

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC  
60793-1-49**

Première édition  
First edition  
2003-03

**Fibres optiques –**

**Partie 1-49:  
Méthodes de mesure et procédures d'essai –  
Retard différentiel de mode**

**Optical fibres –**

**Part 1-49:  
Measurement methods and test procedures –  
Differential mode delay**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC 60793-1-49:2003

## 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](http://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](http://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 remplaçées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- **IEC Just Published**
- **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](mailto: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](http://www.iec.ch))**
- **Catalogue of IEC publications**

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 Online information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- **IEC Just Published**
- **Customer Service Centre**

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

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

Email: [custserv@iec.ch](mailto:custserv@iec.ch)  
Tel: +41 22 919 02 11  
Fax: +41 22 919 03 00

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC  
60793-1-49**

Première édition  
First edition  
2003-03

**Fibres optiques –**

**Partie 1-49:  
Méthodes de mesure et procédures d'essai –  
Retard différentiel de mode**

**Optical fibres –**

**Part 1-49:  
Measurement methods and test procedures –  
Differential mode delay**

© 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](mailto:inmail@iec.ch) Web: [www.iec.ch](http://www.iec.ch)



Commission Electrotechnique Internationale  
International Electrotechnical Commission  
Международная Электротехническая Комиссия

**CODE PRIX  
PRICE CODE**

**Q**

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

## SOMMAIRE

AVANT PROPOS .....	4
1 Domaine d'application.....	8
2 Références normatives .....	8
3 Termes et définitions .....	8
4 Appareillage .....	10
4.1 Source optique .....	10
4.2 Stabilité .....	10
4.3 Système d'injection.....	10
4.4 Système de détection .....	12
4.5 Equipement de calcul .....	14
5 Echantillonnage et échantillons d'essai.....	14
5.1 Echantillon d'essai.....	14
5.2 Faces d'extrémités d'échantillons d'essai .....	14
5.3 Longueur d'échantillon d'essai.....	14
5.4 Emballage de l'échantillon d'essai .....	14
5.5 Positionnement de l'échantillon d'essai.....	14
6 Procédure .....	14
6.1 Régler et mesurer la réponse du système.....	14
6.2 Régler le système de détection.....	16
6.3 Mesurer l'échantillon d'essai.....	16
7 Calculs et interprétation des résultats .....	18
7.1 Retard différentiel de mode (DMD) .....	18
7.2 Normalisation de la longueur .....	18
8 Documentation .....	18
8.1 Informations requises pour chaque mesure.....	18
8.2 Informations nécessairement disponibles.....	20
9 Informations relatives à la spécification .....	20
Annexe A (informative) Comparaison entre cette norme et les recommandations UIT .....	22
Annexe B (normative) Limitation de la largeur spectrale de la source .....	24
Annexe C (informative) Discussion des détails de mesure.....	30
Figure C.1 – Données DMD idéales .....	30
Tableau B.1 – Dispersion attendue la plus élevée pour les fibres disponibles sur le marché de la catégorie A.1.....	28

## CONTENTS

FOREWORD .....	5
1 Scope .....	9
2 Normative references .....	9
3 Definitions .....	9
4 Apparatus .....	9
4.1 Optical source .....	11
4.2 Stability .....	11
4.3 Launch system .....	11
4.4 Detection system .....	13
4.5 Computational equipment .....	15
5 Sampling and specimens .....	15
5.1 Test sample .....	15
5.2 Specimen endfaces .....	15
5.3 Specimen length .....	15
5.4 Specimen packaging .....	15
5.5 Specimen positioning .....	15
6 Procedure .....	15
6.1 Adjust and measure system response .....	15
6.2 Adjust detection system .....	17
6.3 Measure the test sample .....	17
7 Calculations and interpretation of results .....	19
7.1 Differential Mode Delay (DMD) .....	19
7.2 Length normalization .....	19
8 Documentation .....	19
8.1 Report the following information for each test .....	19
8.2 Information to be available upon request .....	21
9 Specification information .....	21
Annex A (informative) Comparison between this Standard and ITU recommendations .....	23
Annex B (normative) Source spectral width limitation .....	25
Annex C (informative) Discussion of measurement details .....	31
Bibliography .....	35
Figure C.1 – Idealized DMD data .....	31
Table B.1 – Highest expected dispersion for commercially available category A.1 fibres .....	29

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## FIBRES OPTIQUES -

Partie 1-49: Méthodes de mesure et procédures d'essai –  
Retard différentiel de mode

## AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI 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 de la présente norme internationale 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 Norme internationale CEI 60793-1-49 a été établie par le sous-comité 86A: Fibres et câbles, du comité d'études 86 de la CEI: Fibres optiques.

La présente norme annule et remplace l'IEC/PAS 60793-1-49 publié en 2002. Cette première édition constitue une révision technique.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
86A/842/FDIS	86A/854/RVD

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

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

La présente norme doit être lue conjointement à la CEI 60793-1-1.

La CEI 60793-1-4X comprend les parties suivantes, sous le titre général *Fibres optiques*:

Partie 1-40: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Affaiblissement  
Partie 1-41: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Largeur de bande  
Partie 1-42: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Dispersion chromatique

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

## OPTICAL FIBRES –

Part 1-49: Measurement methods and test procedures –  
Differential mode delay

## 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 International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60793-1-49 has been prepared by subcommittee 86A: Fibres and cables, of IEC technical committee 86: Fibre Optics.

This standard cancels and replaces IEC/PAS 60793-1-49 published in 2002. This first edition constitutes a technical revision.

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

FDIS	Report on voting
86A/842/FDIS	86A/854/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard 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.

This standard is to be read in conjunction with IEC 60793-1-1.

IEC 60793-1-4X consists of the following parts, under the general title *Optical fibres*:

- Part 1-40: Measurement methods and test procedures – Attenuation
- Part 1-41: Measurement methods and test procedures – Bandwidth
- Part 1-42: Measurement methods and test procedures – Chromatic dispersion

Partie 1-43: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Ouverture numérique  
Partie 1-44: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Longueur d'onde de coupure  
Partie 1-45: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Diamètre du champ de mode  
Partie 1-46: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Contrôle des variations du facteur transmission optique  
Partie 1-47: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Pertes dues aux macrocourbures  
Partie 1-48: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Dispersion de mode de polarisation <sup>1)</sup>  
Partie 1-49: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Retard différentiel de mode

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.

Le contenu du corrigendum de mars 2005 a été pris en considération dans cet exemplaire.

1) A publier.

- Part 1-43: Measurement methods and test procedures – Numerical aperture
- Part 1-44: Measurement methods and test procedures – Cut-off wavelength
- Part 1-45: Measurement methods and test procedures – Mode field diameter
- Part 1-46: Measurement methods and test procedures – Monitoring of changes in optical transmittance
- Part 1-47: Measurement methods and test procedures – Macrobending loss
- Part 1-48: Measurement methods and test procedures – Polarization mode dispersion <sup>1)</sup>
- Part 1-49: Measurement methods and test procedures – Differential mode delay

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.

The contents of the corrigendum of March 2005 have been included in this copy.

---

<sup>1)</sup> To be published.

## FIBRES OPTIQUES –

### Partie 1-49: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Retard différentiel de mode

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60793 décrit une méthode de caractérisation de la structure modale d'une fibre multimodale à gradient d'indice. Cette information est utile pour évaluer les performances de largeur de bande d'une fibre lorsqu'elle est utilisée avec des sources lasers.

Avec cette méthode, la sortie d'une fibre qui est unimodale à la longueur d'onde d'essai excite la fibre multimodale en essai. Le point de la sonde balaye la face d'extrémité de la fibre en essai et le temps de propagation de l'impulsion optique est déterminé à des positions de décalage spécifiées. La différence de temps de propagation de l'impulsion optique entre le mode le plus rapide et le mode le plus lent de la fibre en essai est déterminé. L'utilisateur spécifie les limites supérieure et inférieure des positions de décalage radial sur lesquelles la fibre sonde est balayée afin de spécifier les limites désirées de structure modale.

La présente norme s'applique uniquement aux fibres multimodales à cœur en verre à gradient d'indice (catégorie A1). Cette méthode d'essai est généralement utilisée dans les installations de production et de recherche et n'est pas facilement réalisée sur le terrain.

#### 2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60793-1-1, *Fibres optiques – Partie 1: Spécification générique – Section 1: Généralités*

CEI 60793-1-22, *Fibres optiques – Partie 1-22: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Mesure de la longueur*

CEI 60793-1-42, *Fibres optiques – Partie 1-42: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Dispersion chromatique*

CEI 60793-1-45, *Fibres optiques – Partie 1-45: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Diamètre du champ de mode*

#### 3 Termes et définitions

Pour les besoins de la présente partie de la CEI 60793, les définitions suivantes s'appliquent.

##### 3.1

##### limite intérieure

$R_{INNER}$

##### limite extérieure

$R_{OUTER}$

limites des positions de décalage radial sur la face d'extrémité de la fibre en essai balayée par le point de sonde

## OPTICAL FIBRES –

### PART 1-49: Measurement methods and test procedures – Differential mode delay

#### 1 Scope

This part of IEC 60793 describes a method for characterizing the modal structure of a graded-index multimode fibre. This information is useful for assessing the bandwidth performance of a fibre when used with laser sources.

With this method, the output from a fibre that is single-mode at the test wavelength excites the multimode fibre under test. The probe spot is scanned across the endface of the fibre under test, and the optical pulse delay is determined at specified offset positions. The difference in optical pulse delay time between the fastest and slowest modes of the fibre under test is determined. The user specifies the upper and lower limits of radial offset positions over which the probe fibre is scanned in order to specify desired limits of modal structure.

This standard applies only to multimode, graded-index glass-core (category A1) fibres. The test method is commonly used in production and research facilities, but is not easily accomplished in the field.

#### 2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60793-1-1, *Optical fibres – Part 1: Generic specification – Section 1: General*

IEC 60793-1-22, *Optical fibres – Part 1-22: Measurement methods and test procedures – Length measurement*

IEC 60793-1-42, *Optical fibres – Part 1-42: Measurement methods and test procedures – Chromatic dispersion*

IEC 60793-1-45, *Optical fibres – Part 1-45: Measurement methods and test procedures – Mode field diameter*

#### 3 Terms and definitions

For the purposes of this part of IEC 60793, the following definitions apply.

##### 3.1

**inner limit**

$R_{\text{inner}}$

**outer limit**

$R_{\text{outer}}$

limits of radial offset positions on the endface of the fibre under test over which the probe spot is scanned

### 3.2

#### retard différentiel de mode

##### DMD (Differential Mode Delay)

différence évaluée des temps de propagation de l'impulsion optique entre le mode le plus rapide et le mode le plus lent excité pour toutes les positions de décalage radial entre  $R_{\text{INNER}}$  et  $R_{\text{OUTER}}$  inclus

## 4 Appareillage

### 4.1 Source optique

Utiliser une source optique qui introduit des impulsions de courte durée et de largeur spectrale étroite dans la fibre sonde.

L'impulsion optique doit avoir une durée suffisamment courte pour mesurer le temps de propagation différentiel prévu. La durée maximale autorisée pour l'impulsion optique, caractérisée pleine largeur à 25 % de l'amplitude maximale, dépendra à la fois de la valeur de DMD qui est à déterminer et de la longueur d'échantillon. Par exemple, si la limite de DMD désirée par rapport à la longueur est de 0,20 ps/m, dans le cas d'un échantillon d'une longueur de 500 m le DMD à mesurer est de 100 ps et une impulsion de durée inférieure à ~110 ps est nécessaire. Des essais à la même limite de DMD sur une longueur de 10000 m de fibre implique la mesure d'un DMD de 2000 ps et une impulsion d'une largeur de ~2200 ps peut être utilisée. Les limites détaillées sont données en 6.1 et peuvent dépendre de la largeur spectrale de la source.

L'élargissement induit par la dispersion chromatique provenant de la largeur spectrale de la source doit se situer dans les limites indiquées à l'Annexe B. La prescription concernant la largeur spectrale peut être satisfaite soit en utilisant une source spectralement étroite, ou bien en utilisant un filtrage optique approprié soit au niveau de la source soit au niveau de l'extrémité de détection.

La longueur d'onde centrale doit être dans les limites de  $\pm 10$  nm de la longueur d'onde nominale spécifiée.

Un laser titane-saphir à mode bloqué constitue un exemple de source utilisable pour cette application.

### 4.2 Stabilité

Les dispositifs doivent être en mesure de positionner les extrémités d'entrée et de sortie de l'échantillon en essai avec une stabilité et une reproductibilité suffisantes pour satisfaire aux conditions de 4.3 et 4.4.

### 4.3 Système d'injection

La fibre sonde placée entre la source de lumière et l'échantillon en essai doit propager seulement un mode unique à la longueur d'onde de mesure. Le diamètre de champ de mode de la fibre sonde à  $\lambda$  doit être de  $(8,7\lambda - 2,39) \pm 0,5$   $\mu\text{m}$ , où  $\lambda$  est la longueur d'onde de mesure en micromètres et le diamètre de champ de mode est déterminé en utilisant la CEI 60793-1-45. Cette équation produit un diamètre de champ de mode de 5  $\mu\text{m}$  à 850 nm et de 9  $\mu\text{m}$  à 1310 nm, qui correspond aux fibres unimodales disponibles sur le marché.

S'assurer que la sortie de la fibre sonde est unimodale. Une méthode pour réaliser cette action consiste à retirer des modes d'ordre supérieur en enroulant la fibre sonde trois tours autour d'un mandrin de 25 mm de diamètre.

La tâche de sortie de la fibre sonde doit balayer la face d'extrémité de l'échantillon en essai avec une précision de position inférieure ou égale à  $\pm 0,5$   $\mu\text{m}$ .

### 3.2

#### Differential Mode Delay

##### DMD

estimated difference in optical pulse delay time between the fastest and slowest modes excited for all radial offset positions between and including  $R_{\text{INNER}}$  and  $R_{\text{OUTER}}$

## 4 Apparatus

### 4.1 Optical source

Use an optical source that introduces short duration, narrow spectral width pulses into the probe fiber.

The temporal duration of the optical pulse shall be short enough to measure the intended differential delay time. The maximum duration allowed for the optical pulse, characterized as full width at 25 % of maximum amplitude, will depend both on the value of DMD to be determined and the sample length. For example, if the desired length-normalized DMD limit is 0,20 ps/m over a sample of length 500 m, the DMD to be measured is 100 ps, and a pulse of duration less than ~110 ps is needed. Testing to the same DMD limit in a 10 000 m length of fiber requires measuring a DMD of 2 000 ps, and a pulse a wide as ~2 200 ps may be used. Detailed limits are given in 6.1, and may depend on the source spectral width.

Chromatic dispersion induced broadening resulting from source spectral width shall be within the limits indicated in Annex B. The requirement on spectral width may be met either by using a spectrally narrow source, or alternatively by the use of appropriate optical filtering at either the source or detection end.

The centre wavelength shall be within  $\pm 10$  nm of the nominal specified wavelength.

A mode locked titanium-sapphire laser is an example of a source usable for this application.

### 4.2 Stability

Devices shall be available to position the input and output ends of the test specimen with sufficient stability and reproducibility to meet the conditions of 4.3 and 4.4.

### 4.3 Launch system

The probe fibre between the light source and test sample shall propagate only a single mode at the measurement wavelength. The mode field diameter of the probe fibre at  $\lambda$  shall be  $(8,7\lambda - 2,39) \pm 0,5$   $\mu\text{m}$ , where  $\lambda$  is the measurement wavelength in micrometers, and the mode field diameter is determined using IEC 60793-1-45. This equation produces a mode field diameter of 5  $\mu\text{m}$  at 850 nm and 9  $\mu\text{m}$  at 1310 nm, which corresponds to commercially available single-mode fibres.

Ensure that the output of the probe fibre is single-mode. One method to do this is to strip higher order modes by wrapping the probe fibre three turns around a 25 mm diameter mandrel.

The output spot of the probe fibre shall be scanned across the endface of the test sample with a positional accuracy less than or equal to  $\pm 0,5$   $\mu\text{m}$ .

Le faisceau de sortie de la fibre sonde doit être perpendiculaire à la face d'extrémité de l'échantillon en essai dans les limites d'une tolérance angulaire inférieure à 1,0°.

Le système d'injection doit être capable de centrer de manière reproductible la tâche de sortie de la fibre sonde dans les limites de  $\pm 1,0 \mu\text{m}$ .

Dans le cas d'un couplage direct avec l'échantillon en essai, l'espace entre l'extrémité de sortie de la fibre sonde et l'extrémité de l'échantillon en essai ne doit pas être supérieure à 10  $\mu\text{m}$ .

Un système optique en espace libre constitué de lentilles ou de miroirs peut être utilisé pour créer l'image de la tâche de sortie de la fibre sonde sur la face d'extrémité de l'échantillon en essai. Lorsqu'on utilise ce type de système d'injection, il convient de s'assurer qu'en grande partie ce sont les mêmes modes qui sont excités dans la fibre en essai que ceux qui l'auraient été si le faisceau avait été couplé directement à la sortie de la fibre sonde unimodale. Par exemple, un système d'injection à optique en champ libre ne doit pas créer de vignettage de faisceau, il doit préserver la taille de la sonde sur la fibre en essai et la cohérence du front d'onde du faisceau provenant de la fibre sonde.

Fournir des moyens pour éliminer la lumière de la gaine de l'échantillon en essai. Le revêtement de fibre est souvent suffisant pour assurer cette fonction. Autrement, utiliser les extracteurs de modes de gaine à proximité des deux extrémités de l'échantillon en essai. Si la fibre est positionnée sur le ou les extracteurs de modes de gaine avec des petits poids, on doit veiller à éviter toute microcourbure à ces emplacements.

#### 4.4 Système de détection

Utiliser un appareil de détection optique adapté à la longueur d'onde d'essai. L'appareil de détection optique doit coupler tous les modes guidés de l'échantillon en essai à la zone active du détecteur de telle manière que la sensibilité de détection ne dépende pas du mode de manière significative. Le détecteur, ainsi que tout préamplificateur de signal, doit répondre de manière linéaire (dans les limites de  $\pm 5\%$ ) sur la plage de la puissance détectée.

- Si un affaiblisseur optique est utilisé pour contrôler l'intensité optique sur le détecteur, il ne doit pas dépendre du mode de manière significative. Autrement, la réponse temporelle de l'appareil de détection ne doit pas dépendre du mode de manière significative.
- Un essai spécifique concernant la dépendance par rapport au mode est donné en 6.1. Sinon, la réponse temporelle du détecteur peut être une fonction de décalage tant qu'elle est stable au cours de la mesure (c'est-à-dire que  $\Delta T_{\text{PULSE}}(r)$  doit satisfaire à la prescription de  $\pm 5\%$  de 6.1).

L'anneau de garde du système détecteur doit être limité de manière que le dépassement positif ou négatif maximal soit inférieur à 5 % de l'amplitude de pic du signal optique détecté tel qu'il est mesuré sur la référence.

La forme d'onde du signal optique détecté doit être enregistrée et affichée sur un appareil adapté par exemple un oscilloscope d'échantillonnage à grande vitesse avec balayage temporel étalonné. Il convient que le système d'enregistrement soit capable de faire la moyenne de la forme d'onde détectée pour des impulsions optiques multiples.

Utiliser un retardateur, par exemple un générateur de retard numérique, pour disposer d'un moyen permettant de déclencher l'électronique de détection au moment correct. Le retardateur peut déclencher la source optique ou être déclenché par elle. Le retardateur peut être interne ou externe à l'appareil d'enregistrement.

The output beam from the probe fibre shall be perpendicular to the endface of the test sample to within an angular tolerance of less than 1,0°.

The launch system shall be capable of reproducibly centring the output spot of the probe fibre to within  $\pm 1,0 \mu\text{m}$ .

If directly coupled to the test sample, the gap between the output end of the probe fibre and the endface of the test sample shall be no more than 10  $\mu\text{m}$ .

A free space optics system of lenses or mirrors may be used to image the output spot of the probe fibre onto the endface of the test sample. When using this type of launch system, care should be taken to ensure that substantially the same modes are excited in the test fibre as would be if the beam were coupled directly from the output of the single-mode probe fibre. For example, a free space optics launch system shall not vignette the beam, shall preserve the size of the probe spot on the fibre under test, and shall preserve the wavefront coherence of the beam from the probe fibre.

Provide means to remove cladding light from the test sample. Often the fibre coating is sufficient to perform this function. Otherwise, use cladding mode strippers near both ends of the test sample. If the fibre is retained on the cladding mode stripper(s) with small weights, care shall be taken to avoid microbending at these sites.

#### 4.4 Detection system

Use an optical detection apparatus suitable for the test wavelength. The detection apparatus shall couple all of the guided modes from the test sample onto the detector's active area, such that the detection sensitivity is not significantly mode dependent. The detector, along with any signal preamplifier, shall respond linearly (within  $\pm 5\%$ ) over the range of power detected.

- If an optical attenuator is used to control the optical intensity on the detector, the attenuator shall not be significantly mode dependent. Additionally, the temporal response of the detection apparatus shall not be significantly mode dependent.
- A specific test for mode dependence is given in 6.1. Alternatively, the detector's temporal response may be a function of offset as long as it is stable over the course of the measurement (i.e.  $\Delta T_{\text{PULSE}}(r)$  shall fulfil the  $\pm 5\%$  requirement of 6.1).

Ringing of the detector system shall be limited such that maximum overshoot or undershoot shall be less than 5% of the peak amplitude of the detected optical signal as measured on the reference.

The waveform of the detected optical signal shall be recorded and displayed on a suitable instrument, such as a high-speed sampling oscilloscope with calibrated time sweep. The recording system should be capable of averaging the detected waveform for multiple optical pulses.

Use a delay device, such as a digital delay generator, to provide a means of triggering the detection electronics at the correct time. The delay device may trigger the optical source, or be triggered by it. The delay device may be internal or external to the recording instrument.

L'effet combiné de l'instabilité de synchronisation et du bruit dans le système de détection doit être suffisamment faible pour que la différence entre mesures successives de temps de propagation optique pour toute injection fixée utilisée dans la mesure soit inférieure à 5 % de la valeur mesurée du DMD. Le moyennage de la forme d'onde détectée pour les impulsions optiques multiples peut être utilisé pour réduire les effets d'instabilité de synchronisation et de bruit. Si on utilise le moyennage, le même nombre de moyennes doit être utilisé pour enregistrer toutes les formes d'ondes. Le système doit maintenir ce niveau de stabilité au cours de la mesure.

#### 4.5 Equipement de calcul

Cette méthode d'essai nécessite généralement un calculateur pour stocker les données intermédiaires et calculer les résultats d'essai.

### 5 Echantillonnage et échantillons d'essai

#### 5.1 Echantillon d'essai

L'échantillon d'essai doit être une fibre multimodale à cœur en verre à gradient d'indice (catégorie A1).

#### 5.2 Faces d'extrémités d'échantillons d'essai

Préparer les faces d'extrémités pour qu'elles soient planes au niveau des extrémités d'entrée et de sortie de l'échantillon d'essai.

#### 5.3 Longueur d'échantillon d'essai

La longueur de la fibre doit être mesurée en utilisant une méthode précise bien appropriée telle que la CEI 60793-1-22.

#### 5.4 Emballage de l'échantillon d'essai

Placer la fibre en essai de façon que la tension soit dissipée pour réduire les microcourbures.

#### 5.5 Positionnement de l'échantillon d'essai

Positionner l'extrémité d'entrée de l'échantillon d'essai de manière qu'il soit aligné avec l'extrémité de sortie du système d'injection comme décrit en 4.3.

Positionner l'extrémité de sortie de l'échantillon d'essai de manière qu'il soit aligné avec le système de détection comme décrit en 4.4.

### 6 Procédure

#### 6.1 Régler et mesurer la réponse du système

Coupler la sortie de la fibre sonde dans l'appareil de détection. Ceci peut être réalisé en montant la fibre sonde dans l'appareil de détection ou en utilisant une longueur courte (<10 m) de fibre montée entre le système d'injection et le système de détection ou en couplant directement la sortie de sonde au détecteur par l'intermédiaire d'un système de lentilles et de miroirs. Si on utilise une fibre de longueur courte, elle peut être du même type que la fibre en essai ou d'un type différent.

Régler l'amplitude de l'impulsion optique pour s'adapter à la plus faible amplitude de pic attendue de la fibre en essai pendant la mesure. L'amplitude de pic la plus faible de la fibre en essai apparaîtra généralement pour le décalage radial le plus important.

The combined effect of timing jitter and noise in the detection system shall be small enough that the difference between successive measurements of optical delay times for any fixed launch used in the measurement shall be less than 5 % of the measured value of DMD. Averaging the detected waveform for multiple optical pulses may be used to reduce the effects of timing jitter and noise. If averaging is used, the same number of averages shall be used in recording all waveforms. The system shall maintain this level of stability over the course of the measurement.

#### 4.5 Computational equipment

This test method generally requires a computer to store the intermediate data and calculate the test results.

### 5 Sampling and specimens

#### 5.1 Test sample

The test sample shall be graded-index glass-core (category A1) multimode fibre.

#### 5.2 Specimen endfaces

Prepare flat endfaces at the input and output ends of the specimen.

#### 5.3 Specimen length

The length of the fibre shall be measured using a suitably accurate method such as IEC 60793-1-22.

#### 5.4 Specimen packaging

Support the test fibre in a manner that relieves tension and minimizes microbending.

#### 5.5 Specimen positioning

Position the input end of the test sample such that it is aligned to the output end of the launch system as described in 4.3.

Position the output end of the test sample such that it is aligned with the detection system, as described in 4.4.

### 6 Procedure

#### 6.1 Adjust and measure system response

Couple the output of the probe fibre into the detection apparatus. This may be accomplished by mounting the probe fibre in the detection apparatus, or by using a short (<10 m) length of fibre mounted between the launch system and the detection system, or by directly coupling the probe output to the detector via a system of lenses and mirrors. If using a short fibre, it can be of the same or different type fibre as the test fibre.

Adjust the amplitude of the optical pulse to match the smallest peak amplitude expected from the test fibre during the measurement. The smallest peak amplitude from the test fibre will usually occur for the largest radial offset.

Régler l'échelle de temps du système de détection pour l'adapter à l'échelle de temps utilisée pour acquérir des données de l'échantillon en essai pour assurer que l'impulsion complète sera capturée (voir 6.2).

Mesurer la forme d'onde de l'impulsion optique et déterminer sa largeur temporelle à 25 % de l'amplitude de pic. Cette valeur sera utilisée pour calculer les résultats d'essai et sera appelée  $\Delta T_{PULSE}$ . L'interpolation linéaire peut être utilisée entre des points temporels successifs pour calculer  $\Delta T_{PULSE}$  pour une précision améliorée.

- Des mesures répétées de  $\Delta T_{PULSE}$  ne doivent pas différer de plus de 5 % de la valeur du DMD mesuré
- Si on utilise une longueur courte de fibre ou un système de lentilles et de miroirs, les valeurs de  $\Delta T_{PULSE}$  ne doivent pas différer de plus de 5 % par rapport aux valeurs obtenues en couplant la fibre sonde directement dans l'appareil de détection.
- Pour faire l'essai et vérifier que l'appareil de détection ne dépend pas du mode de manière significative, préparer un échantillon en essai spécial de longueur courte du même type que la fibre à soumettre à l'essai. Mesurer la valeur de  $\Delta T_{PULSE}$  pour chaque décalage radial devant être utilisé dans la mesure. Cette valeur doit satisfaire à la prescription de 6.1.

Utiliser l'Annexe B pour calculer une valeur de  $\Delta T_{REF}$  appropriée aux valeurs de  $\Delta T_{PULSE}$ , de la largeur spectrale de la source et de la dispersion chromatique de la fibre.

## 6.2 Régler le système de détection

Injecter la lumière à partir de la fibre sonde dans la fibre en essai. Régler l'échelle de temps et le temps de déclenchement du système de détection de telle manière qu'une impulsion optique complète soit affichée pour toutes les positions de balayage de la tâche de la sonde, y compris tous les fronts et flancs arrières d'une amplitude supérieure ou égale à 1 % de l'amplitude de pic. Toutes les données de la fibre en essai doivent être obtenues sans réglage supplémentaire du temps de propagation et de l'échelle de temps.

Trouver le centre du cœur de la fibre en essai. Une méthode pour trouver le centre consiste à balayer la position de la tâche de la sonde sur la face de la fibre en essai. Trouver les deux bords du cœur de la fibre le long d'un axe « x » arbitraire, avec le bord défini comme la position pour laquelle la puissance totale reçue atteint un seuil d'environ 15 % du maximum. Centrer la tâche de la sonde le long de l'axe « x ». Ensuite, balayer la tâche de la sonde le long de l'axe orthogonal « y », en trouvant les bords du cœur de la fibre et en centrant le long de l'axe « y ». Répéter, si cela est nécessaire pour obtenir la tolérance de positionnement requise. Lorsque la tâche de la sonde est centrée, le DMD sera symétrique entre les décalages positif et négatif le long des axes « x » ou « y ».

## 6.3 Mesurer l'échantillon d'essai

Mesurer la réponse de l'échantillon d'essai pour des décalages radiaux  $R$  du point de sonde de  $R_{INNER} \leq R \leq R_{OUTER}$  à des intervalles  $\leq 2 \mu\text{m}$ .  $R_{INNER}$  et  $R_{OUTER}$  doivent être donnés dans la spécification (voir le point c) de l'article 9). En fonction des valeurs spécifiées pour  $R_{INNER}$  et  $R_{OUTER}$ , des intervalles inférieurs à  $2 \mu\text{m}$  peuvent être exigés.

**EXEMPLE** Si la spécification demande que  $R_{INNER} = 0$  et  $R_{OUTER} = 17 \mu\text{m}$ , le nombre le plus faible de décalages radiaux sera de dix.  $(0, 2, \dots, 16, 17) \mu\text{m}$  ou  $(0, 1, \dots, 15, 17) \mu\text{m}$  satisferait à la prescription minimale. En variante, on pourrait utiliser 18 décalages à  $(0, 1, 2, \dots, 16, 17) \mu\text{m}$ .

Adjust the time scale of the detection system to match the time scale used in acquiring data from the test sample to ensure that the entire pulse is captured (see 6.2).

Measure the waveform of the optical pulse, and determine its temporal width at 25 % of the peak amplitude. This value will be used to calculate the test results, and will be called  $\Delta T_{PULSE}$ . Linear interpolation may be used between successive time points to calculate  $\Delta T_{PULSE}$  for improved accuracy.

- Repeated measurements of  $\Delta T_{PULSE}$  shall differ by no more than 5 % of the value of DMD being measured
- If using either a short length of fibre, or a system of lenses and mirrors, the values of  $\Delta T_{PULSE}$  shall differ by no more than 5 % from the values obtained by coupling the probe fibre directly into the detection apparatus.
- To test and verify that the detector apparatus is not significantly mode dependent, prepare a special short-length test sample of the same type as the fibre to be tested. Measure the value of  $\Delta T_{PULSE}$  for each radial offset to be used in the measurement. This value shall meet the requirement of 6.1.

Use Annex B to calculate a value of  $\Delta T_{REF}$  appropriate for the values of  $\Delta T_{PULSE}$ , source spectral width, and fibre chromatic dispersion.

## 6.2 Adjust detection system

Launch light from the probe fibre into the test fibre. Adjust the time scale and trigger delay of the detection system such that one entire optical pulse is displayed for all relevant offsets of the probe spot, including all leading and trailing edges having amplitude greater than or equal to 1 % of the peak amplitude. All data from the test fibre shall be obtained without further adjustment of the delay and time scale.

Find the centre of the core of the test fibre. One method for finding the centre is to scan the position of the probe spot across the face of the test fibre. Find both edges of the core of the fibre along some arbitrary “x” axis, with the edge defined as the position for which the total received power reaches a threshold of about 15 % of maximum. Centre the probe spot along the “x” axis. Now scan the probe spot along the orthogonal “y” axis, finding the fibre core edges and centering along the “y” axis. Iterate, as necessary, to achieve the required positional tolerance. When the probe spot is centred, the DMD will be symmetric between positive and negative offsets along the “x” or “y” axes.

## 6.3 Measure the test sample

Measure the response of the test sample for radial offsets  $R$  of the probe spot from  $R_{INNER} \leq R \leq R_{OUTER}$  at intervals of  $\leq 2 \mu\text{m}$ .  $R_{INNER}$  and  $R_{OUTER}$  shall be provided in the specification (see item c) in clause 9). Depending on the values specified for  $R_{INNER}$  and  $R_{OUTER}$ , intervals less than  $2 \mu\text{m}$  may be required.

EXAMPLE If the specification calls for  $R_{INNER} = 0$  and  $R_{OUTER} = 17 \mu\text{m}$ , the fewest number of radial offsets will be ten. Either  $(0, 2, \dots, 16, 17) \mu\text{m}$  or  $(0, 1, \dots, 15, 17) \mu\text{m}$  would meet the minimum requirement. Alternatively, one could use 18 offsets at  $(0, 1, 2, \dots, 16, 17) \mu\text{m}$ .

A chaque décalage radial, mesurer la forme d'onde de l'impulsion optique et déterminer la position temporelle des fronts et flancs arrières à 25 % de l'amplitude maximale de la forme d'onde qui en résulte (voir Annexe C). L'interpolation linéaire peut être utilisée entre des points temporels successifs pour estimer les fronts et flancs arrières pour une précision améliorée. Enregistrer les durées de front et de flanc arrière pour chaque position de décalage radial.

## 7 Calculs et interprétation des résultats

### 7.1 Retard différentiel de mode (DMD)

Trouver  $T_{\text{FAST}}$ , le minimum des durées de front pour l'excitation entre  $R_{\text{INNER}}$  et  $R_{\text{OUTER}}$  à partir des impulsions de sortie enregistrées en 6.3.

Trouver  $T_{\text{SLOW}}$ , le maximum des durées de flanc arrière pour l'excitation entre  $R_{\text{INNER}}$  et  $R_{\text{OUTER}}$  à partir des impulsions de sortie enregistrées en 6.3.

Calculer le DMD:

- **Option 1** (Voir Annexe B)

En utilisant la valeur de  $\Delta T_{\text{REF}}$  de 6.1,  $DMD = (T_{\text{SLOW}} - T_{\text{FAST}}) - \Delta T_{\text{REF}}$

La limite de consignation inférieure pour le DMD en utilisant cette équation est  $0,9(\Delta T_{\text{REF}})$  en raison des problèmes pratiques de mesure exposés à l'Annexe C. En conséquence, si la valeur calculée pour le DMD en utilisant l'équation ci-dessus est inférieure à  $0,9(\Delta T_{\text{REF}})$ , rapporter le résultat comme étant « inférieur à  $0,9(\Delta T_{\text{REF}})$  ».

- **Option 2**

Le DMD peut être calculé alternativement en réalisant une déconvolution de l'impulsion de référence des impulsions obtenues en sortie de la fibre en essai. Pour utiliser la déconvolution, l'algorithme ne doit pas introduire d'erreur significative pour les formes d'impulsions rencontrées dans la mesure, en particulier provenant du choix d'un filtre de bruit à haute fréquence.

- **Valeurs DMD multiples**

Une fibre peut être caractérisée par des valeurs DMD multiples avec chaque valeur évaluée pour une plage différente de  $R_{\text{INNER}}$  et  $R_{\text{OUTER}}$ . Dans ce cas, toutes les valeurs DMD peuvent être évaluées à partir des impulsions de sortie enregistrées en 6.3, dans la mesure où les prescriptions de décalage radial de 6.3 sont satisfaites pour chacune des plages de  $R_{\text{INNER}}$  et  $R_{\text{OUTER}}$ .

### 7.2 Normalisation de la longueur

Il peut être souhaitable de normaliser la valeur du DMD à une longueur d'unité, telle que ps/m. Si le DMD est normalisé à une longueur d'unité, la formule concernant la dépendance par rapport à la longueur doit être consignée.

## 8 Documentation

### 8.1 Informations requises pour chaque mesure

- a) Identification de l'échantillon d'essai
- b) Longueur de l'échantillon d'essai
- c) Formule de normalisation de la longueur, si utilisée

At each radial offset, measure the waveform of the optical pulse, and determine the temporal position of the leading and trailing edges at 25 % of the maximum amplitude of the resulting waveform (see Annex C). Linear interpolation may be used between successive time points to estimate the leading and trailing edge times for improved accuracy. Record the leading and trailing edge times for each radial offset position.

## 7 Calculations and interpretation of results

### 7.1 Differential Mode Delay (DMD)

Find  $T_{\text{FAST}}$ , the minimum of the leading edge times for excitation between  $R_{\text{INNER}}$  and  $R_{\text{OUTER}}$  from among the output pulses recorded in 6.3.

Find  $T_{\text{SLOW}}$ , the maximum of the trailing edge times for excitation between  $R_{\text{INNER}}$  and  $R_{\text{OUTER}}$  from among the output pulses recorded in 6.3.

Calculate DMD:

- **Option 1** (See Annex B)

Using the value of  $\Delta T_{\text{REF}}$  from 6.1,  $DMD = (T_{\text{SLOW}} - T_{\text{FAST}}) - \Delta T_{\text{REF}}$

The lower reporting limit for DMD using this equation is  $0,9(\Delta T_{\text{REF}})$  because of the practical measurement problems discussed in Annex C. Consequently, if the value calculated for DMD using the above equation is less than  $0,9(\Delta T_{\text{REF}})$ , report the result as being “less than  $0,9(\Delta T_{\text{REF}})$ ”.

- **Option 2**

DMD can alternatively be calculated by deconvolving the reference pulse from the pulses gathered exiting the test fibre. To utilize deconvolution, the algorithm shall not introduce significant error for the pulse shapes encountered in the measurement, especially arising from the choice of a high-frequency noise filter.

- **Multiple DMD values**

A fibre may be characterized by multiple DMD values, with each value evaluated for a different range of  $R_{\text{INNER}}$  and  $R_{\text{OUTER}}$ . In this case, all DMD values may be evaluated from among the output pulses recorded in 6.3, provided that the radial offset requirements of 6.3 are met for each of the ranges of  $R_{\text{INNER}}$  and  $R_{\text{OUTER}}$ .

### 7.2 Length normalization

It may be desirable to normalize the value of DMD to a unit length, such as ps/m. If the DMD is normalized to a unit length, the length dependence formula shall be reported.

## 8 Documentation

### 8.1 Information to be reported for each test

- a) Test sample identification
- b) Test sample length
- c) Length normalization formula, if used

- d) Date d'essai
- e) Longueur d'onde source (nominale ou réelle).
- f) Décalages radiaux minimaux et maximaux,  $R_{\text{INNER}}$ ,  $R_{\text{OUTER}}$
- g) Résultat DMD pour une plage  $R_{\text{INNER}}$ ,  $R_{\text{OUTER}}$  donnée

## 8.2 Informations nécessairement disponibles

- a) Méthode de mesure utilisée
- b) Description de l'équipement d'essai, y compris: type de source et longueur d'onde de source centrale réelle, largeur spectrale maximale spécifiée ou réelle (valeur efficace)
- c) Documentation de la méthode utilisée pour calculer  $\Delta T_{\text{REF}}$
- d) Type de détecteur et conditions de fonctionnement
- e) Diamètre de champ de mode de la fibre sonde à la longueur d'onde de mesure (nominale ou réelle)
- f) Méthode d'extraction de la lumière de gaine
- g) Date du dernier étalonnage de l'équipement d'essai

## 9 Informations relatives à la spécification

Lorsqu'on spécifie les performances de fibre en utilisant cette méthode d'essai, les informations suivantes doivent être spécifiées.

- a) Nombre et type d'échantillons à soumettre aux essais
- b) Procédure d'essai (CEI 60793-1-49)
- c) La valeur DMD exigée pour une plage indiquée de décalage radial minimal et maximal,  $\text{DMD}(R_{\text{INNER}}, R_{\text{OUTER}})$ . L'évaluation de plusieurs valeurs DMD différentes pour différentes plages indiquées en  $R_{\text{INNER}}$  et  $R_{\text{OUTER}}$  peut être prescrite.
- d) Méthode de consignation à utiliser, si différente des deux options de 7.1
- e) Longueur ou longueurs d'onde d'essai

- d) Test date
- e) Source wavelength (nominal or actual)
- f) Minimum and maximum radial offsets,  $R_{\text{INNER}}$ ,  $R_{\text{OUTER}}$
- g) DMD result for a given  $R_{\text{INNER}}$ ,  $R_{\text{OUTER}}$  range

## 8.2 Information to be available upon request

- a) The measurement method used
- b) Description of the test equipment, including: source type and actual source centre wavelength, maximum specified or actual spectral width (rms)
- c) Documentation of method used to calculate  $\Delta T_{\text{REF}}$
- d) Detector type and operating conditions
- e) Mode field diameter of probe fibre at measurement wavelength (nominal or actual)
- f) Method of stripping cladding light
- g) Date of latest calibration of test equipment

## 9 Specification information

When specifying fibre performance using this test method, the following information shall be specified.

- a) Number and type of samples to be tested
- b) Test procedure (IEC 60793-1-49)
- c) Required DMD value for a stated range of minimum and maximum radial offsets,  $\text{DMD}(R_{\text{INNER}}, R_{\text{OUTER}})$ . Evaluation of several different DMD values for different stated ranges in  $R_{\text{INNER}}$  and  $R_{\text{OUTER}}$  may be required
- d) Reporting method to be used, if other than the two options in 7.1
- e) Test wavelength(s)

**Annexe A**  
(informative)

**Comparaison entre cette norme et les recommandations UIT**

Les Recommandations UIT-T G.650.1 [1]<sup>2)</sup> et UIT-T G.650.2 [2] ne contiennent pas d'information sur la manière de mesurer le DMD d'une fibre multimodale à gradient d'indice.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60793-1-49:2003

---

2) Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

## Annex A (informative)

### Comparison between this Standard and ITU recommendations

ITU-T Recommendations G.650.1 [1]<sup>2)</sup> and G.650.2 [2] contain no information on how to measure the DMD of a graded-index multimode fibre.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60793-1-49:2003

---

<sup>2)</sup> Figures in square brackets refer to the Bibliography.

## Annexe B

(normative)

### Limitation de la largeur spectrale de la source

#### B.1 Limitation de l'effet de la dispersion chromatique sur la valeur du DMD

L'effet des erreurs introduites par la dispersion chromatique sur la valeur du DMD doit être inférieur à 10 %. Cette prescription peut être satisfaite soit en utilisant une source présentant une largeur spectrale suffisamment faible pour pouvoir ignorer la dispersion chromatique soit en déterminant de manière précise la forme spectrale de la source et en calculant la valeur appropriée de  $\Delta T_{\text{REF}}$ .

La dispersion chromatique  $D(\lambda)$  peut être estimée en utilisant les données indiquées à l'Article B.2. En variante, on peut utiliser  $D(\lambda)$  obtenu en utilisant la CEI 60793-1-42 pour le type particulier de fibre en essai. La prescription de largeur spectrale peut être satisfaite en utilisant soit une source spectralement étroite soit un filtre optique à la source ou à l'extrémité de détection.

Plusieurs exemples de méthodes sont donnés pour satisfaire la prescription de la présente annexe.

a) Utiliser une source avec une largeur spectrale suffisamment étroite de manière que la valeur de

$$\Delta t_{\text{chrom}} = 4 \times \sqrt{\ln(2)} \cdot \delta\lambda \cdot D(\lambda) \cdot L \quad (\text{B.1})$$

soit inférieure à 10 % du DMD à mesurer. Ceci génère une contrainte sur la largeur spectrale de la valeur quadratique moyenne (rms)  $\delta\lambda$ ,

$$\delta\lambda \leq \frac{0,1 \times DMD_{\text{min}}}{4 \sqrt{\ln(2)} \cdot D(\lambda) \cdot L} = 0,030 \times \frac{DMD_{\text{min}}}{D(\lambda) \cdot L} \quad (\text{B.2})$$

Dans ce cas,  $DMD_{\text{min}}$  est la valeur la plus faible du DMD à déterminer,  $D(\lambda)$  est la dispersion chromatique et  $L$  est la longueur de l'échantillon. En partant de l'hypothèse typique selon laquelle les retards modaux d'une fibre suivent linéairement la longueur, cette contrainte ne dépend aucunement de la longueur.

Utiliser  $\Delta T_{\text{REF}} = \Delta T_{\text{PULSE}}$  en 6.1 Et pour le calcul de la valeur du DMD.

**EXEMPLE** Les valeurs du DMD d'une valeur faible telle que 100 ps doivent être soumises aux essais sur des longueurs de fibres de 0,5 km à une longueur d'onde de 850 nm. D'après le Tableau B.1, la valeur de  $D(\lambda)$  à 850 nm est de 107 ps/nm·km. Si on substitue cette information dans l'Equation B.2, il convient que la largeur spectrale de la source de valeur quadratique moyenne (rms)  $\delta\lambda$  soit  $\leq (0,03 \times 100 \text{ ps}) / (107 \text{ ps/nm} \cdot \text{km} \times 0,5 \text{ km}) = 0,056 \text{ nm}$ . La même source conviendrait pour une longueur d'essai de 10 km avec des valeurs DMD d'une valeur faible telle que 2000 ps.

b) Utiliser une source avec une largeur spectrale suffisamment étroite qui en ignorant  $\Delta t_{\text{chrom}}$  par rapport à  $\Delta T_{\text{PULSE}}$  modifie la valeur de  $\Delta T_{\text{REF}}$  de moins de 10 %. Ceci génère une contrainte sur la largeur spectrale de la valeur quadratique moyenne (rms)  $\delta\lambda$ ,

$$\delta\lambda \leq \frac{\sqrt{0,21} \times \Delta T_{\text{PULSE}}}{4 \sqrt{\ln(2)} \cdot D(\lambda) \cdot L} = 0,138 \times \frac{\Delta T_{\text{PULSE}}}{D(\lambda) \cdot L} \quad (\text{B.3})$$

Utiliser  $\Delta T_{\text{REF}} = \Delta T_{\text{PULSE}}$  de 6.1 et pour le calcul de la valeur du DMD.

## Annex B

(normative)

### Source spectral width limitation

#### B.1 Limiting the effect of chromatic dispersion on the value of DMD

The effect of errors introduced by chromatic dispersion on the value of DMD shall be less than 10 %. This requirement may be met either by using a source with a spectral width small enough that chromatic dispersion can be ignored, or by accurately determining the spectral shape of the source and calculating the appropriate value of  $\Delta T_{\text{REF}}$ .

The chromatic dispersion  $D(\lambda)$  may be estimated using the data given in clause B.2. Alternatively, one may use  $D(\lambda)$  obtained using IEC 60793-1-42 for the particular type of fibre being tested. The requirement on spectral width may be met either by using a spectrally narrow source, or by using an optical filter at either the source or detection end.

Several examples of methods for meeting the requirement of this annex are now given.

a) Use a source with sufficiently narrow spectral width such that the value of

$$\Delta t_{\text{chrom}} = 4 \times \sqrt{\ln(2)} \cdot \delta\lambda \cdot D(\lambda) \cdot L \quad (\text{B.1})$$

is less than 10 % of the DMD to be measured. This gives a constraint on rms spectral width  $\delta\lambda$ ,

$$\delta\lambda \leq \frac{0,1 \times DMD_{\text{min}}}{4 \sqrt{\ln(2)} \cdot D(\lambda) \cdot L} = 0,030 \times \frac{DMD_{\text{min}}}{D(\lambda) \cdot L} \quad (\text{B.2})$$

Here,  $DMD_{\text{min}}$  is the smallest value of DMD to be determined,  $D(\lambda)$  is the chromatic dispersion, and  $L$  is the sample length. Under the typical assumption that the modal delays of a fibre scale linearly with length, this constraint has no length dependence.

Use  $\Delta T_{\text{REF}} = \Delta T_{\text{PULSE}}$  in 6.1 and for calculating the value of DMD.

EXAMPLE DMD values as small as 100 ps are to be tested on fibre lengths of 0,5 km at a wavelength of 850 nm. From Table B.1, the value of  $D(\lambda)$  at 850 nm is 107 ps/nm·km. Substituting this information in Equation B.2, the source rms spectral width  $\delta\lambda$  should be  $\leq (0,030 \times 100 \text{ ps}) / (107 \text{ ps/nm} \cdot \text{km} \times 0,5 \text{ km}) = 0,056 \text{ nm}$ . The same source would work for a 10 km test length with DMD values as low as 2000 ps.

b) Use a source with sufficiently narrow spectral width that ignoring  $\Delta t_{\text{chrom}}$  in relation to  $\Delta T_{\text{PULSE}}$  changes the value of  $\Delta T_{\text{REF}}$  by less than 10 %. This gives a constraint on rms spectral width  $\delta\lambda$ ,

$$\delta\lambda \leq \frac{\sqrt{0,21} \times \Delta T_{\text{PULSE}}}{4 \sqrt{\ln(2)} \cdot D(\lambda) \cdot L} = 0,138 \times \frac{\Delta T_{\text{PULSE}}}{D(\lambda) \cdot L} \quad (\text{B.3})$$

Use  $\Delta T_{\text{REF}} = \Delta T_{\text{PULSE}}$  in 6.1, and for calculating the value of DMD.

Dans ce cas, il n'y a pas de dépendance explicite de la largeur spectrale de la source  $\delta\lambda$  par rapport à la valeur de DMD mesurée. A la place, la valeur minimale de DMD qui peut être mesurée est fixée directement par  $\Delta T_{\text{PULSE}}$ . Noter qu'il existe une dépendance explicite de la largeur spectrale maximale autorisée avec la longueur de l'échantillon. Pour une largeur spectrale fixée, l'élargissement chromatique deviendra trop important pour être ignoré au-delà d'une certaine longueur d'échantillon.

**EXEMPLE** Une source laser particulière et un détecteur optique ayant la valeur  $\Delta T_{\text{PULSE}} = 60 \text{ ps}$  sont utilisés pour mesurer des échantillons de 0,5 km à 850 nm. En substituant cette information dans l'Equation B.3, il convient que la largeur spectrale de la source de valeur quadratique moyenne (rms)  $\delta\lambda$  soit  $\leq (0,138 \times 60 \text{ ps})/(107 \text{ ps}/\text{nm} \cdot \text{km} \times 0,5 \text{ km}) = 0,15 \text{ nm}$ .

c) Calculer la valeur appropriée de  $\Delta T_{\text{REF}}$  pour la source utilisée.  $\Delta T_{\text{REF}}$  est la largeur complète à 25 % de chaque mode à la sortie de la fibre en essai. Pour une impulsion et des formes spectrales quasi gaussiennes utiliser

$$\Delta T_{\text{REF}} = (\Delta T_{\text{PULSE}}^2 + \Delta t_{\text{chrom}}^2)^{1/2} \quad (\text{B.4})$$

Dans ce cas, la limite supérieure sur la largeur spectrale de la source est fixée indirectement par la prescription de 7.1 indiquant que la valeur minimale de DMD consignée par la mesure est de 0,9( $\Delta T_{\text{REF}}$ ).

Si une source a des pics spectraux multiples ou si elle est suffisamment non gaussienne, cette formule peut être imprécise. Si l'Equation B.4 est utilisée pour calculer la valeur de  $\Delta T_{\text{REF}}$ , l'erreur introduite dans le calcul du DMD doit être inférieure à 10 %.

## B.2 Dispersion chromatique dans les fibres multimodales

Les données du Tableau B.1 représentent la dispersion attendue la plus élevée pour toute fibre de la catégorie A1 disponible sur le marché, sur la base de la performance de dispersion nominale et de l'ouverture numérique (NA). A des longueurs d'ondes inférieures à 1200 nm, la dispersion est la plus importante avec une fibre de  $\lambda_0$  maximale (fibre à 0,29 d'ouverture numérique (NA)). A des longueurs d'ondes supérieures à 1400 nm, la dispersion est la plus importante avec une fibre de  $\lambda_0$  maximale (fibre à 0,20 d'ouverture numérique (NA)). Ici  $\lambda_0$  est la longueur d'onde à dispersion nulle. Le Tableau B.1 n'est pas utilisé pour des longueurs d'ondes comprises entre 1200 nm et 1400 nm. Utiliser à la place  $D = 16,6 \text{ ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ .

In this case, there is no explicit dependence of source spectral width  $\delta\lambda$  on the value of DMD being measured. Instead, the minimum value of DMD that can be measured is set directly by  $\Delta T_{\text{PULSE}}$ . Note that there is an explicit dependence of the maximum allowed spectral width on sample length. For fixed spectral width, chromatic broadening will become too large to ignore above a certain sample length.

EXAMPLE A particular laser source and optical detector having the value  $\Delta T_{\text{PULSE}} = 60$  ps are used to measure 0,5 km samples at 850 nm. Substituting this information into Equation B.3, the source rms spectral width  $\delta\lambda$  should be  $\leq (0,138 \times 60 \text{ ps}) / (107 \text{ ps/nm}\cdot\text{km} \times 0,5 \text{ km}) = 0,15 \text{ nm}$ .

c) Calculate the appropriate value of  $\Delta T_{\text{REF}}$  for the source being used.  $\Delta T_{\text{REF}}$  is the full width at 25 % of each mode at the output of the fibre under test. For near-Gaussian pulse and spectral shapes use

$$\Delta T_{\text{REF}} = (\Delta T_{\text{PULSE}}^2 + \Delta t_{\text{chrom}}^2)^{1/2} \quad (\text{B.4})$$

In this case, the upper limit on the spectral width of the source is set indirectly by the requirement in 7.1 that the minimum value of DMD reported by the measurement is  $0,9(\Delta T_{\text{REF}})$ .

If a source has multiple spectral peaks, or is otherwise sufficiently non-Gaussian, this formula may be inaccurate. If Equation B.4 is used to calculate the value of  $\Delta T_{\text{REF}}$ , the error introduced to the calculation of DMD shall be less than 10 %.

## B.2 Chromatic dispersion in multimode fibres

The data in Table B.1 represents the highest expected dispersion for any of the commercially available Category A1 fibres, based on nominal dispersion performance and numerical aperture (NA). At wavelengths lower than 1200 nm, dispersion is greatest with fibre having maximum  $\lambda_0$  (0,29 NA fibre). At wavelengths greater than 1400 nm, dispersion is greatest with fibre having minimum  $\lambda_0$  (0,20 NA fibre). Here  $\lambda_0$  is the zero-dispersion wavelength. Table B.1 is not used for wavelengths between 1200 nm and 1400 nm. Instead, use  $D = 16,6 \text{ ps/nm}\cdot\text{Km}$ .

**Tableau B.1 – Dispersion attendue la plus élevée pour les fibres disponibles sur le marché de la catégorie A1<sup>a</sup>**

Longueur d'onde $\lambda$ nm	Dispersion $D$ ps/nm·km	Longueur d'onde $\lambda$ nm	Dispersion $D$ ps/nm·km	Longueur d'onde $\lambda$ nm	Dispersion $D$ ps/nm·km
780	146				
790	140				
800	133	1 000	54,2	1 400	8,28
810	128	1 010	51,8	1 410	9,08
820	122	1 020	49,2	1 420	9,85
830	117	1 030	46,9	1 430	10,6
840	112	1 040	44,7	1 440	11,4
850	107	1 050	42,5	1 450	12,1
860	102	1 060	40,3	1 460	12,8
870	98,0	1 070	38,2	1 470	13,5
880	93,7	1 080	36,2	1 480	14,2
890	89,7	1 090	34,3	1 490	14,9
900	85,7	1 100	32,4	1 500	15,6
910	82,1	1 110	30,6	1 510	16,2
920	78,4	1 120	28,9	1 520	16,9
930	75,0	1 130	27,2	1 530	17,5
940	71,6	1 140	25,5	1 540	18,1
950	68,6	1 150	23,9	1 550	18,8
960	65,5	1 160	22,4	1 560	19,4
970	62,5	1 170	20,8	1 570	20,0
980	59,6	1 180	19,4	1 580	20,6
990	57,0	1 190	17,9	1 590	21,1
				1 600	21,7

<sup>a</sup> Hypothèses:

- pour  $\lambda < 1200$  nm:  $S_0 = 0,09562$  ps/(nm<sup>2</sup>·km);  $\lambda_0 = 1344,5$  nm pour une fibre multimodale nominale d'ouverture numérique de 0,29,
- pour  $\lambda > 1400$  nm:  $S_0 = 0,101$  ps/(nm<sup>2</sup>·km);  $\lambda_0 = 1310$  nm pour une fibre multimodale nominale d'ouverture numérique de 0,20,

où  $S_0$  est la pente de dispersion à la valeur  $\lambda_0$ .

**Table B.1 – Highest expected dispersion for commercially available category A1 fibres <sup>a</sup>**

Wavelength $\lambda$ nm	Dispersion $D$ ps/nm·km	Wavelength $\lambda$ nm	Dispersion $D$ ps/nm·km	Wavelength $\lambda$ nm	Dispersion $D$ ps/nm·km
780	146				
790	140				
800	133	1 000	54,2	1 400	8,28
810	128	1 010	51,8	1 410	9,08
820	122	1 020	49,2	1 420	9,85
830	117	1 030	46,9	1 430	10,6
840	112	1 040	44,7	1 440	11,4
850	107	1 050	42,5	1 450	12,1
860	102	1 060	40,3	1 460	12,8
870	98,0	1 070	38,2	1 470	13,5
880	93,7	1 080	36,2	1 480	14,2
890	89,7	1 090	34,3	1 490	14,9
900	85,7	1 100	32,4	1 500	15,6
910	82,1	1 110	30,6	1 510	16,2
920	78,4	1 120	28,9	1 520	16,9
930	75,0	1 130	27,2	1 530	17,5
940	71,6	1 140	25,5	1 540	18,1
950	68,6	1 150	23,9	1 550	18,8
960	65,5	1 160	22,4	1 560	19,4
970	62,5	1 170	20,8	1 570	20,0
980	59,6	1 180	19,4	1 580	20,6
990	57,0	1 190	17,9	1 590	21,1
				1 600	21,7

<sup>a</sup> Assumptions:

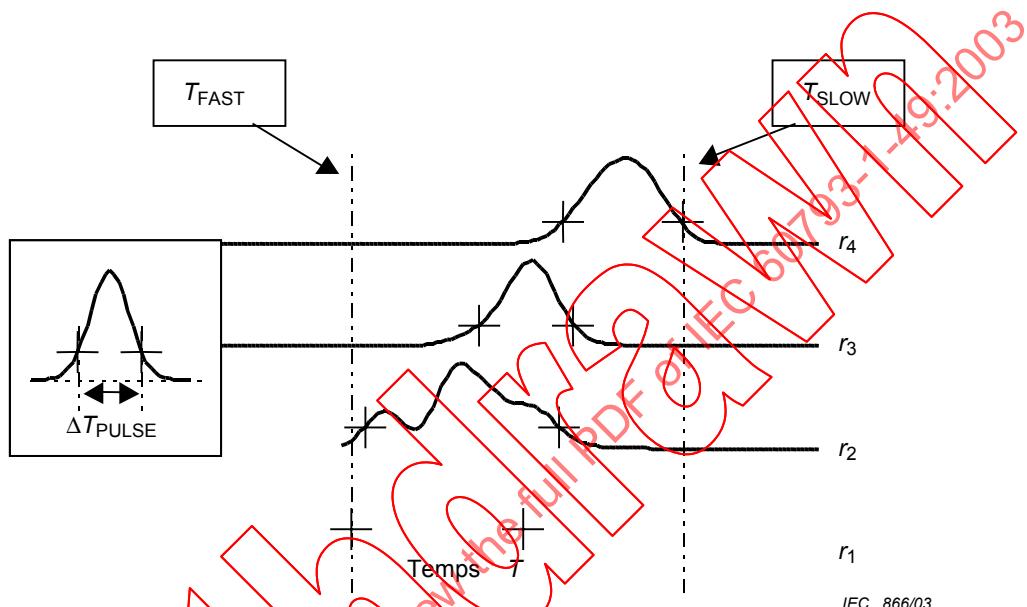
- for  $\lambda < 1200$  nm:  $S_0 = 0,09562$  ps/(nm<sup>2</sup>·km);  $\lambda_0 = 1344,5$  nm for a nominal multimode fibre with 0,29 NA,
- for  $\lambda > 1400$  nm:  $S_0 = 0,101$  ps/(nm<sup>2</sup>·km);  $\lambda_0 = 1310$  nm for a nominal multimode fibre with 0,20 NA,  
where  $S_0$  is  $\lambda_0$  dispersion slope.

## Annexe C

(informative)

### Discussion des détails de mesure

Cette procédure d'essai examine la détermination de la différence des durées de temps de propagation entre les modes les plus rapides et les plus lents excités pour une gamme indiquée de conditions d'excitation comme indiqué à la Figure C.1.



NOTE Les durées de front et flanc arrière (seuil 25 %) sont identifiées par « + ». Les tracés sont des décalages pour différentes positions d'excitation. L'encadré montre  $\Delta T_{PULSE}$ .

Figure C.1 – Données DMD idéales

Pour toute position donnée de décalage, le point provenant de la sonde à mode unique excite plusieurs groupes de modes différents. La forme d'onde de sortie qui en résulte présente une dépendance temporelle compliquée, montrant typiquement des pics multiples et sans garantie que les groupes de modes individuels seront clairement résolus. Le niveau de détection pour le front et le flanc arrière est choisi à 25 % de l'amplitude de pic d'une forme d'onde donnée. Ceci est valable pour des exemples lorsque le groupe de mode excité au maximum par le point de sonde à un décalage donné est séparé dans le temps des autres groupes de modes excités au même décalage. Le niveau de 25 % assure la détection du groupe de mode séparé même lorsque les autres modes ont tous le même temps de propagation, provoquant le dépassement de l'amplitude du groupe de mode séparé par leur amplitude combinée.

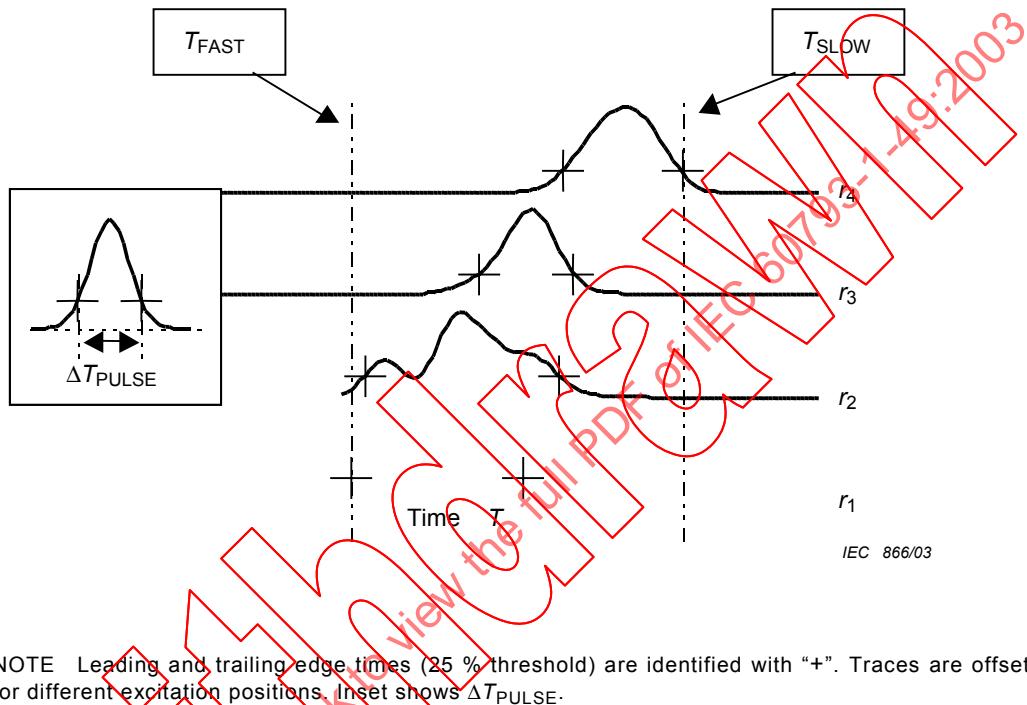
La différence entre  $T_{SLOW}$  et  $T_{FAST}$  sera supérieure au DMD dans une proportion qui dépend de la largeur temporelle de l'impulsion optique, de la largeur de bande limitée du détecteur optique et de l'élargissement de chaque mode dû à la largeur spectrale de la source et à la dispersion chromatique de la fibre en essai.

## Annex C

(informative)

### Discussion of measurement details

This test procedure focuses on determining the difference in delay times between the fastest and slowest modes excited for a stated range of excitation conditions as illustrated in Figure C.1.



**Figure C.1 – Idealized DMD data**

For any given offset position, the spot from the single-mode probe excites several different mode groups. The resulting output waveform exhibits a complicated time dependence, typically showing multiple peaks, and with no guarantee that the individual mode groups will be clearly resolved. The detection level for the leading and trailing edges is chosen at 25 % of peak amplitude of a given waveform. This accounts for instances when the mode group maximally excited by the probe spot at a given offset is separated in time from the other mode groups excited at the same offset. The 25 % level assures detection of the separated mode group even when the other modes all have the same delay time, causing their combined amplitude to exceed that of the separated mode group.

The difference between  $T_{SLOW}$  and  $T_{FAST}$  will be greater than the DMD by an amount that depends on the temporal width of the optical pulse, the finite bandwidth of the optical detector, and the broadening of each mode due to the source spectral width and the chromatic dispersion of the fibre under test.

La largeur temporelle d'une impulsion optique et la largeur de bande limitée du détecteur sont caractérisées comme  $\Delta T_{\text{PULSE}}$ . Dans la limite de la valeur faible de  $\Delta T_{\text{PULSE}}$ , et en partant de l'hypothèse d'une forme gaussienne pour le spectre de la source, la largeur temporelle à 25 % du maximum de chaque mode à la sortie de la fibre en essai sera

$$\Delta t_{\text{chrom}} = 4 \times \sqrt{\ln(2)} \cdot \delta\lambda \cdot D(\lambda) \cdot L \quad (\text{C.1})$$

où

$\delta\lambda$  est la largeur spectrale de la valeur quadratique moyenne (rms) de la source (en nm),

$D(\lambda)$  est la dispersion chromatique (en ps/nm·km), et

$L$  est la longueur de l'échantillon (en km).

Le facteur  $4 \times \sqrt{\ln(2)}$  provient de l'utilisation de 25 % de l'amplitude maximale comme seuil pour évaluer le DMD, avec l'utilisation de la largeur spectrale de la valeur quadratique moyenne (rms) en caractérisant la source.

La largeur complète à 25 % de chaque mode à la sortie de la fibre en essai est alors

$$\Delta T_{\text{REF}} = (\Delta T_{\text{PULSE}}^2 + \Delta t_{\text{chrom}}^2)^{1/2} \quad (\text{C.2})$$

et la valeur du DMD est donnée par

$$DMD = (T_{\text{SLOW}} - T_{\text{FAST}}) - \Delta T_{\text{REF}} \quad (\text{C.3})$$

Noter que tandis que  $\Delta T_{\text{PULSE}}$  est fixé par la durée de l'impulsion optique et la largeur de bande du détecteur, la valeur de  $\Delta t_{\text{chrom}}$  varie avec la longueur de l'échantillon. Limiter l'effet de la dispersion chromatique implique l'utilisation d'une source avec une valeur de  $\delta\lambda$  qui dépend de la valeur du DMD mesuré, de la longueur de l'échantillon mesurée et de la valeur de  $\Delta T_{\text{PULSE}}$ , comme indiqué à l'Annexe B.

Dans la mesure où la détermination du DMD implique la comparaison des durées de propagation de différentes formes d'ondes provenant de mesures réalisées à différentes positions de décalage, l'instabilité de la synchronisation ou la durée de l'impulsion de sonde est un problème potentiel. La limite inférieure de consignation pour le DMD,  $0,9(\Delta T_{\text{REF}})$ , assure une erreur <10 %, limitée essentiellement par l'instabilité totale du système.

Au cours de l'élaboration de la présente méthode d'essai, la déconvolution de la réponse du système avec les impulsions optiques détectées a été considérée comme une méthode d'évaluation de  $T_{\text{FAST}}$  et  $T_{\text{SLOW}}$ . Cependant, compte tenu de la limite relativement grossière sur la valeur la plus faible du DMD qui peut être mesurée, il n'y a pas d'avantage à utiliser une méthode de déconvolution bien plus complexe. Les erreurs provenant de l'utilisation de la simple soustraction de  $\Delta T_{\text{REF}}$  sont inférieures à 1 % pour le  $DMD \geq 0,9(\Delta T_{\text{REF}})$ .

The temporal width of the optical pulse and the finite detector bandwidth are characterized as  $\Delta T_{\text{PULSE}}$ . In the limit of small  $\Delta T_{\text{PULSE}}$ , and assuming a Gaussian shape for the spectrum of the source, the temporal width at 25 % of maximum of each mode at the output of the fibre under test will be

$$\Delta t_{\text{chrom}} = 4 \times \sqrt{\ln(2)} \cdot \delta\lambda \cdot D(\lambda) \cdot L \quad (\text{C.1})$$

where

- $\delta\lambda$  is the rms spectral width of the source (in nm),
- $D(\lambda)$  is the chromatic dispersion (in ps/(nm·km)), and
- $L$  is the sample length (in km).

The factor  $4 \times \sqrt{\ln(2)}$  comes from the use of 25 % of maximum amplitude as the threshold for evaluating DMD, along with the use of rms spectral width in characterizing the source.

The full width at 25 % of each mode at the output of the fibre under test is then

$$\Delta T_{\text{REF}} = (\Delta T_{\text{PULSE}}^2 + \Delta t_{\text{chrom}}^2)^{1/2}, \quad (\text{C.2})$$

and the DMD is given by

$$\text{DMD} = (T_{\text{SLOW}} - T_{\text{FAST}}) - \Delta T_{\text{REF}}. \quad (\text{C.3})$$

Note that while  $\Delta T_{\text{PULSE}}$  is fixed by the duration of the optical pulse and the detector bandwidth, the value of  $\Delta t_{\text{chrom}}$  varies with the sample length. Limiting the effect of chromatic dispersion involves using a source with a value of  $\delta\lambda$  that depends on the value of DMD being measured, the length of sample being measured, and the value of  $\Delta T_{\text{PULSE}}$ , as detailed in Annex B.

Since the determination of DMD involves comparing the delay times from different waveforms from measurements made at different offset positions, jitter in the timing or duration of the probe pulse is a potential problem. The lower reporting limit for the DMD,  $0,9(\Delta T_{\text{REF}})$ , assures an error of <10 %, limited primarily by the total system jitter.

In the course of developing this test method, deconvolution of the system response with the detected optical pulses was considered as a method of evaluating  $T_{\text{FAST}}$  and  $T_{\text{SLOW}}$ . However, given the relatively coarse limit on the smallest value of DMD that can be measured, there is no advantage to be gained from using a much more complicated deconvolution method. Errors from using simple subtraction of  $\Delta T_{\text{REF}}$  are less than 1 % for  $\text{DMD} \geq 0,9(\Delta T_{\text{REF}})$ .