effective atomic number

2 Effective atomic weight

The quantities <Z> and <A> of a compound or a mixture are given by

$$<Z> = \Sigma_j W_j Z_j \text{ and } <A> = <Z> (\Sigma_j W_j Z_j/A_j)^{-1}$$

where W_j, Z_j and A_j are the fraction by weight, the atomic number, and the atomic weight of the jth atomic constituent, respectively.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Tableau 5 – Pouvoir d'arrêt massique par collision pour les électrons dans quelques isolants importants et dans d'autres matériaux (MeV · g^{-1} · cm^2) [7]

Table 5 – Mass collision stopping power for electrons in some important insulators and other materials (MeV · g^{-1} · cm^2) [7]

Energie des électrons *Electron energy* (MeV)	Carbone *Carbon*	Eau *Water (liq.)*	Air (sec) *Air (dry)*	Polyamide (Nylon –6)	Polyéthylène *Polyethylene*	Polyéthylène-téréphtalate *Polyethylene-terephthalate*	Polyméthacrylate de méthyle *Polymethylmethacrylate*	Polystyrène *Polystyrene*	Polytétrafluoroéthylène *Polytetrafluoroethylene*	Polychlorure de vinyle *Polyvinylchloride*	Polypropylène *Polypropylene*	Polycarbonate
0,1	3,671	4,115	3,633	4,152	4,384	3,832	4,006	4,034	3,421	3,604	4,287	3,920
0,15	2,883	3,238	2,861	3,263	3,443	3,015	3,152	3,172	2,697	2,843	3,367	3,084
0,2	2,482	2,793	2,470	2,813	2,967	2,603	2,719	2,735	2,330	2,457	2,902	2,660
0,3	2,083	2,355	2,084	2,369	2,497	2,195	2,292	2,305	1,968	2,077	2,443	2,242
0,5	1,782	2,034	1,802	2,032	2,142	1,889	1,957	1,984	1,699	1,793	2,098	1,930
0,7	1,673	1,917	1,706	1,906	2,008	1,776	1,856	1,864	1,600	1,690	1,969	1,813
1,0	1,609	1,849	1,661	1,832	1,930	1,710	1,788	1,794	1,534	1,633	1,893	1,748
1,5	1,584	1,822	1,661	1,801	1,895	1,684	1,760	1,766	1,522	1,615	1,860	1,719
2,0	1,587	1,824	1,684	1,802	1,895	1,686	1,762	1,768	1,525	1,623	1,861	1,721
3,0	1,611	1,846	1,740	1,823	1,917	1,709	1,784	1,791	1,546	1,653	1,883	1,744
5,0	1,658	1,892	1,833	1,870	1,965	1,756	1,832	1,839	1,589	1,708	1,931	1,791
10,0	1,730	1,968	1,979	1,946	2,042	1,831	1,908	1,916	1,657	1,791	2,008	1,867

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Tableau 6 – Portée extrapolée des électrons[1)] dans quelques isolants importants et dans d'autres matériaux ($g \cdot cm^{-2}$) [30]

Table 6 – Extrapolated range for electrons [1)] in some important insulators and other materials ($g \cdot cm^{-2}$) [30]

Energie des électrons *Electron energy* (MeV)	Carbone *Carbon*	Aluminium	Eau *Water*	Polyamide (Nylon-6)	Poly-éthylène *Poly-ethylene*	Polyméthylène téréphtalate *Polethylene-terephthalate*	Polyméthacrylate de méthyle *Polymethyl-methacrylate*
0,1	1,39 E–2	1,30 E–2	1,23 E–2	1,26 E–2	1,17 E–2	1,23 E–2	1,28 E–2
0,15	2,80 E–2	2,54 E–2	2,45 E–2	2,54 E–2	2,36 E–2	2,65 E–2	2,57 E–2
0,2	4,51 E–2	4,03 E–2	3,93 E–2	4,10 E–2	3,83 E–2	4,28 E–2	4,15 E–2
0,3	8,60 E–2	7,53 E–2	7,45 E–2	7,81 E–2	7,32 E–2	8,23 E–2	7,89 E–2
0,5	1,83 E–1	1,58 E–1	1,58 E–1	1,66 E–1	1,56 E–1	1,73 E–1	1,68 E–1
0,7	2,91 E–1	2,49 E–1	2,51 E–1	2,65 E–1	2,49 E–1	2,75 E–1	2,67 E–1
1,0	4,63 E–1	3,96 E–1	3,98 E–1	4,21 E–1	3,96 E–1	4,37 E–1	4,25 E–1
2,0	1,07 E+0	9,12 E–1	9,18 E–1	9,69 E–1	9,12 E–1	1,01 E+0	9,78 E–1
3,0	1,68 E+0	1,44 E+0	1,45 E+0	1,53 E–1	1,44 E+0	1,59 E+0	1,54 E+0
5,0	2,92 E+0	2,52 E+0	2,52 E+0	2,66 E+0	2,50 E+0	2,76 E+0	2,68 E+0
10,0	6,01 E+0	5,18 E+0	5,18 E+0	5,47 E+0	5,14 E+0	5,63 E+0	5,52 E+0

1) Profondeur de pénétration au point où la tangente au point de pente maximale sur la partie décroissante presque rectiligne de la courbe de transmission des électrons mono-énergétiques frappant perpendiculairement la plaque de matériau absorbant rencontre l'axe des X (transmission = 0).

1) The penetration depth at the point where the tangent at the steepest point on the almost straight descending portion of the transmission curve for monoenergetic electrons normally incident on the slab-absorber meets the X-axis (transmission = 0).

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

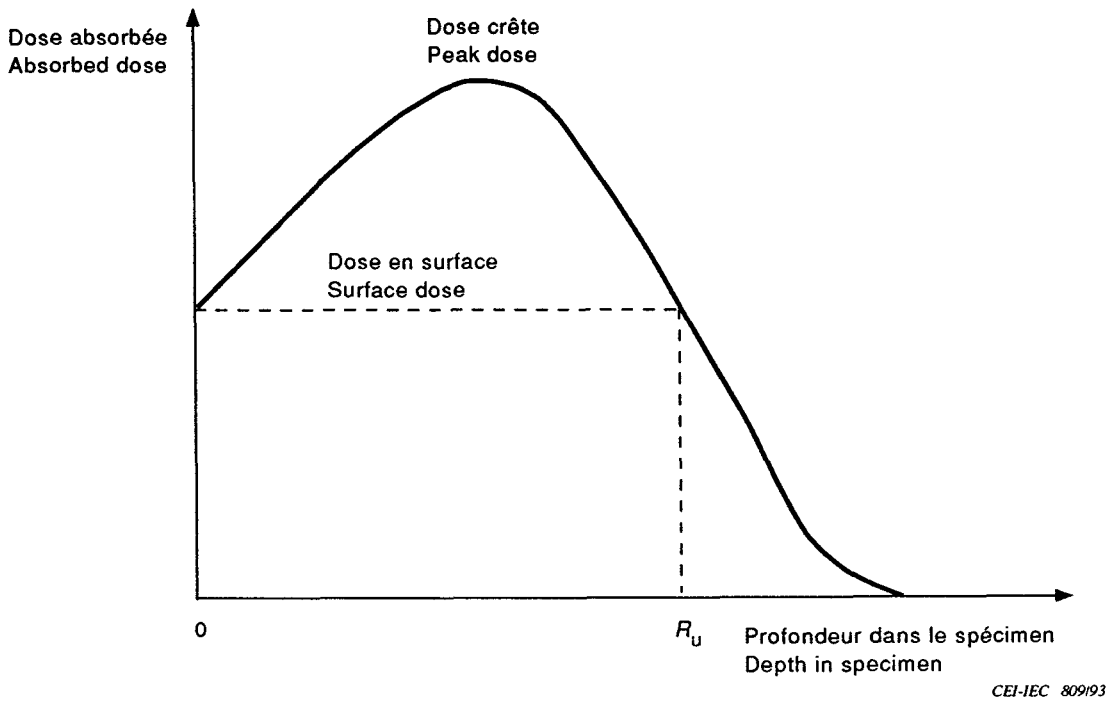


Figure 1 – Distribution type de dose en profondeur dans un matériau homogène obtenue avec des accélérateurs à électrons pour le traitement par rayonnement (tension d'accélération > 0,5 MV, R_u = portée utile)

A typical depth-dose distribution in a homogeneous material obtained with electron accelerators for radiation processing (acceleration voltage > 0,5 MV, R_u = useful range)

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

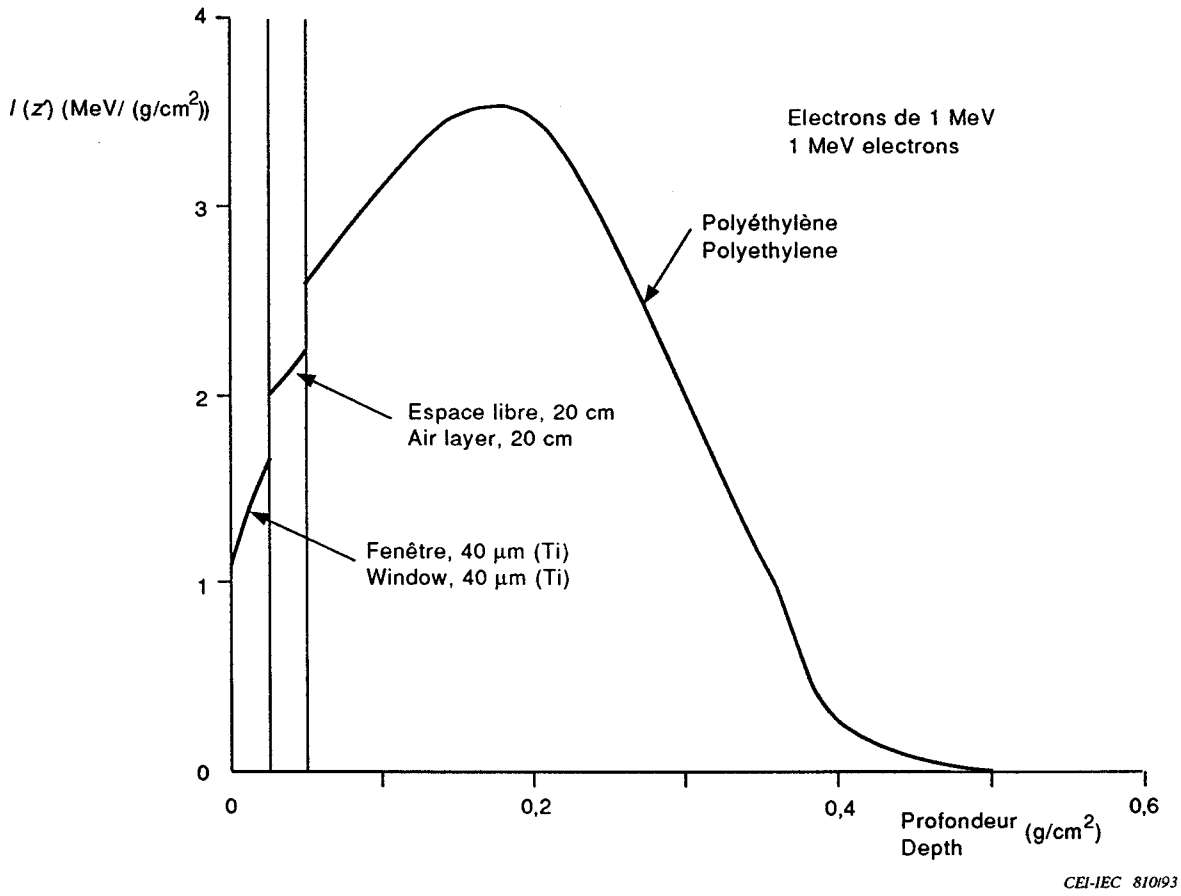


Figure 2 – Exemple de résultats calculés de la fonction de dépôt d'énergie, $I(z')$, pour une plaque de polyéthylène exposée à un faisceau d'électrons de 1 MeV (z': épaisseur totale d'un absorbant à trois couches constituées de la fenêtre, de l'espace libre et de la plaque de polyéthylène

An example of calculated results of energy deposition function, I(z'), for a slab layer of polyethylene exposed to 1 MeV electron (z': total depth in three-layer absorber consisting of beam window, air gap, and polyethylene layer)

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

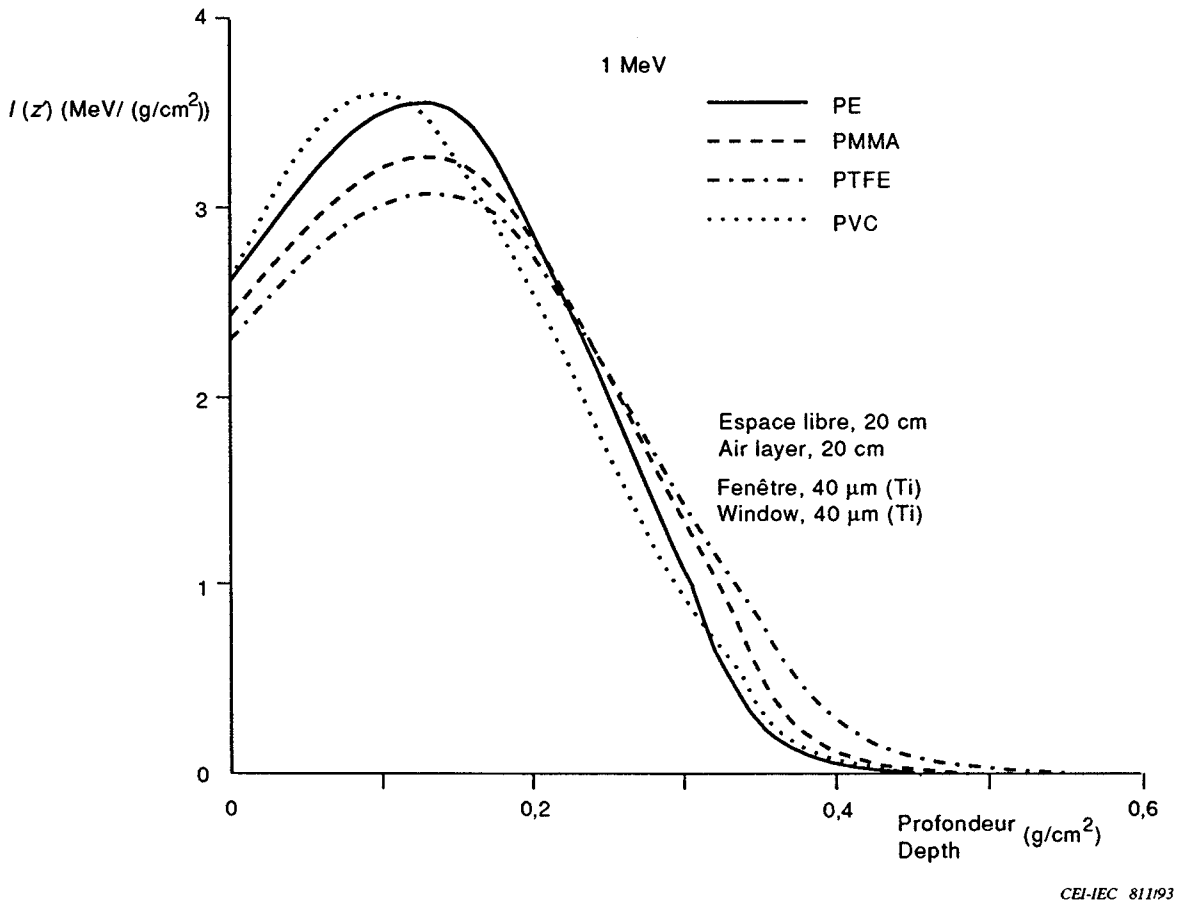
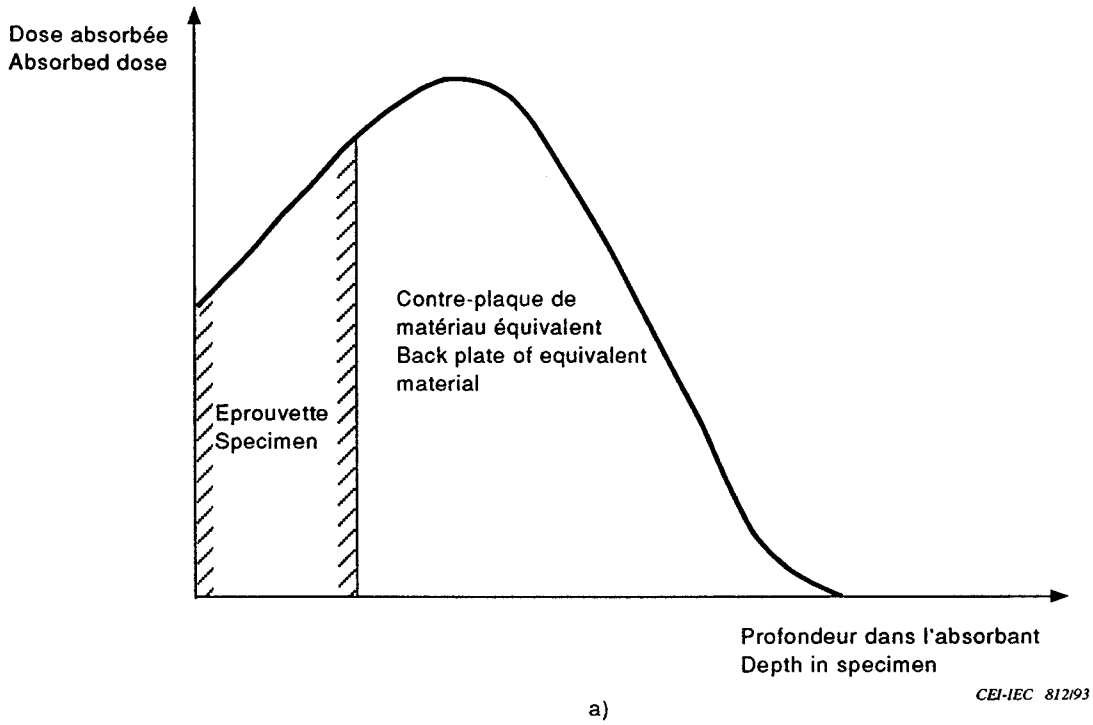


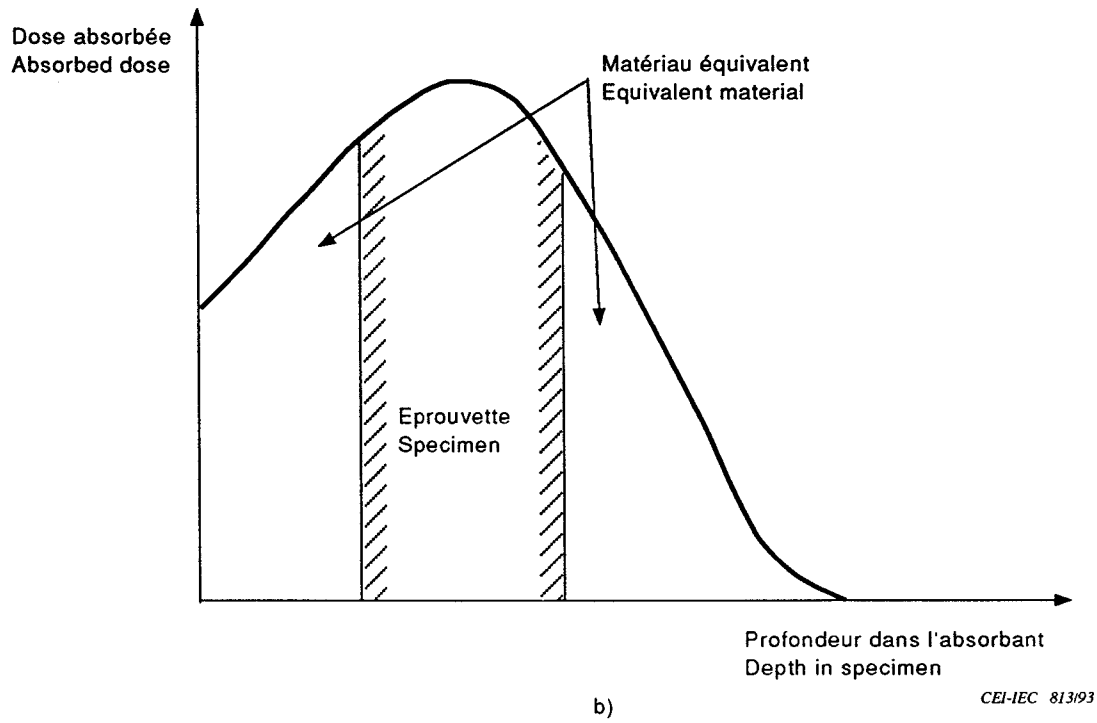
Figure 3 – Exemple de résultats calculés de la fonction de dépôt d'énergie, $I(z')$, pour des isolants organiques types exposés à un faisceau d'électrons de 1 MeV (z': épaisseur totale d'un absorbant à trois couches constituées de la fenêtre, de l'espace libre et de la plaque de matériau isolant

An example of calculated results of energy deposition function, $I(z')$, for typical organic insulators exposed to 1 MeV electron (z': total depth in three-layer absorber consisting of beam window, air gap, and insulating material layer)

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



a)



b)

Figure 4 – Deux façons de disposer les éprouvettes à irradier afin de tenir compte des distributions de dose en profondeur types: a) éprouvette et contre-plaque de matériau équivalent; b) éprouvette intercalée entre deux plaques de matériau équivalent

Two methods of arranging the irradiation samples in order to take into account the typical depth-dose distributions: a) specimen and a backplate of the equivalent material; b) specimen sandwiched between two plates of the equivalent material

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

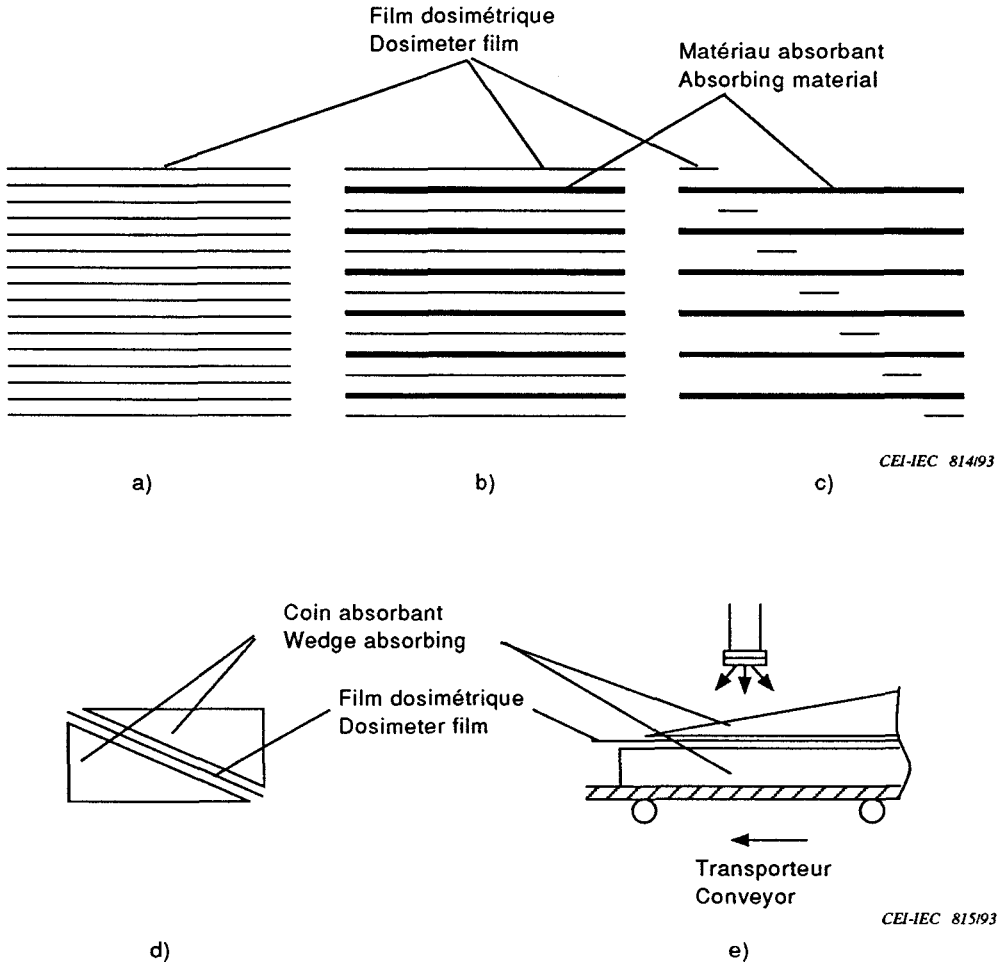


Figure 5 – Différentes façons de disposer les éprouvettes à irradier pour mesurer les distributions de dose d'électrons en profondeur dans une pile d'isolants en forme de plaques et de coins: a) empilement uniforme; b) empilement alterné; c) insertion décalée; d) coin linéaire; et e) coin en escalier

Methods of arranging the irradiation samples for measuring electron depth-dose distributions with a stack of slab insulating materials and wedge-shape insulating materials: a) uniform stack method; b) alternate stack method; c) shift insertion method; d) linear wedge method, and e) stepped wedge method

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe A
(normative)

Epaisseur d'équilibre de particules chargées

Chaque fois qu'un matériau est irradié d'un seul côté par des rayons X ou γ non contaminés par des électrons secondaires, il se produit (dans le premier absorbant) une accumulation d'énergie (dose absorbée) à mesure que le rayonnement pénètre dans le matériau. Au-dessus d'une épaisseur déterminée, le dépôt d'énergie de rayonnement diminue. L'épaisseur nécessaire pour obtenir le dépôt d'énergie maximal est habituellement appelée épaisseur d'équilibre de particules chargées, et elle est fonction de l'énergie de rayonnement et de la densité d'électrons du matériau irradié. Pour de plus grandes épaisseurs, il y a équilibre de particules chargées dans le matériau.

La figure A.1 donne une courbe type du dépôt d'énergie en fonction de l'épaisseur. Chaque fois qu'on irradie une éprouvette de tous les côtés, il est nécessaire de l'entourer d'un absorbant pour assurer l'équilibre des particules chargées dans toute l'éprouvette. En pratique, avec un rayonnement très diffusé, on n'observe pas d'accumulation. Cependant, il est recommandé d'utiliser des couches d'accumulation afin d'obtenir des conditions d'irradiation bien définies.

La figure A.2 donne un diagramme de l'épaisseur de l'absorbant en fonction de l'énergie pour un matériau de densité d'électrons de $3{,}3 \times 10^{23}$ cm^{-3}. La figure A.3 donne le diagramme de l'épaisseur de l'eau (ou d'un matériau de même densité d'électrons) en fonction de l'énergie pour une atténuation donnée d'une irradiation unidirectionnelle.

NOTE – La densité d'électrons n pour un matériau quelconque peut être calculée à partir de:

$$n = \rho \frac{N_A}{M} \sum_i Z_i \ [cm^{-3}] = \frac{N_A}{M} \sum_i Z_i \ [g^{-1}] \qquad (A.1)$$

où

ρ est la masse volumique du matériau (g/cm^3);

N_A est égal à $6{,}023 \times 10^{23}$ mol^{-1} (nombre d'Avogadro);

M est la masse moléculaire (g/mol);

Z_i est le numéro atomique de l'élément i;

$\Sigma_i Z_i$ est le nombre total d'électrons par molécule.

Etant donné que $1/M$ ($\Sigma_i Z_i$) est égal à environ 1/2 pour tous les éléments jusqu'à $Z = 17$ (à l'exclusion de H), pour les matériaux organiques cette équation peut être simplifiée comme suit:

$$n = \rho \frac{N_A}{2} \ 3 \times 10^{23} \ \rho[cm^{-3}] = 3 \times 10^{23} \ [g^{-1}]$$

Les figures A.1 à A.3 ont été obtenues avec cette approximation.

La courbe de la figure A.2 se déplace vers la gauche lorsque la densité électronique de l'absorbant dépasse cette valeur calculée et vers la droite pour des matériaux de densité électronique inférieure. Par conséquent, l'épaisseur équivalente à utiliser est le quotient

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex A
(normative)

Charged-particle equilibrium thickness

Whenever a material is irradiated from one side only with X- or γ-rays uncontaminated with secondary electrons, there is initially (in the first absorber) a build-up of energy deposition (absorbed dose) as the radiation penetrates the material. After some finite thickness the radiation-energy deposition decreases. The thickness necessary to reach the maximum energy deposition is commonly called the charged-particle equilibrium thickness, and is a function of the radiation energy and the electron density of the material being irradiated. For larger thicknesses there is charged-particle equilibrium in the material.

Figure A.1 is a typical plot of energy deposition as a function of thickness. Whenever one is irradiating a specimen from all sides, it is necessary to surround the specimen with an absorber in order to ensure charged-particle equilibrium throughout the specimen. In practical cases with highly scattered radiation, build-up is not observed. It is recommended however to use built-up layers in order to provide well-defined irradiation conditions.

Figure A.2 is a plot of absorber thickness as a function of energy for material of electron density $3{,}3 \times 10^{23}$ cm^{-3}. Figure A.3 is a plot of thickness of water (or a material of the same electron density) as a function of energy for a given attenuation of unidirectional irradiation.

NOTE – The electron density n of any material can be evaluated from:

$$n = \rho \frac{N_A}{M} \sum_i Z_i \; [cm^{-3}] = \frac{N_A}{M} \sum_i Z_i \; [g^{-1}] \qquad (A.1)$$

where

ρ is the density of material (g/cm^3);

N_A is the $6{,}023 \times 10^{23}$ mol^{-1}, Avogadro's constant;

M is the molar mass (g/mol);

Z_i is the atomic number of element i;

$\Sigma_i Z_i$ is the total number of electrons per molecule.

Since $1/M\ (\Sigma_i Z_i)$ is about 1/2 for elements up to $Z = 17$ (excluding H), for organic materials this equation can be simplified to read:

$$n = \rho \frac{N_A}{2} \; 3 \times 10^{23} \; \rho[cm^{-3}] = 3 \times 10^{23} \; [g^{-1}]$$

Figures A.1 to A.3 are calculated with this approximation.

The curve in figure A.2 will shift to the left as the electron density of the absorber increases above this calculated value and to the right for materials of lesser electron density. Therefore, an equivalent thickness to use is that obtained from figure A.2 divided by the ratio of the electron density of the absorber to $3{,}3 \times 10^{23}$ cm^{-3} (electron density of

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

et $3,3 \times 10^{23}$ cm^{-3} (densité électronique de l'eau).

Par exemple, il est demandé d'irradier un film de polytétrafluoréthylène (PTFE) par des photons de 1,1 MeV. En se reportant à la figure A.2, on note qu'il faut 0,5 cm de matériau ayant une densité d'électrons de $3,3 \times 10^{23}$ cm^{-3} pour assurer l'équilibre des particules chargées. Par conséquent, c'est cette épaisseur d'eau qui doit entourer le film.

Pour PTFE, avec une masse volumique $\rho = 2,2$ g/cm^3, on calcule:

$$\frac{n_{PTFE}}{n_{H_2O}} = \frac{3 \times 10^{23} \times 2,2}{3,3 \times 10^{23}} = 2$$

et

$$d_{PTFE} = \frac{d_{H_2O}}{n_{PTFE} / n_{H_2O}} = 0,25 \text{ cm}$$

Cela signifie que le film doit être entouré de 0,25 cm de PTFE.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

water).

For example, it is required to irradiate polytetrafluoroethylene (PTFE) film with 1,1 MeV photons. Referring to figure A.2, it is noted that 0,5 cm of material of electron density of $3{,}3 \times 10^{23}$ cm^{-3} is needed to ensure charged-particle equilibrium. Therefore, this thickness of water shall surround the film.

For PTFE with a density of $\rho = 2{,}2$ g/cm^3 one calculates:

$$\frac{n_{PTFE}}{n_{H_2O}} = \frac{3 \times 10^{23} \times 2{,}2}{3{,}3 \times 10^{23}} = 2$$

and

$$d_{PTFE} = \frac{d_{H_2O}}{n_{PTFE} / n_{H_2O}} = 0{,}25 \text{ cm}$$

This means that 0,25 cm of PTFE must surround the film.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

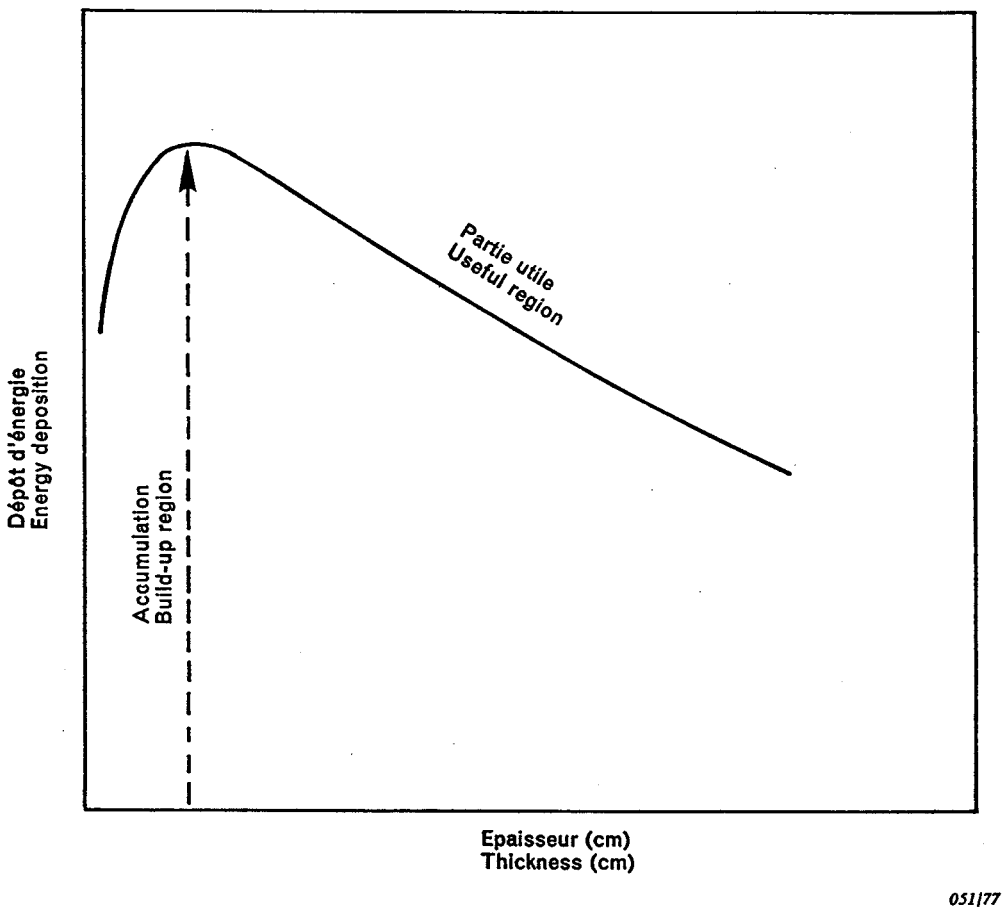


Figure A.1 – Dose absorbée en fonction de l'épaisseur. La partie de la courbe à gauche du maximum n'est pas bien connue. Il est donc nécessaire d'employer une éprouvette ayant une épaisseur suffisante pour tomber sur la valeur maximale ou à droite de celle-ci

Absorbed dose as a function of thickness. The part of the curve to the left of the maximum is not well known; therefore, it is necessary to have a sample of sufficient thickness to fall either at or to the right of the maximum

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

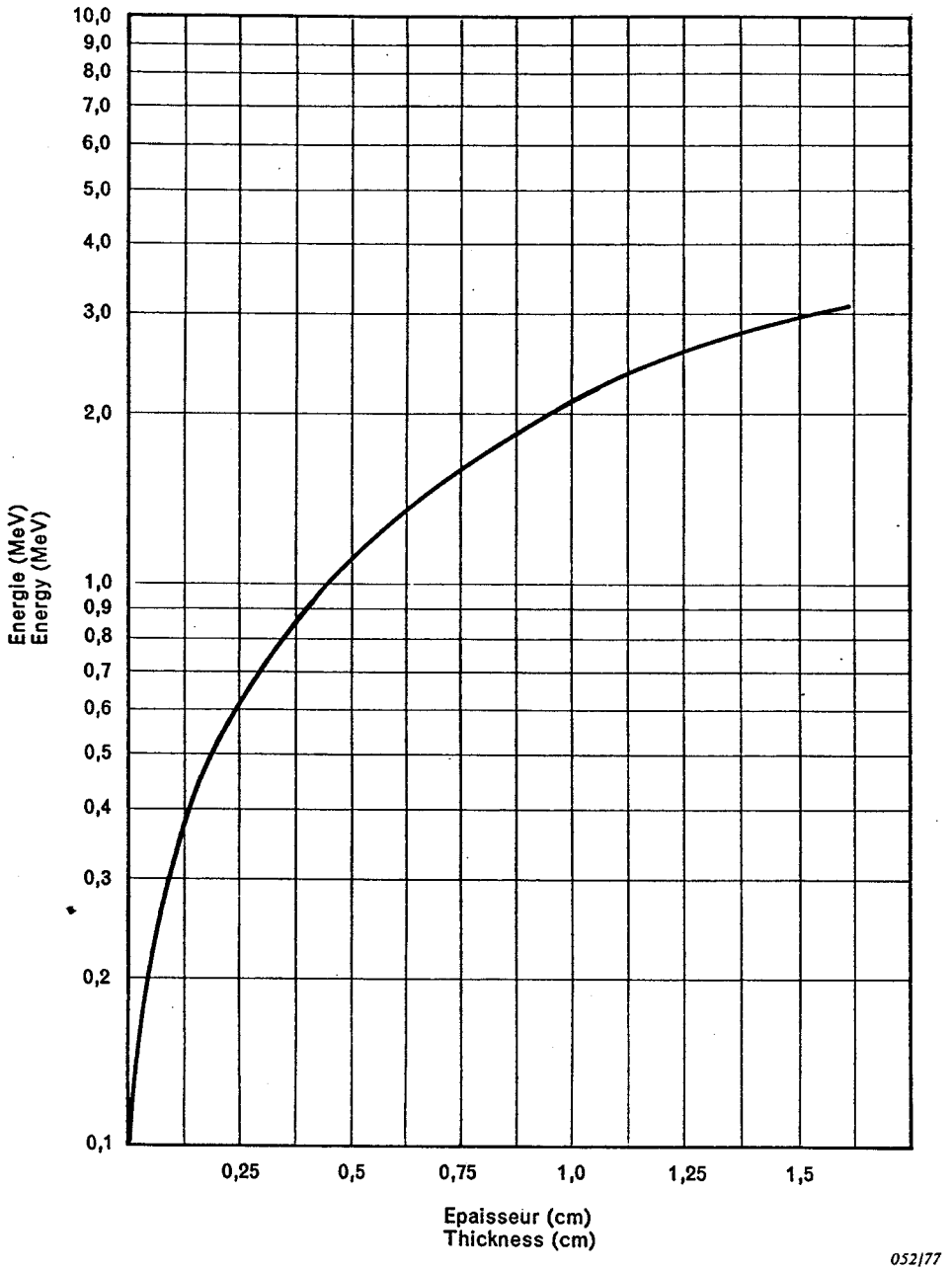


Figure A.2 – Epaisseur d'absorbant pour l'équilibre de particules chargées en fonction de l'énergie pour un matériau ayant une densité d'électrons de $3,3 \times 10^{23}$ cm^{-3} (eau)

Absorber thickness for charged-particle equilibrium as a function of energy for a material with an electron density of $3,3 \times 10^{23}$ cm^{-3} (water)

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

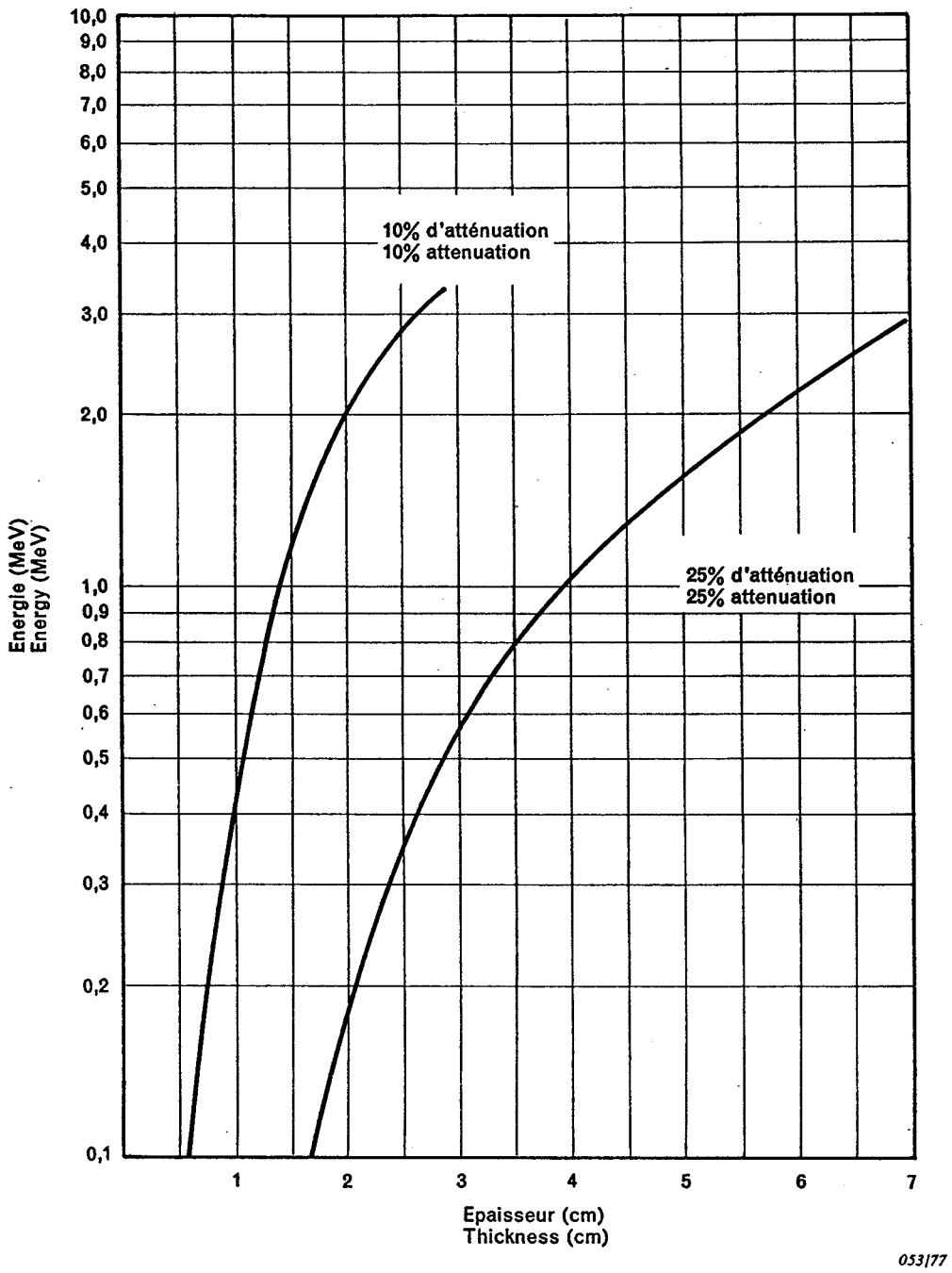


Figure A.3 – Epaisseur d'eau (1 g/cm^3) en fonction de l'énergie des photons pour une atténuation donnée des rayons X ou γ unidirectionnels

Thickness of water (1 g/cm^3) as a function of photon energy for a given attenuation of unidirectional X-ray or γ-ray radiation

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

– Page blanche –

– Blank page –

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe B
(normative)

Calcul des facteurs numériques f_i

L'efficacité de l'absorption d'énergie par un matériau exposé à un rayonnement X ou γ est caractérisée par le coefficient d'absorption massique d'énergie $(\mu_{en}/\rho)_m$.

Celui-ci peut être déterminé à partir du coefficient d'absorption massique en ne comptant que la fraction d'énergie de photons réellement absorbée par le matériau; on doit, par conséquent, effectuer des corrections pour tenir compte des pertes par fluorescence, diffusion, annihilation, rayonnement et rayonnement de freinage.

La valeur pour le matériau irradié, qu'il soit un composé ou un mélange, peut être déterminée avec une bonne précision par la relation:

$$(\mu_{en}/\rho)_m = \sum_i W_i (\mu_{en}/\rho)_i \qquad \text{(B.1)}$$

où W_i et $(\mu_{en}/\rho)_i$ sont respectivement la fraction massique et le coefficient d'absorption massique d'énergie du composant *i*.

Une exposition dans l'air de 1 C/kg entraîne une absorption de 33,68 J/kg (basée sur une valeur de 33,7 + 0,2 eV nécessaire pour produire une paire d'ions dans l'air) chaque fois que l'équilibre de particules chargées est établi au point considéré. Pour la même exposition, la dose absorbée reçue par le matériau irradié est donnée par l'équation:

$$D_m = D_{air} \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} = 33{,}68 \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} X \qquad \text{(B.2)}$$

où

D_m est la dose absorbée dans le matériau m en Gy;

D_{air} est la dose absorbée dans l'air en Gy;

$(\mu_{en}/\rho)_m$ est le coefficient d'absorption massique d'énergie pour le matériau m;

$(\mu_{en}/\rho)_{air}$ est le coefficient d'absorption massique d'énergie pour l'air;

X est l'exposition en C/kg.

En combinant l'équation (B.1) avec l'équation (B.2), on obtient:

$$D_m = X \sum_i W_i f_i \qquad \text{(B.3)}$$

où

$$f_i = 33{,}68 \frac{(\mu_{en}/\rho)_i}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} \text{ (J/C)} \qquad \text{(B.4)}$$

NOTE – Le facteur numérique f_i peut aussi être calculé dans l'ancienne unité c.g.s., rad/R (1 rad/R = 38,76 J/C):

$$f_i = 0{,}870 \frac{(\mu_{en}/\rho)_i}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} \text{ (rad/R)}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex B
(normative)

Derivation of numerical factors f_i

The efficiency of energy absorption by a material exposed to X- or γ-radiation is determined by its mass energy-absorption coefficient $(\mu_{en}/\rho)_m$.

This may be determined from the mass absorption coefficient by including only the fraction of the photon energy actually absorbed by the material; corrections are therefore required for fluorescence, scattering, annihilation, radiation, and bremsstrahlung losses.

The value for the material being irradiated, whether a compound or a mixture, may be closely approximated by the relation:

$$(\mu_{en}/\rho)_m = \sum_i W_i \, (\mu_{en}/\rho)_i \qquad \text{(B.1)}$$

where W_i and $(\mu_{en}/\rho)_i$ are, respectively, the mass fraction and the mass energy-absorption coefficient of constituent *i*.

An exposure in air of 1 C/kg results in an absorption of 33,68 J/kg (based on 33,7 + 0,2 eV for production of one ion pair in air) whenever charged-particle equilibrium exists at the point of interest. For the same exposure, the absorbed dose received by the material being irradiated is given by the equation:

$$D_m = D_{air} \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} = 33{,}68 \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} X \qquad \text{(B.2)}$$

where

D_m is the absorbed dose in the material m in Gy;

D_{air} is the absorbed dose in air in Gy;

$(\mu_{en}/\rho)_m$ is the mass energy-absorption coefficient for the material m;

$(\mu_{en}/\rho)_{air}$ is the mass energy-absorption coefficient for air;

X is the exposure in C/kg.

Substitution of equation (B.1) into equation (B.2) gives:

$$D_m = X \sum_i W_i f_i \qquad \text{(B.3)}$$

where

$$f_i = 33{,}68 \frac{(\mu_{en}/\rho)_i}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} \text{ (J/C)} \qquad \text{(B.4)}$$

NOTE – The numerical factor f_i can also be given in the old c.g.s. unit rad/R (1 rad/R = 38,76 J/C):

$$f_i = 0{,}870 \frac{(\mu_{en}/\rho)_i}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} \text{ (rad/R)}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe C/Annex C

Bibliographie/Bibliography

[1] Standard method of test for absorbed gamma radiation dose in the Fricke dosimeter, ASTM D1671-72, *Book of ASTM Standards*, Parts 39 and 45 (1976).

[2] STM D2568, Calculation of absorbed dose from X or Gamma radiation, *Book of ASTM Standards*, Parts 39 and 45 (1976).

[3] F.H. Attix, Present status of dosimetry by radiophotoluminescence and thermoluminescence methods, U.S. Naval Research Laboratory, Rep. 6145 (1964).

[4] F.H. Attix and W.C. Roesch, *Radiation dosimetry*, Academic Press, Vol. I (1968), Vol. II (1966), Vol. III (1969).

[5] J.H. Barrett, Int. J. Appl. Radiat. Isot. **33**, 1177 (1982).

[6] K. Becker, *Solid state dosimetry*, CRC Press, Cleveland (1973).

[7] M.J. Berger and S.M. Seltzer, *Stopping powers and ranges of electrons and positrons*, National Bureau of Standards Rep. NBSIR 82-2550-A (1982), and ICRU Report 37 (1984).

[8] B. Burgkhardt, D. Singh and E. Piesch, Nucl. Instrum. Methods **141**, 363 (1977).

[9] DIN 6800, *Methods for dose measurements by radiological technique*, Beuth-Vertrieb GmbH (Berlin).

[10] Dole and Malcolm, *The radiation-chemistry of macromolecules*, Academic Press, Volume 1 (1972), Volume II (1973).

[11] B. Gross, *Electrets*, Sessler, ed., Springer, Chapter 4 (1980).

[12] International Atomic Energy Agency, *Manual of food irradiation dosimetry*, Technical Report Series No. 178, IAEA (1977).

[13] Radiation dosimetry: X-rays and Gamma rays with maximum photon energies between 0,6 and 50 MeV, ICRU Report 14 (1969).

[14] Radiation dosimetry: X-Ray generated at potentials of 5 to 150 kV, ICRU Report 17 (1970).

[15] Radiation quantities and units, ICRU Report 33 (1980).

[16] Radiation dosimetry: Electron beams with energies between 1 and 50 MeV, ICRU Report 35 (1984).

[17] R. Ito and T. Tabata, Radiat. Center Osaka Prefect. Tech. Rep. No. 8 (1987).

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

[18] A.D. Kantz and J.C. Humphreys, Radiat. Phys. Chem. **10**, 119 (1977).

[19] C.J. Karzmark, J. White and J.F. Fowler, Lithium fluoride thermoluminescence dosimetry, Phys. in Med. and Biol. **9**, 273 (1964).

[20] T. Kojima *et al.*, Int. J. Radiat. Appl. Instr., Appl. Rad. Isot. **37**, 517 (1986).

[21] W.L. McLaughlin, R.D. Jarrett and T.A. Olejnik, *Dosimetry in preservation of foods by ionizing radiation*, Vol. 1, E.S. Josephson and M.S. Peterson, eds., CRC Press, Boca Raton, FL (1982).

[22] W.L. McLaughlin, J.C. Humphreys and W. Chen, Radiat. Phys. Chem. **25**, 79 (1985).

[23] W.L. McLaughlin *et al.*, Radiat. Phys. Chem. **31**, 505 (1988).

[24] A. Miller and W.L. McLaughlin, Int. J. Appl. Radiat. Isot. **33**, 1299 (1982).

[25] A. Miller and A. Kovacs, Nucl. Instrum. methods in Phys. Res. **B10/11**, 994 (1985)

[26] M. Oberhofer, Atomkernenergie **31**, 209 (1978).

[27] B.B. Radak and V.M. Markovic, Manual on radiation dosimetry, N.W. Holm and R.J. Berry, eds., Marcel Dekker, New York (1970), Chap. 3.

[28] D.F. Regulla and U. Deffner, Int. J. Appl. Radiat. Isot. **33**, 1101 (1982).

[29] D.F. Regulla and U. Deffner, High-dose dosimetry, IAEA, 221 (1985).

[30] T. Tabata, R. Ito and S. Okabe: Nucl. Instrum. Methods **103**, 85 (1972).

[31] T. Tabata and R. Ito, Radiat. Center Osaka Prefect. Tech. Rep. No. 1 (1981).

[32] N. Tamura *et al.*, Radiat. Phys. Chem. **18**, 947 (1981).

[33] R. Tanaka, K. Mizuhashi, H. Sunaga and N. Tamura, Nucl. Instrum. methods 17, 201 (1980).

[34] R. Tanaka, S. Mitomo and N. Tamura, Int. J. Appl. Radiat. Isot. **35**, 875 (1984).

[35] R. Tanaka, H. Sunaga and T. Agematsu, High-dose dosimetry, IAEA, 317 (1985).

[36] B. Whittaker *et al.*, High-dose dosimetry, IAEA, 293 (1985).

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

ICS 17.240 ; 29.035.01

Typeset and printed by the IEC Central Office
GENEVA, SWITZERLAND

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale