

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Publication 544-1

Première édition — First edition

1977

**Guide pour la détermination des effets des rayonnements ionisants
sur les matériaux isolants**

Première partie : Interaction des rayonnements

**Guide for determining the effects of ionizing radiation
on insulating materials**

Part 1: Radiation interaction



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe
Genève, Suisse

Révision de la présente publication

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

Les renseignements relatifs à ce travail de révision, à l'établissement des éditions révisées et aux mises à jour peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et en consultant les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Rapport d'activité de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement

Terminologie utilisée dans la présente publication

Seuls sont définis ici les termes spéciaux se rapportant à la présente publication.

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la Publication 50 de la CEI: Vocabulaire Electrotechnique International (V.E.I.), qui est établie sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini, l'Index général étant publié séparément. Des détails complets sur le V.E.I. peuvent être obtenus sur demande.

Symboles graphiques et littéraux

Seuls des symboles graphiques et littéraux spéciaux sont inclus dans la présente publication.

Le recueil complet des symboles graphiques approuvés par la CEI fait l'objet de la Publication 117 de la CEI.

Les symboles littéraux et autres signes approuvés par la CEI font l'objet de la Publication 27 de la CEI.

Autres publications de la CEI établies par le même Comité d'Etudes

L'attention du lecteur est attirée sur la page 3 de la couverture, qui énumère les autres publications de la CEI préparées par le Comité d'Etudes qui a établi la présente publication.

Revision 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 on the work of revision, the issue of revised editions and amendment sheets may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **Report on IEC Activities**
Published yearly
- **Catalogue of IEC Publications**
Published yearly

Terminology used in this publication

Only special terms required for the purpose of this publication are defined herein.

For general terminology, readers are referred to IEC Publication 50: International Electrotechnical Vocabulary (I.E.V.), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field, the General Index being published as a separate booklet. Full details of the I.E.V. will be supplied on request.

Graphical and letter symbols

Only special graphical and letter symbols are included in this publication.

The complete series of graphical symbols approved by the IEC is given in IEC Publication 117.

Letter symbols and other signs approved by the IEC are contained in IEC Publication 27.

Other IEC publications prepared by the same Technical Committee

The attention of readers is drawn to the inside of the back cover, which lists other IEC publications issued by the Technical Committee which has prepared the present publication.

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

IEC STANDARD

Publication 544-1

Première édition — First edition

1977

**Guide pour la détermination des effets des rayonnements ionisants
sur les matériaux isolants**

Première partie : Interaction des rayonnements

**Guide for determining the effects of ionizing radiation
on insulating materials**

Part 1: Radiation interaction



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

1, rue de Varembe
Genève, Suisse

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
Articles	
1. Introduction	6
2. Domaine d'application et objet	6
SECTION UN — PROBLÈMES LIÉS À L'ÉVALUATION DE LA TENUE AUX RAYONNEMENTS DES MATÉRIAUX ISOLANTS ÉLECTRIQUES	
3. Modifications provoquées par le rayonnement	6
4. Evaluation du champ de rayonnement	8
5. Evaluation de la dose absorbée et du débit de dose absorbée	10
6. Méthodes d'essai pour l'évaluation de la tenue aux rayonnements	10
SECTION DEUX — GUIDE POUR LES MÉTHODES DE DOSIMÉTRIE DANS LE CAS DES RAYONNEMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES	
7. Introduction	14
8. Méthodes absolues	14
9. Méthodes secondaires	16
10. Classification des méthodes de mesure de la dose absorbée	16
SECTION TROIS — CALCUL DE LA DOSE ABSORBÉE DE RAYONNEMENT X OU GAMMA	
11. Objet	18
12. Grandeurs et unités de rayonnement	18
13. Calcul de la dose absorbée à partir d'une mesure d'exposition	20
14. Calcul de la dose absorbée dans un matériau donné, à partir de celle absorbée dans un autre matériau	22
15. Limites	24
16. Références	28
ANNEXE A — Méthodes courantes recommandées pour la mesure de la dose absorbée de rayonnement électromagnétique dans les polymères	30
ANNEXE B — Equilibre de particules chargées	36
ANNEXE C — Calcul de la dose absorbée dans un matériau à partir d'une exposition mesurée	38
FIGURES	40

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Introduction	7
2. Scope and object	7
SECTION ONE — PROBLEMS INVOLVED IN EVALUATING THE RADIATION RESISTANCE OF ELECTRICAL INSULATING MATERIALS	
3. Radiation-induced changes	7
4. Evaluation of the radiation field	9
5. Evaluation of absorbed dose and absorbed dose-rate	11
6. Test procedures for the evaluation of the radiation resistance	11
SECTION TWO — A GUIDE TO DOSIMETRY METHODS FOR ELECTROMAGNETIC RADIATION	
7. Introduction	15
8. Absolute methods	15
9. Secondary methods	17
10. Tabulation of methods for measuring absorbed dose	17
SECTION THREE — CALCULATION OF ABSORBED DOSE FROM X OR GAMMA RADIATION	
11. Object	19
12. Radiation quantities and units	19
13. Calculation of the absorbed dose from a measurement of exposure	21
14. Calculation of absorbed dose in one material from that in another material	23
15. Limitations	25
16. References	29
APPENDIX A — Current methods to be recommended for measuring absorbed dose of electro- magnetic radiation in polymeric materials	31
APPENDIX B — Charged particle equilibrium	37
APPENDIX C — Calculation of absorbed dose in a material from a measured exposure	39
FIGURES	40

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**GUIDE POUR LA DÉTERMINATION DES EFFETS DES RAYONNEMENTS
IONISANTS SUR LES MATÉRIAUX ISOLANTS**

Première partie: Interaction des rayonnements

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes 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.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

La présente norme a été établie par le Sous-Comité 15B: Essais d'endurance, du Comité d'Etudes N° 15 de la CEI: Matériaux isolants.

Un premier projet fut discuté lors des réunions tenues à Varsovie en 1967 et à Londres en 1968. A la suite de cette dernière réunion, un projet, document 15B(Bureau Central)15, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en mars 1970. Des modifications, document 15B(Bureau Central)24, furent soumises à l'approbation des Comités nationaux suivant la Procédure des Deux Mois en mai 1972.

Les pays suivants se sont prononcés explicitement en faveur de la publication:

Afrique du Sud (République d')	Italie
Allemagne	Japon
Australie	Pays-Bas
Autriche	Portugal
Belgique	Roumanie
Canada	Suède
Danemark	Suisse
Etats-Unis d'Amérique	Tchécoslovaquie
Finlande	Turquie
France	Union des Républiques Socialistes Soviétiques
Iran	Yougoslavie
Israël	

Autre publication de la CEI citée dans la présente norme:

Publication n° 216: Guide pour la détermination des propriétés d'endurance thermique de matériaux isolants électriques.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**GUIDE FOR DETERMINING THE EFFECTS
OF IONIZING RADIATION ON INSULATING MATERIALS**

Part 1: Radiation interaction

FOREWORD

- 1) 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.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This standard has been prepared by Sub-Committee 15B, Endurance Tests, of IEC Technical Committee No. 15, Insulating Materials.

A first draft was discussed at meetings held in Warsaw in 1967 and in London in 1968. As a result of this latter meeting, a draft, Document 15B(Central Office)15, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in March 1970. Amendments, Document 15B(Central Office)24, were submitted to the National Committees for approval under the Two Months' Procedure in May 1972.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	Japan
Austria	Netherlands
Belgium	Portugal
Canada	Romania
Czechoslovakia	South Africa (Republic of)
Denmark	Sweden
Finland	Switzerland
France	Turkey
Germany	Union of Soviet Socialist Republics
Iran	United States of America
Israel	Yugoslavia
Italy	

Other IEC publication quoted in this standard:

Publication No. 216: Guide for the Determination of Thermal Endurance Properties of Electrical Insulating Materials.

GUIDE POUR LA DÉTERMINATION DES EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS SUR LES MATÉRIAUX ISOLANTS

Première partie: Interaction des rayonnements

1. Introduction

Le but final du Sous-Comité 15B de la CEI, dans ses travaux sur la tenue aux rayonnements, consiste à établir des critères appropriés pour l'évaluation de la tenue des matériaux isolants aux rayonnements; il est très complexe. De tels critères dépendent en effet des conditions d'utilisation des matériaux. Par exemple, si un câble isolé doit être 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 de façon importante une ou plusieurs des propriétés mécaniques correspondantes. La température de fonctionnement et la composition de l'atmosphère environnante sont des facteurs importants qui déterminent également le taux et les mécanismes des transformations chimiques. Pour certaines applications, les modifications temporaires peuvent constituer le facteur limite.

A ce stade, le déroulement des travaux s'impose automatiquement. 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.

Etant donné le nombre croissant de demandes de matériaux isolants destinés à fonctionner dans les milieux où ils sont soumis à des rayonnements ionisants de haute énergie, il a été jugé souhaitable d'établir des méthodes d'essai appropriées pour évaluer la tenue aux rayonnements de ces matériaux. Ces essais doivent évidemment s'appuyer sur une connaissance approfondie non seulement de l'action des rayonnements sur les matériaux isolants, mais aussi des mécanismes d'interaction des différents types de rayonnements (électromagnétiques, neutrons, électrons, etc.) avec la matière. Il est souhaitable de savoir, en particulier, si les effets produits par tous les types de rayonnements peuvent être évalués par l'utilisation d'un seul type tel que les rayons X, gamma ou les électrons de haute énergie. Le travail à effectuer portera tout d'abord sur les matériaux isolants organiques exposés à ces types de rayonnements.

2. Domaine d'application et objet

Cette partie de la norme constitue une introduction traitant de manière générale des problèmes rencontrés dans l'évolution des effets des rayonnements ionisants sur tous les types de matériaux isolants électriques. Elle fournit également un guide de terminologie en dosimétrie, ainsi que des méthodes de détermination de la dose d'exposition et de la dose absorbée et des méthodes de calcul de la dose absorbée.

SECTION UN — PROBLÈMES LIÉS À L'ÉVALUATION DE LA TENUE AUX RAYONNEMENTS DES MATÉRIAUX ISOLANTS ÉLECTRIQUES

3. Modifications provoquées par le rayonnement

Bien que l'interaction des différents types de rayonnements et de la matière se fasse de différentes façons, le phénomène essentiel consiste dans la production d'ions et d'états d'excitation électronique

GUIDE FOR DETERMINING THE EFFECTS OF IONIZING RADIATION ON INSULATING MATERIALS

Part 1: Radiation interaction

1. Introduction

The ultimate goal of the work of IEC Sub-Committee 15B on radiation resistance consists in establishing suitable criteria for the evaluation of the radiation resistance of insulating materials and is very complex, since such criteria will depend on 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 significantly one or more of the relevant mechanical properties. Temperature of operation and composition of the surrounding atmosphere are important factors which also determine the rate and mechanisms of chemical changes. In some applications, the temporary changes may be the limiting factor.

At this stage, the natural development of the work becomes apparent. First, 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 view of the increasing number of applications for insulating materials to operate in an environment in which they will be subjected to the action of high energy ionizing radiation, it was deemed desirable that suitable test procedures should be devised in order to evaluate the radiation resistance of those materials. Such tests should, of course, be based upon a detailed knowledge not only of the effects of the radiations on insulating materials, but also of the mechanisms by which the different types of radiation (electromagnetic, neutrons, electrons, etc.) interact with matter. In particular, it is desirable to know whether the effects produced by all types of radiation can be assessed by the use of a single type such as X or gamma rays or high energy electrons. Work will first be concerned with organic insulating materials exposed to these types of radiation.

2. Scope and object

This part of the standard constitutes an introduction dealing very broadly with the problems involved in evaluating the effects of ionizing radiations on all types of electrical insulating materials. It also provides a guide to dosimetry terminology, methods of determining exposure and absorbed dose and methods of calculating absorbed dose.

SECTION ONE — PROBLEMS INVOLVED IN EVALUATING THE RADIATION RESISTANCE OF ELECTRICAL INSULATING MATERIALS

3. Radiation-induced changes

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

des molécules qui, à leur tour, peuvent entraîner la formation de radicaux libres. Les altérations chimiques qui en résultent sont caractéristiques des interactions et des réactions de ces entités et de la composition chimique du matériau considéré*.

3.1 *Modifications permanentes*

Les effets permanents dus aux réactions chimiques varient avec la dose absorbée et sont, dans certaines circonstances, fonction du débit de dose absorbée. Souvent, ces effets dépendent des conditions d'environnement et des contraintes mécaniques exercées sur le matériau pendant l'irradiation. Il en résulte surtout une détérioration des propriétés mécaniques, fréquemment accompagnée de modifications importantes des caractéristiques électriques.

3.1.1 Pour la plupart des applications électriques, il se peut que la détérioration des propriétés mécaniques constitue le critère essentiel pour l'évaluation de la tenue aux rayonnements. Toutefois, une modification du facteur de dissipation ou de la permittivité peut être très grave, par exemple dans un circuit résonnant.

3.2 *Modifications temporaires*

Les effets temporaires des irradiations se manifestent surtout par des changements de propriétés électriques telles que la conductivité induite, tant pendant l'irradiation que pendant un certain temps après la fin de l'application de cette contrainte. Ces effets sont principalement fonction du débit de dose.

3.2.1 La conductivité, en courant continu, observée pendant l'irradiation est probablement en relation avec des électrons mobiles excités par le rayonnement absorbé. La persistance de l'effet pendant une longue durée après l'irradiation est attribuée à une partie des électrons produits par le rayonnement qui, pendant l'irradiation, est piégée en des sites où l'énergie potentielle est peu élevée. Ces électrons se libèrent lentement de leurs puits de potentiel et se combinent avec des cations ayant des charges de signe contraire.

4. **Evaluation du champ de rayonnement**

Pour les composés organiques, la dose absorbée constitue le paramètre principal puisque les effets observés sur de tels matériaux sont, dans la plupart des cas, proportionnels à l'énergie absorbée. Toutefois, il est habituellement plus commode de mesurer expérimentalement la densité de flux énergétique du champ de rayonnement, à partir duquel on peut ensuite calculer la dose absorbée. Pour les divers types de rayonnement, le champ de rayonnement est décrit de manière différente. Un champ de particules chargées ou un champ de neutrons est habituellement caractérisé par le débit de fluence. C'est le nombre de particules entrant dans une sphère de section unitaire par unité de temps. Lorsqu'il existe une distribution de l'énergie des particules, il y a lieu de donner des renseignements complémentaires concernant le spectre d'énergie. Un champ de rayonnement électromagnétique peut être défini de façon analogue au moyen de la densité de flux et de la distribution des énergies des photons. Pour les rayons X et gamma cependant il est d'usage de définir le champ par ses effets d'ionisation sur l'air. A cette fin, la CIUR ** a défini la quantité «exposition» dont l'unité est le röntgen (voir les paragraphes 7.2 et 12.2).

* Voir les références (1), (2), (3), (4) et (5), page 28.

** Commission Internationale des Unités et Mesures Radiologiques, voir les références (6), (7), (8), (9), (10), (11) et (12), page 28.

formation of free radicals. The subsequent chemical changes produced are characteristic of the interactions and reactions of these entities and of the chemical constitution of the material concerned.*

3.1 *Permanent changes*

The permanent effects due to chemical reaction vary with the absorbed dose and in some circumstances are dependent on the absorbed dose-rate. Frequently, the effects are dependent on the environmental conditions and mechanical stresses acting on the material during the irradiation. They result predominantly in the deterioration of the mechanical properties, frequently associated with significant electrical changes.

3.1.1 For most electrical applications, it may well be that the deterioration of the mechanical properties will be the most significant criterion for the evaluation of radiation resistance. However, a change in the dissipation factor or in permittivity might be very serious, for instance in a resonant circuit.

3.2 *Temporary changes*

The temporary effects of irradiations appear primarily as changes in electrical properties such as induced conductivity, both during and for some time after irradiation. These effects are primarily dose-rate dependent.

3.2.1 The direct current conductivity observed during irradiation is probably associated with mobile electrons excited by the absorbed radiation. The persistence of the effect for a long time after irradiation is attributed to a fraction of radiation-generated electrons, which, during the irradiation, become trapped at sites of low potential energy. These slowly escape from their potential wells and recombine with oppositely charged cations.

4. **Evaluation of the radiation field**

For organic compounds, the absorbed dose is the parameter of primary importance since the radiation effects observed in such materials are in most cases proportional to the energy absorbed. However, it is usually more convenient experimentally to measure the energy flux density of the radiation field, from which the absorbed dose can then be calculated. For various types of radiation, the radiation field is described in different ways. A charged particle field or a neutron field is usually characterized in terms of the fluence rate. It is the number of particles entering a sphere of unit cross-sectional area per unit time. When the particles have a distribution of energies, additional information as to the energy spectrum is required. An electromagnetic radiation field may similarly be described in terms of photon flux density and energy distribution. However, for X rays and gamma rays it is customary to characterize the field in terms of its ionizing effect on air. For this purpose, the ICRU ** has defined the quantity "exposure", whose unit is the röntgen (see Sub-clauses 7.2 and 12.2).

* See references (1), (2), (3), (4) and (5), page 29.

** International Commission on Radiological Units; see references (6), (7), (8), (9), (10), (11) and (12), page 29.

- 4.1 Dans tous les cas, le but recherché est de définir le champ de rayonnement de façon à permettre le calcul de la dose absorbée dans un matériau quelconque placé dans le champ. Le premier objectif est donc de normaliser des méthodes en collaboration avec d'autres organismes tels que la CIUR * pour la mesure des caractéristiques des champs de rayonnement auxquels des matériaux isolants sont appelés à être exposés. La section deux remplit cet objectif en présentant une liste des techniques de dosimétrie des rayonnements avec les références correspondantes.

5. 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 ou dosimètres chimiques, les données permettant de calculer la dose absorbée ou le débit de dose absorbée appliqué au matériau irradié. La section deux traite des techniques fiables et conventionnelles pour de telles mesures, alors que la section trois 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 à partir des résultats de mesure. La section trois est toutefois limitée au rayonnement des photons; une publication ultérieure étudiera les champs de rayonnements de particules chargées, de neutrons et les champs de rayonnements mixtes. Il existe une différence spécifique dans la nature des interactions produites par des neutrons d'énergie inférieure à 1 MeV. Dans ce cas, une large fraction de l'énergie est transférée par diffusion quasi élastique et par des transferts de charge, sans rapport avec les interactions dues au rayonnement photonique.

6. Méthodes d'essai pour l'évaluation de la tenue aux rayonnements

6.1 Effets permanents

Le but de la normalisation des méthodes d'essai est l'établissement de méthodes uniformes pour la détermination de la tenue relative des matériaux isolants aux rayonnements. Le critère d'aptitude à l'emploi peut être d'ordre mécanique et/ou électrique, suivant la fonction fondamentale du matériau dans son application industrielle.

Une autre publication sur ce sujet sera établie ultérieurement. Elle contiendra des données sur les sujets suivants:

6.1.1 Types d'essais et d'échantillons

Comme l'indique la Publication 216 de la CEI, Guide pour la détermination des propriétés d'endurance thermique de matériaux isolants électriques: « Pour remplir leur rôle de façon satisfaisante, les matériaux isolants doivent présenter simultanément un ensemble de propriétés physiques, chimiques et diélectriques; celles-ci sont caractéristiques de chaque application ou de chaque forme d'isolation ». Ainsi, pour le polyéthylène, la mesure des propriétés mécaniques et électriques sur des échantillons en feuille serait suffisante pour déterminer les altérations dues au rayonnement tandis que les tubes en stratifié exigeraient un ensemble d'essais différent. Pour les fils émaillés, la flexion sur mandrin, l'abrasion et la tension de perforation appliquées sur une torsade peuvent constituer des techniques d'évaluation satisfaisantes.

6.1.2 Conditions climatiques

Comme il est indiqué ci-dessus, la température de fonctionnement (pendant et après l'irradiation) ainsi que l'atmosphère (surtout l'oxygène et l'humidité) sont susceptibles de beaucoup influencer sur

* Commission Internationale des Unités et Mesures Radiologiques, voir les références (6), (7), (8), (9), (10), (11) et (12).

- 4.1 In all cases, the objective is to characterize the radiation field in such a way that the absorbed dose in any material when placed in the field may be calculated. Our first objective is thus to describe standard methods and procedures in collaboration with other groups such as the ICRU* — for measuring the characteristics of the radiation fields to which insulating materials have to be exposed. Section Two meets this objective by presenting a list of radiation dosimetry techniques with the relevant references.

5. Evaluation of absorbed dose and absorbed dose-rate

Techniques have been perfected to obtain — from measurements with radiation detectors such as ionization chambers, calorimeters or chemical dosimeters — the data from which the absorbed dose or absorbed dose-rate given to the material under irradiation may be calculated. Section Two deals with the reliable and conventional techniques of such measurements, while Section Three contains the material and energy-dependent factors to be used in calculations of absorbed dose or absorbed dose-rate from the measured data. Section Three, however, is restricted to photon radiation; a subsequent publication will consider charged particle radiation, neutrons and composite radiation fields. There is a specific difference in the nature of interactions produced by neutrons of less than 1 MeV. The large fraction of energy here is transferred in quasi-elastic scattering and charge transfer, and there is no relation to the interactions of photon radiation.

6. Test procedures for the evaluation of the radiation resistance

6.1 *Permanent effects*

The objective of standardizing test procedures is to provide uniform methods to be used in determining the relative radiation resistance of insulating materials. The performance index may be mechanical and/or electrical, depending on the basic function of the material in its engineering application.

Another publication covering this topic will be prepared at a later date. It will include a discussion of the following topics:

6.1.1 *Types of tests and specimens*

As is stated in IEC Publication 216, Guide for the Determination of Thermal Endurance Properties of Electrical Insulating Materials: "To perform satisfactorily, insulating materials must have the required combination of physical, chemical and dielectric properties; and these are characteristic for each application or form of insulation." Thus, for polyethylene, measurements of mechanical and electrical properties on sheet samples would be sufficient to characterize the radiation changes, while for laminated tubes a different system of tests would be necessary. For enamelled wires, the mandrel bend, abrasion and voltage breakdown on a twisted pair may be satisfactory evaluation techniques.

6.1.2 *Environmental conditions*

As mentioned above, both the operating temperature (during and after irradiation) and the atmosphere (especially oxygen and moisture) can significantly influence the radiation effects.

* International Commission on Radiological Units; see references (6), (7), (8), (9), (10), (11) and (12).

les effets du rayonnement. Cela peut être déduit du fait que chaque matériau réagit différemment à la température ; pour certains, la détérioration se trouve accélérée tandis que d'autres présentent une résistance plus élevée à la détérioration dans certaines gammes de température. La température est très importante en présence d'oxygène, puisque si la température est suffisamment élevée, les phénomènes normaux de l'oxydation thermique se produisent en plus de l'oxydation provoquée par le rayonnement, et les anti-oxydants qui peuvent être introduits dans l'isolation pour éviter ce phénomène dans des conditions plus normales peuvent avoir été rendus inefficaces par la radiolyse. La décision d'étudier simultanément l'endurance thermique et la tenue aux rayonnements est particulièrement pertinente au même titre qu'un certain nombre de principes énoncés dans la Publication 216 de la CEI.

L'oxygène peut avoir un effet plus important aux faibles débits de dose qu'aux débits élevés car il aura plus de temps pour diffuser. Il peut ainsi se produire qu'en cas d'irradiation à l'air libre, les résultats montrent de grandes différences entre irradiation de brève durée à débit de dose élevé et irradiation de longue durée à faible débit de dose, comme on le constate en pratique.

6.1.3 Effets consécutifs à l'irradiation

Dans un certain nombre de polymères organiques peuvent se produire des effets consécutifs à l'irradiation qui sont imputables à la décroissance progressive de différents défauts tels que les radicaux libres résiduels. Lors de chaque évaluation, on doit tenir compte de ce type de comportement. Lorsque les essais ne peuvent pas être effectués pendant l'exposition, on doit effectuer des essais après l'irradiation à des intervalles déterminés, en maintenant les échantillons dans une atmosphère normale de laboratoire.

6.2 Effets temporaires

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. Le courant ionique dans l'atmosphère ionisée introduit également des erreurs de mesure si elles ne sont pas éliminées. Il convient de définir des méthodes de laboratoire éliminant la plupart des effets perturbateurs tout en restant relativement simples.

6.2.1 Les descriptions de différentes tentatives effectuées en vue d'éviter la nécessité coûteuse de mettre la cellule sous vide, et de trouver le meilleur matériau pour l'électrode et la meilleure configuration des éprouvettes, ont été publiées, mais les différentes méthodes devront être soigneusement étudiées avec des éprouvettes identiques avant qu'une recommandation ne soit proposée.

6.2.2 Lorsque les techniques les plus pratiques auront été clairement définies, on devra adopter un critère pour la sensibilité aux rayonnements. Il serait commode d'utiliser une grandeur simple telle que la conductivité induite σ_1 par unité de débit de dose, ou σ_1/σ_0 son rapport à la conductivité d'obscurité σ_0 mesurée dans les mêmes conditions expérimentales (champ, température, milieu ambiant, etc.).

6.2.3 L'expérience a montré que la conductivité induite n'était généralement pas tout à fait proportionnelle au débit de dose absorbée (symbolisé par \dot{D}) mais variait comme \dot{D}^α , facteur dans lequel α est inférieur à l'unité. Par conséquent la sensibilité aux rayonnements est définie par la relation $\sigma_1 = k\dot{D}^\alpha$. Pour déterminer k et α au moins deux mesures sont nécessaires. Une autre complication provient du fait que k et α dépendent également de la dose intégrée absorbée par l'échantillon. Cela illustre la complexité du problème qui constitue le but ultime de la présente publication et fera l'objet d'une publication ultérieure.

Indications are that each material is affected differently by temperature, with some showing accelerated degradation while others have a greater resistance to degradation in certain temperature ranges. The temperature is also important when oxygen is present, since when the temperature is high enough the normal processes of thermal oxidation will occur in addition to radio-oxidation, and such anti-oxidants which might have been included in the insulation to prevent this under more normal circumstances may have been inactivated by radiolysis. The decision to consider thermal and radiation resistance together is therefore particularly relevant, as are a number of the principles set forth in IEC Publication 216.

Oxygen may have a greater effect at a lower dose-rate than at a higher one because it will have more time to diffuse. Thus, it may happen that, in case of irradiation in free air on some materials, there are great differences in the results between short-time irradiation with high dose-rate and long-time irradiations with low dose-rate, as occurs in practice.

6.1.3 *Post-irradiation effects*

In a number of organic polymers, there may be post-irradiation effects attributable to the gradual decay of various defects, such as residual free radicals. Due allowance should be made for this type of behaviour in any evaluation procedure. Where tests cannot be performed during the exposure, they should be made at recorded intervals after irradiation, maintaining specimen storage in a standard laboratory atmosphere.

6.2 *Temporary effects*

The measurement of the induced conductivity is actually quite delicate, since photo-electrons and Compton electrons in the electrode materials will tend to perturb the intrinsic induced current of the specimen. Ionic current 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.

6.2.1 Descriptions of several attempts to avoid the costly necessity for evacuating the cell and to find the best electrode material and sample configuration have been published, but the various procedures should be carefully evaluated with identical samples before any recommendation can be offered.

6.2.2 Once the most practical techniques are clearly defined, a criterion for radiation sensitivity should be adopted. It would be convenient to use a simple figure, such as the induced conductivity (σ_i) per unit dose-rate, or σ_i/σ_0 its ratio to the dark conductivity (σ_0) measured in the same experimental conditions (field, temperature, ambience, etc.).

6.2.3 Experience has shown that the induced conductivity is usually not quite proportional to the absorbed dose-rate (symbolized as \dot{D}), but varies as \dot{D}^α , 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. Further complication occurs from the fact that k and α also depend on the integrated dose absorbed by the sample.

This illustrates the complexity of the problem which constitutes the ultimate goal of this publication and will be discussed in a subsequent publication.

SECTION DEUX — GUIDE POUR LES MÉTHODES DE DOSIMÉTRIE DANS LE CAS DES RAYONNEMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

7. Introduction

- 7.1 Comme indiqué dans la section un de cette publication, afin de comparer les effets de différentes irradiations sur les propriétés des divers matériaux isolants électriques, il est nécessaire de déterminer la dose absorbée par le matériau. Lorsque différents matériaux sont exposés à la même fluence de photons ou de particules, ils peuvent absorber des quantités différentes d'énergie.
- 7.2 La mesure directe de la dose absorbée par le matériau étudié étant en général impossible, on mesure soit le débit d'exposition, soit le débit de dose absorbée par un matériau étalon (tel que l'air); ensuite, l'un de ces deux débits mesurés peut être converti en dose absorbée dans l'échantillon par les méthodes décrites dans la section suivante de cette publication.
- 7.3 L'exposition X est le quotient dQ/dm où dQ est la valeur absolue de la charge totale des ions du même signe produits dans l'air quand tous les électrons (négatons et positons) libérés par les photons dans un volume élémentaire d'air de masse dm , sont complètement arrêtés par l'air. $X = \frac{dQ}{dm}$. L'unité d'exposition est le röntgen (R) défini au paragraphe 12.2.

8. Méthodes absolues

Les méthodes absolues sont celles qui permettent de déterminer l'exposition 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 trois méthodes absolues qui sont largement considérées en dosimétrie comme des méthodes normalisées primaires. Ces procédures ne sont pas utilisées régulièrement pour les études des effets du rayonnement mais sont réalisables dans les laboratoires nationaux et internationaux de normalisation pour l'étalonnage des sources de rayonnement. La précision d'étalonnage des sources de photons est comprise entre 2% et 3%.

- 8.1 La chambre d'ionisation à air libre est utilisée exclusivement pour mesurer l'exposition X . C'est-à-dire qu'elle est conçue de façon à mesurer la charge dQ produite dans l'air et la masse dm d'air où les électrons ionisants sont libérés.
- 8.2 La chambre d'ionisation à cavité est un détecteur de rayonnement qui permet de mesurer l'exposition à partir de laquelle on pourra calculer la dose absorbée si \dot{D} n'est pas trop élevé et les conditions d'équilibre assurées. Si elle 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 le même débit de fluence et la même répartition d'énergie des particules ionisantes secondaires dans les deux milieux.
- 8.3 D'autres méthodes de détermination de la dose absorbée, qui peuvent servir de sources sûres de comparaison entre différents laboratoires, sont la méthode calorimétrique et la méthode de la réaction chimique, cette dernière constituant une méthode secondaire.

SECTION TWO — A GUIDE TO DOSIMETRY METHODS FOR ELECTROMAGNETIC RADIATION

7. Introduction

- 7.1 As stated in Section One of this publication, in order to compare the effects of different irradiations on the properties of various electrical insulating materials, it is necessary to determine the dose absorbed by the material. When different materials are exposed to the same fluence of photons or particles, they may absorb different amounts of energy.
- 7.2 The direct measurement of the absorbed dose in the material under investigation being usually impossible, either the exposure rate or the absorbed dose-rate in a standard material (such as air) is measured; then either of these measured rates can be converted into absorbed dose in the specimen by methods described in the next section of this publication.
- 7.3 The exposure X is the quotient of dQ by dm where dQ is the absolute value of the total charge of the ions of one sign produced in air when all of the electrons (negatrons and positrons) liberated by photons in a volume element of air having mass dm are completely stopped in air. $X = \frac{dQ}{dm}$. The unit of exposure is the röntgen (R). It is defined in Sub-clause 12.2.

8. Absolute methods

Absolute methods are those that will provide a determination of the exposure or of 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 three absolute methods that are widely considered as primary dosimetry standards. These procedures are not regularly used in radiation effects studies, but are available in national and international standards laboratories for calibration of radiation sources. For photon sources, the calibration accuracy is within 2% and 3%.

- 8.1 The free-air ionization chamber is used to measure exposure X , exclusively. That is, it is designed to measure the quantity of charge dQ produced in air and the mass dm of air where the ionizing electrons are liberated.
- 8.2 The cavity ionization chamber is a radiation detector that can be used to measure exposure from which the absorbed dose may be calculated if \dot{D} is not too high and equilibrium conditions are ensured. If it 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 the one medium as in the other.
- 8.3 Other methods of determining the absorbed dose which can be used as reliable standards of comparison between different laboratories are the calorimetric type and the chemical reaction type. The latter one is a secondary method.

8.3.1 Les systèmes calorimétriques 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. La capacité calorifique du système est 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 produit de légers écarts auxquels des corrections peuvent être apportées. Toutefois, comme la conversion en chaleur de l'énergie absorbée du rayonnement 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 normalisées ont été étalonnées.

9. Méthodes secondaires

En plus des méthodes normalisées primaires, il existe de nombreuses autres méthodes qui ont été étalonnées à partir des premières et qui sont très utilisées en tant que méthodes secondaires. Celles-ci sont basées sur la grande variété de réactions chimiques mesurables ou de transformations d'énergie résultant de l'énergie communiquée à la matière faisant l'objet de la dosimétrie, par suite de l'interaction avec le champ de rayonnement. Dans bien des cas, il est nettement avantageux de les employer lorsque la précision exigée est moindre.

9.1 La dosimétrie par conversion chimique est basée sur la création par l'irradiation de certaines réactions quantitatives d'oxydation et de réduction dont le taux est directement proportionnel à la dose absorbée. La méthode au sulfate ferreux (dosimètre de Fricke), par exemple, est largement employée et elle est la plus fiable. D'autres méthodes présentent une grande importance car elles permettent d'étendre les gammes d'utilisation de la méthode au sulfate ferreux. La méthode au sulfate cérique vient immédiatement après en ce qui concerne les avantages et la fiabilité de ces systèmes.

10. Classification des méthodes de mesure de la dose absorbée

Le tableau de l'annexe A donne une liste non limitative des méthodes absolues et secondaires avec quelques-unes de leurs caractéristiques principales telles que:

- type de mesure: dose absorbée ou débit de dose absorbée;
- gamme des doses absorbées ou des débits de dose absorbée;
- influence de l'énergie de rayonnement;
- influence de la température;
- observations d'ordre pratique;
- références bibliographiques.

10.1 Etant donné que la dosimétrie des rayonnements reste un secteur toujours très actif de la recherche, il n'est pas possible d'indiquer ici toutes les méthodes qui ont été mises au point. On ne cherche pas non plus à donner toutes les instructions nécessaires pour effectuer une dosimétrie au moyen de l'une des méthodes décrites. On espère que toutes les méthodes inventoriées et adoptées comme normes nationales ou internationales ainsi que les domaines d'application couramment adoptés sont indiqués. 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 d'éléments des dosimètres à cause des rayonnements (par exemple détérioration de supports isolants dans la chambre d'ionisation). Des essais et procédés spéciaux peuvent être requis afin d'éviter des inconvénients de ce genre.

8.3.1 Calorimetric systems operate by absorbing energy from the radiation field in which they are placed, retaining this energy until it is degraded to thermal energy and this heat quantity is evaluated by measuring the rise in temperature of the system. The heat capacity of the system is calibrated electrically by measuring the amount of electrical power input required to produce the same temperature rise as the radiation did. In some systems, the conversion of energy into chemical form 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.

9. Secondary methods

In addition to the primary standard methods, there are many other methods that have been calibrated against them and which have become extensively utilized as secondary methods. 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. In many cases, there are definite advantages to applying them where the required accuracy is less rigid.

9.1 Chemical conversion dosimetry is based on the principle that certain quantitative oxidation and reduction reactions take place upon irradiation to an extent directly proportional to the absorbed dose. The ferrous sulfate (Fricke dosimeter) method is a widely-used standard of this type and is the most reliable. Other systems are very important because of their utility in extending the ranges of the ferrous sulfate method. The ceric sulfate method is the next most useful and reliable of these systems.

10. Tabulation of methods for measuring absorbed dose

The table in Appendix A gives a non-exhaustive list of absolute and secondary methods with some of their main characteristics, such as:

- type of measurement: absorbed dose or absorbed dose-rate;
- range of absorbed doses or absorbed dose-rates;
- influence of the radiation energy;
- influence of the temperature;
- observations of practical interest;
- bibliographical references.

10.1 Since radiation dosimetry is yet a very active field of research, it is not possible here to include all methods that have been developed. Nor is it intended here to give all the instructions necessary to perform a dosimetry measurement by any of the described methods. It is hoped that all methods that have been documented and adopted as either national or international standards have been listed and the currently accepted ranges are reported. A difficulty inherent to 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.

- 10.2 Un examen plus complet de la plupart des méthodes classées dans le tableau I, page 26, se trouve dans chacune des trois premières références. Les sources de systèmes disponibles dans le commerce peuvent être relevées dans des revues commerciales et dans les annuaires du commerce.
- 10.3 Il est prévu de réviser périodiquement ce tableau et la bibliographie.

SECTION TROIS — CALCUL DE LA DOSE ABSORBÉE DE RAYONNEMENT X OU GAMMA

11. Objet

- 11.1 La méthode recommandée constitue une technique de calcul de la dose absorbée dans un matériau à partir de la connaissance du champ de rayonnement X ou gamma et de la composition du matériau (13). 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. L'emploi de la méthode est limité au cas des champs de rayonnements électromagnétiques d'énergie comprise entre 0,1 MeV et 3 MeV.

12. Grandeurs et unités de rayonnement

- 12.1 L'exposition est une mesure du champ de rayonnement auquel le matériau se trouve exposé tandis que la dose absorbée est une mesure de l'énergie communiquée au matériau irradié (voir le paragraphe 2.3). Pour cette raison, la dose absorbée constitue un paramètre plus significatif dans la description des effets des rayonnements sur les matériaux. Afin de pouvoir mesurer plus facilement la dose absorbée par un matériau, on doit attendre que l'équilibre des particules chargées soit atteint (voir l'annexe B).
- 12.2 L'exposition a été définie par la CIUR seulement pour les champs de rayonnement X ou gamma. L'unité d'exposition

$$\left(X = \frac{dQ}{dm} \right) \text{ est le röntgen (R); } 1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ coulomb/kilogramme (8)}$$

Le coulomb/kilogramme est l'unité SI.

Le röntgen est numériquement identique à l'ancienne unité définie comme « l'exposition de rayonnement X ou gamma telle que l'émission corpusculaire associée par 0,001 293 g d'air produise, dans l'air, des ions transportant une unité électrostatique de quantité d'électricité de chaque signe » (6). L'exposition définit ainsi l'action d'un champ de rayonnement électromagnétique sur la matière par l'ionisation que produit l'exposition sur un matériau étalon de référence, l'air. L'emploi du terme exposition n'a pas été étendu officiellement à la désignation de l'action d'autres types de champs de rayonnement; par conséquent, il est incorrect de l'appliquer à des cas autres que le rayonnement électromagnétique. Etant donné que l'exposition ne s'applique qu'au rayonnement électromagnétique, on doit employer d'autres unités pour décrire les conditions dans lesquelles les irradiations par particules sont effectuées. Pour les irradiations par neutrons et par électrons, le champ de rayonnement est habituellement défini par le nombre des particules et leur énergie; la terminologie employée sera donnée avec plus de précisions dans les publications qui suivront.

- 10.2 More complete reviews of most of the methods listed in Table I, page 27, can be found in any of the first three references. Sources of commercially available systems can be located in trade journals and business directories.
- 10.3 It is anticipated that this table and bibliography will be revised periodically.

SECTION THREE — CALCULATION OF ABSORBED DOSE FROM X OR GAMMA RADIATION

11. Object

- 11.1 This recommended practice presents a technique for calculating the absorbed dose in a material from knowledge of the X or gamma radiation field and the composition of the material (13). From the absorbed dose in one material, the absorbed dose in any other material exposed to the same radiation field may be calculated. The procedure is restricted to use with electromagnetic radiation fields in the energy range of 0.1 MeV to 3 MeV.

12. Radiation quantities and units

- 12.1 Exposure is a measure of the radiation field to which a material is exposed; whereas the absorbed dose is a measure of the energy imparted to the irradiated material (see Sub-clause 2.3). Therefore, the absorbed dose is a more meaningful parameter for use in relating the effects of radiation on materials. In order to measure absorbed dose in a material more easily, charged particle equilibrium must be attained (see Appendix B).
- 12.2 Exposure has been defined by the ICRU solely for X and gamma radiation fields. The unit of exposure

$$\left(X = \frac{dq}{dm}\right) \text{ is the röntgen (R); } 1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ coulomb/kilogram (8)}$$

coulomb/kilogram is the SI-unit.

The röntgen is numerically identical with the old unit defined as “the exposure of X or gamma radiation such that the associated corpuscular emission per 0.001 293 g of air produces, in air, ions carrying one e.s.u. of quantity of electricity of either sign” (6). The exposure thus describes the effect of an electromagnetic radiation field on matter in terms of the ionization that the radiation produces in a standard reference material, air. Use of the term exposure has not officially been extended to the designation of the effect of other types of radiation fields; hence, its application to cases other than electromagnetic radiation is incorrect. Since the exposure is applicable only to electromagnetic radiation, other quantities must be used to describe the conditions under which particle irradiations are carried out. For both neutron and electron irradiations, a description of the radiation field is usually given in terms of the number of particles and their energies; the terminology used will be given more exactly in subsequent publications.

12.3 La dose absorbée, d'autre part, est exprimée seulement en termes d'énergie délivrée au matériau irradié quelle que soit la nature du champ de rayonnement. La CIUR donne la définition suivante de la dose absorbée (8):

« La dose absorbée D est le quotient de $d\bar{\varepsilon}$ par dm où $d\bar{\varepsilon}$ est l'énergie moyenne délivrée par le rayonnement ionisant à la matière dans un élément de volume et dm est la masse de la matière dans cet élément de volume.

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

Une unité unique suffit par conséquent pour tous les types d'irradiations. Cette unité est le *rad*.

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ joule/kilogramme}$$

Le joule/kilogramme est l'unité SI.

Etant donné que cette définition ne spécifie pas le matériau absorbant, le rad ne peut être employé qu'accompagné de la référence à un matériau déterminé. La dose absorbée exprimée en rads est déterminée en partie par la composition du matériau irradié. Lorsqu'ils sont exposés au même champ de rayonnement, des matériaux différents reçoivent, en général, des doses absorbées différentes.

13. Calcul de la dose absorbée à partir d'une mesure d'exposition (12)

13.1 Les irradiations de matériaux isolants sous rayonnements de photons d'énergie inférieure à 3 MeV ont été fréquemment caractérisées par l'exposition mesurée à l'air libre à l'emplacement de l'éprouvette. Comme la dose absorbée est devenue la base de comparaison des effets de différents rayonnements, il est devenu nécessaire d'évaluer la dose absorbée induite par le matériau irradié. L'exposition mesurée à l'air libre à l'emplacement de l'éprouvette peut alors être utilisée comme information immédiate en vue du calcul de la dose absorbée. Les paragraphes suivants contiennent les formules à appliquer dans ces calculs. Les tableaux I et II, pages 26 et 28, présentent les facteurs numériques nécessaires.

13.2 Le tableau I donne les valeurs de f_i (dose absorbée en rads par unité d'exposition en röntgens) pour des énergies de photons comprises entre 0,1 MeV et 3,0 MeV pour les éléments énumérés (voir l'annexe C pour le calcul des valeurs de f_i). Les valeurs f_i ne sont valables que dans des conditions d'équilibre des particules chargées (voir l'annexe B pour des explications complémentaires).

13.3 La dose absorbée par unité d'exposition pour un matériau quelconque de composition connue peut être calculée par la méthode suivante:

13.3.1 Déterminer la fraction massique des éléments dans le matériau.

13.3.2 Prendre dans le tableau I les valeurs f_i correspondant aux éléments du matériau et à l'énergie des photons incidents.

13.3.3 Introduire ces valeurs et leurs fractions massiques correspondantes dans l'équation suivante et calculer f_m :

$$f_m = \sum_i a_i f_i$$

où:

f_m = quotient de la dose absorbée/exposition dans le matériau rad/R

a_i = fraction massique de l'élément i dans le matériau

f_i = dose absorbée par l'élément i par unité d'exposition

13.3.4 Multiplier la valeur obtenue pour f_m par l'exposition en röntgens (obtenue par un essai) pour obtenir la dose absorbée dans le matériau. Ainsi $D_m = Xf_m$.

12.3 Absorbed dose, on the other hand, is expressed solely in terms of energy imparted to the irradiated material, regardless of the nature of the radiation field. The ICRU gives the following definition of absorbed dose (8):

“The absorbed dose D is the quotient of $d\bar{\epsilon}$ by dm , where $d\bar{\epsilon}$ is the mean energy imparted by ionizing radiation to the matter in a volume element and dm is the mass of the matter in that volume element.

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} ”$$

A single unit will therefore suffice for all types of irradiations. This unit is the *rad*.

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ joule/kilogram}$$

Joule/kilogram is the SI-unit.

Since this definition does not specify the absorbing material, the rad can be used only with reference to a specific material. The absorbed dose expressed in rads 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.

13. Calculation of the absorbed dose from a measurement of exposure (12)

13.1 Irradiations of insulating materials with photon radiations at energies below 3 MeV have been frequently characterized by the exposure measured in free air at the place of the specimen. Since absorbed dose has become the basis for comparison of effects of different radiations, it has become necessary to evaluate the absorbed dose produced in the irradiated material. The exposure measured in free air at the place of the specimen may then be utilized as the immediate information from which the absorbed dose is to be calculated. The following sub-clauses contain the formulae to be used in this calculation. Tables I and II, pages 27 and 29, supply the necessary numerical factors.

13.2 Table I gives values of f_i (absorbed dose in rads per unit exposure in röntgens) for photon energies between 0.1 MeV and 3.0 MeV, for the elements listed (see Appendix C for derivation of f_i values). The values of f_i are valid only under conditions of charged particle equilibrium (see Appendix B for explanation).

13.3 The absorbed dose per unit exposure for any material of known composition may be calculated using the following procedure:

13.3.1 Determine the mass fraction of the elements in the material.

13.3.2 From Table I, obtain f_i values for the elements in the material at the incident photon energy.

13.3.3 Substitute these values and their respective mass fractions in the following equation, and solve for f_m :

$$f_m = \sum_i a_i f_i$$

where:

f_m = quotient absorbed dose/exposure in the material, rad/R

a_i = mass fraction of element i in the material, and

f_i = absorbed dose per unit exposure for element i

13.3.4 Multiply the value obtained for f_m by the exposure in röntgens (obtained by test) to obtain the absorbed dose in the material. Thus, $D_m = Xf_m$.

13.4 Supposons, par exemple, qu'il soit demandé de calculer la dose absorbée par un film de polytétrafluoréthylène (PTFE) correspondant à une exposition de 10^6 röntgens de photons de 1 MeV, cette dernière ayant été déterminée au moyen d'une chambre d'ionisation d'une épaisseur de paroi suffisante pour « l'équilibre de particules chargées ». La référence à l'annexe B indique qu'il est nécessaire d'employer un absorbant d'une épaisseur soit de 0,50 cm d'un matériau ayant une densité d'électrons de $3,3 \times 10^{23}$ électrons/cm³, soit de 0,22 cm d'un matériau ayant une densité d'électrons $7,6 \times 10^{23}$ électrons/cm³, soit encore une combinaison d'épaisseurs et de densités fournissant un produit équivalent.

13.4.1 Le polytétrafluoréthylène (PTFE) a pour formule empirique $(CF_2)_n$ (en négligeant les extrémités de chaînes, la non-saturation et les impuretés); donc, les fractions massiques de C et F sont respectivement 0,24 et 0,76.

13.4.2 Le tableau I donne $f_C = 0,866$ rad/R et $f_F = 0,822$ rad/R pour des photons de 1 MeV. Ces valeurs sont à $\pm 0,5\%$.

13.4.3 En introduisant ces valeurs dans l'équation, on obtient:

$$f_{CF_2} = (0,24 \times 0,866) + (0,76 \times 0,822) = 0,83 \text{ rad/R.}$$

Pour cette raison une dose d'exposition de 10^6 R donne une dose absorbée par ce matériau de $0,83 \times 10^6$ rad.

13.4.4 Pour divers composés organiques irradiés par des photons d'énergies comprises entre 0,5 MeV et 1,5 MeV, l'équation du paragraphe 13.3.3 peut être approchée comme suit:

$$f_m = 0,85 a_H - 0,05 a_F - 0,04 a_{Cl} - 0,03 a_P + 0,87.$$

13.5 Le tableau II donne les résultats de ces calculs pour quelques matériaux utilisés couramment, à des niveaux d'énergie des photons de 1 MeV et 0,1 MeV.

14. Calcul de la dose absorbée dans un matériau donné, à partir de celle absorbée dans un autre matériau

14.1 Les données du tableau I peuvent aussi être employées 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 (2) de l'annexe C, on peut voir que pour une exposition constante, le rapport entre les f_i de deux milieux quelconques est égal au rapport de leurs coefficients d'absorption d'énergie en masse (μ_{en}/ρ_m); donc, ce rapport est égal à celui des doses absorbées. Lorsqu'on emploie la dosimétrie chimique, la transformation chimique mesurée peut être convertie directement en dose absorbée en rads. En utilisant le rapport des valeurs f_m , on peut calculer la dose absorbée par un matériau quelconque à partir de la connaissance de la dose absorbée par un dosimètre chimique lorsqu'on connaît l'énergie des photons incidents (dans les limites indiquées à l'article 15).

14.2 Par exemple, si la mesure de la dose absorbée par un dosimètre de Fricke (voir l'annexe A, réf. (5)) donne $5,0 \times 10^5$ rads pour une exposition de 1 h dans une source de rayonnement de ⁶⁰Co 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:

14.2.1 Le dosimètre de Fricke a des fractions massiques pour H, O et S de 0,11, 0,88 et 0,013 respectivement. La formule empirique pour le polyéthylène est $(CH_2)_n$ et les fractions massiques de C et H sont respectivement de 0,86 et 0,14.

14.2.2 D'après le tableau I, $f_H = 1,72$, $f_O = 0,869$, $f_S = 0,869$ et $f_C = 0,866$ pour une énergie de photons de 1,0 MeV.

13.4 For example, suppose it is required to calculate the absorbed dose in a polytetrafluoroethylene (PTFE) film, corresponding to an exposure of 10^6 röntgens of 1 MeV photons, the latter having been determined using an air ionization chamber with sufficient wall thickness for "charged particle equilibrium". Reference to Appendix B indicates the necessity for using an absorber thickness of either 0.50 cm of material with an electron density of 3.3×10^{23} electrons/cm³, or 0.22 cm of material having an electron density of 7.6×10^{23} electrons/cm³, or any combinations of thickness and density to give an equivalent product.

13.4.1 Polytetrafluoroethylene (PTFE) has the empirical formula (CF₂)_n (disregarding chain ends, nonsaturation and impurities); hence, the mass fractions of C and F are 0.24 and 0.76, respectively.

13.4.2 Table I gives $f_C = 0.866$ rad/R and $f_F = 0.822$ rad/R for 1-MeV photons.

These values are within $\pm 0.5\%$.

13.4.3 Substituting these values in the equation gives:

$$f_{CF_2} = (0.24 \times 0.866) + (0.76 \times 0.822) = 0.83 \text{ rad/R.}$$

Therefore, an exposure of 10^6 R gives an absorbed dose in this material of 0.83×10^6 rad.

13.4.4 For various organic compounds irradiated at photon energies in the range between 0.5 MeV and 1.5 MeV, the equation in Sub-clause 13.3.3 may be approximated as:

$$f_m = 0.85 a_H - 0.05 a_F - 0.04 a_{Cl} - 0.03 a_P + 0.87.$$

13.5 Table II lists the results of these calculations for some of the commonly used materials at photon energy levels of 1 MeV and 0.1 MeV.

14. Calculation of absorbed dose in one material from that in another material

14.1 The data in Table I 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 (2) in Appendix C, it is seen that, for constant exposure, the ratio between the f_i 's for any two media equals the ratio between their mass energy absorption coefficients (μ_{en}/ρ_m); hence the ratio equals the ratio between the absorbed doses. When chemical dosimetry is employed, the measured chemical change may be converted directly to the absorbed dose in rads. 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 Clause 15).

14.2 For example, if one measures an absorbed dose in the Fricke dosimeter (see Appendix A, ref. (5)) to be 5.0×10^5 rads for a 1 h exposure in a ⁶⁰Co 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:

14.2.1 The Fricke dosimeter has mass fractions of H, O and S of 0.11, 0.88, and 0.013, respectively. The empirical formula for polyethylene is (CH₂)_n and the weight fraction of C and H are 0.86 and 0.14, respectively.

14.2.2 From Table I, $f_H = 1.72$, $f_O = 0.869$, $f_S = 0.869$ and $f_C = 0.866$ for 1.0 MeV photon energy.

14.2.3 En portant ces valeurs dans l'équation (3) de l'annexe C, on obtient:

$$f_{\text{CH}_2} = (0,86 \times 0,866) + (0,14 \times 1,72) = 0,986 = 0,99 \text{ rad/R}$$

et

$$f_{\text{Fricke}} = (0,11 \times 1,72) + (0,88 \times 0,869) + (0,013 \times 0,869) = 0,96 \text{ rad/R}$$

Le rapport $f_{\text{CH}_2}/f_{\text{Fricke}} = 0,99/0,96 = 1,02$; par conséquent, la dose absorbée par le polyéthylène est égale à:

$$1,02 \times 5,0 \times 10^5 \text{ rad} = 5,10 \times 10^5 \text{ rad.}$$

14.3 Les indications du tableau II peuvent aussi être utilisées 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 3 MeV. Par exemple, si l'on a déterminé la dose absorbée par du polyéthylène irradié dans une source de ^{60}Co comme égale à $5,10 \times 10^5$ rad, et si l'on désire déterminer la dose qui sera absorbée par une éprouvette de polychlorure de vinyle (PVC) dans la même source pendant le même temps, il suffit de multiplier la valeur de la dose absorbée connue par le rapport des f_m pour le matériau considéré:

$$f_{\text{PVC}} = 0,89 \text{ rad/R}; f_{\text{CH}_2} = 0,99 \text{ rad/R}$$

par conséquent,

$$D_{\text{PVC}} = \frac{f_{\text{PVC}}}{f_{\text{CH}_2}} \times 5,10 \times 10^5 \text{ rad} = \frac{0,89}{0,99} \times 5,10 \times 10^5 = 4,58 \times 10^5 \text{ rad absorbé par l'éprouvette de polychlorure de vinyle.}$$

15. Limites

15.1 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 l'on fixe arbitrairement une limite de 10% pour la différence entre la dose à l'entrée et la dose à la sortie de l'éprouvette (10% d'atténuation à travers l'éprouvette), l'épaisseur de l'éprouvette est limitée à 1,1 cm pour un rayonnement de 0,5 MeV et à 1,8 cm pour 1,5 MeV en admettant qu'il n'y a pas d'accumulation et que l'éprouvette a une densité d'électrons de $3,3 \times 10^{23}$ électrons/cm³ (densité d'électrons de l'eau à 25 °C). Voir la note de l'annexe B.

15.2 La figure 3, page 42, donne la courbe de l'énergie de photon en fonction de l'épaisseur de l'éprouvette pour 10% et 25% d'atténuation à travers une éprouvette de masse volumique égale à 1 g/cm³ et de $3,3 \times 10^{23}$ électrons/g (c'est-à-dire H₂O). Les courbes de la figure 3 se déplacent vers la gauche pour des matériaux de densité d'électrons plus élevée et vers la droite pour des matériaux de densité d'électrons moins élevée (voir la note ci-dessous). L'épaisseur pour une atténuation de 10% ou 25% dans l'éprouvette est le quotient de la valeur obtenue par la figure 3 par le rapport de la densité d'électrons de l'éprouvette à $3,3 \times 10^{23}$ électrons/g. Etant donné que les courbes sont calculées à partir de la seule atténuation et que l'on néglige l'accumulation dans les éprouvettes de plus grande épaisseur, les courbes représentent l'atténuation maximale pour une énergie et une épaisseur données.

Note. — Toutes les figures ne s'appliquent qu'à des matériaux composés d'éléments de numéro atomique inférieur à 18.

14.2.3 Substituting these values in equation (3) of Appendix C, one obtains:

$$f_{\text{CH}_2} = (0.86 \times 0.866) + (0.14 \times 1.72) = 0.986 = 0.99 \text{ rad/R}$$

and

$$f_{\text{Fricke}} = (0.11 \times 1.72) + (0.88 \times 0.869) + (0.013 \times 0.869) = 0.96 \text{ rad/R}$$

The ratio $f_{\text{CH}_2}/f_{\text{Fricke}} = 0.99/0.96 = 1.02$; therefore, the absorbed dose in polyethylene is equal to:

$$1.02 \times 5.0 \times 10^5 \text{ rad} = 5.10 \times 10^5 \text{ rad.}$$

14.3 The information in Table II may also 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 0.1 MeV or between 0.5 MeV and 3 MeV. For example, if one has determined the absorbed dose in polyethylene irradiated in a ^{60}Co irradiator, found it to be 5.10×10^5 rad, and wishes to determine the dose that will be absorbed by a specimen of polyvinyl chloride (PVC) in the same irradiator for the same time, all that is necessary is to multiply the known absorbed dose by the ratio of the f_m 's for the materials involved:

$$f_{\text{PVC}} = 0.89 \text{ rad/R}; f_{\text{CH}_2} = 0.99 \text{ rad/R}$$

therefore,

$$D_{\text{PVC}} = \frac{f_{\text{PVC}}}{f_{\text{CH}_2}} \times 5.10 \times 10^5 \text{ rad} = \frac{0.89}{0.99} \times 5.10 \times 10^5 = 4.58 \times 10^5 \text{ rad absorbed by the polyvinyl chloride specimen.}$$

15. Limitations

15.1 Since the absorbed dose distribution through the specimen being irradiated will vary and is a function of the specimen thickness, 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 one arbitrarily sets a limit of 10% for the difference between the absorbed dose at the front and rear of the specimen (10% attenuation through the specimen), then the specimen thickness is limited to 1.1 cm for 0.5 MeV and 1.8 cm for 1.5 MeV radiation, assuming no build-up and a specimen of electron density 3.3×10^{23} electrons/cm³ (electron density of water at 25 °C). See note in Appendix B.

15.2 Figure 3, page 42, is a plot of photon energy versus thickness of sample for 10% and 25% attenuation through a specimen of unit density and 3.3×10^{23} electrons/g (that is, H₂O). The curves in Figure 3 will shift to the left for higher electron density material and to the right for lower electron density material (see note below). The thickness for 10% or 25% attenuation in the specimen will be the value obtained from Figure 3 divided by the ratio of the electron density of the specimen to 3.3×10^{23} electrons/g. 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.

Note. — All figures are valid only for materials composed of elements having atomic numbers less than 18.

TABLEAU I
Dose absorbée par unité d'exposition rad/röntgen

$$f_i = 0,869 \frac{(\mu_{en}/\rho)_i}{(\mu_{en}/\rho)_{air}}$$

Energie de photon MeV	H	C	N	O	F	Si	S	Cl	P
0,10	1,53	0,802	0,835	0,873	0,896	1,67	2,25	2,56	1,88
0,15	1,67	0,852	0,862	0,872	0,845	1,06	1,22	1,26	1,09
0,20	1,71	0,866	0,866	0,879	0,833	0,947	1,00	1,00	0,947
0,30	1,72	0,869	0,872	0,872	0,823	0,893	0,909	0,950	0,875
0,40	1,72	0,866	0,869	0,869	0,822	0,878	0,884	0,855	0,851
0,50	1,72	0,869	0,869	0,869	0,822	0,866	0,878	0,845	0,843
0,60	1,72	0,869	0,869	0,869	0,825	0,869	0,872	0,839	0,843
0,80	1,72	0,866	0,869	0,869	0,823	0,866	0,863	0,833	0,843
1,0	1,72	0,866	0,869	0,869	0,822	0,869	0,869	0,828	0,837
1,5	1,72	0,869	0,869	0,869	0,821	0,869	0,866	0,824	0,835
2,0	1,72	0,869	0,869	0,869	0,824	0,873	0,873	0,835	0,846
3,0	1,68	0,865	0,869	0,873	0,830	0,890	0,890	0,865	0,865

TABLEAU II

Dose absorbée par unité d'exposition en fonction de la composition du matériau et de l'énergie des photons

Matériau	Formule empirique	f_m Rad/röntgen	
		1 MeV	0,1 MeV
Polystyrène	(CH)n	0,94	0,86
Polyéthylène	(CH ₂)n	0,99	0,90
Polyamide (acide ε-amino-caproïque)	(C ₅ H ₁₁ ON)n	0,95	0,89
Siloxane de polydiméthyle	(C ₂ H ₆ OSi)n	0,93	1,21
Polysulfure d'éthylène	(C ₂ H ₄ S ₂)n	0,90	2,01
Copolymère de chlorure de vinylidène	(C ₄ H ₅ Cl ₃)n	0,87	2,00
Polytétrafluoréthylène	(CF ₂)n	0,83	0,87
Polychlorotrifluoréthylène	(C ₂ F ₃ Cl)n	0,83	1,38
Polychlorure de vinyle	(C ₂ H ₂ Cl)n	0,89	1,82
Polychlorure de vinylidène	(C ₂ H ₂ Cl ₂)n	0,86	2,10
Polypyrolidone de vinyle	(C ₆ H ₉ NO)n	0,94	0,87
Polycarbazote de vinyle	(C ₁₄ H ₁₁ N)n	0,92	0,85
Polyacétate de vinyle	(C ₄ H ₆ O ₂)n	0,93	0,88
Polyméthacrylate de méthyle	(C ₅ H ₈ O ₂)n	0,94	0,88
Phosphate de tributyle	(C ₄ H ₉) ₃ PO ₄	0,95	1,02
Dosimètre de Fricke	—	0,96	0,96

Ces données peuvent aussi servir pour des rayonnements gamma ⁶⁰Co et ¹³⁷Cs et pour des rayonnements X de 2 à 3 MeV.

TABLE I
Absorbed dose per unit exposure rad/röntgen

$$f_i = 0.869 \frac{(\mu_{en}/\rho)_i}{(\mu_{en}/\rho)_{air}}$$

Photon energy MeV	H	C	N	O	F	Si	S	Cl	P
0.10	1.53	0.802	0.835	0.873	0.896	1.67	2.25	2.56	1.88
0.15	1.67	0.852	0.862	0.872	0.845	1.06	1.22	1.26	1.09
0.20	1.71	0.866	0.866	0.879	0.833	0.947	1.00	1.00	0.947
0.30	1.72	0.869	0.872	0.872	0.823	0.893	0.909	0.950	0.875
0.40	1.72	0.866	0.869	0.869	0.822	0.878	0.884	0.855	0.851
0.50	1.72	0.869	0.869	0.869	0.822	0.866	0.878	0.845	0.843
0.60	1.72	0.869	0.869	0.869	0.825	0.869	0.872	0.839	0.843
0.80	1.72	0.866	0.869	0.869	0.823	0.866	0.863	0.833	0.843
1.0	1.72	0.866	0.869	0.869	0.822	0.863	0.869	0.828	0.837
1.5	1.72	0.869	0.869	0.869	0.821	0.869	0.866	0.824	0.835
2.0	1.72	0.869	0.869	0.869	0.824	0.873	0.873	0.835	0.846
3.0	1.68	0.865	0.869	0.873	0.830	0.890	0.890	0.865	0.865

TABLE II
Absorbed dose per unit exposure as a function of material composition and photon energy

Material	Empirical formula	f_m Rad/röntgen	
		1 MeV	0.1 MeV
Polystyrene	(CH)n	0.94	0.86
Polyethylene	(CH ₂)n	0.99	0.90
Polyamide (ε-amino caproic acid)	(C ₅ H ₁₁ ON)n	0.95	0.89
Polydimethyl siloxane	(C ₂ H ₆ OSi)n	0.93	1.21
Ethylene polysulfide	(C ₂ H ₄ S ₄)n	0.90	2.01
Vinylidene chloride copolymer	(C ₄ H ₅ Cl ₃)n	0.87	2.00
Polytetrafluoroethylene	(CF ₂)n	0.83	0.87
Polychlorotrifluoroethylene	(C ₂ F ₃ Cl)n	0.83	1.38
Polyvinyl chloride	(C ₂ H ₂ Cl)n	0.89	1.82
Polyvinylidene chloride	(C ₂ H ₂ Cl ₂)n	0.86	2.10
Polyvinyl pyrrolidone	(C ₆ H ₉ NO)n	0.94	0.87
Polyvinyl carbazote	(C ₁₄ H ₁₁ N)n	0.92	0.85
Polyvinyl acetate	(C ₄ H ₆ O ₂)n	0.93	0.88
Polymethyl methacrylate	(C ₅ H ₈ O ₂)n	0.94	0.88
Tributyl phosphate	(C ₄ H ₉) ₃ PO ₄	0.95	1.02
Fricke dosimeter	—	0.96	0.96

These data may also be used for ⁶⁰Co and ¹³⁷Cs gamma rays and for 2 to 3 MeV X rays.

16. Références

- (1) Charlesby, A., *Atomic Radiation and Polymers*, Pergamon Press, 1960.
 - (2) Bolt, R. O., and Carroll, J. G., *Radiation Effects on Organic Materials*, Academic Press, 1963.
 - (3) Kircher, J. F., and Bowman, R. E., *Effects of Radiation on Materials and Components*, Reinhold Publishing Corporation, 1964.
 - (4) Chapiro, Adolphe, *Radiation Chemistry of Polymeric Systems*, p. 521-5, Interscience Publishers, 1962.
 - (5) Dole, Malcolm, *The Radiation Chemistry of Macromolecules*, Academic Press, Volume I (1972), Volume II (1973).
 - (6) « Physical Aspects of Irradiation, Recommendations of the International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU), Report 10b, 1962 », *NBS Handbook 85* (1964). U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 20402.
 - (7) Attix, F. H., and Roesch, W. C., *Radiation Dosimetry*, Academic Press, Vol. I (1968), Vol. II (1966), Vol. III (1969).
 - (8) « Radiation Quantities and Units », ICRU Report 19 (1971).
 - (9) « Neutron Fluence, Neutron Spectra and Kerma », ICRU Report 13 (1969).
 - (10) « Radiation Dosimetry: X-rays and Gamma Rays with Maximum Photon Energies between 0.6 and 50 MeV », ICRU Report 14 (1969).
 - (11) « Linear Energy Transfer », ICRU Report 16 (1970).
 - (12) « Radiation Dosimetry: X-ray Generated at Potentials of 5 to 150 kV », ICRU Report 17 (1970).
- Note.* — Les rapports de la CIUR peuvent être obtenus auprès de:
- ICRU Publications
P.O. Box 30165
Washington, D.C. 20014
U.S.A.
- (13) « Calculation of Absorbed Dose from X or Gamma Radiation », ASTM D2568, *ASTM Book of Standards*, Parts 39 and 45 (1976).
 - (14) Hubbell, J. H., « Photon Cross-sections, Attenuation Coefficients and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV », U.S. Dept. of Commerce, NSRDS-NBS 29 (1969). Also *Atomic Data* 3, No. 3, November 1971, p. 241.

16. References

- (1) Charlesby, A., *Atomic Radiation and Polymers*, Pergamon Press, 1960.
- (2) Bolt, R. O., and Carroll, J. G., *Radiation Effects on Organic Materials*, Academic Press, 1963.
- (3) Kircher, J. F., and Bowman, R. E., *Effects of Radiation on Materials and Components*, Reinhold Publishing Corporation, 1964.
- (4) Chapiro, Adolphe, *Radiation Chemistry of Polymeric Systems*, p. 521-5, Interscience Publishers, 1962.
- (5) Dole, Malcolm, *The Radiation Chemistry of Macromolecules*, Academic Press, Volume I (1972), Volume II (1973).
- (6) "Physical Aspects of Irradiation, Recommendations of the International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU), Report 10b, 1962", *NBS Handbook 85* (1964). U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 20402.
- (7) Attix, F. H., and Roesch, W. C., *Radiation Dosimetry*, Academic Press, Vol. I (1968), Vol. II (1966), Vol. III (1969).
- (8) "Radiation Quantities and Units", ICRU Report 19 (1971).
- (9) "Neutron Fluence, Neutron Spectra and Kerma", ICRU Report 13 (1969).
- (10) "Radiation Dosimetry: X-rays and Gamma Rays with Maximum Photon Energies between 0.6 and 50 MeV", ICRU Report 14 (1969).
- (11) "Linear Energy Transfer", ICRU Report 16 (1970).
- (12) "Radiation Dosimetry: X-ray Generated at Potentials of 5 to 150 kV", ICRU Report 17 (1970).

Note. — ICRU Reports are available from:

ICRU Publications
P.O. Box 30165
Washington, D.C. 20014
U.S.A.

- (13) "Calculation of Absorbed Dose from X or Gamma Radiation", ASTM D2568, *ASTM Book of Standards*, Parts 39 and 45 (1976).
- (14) Hubbell, J. H., "Photon Cross-sections, Attenuation Coefficients and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV", U.S. Dept. of Commerce, NSRDS-NBS 29 (1969). Also *Atomic Data* 3, No. 3, November 1971, p. 241.

ANNEXE A

MÉTHODES COURANTES RECOMMANDÉES POUR LA MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE DE RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE DANS LES POLYMÈRES

Méthode	Type	Dose (rad)	Débit de dose (rad/h)	Energie	Température	Observations	Références
<i>Méthodes absolues</i> Calorimètres	Dose ou débit de dose	10 à 10 ⁶	10 ⁸ à environ 5 × 10 ⁹	Indépendante de l'énergie	Aucun effet	Type adiabatique tout à fait approprié. Haute précision avec des détecteurs à thermistance. Lecture électrique directe bien appropriée aux champs de grande intensité. Disponible dans le commerce	[2]
Chambre d'ionisation à cavité	Dose ou débit de dose		D'une valeur très faible à 10 ⁸ , la limitation étant due à la perte de charge par recombinaison d'ions	Spécifiée par le constructeur		Dispositifs disponibles dans le commerce. Lecture électrique directe. Méthode très sensible appropriée à la mesure de faibles doses et de faibles débits de dose	[3] [4] [13]
<i>Méthodes secondaires</i> Conversion chimique Sulfate ferreux (dosimètre de Fricke)	Dose	2 × 10 ³ à 4 × 10 ⁴	Jusqu'à 10 ⁷	Indépendant de l'énergie dans la gamme de 0,66 MeV à 16 MeV	Faible effet dans la gamme de 0 °C à 50 °C pendant l'irradiation, très sensible pour le relevé spectrophotométrique	Facile à préparer en laboratoire. Mesure spectrophotométrique. Recommandé pour rayons X et gamma, sauf si le débit d'exposition est trop élevé pour obtenir facilement 50 000 rad	[2] [5] [13]
Sulfate cérique	Dose	5 × 10 ⁴ à 10 ⁹	Jusqu'à 10 ⁹	Domaine similaire à celui du sulfate ferreux	Légers effets sur les résistants au-dessus de la température ambiante	Sensible aux impuretés. Exige beaucoup de précautions	[6]
Acide oxalique	Dose	10 ⁵ à 1,6 × 10 ⁸	Jusqu'à 3,5 × 10 ⁶	Comme ci-dessus	Aucun effet entre 15 °C et 80 °C	Activation des neutrons négligeable. Excellent pour des télemesures au cœur	[2]
Protoxyde d'azote	Dose	10 ⁶ à 3 × 10 ⁹	Jusqu'à 10 ⁹	Aucun effet	Aucun effet entre -18 °C et 200 °C	Préparation en laboratoire. Opération facile. Mesure de la quantité de gaz dégagée	[8] [9]
Cyclohexane	Dose	10 ⁴ à 10 ⁸	Jusqu'à 10 ⁹	Aucun effet	Aucun effet entre -30 °C et 100 °C	Mesure de la quantité de gaz dégagée	
Polyéthylène	Dose	10 ⁴ à 10 ¹⁰	Indépendant du débit de dose entre 10 ³ à 10 ⁸	Doit pénétrer dans la capsule de verre		Mesure de la quantité de gaz dégagée, pas d'effet secondaire, disponible dans le commerce	

APPENDIX A
CURRENT METHODS TO BE RECOMMENDED FOR MEASURING ABSORBED DOSE
OF ELECTROMAGNETIC RADIATION IN POLYMERIC MATERIALS

Method	Type	Dose range (rad)	Dose-rate range (rad/h)	Energy	Temperature	Comments	Reference
<i>Absolute methods</i> Calorimeters	Dose or dose-rate	10 to 10 ⁶	From 10 ³ to about 5 × 10 ⁸	Independent of energy	No effect	Adiabatic type most acceptable. High precision with thermistor sensors. Direct electrical reading well suited for high intensity fields. Commercially available	[2]
	Dose or dose-rate		From very low to 10 ⁸ . Limitation due to charge loss by recombination of ions	Specified by manufacturer		Commercially available devices. Direct electrical reading. Very sensitive method well suited for low dose and dose-rate measurements	[3] [4] [13]
<i>Secondary methods</i> <i>Chemical conversion</i> Ferrous sulfate (Fricke dosimeter)	Dose	2 × 10 ³ to 4 × 10 ⁴	Up to 10 ⁷	Independent of energy in the range of 0.66 MeV to 16 McV	Small effect in the range of 0 °C to 50 °C during irradiation, very sensitive for spectrophotometric read-out	Easily prepared in the laboratory. Spectrophotometric measurement. Recommended for X and γ radiations, except if the exposure rate is too high to obtain easily 50 000 rad	[2] [5] [13]
	Dose	5 × 10 ⁴ to 10 ⁹	Up to 10 ⁹	Range similar to ferrous sulfate	Small effects on yields above room temperature	Sensitive to impurities. Requires many precautions	[6]
Oxalic acid	Dose	10 ⁵ to 1.6 × 10 ⁸	Up to 3.5 × 10 ⁶	Same as above	No effect from 15 °C to 80 °C	Neutron activation negligible. Excellent for in-pile measurements	[2]
Nitrous oxide	Dose	10 ⁶ to 3 × 10 ⁹	Up to 10 ⁹	No effect	No effect from -18 °C to 200 °C	To be prepared in the laboratory. Easy procedure. Gas yield measurement	[8]
Cyclohexane	Dose	10 ⁴ to 10 ⁸	Up to 10 ⁹	No effect	No effect from -30 °C to 100 °C	Gas yield measurement	[9]
Polyethylene	Dose	10 ⁴ to 10 ¹⁰	Not rate-dependent between 10 ³ and 10 ⁸	Must penetrate glass capsule		Gas yield measurement, no side effects, commercially available	

ANNEXE A (suite)

Méthode	Type	Dose (rad)	Débit de dose (rad/h)	Energie	Température	Observations	Références
<i>Dispositifs à courant photoélectrique</i> Silicium à jonction p-n	Débit de dose		10^2 à 10^{10}	Réponse plus élevée par fluence aux faibles énergies	Sensible à la température	Disponible dans le commerce. Chaque diode doit être étalonnée. Lecture directe. La réduction de sensibilité due aux dégradations par le rayonnement nécessite un réétalonnage	[10] [2]
<i>Photoluminescence</i> Verre au phosphate activé à l'argent	Dose	10^{-2} à 10^4	Au moins jusqu'à 4×10^{12}	Réponse de 10 à 30 fois plus élevée par röntgen à 30 keV qu'à 1,2 MeV, en fonction du type et de la dimension des pièces de verre utilisées. Amélioré par écran	On doit appliquer des coefficients à l'exposition lorsque la température diffère de 25 °C	Appareils de lecture et choix de verres disponibles dans le commerce	[11] [13]
<i>Thermoluminescence</i> Fluorure de calcium activé	Dose	2×10^{-3} à 4×10^6	Au moins jusqu'à 4×10^8	Réponse environ 15 fois plus élevée par röntgen à 30 keV qu'à 1,2 MeV. Amélioré par écran	Pointe de luminescence stable dans le temps à 250 °C	Appareils de lecture et sels de qualité dosimétrique disponibles dans le commerce. Temps nécessaire (16 h) pour la stabilisation après l'exposition	[11] [13]
Fluorure de lithium activé	Dose	10^{-2} à 3×10^4	Au moins jusqu'à 2×10^8	Réponse environ 1,5 fois plus élevée par röntgen 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 au champ mixte de rayonnements gamma et neutronique	[12] [13]

APPENDIX A (continued)

Method	Type	Dose range (rad)	Dose-rate range (rad/h)	Energy	Temperature	Comments	Reference
<i>Photocurrent devices</i> p-n junction silicon	Dose-rate		10^2 to 10^{10}	Greater response per fluence at low energy	Temperature sensitive	Commercially available. Each diode requires calibration. Direct reading. Loss in sensitivity due to radiation damage requires recalibration	[10] [2]
<i>Photoluminescence</i> Silver-activated phosphate glass	Dose	10^{-2} to 10^4	At least up to 4×10^{12}	10 to 30 times greater response per R at 50 keV than at 1.2 MeV, depending on type and size of glass pieces used. Improved by shielding	Must apply coefficients for exposure deviations from 25 °C	Read-out instruments and selection of glasses available commercially	[11] [13]
<i>Thermoluminescence</i> Activated calcium fluoride	Dose	2×10^{-3} to 4×10^6	At least up to 4×10^8	Approximately 15 times greater response per R at 30 keV than at 1.2 MeV. Improved by shielding	Time-stable glow-peak at 250 °C	Read-out instruments and dosimetry-grade salts are commercially available. Time required (16 h) to stabilize after exposure	[11] [13]
Activated lithium fluoride	Dose	10^{-3} to 3×10^4	At least up to 2×10^8	Approximately 1.5 times greater response per R 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. Unavailable for mixed gamma and neutron fields	[12] [13]

Références de dosimétrie

Dosimetry references

- [1] « Physical Aspects of Irradiation, Recommendations of the International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU), Report 10b, 1962 », *NBS Handbook 85* (1964). U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- [2] Attix, F. H., and Roesch, W. C., *Radiation Dosimetry*, Academic Press, Vol. I (1968), Vol. II (1966), Vol. III (1969).
- [3] Boag, J. W., « Radiation Dosimetry », Academic Press, p. 153 (1956).
- [4] Laughlin, J. S. et al., *Radiology* 60, 165 (1953).
- [5] A.S.T.M. D 1671-72, « Standard Method of Test for Absorbed Gamma Radiation Dose in the Fricke Dosimeter », *Book of ASTM Standards*, Parts 39 and 45 (1976).
- [6] Harlan, J. T., Hart, E. J., « Ceric Dosimetry: Accurate Measurements at 10^8 Rads », *Nucleonics* 17, 102 and 107 (1959).
- [7] Draganic, I., *Nucleonics* 21, 6 (1953).
- [8] Harteck, P., Dondes, S., « Nitrous Oxide Dosimeter for High Levels of Betas, Gammas and Thermal Neutrons », *Nucleonics* 14, 66 (1956).
- [9] Fory, D. A., « High Dose N_2O Dosimeter », *Nucleonics* 21, 50 (1963).
- [10] Manent, G., « Utilisation de diodes au silicium pour la mesure des flux gamma », *Bul. Inf. Sc. et Tech.* 82, 27-29 (1964).
- [11] Attix, F. H., « Present Status of Dosimetry by Radiophotoluminescence and Thermoluminescence Methods », U.S. Naval Research Laboratory, Report 6143, September 18 (1964).
- [12] Karzmark, C. J., White, J., and Fowler, J. F., « Lithium Fluoride Thermoluminescence Dosimetry », *Phys. in Med. and Biol.* 9, 273 (1964).
- [13] DIN 6800. « Methods for Dose Measurements by Radiological Techniques », Beuth-Vertrieb GmbH (Berlin).

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60544-1:1977
Withdrawn

ANNEXE B

ÉQUILIBRE DE PARTICULES CHARGÉES

B1. Epaisseur d'équilibre de particules chargées

B1.1 Chaque fois qu'un matériau est irradié par des rayons X ou gamma non contaminés par des électrons secondaires, il se produit initialement (dans le premier absorbant) une accumulation d'énergie (dose absorbée) à mesure que le rayonnement pénètre dans le matériau. Au-dessus d'une certaine 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. La figure 1, page 40, donne la 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. Cependant, si l'éprouvette est irradiée suivant une seule direction, il suffit de placer un absorbant devant et derrière elle. La figure 2, page 41, donne un diagramme de l'épaisseur de l'absorbant en fonction de l'énergie pour un matériau de densité d'électrons de $3,3 \times 10^{23}$ électrons/cm³. La figure 3, page 42, donne le diagramme de l'épaisseur de l'eau pour une atténuation donnée d'une irradiation unidirectionnelle.

Note. — La densité d'électrons pour un matériau quelconque peut être calculée à partir de:

$$n = (\rho N_A / M) \sum_i Z_i$$

où:

n = densité d'électrons (m⁻³)

ρ = masse volumique du matériau (kg/m³)

N_A = $6,023 \times 10^{23}$ mol⁻¹, nombre d'Avogadro

M = masse moléculaire (kg/mol)

Z = nombre atomique

et $\sum_i Z_i$ = nombre total d'électrons par molécule.

Etant donné que $\frac{\sum_i Z_i}{M}$ est d'environ $\frac{1}{2}$ pour presque tous les matériaux, cette équation peut être simplifiée comme suit:

$$n = \frac{\rho N_A}{2} = 3 \times 10^{23} \rho.$$

La courbe de la figure 2 se déplace vers la gauche lorsque la densité d'électrons de l'absorbant dépasse cette valeur calculée, et vers la droite pour des matériaux de densité d'électrons inférieure. Par conséquent, l'épaisseur équivalente à utiliser est le quotient de celle obtenue sur la figure 2 par le rapport de la densité d'électrons de l'absorbant à $3,3 \times 10^{23}$ électrons/cm³.

B1.2 Il est demandé, par exemple, d'irradier un film de polytétrafluoréthylène (PTFE) par des photons de 1,1 MeV. En se reportant à la figure 2, on note qu'il faut 0,5 cm de matériau de $3,3 \times 10^{23}$ électrons/cm³ pour assurer l'équilibre de particules chargées. Par conséquent, c'est cette épaisseur de matériau qui doit entourer le film.