

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC**

TR 62283

Première édition
First edition
2003-01

**Rayonnement nucléaire –
Guide d'application sur les fibres optiques**

**Nuclear radiation –
Fibre optic guidance**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC/TR 62283:2003

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions consolidées

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

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique. Des renseignements relatifs à cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- Site web de la CEI (www.iec.ch)
- Catalogue des publications de la CEI

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/catlg-f.htm) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- IEC Just Published

Ce résumé des dernières publications parues (www.iec.ch/JP.htm) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- Service clients

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: custserv@iec.ch
Tél: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Further information on IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

- IEC Web Site (www.iec.ch)
- Catalogue of IEC publications

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/catlg-e.htm) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- IEC Just Published

This summary of recently issued publications (www.iec.ch/JP.htm) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- Customer Service Centre

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: custserv@iec.ch
Tel: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC**

TR 62283

Première édition
First edition
2003-01

Rayonnement nucléaire – Guide d'application sur les fibres optiques

Nuclear radiation – Fibre optic guidance

© IEC 2003 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

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

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

U

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	6
INTRODUCTION	8
1 Domaine d'application.....	10
2 Documents de référence	10
3 Unités de rayonnement, calcul des doses	10
4 Protection contre les rayonnements	12
5 Milieux de rayonnement et exposition	14
5.1 Radioactivité naturelle	14
5.2 Réacteurs nucléaires (fission).....	14
5.3 Réacteurs de fusion.....	14
5.4 Expériences de physique des hautes énergies.....	16
5.5 Milieux spatiaux.....	16
5.6 Médecine.....	18
5.7 Milieux militaires	18
6 Installations d'irradiation et dosimétrie	20
6.1 Irradiation gamma continue.....	20
6.2 Irradiation neutronique.....	22
6.3 Irradiation protonique.....	24
6.4 Irradiation électronique	26
6.5 Irradiation pulsée.....	26
7 Effets des rayonnements sur les fibres optiques	28
8 Affaiblissement de transmission dû aux rayonnements	30
8.1 Radioantécédents.....	30
8.2 Relation avec la longueur d'onde	30
8.3 Relation avec la température	32
8.4 Relation avec l'énergie lumineuse, photo-instabilité	34
8.5 Relation avec le débit de dose.....	36
8.6 Irradiations pulsées	40
8.7 Relation avec le type de rayonnement	42
8.8 Recuit de l'affaiblissement	44
8.9 Conclusions.....	44
9 Effets des rayonnements sur les composants des fibres optiques	46
9.1 Connecteurs	46
9.2 Coupleurs et multiplexeurs	48
9.3 Réseaux gravés de fibres de Bragg	48
Bibliographie	50

CONTENTS

FOREWORD	7
INTRODUCTION	9
1 Scope	11
2 Reference documents	11
3 Radiation units, dose calculation	11
4 Radiation shielding	13
5 Radiation environments and exposure	15
5.1 Natural radioactivity	15
5.2 Nuclear reactors (fission)	15
5.3 Fusion reactors	15
5.4 High-energy physics experiments	17
5.5 Space environments	17
5.6 Medicine	19
5.7 Military environments	19
6 Irradiation facilities and dosimetry	21
6.1 Continuous gamma irradiation	21
6.2 Neutron irradiation	23
6.3 Proton irradiation	25
6.4 Electron irradiation	27
6.5 Pulsed irradiation	27
7 Radiation effects on optical fibres	29
8 Radiation-induced transmission loss	31
8.1 Radiation history	31
8.2 Wavelength dependence	31
8.3 Temperature dependence	33
8.4 Light power dependence, photobleaching	35
8.5 Dose rate dependence	37
8.6 Pulsed irradiations	41
8.7 Radiation type dependence	43
8.8 Loss annealing	45
8.9 Conclusions	45
9 Radiation effects on fibre optic components	47
9.1 Connectors	47
9.2 Couplers and multiplexers	49
9.3 Fibre Bragg gratings	49
Bibliography	51

Figure 1 – Relation avec la longueur d'onde de l'affaiblissement dû aux rayonnements de la fibre à gradient d'indice dopée au Ge AT&T MM Rad Hard 3A (50/125 μm)	32
Figure 2 – Dépendance thermique de l'affaiblissement dû aux rayonnements	34
Figure 3 – Relation de l'affaiblissement dû aux rayonnements avec l'énergie lumineuse de la fibre unimodale non dopée Schott P 926/20E	34
Figure 4 – Relation de l'affaiblissement dû aux rayonnements avec l'énergie lumineuse dans les fibres modernes MM SI et SM	36
Figure 5 – Relation de l'affaiblissement dû aux rayonnements avec le débit de dose: $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$	38
Figure 6 – Recuit de l'affaiblissement dû aux rayonnements de la fibre GI à gradient d'indice dopée au Ge KWO G 2.2/1380 après irradiation électronique pulsée respectivement à des valeurs de dose de 5 Gy(SiO_2), 100 Gy(SiO_2) et 1 000 Gy(SiO_2)	40

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 62283:2003

Figure 1 – Wavelength dependence of the radiation-induced loss of the Ge-doped graded index fibre AT&T MM Rad Hard 3A (50/125 μm)	33
Figure 2– Temperature dependence of the radiation-induced loss	35
Figure 3 – Light power dependence of the radiation-induced loss of the undoped single-mode fibre Schott P 926/20E	35
Figure 4 – Light power dependence of the radiation-induced loss in modern MM SI and SM fibres	37
Figure 5 – Dose rate dependence of the radiation-induced loss; $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$	39
Figure 6 – Annealing of the radiation-induced loss of the Ge-doped GI fibre KWO G 2.2/1380 after pulsed electron irradiation with dose values of 5 Gy(SiO_2), 100 Gy(SiO_2) and 1 000 Gy(SiO_2), respectively	41

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 62283:2003

Withdrawing

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

RAYONNEMENT NUCLÉAIRE – GUIDE D'APPLICATION SUR LES FIBRES OPTIQUES

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Électrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent rapport technique peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est l'élaboration des Normes internationales. Toutefois, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique lorsqu'il a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

La CEI 62283, qui est un rapport technique, a été établie par le sous-comité 86A: Fibres et câbles, du comité d'études 86 de la CEI: Fibres optiques.

Le texte de ce rapport technique est issu des documents suivants:

Projet d'enquête	Rapport de vote
86A/758/DTR	86A/798/RVC

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2008. A cette date, la publication sera

- reconduite;
- supprimée;
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**NUCLEAR RADIATION –
FIBRE OPTIC GUIDANCE**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this technical report may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. However, a technical committee may propose the publication of a technical report when it has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

IEC 62283, which is a technical report, has been prepared by subcommittee 86A: Fibres and cables, of IEC technical committee 86: Fibre optics.

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

Enquiry draft	Report on voting
86A/758/DTR	86A/798/RVC

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

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2008. At this date, the publication will be

- reconfirmed;
- withdrawn;
- replaced by a revised edition, or
- amended.

INTRODUCTION

Afin de produire une liste d'instructions claires et concises à partir de la méthode d'essai de la CEI 60793-1-54 *Fibres optiques – Partie 1-54: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Irradiation Gamma*, les connaissances de base nécessaires à la réalisation d'essais corrects, pertinents et significatifs sur les irradiations font l'objet d'un «guide d'application» séparé.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 62283:2003

Withd2Wm

INTRODUCTION

In order to restrict the test method of IEC 60793-1-54, *Optical fibres – Part 1-54: Measurement methods and test procedures – Gamma irradiation* to a clear, concise listing of instructions, the background knowledge necessary to perform correct, relevant and expressive irradiation tests is presented here separately as a “guidance document”.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 62283:2003

Withd2Wm

RAYONNEMENT NUCLÉAIRE – GUIDE D'APPLICATION SUR LES FIBRES OPTIQUES

1 Domaine d'application

Le présent rapport technique étudie brièvement l'exposition aux rayonnements dans certains milieux et selon certaines applications ainsi que les différents effets des rayonnements sur les fibres. Il décrit également l'effet le plus conséquent d'un rayonnement, c'est-à-dire l'augmentation de l'affaiblissement de transmission, et sa grande dépendance vis-à-vis de diverses propriétés des fibres et des conditions d'essai. La réalisation d'essais appropriés pour chaque application exige une connaissance de ces éléments connexes.

2 Documents de référence

CEI 60793-1-54, — *Fibres optiques – Partie 1-54: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Irradiation Gamma* ¹⁾

3 Unités de rayonnement, calcul des doses

L'interaction du rayonnement avec la matière dépend de la charge, de la masse et de l'énergie lorsqu'il s'agit de rayonnements corpusculaires (par exemple électrons, protons, neutrons, particules alpha et ions lourds) et de l'énergie dans le cas de rayonnements électromagnétiques tels que les rayons X ou les quanta gamma. Cette interaction est à l'origine d'un transfert d'énergie vers la matière concernée, ce qui provoque l'ionisation et le réchauffement.

Plus l'énergie du rayonnement est intense, plus sa pénétrabilité est grande et plus sa gamme est étendue. L'unité de l'énergie est l'électronvolt (eV). Les énergies de rayonnement habituelles des milieux naturels ou techniques varient de dizaines de keV (rayons X à usage médical) à plusieurs MeV (réacteurs à fission ou à fusion et armes nucléaires). Les énergies actuelles des accélérateurs de physique à haute énergie varient en fonction des particules en collision. L'énergie maximale générée par les collisions électron-positron est de 100 GeV par faisceau. Concernant les collisions proton-proton, l'énergie générée est de 1 TeV par faisceau. Les faisceaux d'énergie des futurs collisionneurs proton-proton, par exemple l'accélérateur à particules LHC au CERN, pourront atteindre 7 TeV. Il existe en outre un certain nombre d'autres accélérateurs qui fonctionnent dans cette gamme d'énergie.

Il est à noter que ces énergies concernent les particules en collision. Les particules secondaires, c'est-à-dire celles qui sont susceptibles d'affecter les fibres, possèdent des énergies beaucoup moins intenses.

L'énergie déposée par les rayonnements ionisants dans la matière est appelée «dose d'énergie» (ou dose absorbée). L'ancienne unité est le radian, (rd ou rad), $1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$ ($1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$). L'unité SI est le gray [Gy], $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$.

Certains dosimètres mesurent la charge libérée dans un gaz (par exemple les chambres d'ionisation), pour déterminer un autre type de dose, la «dose ionique». L'unité de dose ionique est le röntgen, [R], $1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$, avec C = unité de charge (coulomb).

Il est possible de convertir la dose ionique, D', en dose d'énergie, D, pour les rayons gamma ^{60}Co (environ 1,2 MeV) par

¹⁾ A publier.

NUCLEAR RADIATION – FIBRE OPTIC GUIDANCE

1 Scope

This technical report gives a short survey of the radiation exposure in certain environments and applications and the different radiation effects on fibres. It also describes the most important radiation effect, i.e., the increase of transmission loss, and its strong dependence on a variety of fibre properties and test conditions. These dependencies need to be known in order to perform appropriate tests for each specific application.

2 Reference documents

IEC 60793-1-54, — *Optical fibres – Part 1-54: Measurement methods and test procedures – Gamma irradiation* ¹⁾

3 Radiation units, dose calculation

The interaction of radiation with matter depends on charge, mass and energy in the case of particle radiation (for example, electrons, protons, neutrons, alphas and heavy ions) and on energy in the case of electromagnetic radiation such as X-ray or gamma quanta. The interaction causes an energy transfer to the respective matter. This leads to ionization and warming up.

The higher the radiation's energy, the stronger its penetrability, the longer its range. The energy unit is the electron Volt (eV). Usual radiation energies in natural or technical environments range from tens of keV (medical X-rays) to several MeV (fission or fusion reactors and nuclear weapons). Current energies at high-energy physics accelerators vary depending on the particles which are collided. The highest energy for electron-positron collisions is 100 GeV per beam. For proton-proton collisions the energy per beam is 1 TeV. Future proton-proton machines, for example the "Large Hadron Collider" (LHC) at CERN, will have beams with an energy of 7 TeV. In addition, there are quite a number of other accelerators which operate between these limits.

Note that these energies refer to the colliding particles. The secondary particles, i.e. the ones likely to affect fibres, have much lower energies.

The energy deposited by ionizing radiation in matter is called "energy dose" (or absorbed dose). The old unit is rad, (rd or rad), $1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$ ($1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$). The SI unit is the gray [Gy], $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$.

Some dosimeter types measure the charge released in a gas (for example, ionization chambers). This was used to define another type of dose, the "ion dose". The ion dose unit is the röntgen, [R], $1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$, with C = charge unit (coulomb).

Conversion of ion dose, D' , to energy dose, D , can be performed for ^{60}Co gamma rays (about 1,2 MeV) by

¹⁾ To be published.

$$yD = 0,879 \frac{\text{Gy}(\text{air})}{R} D' \quad (1)$$

Le transfert d'énergie des rayonnements gamma et des rayons X à la matière dépend de leur énergie ainsi que du matériau irradié. Il faut, par conséquent, rajouter le matériau à l'unité de dose (par exemple [Gy(Si)], [rad(SiO₂)], [Gy(air)], etc.), et la dose D(d) mesurée à l'aide d'un matériau de dosimètre d (par exemple l'air) peut clairement différer de la dose D(m) déposée dans le matériau m soumis à l'essai (par exemple Si, SiO₂, InGaAs, etc.).

Le rapport de dose entre les deux matériaux D(m) est indiqué par le rapport de leur «coefficient d'absorption énergétique de masse photonique» μ_{en}/ρ :

$$D(m) = \frac{(\mu_{\text{en}}/\rho)_m}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_d} D(d) \quad (2)$$

Les valeurs μ_{en}/ρ peuvent présenter des différences marquées, notamment pour les matériaux de nombre atomique bas et élevé à des énergies < 300 keV. Elles sont présentées sous forme de tableau pour divers éléments et composés dans la référence [1]²⁾

L'intensité des rayonnements corpusculaires se caractérise généralement par la fluence Φ . L'unité est particules/cm² ou tout simplement cm⁻². La dose des particules chargées (dans une certaine épaisseur de matériau) peut être calculée à partir de leur fluence et de leur perte d'énergie (fonction de l'énergie) par unité de longueur, dE/dx (= pouvoir d'arrêt):

$$D = \frac{\Phi}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx} \quad (3)$$

avec ρ = densité du matériau. Le pouvoir d'arrêt peut être calculé à l'aide du progiciel «SRIM2000.38»³⁾, voir [2].

La dose neutronique D_n peut être calculée à partir de leur fluence Φ_n et du «facteur de conversion de la dose de fluence» ou «facteur kerma» $k(E_n, \text{Mat})$ fonction de l'énergie et du matériau:

$$D_n = \Phi_n \cdot k(E_n, \text{Mat.}) \quad (4)$$

Les facteurs kerma sont présentés sous forme de tableau pour divers éléments et composés en [3].

4 Protection contre les rayonnements

La protection des fibres optiques contre les rayonnements (notamment gamma) est insuffisante dans la plupart des cas, dans la mesure où, à titre d'exemple, il suffit de 5 cm de fer pour diminuer de 1/10^{ème} l'intensité initiale des rayons gamma de 1 MeV.

Cependant, les câbles à fibre optique posés à 1 m de profondeur minimum sont protégés contre les rayons gamma de 1 MeV par un facteur d'environ 10⁴.

2) Les chiffres entre crochets se réfèrent à la bibliographie.

3) SRIM2000.38 est l'appellation commerciale d'un produit distribué par IBM. Cette information est donnée à l'intention des utilisateurs de la présente Norme internationale et ne signifie nullement que la CEI approuve ou recommande l'emploi exclusif du produit ainsi désigné. Des produits équivalents peuvent être utilisés s'il est démontré qu'ils conduisent aux mêmes résultats.

$$D = 0,879 \frac{\text{Gy}(\text{air})}{R} D' . \quad (1)$$

The energy transfer of gammas and X-rays to matter depends on their energy as well as on the irradiated material. Therefore, the material has to be added to the dose unit (for example [Gy(Si)], [rad(SiO₂)], [Gy(air)] etc.), and the dose D(d) measured with a dosimeter material d (for example, air) can differ significantly from the dose D(m) deposited in the investigated material m (for example, Si, SiO₂, InGaAs, etc.).

The dose ratio between both materials D(m) is given by the ratio of their “photon mass energy absorption coefficient” μ_{en}/ρ :

$$D(m) = \frac{(\mu_{\text{en}}/\rho)_m}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_d} D(d) . \quad (2)$$

The μ_{en}/ρ -values can differ significantly, especially for materials of high and low atomic number at energies < 300 keV. They are tabulated for various elements and compounds in reference [1]²⁾.

The intensity of particle radiation is usually characterized by the fluence Φ . The unit is particles/cm² or only cm⁻². The dose of charged particles (in a certain material depth) can be calculated from their fluence and their (energy-dependent) energy loss per unit of length, dE/dx (= stopping power):

$$D = \frac{\Phi \cdot dE}{\rho \cdot dx} , \quad (3)$$

with ρ = material density. The stopping power can be calculated with the software package “SRIM2000.38”³⁾, see [2].

The neutron dose D_n can be calculated from their fluence Φ_n and the energy and material dependent “fluence dose conversion factor” or “kerma factor” $k(E_n, \text{Mat.})$:

$$D_n = \Phi_n \cdot k(E_n, \text{Mat.}) . \quad (4)$$

The kerma-factors are tabulated for a variety of elements and compounds in [3].

4 Radiation shielding

Shielding of optical fibres against (especially gamma) radiation is in most cases not reasonably achievable since, for example, gamma rays of 1 MeV are attenuated to 1/10 of their initial intensity only by 5 cm of iron.

However, buried fibre cables that are layed in at least 1 m depth are shielded against 1 MeV gamma rays by about a factor of 10⁴.

2) Figures in square brackets refer to the bibliography.

3) SRIM2000.38 is the trade name of a product supplied by IBM. This information is given for the convenience of users of this International Standard and does not constitute an endorsement by IEC of the product named. Equivalent products may be used if they can be shown to lead to the same results.

5 Milieux de rayonnement et exposition

5.1 Radioactivité naturelle

Les rayons gamma sont les principaux types de rayonnement. La valeur de dose annuelle type pour les câbles de mise à la terre ou sous-marins est $\leq 0,004$ Gy. Ainsi, la dose totale au cours des 25 ans de durée de vie normale d'un câble serait donc $\leq 0,1$ Gy. Des valeurs considérablement supérieures sont envisageables, par exemple au-dessus des gisements de minerai d'uranium ou de thorium. Les dosages et les débits de dosage sont typiques et peuvent varier en fonction de l'application spécifique.

5.2 Réacteurs nucléaires (fission)

Les fibres optiques peuvent être exposées aux rayons gamma ainsi qu'à des neutrons thermiques et rapides. Les valeurs de dose et de fluence dépendent considérablement de l'emplacement à l'intérieur du bâtiment réacteur et des conditions de fonctionnement du réacteur (par exemple la puissance de sortie, en fonctionnement normal ou en accident).

A l'intérieur de la zone de confinement, les niveaux d'exposition varient de 0,001 Gy/h à 0,03 Gy/h jusqu'à environ 1 Gy/h près des tuyauteries primaires de refroidissement. Le débit de dose autour des crayons de combustible est de l'ordre de 10^3 Gy/h. Des débits de dose pouvant atteindre 10^4 Gy/h surviennent dans l'enceinte de confinement au tout début d'un accident [36].

Le flux neutronique (= fluence Φ par unité de temps) à l'intérieur de l'enceinte de confinement peut varier d'environ 10^4 n/cm²h jusqu'à 10^{15} n/cm²h environ à proximité des crayons de combustible. Les dosages et les débits de dosage sont typiques et peuvent varier en fonction de l'application spécifique.

5.3 Réacteurs de fusion

Les principaux rayonnements émis après la fusion des noyaux de deutérium (D) et de tritium (T) sont des neutrons de 14 MeV et des noyaux ⁴He (énergie d'environ 3,5 MeV). Les ions ⁴He ont une gamme très peu étendue et n'atteignent pas les fibres optiques susceptibles d'être utilisées comme capteurs ou pour transférer des données, tandis que les neutrons rapides sont très pénétrants et activent les matériaux de structure autour de la chambre de réaction. Ces matériaux émettent ensuite des rayons gamma de forte intensité, même après l'arrêt du réacteur.

Une fois de plus, les valeurs de dose totale et de fluence neutronique dépendent considérablement de l'emplacement et des conditions de fonctionnement.

Dans le cas du «Tore européen commun» expérimental (JET), les niveaux d'exposition aux rayonnements prévus pour une série d'essais de deux ans sont

- fluence neutronique de 10^{13} cm⁻² environ (socle de l'installation torique) à $5 \cdot 10^{16}$ cm⁻² environ (à proximité du tore);
- dose totale (gamma plus neutron) de 30 Gy à $4 \cdot 10^5$ Gy environ.

Pour les futures installations d'essai, des débits de dose gamma de $3 \cdot 10^4$ Gy/h environ à l'intérieur de la chambre de réaction et des valeurs de dose de durée de vie de 10^7 Gy à 10^8 Gy sont prévus. Les dosages et les débits de dosage sont typiques et peuvent varier en fonction de l'application spécifique.

5 Radiation environments and exposure

5.1 Natural radioactivity

The predominant radiation type is gamma rays. Typical annual dose value for earth cables or undersea cables is $\leq 0,004$ Gy. The total dose during an expected cable life time of 25 years would thus be $\leq 0,1$ Gy. Distinctly higher values are possible, for example, above uranium or thorium ore deposits. The dosage and dosage rates are typical and may vary depending on the specific application.

5.2 Nuclear reactors (fission)

Optical fibres can be exposed to gamma rays as well as to thermal and fast neutrons. Dose and fluence values depend strongly on the place within the reactor building and the operating conditions of the reactor (for example, the power delivery, normal operation or accident).

Within the containment area, exposure levels range from 0,001 Gy/h to 0,03 Gy/h up to about 1 Gy/h near the primary coolant lines. The dose rate around the fuel rods is of the order of 10^3 Gy/h. In the early stage of an accident, dose rates as high as 10^4 Gy/h will occur within the containment. [36].

The neutron flux (= fluence Φ per unit of time) within the containment can range from about 10^4 n/cm²h up to about 10^{15} n/cm²h near the fuel rods. The dosage and dosage rates are typical and may vary depending on the specific application.

5.3 Fusion reactors

The primary radiation emitted after the fusion of deuterium (D) and tritium (T) nuclei are 14 MeV neutrons and ⁴He nuclei (energy about 3,5 MeV). The ⁴He ions are very short-ranged and will not reach optical fibres that might be used as sensors or to transfer data, whereas the fast neutrons are very penetrating and will also activate the structural materials around the reaction chamber. These materials then emit high gamma ray intensities also after reactor turn-off.

Again, the total dose and neutron fluence values depend strongly on location and operation conditions.

For the experimental "Joint European Torus" (JET) facility estimated radiation exposure levels for a two-year test series are

- neutron fluence from about 10^{13} cm⁻² (basement of torus hall) to about $5 \cdot 10^{16}$ cm⁻² (near the torus);
- total dose (gamma plus neutron) from about 30 Gy to about $4 \cdot 10^5$ Gy.

For future test facilities, gamma dose rates within the reaction chamber of about $3 \cdot 10^4$ Gy/h and life dose values of 10^7 Gy to 10^8 Gy are expected. The dosage and dosage rates are typical and may vary depending on the specific application.

5.4 Expériences de physique des hautes énergies

Dans la physique des hautes énergies, des électrons ou des protons dont les énergies atteignent plusieurs centaines de GeV (protons) servent généralement à l'étude des particules élémentaires. Il est fréquent que deux faisceaux entrent en collision à l'intérieur d'une zone de réaction entourée d'immenses détecteurs qui analysent les produits de réaction, permettant ainsi l'augmentation de l'énergie de réaction. Le tube accélérateur et les parties internes des détecteurs deviennent alors hautement radioactifs, en particulier si des protons entrent en collision.

Les rayonnements secondaires qui menacent les instruments de commande de l'accélérateur et l'équipement d'enregistrement du détecteur se composent essentiellement de pions (énergie moyenne de plusieurs centaines de MeV), de rayons gamma et, à des rayons >50 cm, de neutrons dont les énergies maximales dépassent 100 MeV, mais dont l'énergie moyenne atteint seulement 1 MeV à 2 MeV. Les intensités de rayonnement dépendent fortement des conditions de fonctionnement (énergie des particules, intensité des faisceaux), de la distance à partir de la ligne du faisceau et de l'angle d'émission (à son maximum dans la direction du faisceau).

La dose annuelle totale peut être de l'ordre de 10^5 Gy à 10^6 Gy et les valeurs de la fluence neutronique peuvent varier de 10^{13} cm⁻² à 10^{15} cm⁻². Les dosages et les débits de dosage sont typiques et peuvent varier en fonction de l'application spécifique.

5.5 Milieux spatiaux

A proximité de la Terre, les principaux rayonnements sont les protons solaires, les protons piégés et les électrons piégés, «piégé» signifiant piégé dans le champ magnétique de la Terre, à l'intérieur des ceintures de Van Allen.

Les électrons sont concentrés dans une zone interne (extrémité située à des rayons terrestres d'environ 2,4) et une zone externe (rayons terrestres situés entre 2,8 et 12). Leur énergie maximale est d'environ 7 MeV. Ils peuvent être arrêtés, par exemple, par environ 10 mm d'Al. Au cours du processus de ralentissement dans la matière, ils produisent des rayons X pénétrants (rayonnement de freinage).

Le flux de protons diminue à mesure que la distance par rapport à la terre augmente. L'énergie maximale est de plusieurs centaines de MeV. Par exemple, la gamme des protons de 300 MeV dans l'Al est d'environ 24 cm. Plus de 90 % des protons ont des énergies inférieures à 100 MeV.

Dans une orbite de satellite géostationnaire (par exemple 15° est), la dose totale annuelle reçue sous 3 mm d'Al atteint presque 600 Gy, dont près de 550 Gy sont dus à des électrons piégés et environ 50 Gy à des protons solaires. Dans une orbite basse terrestre (LEO), 1 000 km d'altitude et 70° d'inclinaison, la dose totale annuelle d'environ 823 Gy (sous 3 mm d'Al) se compose d'électrons piégés d'environ 400 Gy, de protons piégés d'environ 420 Gy et de protons solaires de 3 Gy.

En complément des types de rayonnement susmentionnés, les rayons cosmiques sont un type supplémentaire de radiation de l'espace. Les rayons cosmiques «primaires» sont un faible flux de particules à haute énergie (environ 85 % de protons, 14 % de particules alpha et environ 1 % de noyaux plus lourds). Cependant, leur contribution à la dose totale est insignifiante.

5.4 High-energy physics experiments

Usually, in high-energy physics, electrons or protons with energies as high as several 100 GeV (protons) are used to study elementary particles. In order to increase the reaction energy it is common that two beams collide within a reaction zone that is surrounded by huge detectors analyzing the reaction products. The accelerator tube and the inner parts of the detectors will become highly radioactive, especially if protons collide.

The secondary radiation that threatens the accelerator control instruments and the detector read-out equipment mainly consists of pions (mean energy several 100 MeV), gamma rays and, at radii >50 cm, of neutrons with maximum energies up to more than 100 MeV, but a mean energy of only about 1 MeV to 2 MeV. The radiation intensities strongly depend on the operating conditions (particle energy, beam current), the distance from the beam line, and the emission angle (maximum in beam direction).

The annual total dose can be of the order of 10^5 Gy to 10^6 Gy and the neutron fluence can reach values from 10^{13} cm⁻² to 10^{15} cm⁻². The dosage and dosage rates are typical and may vary, depending on the specific application.

5.5 Space environments

Close to the earth the dominating radiations are solar protons, trapped protons and trapped electrons. "Trapped" means trapped by the magnetic field of the earth, within the Van Allen Belts.

The electrons are concentrated in an inner zone (ending at about 2,4 earth radii) and an outer zone (between about 2,8 earth radii and 12 earth radii). Their maximum energy is about 7 MeV. They can be stopped, for example, by about 10 mm Al. During the slowing down process in matter, they produce penetrating X-rays (bremsstrahlung).

The proton flux decreases with increasing distance from earth. The maximum energy is several 100 MeV. For example, the range of 300 MeV protons in Al is about 24 cm. More than 90 % of the protons have energies below 100 MeV.

In a geostationary orbit (for example, 15° east) the total annual dose behind 3 mm Al is nearly 600 Gy, of which about 550 Gy is caused by trapped electrons and about 50 Gy by solar protons. In a low earth orbit (LEO), height 1 000 km and 70° inclination, the total annual dose of about 823 Gy (behind 3 mm Al) is composed of about 400 Gy trapped electron contribution, about 420 Gy trapped proton contribution and 3 Gy solar proton contribution.

Additionally to the above-mentioned radiation types, cosmic rays are an additional type of space radiation. The "primary" cosmic rays are a low flux of high energetic particles (about 85 % protons, 14 % alpha particles and about 1 % heavier nuclei). Their contribution to the total dose, however, is negligible.

Il est possible de calculer les fluences de particules pour certaines orbites ainsi que les valeurs de dose à l'aide, par exemple, du progiciel «Space Radiation 4.0™»⁴⁾, [4]. Les dosages et les débits de dosage sont typiques et peuvent varier en fonction de l'application spécifique.

5.6 Médecine

Des rayons X d'énergie ≤ 100 keV sont utilisés à des fins de radiographie (diagnostic). Les techniques modernes d'intensification d'image permettent d'obtenir une série d'images significatives avec des valeurs de dose de seulement $\leq 10^{-3}$ Gy.

L'irradiation des tumeurs est effectuée à l'aide de rayons gamma ^{60}Co , d'électrons de haute énergie (20 MeV à 30 MeV), de protons de haute énergie (60 MeV à 300 MeV) ou d'ions lourds (par exemple ^{12}C , 2 GeV à 4 GeV) et de neutrons thermiques ou rapides. Les valeurs de dose au sein de la tumeur peuvent atteindre plusieurs Gy par «séance». Les dosages et les débits de dosage sont typiques et peuvent varier en fonction de l'application spécifique.

5.7 Milieux militaires

Deux éléments peuvent caractériser le rayonnement émis par une arme nucléaire: le rayonnement (gamma) instantané émis au cours de la phase d'explosion dans un laps de temps d'environ 10^{-8} s, et un composant différé (particules gamma et neutrons rapides) devenant effectif après des laps de temps pouvant atteindre 1 min. Malgré une contribution du rayonnement instantané à la dose totale inférieure à 10 %, ce composant peut se révéler très destructeur du fait de son débit de dose élevé (par exemple 1 Gy en 10^{-8} s, c'est-à-dire un débit de dose de 10^8 Gy/s). C'est pourquoi il serait nécessaire d'effectuer des essais spécifiques avec des sources de rayonnements pulsés (par exemple des générateurs d'éclairs de rayons X) afin de simuler ce composant de rayonnement.

La dose totale et la fluence neutronique dépendent de la puissance de l'arme (force explosive), du type d'arme (contribution de l'énergie de fusion) et de la distance par rapport au site de l'explosion. Il est possible d'augmenter l'émission de rayonnements pour une force explosive donnée en augmentant la contribution de la fusion («bombe à neutrons» ou «arme à effet de rayonnement renforcé»). Conformément au principe de la «résistance équilibrée», il conviendrait que les câbles à fibre optique ne résistent pas à des valeurs de dose de rayonnement extrêmement élevées près du centre de l'explosion, dans la mesure où la chaleur et l'onde de choc ne manqueront pas de les détruire.

Les niveaux types d'exposition aux rayonnements (au début) sont

- débit de dose de rayonnement instantané 10^8 Gy/s à 10^9 Gy/s (dose instantanée 1 Gy à 5 Gy),
- dose totale 30 Gy à 100 Gy,
- fluence de neutrons rapides 10^{12} n/cm² à 10^{13} n/cm² (1 MeV).

La forte intensité d'énergie de rayons X émise par les explosions nucléaires à haute altitude (= extra-atmosphériques) ne sera pas absorbée et peut être à l'origine de dommages considérables, même à distance de l'explosion.

Outre le rayonnement initial produit (émis dans la minute qui suit l'explosion), les retombées radioactives peuvent gravement contaminer de larges zones, selon l'altitude de l'explosion, la force et la direction du vent et les précipitations. Des niveaux de dose pouvant atteindre plusieurs dizaines de Gy sont susceptibles d'affecter des zones de plusieurs centaines de km² 10 h à 15 h après l'explosion.

4) Space Radiation 4.0™ est l'appellation commerciale d'un produit distribué par Space Radiation Associated. Cette information est donnée à l'intention des utilisateurs de la présente Norme internationale et ne signifie nullement que la CEI approuve ou recommande l'emploi exclusif du produit ainsi désigné. Des produits équivalents peuvent être utilisés s'il est démontré qu'ils conduisent aux mêmes résultats.

Particle fluences for certain orbits, and dose values can be calculated, for example, with the software package “Space Radiation 4.0TM”,⁴⁾ [4]. The dosage and dosage rates are typical and may vary depending on the specific application.

5.6 Medicine

For radiography purposes (diagnostics) X-rays with energies ≤ 100 keV are used. With modern image intensifier techniques dose values $\leq 10^{-3}$ Gy are sufficient to take a series of expressive pictures.

Irradiation of tumors is made with ^{60}Co gamma rays, high energy electrons (20 MeV to 30 MeV), high energy protons (60 MeV to 300 MeV) or heavy ions (for example ^{12}C , 2 GeV to 4 GeV), and thermal or fast neutrons. Dose values within the tumor can reach several Gy per “session”. The dosage and dosage rates are typical and may vary depending on the specific application.

5.7 Military environments

The radiation emitted from a nuclear weapon can be divided into prompt (gamma) radiation emitted during the explosion phase within a time of about 10^{-8} s, and a delayed component (gammas and fast neutrons) becoming effective after times up to 1 min. Despite the fact that the contribution of prompt radiation to the total dose is less than 10 %, this component can be very destructive because of its high dose rate (for example, 1 Gy within 10^{-8} s, i.e., a dose rate of 10^8 Gy/s). Therefore, special tests with pulsed radiation sources (for example, flash X-ray generators) would have to be performed to simulate this radiation component.

Total dose and neutron fluence depend on weapon strength (explosive force), the weapon type (contribution of fusion energy), and the distance from the explosion site. The radiation emission for a given explosive force can be increased by increasing the fusion contribution (“neutron bomb” or “radiation enhanced weapon”). According to the “balanced hardening” principle, fibre cables should not withstand extremely high radiation dose values near the center of the explosion, where heat and shock wave will destroy the cable anyway.

Typical (initial) radiation exposure levels are

- prompt radiation dose rate 10^8 Gy/s to 10^9 Gy/s (prompt dose 1 Gy to 5 Gy),
- total dose 30 Gy to 100 Gy,
- fast neutron fluence 10^{12} n/cm² to 10^{13} n/cm² (1 MeV).

With high-altitude (= exo-atmospheric) nuclear explosions the high amount of X-ray energy will not be absorbed and can cause significant damage, even far away from the explosion.

Apart from the initial radiation (emitted within about 1 min after explosion) “fall out” can severely contaminate large areas, dependent on explosion height, direction and strength of the wind, and rainfall. Dose levels up to several tens of Gy can be reached within 10 h to 15 h after explosion in areas of several 100 km².

4) Space Radiation 4.0TM is the trade name of a product supplied by Space Radiation Associated. This information is given for the convenience of users of this International Standard and does not constitute an endorsement by IEC of the product named. Equivalent products may be used if they can be shown to lead to the same results.

Des détails concernant l'émission de rayonnement par des armes nucléaires sont disponibles, par exemple, en [5]. Les dosages et les débits de dosage sont typiques et peuvent varier en fonction de l'application spécifique.

6 Installations d'irradiation et dosimétrie

Dans la plupart des milieux, l'exposition au rayonnement est due à différents types de rayonnements, comme indiqué à l'Article 5. Tant que les rayons gamma ou les rayons X de haute énergie constituent les principaux types de rayonnement, l'application de la dose totale prévue au moyen de rayons gamma peut s'avérer suffisante. En revanche, lorsque les neutrons rapides, les protons ainsi que les électrons de haute énergie contribuent à plus de 30 % de la dose totale, l'irradiation par des particules de ce type peut également s'avérer nécessaire pour les raisons brièvement décrites en 8.7.

Une liste non exhaustive des installations d'irradiation existantes pour les différents types de rayonnement est disponible, par exemple dans certaines publications du CERN (Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire, Genève, CH).

6.1 Irradiation gamma continue

L'énergie gamma moyenne de la plupart des milieux de rayonnement est d'environ 1 MeV, ce qui permet d'effectuer les essais d'irradiation avec les isotopes ^{60}Co ou ^{137}Cs , très fréquemment utilisés. Leur énergie gamma et leur période sont respectivement d'environ 1,25 MeV (valeur moyenne) et de 5,3 ans, ou 0,66 MeV et 30,2 ans. Il convient que les échantillons d'essai (ainsi que les dosimètres) soient recouverts de la «couche d'accumulation de dose» (build-up) fonction de l'énergie afin d'atteindre un «équilibre électronique secondaire».

Les irradiations générant une énergie gamma beaucoup plus intense peuvent également modifier le mécanisme de dégradation de la fibre (débit d'ionisation et dommage structural) comme décrit en 8.7. L'utilisation de particules gamma de faible intensité énergétique (ou de rayons X), notamment inférieure à 0,1 MeV, donnera lieu à une variation de dose rapide en fonction de l'épaisseur à l'intérieur de l'échantillon de fibre ainsi qu'à des erreurs dosimétriques («renforcement de la dose» aux interfaces entre différents matériaux).

L'affaiblissement de transmission des fibres dû au rayonnement dépend également du débit de dose, c'est-à-dire du temps nécessaire pour atteindre la dose prévue (voir 8.5). Par conséquent, il convient d'effectuer l'irradiation uniquement avec les débits de dose recommandés par la «méthode d'essai» (sauf spécification contraire) afin d'obtenir des résultats comparables.

Le débit de dose et/ou la dose peuvent être mesurés, par exemple à l'aide de chambres d'ionisation, de dosimètres thermoluminescents (DTL) ou d'un film radiochromatique. Une couche d'accumulation en quantité de l'épaisseur requise doit être fournie. Les chambres d'ionisation sont susceptibles de générer un «affaiblissement de recombinaison» beaucoup trop important pour des débits de dose élevés. La mesure des doses à l'aide de «fibres à dosimètre» étalonnées [37] et [38] (fibres avec augmentation de l'affaiblissement très importante et ne nécessitant pas de recuit, (voir [6], [7] et les références bibliographiques qui y sont citées)) peut donner de meilleurs résultats pour des configurations d'échantillons d'essai spécifiques. Recuit signifie que l'affaiblissement dû au rayonnement diminue à la fin de l'irradiation (voir 8.6).

Details about radiation emission from nuclear weapons can be found, for example, in [5]. The dosage and dosage rates are typical and may vary depending on the specific application.

6 Irradiation facilities and dosimetry

In most of the environments radiation exposure is caused by different kinds of radiation, as outlined in Clause 5. As long as gamma rays or high energy X-rays are the dominant radiation type it might be sufficient to apply the expected total dose by gamma rays. However, in cases where fast neutrons, protons and even high energy electrons contribute more than about 30 % to the total dose, irradiation also with these particle types might become necessary for reasons that are described briefly in 8.7.

An incomplete list of available irradiation facilities for the different types of radiation can be found, for example, in some of the publications of CERN (European Organization for Nuclear Research, Geneva, CH).

6.1 Continuous gamma irradiation

In most of the radiation environments, the mean gamma energy is around 1 MeV so that irradiation tests can be made with the widely used radioactive isotopes ^{60}Co or ^{137}Cs . Their gamma energy and half-life are about 1,25 MeV (mean value) and 5,3 years or 0,66 MeV and 30,2 years, respectively. Test samples (as well as dosimeters) would have to be covered with the energy-dependent “dose build-up layer” in order to reach “secondary electron equilibrium”.

Irradiation with distinctly higher gamma energy can also change the fibre degradation mechanism (ratio of ionization and structural damage) as described in 8.7. Use of low energy gammas (or X-rays), especially below 0,1 MeV, will lead to rapid variation of dose as a function of depth within the fibre sample and to dosimetry errors (“dose enhancement” at interfaces between different materials).

The radiation-induced transmission loss of fibres also depends on dose rate, i.e., on the time that is necessary to reach the expected dose (see 8.5). Irradiation should therefore only be performed with dose rates recommended by the “test procedure” (if not otherwise specified) in order to give comparable results.

Dose rate and/or dose can be measured, for example, with ionization chambers, thermoluminescence dosimeters (TLDs) or radiochromatic film. A dose build-up layer of necessary thickness has to be provided. At high dose rates ionization chambers might show unacceptable high “recombination loss”. Dose measurement with calibrated “dosimeter fibres” [37 and 38] (fibres with very high and non-annealing increase of attenuation, (see [6], [7] and the literature cited therein)) can give improved results for specific test sample configurations. Annealing means that the radiation-induced loss decreases after the end of irradiation (see 8.6).

6.2 Irradiation neutronique

Les neutrons à spectre d'énergie spécifique sont généralement produits par des sources de rayonnements différentes, comme indiqué à l'Article 5. La référence [8] explique comment les neutrons d'énergie différente donnent lieu à des mécanismes différents de dégradation des fibres. Par conséquent, l'étude de l'influence des irradiations neutroniques sur les fibres optiques exige plus que l'application d'une certaine fluence neutronique. Il convient au moins que l'énergie moyenne de l'équipement d'essai soit comparable à celle du milieu de rayonnement en question.

Les sources neutroniques radioactives (α , n) ainsi que les sources de fission spontanée (principalement ^{252}Cf) libèrent des neutrons «rapides» ayant des énergies de plusieurs MeV. Les sources (α , n) constituent un mélange d'émetteurs α tels que le Ra, l'Am ou le Po additionné de Be. La collision entre une particule α et un noyau ^9Be peut produire un noyau ^{12}C et un neutron rapide. Une source Am-Be ayant une activité de 1 Ci (= Curie) ne produirait qu'environ $2 \cdot 10^6$ n/s (en 4π). Les sources de ce type sont économiques, mais elles produisent trop peu de neutrons pour la majorité des essais à effectuer.

Les réacteurs les plus souvent utilisés pour les essais sont les réacteurs à fission. Les réacteurs de recherche peuvent libérer des flux élevés (jusqu'à 10^{15} n/cm² s environ) de neutrons rapides (énergie neutronique moyenne de 1 MeV environ) ainsi que de neutrons lents ou «thermiques» ayant des énergies < 1 MeV, selon la conception du réacteur.

Il est possible d'obtenir des flux relativement élevés de neutrons rapides monoénergétiques grâce aux «générateurs de neutrons». Il s'agit de petits accélérateurs dans lesquels les deutérons (d) sont accélérés à des énergies de seulement 0,2 MeV à 0,5 MeV. Les deutérons bombardent une «cible» qui contient du deutérium (D) ou du tritium (T) et produisent des neutrons ayant respectivement une énergie de 2,6 MeV ou 14,5 MeV environ. La sortie de neutrons ayant un flux de deutérons de 1 mA est de respectivement $4 \cdot 10^8$ n/s ou 10^{11} n/s environ (en 4π).

Il est possible de produire des intensités très fortes de neutrons rapides avec les «sources de spallation». Il s'agit d'accélérateurs dans lesquels les protons ayant des énergies pouvant atteindre jusqu'à 1 000 MeV et des intensités de faisceau de 1 mA sont dirigés sur une cible en métal lourd (par exemple Pb ou Hg). Afin de produire des neutrons à l'état thermique, il est possible d'entourer la cible d'un «modérateur», et des flux pouvant atteindre jusqu'à $5 \cdot 10^{14}$ n/cm² s environ sont disponibles.

Les réacteurs pulsés (par exemple du type TRIGA) et notamment les «réacteurs à rupture brutale de gaine» sont utilisés principalement pour les essais portant sur les effets des armes nucléaires. Ces réacteurs produisent des impulsions neutroniques d'une durée de ≤ 50 ms ou $\leq 0,1$ ms, respectivement. Des particules gamma de forte intensité énergétique et contribuant à 10 % environ de la dose totale accompagnent les neutrons.

Il existe également plusieurs emplacements d'irradiation neutronique disponibles au CERN [9], [10]. Les neutrons sont des produits secondaires et sont principalement libérés lors de réactions nucléaires avec des protons à forte intensité énergétique. Le spectre d'énergie est comparable à celui des neutrons de fission.

Dans certaines situations spécifiques, il est possible de simuler les effets des neutrons d'une énergie (par exemple les neutrons de fission ayant une énergie moyenne de 1 MeV environ) en utilisant des neutrons d'énergie différente, par exemple des neutrons de fusion de 14,5 MeV environ. Sur la base de la référence [3], il est possible de calculer que des neutrons de 14,5 MeV généreront la même dose de SiO_2 qu'une fluence de neutrons de 1 MeV 10 fois plus élevée. En revanche, il est reconnu que des neutrons de 14,5 MeV génèrent des dommages structurels ou par déplacement (en Si !) 2,5 fois plus importants que la même fluence neutronique de 1 MeV. Une connaissance de l'éventualité et de la fréquence d'une dégradation des performances des fibres optiques engendrée par les neutrons rapides au moyen de leur dose déposée plutôt que par leur dommage par déplacement est donc indispensable (voir 8.7).

6.2 Neutron irradiation

Different radiation sources usually produce neutrons with distinctly different energy spectrum, as outlined in Clause 5. In [8], it is described that neutrons of different energy lead to different fibre degradation mechanisms. For investigating the influence of neutron irradiation on optical fibres, it is therefore not sufficient to apply a certain neutron fluence. At least the mean energy at the test facility should be comparable with that of the radiation environment in question.

Radioactive (α , n) neutron sources and spontaneous fission sources (mainly ^{252}Cf) release “fast” neutrons with energies of several MeV. (α , n) sources are a mixture of α -emitters like Ra, Am or Po with Be. Collision of an α particle with a ^9Be nucleus can result in a ^{12}C nucleus and a fast neutron. An Am-Be source with an activity of 1 Ci (= Curie) would only yield about $2 \cdot 10^6$ n/s (in 4π). Such sources are cheap, but their neutron output is too low for the majority of the necessary tests.

Fission reactors are most frequently used for test purposes. Research reactors can deliver high fluxes (up to about 10^{15} n/cm² s) of fast (mean neutron energy about 1 MeV) as well as slow or “thermal” neutrons with energies < 1 MeV, depending on the reactor design.

Relatively high fluxes of monoenergetic fast neutrons can be obtained with “neutron generators”. These are small accelerators where deuterons (d) are accelerated to energies of only 0,2 MeV to 0,5 MeV. The deuterons are focused on a “target” that contains deuterium (D) or tritium (T) and produce neutrons with an energy of about 2,6 MeV or 14,5 MeV, respectively. The neutron output with a deuteron current of 1 mA is about $4 \cdot 10^8$ n/s or 10^{11} n/s, respectively (in 4π).

Very high intensities of fast neutrons can be produced at “spallation sources”. These are accelerators where protons with energies up to 1 000 MeV and beam currents up to 1 mA are directed on to a heavy metal target (for example, Pb or Hg). In order to produce thermalized neutrons, the target can be surrounded by a “moderator”, and fluxes up to about $5 \cdot 10^{14}$ n/cm² s are available.

Pulsed reactors (for example, of the TRIGA type) and, especially, “fast burst reactors” are mainly used for nuclear weapons effects testing. They produce neutron pulses with a duration of ≤ 50 ms or $\leq 0,1$ ms, respectively. The neutrons are accompanied by high energetic gammas that contribute about 10 % to the total dose.

Several neutron irradiation places are also available at CERN [9], [10]. The neutrons are secondary products and are mostly released during nuclear reactions with high energetic protons. The energy spectrum is comparable with that of fission neutrons.

For some special situations, it is possible to simulate the effect of neutrons of one energy (for example, fission neutrons with a mean energy of about 1 MeV) by neutrons with distinctly different energy, for example, fusion neutrons with about 14,5 MeV. From reference [3], it can be calculated that 14,5 MeV neutrons will cause the same dose in SiO_2 as an about 10 times higher fluence of 1 MeV neutrons. On the other hand, it is known that 14,5 MeV neutrons cause only about 2,5 times higher structural or displacement damage (in Si!) than the same fluence of 1 MeV neutrons. One therefore has to know if and when fast neutrons degrade optical fibre performance by their deposited dose rather than by their displacement damage (see 8.7).

La fluence des neutrons rapides et thermiques est principalement déterminée par l'analyse par activation ou par des chambres de fission. Pour la détection des neutrons thermiques, une chambre de fission contient par exemple ^{235}U au lieu de ^{238}U pour les neutrons rapides. Il faut donc choisir pour l'analyse par activation des isotopes ayant une section efficace importante pour des neutrons thermiques ou rapides. Il est possible de calculer la dose des fluences respectives à l'aide des facteurs de conversion des doses de fluence fonction du matériau et de l'énergie présentés sous forme de tableau en [3]. La fluence des neutrons thermiques peut également être déterminée au moyen de fibres à dosimètre étalonnées avec un cœur dopé au B [7]. Pour les énergies neutroniques $> 2,5$ MeV, on doit tenir compte du fait que des «protons de recul» de forte intensité énergétique provenant du revêtement contenant de l'hydrogène (H) ou des matériaux du câble peuvent augmenter la dose dans des zones plus épaisses d'une bobine de fibre ou dans une fibre torsadée par un facteur pouvant atteindre environ cinq, en fonction de l'énergie neutronique et de la teneur en hydrogène [8], [11].

6.3 Irradiation protonique

Le seul milieu dans lequel des longueurs de fibres optiques plus importantes sont susceptibles d'être exposées à des fluences considérables de protons d'intensité énergétique élevée est représenté par les ceintures de radiation de la Terre (voir 5.5), notamment celles de Jupiter. Les fibres sont de plus en plus utilisées, par exemple pour les systèmes de bus de données des satellites (généralement des fibres multimodales à saut d'indice (MM SI) avec un cœur en SiO_2 pur à forte teneur en OH) ou dans les amplificateurs à fibre ou lasers à fibre des systèmes de «communication par laser de l'espace libre» (fibres unimodales (SM) dopées avec un métal du groupe des terres rares et conservatrices de polarisation).

La référence [12] a montré que l'irradiation aux particules gamma ^{60}Co et aux protons de 60 MeV jusqu'à une dose de 10^3 Gy ($= 10^5$ rad) provoque une augmentation quasi identique de l'affaiblissement de la fibre dû au rayonnement. Il semblerait que l'affaiblissement dû aux protons soit inférieur de 25 %. Voir 8.7 pour une explication.

Dans la mesure où les doses de protons de 10^3 Gy ne s'obtiennent que sur une période de plusieurs années dans une « LEO » (voir 5.5), il suffit généralement d'effectuer des essais de fibres jusqu'à la dose totale (électron plus proton plus rayons X) en utilisant des irradiations gamma moins chères et plus pratiques. Ce principe ne s'applique pas aux composants à semi-conducteur d'un système complet dans lequel les protons sont à l'origine de dommages par déplacement beaucoup plus importants que lors d'irradiations gamma pour la même dose. Pour les valeurs de doses protoniques de 10^4 Gy à 10^5 Gy telles qu'elles sont susceptibles d'être obtenues au cours de missions Jupiter plus longues, les dommages structurels d'origine protonique tendent à s'intensifier par rapport à l'ensemble des défauts existants dans les fibres brut d'étirage, donnant lieu à une augmentation de l'affaiblissement plus importante (voir 8.7). Par conséquent, il n'est plus possible d'effectuer les essais de fibre au moyen de rayons gamma. Il convient que l'énergie protonique soit comparable à l'énergie moyenne du milieu spatial respectif afin d'obtenir des débits d'ionisation et de dommages par déplacement analogues.

Il est possible d'effectuer les irradiations protoniques dans des accélérateurs linéaires et notamment dans les cyclotrons qui génèrent des protons dont les énergies varient entre 10 MeV et plusieurs centaines de MeV. Les appareils de ce type sont fréquemment utilisés comme dispositifs d'injection pour les installations de recherche de la gamme d'énergie des GeV (voir 5.4).

Pour réaliser des essais de fibres précis et significatifs, il convient que la longueur irradiée soit de 5 m à 50 m minimum, en fonction du type de fibres. Les fibres peuvent être enroulées en bobines, mais il convient que leur diamètre soit supérieur à 5 cm à 10 cm, au moins pour les fibres multimodales (MM). Il est souvent nécessaire de modifier la température de la fibre. Ces conditions peuvent être rencontrées seulement dans les installations qui produisent des énergies plus intenses (> 30 MeV à 40 MeV), où les protons peuvent quitter le tube du faisceau à vide. Il convient d'élargir le diamètre du faisceau étroit en ajoutant des feuilles de

The fluence of fast as well as of thermal neutrons is mainly determined by activation analysis or fission chambers. For thermal neutron detection, a fission chamber contains, for example, ^{235}U instead of ^{238}U for fast neutrons. Correspondingly, one has to choose for activation analysis isotopes with high cross section for fast or for thermal neutrons. The dose of the respective fluences can be calculated with the material- and energy-dependent fluence dose conversion factors tabulated in [3]. The fluence of thermal neutrons can also be determined by calibrated dosimeter fibres with B-doped core [7]. For neutron energies $> 2,5$ MeV, it has to be considered that high energetic “recoil protons” out of the hydrogen (H) containing coating or cable materials can increase the dose in deeper layers of a fibre spool or in a cabled fibre by up to a factor of about five, dependent on neutron energy and hydrogen content [8], [11].

6.3 Proton irradiation

The only environment where greater lengths of optical fibres might be exposed to considerable fluences of high energetic protons are the radiation belts of the earth (see 5.5) and, especially, of Jupiter. Fibres are increasingly used, for example, for data bus systems of satellites (usually multimode step-index (MM SI) with pure SiO_2 core of high OH content) or in fibre amplifiers or fibre lasers of “free space laser communication” systems (rare earth doped and polarization maintaining single-mode (SM) fibres).

In reference [12], it was shown that ^{60}Co gamma and 60 MeV proton irradiation up to a dose of 10^3 Gy ($= 10^5$ rad) leads to nearly the same radiation-induced fibre loss increase. Obviously, the proton-induced loss seemed to be about 25 % lower. For an explanation, see 8.7.

Since proton doses of 10^3 Gy are only obtained during several years in a “LEO” (see 5.5), it usually is sufficient to make fibre tests up to the total dose (electron plus proton plus X-rays) with cheaper and more convenient gamma irradiations. This does not hold for the semiconductor components of a whole system where protons cause distinctly higher displacement damage than gamma irradiation up to the same dose. For proton dose values of 10^4 Gy to 10^5 Gy, as they might be obtained during longer Jupiter missions, the structural damage caused by protons will become higher than the already existing defect concentration in as drawn fibres, leading to higher loss increase (see 8.7). Therefore fibre tests can no longer be made with gamma rays. The proton energy should be comparable with the mean energy in the respective space environment in order to have comparable ratios of ionization and displacement damage.

Proton irradiations can take place at linear accelerators and, especially, cyclotrons that deliver protons with energies between about 10 MeV and several 100 MeV. Such machines are often used as injector for research facilities in the GeV energy range (see 5.4).

For accurate, expressive fibre tests, the irradiated length should be at least 5 m to 50 m, depending on fibre type. The fibres can be coiled up to spools, but their diameter should be greater than 5 cm – 10 cm, at least with multimode (MM) fibres. Often the fibre temperature has to be varied. These conditions can only be met at facilities that deliver higher energies (> 30 MeV to 40 MeV), where protons can leave the vacuum beam tube. The narrow beam

diffusion afin d'obtenir, à des distances comprises entre 1 m et 5 m à l'arrière de la feuille de diffusion, une distribution relativement homogène du flux protonique sur des diamètres de 5 cm à 25 cm environ. Les installations d'essai de ce type sont décrites par exemple en [13], [14], [15].

La dosimétrie peut être effectuée par feuilles, chambres d'ionisation, DTL ou film radiochromatique. Les mesurages de dose effectués au moyen de «fibres à dosimètre» étalonnées peuvent fournir de meilleurs résultats pour des configurations d'échantillons d'essai spécifiques (voir 6.1). Il est possible de calculer la fluence protonique à partir de la dose au moyen du «pouvoir d'arrêt» (= perte d'énergie par unité de longueur) protonique fonction de l'énergie et du matériau et présenté sous forme de tableau en [16]. Le programme « SRIM2000.38 » (voir [2]) facilite les calculs portant sur des échantillons de grande taille et plus épais où l'énergie protonique diminue à mesure que l'épaisseur augmente.

6.4 Irradiation électronique

La première phrase du paragraphe 6.3 s'applique également aux électrons. Du fait de leur faible énergie (< 7 MeV, voir 5.5), la plupart sont immédiatement arrêtés par la protection externe des satellites, ce qui génère des rayons X pénétrants. Il est par conséquent possible de simuler de manière suffisamment exacte l'effet des électrons spatiaux sur les fibres optiques au moyen d'irradiations aux rayons gamma ^{60}Co .

Lorsque l'irradiation électronique est explicitement requise, il est possible d'utiliser des générateurs Van de Graaff. Leur énergie maximale varie de 1 MeV à 10 MeV environ. Pour une irradiation homogène de bobines de fibre, il convient que le faisceau étroit quitte le tube du faisceau à vide par une mince feuille métallique. Cette feuille peut servir également de feuille de diffusion pour élargir le faisceau (voir 6.3). Ce type d'électrons à énergie relativement faible permet également de dévier le faisceau étroit à travers la bobine au moyen de déflecteurs électromagnétiques, comme dans un tube TV.

L'irradiation électronique est souvent effectuée au moyen d'accélérateurs bêta-tron et linéaires (plus petits) car les électrons y ont une énergie beaucoup plus intense (de 25 MeV environ à plusieurs centaines de MeV) et sont à l'origine de réactions nucléaires et d'importants dommages par déplacement, c'est-à-dire que le rapport des dommages structuraux et de l'ionisation est plus important qu'il ne l'aurait été dans l'espace. Il convient par conséquent de n'utiliser les électrons d'énergie élevée que pour les valeurs de dose moins importantes (< 10^3 Gy) tant que la concentration de défauts due aux électrons est moins importante que celle présente dans les fibres non irradiées (voir 6.3).

Il est possible d'effectuer la dosimétrie par chambres d'ionisation, sondes à scintillations, DTL, film radiochromatique ou fibres à dosimètre (voir 6.1).

6.5 Irradiation pulsée

Lorsqu'une dose de rayonnement supérieure est appliquée dans un laps de temps très court, c'est-à-dire avec un débit de dose extrêmement élevé, l'affaiblissement de la fibre dû aux rayonnements peut atteindre des valeurs considérables (voir 8.6). Lors de l'explosion d'une arme nucléaire, il convient de prendre en compte des doses pouvant atteindre jusqu'à 10 Gy et émises en $\leq 10^{-8}$ s (voir 5.7). Il est possible d'exposer les fibres utilisées aux cours des explosions d'essai nucléaires à des valeurs de dose > 10^3 Gy. Il est impossible aux mécanismes de recuit, en un laps de temps si court, de réduire l'absorption induite, comme c'est le cas au cours d'une irradiation atteignant la même dose en secondes, minutes ou même en jours (espace).

La façon la plus pratique et économique de simuler des débits de dose aussi élevés consiste à utiliser des installations pour éclairs de rayons X dans lesquelles des tensions de plusieurs 10^6 V sont appliquées instantanément à un tube d'émission de champ, produisant un courant électronique de plusieurs 10^3 A à plusieurs 10^4 A. Les électrons bombardent une cible en métal lourd (W ou Ta) dans laquelle ils produisent un rayonnement de freinage pénétrant

diameter should be widened up by additional scatter foils so that, at distances between about 1 m and 5 m behind the scatter foil, relatively homogeneous proton flux distribution is achieved across diameters between about 5 cm to 25 cm. Such test facilities are, for example, described in [13], [14], [15].

Dosimetry can be made by activation foils, ionization chambers, TLDs or radiochromatic film. Dose measurements with calibrated “dosimeter fibres” can give improved results for specific test sample configurations (see 6.1). The proton fluence can be calculated from the dose with the energy and material dependent proton “stopping power” (= energy loss per length unit) that is tabulated in [16]. Calculations for spacious, thicker samples where the proton energy decreases with increasing depth are facilitated by the computer program “SRIM2000.38” (see [2]).

6.4 Electron irradiation

The first sentence of 6.3 is also valid for electrons. Because of their low energy (< 7 MeV, see 5.5), most of them are already stopped by the outer satellite shell, producing penetrating X-rays. The effect of space electrons on optical fibres can therefore be simulated with sufficient accuracy by irradiation with ^{60}Co gamma rays.

In cases where electron irradiation is explicitly demanded, one can use Van de Graaff generators. Their maximum energy ranges from about 1 MeV to 10 MeV. For homogeneous irradiation of fibre coils the narrow beam should leave the vacuum beam tube through a thin metal foil. This foil can at the same time act as a scattering foil that widens the beam (see 6.3). With electrons of such relatively low energy it is also possible to wave the narrow beam across the spool by means of electromagnetic deflectors, like in a TV tube.

Electron irradiation is often made with betatrons and (smaller) linear accelerators. Here the electrons have distinctly higher energy (from about 25 MeV to several 100 MeV) and cause nuclear reactions and considerable displacement damage, i.e., the ratio of structural damage and ionization is higher as it would be in space. High energy electrons should therefore only be used for lower dose values ($< 10^3$ Gy), as long as the electron-induced defect concentration is lower than that in unirradiated fibres (see 6.3).

Dosimetry can be made with ionization chambers, scintillation detectors, TLDs, radiochromatic film or dosimeter fibres (see 6.1).

6.5 Pulsed irradiation

If a higher radiation dose is applied within a very short time, i.e. with extremely high dose rate, the radiation-induced fibre loss can reach tremendous values (see 8.6). During a nuclear weapon explosion, doses up to 10 Gy emitted within $\leq 10^{-8}$ s would have to be considered (see 5.7). Fibres which are used for measurements during nuclear test explosions can be exposed to dose values $> 10^3$ Gy. During such a short time, annealing mechanisms cannot reduce the induced absorption like during an irradiation up to the same dose within seconds, minutes or even days (space).

The most convenient and cheapest way to simulate such high dose rates are flash-X-ray facilities where voltages of several 10^6 V are instantaneously applied to a field emission tube, leading to an electron current of several 10^3 A up to several 10^4 A. The electrons are focused on a heavy metal target (W or Ta) where they produce penetrating bremsstrahlung (X-rays)

(rayons X) possédant un spectre d'énergie continu. Il est possible d'irradier une bobine de fibre dans l'air. En ce qui concerne les appareils plus petits dans lesquels la dose de rayons X est trop faible, l'irradiation peut être effectuée par le faisceau électronique d'origine. La cible métallique est retirée et le faisceau quitte le tube d'émission de champ par une mince fenêtre en Ti. Une feuille de diffusion supplémentaire vient élargir le faisceau permettant aux bobines de fibres plus petites d'être irradiées de façon homogène à des distances comprises entre 50 cm et 150 cm environ. Du fait de la gamme d'énergie limitée des électrons de faible énergie, l'usage de bobines monocouches hélicoïdales est fréquent. Il convient que la fibre d'essai soit de petite longueur dans la mesure où l'augmentation d'affaiblissement qui suit immédiatement l'impulsion de rayonnement de 10 ns peut atteindre des valeurs allant jusqu'à 1 dB/cm, en fonction de la dose, du type de fibre, de la longueur d'onde et de la température de la fibre.

Il est possible d'effectuer la dosimétrie par DTL, film radiochromatique, «calorimètres différentiels» ou diodes à semi-conducteur étalonnées. Les fibres à dosimètre étalonnées aménagées de la même façon que la fibre soumise à essai peuvent fournir les résultats les plus exacts et fiables.

7 Effets des rayonnements sur les fibres optiques

Les rayonnements peuvent modifier presque toutes les propriétés des fibres optiques, en fonction du type de rayonnement, de l'énergie de rayonnement, de la dose de rayonnement ainsi que du type de fibre. Il convient, pour des raisons de simplicité, de ne tenir compte que des types de rayonnement, des énergies et des valeurs de dose les plus susceptibles de concerner des fibres, comme traité de 5.1 à 5.7.

L'augmentation de l'affaiblissement constitue l'effet le plus évident des rayonnements ionisants. Elle est visible pour tous les types de rayonnement dans tous les types de fibres affichant déjà les valeurs de dose les plus petites. L'augmentation de l'affaiblissement est donc traitée en détail à l'Article 8.

Les relations de dispersion de Kramers-Kronig démontrent que toute augmentation de l'affaiblissement s'accompagne d'un changement de l'indice de réfraction. Lors de l'utilisation de fibres à gradient d'indice (GI) dans lesquelles la concentration de dopage varie sur tout le diamètre du cœur de la fibre, il convient que l'affaiblissement dû au rayonnement ainsi que les changements de l'indice de réfraction soient fonction de la concentration respective en Ge. Il convient donc que l'irradiation des fibres à gradient change le profil de l'indice de réfraction et donne lieu à une modification de la bande passante. Cette question est étudiée en [17] et dans la bibliographie qui y est citée. L'augmentation ainsi que la diminution de la bande passante semble possible. Dans le cas de sections de fibre plus longues, la bande passante ne se dégrade de manière perceptible qu'une fois que l'affaiblissement dû aux rayonnements a atteint des valeurs trop importantes. En règle générale, seules les longueurs de fibre relativement courtes (10 m à 100 m) sont nécessaires à la plupart des applications des fibres dans les milieux de rayonnement. Par conséquent, la bande passante ne pose aucun problème.

Les modifications de la contrainte de rupture (BS) sont un effet dont il faut tenir compte après des valeurs de dose gamma importantes (par exemple l'industrie du nucléaire), notamment après des fluences importantes de neutrons ou de protons d'intensité énergétique élevée. L'influence des doses gamma élevées (10^6 Gy) et des fluences de neutrons de 14 MeV d'environ 10^{13} cm⁻² est décrite par exemple en [11], [18], [19] et dans la bibliographie qui y est citée. Les irradiations de neutrons rapides semblaient réduire la BS d'environ 3 % à 4 %, tandis que les irradiations atteignant la dose gamma correspondante (environ 500 Gy) semblaient rester sans effet. La référence [18] démontre que l'irradiation gamma atteignant jusqu'à 10^6 Gy donne généralement lieu à une augmentation de la BS entre 2 % et 11 % environ, ce qui pourrait s'expliquer par le compactage dû au rayonnement, c'est-à-dire une augmentation de la densité. Cependant, après des valeurs de dose gamma $\geq 10^7$ Gy, la BS de la fibre semble diminuer (voir [20]).

with a continuous energy spectrum. Irradiation of a fibre spool can conveniently be made in air. With the smaller machines where the X-ray dose is too low, irradiation can be made by the original electron beam. The metal target is removed, and the beam leaves the field emission tube through a thin Ti window. An additional scattering foil widens the beam so that smaller fibre spools can be homogeneously irradiated at distances between about 50 cm and 150 cm. Because of the limited range of low energetic electrons, one often uses helical single layer spools. The test fibre length has to be short anyhow since the loss increase immediately after the end of a 10 ns radiation pulse can reach values up to 1 dB/cm, dependent on dose, fibre type, wavelength and fibre temperature.

Dosimetry can be made with TLDs, radiochromatic film, “differential calorimeters”, or calibrated semiconductor diodes. Calibrated dosimeter fibres which are arranged in the same way as the fibre under test can give the most accurate and reliable results.

7 Radiation effects on optical fibres

Radiation can change nearly all properties of optical fibres, dependent on radiation type, radiation energy, radiation dose and also on fibre type. For simplicity one only should regard the most probable radiation types, energies and dose values that fibres can experience, as discussed in 5.1 to 5.7.

The most obvious effect of ionizing radiation is an increase of attenuation. It is observable with all radiation types in all fibre types already at lowest dose values. This most important radiation effect is therefore treated in more detail in Clause 8.

From the Kramers-Kronig dispersion relations it is known that any increase of attenuation is accompanied by a change of the refractive index. With graded index (GI) fibres where the dopant concentration varies across the fibre core diameter, the radiation-induced loss and therewith the refractive index changes should depend on the respective Ge concentration. GI fibre irradiation should thus change the index profile and lead to a change of bandwidth. This question is investigated in [17] and the literature cited therein. Increase as well as decrease of bandwidth seems to be possible. With longer fibre sections, noticeable bandwidth degradation only occurs when the radiation-induced loss mostly has reached intolerable high values. Usually only relatively short fibre lengths (10 m to 100 m) are necessary for most of the fibre applications in radiation environments. Therefore, bandwidth poses no problem.

An effect that has to be considered after high gamma dose values (for example, nuclear industry) and, especially, after higher fluences of high energetic neutrons or protons are changes of the breaking stress (BS). The influence of high gamma doses (10^6 Gy) and of 14 MeV neutron fluences of about 10^{13} cm⁻² is described, for example, in [11], [18], [19] and the relevant literature cited therein. The fast neutron irradiations seemed to reduce BS by about 3 % to 4 %, whereas irradiation up to the corresponding gamma dose (about 500 Gy) seemed to have no effect. In [18], it is shown that gamma irradiation up to 10^6 Gy usually leads to a BS increase between about 2 % and 11 %. An explanation could be radiation-induced compaction, i.e. an increase in density. After gamma dose values $\geq 10^7$ Gy, however, fibre BS seems to decrease (see [20]).

Les neutrons thermiques produisent des doses plus de 10^6 fois moins importantes dans du SiO_2 que la même fluence de neutrons de 14 MeV. C'est pourquoi ils ne causent généralement qu'une augmentation peu conséquente de l'affaiblissement. Cependant, l'isotope ^{30}Si est transformé en isotope ^{31}P par capture d'un neutron thermique, ce qui modifie l'indice de réfraction et augmente l'affaiblissement dû aux rayonnements. Malgré tout, cet effet n'a pas de signification pratique.

A la fin de 6.2, il est indiqué que les neutrons rapides peuvent transférer une partie importante de leur énergie cinétique aux noyaux des atomes H du matériau de revêtement ou de câblage. Pour les énergies neutroniques $> 2,5$ MeV, ces protons de recul peuvent atteindre le cœur de la fibre, même pour les fibres unimodales, ce qui donnera lieu, en plus d'une augmentation de la dose, à une augmentation de l'affaiblissement de la fibre autour de 1 390 nm, le pic d'absorption (voir [21]).

Le polytétrafluoréthylène (PTFE) est peut-être le polymère le plus sensible aux rayonnements. Il devient déjà cassant à des valeurs de dose inférieures à 10^3 Gy. Dans la mesure où la gaine des fibres optiques en polymère (POF) est généralement constituée de polymères fluorés, les propriétés lumineuses directrices de ces fibres optiques risquent d'être affectées avant que l'augmentation de l'affaiblissement dû aux rayonnements n'atteigne des valeurs intolérables (voir [22] et [39]).

8 Affaiblissement de transmission dû aux rayonnements

Le niveau d'augmentation de l'affaiblissement de la fibre au cours de l'irradiation dépend de ses propriétés et de son mode de fabrication, d'une part, tels que la pureté des matières premières, le dopage du matériau du cœur, le processus de fabrication de la préforme, les conditions d'étirage, etc. Les efforts considérables consentis par les fabricants pour optimiser la qualité des fibres ont donné naissance à des fibres beaucoup moins sensibles aux rayonnements par rapport aux générations précédentes. Il existe cependant toujours des différences de résistance aux rayonnements plus ou moins marquées entre les fibres de même type fabriquées par des entreprises différentes.

En variante, l'affaiblissement dû aux rayonnements dépend considérablement de la plupart des conditions d'essai, comprenant la température, la longueur d'onde de mesure, la puissance injectée de lumière, le débit de dose et les radioantécédents, comme le montrent les articles suivants. Lorsqu'il est indispensable de sélectionner la pièce la mieux protégée contre les rayonnements dans un type de fibre donné, on doit tenir compte de ces éléments connexes afin d'obtenir des résultats pleinement comparables.

8.1 Radioantécédents

Il est probable que toutes les fibres présentent des différences plus ou moins marquées concernant l'augmentation de l'affaiblissement lors d'une deuxième irradiation dans les mêmes conditions. Pour certaines, l'augmentation est plus importante, pour d'autres, elle l'est moins. Cela dépend également de la durée écoulée entre les irradiations successives et de l'affaiblissement restant de l'irradiation précédente, c'est-à-dire du comportement du recuit d'affaiblissement. Il convient donc impérativement d'utiliser un échantillon de fibre vierge pour chaque essai afin d'obtenir des résultats comparables.

8.2 Relation avec la longueur d'onde

L'affaiblissement dû aux rayonnements de toutes les fibres dépend considérablement de la longueur d'onde de la lumière transmise. Les rayonnements UV ont une longueur d'onde maximale marquée dont le facteur d'affaiblissement est 1 000 fois plus important que dans la région de l'affaiblissement minimal. Ce facteur dépend du type de fibre et de la dose de rayonnement. L'infrarouge lointain est une longueur maximale généralement moins élevée et observée à environ 2 500 nm. La Figure 1 (extraite de la référence [19]) illustre cette relation avec la longueur d'onde. La valeur d'affaiblissement minimale se situe autour de 1 650 nm au

Thermal neutrons produce a more than 10^6 times lower dose in SiO_2 than the same fluence of 14 MeV neutrons. Therefore they usually induce only negligible loss increase. However, the isotope ^{30}Si is transformed by thermal neutron capture into the isotope ^{31}P . This will change the refractive index and increase radiation-induced loss. But this effect usually has no practical significance.

At the end of 6.2, it is pointed out that fast neutrons can transfer a considerable portion of their kinetic energy to the nuclei of H atoms of the coating or cabling material. For neutron energies $>2,5$ MeV these recoil protons can reach the fibre core, even of single-mode (SM) fibres. Apart from an increase of dose this will lead to an increase of fibre attenuation around 1 390 nm, the water peak (see [21]).

Polytetrafluoroethylene (PFTE) is perhaps the most radiation sensitive polymer. It already becomes brittle after dose values below 10^3 Gy. Since the cladding of polymer optical fibres (POFs) is usually made of fluoro polymers, the light-guiding properties of POFs could be affected before their radiation-induced loss increase reaches intolerably high values (see [22] and [39]).

8 Radiation-induced transmission loss

The amount of increase of fibre attenuation during irradiation depends on the fibre properties and the manufacturing procedure, on the one side, such as purity of the raw materials, doping of the core material, preform manufacturing process, drawing conditions, and others. The great efforts of all manufacturers in optimizing fibre quality led to fibres with strongly reduced radiation sensitivity, compared with the early ones. Nevertheless, there still exist more or less pronounced differences in the radiation hardness between fibres of the same type made by different companies.

Alternatively the radiation-induced loss depends strongly on most of the test conditions, including the temperature, the measurement wavelength, the injected light power, the dose-rate and the irradiation history, as will be shown in the following clauses. In cases where it is essential to select the most radiation hard piece of a given fibre type, one has to be aware of these dependencies in order to obtain fully comparable results.

8.1 Radiation history

Presumably all fibres show more or less pronounced differences in loss increase when irradiated a second time under identical conditions. Some types show higher loss increase, some types a lower one. This also depends on the time between successive irradiations and on the residual loss from the previous irradiation, i.e., on the loss annealing behaviour. In order to get comparable results one therefore imperatively should use a new, virgin fibre sample for each test.

8.2 Wavelength dependence

The radiation-induced loss of all fibres depends strongly on the wavelength of the transmitted light. There is a pronounced maximum in the UV, with a factor of more than 1 000 higher loss than in the region of minimal loss. This factor depends on fibre type and radiation dose. Another, usually lower maximum is to be observed in the far IR, around about 2 500 nm. Figure 1 (taken from reference [19]) shows this wavelength dependence. The loss minimum is situated around 1 650 nm at the beginning of an irradiation and shifts to values around

début d'une irradiation et s'établit autour de 1 050 nm aux périodes suivantes (ou à des valeurs de dose plus élevées) aussi bien pour les fibres dont le cœur n'est pas dopé que pour celles dont le cœur est dopé au Ge. Certaines des figures de la référence [23] illustrent plus clairement ce comportement ainsi que l'augmentation de l'affaiblissement vis-à-vis de l'infrarouge lointain.

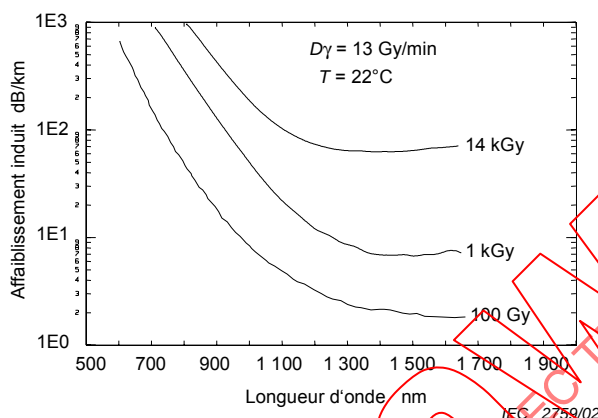


Figure 1 – Relation avec la longueur d'onde de l'affaiblissement dû aux rayonnements de la fibre à gradient d'indice dopée au Ge AT&T MM Rad Hard 3A (50/125 μ m)

Pour des longueurs d'onde plus courtes, le rapport signal/bruit, c'est-à-dire le rapport entre l'augmentation de l'affaiblissement et les dérives du signal ou les bruits, est beaucoup plus important, permettant une longueur de fibre d'essai beaucoup plus courte que pour les mesurages situés entre 800 et 1 600 nm. La longueur doit être plus courte en cas de gamme dynamique limitée des systèmes de mesure tels que les analyseurs de spectre optique.

8.3 Relation avec la température

L'affaiblissement dû aux rayonnements de presque tous les types de fibres diminue à mesure que la température augmente. Ce phénomène s'explique par le fait que le recuit des centres de couleurs est plus rapide à température croissante («recuit thermique»). Les Figures 2a et 2b illustrent ce comportement respectivement pour une fibre SM dopée au Ge et non dopée. La dépendance de dose (ou durée d'irradiation) de l'influence thermique pour les deux types de fibre est clairement différente. La Figure 7 de la référence [6] montre que les fibres dopées au Ge+P présentent même une dépendance thermique inverse située entre -50°C et $+75^{\circ}\text{C}$, c'est-à-dire une augmentation de l'affaiblissement avec la température, mais une légère diminution lorsque la température est élevée à 98°C .

Ces résultats démontrent d'une part qu'il est nécessaire de maintenir la température de la fibre à une valeur donnée (à quelques $^{\circ}\text{C}$ près) afin d'obtenir des résultats non ambigus et comparables; d'autre part, il peut également être nécessaire d'ajuster la longueur de la fibre d'essai à l'affaiblissement supérieur ou inférieur prévu à une certaine température; enfin, il est hasardeux de présenter une méthode relativement simple pour calculer l'affaiblissement dû aux rayonnements à une température plus élevée ou plus basse à partir de mesures réalisées à température ambiante, comme c'est le cas en [12], [24]. Il convient d'effectuer au moins un mesurage à la température considérée pour s'assurer des résultats.

1 050 nm at later times (or higher dose values), for Ge-doped as well as for fibres with undoped core. This behaviour and the loss increase towards the far IR can be seen more clearly in some figures of [23].

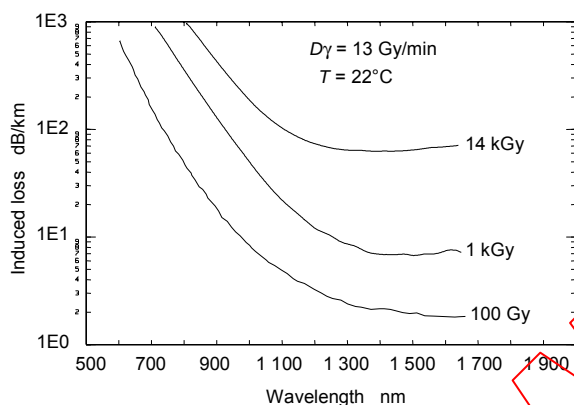


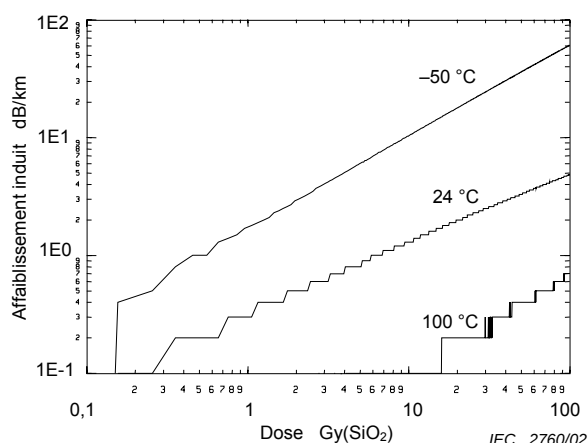
Figure 1 – Wavelength dependence of the radiation-induced loss of the Ge-doped graded index fibre AT&T MM Rad Hard 3A (50/125 μm)

At shorter wavelengths, the signal to noise ratio, i.e., the ratio of loss increase and signal drifts or noise, is much higher so that the test fibre length can be distinctly shorter than for measurements between about 800 nm and 1 600 nm. The length has to be shorter in cases of limited dynamic range of measuring systems like optical spectrum analyzers.

8.3 Temperature dependence

The radiation-induced loss of nearly all fibre types decreases with increasing temperature. The reason is that colour centres anneal faster with increasing temperature ("thermal annealing"). Figures 2a and 2b show this behaviour for a Ge-doped and an undoped SM fibre, respectively. The dose (or irradiation time) dependence of the temperature influence for both fibre types is distinctly different. In Figure 7 of reference [6], it is shown that fibres doped with Ge+P even show an inverse temperature dependence between –50 °C and +75 °C, i.e., an increase of loss with temperature, but a slight decrease when the temperature is raised to 98 °C.

These results show that the fibre temperature has to be kept at a given value (within a few °C) in order to get unambiguous and comparable results, that the test fibre length might have be adjusted to the expected higher or lower loss at a certain temperature, and that it is a daring undertaking to present a relatively simple procedure for calculation of the radiation-induced loss at a higher or lower temperature from measurements taken at room temperature, as done in [12], [24]. In order to be sure, one should perform at least one measurement at the temperature of interest.



NOTE $D_{\gamma} \approx 3 \text{ Gy/min}$, $\lambda = 1309 \text{ nm}$, $P = 20 \text{ }\mu\text{W}$.

Figure 2a – Fibre unimodale dopée au Ge

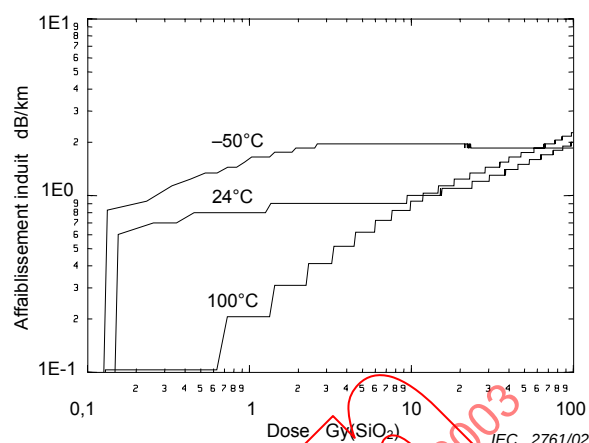
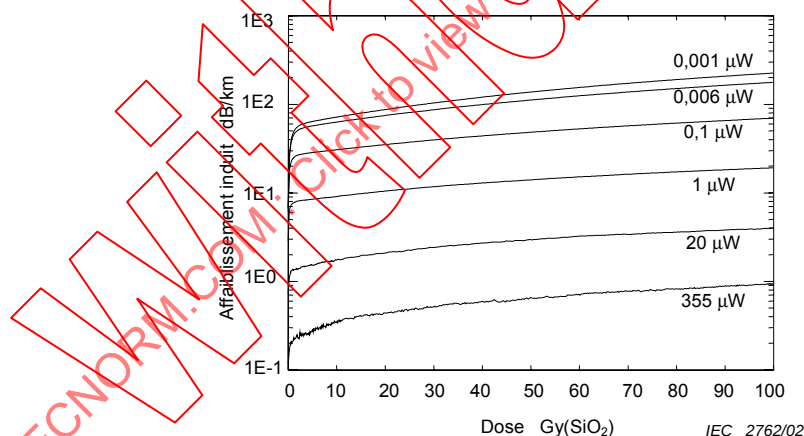


Figure 2b – Fibre unimodale non dopée

Figure 2 – Dépendance thermique de l'affaiblissement dû aux rayonnements

8.4 Relation avec l'énergie lumineuse, photo-instabilité

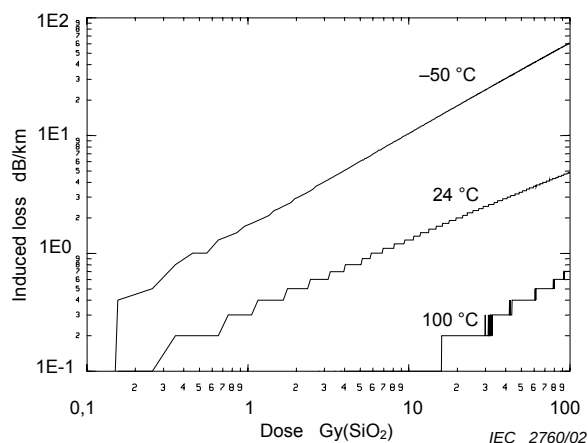
Il est possible que l'augmentation de l'affaiblissement dû aux rayonnements dépende fortement de l'intensité de la lumière utilisée pour la mesure de l'augmentation de l'affaiblissement, en particulier en ce qui concerne certaines fibres fabriquées avant 1985 ayant un cœur non dopé en silice à faible teneur en OH.



NOTE $D_{\gamma} \approx 3 \text{ Gy/min}$, $\lambda = 1309 \text{ nm}$, $T = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figure 3 – Relation de l'affaiblissement dû aux rayonnements avec l'énergie lumineuse de la fibre unimodale non dopée Schott P 926/20E

La Figure 3 donne un exemple dans lequel l'augmentation de l'affaiblissement était moins importante d'un facteur de 200 lorsque l'énergie lumineuse passait de $0,001 \text{ }\mu\text{W}$ à $355 \text{ }\mu\text{W}$. Cet effet, la photo-instabilité, s'explique par l'augmentation du taux de recuit du centre de couleurs sous l'effet de la lumière transmise. Cela explique pourquoi il était recommandé [25 et 40] de maintenir l'énergie lumineuse de mesurage $\leq 1 \text{ }\mu\text{W}$. Mais la Figure 3 montre que la réduction de l'énergie lumineuse de $1 \text{ }\mu\text{W}$ à $0,001 \text{ }\mu\text{W}$ donne toujours lieu à une augmentation de l'affaiblissement supérieure à un facteur de 20.



NOTE $D_{\gamma} \approx 3 \text{ Gy/min}$, $\lambda = 1\,309 \text{ nm}$, $P = 20 \text{ }\mu\text{W}$.

Figure 2a – Ge-doped single-mode fibre

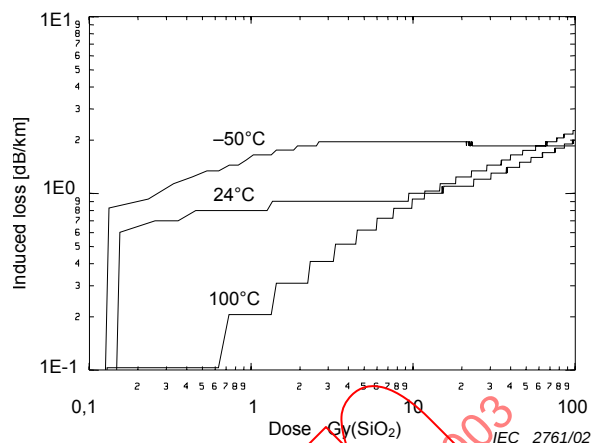
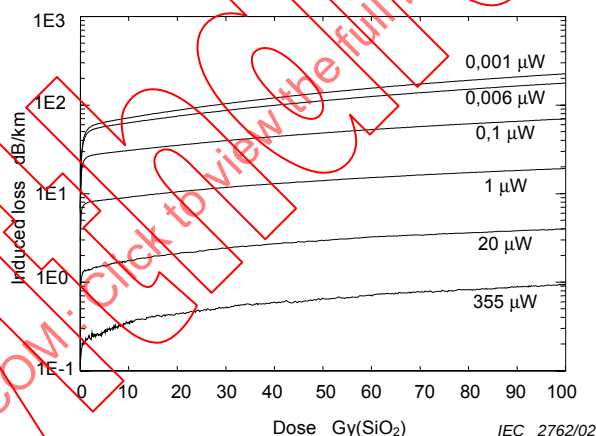


Figure 2b – Undoped single-mode fibre

Figure 2 – Temperature dependence of the radiation-induced loss

8.4 Light power dependence, photobleaching

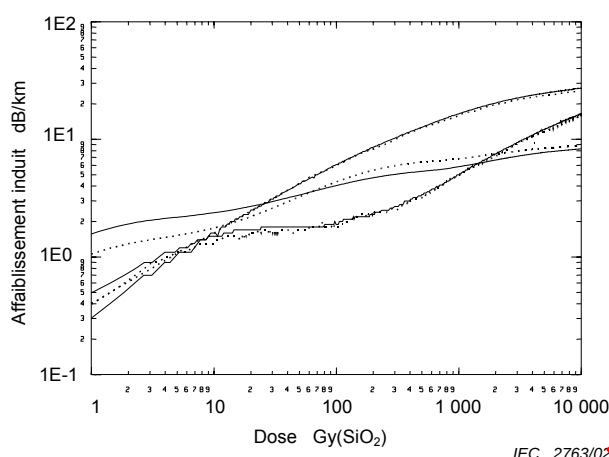
Especially with some of the fibres manufactured before 1985 with undoped silica core of low OH content, the radiation-induced loss increase could extremely depend on the intensity of the light that was used for the loss increase measurement.



NOTE $D_{\gamma} \approx 3 \text{ Gy/min}$, $\lambda = 1\,309 \text{ nm}$, $T = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figure 3 – Light power dependence of the radiation-induced loss of the undoped single-mode fibre Schott P 926/20E

Figure 3 shows an example where the loss increase was more than a factor of 200 lower when the light power was increased from 0,001 μW to 355 μW . This effect is known as “photobleaching”, i.e., the colour centre annealing rate is increased by the transmitted light. This is the reason why it was recommended [25 and 40] to keep the measuring light power $\leq 1 \text{ }\mu\text{W}$. But Figure 3 shows that light power reduction from 1 μW to 0,001 μW still led to a more than a factor of 20 higher loss increase.



NOTE $D, \gamma \approx 0,22 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{s}$, température ambiante.

Légende

- 1 Heraeus Fluosil SS (MM SI, cœur en SiO_2 pur, forte teneur en OH)
 $\lambda = 865 \text{ nm}$, — $P = 0,1 \text{ } \mu\text{W}$, ····· $P = 75 \text{ } \mu\text{W}$
- 2 Light Spec (SM, cœur en SiO_2 pur, faible teneur en OH)
 $\lambda = 1\,309 \text{ nm}$, — $P = 1 \text{ } \mu\text{W}$, ····· $P = 100 \text{ } \mu\text{W}$
- 3 KABELRHEYDT No. 1 (SM, cœur dopé au Ge)
 $\lambda = 1\,309 \text{ nm}$, — $P = 1 \text{ } \mu\text{W}$, ····· $P = 100 \text{ } \mu\text{W}$

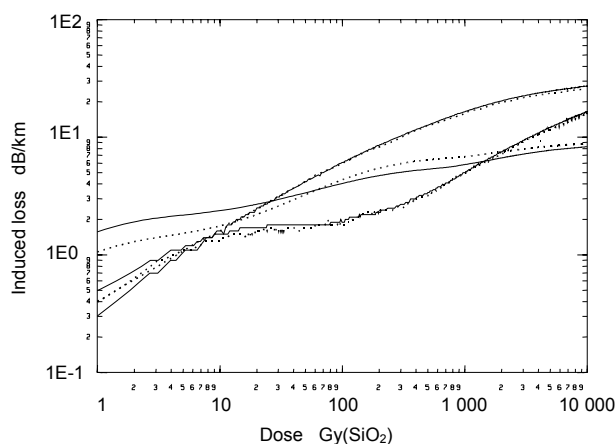
Figure 4 – Relation de l'affaiblissement dû aux rayonnements avec l'énergie lumineuse dans les fibres modernes MM SI et SM

Lorsque des fibres de forte photo-instabilité sont utilisées, il convient d'utiliser d'un échantillon d'essai de longueur relativement courte afin de prévenir une augmentation de l'affaiblissement plus importante vers l'extrémité de l'échantillon où l'intensité lumineuse est de plus en plus faible. Par ailleurs, ce type de fibres ne permet pas de calculer un affaiblissement induit en dB/km à partir de l'affaiblissement mesuré (en dB) avec une longueur L (en mètres) en le multipliant par le facteur $1\,000/L$. Afin d'obtenir des résultats réalistes, il convient d'ajuster la longueur de l'échantillon d'essai ainsi que l'énergie lumineuse au champ d'application prévu.

En fait, la situation est moins compliquée. La photo-instabilité de toutes les fibres modernes SM et GI dopées au Ge ainsi que de la plupart des fibres non dopées à forte ou faible teneur en OH est peu conséquente, à $1\,300 \text{ nm}$ ou $1\,550 \text{ nm}$, ce qui est illustré à la Figure 4 pour une fibre MM SI et deux fibres SM. Cependant, la Figure 3 de la référence [23] indique qu'une fibre GI dopée au Ge ne manifestait pas de photo-instabilité à $1\,300 \text{ nm}$, tandis que son affaiblissement à 830 nm diminuait presque d'un facteur de 5 lorsque l'énergie lumineuse passait de $0,1 \text{ } \mu\text{W}$ à $800 \text{ } \mu\text{W}$. La relation de la photo-instabilité avec la longueur d'onde fait l'objet de [26], où il est également prouvé que l'efficacité de la photo-instabilité est en fait passée de $1\,300 \text{ nm}$ à 670 nm . Mais cette constatation n'a qu'une valeur pratique limitée dans la mesure où l'affaiblissement dû aux rayonnements augmente fortement à mesure que la longueur d'onde diminue, afin qu'une lumière de blanchiment plus efficace de longueur d'onde plus courte soit rapidement affaiblie et perde de son efficacité.

8.5 Relation avec le débit de dose

Les Figures 5a et 5b illustrent la relation de l'affaiblissement dû aux rayonnements avec le débit de dose pour deux types de fibres différents: une fibre SM dopée au Ge (Figure 5a) ayant un taux de recuit modéré et une fibre MM SI avec un cœur en SiO_2 pur à forte teneur en OH (Figure 5b) dont le recuit est relativement rapide (voir 8.8). Plus le recuit est rapide,



NOTE $D_{\gamma} \approx 0,22 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{s}$, room temperature.

Key

- 1 Heraeus Fluosil SS (MM SI, pure SiO_2 core, high OH)
 $\lambda = 865 \text{ nm}$, ——— $P = 0,1 \mu\text{W}$, $P = 75 \mu\text{W}$
- 2 Light Spec (SM, pure SiO_2 core, low OH)
 $\lambda = 1\,309 \text{ nm}$, ——— $P = 1 \mu\text{W}$, $P = 100 \mu\text{W}$
- 3 KABELRHEYDT No. 1 (SM, Ge-doped core)
 $\lambda = 1\,309 \text{ nm}$, ——— $P = 1 \mu\text{W}$, $P = 100 \mu\text{W}$

Figure 4 – Light power dependence of the radiation-induced loss in modern MM SI and SM fibres

With fibres that show strong photobleaching, the test sample length should be kept relatively short in order to prevent higher loss increase towards the sample end where the light intensity will be more and more attenuated. On the other hand it is not allowed with such fibres to calculate an induced loss in dB/km from the loss measured (in dB) with a length L (in metres) by multiplication with the factor $1\,000/L$. In order to get realistic results, test sample length and light power should be adjusted to the intended field of application.

In fact, the situation is less complicated. All modern Ge-doped SM and GI fibres, as well as most of the undoped fibres with low or high OH content show negligible photobleaching at $1\,300 \text{ nm}$ or $1\,550 \text{ nm}$. This is shown in Figure 4 for a MM SI fibre and two SM fibres. However, it is pointed out in Figure 3 of [23] that a Ge-doped GI fibre showed no Photobleaching at $1\,300 \text{ nm}$, whereas its loss at 830 nm decreased by nearly a factor of 5 when the light power was increased from $0,1 \mu\text{W}$ to $800 \mu\text{W}$. The wavelength dependence of photobleaching is discussed in [26], and it is demonstrated that the photobleaching effectiveness actually increased from $1\,300 \text{ nm}$ to 670 nm . But this is only of limited practical value since the radiation-induced loss strongly increases with decreasing wavelength, so that more effective bleaching light of shorter wavelength will be attenuated very soon and becomes less effective.

8.5 Dose rate dependence

Figures 5a and 5b show the dose rate dependence of the radiation-induced loss for two different fibre types: a Ge-doped SM fibre (Figure 5a) with moderate annealing rate and a MM SI fibre with pure SiO_2 core of high OH-content (Figure 5b) that shows relatively fast annealing (see 8.8). The faster the annealing, the stronger the dose rate dependence.

plus la relation avec le débit de dose est forte. Ce phénomène peut s'expliquer par une compétition entre le peuplement et le dépeuplement du centre de couleurs: plus le débit de dose est faible, plus il faudra de temps pour atteindre une dose donnée et plus il y a de recuit des centres de couleurs au cours de l'irradiation. L'ensemble arrive à saturation lorsque le taux de production des centres de couleurs correspond au taux de recuit des centres de couleurs. L'augmentation de l'affaiblissement de la fibre de la Figure 5a arrive à saturation après une dose d'environ 10^4 Gy. Dans la mesure où le taux de recuit est proportionnel au nombre de centres de couleurs déjà présents (c'est-à-dire à l'affaiblissement induit), il convient que la valeur de l'affaiblissement de la saturation augmente à mesure que le débit de dose augmente. L'augmentation de l'affaiblissement des fibres à recuit négligeable ou très lent est (quasiment) indépendante du débit de dose. Il serait possible d'utiliser ce type de fibre pour la dosimétrie des rayonnements («fibres à dosimétrie», voir 6.1).

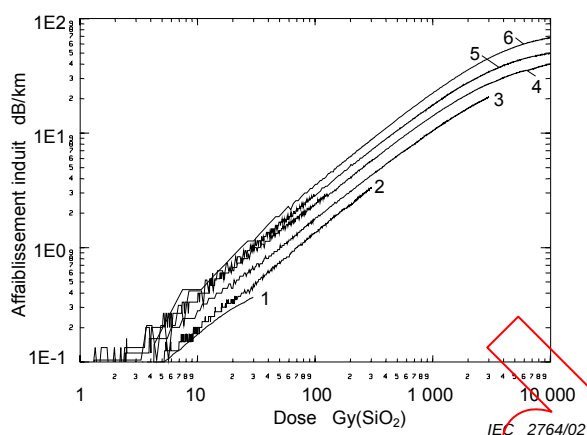


Figure 5a – Fibre unimodale dopée au Ge Philips
FL 1 048 C; $\lambda = 1\,309$ nm, $P = 20$ μ W

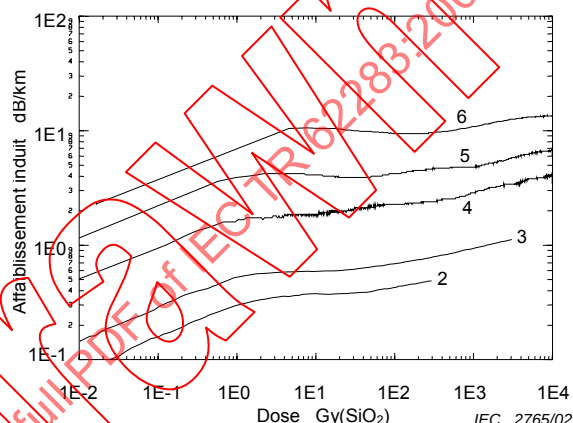


Figure 5b – Fibre multimodale à saut d'indice avec
un cœur en silice pur à forte teneur en OH
Heraeus SS 1.2 152/90; $\lambda = 865$ nm, $P = 10$ μ W

Légende

- | | |
|---------------|------------------------|
| 1 5·10-4 Gy/s | 4 $\approx 0,045$ Gy/s |
| 2 0,0025 Gy/s | 5 $\approx 0,2$ Gy/s |
| 3 0,01 Gy/s | 6 $\approx 1,6$ Gy/s |

Figure 5 – Relation de l'affaiblissement dû aux rayonnements
avec le débit de dose: $T = 22$ °C

Il est généralement impossible d'effectuer des essais de fibre jusqu'à une dose donnée avec le débit de dose prévu pour l'application en question. Cela prendrait des années dans la plupart des cas (espace, centrales nucléaires). On doit, par conséquent, réaliser des essais «accélérés» au cours desquels la dose de durée de vie prévue est appliquée sur plusieurs heures ou jours. Il est certain que cette méthode conviendrait pour la sélection de la fibre la mieux protégée des rayonnements parmi un ensemble de fibres analogues. Afin d'obtenir une estimation réaliste de la véritable augmentation de l'affaiblissement, il est possible d'effectuer des mesurages à partir de différents débits de dose et de calculer le résultat (augmentation de l'affaiblissement pour une dose donnée comme fonction du débit de dose) jusqu'à obtention du débit de dose voulu. Il existe cependant quelques approches (plus ou moins pratiques) [12], [24], [27] permettant de calculer l'augmentation de l'affaiblissement prévue au moyen d'un seul débit de dose plus simple à obtenir. La méthode proposée en [27] est très simple et convient généralement aux valeurs de dose non encore à saturation (c'est-à-dire jusque environ $1\,000$ Gy pour les fibres dopées au Ge) car elle se fonde sur la solution exacte de l'équation différentielle de l'augmentation de l'affaiblissement à un certain débit de dose. L'exactitude de l'augmentation de l'affaiblissement ainsi prévue pour un débit de dose des dizaines de fois inférieur à celui du mesurage réel dépend fortement de l'exactitude du mesurage du débit de dose.

This can be explained by a competition between colour centre population and depopulation: the lower the dose rate, the longer the time to reach a certain dose, the more colour centres anneal already during irradiation. Saturation is reached when the colour centre production rate becomes equal to the colour centre annealing rate. The loss increase of the fibre of Figure 5a saturates after a dose of about 10^4 Gy. Since the annealing rate is proportional to the number of already existing colour centres (i.e. to the induced loss), the saturation loss value has to increase with increasing dose rate. The loss increase of fibres with negligible or very slow annealing is (nearly) independent on dose rate. Such fibres could, for example, be used for radiation dosimetry ("dosimetry fibres", see 6.1).

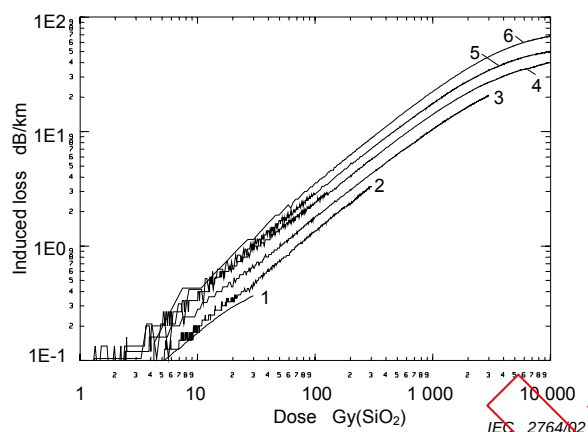


Figure 5a – Ge-doped single-mode fibre
Philips FL 1 048 C; $\lambda = 1\,309$ nm,
 $P = 20$ μ W

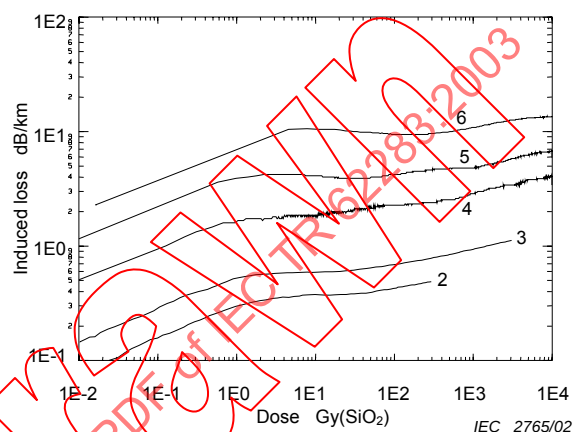


Figure 5b – Multimode step-index fibre with pure silica core of high OH-content Heraeus SS 1. 152/90;
 $\lambda = 865$ nm, $P = 10$ μ W

Key

1 5.10-4 Gy/s	4 $\approx 0,045$ Gy/s
2 0,0025 Gy/s	5 $\approx 0,2$ Gy/s
3 0,01Gy/s	6 $\approx 1,6$ Gy/s

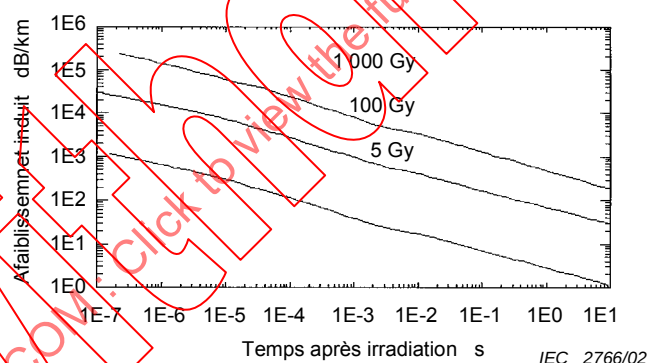
Figure 5 – Dose rate dependence of the radiation-induced loss; $T = 22$ °C

Usually, it is not possible to perform fibre tests up to a given dose with the dose rate expected for the respective application. This often would last several years (space, nuclear power plants). One therefore has to perform "accelerated" tests where the expected life dose is applied within several hours or days. Such a procedure will surely be suited for selecting the radiation hardest one out of a set of otherwise comparable fibres. In order to get a realistic estimate for the actual loss increase, one could perform measurements with distinctly different dose rate and extrapolate the result (loss increase for a given dose as a function of dose rate) down to the dose rate of interest. However, there exist some (more or less convenient) approaches [12], [24], [27] for the calculation of the loss increase expected with a lower (or higher) dose rate from a measurement with only one dose rate that is easier to attain. The method proposed in [27] is very simple and should be correct for dose values below saturation (i.e. up to about 1 000 Gy with Ge-doped fibres) because it is based on the exact solution of the differential equation for the loss increase with a certain dose rate. The accuracy of the loss increase thus predicted for a dose rate that is orders of magnitude lower than that during the actual measurement depends strongly on the accuracy of the dose rate measurement.

8.6 Irradiations pulsées

Il a été démontré en 8.5 que l'affaiblissement dû aux rayonnements observé à une certaine dose augmente avec le débit de dose. Au cours d'irradiations continues à des sources gamma ^{60}Co , le débit de dose varie généralement de 0,01 Gy/s à 10 Gy/s au maximum. Les valeurs de dose habituelles pour les essais militaires varie de 1 Gy à 1 000 Gy par impulsion. Dans la mesure où la durée d'impulsion de la plupart des installations d'essai se situe uniquement entre 1 ns et 50 ns environ, les débits de dose peuvent y atteindre des valeurs comprises entre 10^7 Gy/s et 10^{12} Gy/s environ, ce qui donne lieu à des valeurs d'affaiblissement incroyablement élevées dès la fin du rayonnement impulsionnel. La Figure 6 (extraite de la référence [28]) illustre les résultats obtenus pour une fibre GI dopée au Ge à température ambiante. L'augmentation de l'affaiblissement peut atteindre des valeurs comprises entre 10^5 dB/km et 10^6 dB/km dès la fin de l'impulsion, en fonction de la longueur d'onde et de la température de la fibre. Dans la mesure où le niveau sonore des récepteurs à bande passante élevée est tout juste inférieur à 0,1 μW , il convient que la longueur de la fibre d'essai soit uniquement de 10 cm environ pour les valeurs de dose les plus élevées afin de pouvoir mesurer l'augmentation de l'affaiblissement jusqu'à 10 dB et avec une énergie lumineuse de 1 μW .

Nombreuses sont les irradiations pulsées réalisées avec des électrons fortement énergétiques dont la vitesse est supérieure à celle de la lumière dans la fibre irradiée. Par conséquent, une impulsion «lumineuse lumineuse» de forte intensité est observée au cours de l'irradiation; elle peut surcharger le récepteur, empêchant les mesurages à la fin de l'impulsion. Dans la mesure où la majeure partie de la lumière est due à l'effet Cerenkov, son intensité augmente avec $1/\lambda^3$, afin de faciliter une protection adéquate du récepteur par un filtre passe-haut qui bloque la lumière n'entrant pas dans la longueur d'onde considérée.



NOTE La largeur d'impulsion efficace était 30 ns, $\lambda = 840$ nm, $P = 10$ μW , température ambiante.

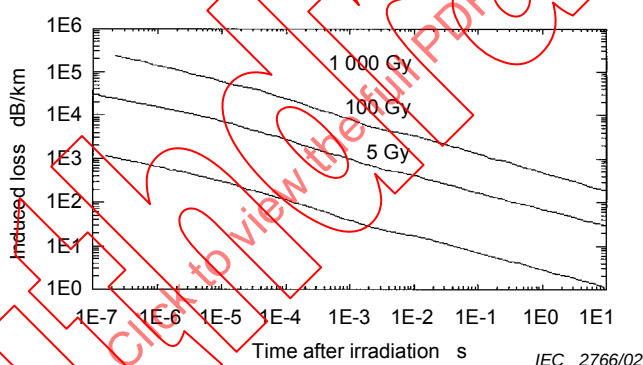
Figure 6 – Recuit de l'affaiblissement dû aux rayonnements de la fibre GI à gradient d'indice dopée au Ge KWO G 2.2/1380 après irradiation électronique pulsée respectivement à des valeurs de dose de 5 Gy(SiO_2), 100 Gy(SiO_2) et 1 000 Gy(SiO_2)

La Figure 6 montre que le recuit de l'affaiblissement démarre dès la fin de l'impulsion et engendre une réduction de l'affaiblissement supérieure à un facteur de 1 000 (selon le type et la température de fibre) en l'espace de 10 s après la fin de l'impulsion. Du fait de la gamme dynamique limitée de la plupart des récepteurs à bande passante élevée, il est par exemple possible d'utiliser un nouvel échantillon de fibre, plus long, pour mesurer le recuit de l'affaiblissement pour des durées supérieures à 10^{-3} s, par exemple. Une autre solution consiste à amener la lumière vers un récepteur à bande passante élevée (avec un coupleur 1:2) pour le régime court et vers un récepteur à bande passante faible, à niveau sonore faible, pour les durées $> 10^{-3}$ s.

8.6 Pulsed irradiations

In 8.5, it was shown that the radiation-induced loss observed with a certain dose increases with dose rate. During continuous irradiations at ^{60}Co gamma sources the dose rate usually is in the range of 0,01 Gy/s up to 10 Gy/s at the most. Usual dose values for military tests range from 1 Gy to 1 000 Gy per pulse. Since the pulse length with most of the usual test facilities is only between about 1 ns and 50 ns, the dose rates can here reach values between about 10^7 Gy/s and 10^{12} Gy/s. This leads to tremendous loss values immediately after the radiation pulse end. Figure 6 (taken from reference [28]) shows the result obtained with a Ge-doped GI fibre at room temperature. The loss increase can reach values between 10^5 dB/km and 10^6 dB/km immediately after the pulse end, dependent on wavelength and fibre temperature. Since the necessary high bandwidth receivers have a noise level not far below 0,1 μW , the test fibre length should only be around 10 cm for the highest dose values in order to be able to measure a loss increase up to 10 dB with a light power of 1 μW .

Many of the pulsed irradiations are performed with high energetic electrons with a velocity distinctly above the velocity of light in the irradiated fibre. During irradiation one therefore observes a “luminescence light” pulse of high intensity that can overload the receiver, preventing measurements immediately after pulse end. Since most of the light comes from the Cerenkov effect, its intensity increases with $1/\lambda^3$, so that the receiver could easily and adequately be protected by a high pass filter that blocks all light below the wavelength of interest.



NOTE Effective pulse width was 30 ns, $\lambda = 840$ nm, $P = 10$ μW , room temperature

Figure 6 – Annealing of the radiation-induced loss of the Ge-doped GI fibre KWO G 2.2/1380 after pulsed electron irradiation with dose values of 5 Gy(SiO_2), 100 Gy(SiO_2) and 1 000 Gy(SiO_2), respectively

From Figure 6, it can be seen that loss annealing begins immediately after pulse end and leads to a loss reduction by more than a factor of 1 000 (dependent on fibre type and temperature) already 10 s after pulse end. Because of the limited dynamic range of most of the high bandwidth receivers, one could for example use a new, longer fibre sample for measuring the loss annealing at times greater than for example 10^{-3} s. Another possibility is to conduct the light (with a 1:2 splitter) to a high bandwidth receiver for the short time regime as well as to a low bandwidth receiver, with low noise level, for times $> 10^{-3}$ s.

Le recuit de l'affaiblissement prend fin au bout de 10^{-5} s environ pour les fibres dopées au Ge+P, comme l'illustrent les Figures 5a et 5b de la référence [29]. Par la suite, l'affaiblissement suit plus ou moins la même courbe qu'après une irradiation continue à un débit de dose de seulement 0,05 Gy/s jusqu'à la même dose de 100 Gy (Figures 13a et 13b de la référence [29]).

On doit tenir compte des irradiations pulsées également dans la photo-instabilité, c'est-à-dire qu'il est possible d'accélérer le recuit de l'affaiblissement en augmentant l'intensité de la lumière de mesure, en fonction du type de fibre, de la longueur d'onde et de la température de la fibre. Cependant, les mesurages effectués sur les mêmes fibres fortement sensibles à la photo-instabilité que celles de la Figure 3 montrent que le phénomène ne s'avère efficace que 10^{-5} s environ après la fin du rayonnement impulsif (Figures 6a et 6b de la référence [29]).

8.7 Relation avec le type de rayonnement

Il semble a priori raisonnable de supposer que les différents types de rayonnements ionisants donnent lieu à la même augmentation de l'affaiblissement des fibres, à condition qu'ils déposent la même dose. C'est le principe énoncé par exemple en [30] pour l'irradiation aux particules gamma ^{60}Co et aux neutrons de 14 MeV. En fait, il a été démontré (voir [11]) que les fluences de neutrons de 14 MeV atteignant jusqu'à 10^{13} n/cm² provoquent une augmentation de l'affaiblissement 2,5 fois moins importante que les irradiations gamma pour le même débit de dose et jusqu'à la même dose. Cet écart pourrait s'expliquer par le fait que les auteurs de la référence [30] n'ont pas pris en compte la contribution à la dose des «protons de recul» ionisants s'échappant du matériau de revêtement hydrogéné de la fibre (généralement «acrylate UV», voir [8]).

La densité d'ionisation des protons, des particules alpha et des ions plus lourds tels que les produits de la réaction des neutrons de 14 MeV avec la matière est beaucoup plus importante que celle due aux rayons X, aux rayons gamma et aux électrons. Ce phénomène peut donner lieu à une recombinaison des porteurs de charge et à des effets de saturation dans les traces d'ionisation plus denses, ainsi qu'à une augmentation de l'affaiblissement moins importante, comme l'explique la référence [11]. Cette constatation est valable au moins au début d'une irradiation, tant que la concentration des défauts à l'intérieur du cœur de la fibre et agissant comme «parents» des «centres de couleurs» absorbeurs de lumière est donnée par le processus de production des fibres.

Les rayons X et gamma dont l'énergie est supérieure à 0,7 MeV ainsi que les électrons fortement énergétiques, les protons, les particules alpha et les ions plus lourds peuvent libérer une fraction de leur énergie lors de «collisions non ionisantes» à l'origine de dommages structurels à l'intérieur du cœur de la fibre, c'est-à-dire de nouveaux défauts susceptible d'agir comme des parents des centres de couleurs. Les dommages structurels dus aux particules ionisantes plus lourdes peuvent devenir des dizaines de fois plus importants que ceux causés par la même dose de rayons gamma ou d'électrons. Il faut donc s'attendre à ce que des particules plus lourdes et plus densément ionisantes donnent finalement lieu à une augmentation de l'affaiblissement plus importante que les rayons gamma ou les électrons pour un même débit de dose, au-delà d'une certaine valeur de fluence, lorsque la concentration de défauts due aux neutrons devient plus importante que celle des défauts déjà présents. Il est estimé en [11] que ce pourrait être le cas pour une fluence de neutrons de 14 MeV supérieure à 5×10^{13} n/cm².

Cependant, les Figures 5a et 5b de la référence [11] montrent que pour les fibres dont l'augmentation de l'affaiblissement est plus importante au cours des irradiations gamma, le phénomène sera identique au cours des irradiations à neutrons rapides pour le même débit de dose. La méthode suivante pourrait donc servir à réduire le nombre d'irradiations plus chères et plus difficiles effectuées avec des protons ou des neutrons rapides: on commence par sélectionner, au moyen d'irradiations gamma ^{60}Co , la fibre la mieux protégée des rayonnements parmi un grand nombre de fibres analogues (voir également 8.5).

With fibres that are doped with Ge+P the loss annealing ends after about 10^{-5} s, as can be seen in Figures 5a and 5b of reference [29]. Thereafter, the loss is approximately of the same size as after a continuous irradiation with a dose rate of only 0,05 Gy/s up to the same dose of 100 Gy (Figures 13a and 13b of reference [29]).

Photobleaching has to be considered also with pulsed irradiations, i.e., the loss annealing can be accelerated by increasing the power of the measuring light, dependent on fibre type, wavelength and fibre temperature. However, measurements that were made with the same fibre type of high photobleaching sensitivity as those of Figure 3 show that it becomes effective not before about 10^{-5} s after the end of the radiation pulse (Figures 6a and 6b of reference [29]).

8.7 Radiation type dependence

At the first attempt it seems to be reasonable to assume that different types of ionizing radiation will lead to the same fibre loss increase, provided they deposit the same dose. This was, for example, stated in [30] for ^{60}Co gamma and 14 MeV neutron irradiation. Actually, it was found (see [11]) that 14 MeV neutron fluences up to 10^{13} n/cm² cause an about 2,5 times lower loss increase than gamma irradiations with the same dose rate up to the same dose. The reason for this discrepancy might be that the authors of reference [30] did not consider the dose contribution of ionizing “recoil protons” out of the hydrogen containing fibre coating material (usually “UV acrylate”, see [8]).

The ionization density of protons, alpha particles and heavier ions like the reaction products of 14 MeV neutrons with matter is much higher than that caused by X-rays, gamma rays and electrons. This can lead to charge carrier recombination and saturation effects in more dense ionization tracks and, as a consequence, to a lower loss increase, as discussed in more detail in [11]. This is at least valid at the beginning of an irradiation, as long as the concentration of defects within the fibre core that can act as “precursors” of light absorbing “colour centres” is given by the fibre production process.

X-rays and gamma rays above an energy of about 0,7 MeV, as well as highly energetic electrons, protons, alpha particles and heavier ions can loose a fraction of their energy by “non ionizing collisions” that cause structural damage within the fibre core, i.e., new defects that can act as precursors of colour centres. The structural damage caused by heavier ionizing particles can become orders of magnitude higher than that caused by the same dose of gamma rays or electrons. Therefore it is to be expected that heavier, more densely ionizing particles will finally lead to a higher loss increase than gamma rays or electrons of the same dose rate, above a certain fluence value, when the concentration of defects caused by neutrons became higher than that of the already existing ones. In [11], it is estimated that this will happen for a 14 MeV neutron fluence above 5×10^{13} n/cm².

However, in Figures 5a and 5b of reference [11], it is shown that fibres with higher loss increase during gamma irradiation will also show higher loss increase during fast neutron irradiation with the same dose rate. Therefore the following procedure could help to reduce the number of more expensive and more difficult irradiations with protons or fast neutrons: as a first step one selects with ^{60}Co gamma irradiations the most radiation hard one out of a greater number of otherwise comparable fibres (see also 8.5). For neutron and proton

Pour les fluences neutroniques et protoniques $\leq 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, il convient que l'augmentation de l'affaiblissement due aux rayons gamma représente une limite maximale également pour les irradiations neutroniques et protoniques. Ces dernières ne s'avèrent nécessaires que dans le cas de fluences de particules plus importantes.

8.8 Recuit de l'affaiblissement

Dans la plupart des publications portant sur les essais d'irradiation des fibres optiques, les fibres sont irradiées à un débit de dose fixe jusqu'à la dose voulue, ce qui signifie que la durée d'irradiation reste constante. Par conséquent, lorsque le recuit, c'est-à-dire la diminution de l'affaiblissement à la fin de l'irradiation, est également mesuré, la durée de recuit observée est pratiquement toujours identique (= temps nécessaire à la diminution de l'affaiblissement, par exemple à 1/2 ou 1/e ($e = 2,718...$, fondement des logarithmes naturels) dès la fin de l'irradiation). Il est donc courant de considérer la durée de recuit comme une propriété fixe des fibres (à une température donnée), similaire, par exemple, à la durée de vie des états excités des noyaux, des atomes ou des cristaux.

La durée de recuit est en fait une fonction forte de la durée d'irradiation. Il est visible, à la Figure 6, qu'après les irradiations pulsées, le recuit de la valeur d'affaiblissement initiale à 1/2 ne dure que 10^{-6} s environ. La référence [31] montre que suite à des irradiations gamma ^{60}Co continues, la durée de recuit augmente quasiment parallèlement à la durée d'irradiation, au moins pour les durées d'irradiation de 1 s jusqu'à 5 jours environ. Cet effet peut dépendre des conditions précises et du type de fibre. La référence [11] montre que l'augmentation de la durée de recuit simultanément à la durée d'irradiation vaut également pour les irradiations de neutrons de 14 MeV.

Ce comportement s'explique peut-être par le fait que l'affaiblissement de la fibre est dû à un ensemble (continuum) de centres de couleurs de période différente et dans lequel s'imposent les centres à durée de vie plus longue, à mesure qu'augmente la durée d'irradiation. Les références [27] et [32] présentent ces phénomènes plus en détail.

Dans les cas où le recuit de l'affaiblissement est également mesuré, on doit donc prendre en compte sa relation avec la durée d'irradiation.

8.9 Conclusions

Les paragraphes précédents ont mis l'accent sur la relation de l'affaiblissement des fibres dû aux rayonnements avec les radioantécédents (irradiations précédentes) ainsi qu'avec presque tous les paramètres d'essai.

Par conséquent, il convient d'utiliser dans tous les cas un nouvel échantillon de fibre pour chaque essai afin d'obtenir des résultats significatifs, comparables et reproductibles.

La longueur de la fibre d'essai doit être ajustée aux paramètres d'essai respectifs. Il conviendrait qu'il ne s'agisse pas des très grandes longueurs anciennement prescrites, lorsque la stabilité de l'équipement de mesure était bien largement inférieure à celle des sources lumineuses de grande qualité et des wattmètres optiques actuels. Il convient que les longueurs des échantillons de fibre soient bien courtes, en particulier pour les irradiations pulsées à débit de dose extrême.

On doit toujours tenir compte de la photo-instabilité, mais les fibres modernes à affaiblissement peu important sont beaucoup moins sensibles que les précédentes. En général, la photo-instabilité est peu conséquente pour des longueurs d'onde de plus grande portée (1 300 nm, 1 550 nm).

Dans la mesure où la quasi-totalité des fibres présentent un recuit particulier, l'affaiblissement mesuré après l'application d'une certaine dose dépend du débit de dose, c'est-à-dire de la durée d'irradiation. Les essais «accélérés», plus économiques et rapides produisent généralement des valeurs d'affaiblissement trop importantes. Il existe cependant des méthodes de calcul de l'affaiblissement prévu après des durées d'exposition plus longues, effectuées à partir d'un ou plusieurs mesurages plus courts.