

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC
TR 62048**

Première édition
First edition
2002-05

**Fibres optiques –
Fiabilité –
Théorie de la loi de puissance**

**Optical fibres –
Reliability –
Power law theory**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC/TR 62048:2002

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 62048

Première édition
First edition
2002-05

**Fibres optiques –
Fiabilité –
Théorie de la loi de puissance**

**Optical fibres –
Reliability –
Power law theory**

© IEC 2002 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 **XB**

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	8
1 Domaine d'application.....	12
2 Liste des symboles	12
3 Approche générale.....	16
4 Types de formules	18
5 Mesure des paramètres de fiabilité des fibres	20
5.1 Longueur et longueur équivalente	20
5.2 Paramètres de fiabilité	22
5.2.1 Essai de sélection	22
5.2.2 Fatigue statique	22
5.2.3 Fatigue dynamique.....	24
5.3 Paramètres de la région de faible résistance.....	24
5.3.1 Essai de sélection sous contrainte variable	24
5.3.2 Fatigue dynamique.....	28
5.4 Valeurs numériques mesurées	32
6 Exemples de calculs numériques	34
6.1 Calculs du taux de défaillance.....	34
6.1.1 Formules de taux de défaillances dans un temps donné (DTD).....	34
6.1.2 Grandes longueurs sous traction.....	34
6.1.3 Petites longueurs sous courbure uniforme.....	38
6.2 Calculs de la durée de vie.....	42
6.2.1 Formules de la durée de vie.....	42
6.2.2 Grandes longueurs sous tension	44
6.2.3 Petites longueurs sous courbure uniforme.....	44
7 Fragilisation et défaillance de la fibre.....	48
7.1 Croissance et fragilisation de fissure.....	48
7.2 Défaillance de fissure.....	54
7.3 Caractéristiques des résultats généraux.....	56
7.4 Contrainte et déformation	56
8 Essais de fatigue.....	58
8.1 Fatigue statique.....	58
8.2 Fatigue dynamique	62
8.2.1 Fatigue à la défaillance	62
8.2.2 Fatigue jusqu'à une contrainte maximale.....	64
8.3 Comparaisons de la fatigue statique et dynamique.....	66
8.3.1 Ordonnées à l'origine (intersection) et paramètres obtenus	66
8.3.2 Durée	66
8.3.3 Résistance dynamique et passive	68
8.3.4 Non-linéarités des courbes.....	68
8.3.5 Environnements.....	70
9 Essai de sélection.....	70
9.1 Le cycle d'essai de sélection.....	70
9.2 Fragilisation des fissures au cours des essais de sélection.....	72

CONTENTS

FOREWORD.....	9
1 Scope.....	13
2 List of symbols.....	13
3 General approach	17
4 Formula types.....	19
5 Measuring parameters for fibre reliability.....	21
5.1 Length and equivalent length	21
5.2 Reliability parameters	23
5.2.1 Proof testing	23
5.2.2 Static fatigue	23
5.2.3 Dynamic fatigue	25
5.3 Parameters for the low-strength region	25
5.3.1 Variable proof test stress	25
5.3.2 Dynamic fatigue	29
5.4 Measured numerical values	33
6 Examples of numerical calculations.....	35
6.1 Failure rate calculations.....	35
6.1.1 FIT rate formulas	35
6.1.2 Long lengths in tension	35
6.1.3 Short lengths in uniform bending.....	39
6.2 Lifetime calculations	43
6.2.1 Lifetime formulae.....	43
6.2.2 Long lengths in tension	45
6.2.3 Short lengths in uniform bending.....	45
7 Fibre weakening and failure	49
7.1 Crack growth and weakening	49
7.2 Crack fracture.....	55
7.3 Features of the general results	57
7.4 Stress and strain	57
8 Fatigue testing.....	59
8.1 Static fatigue	59
8.2 Dynamic fatigue.....	63
8.2.1 Fatigue to breakage	63
8.2.2 Fatigue to a maximum stress	65
8.3 Comparisons of static and dynamic fatigue	67
8.3.1 Intercepts and parameters obtained	67
8.3.2 Time duration	67
8.3.3 Dynamic and inert strengths.....	69
8.3.4 Plot non-linearities	69
8.3.5 Environments.....	71
9 Proof testing.....	71
9.1 The proof test cycle	71
9.2 Crack weakening during proof testing	73

9.3	Résistance minimale après essai de sélection.....	74
9.3.1	Retrait rapide de la charge.....	76
9.3.2	Retrait lent de la charge.....	76
9.3.3	Condition aux limites.....	78
9.4	Variations de la contrainte de sélection.....	80
10	Probabilité de Weibull.....	80
10.1	Statistiques de résistance sous tension uniforme.....	80
10.1.1	Distribution de probabilité unimodale.....	80
10.1.2	Distribution de probabilité bimodale.....	84
10.2	Statistiques de résistance pour d'autres géométries.....	84
10.2.1	Non-uniformité de la contrainte.....	84
10.2.2	Courbure uniforme.....	86
10.2.3	Flexion en deux points.....	88
10.3	Fatigue statique de Weibull avant essai de sélection.....	88
10.4	Fatigue dynamique de Weibull avant essai de sélection.....	92
10.5	Weibull après essai de sélection.....	96
10.6	Fatigue statique de Weibull après essai de sélection.....	102
10.7	Fatigue dynamique de Weibull après essai de sélection.....	104
11	Prédiction de la fiabilité.....	106
11.1	La fiabilité sous contrainte générale et contrainte constante.....	106
11.2	Durée de vie et taux de défaillance à partir des essais de fatigue.....	110
11.3	Assurance de survie après essai de sélection.....	112
11.4	Défaillances dans le temps.....	112
12	Valeur <i>B</i> : élimination à partir des formules et mesures.....	114
12.1	Distribution de Weibull approximative après essai de sélection.....	114
12.1.1	«Région à risque» au cours de l'essai de sélection.....	114
12.1.2	Autres approximations.....	116
12.2	Durée de vie et taux de défaillance approximatifs.....	122
12.3	Estimation de la valeur <i>B</i>	122
12.3.1	Ordonnées à l'origine (intersection) des courbes de fatigue.....	124
12.3.2	Contrainte de défaillance dynamique.....	124
12.3.3	Obtenir la résistance.....	124
12.3.4	Mesure de contrainte en impulsion.....	124
12.3.5	Mesure de la croissance de fissure.....	126
13	Références.....	126

Figure 1 – Courbe de Weibull de fatigue dynamique près du niveau de contrainte de sélection à la limite conventionnelle de déformation..... 30

Figure 2 – Taux DTD instantanés par km de fibre en fonction du temps pour des pourcentages contrainte appliquée / contrainte de sélection (de bas en haut) 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %..... 36

Figure 3 – Taux DTD moyenné par km de fibre en fonction du temps pour des pourcentages contrainte appliquée / contrainte de sélection (de bas en haut) 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %..... 36

Figure 4 – Taux DTD instantanés par mètre de fibre courbée en fonction du temps..... 40

Figure 5 – Taux DTD instantanés par mètre de fibre courbée en fonction du temps pour les diamètres de courbure (de haut en bas): 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm..... 40

Figure 6 – Durée de vie sur 1 km en fonction de la probabilité de défaillance pour des pourcentages contrainte appliquée / contrainte de sélection (de haut en bas): 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %..... 44

9.3	Minimum strength after prooftesting	75
9.3.1	Fast unloading	77
9.3.2	Slow unloading	77
9.3.3	Boundary condition	79
9.4	Varying the proof test stress	81
10	Weibull probability	81
10.1	Strength statistics in uniform tension	81
10.1.1	Unimodal probability distribution	81
10.1.2	Bimodal probability distribution	85
10.2	Strength statistics in other geometries	85
10.2.1	Stress non-uniformity	85
10.2.2	Uniform bending	87
10.2.3	Two-point bending	89
10.3	Weibull static fatigue before prooftesting	89
10.4	Weibull dynamic fatigue before prooftesting	93
10.5	Weibull after prooftesting	97
10.6	Weibull static fatigue after prooftesting	103
10.7	Weibull dynamic fatigue after prooftesting	105
11	Reliability prediction	107
11.1	Reliability under general stress and constant stress	107
11.2	Lifetime and failure rate from fatigue testing	111
11.3	Certain survivability after prooftesting	113
11.4	Failures in time	113
12	<i>B</i> -value: elimination from formulae, and measurements	115
12.1	Approximate Weibull distribution after prooftesting	115
12.1.1	"Risky region" during prooftesting	115
12.1.2	Other approximations	117
12.1.3	The dynamic Weibull distribution of equation (10.7.2) is	121
12.2	Approximate lifetime and failure rate	123
12.3	Estimation of the <i>B</i> -value	123
12.3.1	Fatigue intercepts	125
12.3.2	Dynamic failure stress	125
12.3.3	Obtaining the strength	125
12.3.4	Stress pulse measurement	125
12.3.5	Flaw growth measurement	127
13	References	127
Figure 1 – Weibull dynamic fatigue plot near the proof test stress level		31
Figure 2 – Instantaneous FIT rates per fibre km versus time for applied stress/proof test stress percentages (bottom to top): 10, 15, 20, 25, 30 %		37
Figure 3 – Averaged FIT rates per fibre km versus time for applied stress/proof test stress percentages (bottom to top): 10, 15, 20, 25, 30 %		37
Figure 4 – Instantaneous FIT rates per bent fibre metre versus time		41
Figure 5 – Instantaneous FIT rates per bent fibre metre versus time for bend diameters (top to bottom): 10, 20, 30, 40, 50 mm		41
Figure 6 – 1-km lifetime versus failure probability for applied stress/proof test stress percentages (top to bottom): 10, 15, 20, 25, 30 %		45

Figure 7 – Durées de vie par mètre de fibre courbée en fonction de la probabilité de défaillance pour les diamètres de courbure (bas-droite vers haut-gauche) 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm.....	46
Figure 8 – Fatigue statique: contrainte appliquée en fonction du temps pour une contrainte appliquée donnée.....	60
Figure 9 – Fatigue statique: données schématiques de temps de défaillance en fonction de la contrainte appliquée	60
Figure 10 – Fatigue dynamique: contrainte appliquée en fonction du temps pour un taux donné de contrainte appliquée.....	62
Figure 11 – Fatigue dynamique: données schématiques de temps de défaillance en fonction du taux de contrainte appliquée.....	64
Figure 12 – Essai de sélection: Contrainte appliquée en fonction du temps.....	72
Figure 13 – Diagramme schématique de Weibull de fatigue statique	92
Figure 14 – Diagramme schématique de Weibull de fatigue dynamique	94
Tableau 1 – Taux DTD des figures 2 et 3 pour différents temps.....	38
Tableau 2 – Taux DTD des figures 4 et 5 pour différents temps.....	42
Tableau 3 – Taux DTD du tableau 2 – en négligeant la contrainte en fonction de la non-linéarité de la déformation	42
Tableau 4 – Durées de vie sur 1 km de la figure 6 pour différentes probabilités de défaillance	46
Tableau 5 – Durées de vie sur 1 m de la figure 7 pour différentes probabilités de défaillance	48
Tableau 6 – Durées de vie du tableau 5 en négligeant la non-linéarité de la contrainte en fonction de la déformation	48

WITNESS

Figure 7 – Lifetimes per bent fibre metre versus failure probability for bend diameters (bottom-right to top-left): 10, 20, 30, 40, 50 mm	47
Figure 8 – Static fatigue: applied stress versus time for a particular applied stress.....	61
Figure 9 – Static fatigue: schematic data of failure time versus applied stress.....	61
Figure 10 – Dynamic fatigue: applied stress versus time for a particular applied stress rate.....	63
Figure 11 – Dynamic fatigue: schematic data of failure time versus applied stress rate	65
Figure 12– Proof testing: applied stress versus time	73
Figure 13 – Static fatigue schematic Weibull plot	93
Figure 14 – Dynamic fatigue schematic Weibull plot	95
Table 1 – FIT rates of figures 2 and 3 at various times.....	39
Table 2 – FIT rates of figures 4 and 5 at various times.....	43
Table 3 – FIT rates of table 2 neglecting stress versus strain non-linearity	43
Table 4 – One kilometer lifetimes of figure 6 for various failure probabilities.....	47
Table 5 – One-meter lifetimes of figure 7 for various failure probabilities.....	49
Table 6 – Lifetimes of table 5 neglecting stress versus strain non-linearity	49

Withdrawn

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

FIBRES OPTIQUES – FIABILITÉ – THÉORIE DE LA LOI DE PUISSANCE

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 62048, 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/611/CDV	86A/660/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 3.

Ce document, purement informatif, ne doit pas être considéré comme une Norme internationale.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**OPTICAL FIBRES –
RELIABILITY –
POWER LAW THEORY**

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 62048, 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/611/CDV	86A/660/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 3.

This document which is purely informative is not to be regarded as an International Standard.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2005. A cette date, la publication sera

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

Withdrawn

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2005. At this date, the publication will be

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

Withdrawn

FIBRES OPTIQUES – FIABILITÉ – THÉORIE DE LA LOI DE PUISSANCE

1 Domaine d'application

Le présent document constitue un guide qui contient des formules permettant d'estimer la fiabilité des fibres soumises à une contrainte de service constante. Il se fonde sur une loi de puissance relative à la croissance de fissure, déduite de façon empirique, mais il existe d'autres lois qui ont une base plus physique (par exemple, la loi exponentielle). En général, toutes ces lois cadrent bien avec les données expérimentales obtenues à court terme, mais elles conduisent à des prédictions différentes à long terme. La loi de puissance a été choisie comme la représentation la plus raisonnable du comportement de fatigue par les experts de plusieurs organismes de normalisation.

La fiabilité est exprimée soit sous la forme d'une durée de vie prévue, soit sous la forme d'un taux de défaillance prévu. Les résultats ne peuvent pas être utilisés pour établir des spécifications ou pour comparer la qualité de différentes fibres. Le présent document développe les aspects théoriques qui sous-tendent les principes expérimentaux utilisés pour mesurer les paramètres des fibres nécessaires dans les formules de fiabilité. Ces aspects théoriques découlent pour la plupart de la littérature référencée et sont présentés ici de façon unifiée. Les résultats essentiels sont des formules relatives à la durée de vie ou au taux de défaillance, exprimées en fonction des paramètres mesurables. Inversement, il est possible de calculer une contrainte de service maximale autorisée ou une valeur extrême d'un autre paramètre pour une durée de vie ou un taux de défaillance admissible.

Pour des lecteurs qui sont uniquement intéressés par les résultats finaux du présent document – un résumé des formules utilisées et des exemples numériques de calcul de fiabilité des fibres – les articles 5 et 6 sont suffisants et indépendants. Les lecteurs qui désirent avoir des explications détaillées avec des dérivations algébriques trouveront ce qui les intéresse dans les articles 7 à 12. On a tenté d'homogénéiser l'approche et la notation afin de permettre aux lecteurs de suivre plus facilement la théorie. Cela devrait garantir également l'homogénéité de la notation utilisée dans toutes les procédures d'essai. L'article 13 présente un ensemble limité de références en majorité théoriques, mais il n'est pas nécessaire de les lire pour être en mesure de suivre le développement analytique du présent document.

NOTE Les articles 7 à 11 font référence à la valeur B et ceci uniquement dans le souci de présenter la théorie dans son intégralité. Il n'existe pas encore de méthode consensuelle permettant de mesurer B . L'article 12 présente un résumé analytique succinct de certaines méthodes proposées et développe, en outre, des résultats théoriques qui s'appliquent au cas particulier où la valeur B peut être négligée.

2 Liste des symboles

Les symboles sont donnés pour la plupart par ordre alphabétique, en alphabet latin et en alphabet grec. Le symbole est défini en premier dans le paragraphe (articles 7 à 11) indiqué.

NOTE La mention «dim» signifie «sans dimension»

OPTICAL FIBRES – RELIABILITY – POWER LAW THEORY

1 Scope

This is a guideline technical report that gives formulae to estimate the reliability of fibre under a constant service stress. It is based on a power law for crack growth which is derived empirically, but there are other laws which have a more physical basis (for example, the exponential law). All these laws generally fit short-term experimental data well but lead to different long-term predictions. The power law has been selected as a most reasonable representation of fatigue behaviour, by the experts of several standard-formulating bodies.

Reliability is expressed as an expected lifetime or as an expected failure rate. The results can not be used for specifications or for the comparison of the quality of different fibres. The document develops the theory behind the experimental principles used in measuring the fibre parameters needed in the reliability formulae. Much of the theory is taken from the referenced literature and is presented here in a unified manner. The primary results are formulae for lifetime or for failure rate, given in terms of the measurable parameters. Conversely, an allowed maximum service stress or extreme value of another parameter may be calculated for an acceptable lifetime or failure rate.

For readers interested only in the final results of this technical report – a summary of the formulae used and numerical examples in the calculation of fibre reliability – clauses 5 and 6 are sufficient and self-contained. Readers wanting a detailed background with algebraic derivations will find this in clauses 7 to 12. An attempt is made to unify the approach and the notation to make it easier for the reader to follow the theory. Also, it should ensure that the notation is consistent in all test procedures. Clause 13 has a limited set of mostly theoretical references, but it is not necessary to read them to follow the analytical development in this technical report.

NOTE Clauses 7 to 11 reference the B -value, and this is done for theoretical completeness only. There are as yet no agreed methods for measuring B , so clause 12 gives only a brief analytical outline of some proposed methods, and furthermore develops theoretical results for the special case in which β can be neglected.

2 List of symbols

The symbols are listed mostly in alphabetical order, within the Latin and the Greek alphabets. The symbol is first defined in the subclause (clauses 7 to 11) indicated.

NOTE The remark "dim" means dimensionless.

Symbole	Unité	Nom	Paragraphe
a	μm	Profondeur de fissure	7.1
a_f	μm	Rayon de la fibre de verre	10.2
B	$\text{GPa}^2 \cdot \text{s}$	Paramètre de préservation de la résistance de la fissure ou valeur B	7.1
B_0	$\text{GPa}^2 \cdot \text{s}$	Valeur B de transition à la limite entre retrait lent et retrait rapide de la charge	9.3
c	dim	Terme de non-linéarité pour la contrainte en fonction de la déformation	7.4
C	dim	Terme supplémentaire sans dimension, se rapportant à l'essai de sélection ou valeur C	10.5
C_0	dim	Valeur de transition de C à la limite entre retrait lent et retrait rapide de la charge	10.5
D	mm	Séparation des axes de la fibre dans un cas de courbure en deux points	10.2.3
E	GPa	Module de Young	7.4
E_0	GPa	Module de Young en contrainte nulle	7.4
F	dim	Probabilité de défaillance de la fibre	11.1
$K_I(t)$	$\text{GPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$	Facteur d'intensité de contrainte	7.1
$K_{Ic}(t)$	$\text{GPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$	Facteur d'intensité de contrainte critique	7.1
L	μm à km	Longueur effective de la fibre sous contrainte uniforme, ou longueur de traction équivalente	10.1.1
L_b	μm à km	Longueur de la fibre en courbure uniforme	10.2.2
L_p	km	Longueur moyenne de survie, ou longueur de survie, durant l'essai de sélection	10.5
L_0	km	Longueur en essai, longueur de référence	10.1.1
m	dim	Paramètre inerte de Weibull ou valeur m	10.1.1
m_d	dim	Valeur m sous fatigue dynamique	10.4
m_s	dim	Valeur m sous fatigue statique	10.3
n	dim	Paramètre de susceptibilité à la corrosion sous contrainte ou valeur n	7.1
N_p	km^{-1}	Taux de casse moyen par unité de longueur au cours de l'essai de sélection	10.5
$N(S)$	km^{-1}	Défauts par unité de longueur ne dépassant pas la résistance passive S	10.1.1
P	dim	Probabilité de survie de la fibre	10.1.1
P_p	dim	Probabilité de survie de la fibre après essai de sélection	10.5
R	mm, m	Rayon de courbure de la fibre	10.2.2
$S(t)$	GPa	Résistance «passive» d'une fissure	7.1
S_p	GPa	Résistance après essai de sélection	9.2
$S_{p,min}$	GPa	Résistance minimale après essai de sélection	9.3
S_0	GPa	Résistance en essai de Weibull	10.1.1
t	s à année	Variable de temps	7.1
t_d	s à année	Temps jusqu'à la défaillance sous fatigue dynamique, ou temps de maintien dans l'essai de sélection	8.2.1, 9.1
t_f	s à année	Durée de vie (temps jusqu'à la défaillance) sous contrainte constante ou essai de fatigue statique	7.2, 8.1
t_{fp}	s à année	Durée de vie après essai de sélection	10.7
t_{fpmin}	s à année	Durée de vie minimale pour survie assurée après essai de sélection	10.7
$t_f(1)$	---	Intersection sur une courbe de fatigue statique	8.1
t_l	ms	Temps d'application sous contrainte en essai de sélection	9.1
t_p	ms	Temps de sélection effectif	9.2

Symbol	Unit	Name	Clause and subclause
A	μm	Flaw depth	7.1
a_f	"	Radius of glass fibre	10.2
B	$\text{GPa}^2 \cdot \text{s}$	Crack strength preservation parameter or B -value	7.1
B_0	"	Transitional B -value at the slow-unloading/fast-unloading boundary	9.3
c	Dim	Non-linearity term for stress versus strain	7.4
C	"	Additive dimensionless proof test term or C -value	10.5
C_0	"	Transitional value of C at the slow-unloading/fast-unloading boundary	10.5
D	mm	Fibre-axe separation in two-point bending	10.2.3
E	GPa	Young's modulus	7.4
E_0	GPa	Zero-stress Young's modulus	7.4
F	dim	Fibre failure probability	11.1
$K_I(t)$	$\text{GPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$	Stress intensity factor	7.1
$K_{Ic}(t)$	$\text{GPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$	Critical stress intensity factor	7.1
L	μm to km	Fibre effective length under uniform stress, or equivalent tensile length	10.1.1
L_b	μm to km	Fibre length in uniform bend	10.2.2
L_p	km	Mean survival length, or survival length, during proof testing	10.5
L_0	km	Gauge length, reference length	10.1.1
m	dim	"Inert" Weibull parameter or m -value	10.1.1
m_d	dim	m -value under dynamic fatigue	10.4
m_s	dim	m -value under static fatigue	10.3
n	dim	Stress corrosion susceptibility parameter or n -value	10.1
N_p	km^{-1}	Mean break rate per unit length during proof testing	10.5
$N(S)$	km^{-1}	Flaws per unit length not exceeding inert strength S	10.1.1
P	dim	Fibre survival probability	10.1.1
P_p	dim	Fibre survival probability after proof testing	10.5
R	mm , m	Fibre bend radius	10.2.2
$S(t)$	GPa	"Inert" strength of a crack	7.1
S_p	GPa	Strength after proof testing	9.2
$S_{p\min}$	GPa	Minimum strength after proof testing	9.3
S_0	GPa	Weibull gauge strength	10.1.1
t	s to year	Variable of time	7.1
t_d	s to year	Time to failure under dynamic fatigue, or proof testing dwell time	8.2.1, 9.1
t_f	s to year	Lifetime (time to failure) under constant stress or static fatigue testing	7.2, 8.1
t_{fp}	s to year	Lifetime after proof testing	10.7
$t_{fp\min}$	s to year	Minimum lifetime for certain survival after proof testing	10.7
$t_f(1)$	---	Intercept on a static fatigue plot	8.1
t_l	ms	Proof test load time	9.1
t_p	ms	Effective proof time	9.2

Symbole	Unité	Nom	Paragraphe
t_u	ms	Temps de la mise hors contrainte en essai de sélection	9.1
t_0		Paramètre d'échelonnage du temps de Weibull statique	10.3
V	$\mu\text{m/s}$	Rapidité de croissance de fissure	7.1
V_C	$\mu\text{m/s}$	Rapidité critique de croissance de fissure	7.1
x	dim	Facteur liant la longueur courbée à une longueur de traction équivalente	10.2.2
Y	dim	Paramètre de forme relatif à la géométrie d'une fissure	7.1
α	dim	Rapport entre paramètres de la mise hors contrainte d'essai de sélection et paramètres de fissure	9.3
β	$\text{GPa}^n \cdot \text{s} \cdot \text{km}^{(n-2)/m}$	Valeur β de Weibull	10.3, 10.4
ε	dim	Déformation correspondant à une contrainte particulière	7.4
λ_i	$\text{km}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$	défaillances/longueur-temps (taux de défaillance instantané)	11.1
λ_a	$\text{km}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$	Taux de défaillance moyenné	11.2
$\sigma(t)$	GPa	Contrainte appliquée à une fissure	7.1
σ_a	GPa	Contrainte appliquée sous essai de fatigue statique et durée de vie	8.1, 11.2
$\dot{\sigma}_a$	GPa/s	Taux de contrainte appliquée sous essai de fatigue dynamique	8.2.1
σ_f	GPa	Contrainte de défaillance sous essai de fatigue dynamique, sans essai de sélection	8.2.1
σ_{fp}	GPa	Contrainte de défaillance après essai de sélection	10.7
σ_{fmin}	GPa	Contrainte de défaillance minimale après essai de sélection	10.7
$\sigma_f(1)$	---	Intersection sur une courbe de fatigue dynamique	8.2.1
σ_p	GPa	Essai de sélection	9.1
σ_0	GPa	Paramètre d'échelonnage de contrainte dynamique de Weibull	10.4

3 Approche générale

Tout d'abord, on montre l'équivalence entre la croissance de fissure individuelle et sa fragilisation associée. Ceci est lié à la contrainte appliquée ou à la déformation considérée comme une fonction arbitraire du temps. La contrainte appliquée peut être appliquée jusqu'à la défaillance, ce qui permet de calculer la durée de vie d'une fissure. Ensuite, on examine les résultats des essais destructifs de fatigue statique et dynamique avec leurs relations réciproques. Ces essais mesurent des paramètres utiles pour la théorie. Ils mettent également en évidence la différence qui existe entre résistance «passive» et résistance «dynamique».

La théorie de la fissure unique présentée ci-dessus est ensuite étendue à une distribution statistique d'un grand nombre de fissures. On utilise à cette fin une distribution de probabilité de Weibull définie en termes de survie (ou de défaillance) et appliquée à la résistance. Cela permet de mettre en œuvre plusieurs géométries de déploiement dans des conditions d'essai et dans des conditions de service. La distribution inerte et les distributions obtenues au cours des essais de fatigue statique ou dynamique sont établies pour avant et après les essais de sélection. Cette opération s'effectue parfois avec des approximations pour lesquelles il n'est pas toujours nécessaire de connaître explicitement la valeur B . Enfin, les divers paramètres mesurés au cours des essais décrits ci-dessus sont reliés à des formules relatives à la fiabilité des fibres, c'est-à-dire la durée de vie et le taux de défaillance.

Les principales hypothèses utilisées dans le développement sont indiquées ci-dessous.

- La relation entre le facteur d'intensité de contrainte, la contrainte appliquée et la taille de la fissure est donnée par l'équation (7.1.1), alors que, à la défaillance, la relation entre le facteur d'intensité de contrainte critique, la résistance et la profondeur de fissure est donnée par l'équation (7.1.2).

Symbol	Unit	Name	Clause and subclause
t_u	Ms	Proof test unload time	9.1
t_0		Static Weibull time-scaling parameter	10.3
V	$\mu\text{m/s}$	Crack growth velocity	7.1
V_C	$\mu\text{m/s}$	Critical crack growth velocity	7.1
x	dim	Factor relating bend length to equivalent tensile length	10.2.2
Y	dim	Crack geometry shape parameter	7.1
α	dim	Ratio of proof test unload parameters to crack parameters	9.3
β	$\text{GPa}^n \cdot \text{s} \cdot \text{km}^{(n-2)}$	Weibull β -value	10.3, 10.4
ϵ	dim	Strain corresponding to a particular stress	7.4
λ_i	$\text{km}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$	Breaks/length-time (instantaneous failure rate)	11.1
λ_a	$\text{km}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$	Averaged failure rate	11.2
$\sigma(t)$	GPa	Stress applied to a crack	7.1
σ_a	GPa	Applied stress under static fatigue testing and lifetime	8.1, 11.2
$\dot{\sigma}_a$	GPa/s	Applied stress rate under dynamic fatigue testing	8.2.1
σ_f	GPa	Failure stress under dynamic fatigue testing, without proof testing	8.2.1
σ_{fp}	GPa	Failure stress after proof testing	10.7
$\sigma_{fp\min}$	GPa	Minimum failure stress after proof testing	10.7
$\sigma_f(1)$	---	Intercept on a dynamic fatigue plot	8.2.1
σ_p	GPa	Proof test stress	9.1
σ_0	GPa	Dynamic Weibull stress-scaling parameter	10.4

3 General approach

First, the equivalence of the growth of an individual crack and its associated weakening is shown. This is related to applied stress or strain as an arbitrary function of time. Applied stress can be taken to fracture, from which the lifetime of the crack is calculated. Next, the destructive tests of static and dynamic fatigue are reviewed, along with their relationship to each other. These tests measure parameters useful in the theory. This also shows the difference between "inert" strength and "dynamic" strength.

The above single-crack theory is then extended to a statistical distribution of many cracks. This is done in terms of a survival (or failure) Weibull probability distribution in strength. It can allow for several deployment geometries in testing and service. The inert distribution and the distributions obtained by static or dynamic fatigue testing are derived for before and after proof testing. The latter is sometimes done with approximations that may not require knowing the B -value explicitly. Finally, the various parameters measured by the above testing are related to formulas for fibre reliability, that is, lifetime and failure rate.

Some of the main assumptions in the development are as indicated below.

- The relationship between the stress intensity factor, applied stress, and flaw size is given by equation (7.1.1), while at fracture the relationship between the critical stress intensity factor, strength, and flaw depth is given by equation (7.1.2).

- La vitesse de croissance de fissure est reliée au facteur d'intensité de contrainte par l'équation (7.1.4).
- La distribution de Weibull des contraintes (avant tout essai de sélection) est unimodale selon les équations (10.1.5) et (10.1.6) ou bimodale selon l'équation (10.1.11). Il est nécessaire d'utiliser la paire (m, S_0) qui convient pour le niveau de probabilité de survie souhaité et la longueur souhaitée. Les longueurs de déploiement varieront selon l'application, comme par exemple: fibres enroulées sur des bobines, dans un câble, dans des tiroirs d'épissures ou dans un connecteur ou dans d'autres types de composants. Toutefois, en raison des faibles niveaux de probabilités de défaillance voulus, le mode extrinsèque de faible résistance doit normalement être utilisé.
- Les valeurs des paramètres de fatigue, aussi bien statique que dynamique, dépendent de l'environnement de la fibre, du vieillissement de la fibre ainsi que du conditionnement préalable de la fibre avant les essais. Dans la théorie, elles sont considérées comme indépendantes du temps, de sorte qu'il est nécessaire d'avoir recours à un jugement technique pour choisir les valeurs pratiques à utiliser dans les calculs. Ceci implique également que les paramètres de fatigue statiques et de fatigue dynamique correspondants sont égaux (pour le même environnement et la même durée).
- Le vieillissement sous contrainte nulle n'est pas pris en compte. Etant donné que les paramètres indiqués ci-dessus sont indépendants du temps, la résistance diminue uniquement en raison de la fatigue sous contrainte conformément à la loi de puissance telle qu'indiquée en 7.1.

4 Types de formules

Les formules utilisent des paramètres obtenus à partir d'essais de fatigue jusqu'à la défaillance et à partir d'essais de sélection avec des défaillances potentielles aléatoires. Dans les conditions de service qui nous intéressent, une fibre ayant une longueur effective (qui dépend de la géométrie de déploiement) L est soumise à des contraintes de service appliquées constantes qui ne varient pas avec le temps. (Il s'agit de contraintes de traction, qui comprennent les contraintes de courbure. Les contraintes de torsion ou de compression ne sont pas traitées.) La durée de vie en fonction de la probabilité de défaillance ou du taux de défaillance en fonction du temps est donnée.

Les formules supposent une distribution de Weibull avec des paramètres qui varient entre divers types de fibres et peut-être entre fibres du même type. De plus, ces paramètres varient en fonction de l'environnement et des niveaux de contraintes appliquées. La distribution de Weibull peut présenter plusieurs termes nominalement linéaires qui dépendent de différents niveaux de résistance de fissure. Il est important d'utiliser dans les formules les paramètres de Weibull qui correspondent au terme concerné. Ces paramètres sont obtenus à partir de mesures de fatigue. En règle générale, la région de faible résistance située près et en dessous de la contrainte de sélection est intéressante, et les mesures doivent être effectuées sur des grandes longueurs de fibre en essai et sur de nombreux échantillons pour que la longueur totale de fibre soumise à l'essai soit importante. Les paramètres mesurés sur un petit nombre d'échantillons de faible longueur, pour caractériser la région de forte résistance, seront différents des précédents. Ils ne doivent pas être utilisés dans les formules pour extrapoler vers des régions à probabilité réduite de résistance plus faible.

Dans les hypothèses de la loi de puissance mentionnées plus haut, les équations des articles 7 à 11 sont algébriquement «exactes». Cependant, dans certaines applications, certains termes peuvent être négligeables et des équations algébriques plus approximatives et plus simples sont données à l'article 12. Ceci offre l'avantage de ne pas nécessiter l'utilisation de la valeur B , pour laquelle il n'existe pas encore de méthode normalisée d'essai, et qui a été décrite comme pouvant couvrir plusieurs ordres de grandeur.

Même en utilisant ces formules, il n'existe pas de méthode sûre qui permette de prédire avec exactitude la fiabilité des fibres. Certaines fibres peuvent casser avant la plus prudente des prédictions, tandis que d'autres peuvent durer plus longtemps que la plus pessimiste des prédictions. Après fabrication de la fibre, fatigue ou dommage peut se produire à

- The crack growth velocity is related to the stress intensity factor by equation (7.1.4).
- The Weibull distribution of stress (before any proof testing) is unimodal according to equations (10.1.5) and (10.1.6) or bimodal according to equation (10.1.11). The (m, S_0) pair appropriate to the desired survival probability level and length must be used. Deployment lengths will differ upon the application such as fibre on reels, in cable, splice trays, or within a connector or other component. Because of the low failure probabilities desired, however, the low-strength extrinsic mode must usually be used.
- The values of the fatigue parameters, both static and dynamic, depend upon the fibre environment, fibre ageing, and fibre preconditioning prior to testing. In theory, they are taken to be independent of time, so that some engineering judgement is needed to decide the practical values to be used in the calculations. This also implies that the corresponding static and dynamic parameters equal each other (for the same environment and time duration).
- Zero-stress ageing is not accounted for. Since the above parameters are independent of time, the strength decreases due only to stress fatigue following the power law according to 7.1.

4 Formula types

The formulae utilize parameters obtained from fatigue testing-to-failure, and from proof testing with potential random failures. In the service condition of interest, a fibre of effective length L (dependent upon deployment geometry) is subjected to a constant applied service stress that does not change with time. (This stress is tensile, including bending stress. Torsional or compressive stresses are not covered.) The lifetime as a function of failure probability or failure rate as a function of time are given.

The formulae assume a Weibull distribution with parameters that vary among fibre types and perhaps among fibres of the same type. Moreover, they change with environment and applied stress levels. The Weibull distribution may have several nominally linear terms depending upon several levels of flaw strength. It is important that the Weibull parameters for the term of interest be used in the formulae. These are obtained from fatigue measurements. Generally, the low-strength region near the proof test stress and below is of interest, and measurements must be on long fibre gauge lengths and with many samples so that the total fibre length tested is large. Parameters measured for a small number of short samples, characterizing the high-strength region, will differ from the preceding ones. They must not be used in the formulae to extrapolate to lower-strength lower-probability regions.

Within the above power-law assumptions, the equations of clauses 7 to 11 are algebraically "exact". However, in some applications, certain terms may be negligible, and more approximate and simpler algebraic equations are given in clause 12. This has the advantage that the B -value, for which there is yet no standard test method and which has been reported to span several orders of magnitude, is not required.

Even with these formulae, there is no assured way of accurately predicting fibre reliability. Some fibres may break before the most conservative of predictions, while others may last longer than the most pessimistic of predictions. After fibre manufacture, fatigue or damage may

câblage, de l'installation ou de la mise en service; habituellement ces aspects ne peuvent pas être pris en compte dans la théorie. Une approche de l'estimation de ces effets pourrait être obtenue en mesurant les paramètres de fibre, après chacune de ces phases, mais cela n'est pas fait couramment.

Toutes les équations sont numérotées par trois chiffres; les deux premiers chiffres correspondent aux deux chiffres du paragraphe de niveau 2 (par exemple 5.1 pour le paragraphe 5.1), le troisième chiffre indiquant l'ordre de l'équation à l'intérieur du paragraphe (par exemple l'équation [5.1.6] sera la sixième équation qui apparaît dans le paragraphe 5.1). Afin de faciliter la recherche des dérivations pour le lecteur, si nécessaire, les formules résumées dans les articles 5 et 6 portent la mention, entre parenthèses, des équations détaillées dans les articles 7 à 12. Néanmoins, il n'est pas nécessaire de se reporter aux dérivations pour être en mesure de suivre les articles 5 et 6 (Id : changer 2 et 3 – ancienne numérotation).

5 Mesure des paramètres de fiabilité des fibres

Cet article présente la façon dont les paramètres entrant dans les équations de fiabilité (durée de vie et taux de défaillance) sont obtenus avec une approximation de faible valeur B . Les paramètres de l'essai de sélection sont obtenus en soumettant à l'essai la longueur totale de fibre à déployer. Au contraire, les procédures de fatigue statique et dynamique utilisent toutes deux de nombreux échantillons courts. Ceux-ci sont utilisés pour obtenir des diagrammes linéaires de Weibull pour la probabilité de défaillance cumulative F , représentée en: $\ln - \ln \frac{1}{P}$ (où $P = 1 - F$ est la probabilité de survie) en fonction du $\ln$ d'une variable appropriée (temps de défaillance ou contrainte de défaillance). Pour les situations où le diagramme peut être ajusté à au moins deux sections rectilignes, il convient d'utiliser la section la plus proche de la contrainte de service anticipée pour obtenir les paramètres requis.

5.1 Longueur et longueur équivalente

La géométrie des conditions d'essai peut être différente de la géométrie des conditions de service. Le symbole L_0 représente la longueur en essai pour l'essai de fatigue statique ou dynamique, alors que L est la longueur en service soumise à une contrainte de service appliquée constante. La longueur en essai est égale à la longueur effective seulement dans le cas d'une tension longitudinale. D'autres géométries requièrent l'utilisation de longueurs équivalentes.

Pour une courbure uniforme (par exemple, un enroulement sur mandrin), la longueur de courbure en service L_b est remplacée par une longueur de traction en service équivalente L donnée par

$$L \approx 0,4 \frac{L_b}{\sqrt{x}} \quad (10.2.6)$$

Le même rapport vaut entre la longueur de courbure en essai L_{b0} et la longueur en essai équivalente L_0 . Dans cette équation on trouve le facteur

$$x = \frac{mn}{n-2} = m_s n = \frac{m_d n}{n+1} \quad (10.2.7)$$

en utilisant les paramètres de fatigue inerte, statique et dynamique respectivement, obtenus comme indiqué ci-dessous.

Pour la flexion en deux points, la longueur équivalente dépend de la contrainte appliquée dans une méthode complexe. Le calcul de la longueur en service équivalente pour une contrainte de service appliquée arbitraire est difficile. La longueur en essai équivalente est comprise approximativement entre 10 μm et 30 μm , en fonction de la contrainte de défaillance.

occur due to cabling, installation, or operation; this usually cannot be accounted for in the theory. A start on estimating these effects could be made by measuring the parameters of fibres after each of these stages, but this is not commonly done.

All the equations are numbered by three digits; the first two correspond to the two digits from the subclause (for example, 5.1 for subclause 5.1), and the third is the order of the equation within the subclause (for example, equation (5.1.6) will be the sixth equation which appears in subclause 5.1. For convenience in assisting the reader to find the derivations, if desired, the formulae summarized in clauses 5 and 6 include the indication in brackets of the equations listed in clauses 7 to 12. However, it is not necessary to refer to the derivations to be able to follow clauses 5 and 6.

5 Measuring parameters for fibre reliability

This clause outlines how the parameters in the reliability (lifetime and failure rate) equations are obtained in the approximation of the small B -value. Proof test parameters are obtained from testing the full length of fibre to be deployed. By contrast, both static and dynamic fatigue procedures use many short-length test samples. These are used to obtain "linear" Weibull plots of the cumulative failure probability F scaled as $\ln \ln \frac{1}{P}$ (where $P = 1 - F$ is the survival probability) versus the $\ln$ of a suitable variable (failure time or failure stress). For situations in which the plot may be fitted to two or more straight line parts, that part closest to the anticipated service stress should be used in obtaining the needed parameters.

5.1 Length and equivalent length

The testing and service geometries may differ from each other. The symbol L_0 is the gauge length in static or dynamic fatigue testing, whereas L is the in-service length subjected to constant applied service stress. The gauge length equals the actual length only for the case of longitudinal tension. Other geometries require equivalent lengths.

For uniform bending (for example, mandrel wrap), the in-service bend length L_b is replaced by an equivalent in-service tensile length L given by

$$L \approx 0,4 \frac{L_b}{\sqrt{x}} \quad (10.2.6)$$

The same relationship holds between the gauge bend length L_{b0} and the equivalent gauge length L_0 . In this equation there is the factor

$$x = \frac{mn}{n-2} = m_s n = \frac{m_d n}{n+1} \quad (10.2.7)$$

using inert, static fatigue, and dynamic fatigue parameters, respectively, as obtained below.

For two-point bending, the equivalent length depends upon the applied stress in a complex way. Computation of the equivalent in-service length for an arbitrary applied service stress is difficult. The equivalent gauge length is approximately 10 μm to 30 μm , depending upon the failure stress.

5.2 Paramètres de fiabilité

Ce paragraphe présente des méthodes qui sont couramment utilisées pour déduire ces paramètres.

5.2.1 Essai de sélection

- Obtenir le paramètre composé d'essai de sélection $\sigma_p^n t_p$, où σ_p représente la contrainte de sélection effective au cours du temps de maintien, et n le paramètre de susceptibilité à la corrosion sous contrainte (ou valeur n). Le temps effectif d'essai de sélection est donné par

$$t_p = t_d + \frac{t_l + t_u}{n+1} \quad (9.2.2)$$

obtenu à partir du temps sous contrainte t_l , du temps de maintien t_d , et du temps de la mise hors contrainte t_u .

- (Facultatif): Si à partir de l'essai de sélection, le nombre moyen de défaillances N_p par longueur ou la longueur moyenne de survie L_p au cours de l'essai de sélection est connu(e), calculer

$$\beta = \frac{\sigma_p^n t_p}{N_p^m} = \frac{\sigma_p^n t_p L_p^m}{n-2} \quad (12.1.12)$$

où

$$\frac{m}{n-2} = m_s = \frac{m_d}{n+1} \quad (12.1.13)$$

si cela n'est pas possible, obtenir β en tant que paramètre d'ajustement à partir de 5.2.2, de 5.2.3, ou en 5.3.

5.2.2 Fatigue statique

- Obtenir la courbe de Weibull statique de probabilité graduée en fonction du ln des temps de défaillance t_f pour toute contrainte particulière appliquée constante σ_a :

$$\ln \frac{1}{P_p(t_f)} = \left[(t_f \sigma_a^n + t_p \sigma_p^n)^{m_s} - (t_p \sigma_p^n)^{m_s} \right] \frac{L}{\beta^{m_s}} \quad (12.1.14)$$

Déterminer les paramètres m_s et β à partir des caractéristiques de la courbe.

- Obtenir la ligne droite la mieux ajustée au ln des temps de défaillance en fonction du ln des contraintes appliquées:

$$\log t_f(\sigma_a) \approx \log t_f(1) - n \log \sigma_a \quad (8.1.4)$$

Mesurer le paramètre de susceptibilité à la corrosion sous contrainte statique en tant que pente négative $-n$ de cette ligne. Le terme $t_f(1)$ représente «l'intersection» de cette ligne sur l'axe de l'ordonnée, c'est-à-dire la valeur de temps de défaillance lorsque la contrainte appliquée est de l'ordre de l'unité. (Cette valeur dépendra des unités utilisées, et peut requérir une extrapolation linéaire au-delà des points de données. Elle n'a pas de dimension de temps.)

5.2 Reliability parameters

This subclause outlines methods that are commonly used to derive these parameters.

5.2.1 Proof testing

- Obtain the composite proof test parameter $\sigma_p^n t_p$, where σ_p is the actual proof test stress during dwell, and n is the stress-corrosion susceptibility parameter (or n -value). The effective proof time is given by

$$t_p = t_d + \frac{t_l + t_u}{n + 1} \quad (9.2.2)$$

obtained from the loadtime t_l , the dwelltime t_d , and the unloadtime t_u .

- (Optional): If from proof testing the mean number of breaks N_p per length or the mean survival length L_p during proof testing is known, calculate

$$\beta = \frac{\sigma_p^n t_p}{N_p^{\frac{n-2}{n-1}}} = \sigma_p^n t_p L_p^{\frac{n-2}{n-1}} \quad (12.1.12)$$

where

$$\frac{m}{n-2} = m_s = \frac{m_d}{n+1} \quad (12.1.13)$$

If this is not possible, obtain β as a fit parameter in 5.2.2, 5.2.3, or 5.3.

5.2.2 Static fatigue

- Obtain the static Weibull plot of scaled probability versus $\ln$ of failure times t_f for any particular constant applied stress σ_a :

$$\ln \frac{1}{P_p(t_f)} = \left[(t_f \sigma_a^n + t_p \sigma_p^n)^{m_s} - (t_p \sigma_p^n)^{m_s} \right] \frac{L}{\beta^{m_s}} \quad (12.1.14)$$

Determine parameters m_s and β from the characteristics of the plot.

- Obtain the best-fit straight line to the $\ln$ of failure times versus the $\ln$ of applied stresses:

$$\log t_f(\sigma_a) \approx \log t_f(1) - n \log \sigma_a \quad (8.1.4)$$

Measure the static stress-corrosion susceptibility parameter as the negative slope $-n$ of this line. The term $t_f(1)$ is the "intercept" of this line on the ordinate axis, that is, the value of failure time where the applied stress is unity. (This value will depend on the units used, and may require a straight-line extrapolation beyond the data points. It does not have the dimension of time.)

5.2.3 Fatigue dynamique

La CEI 60793-1-31¹ décrit la façon de mesurer la distribution de la résistance des fibres optiques à la fois sur des longueurs petites et sur de grandes longueurs.

- Obtenir la courbe de Weibull dynamique de probabilité graduée en fonction du $\ln$ des contraintes de défaillance σ_f pour un taux donné de contrainte appliquée constante $\dot{\sigma}_a$:

$$\ln \frac{1}{P_p(\sigma_f)} = \left\{ \left[\frac{\sigma_f^{n+1}}{(n+1)\dot{\sigma}_a} + \sigma_p^n t_p \right]^{\frac{m_d}{n+1}} - (\sigma_p^n t_p)^{\frac{m_d}{n+1}} \right\} \frac{L}{\beta^{\frac{m_d}{n+1}}} \quad (12.1.15)$$

Déterminer les paramètres m_d et β à partir des caractéristiques de la courbe.

- Obtenir la ligne droite la mieux ajustée au $\ln$ des contraintes de défaillance en fonction du $\ln$ des taux de contrainte appliquée:

$$\log \sigma_f(\dot{\sigma}_a) \approx \log \sigma_f(1) + \frac{\log \dot{\sigma}_a}{n+1} \quad (8.2.5)$$

Mesurer le paramètre de susceptibilité à la corrosion sous contrainte dynamique à partir de la pente $\frac{1}{n+1}$ de cette ligne.

Le terme $\sigma_f(1)$ représente «l'intersection» de cette ligne sur l'axe de l'ordonnée, c'est-à-dire la valeur de contrainte de défaillance lorsque le taux de contrainte appliquée est de l'ordre de l'unité. (Cette valeur dépendra des unités utilisées, et peut requérir une extrapolation linéaire au-delà des points de données. Elle n'a pas la dimension d'une contrainte.)

5.3 Paramètres de la région de faible résistance

Le présent paragraphe présente la façon de mesurer la distribution de résistance avec une probabilité suffisamment faible pour représenter la distribution des résistances à la défaillance près du niveau de contrainte de l'essai de sélection pour le deuxième mode de la distribution de Weibull (illustré en tant que région extrinsèque dans la figure 14). Normalement, la population de fibres a été soumise à un essai de sélection comme indiqué à l'article 9.

NOTE Ces pratiques sont utilisées uniquement pour caractériser les fibres et non pour établir des spécifications.

5.3.1 Essai de sélection sous contrainte variable

Dans cette méthode (présentée brièvement en 9.4) une longueur totale de fibre est soumise à une contrainte de sélection donnée, une autre longueur à une contrainte de sélection plus élevée, et ainsi de suite sur plusieurs niveaux d'augmentation de la contrainte de sélection. La longueur de survie moyenne L_p (ou nombre de défaillances N_p par unité de longueur) est calculée pour chaque longueur et pour chaque niveau de contrainte. Ceci s'apparente à un essai de fatigue statique où la contrainte de défaillance (la contrainte de sélection σ_p) varie. Néanmoins, le temps de défaillance n'excède pas le temps de sélection fixé t_p . Les valeurs n sont obtenues au moyen des mesures de fatigue indiquées en 5.2.

¹ CEI 60793-1-31:2001, *Fibres optiques – Partie 1-31: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Résistance à la traction*

5.2.3 Dynamic fatigue

IEC 60793-1-31¹ describes how to measure both short-length and long-length strength distributions of optical fibres.

- Obtain the dynamic Weibull plot of scaled probability versus $\ln$ of failure stresses σ_f for any particular constant applied stress rate $\dot{\sigma}_a$:

$$\ln \frac{1}{P_p(\sigma_f)} = \left\{ \left[\frac{\sigma_f^{n+1}}{(n+1)\dot{\sigma}_a} + \sigma_p^n t_p \right]^{\frac{m_d}{n+1}} - (\sigma_p^n t_p)^{\frac{m_d}{n+1}} \right\} \frac{L}{\beta^{\frac{m_d}{n+1}}} \quad (12.1.15)$$

Determine parameters m_d and β from the characteristics of the plot.

- Obtain the best-fit straight line to the $\ln$ of failure stresses versus the $\ln$ of applied stress rates:

$$\log \sigma_f(\dot{\sigma}_a) \approx \log \sigma_f(1) + \frac{\log \dot{\sigma}_a}{n+1} \quad (8.2.5)$$

Measure the dynamic stress-corrosion susceptibility parameter from the slope $\frac{1}{n+1}$ of this line.

The term $\sigma_f(1)$ is the "intercept" of this line on the ordinate axis, that is, the value of failure stress where the applied stress rate is unity. (This value will depend on the units used, and may require a straight-line extrapolation beyond the data points. It does not have the dimension of stress.)

5.3 Parameters for the low-strength region

This subclause describes the way to measure the strength distribution at sufficiently low probability to represent the distribution of failure strengths near the proof test stress level for the second mode of the Weibull distribution (shown as the extrinsic region in figure 14). Normally, the fibre population has been proof tested once according to clause 9.

NOTE These implementations are used only for characterization and not for specification.

5.3.1 Variable proof test stress

This method (briefly mentioned in 9.4) subjects a full length of fibre to a certain proof test stress, another length to a higher proof test stress, and so on for several increasing levels of proof test stress. The mean survival length L_p (or number of breaks N_p per unit length) is counted for each length and stress level. This resembles a static fatigue test in which the failure stress (the proof test stress σ_p) varies. However, the failure time does not exceed the fixed proof time t_p . The n -values are obtained by the fatigue measurements of 5.2.

¹ IEC 60793-1-31:2001, *Optical fibres – Part 1-31: Measurement methods and test procedures – Tensile strength*

Premièrement, il faut considérer le cas où il n'y aurait eu aucun essai de sélection initial en usine. A partir des équations (12.1.11) et (12.1.13) on obtient

$$\ln L_p + m_s(n \ln \sigma_p + \ln t_p - \ln \beta) = 0 \quad (5.3.1)$$

ainsi une courbe logarithmique indiquant la relation entre la longueur de survie moyenne et la contrainte de sélection, courbe qui devrait être proche d'une ligne droite.

La pente est $-nm_s$, alors que la contrainte et la longueur «intersection» sont $\frac{1}{n}(\ln \beta - \ln t_p)$ et $m_s(\ln t_p - \ln \beta)$, respectivement.

Dans la référence [11], des fibres avec une gaine de 400 μm et des longueurs initiales de 10 km à 15 km ont été utilisées, avec cinq allongements de sélection différents compris entre 0,8 % et 3,5 %. Il n'y a pas eu d'autres essai de sélection initial.

L'équation (5.3.1) est équivalente aux équations (18) à (20) de la référence [11] où $C = \beta^{-m_s}$.

Avec une durée t_d de 1 s, on obtient $nm_s = 2,07$, si bien qu'avec $n = 20$, on obtient $m_s = 0,1035$.

Egalement, $m_s \ln t_p + \ln C = -2,09$, d'où $\beta^{m_s} = 8,085 \text{ GPa}^{nm_s} \cdot \text{s}^{m_s} \cdot \text{km}$.

Plus fréquemment, un essai de sélection initial est effectuée en usine. Si la seconde contrainte de sélection est supérieure de façon significative à la première, alors l'équation (5.3.1) peut être encore utilisée.

Dans la référence [12], le niveau de la contrainte de sélection en usine n'était pas précisé. Une longueur minimale d'échantillon de 10 km ou 20 km a été utilisée, et les échantillons ont été soumis chacun à un niveau de contrainte choisi parmi cinq niveaux de contrainte de sélection compris entre 1 GPa et 4 GPa. La vitesse de l'essai de sélection a été réduite afin de minimiser la casse durant la phase d'accélération de démarrage. Donc, la durée t_d a été normalisée à 1 s en utilisant $n = 23$. Les probabilités de défaillance F par mètre ont été calculées pour chaque contrainte et ont été tracées pour rapprocher la ligne droite de la forme

$$\ln\left(\frac{1}{1-F}\right) = M \ln \sigma_p + \ln K \quad (5.3.2)$$

Avec un autre «ln» du côté gauche (apparemment manquant), ceci est équivalent à l'équation (10.3.2) relative à la fatigue statique (en ne prenant pas en compte l'essai de sélection initial) si

$$M \equiv nm_s \text{ et } K \equiv \left(\frac{t_d}{\beta}\right)^{m_s} \quad (5.3.3)$$

A partir de ceci, il a été possible de déterminer que $M = 1,69$,

ce qui donne $m_s = 0,0735$, et $K = 0,000418$, donc $\beta^{m_s} = 2,392 \text{ GPa}^{nm_s} \cdot \text{s}^{m_s} \cdot \text{km}$.

First consider the case in which there is no initial proof test at manufacture. From equations (12.1.11) and (12.1.13) one has

$$\ln L_p + m_s(n \ln \sigma_p + \ln t_p - \ln \beta) = 0 \quad (5.3.1)$$

so a logarithmic plot of mean survival length versus proof test stress should be close to a straight line. The slope is $-nm_s$, while the stress and length "intercepts" are $\frac{1}{n}(\ln \beta - \ln t_p)$ and $m_s(\ln t_p - \ln \beta)$, respectively.

In reference [11], fibres with a 400 μm jacket and initial lengths of 10 km to 15 km were used, with five proof strains of 0,8 % to 3,5 %. There was no other initial proof test. Equation (5.3.1) is equivalent to equations (18) to (20) of reference [11] with $C = \beta^{-m_s}$. With a duration time t_d of 1 s, it was found that $nm_s = 2,07$, so that with $n = 20$, one has $m_s = 0,1035$. Also, $m_s \ln t_p + \ln C = -2,09$, so that $\beta^{m_s} = 8,085 \text{ GPa}^{nm_s} \cdot \text{s}^{m_s} \cdot \text{km}$.

More common is the case in which there is an initial proof test at manufacture. If the second proof test stress is significantly above the first, then equation (5.3.1) can still be used.

In reference [12], the proof test stress level at manufacture was not stated. A minimum sample length of 10 km or 20 km was used, and each sample was subjected to a different one of five proof test stress levels between 1 GPa and 4 GPa. The proof test speed was reduced to minimize breakage during the start-up acceleration period, so the duration time t_d was normalized to 1 s using $n = 23$. The failure probabilities F per meter were calculated for each stress and plotted to fit the straight line of the form

$$\ln\left(\frac{1}{1-F}\right) = M \ln \sigma_p + \ln K \quad (5.3.2)$$

With another "ln" on the left (apparently missing), this is equivalent to equation (10.3.2) for static fatigue (ignoring the initial proof testing) if

$$M \equiv nm_s \text{ and } K \equiv \left(\frac{t_d}{\beta}\right)^{m_s} \quad (5.3.3)$$

From this it was determined that $M = 1,69$, so we find $m_s = 0,0735$, and $K = 0,000418$, so that $\beta^{m_s} = 2,392 \text{ GPa}^{nm_s} \cdot \text{s}^{m_s} \cdot \text{km}$.

5.3.2 Fatigue dynamique

Il s'agit d'une forme d'essai dynamique avec élimination, comme cela est mentionné en 8.2.2 et avec plus de détails du dispositif dans la référence [5].

Une éprouvette est constituée d'une unique longueur de fibre en essai L_0 . (Il est recommandé d'utiliser une longueur en essai L_0 supérieure à 1 m, comprise par exemple entre 10 m et 20 m.) Un échantillon est un groupe d'éprouvettes d'une population donnée de fibres.

Chaque éprouvette est soumise à une contrainte de défaillance σ_f , ou, avec élimination, à une contrainte maximale (n'entraînant pas de défaillance) $\sigma_{\max}$ (par exemple, 2,4 GPa, déformation d'environ 3,2 %, à partir de l'équation (7.4.2)).

La vitesse de déformation recommandée $\dot{\sigma}_a$ est rapide (par exemple, supérieure à 200 %/min, environ 2,6 GPa/s, selon l'équation (7.4.1)).

La taille d'échantillon devrait être assez grande pour fournir une représentation adéquate du deuxième mode de Weibull (par exemple, de façon que 1 km de l'ensemble des éprouvettes subisse une défaillance).

Les données suivantes sont enregistrées:

- le nombre total d'éprouvettes mises à l'essai: N , qu'une défaillance se soit produite ou pas;
- les valeurs de contrainte de défaillance des éprouvettes qui ont subi une défaillance: σ_{fi} en GPa. Ici i représente l'ordre hiérarchique, établi par ordre croissant de contrainte de défaillance;
- le taux de contrainte (converti à partir de la vitesse de déformation): $\dot{\sigma}_a$ en GPa/s;
- la longueur en essai des éprouvettes: L_0 en km;

Une courbe de Weibull telle que celle illustrée dans la figure 1 peut également être produite (sans les ajustements de courbe). Les points sont des mesures obtenues pour des valeurs comprises entre 0,8 GPa et 2,4 GPa, sur une fibre optique en verre de silice à revêtement d'acrylate, avec un diamètre de gaine de 125 μm .

Calcul des paramètres de Weibull

Ici, les données de la mesure sont analysées. Selon l'équation (10.1.6), l'échelle d'ordonnée de la probabilité cumulative de Weibull se présente sous la forme

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \right]$$

où $F = 1 - P$ représente la probabilité de défaillance cumulative.

A partir de ceci, calculer

$$w_i = \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{i}{N+1} \right) \right] \quad (5.3.4)$$

5.3.2 Dynamic fatigue

This is a form of dynamic testing with censoring, as mentioned in 8.2.2, and with more details on the apparatus given in reference [5].

A specimen is a single gauge length L_0 of fibre. (A recommended gauge length L_0 is longer than 1 m; for example, 10 m to 20 m.) A sample is a group of specimens from a given population of fibres.

Each specimen is loaded to a failure stress σ_f , or, with censoring, to a (non-failing) maximum stress $\sigma_{\max}$ (for example, 2,4 GPa, about 3,2 % strain from equation (7.4.2)). The recommended strain rate $\dot{\sigma}_a$ is fast (for example, greater than 200 %/min, about 2,6 GPa/s, from equation (7.4.1)). The sample size should be large enough to provide an adequate representation of the second Weibull mode (for example, so that 1 km of the total specimens fail).

The following data are recorded:

- the total number of specimens tested: N , whether or not failure occurred;
- the failure stress values of those specimens that failed: σ_{fi} in GPa. Here i is the rank order, sorted by increasing failure stress.
- the stress rate (converted from strain rate): $\dot{\sigma}_a$ in GPa/s.
- the gauge length of the specimens: L_0 in km.

A Weibull plot in the form of figure 1 may also be presented (without the curve fits). The points are measurements from about 0,8 GPa to 2,4 GPa, for an acrylate-coated fused silica fibre with a cladding diameter of 125 μm .

Calculation of Weibull parameters

Here the data of the measurement is analysed. According to equation (10.1.6), the Weibull cumulative probability ordinate scale is of the form

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \right],$$

where $F = 1 - P$ is the cumulative failure probability.

Hence compute

$$w_i = \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{i}{N+1} \right) \right] \quad (5.3.4)$$

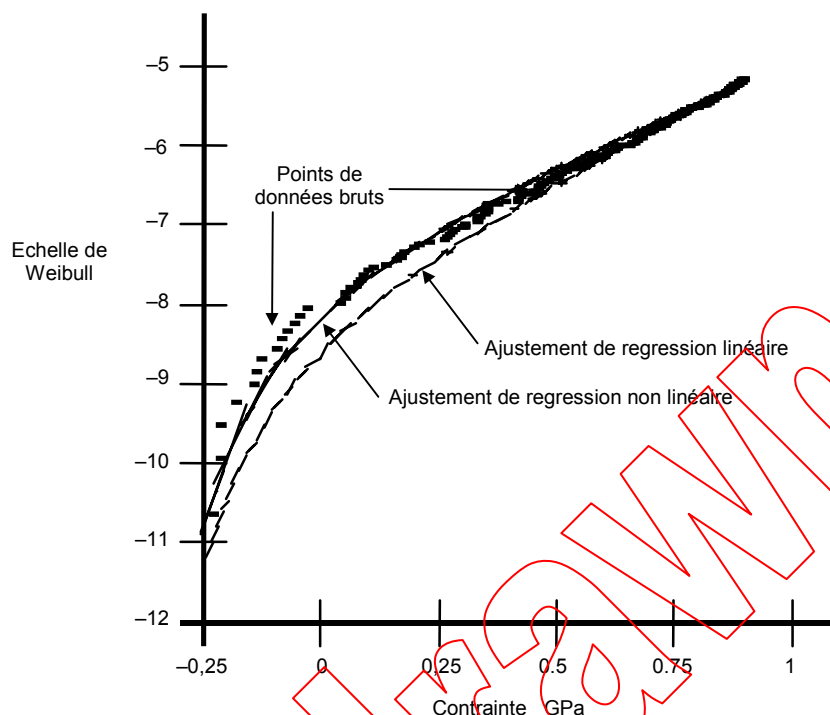


Figure 1 – Courbe de Weibull de fatigue dynamique près du niveau de contrainte de sélection à la limite conventionnelle de déformation

Mettre sous forme exponentielle et utiliser une forme modifiée de l'équation (10.7.2):

$$\exp w_i = \frac{\sigma_{fi}^{m_d} L_0}{[\dot{\sigma}_a (n+1)\beta]^{m_d}} \times \left\{ \left[1 + \frac{\dot{\sigma}_a (n+1)\sigma_p^n t_p}{\sigma_{fi}^{n+1}} \right]^{\frac{m_d}{n+1}} - \left[\frac{\dot{\sigma}_a (n+1)\sigma_p^n t_p}{\sigma_{fi}^{n+1}} \right]^{\frac{m_d}{n+1}} \right\} \quad (5.3.5)$$

Ici la longueur L devient la longueur en essai L_0 .

Deux ajustements sont utilisés pour cette équation.

Ajustement de régression linéaire

Pour des contraintes de défaillance élevées, le terme de l'équation (5.3.5) qui est inclus dans les parenthèses $\{ \}$ se rapproche de l'unité. L'équation se rapproche de la forme «linéaire» des équations habituelles (10.4.2) et (10.4.4) sans essai de sélection:

$$w_i = A + m_d \ln \sigma_{fi} \quad (5.3.6)$$

où

$$\ln \beta = \frac{n+1}{m_d} (\ln L_0 - A) - \ln[(n+1)\dot{\sigma}_a] \quad (5.3.7)$$

A partir de là, pour une contrainte de défaillance plus élevée qu'une valeur choisie, trouver m_d et A tels que l'erreur des moindres carrés de w_i soit minimisée.

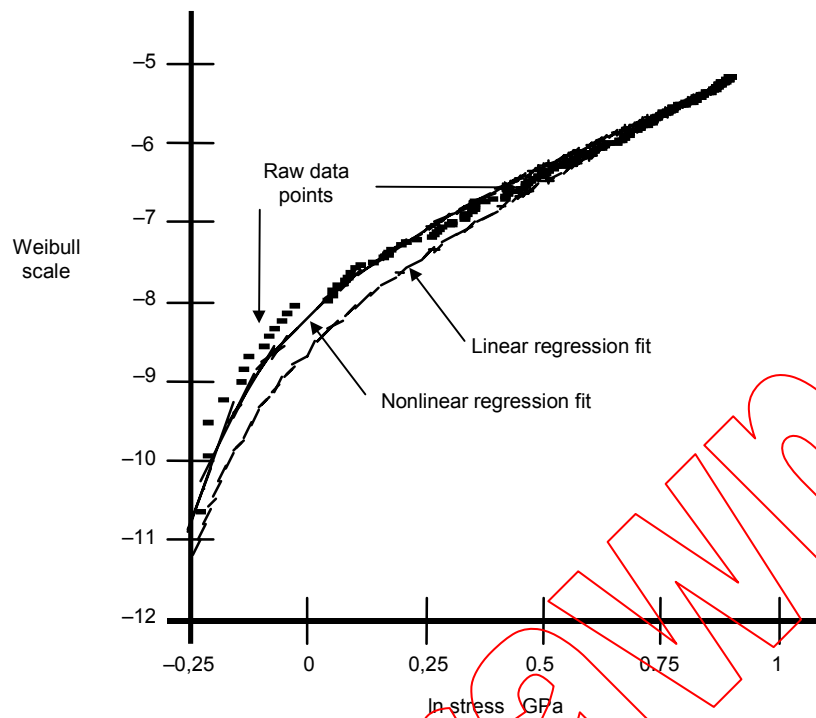


Figure 1 – Weibull dynamic fatigue plot near the proofstress level

Exponentiate this and use a rearranged form of equation (10.7.2):

$$\exp w_i = \frac{\sigma_{fi}^{m_d} L_0}{[\dot{\sigma}_a (n+1)\beta]^{m_d}} \times \left\{ \left[1 + \frac{\dot{\sigma}_a (n+1) \sigma_p^n t_p}{\sigma_{fi}^{n+1}} \right]^{\frac{m_d}{n+1}} - \left[\frac{\dot{\sigma}_a (n+1) \sigma_p^n t_p}{\sigma_{fi}^{n+1}} \right]^{\frac{m_d}{n+1}} \right\} \quad (5.3.5)$$

Here the length L becomes the testing gauge length L_0 .

Two fits are used on this equation.

Linear regression fit

For large failure stresses, the term in equation (5.3.5) that is enclosed in curled brackets $\{ \}$ approaches one. The equation approaches the "linear" form of the usual equations (10.4.2) and (10.4.4) without prooftesting:

$$w_i = A + m_d \ln \sigma_{fi} \quad (5.3.6)$$

where

$$\ln \beta = \frac{n+1}{m_d} (\ln L_0 - A) - \ln[(n+1)\dot{\sigma}_a] \quad (5.3.7)$$

Hence for failure stress greater than some selected value, find m_d and A such that the least squares error of w_i is minimized.

Cette procédure produit l'ajustement de régression linéaire illustré dans la figure 1. Clairement, il serait plus intéressant d'avoir un meilleur ajustement sur le côté gauche de cet ensemble de données, où les valeurs sont plus proches des applications intéressantes.

Ajustement de régression non linéaire

Cet ajustement utilise les données des contraintes plus faibles où la courbure est apparente. Pour une valeur donnée de m_d , une valeur de β est calculée pour chaque contrainte de défaillance, et une valeur de la zone médiane des données intéressantes produit une courbe qui traverse cette zone. Le résultat produit une somme des carrés des erreurs résiduelles pour la courbe entière, et m_d est modifié pour rendre minimale la somme. Les phases sont indiquées dans la liste ci-dessous.

- Définir un éventail de données servant de base pour l'ajustement. Cet éventail est ici constitué en se servant des valeurs de $\ln \sigma_{fi}$ comprises entre 0 et 0,5.
- Choisir une valeur de m_d .
- Calculer $\ln \beta_i$ pour chaque contrainte de défaillance dans la région définie en utilisant l'équation (5.3.5).
- Ajuster $\ln \beta$ avec la médiane des valeurs $\ln \beta_i$ calculées.
- Calculer w_{out_i} en utilisant l'équation (5.3.5) et la valeur β indiquée ci-dessus.
- Calculer les carrés des résidus $(w_i - w_{out_i})^2$, puis calculer la somme des carrés des résidus.
- Modifier m_d comme dans la deuxième phase, et reprendre les phases restantes pour minimiser la somme.

Cette procédure produit l'ajustement de régression non linéaire de la figure 5.1.

5.4 Valeurs numériques mesurées

Dans ce paragraphe, des valeurs expérimentales sont obtenues en se servant des mesures indiquées en 5.3.2. Elles vont être utilisées dans les calculs de l'article 6.

En 5.2.1, le paramètre composé d'essai de sélection est $\sigma_p^n t_p = 8,8849 \times 10^{-5} \text{ GPa}^n \cdot \text{s}$, avec une charge nominale unitaire $\sigma_p = 0,69 \text{ GPa}$ ($\ln \sigma_p = -0,37$ dans la figure 1). A partir de 5.2.3 $n = 20$ est obtenu, et en 5.3.2, le taux de contrainte est $\dot{\sigma}_a = 4,59477 \text{ GPa/s}$ pour une longueur en essai $L_0 = 20 \text{ m}$. L'ajustement non linéaire donne la valeur $m_d = 2,359$ et $\ln \beta = 25,499$.

Noter que β a l'unité $\text{GPa}^n \cdot \text{s} \cdot \text{km}^{\frac{n+1}{m_d}}$.

On aura également besoin dans le paragraphe suivant de la valeur statique

$$m_s = \frac{m_d}{n+1} \quad (10.4.8)$$

qui d'après le paragraphe précédent est égale à: 0,11233.

Noter également que β a maintenant l'unité $\text{GPa}^n \cdot \text{s} \cdot \text{km}^{\frac{1}{m_s}}$, et

que $\beta^{m_s} = 17,538 \text{ GPa}^{nm_s} \cdot \text{s}^{m_s} \cdot \text{km}$.

Les deux valeurs s'accordent de façon raisonnable avec celles indiquées en 5.3.1.

This procedure produces the linear regression fit in figure 1. Clearly, it would be better to have a closer fit at the left side of this data set, where the values are closer to the applications of interest.

Non-linear regression fit

This uses lower-stress data, where the curvature is apparent. Given a value of m_d , a value of β is computed for each failure stress, and a value from the middle of the data of interest produces a curve that goes through that area. The result produces a sum of squared errors for the entire curve, and m_d is varied to minimize the sum. The steps are indicated below.

- Define a range of data in which the fit is to be forced. Here it is constructed using $\ln \sigma_{fi}$ values between 0 and 0,5.
- Select a value of m_d .
- Compute $\ln \beta_i$ for each failure stress in the defined region using equation (5.3.5).
- Set $\ln \beta$ equal to the median of the computed $\ln \beta_i$ values.
- Compute $wout_i$ using equation (5.3.5) and the above value of β .
- Compute the squared errors $(w_i - wout_i)^2$, and then compute the sum of squared errors.
- Vary m_d as in the second step, and repeat the remaining steps to minimize the sum.

The procedure produces the non-linear regression fit in figure 1.

5.4 Measured numerical values

In this subclause, experimental values resulting from the measurements of 5.3.2 are obtained. They will be used in the calculations of clause 6.

In 5.2.1, the composite proof test parameter is $\sigma_{p tp}^n = 8,8849 \times 10^{-5} \text{ GPa}^n \cdot \text{s}$, with a nominal proof stress of $\sigma_p = 0,69 \text{ GPa}$ ($\ln \sigma_p = -0,37$ in figure 1). From 5.2.3 $n = 20$ is obtained, and in 5.3.2 the stress rate is $\sigma_d = 4,59477 \text{ GPa/s}$ for a gauge length $L_0 = 20 \text{ m}$. The non-linear fit gives

the values $m_d = 2,359$ and $\ln \beta = 25,499$. Note that β has the unit $\text{GPa}^n \cdot \text{s} \cdot \text{km}^{\frac{n+1}{m_d}}$.

The static value will also be needed in the following subclause

$$m_s = \frac{m_d}{n+1} \quad (10.4.8)$$

which according to the above subclause equals 0,11233. Note too that β now has the unit $\text{GPa}^n \cdot \text{s} \cdot \text{km}^{\frac{1}{m_s}}$ and that $\beta^{m_s} = 17,538 \text{ GPa}^{nm_s} \cdot \text{s}^{m_s} \cdot \text{km}$.

The two values are in reasonable agreement with those of 5.3.1.

6 Exemples de calculs numériques

Les valeurs numériques obtenues expérimentalement en 5.4 sont utilisées pour les calculs décrits ci-dessous. Les résultats seront conservateurs étant donné que la valeur B explicite est négligée; des taux de défaillances plus faibles et des durées de vie plus longues seraient obtenus si cette valeur était incluse dans les calculs. (Le degré d'amélioration augmente en fonction de l'augmentation de B .) Les résultats des calculs peuvent varier considérablement en fonction du choix des valeurs des paramètres. Ces valeurs sont liées les unes aux autres, et une modification de l'un des paramètres affectera les valeurs des autres paramètres. Dans l'idéal, les valeurs des paramètres devraient être obtenues en se servant de données expérimentales.

Si la probabilité de défaillance $F = 1 - P$ est de 10^{-3} ou inférieure (en général la région qui présente un intérêt pratique), le terme $\ln \frac{1}{P}$ dans les formules données ci-dessous peut être remplacé par F avec une exactitude de 0,5 % ou meilleure, mais cela n'a pas été fait pour les résultats numériques indiqués ci-dessous.

Etablir
$$t_f(\text{sec}) = 31.577.600 t_y(\text{yr}) \quad (11.4.5)$$

Enfin, la notation «5,45 E-10» signifie «5,45 x 10⁻¹⁰».

6.1 Calculs du taux de défaillance

Calculer les taux de défaillance λ qui seraient obtenus à différents niveaux de contrainte statique σ_a en fonction du temps de service t_y en années.

6.1.1 Formules de taux de défaillances dans un temps donné (DTD)

Le taux de défaillance instantané est

$$\lambda_i(t_f) = 3,6 \times 10^{12} m_s \left(\frac{\sigma_a}{\beta} \right)^{m_s} \left[t_f + t_p \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_a} \right)^n \right]^{m_s-1} \quad (12.2.2)$$

Le taux de défaillance moyenné est

$$\lambda_a(t_f) = \frac{3,6 \times 10^{12}}{t_f L} \left\langle 1 - \exp \left[\left(t_p \sigma_p^n \right)^{m_s} - \left(t_f \sigma_a^n + t_p \sigma_p^n \right)^{m_s} \right] \frac{L}{\beta^{m_s}} \right\rangle \quad (12.2.3)$$

6.1.2 Grandes longueurs sous traction

Utiliser différentes contraintes appliquées en tant que fraction de la contrainte de sélection nominale dans les équations présentées ci-dessus, pour une longueur de fibre $L = 1$ km. En fonction du temps sur une durée de 50 ans, ces valeurs donnent les tracés de taux de défaillance instantanés et moyennés des figures 2 et 3, respectivement. Les valeurs correspondantes sont indiquées dans le tableau 1. (Le temps zéro est évité à cause de la singularité qu'y présente le taux de défaillance moyenné.)

Deux points méritent d'être signalés. Premièrement, tous les taux de défaillance sont presque constants au cours du temps, spécialement pour les contraintes plus faibles. Ceci indique une augmentation quasiment linéaire des défaillances cumulées totales au cours du temps. Deuxièmement, et en conséquence, il y a peu de différence pratique entre les valeurs des taux de défaillance instantanés et moyennés.

6 Examples of numerical calculations

The numerical values experimentally obtained in 5.4 are used in the calculations below. The results will be conservative since the explicit B -value is neglected; lower failure rates and longer lifetimes would be obtained if this value were included. (The degree of improvement increases as B increases.) The results of the calculations can be quite sensitive to the choice of parameter values. These values are related to each other, and a change in one parameter will affect the values of other parameters. Ideally, the parameter values should be obtained on the basis of experimentation.

If the failure probability $F = 1 - P$ is 10^{-3} or less (generally the region of practical interest), the term $\ln \frac{1}{P}$ in the formulae below may be replaced by F to an accuracy of 0,5 % or better, but this has not been done in the numerical results given here. Set

$$t_f(\text{sec}) = 31\,577\,600\, t_y(\text{yr}) \quad (11.4.5)$$

Finally, the notation "5,45 E-10" means " $5,45 \times 10^{-10}$ ".

6.1 Failure rate calculations

Compute the failure rates λ that would occur at various static stress levels σ_a as a function of service time t_y in years.

6.1.1 FIT rate formulas

The instantaneous failure rate is

$$\lambda_i(t_f) = 3,6 \times 10^{12} m_s \left(\frac{\sigma_a}{\beta} \right)^{m_s} \left[t_f + t_p \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_a} \right)^n \right]^{m_s-1} \quad (12.2.2)$$

The averaged failure rate is

$$\lambda_a(t_f) = \frac{3,6 \times 10^{12}}{t_f L} \left\langle 1 - \exp \left\{ \left[\left(t_p \sigma_p^n \right)^{m_s} - \left(t_f \sigma_a^n + t_p \sigma_p^n \right)^{m_s} \right] \frac{L}{\beta^{m_s}} \right\} \right\rangle \quad (12.2.3)$$

6.1.2 Long lengths in tension

Use several applied stresses, as a fraction of the nominal proofstress, in the above equations for a fibre length $L = 1$ km. As a function of time out to 50 years, these give the instantaneous and averaged failure rate plots of figures 2 and 3, respectively. The corresponding values are given in table 1. (Zero time is avoided because of the singularity shown there of the averaged failure rate.)

Two points are worth noting. First, all the failure rates are almost constant over time, especially at the lower stresses. This indicates an almost linear increase in total cumulative failures with time. Secondly, and because of this, there is little practical difference in the values between the instantaneous and averaged failure rates.

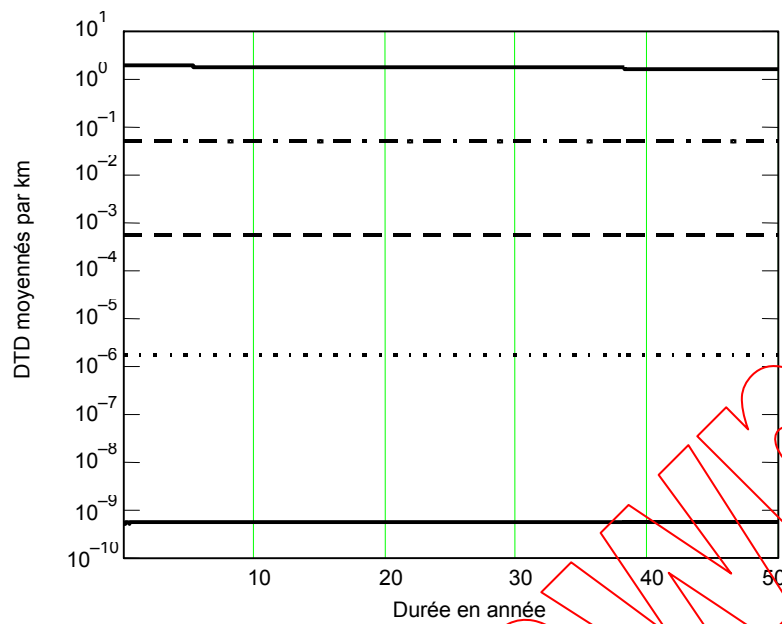


Figure 2 – Taux DTD instantanés par km de fibre en fonction du temps pour des pourcentages contrainte appliquée / contrainte de sélection (de bas en haut) 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %

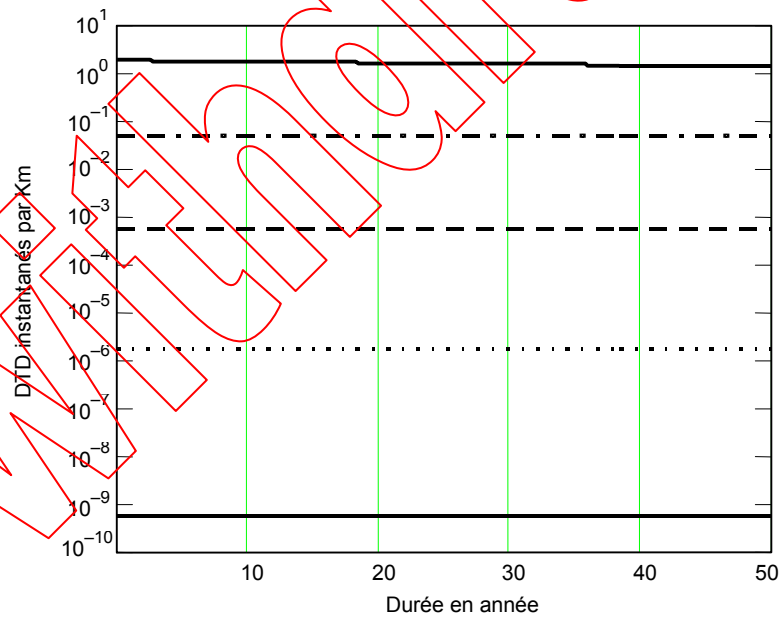


Figure 3 – Taux DTD moyenné par km de fibre en fonction du temps pour des pourcentages contrainte appliquée / contrainte de sélection (de bas en haut) 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %

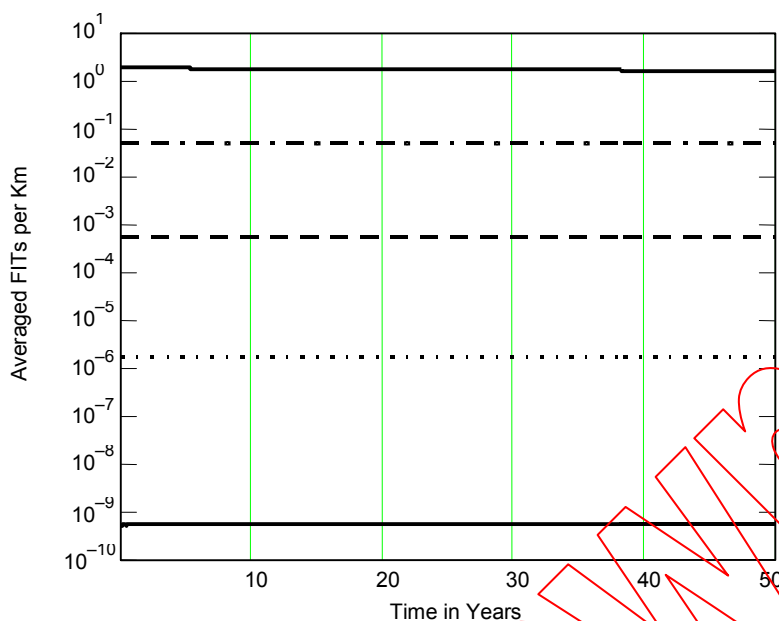


Figure 2 – Instantaneous FIT rates per fibre km versus time for applied stress/proofter stress percentages (bottom to top): 10, 15, 20, 25, 30 %

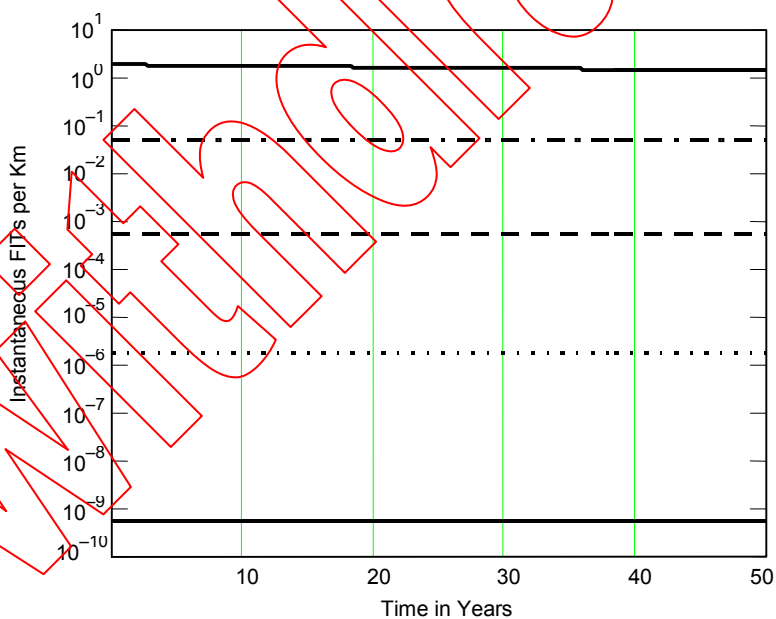


Figure 3 – Averaged FIT rates per fibre km versus time for applied stress/proofter stress percentages (bottom to top): 10, 15, 20, 25, 30 %

Tableau 1 – Taux DTD des figures 2 et 3 pour différents temps

Contrainte appliquée en % de contrainte de sélection	DTD/km instantané						DTD/km moyenné					
	1 an	10 ans	20 ans	30 ans	40 ans	50 ans	1 an	10 ans	20 ans	30 ans	40 ans	50 ans
10	5,45 E-10	5,45 E-10	5,45 E-10	5,45 E-10	5,45 E-10	5,45 E-10	5,45 E-10	5,45 E-10	5,45 E-10	5,45 E-10	5,45 E-10	5,45 E-10
15	1,81 E-6	1,81 E-6	1,81 E-6	1,81 E-6	1,81 E-6	1,81 E-6	1,81 E-6	1,81 E-6	1,81 E-6	1,81 E-6	1,81 E-6	1,81 E-6
20	5,71 E-4	5,71 E-4	5,71 E-4	5,71 E-4	5,71 E-4	5,71 E-4	5,71 E-4	5,71 E-4	5,71 E-4	5,71 E-4	5,71 E-4	5,71 E-4
25	4,95 E-2	4,95 E-2	4,95 E-2	4,93 E-2	4,92 E-2	4,91 E-2	4,95 E-2	4,95 E-2	4,94 E-2	4,94 E-2	4,94 E-2	4,93 E-2
30	1,89 E0	1,78 E0	1,68 E0	1,59 E0	1,51 E0	1,44 E0	1,89 E0	1,84 E0	1,78 E0	1,73 E0	1,69 E0	1,64 E0

6.1.3 Petites longueurs sous courbure uniforme

En utilisant les équations (10.2.6) et (10.2.7), réduire la longueur de courbure effective L_B par le facteur flexion-longueur

$$\frac{L}{L_B} = \frac{0,4}{\sqrt{nm_s}} \quad (6.1.1)$$

qui est ici égal à 0,26686. Selon l'équation non linéaire (10.2.3), la contrainte appliquée maximale sur la surface extérieure de la fibre sous courbure est

$$\sigma_a(D) = \frac{70,33}{8D} \left(1 + \frac{9}{32D} \right) \quad (6.1.2)$$

où D représente le diamètre de courbure en mm. Utiliser plusieurs diamètres de courbure dans les équations de 6.1.1 pour une longueur de fibre courbée de 1 m. De plus, les valeurs souhaitées de DTD/m sont 10^{-3} fois DTD/km. En fonction du temps sur une période de 50 ans, ces valeurs donnent les courbes des taux de défaillance instantanés et moyennés des figures 2 et 3, respectivement. Les valeurs correspondantes sont données dans le tableau 2.

Le nombre indiqué dans la colonne «% de contrainte de sélection» représente le pourcentage de la contrainte de sélection de 0,69 GPa auquel est égale la contrainte maximale (sur l'extérieur de la courbure). Par comparaison avec le cas sous traction du paragraphe précédent, dans le cas de ces contraintes plus fortes, on remarque que la constance du taux de défaillance avec le temps n'est plus valable, spécialement sur des temps plus courts. Des différences plus significatives entre les valeurs instantanées et moyennées apparaissent, notamment sur des durées plus courtes et des courbures plus fortes.

Enfin, le tableau 3 donne les résultats obtenus lorsque le terme non linéaire n'est pas inclus dans l'équation (6.1.2). Comme escompté, les taux de défaillance sont plus petits étant donné que la contrainte appliquée est légèrement sous-estimée. De plus, le pourcentage d'erreurs de déviation par rapport aux valeurs plus exactes du tableau 2 augmente avec la diminution du diamètre de courbure et l'augmentation de la contrainte.