

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60793-1-48

Première édition
First edition
2003-05

Fibres optiques –

**Partie 1-48:
Méthodes de mesure et procédures d'essai –
Dispersion de mode de polarisation**

Optical fibres –

**Part 1-48:
Measurement methods and test procedures –
Polarization mode dispersion**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60793-1-48:2003

Numérotation des publications

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

Editions consolidées

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

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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

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

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut.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 (http://www.iec.ch/online_news/justpub/jp_entry.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 (http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut.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 (http://www.iec.ch/online_news/justpub/jp_entry.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

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC

60793-1-48

Première édition
First edition
2003-05

Fibres optiques –

**Partie 1-48:
Méthodes de mesure et procédures d'essai –
Dispersion de mode de polarisation**

Optical fibres –

**Part 1-48:
Measurement methods and test procedures –
Polarization mode dispersion**

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

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

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

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

XA

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	6
INTRODUCTION	10
1 Domaine d'application.....	12
2 Références normatives	12
3 Généralités	12
3.1 Méthode d'essai de référence	16
3.2 Applicabilité	18
4 Appareillage.....	18
4.1 Source de lumière et polariseurs.....	18
4.2 Optique d'entrée	20
4.3 Positionneur d'entrée	20
4.4 Extracteur de mode de gaine	20
4.5 Filtre de mode d'ordre élevé	20
4.6 Positionneur de sortie	22
4.7 Optique de sortie	22
4.8 Détecteur	22
4.9 Calculateur	22
5 Echantillonnage et échantillons en essai.....	22
5.1 Longueur des échantillons en essai	24
5.2 Déploiement	24
6 Procédure	26
6.1 Déployer la fibre ou le câble et préparer les extrémités.....	26
6.2 Fixer les extrémités à l'optique d'entrée et à l'optique de sortie.....	26
6.3 Utiliser le calculateur pour effectuer les analyses et les mesures indiquées dans les Annexes A, B et C pour les trois méthodes de mesure.....	26
6.4 Remplir les documents.....	26
7 Calcul ou interprétation des résultats	26
8 Documentation.....	26
8.1 Informations requises pour chaque mesure.....	26
8.2 Informations nécessairement disponibles.....	28
9 Informations relatives à la spécification.....	28
Annexe A (normative) Méthode de mesure par analyseur fixe	30
Annexe B (normative) Méthode d'évaluation de Stokes	46
Annexe C (normative) Méthode par interférométrie	60
Annexe D (informative) Résultats d'intercomparaison de la dispersion de mode de polarisation (PMD) et observations.....	68
Annexe E (informative) Stratégies d'amélioration de la précision.....	76
Annexe F (informative) Algorithme d'identification de pic pour le comptage d'extrema utilisé dans la Méthode A	80
Annexe G (informative) Support théorique de l'analyse de Fourier pour la Méthode A	84
Annexe H (informative) Détermination du régime de couplage de mode à partir des valeurs du retard de groupe différentiel (DGD)	90

CONTENTS

FOREWORD	7
INTRODUCTION	11
1 Scope	13
2 Normative references	13
3 General	13
3.1 Reference test method	17
3.2 Applicability	19
4 Apparatus	19
4.1 Light source and polarizers	19
4.2 Input optics	21
4.3 Input positioner	21
4.4 Cladding mode stripper	21
4.5 High-order mode filter	21
4.6 Output positioner	23
4.7 Output optics	23
4.8 Detector	23
4.9 Computer	23
5 Sampling and specimens	23
5.1 Specimen length	25
5.2 Deployment	25
6 Procedure	27
6.1 Deploy the fibre or cable and prepare the ends	27
6.2 Attach the ends to the input and output optics	27
6.3 Engage the computer to complete the scans and measurements found in Annexes A, B, and C for the three measurement methods	27
6.4 Complete documentation	27
7 Calculation or interpretation of results	27
8 Documentation	27
8.1 Information required for each measurement	27
8.2 Information to be available	29
9 Specification information	29
Annex A (normative) Fixed analyser measurement method	31
Annex B (normative) Stokes evaluation method	47
Annex C (normative) Interferometry method	61
Annex D (informative) PMD intercomparison results and observations	69
Annex E (informative) Strategies for improving precision	77
Annex F (informative) Peak identification algorithm for extrema counting used in Method A	81
Annex G (informative) Fourier analysis theoretical background for Method A	85
Annex H (informative) Determination of mode-coupling regime from DGD values	91

Annexe I (informative) Equivalence formelle des méthodes d'analyses des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (PSA et JME) et comparaison des résultats	96
Annexe J (informative) Détermination de la dispersion de mode de polarisation (PMD) par la Méthode C pour un interférogramme avec un pic d'autocorrélation	110
Annexe K (informative) Glossaire	116
Bibliographie	118
Figure A.1 – Schémas relatifs à l'analyseur fixe	30
Figure A.2 – Exemple de fonction R pour la méthode à analyseur fixe	36
Figure A.3 – La dispersion de mode de polarisation (PMD) par l'analyse de Fourier	44
Figure B.1 – Représentation schématique pour la Méthode B	46
Figure B.2 – Retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde	50
Figure B.3 – Histogramme des valeurs du retard de groupe différentiel (DGD)	50
Figure C.1 – Représentation schématique pour la Méthode C	60
Figure C.2 – Données typiques obtenues par la Méthode C	64
Figure D.1 – Comparaison des méthodes PMD et des calculs à partir des tests interlaboratoires	70
Figure H.1 – Exemple d'estimation de statistiques de mesures de PMD – Valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) mesurées et idéales avec superposition des courbes de Maxwell	94
Figure I.1 – Variation du DGD en fonction de la fréquence optique	100
Figure I.2 – Trajectoires des états principaux de polarisation (PSP) sur la sphère de Poincaré	102
Figure I.3 – Différences entre les trajectoires des PSP et les trois paramètres de Stokes à partir de la Figure I.2	102
Figure I.4 – Système de coordonnées rectangulaires définies par les vecteurs réponses de Stokes, et angles de direction de la dispersion de polarisation dans ce système de coordonnées	104
Figure I.5 – Arc de cercle décrit par l'état de polarisation de sortie dans l'intervalle $[\omega, \omega + \Delta\omega]$	106
Tableau D.1 – Comparaison des méthodes et calculs de la dispersion de mode de polarisation (PMD) à partir de la séquence interlaboratoire PMD COST 241	72
Tableau D.2 – Matrice de méthodes de mesure de PMD	74

Annex I (informative) Formalistic equivalence of PSA and JME and result comparison	97
Annex J (informative) PMD determination by Method C for an interferogram with an auto-correlation peak	111
Annex K (informative) Glossary	117
Bibliography	119
Figure A.1 – Block diagrams for fixed analyser	31
Figure A.2 – Examples of the R-function for the fixed analyser method	37
Figure A.3 – PMD by Fourier analysis	45
Figure B.1 – Block diagram for Method B	47
Figure B.2 – DGD versus wavelength	51
Figure B.3 – Histogram of DGD values	51
Figure C.1 – Schematic diagram for Method C	61
Figure C.2 – Typical data obtained by Method C	65
Figure D.1 – PMD wavelength scan data round robin	71
Figure H.1 – Example assessments of PMD measurement statistics – measured and ideal DGD values with superimposed Maxwell curves	95
Figure I.1 – DGD versus optical frequency	101
Figure I.2 – PSP trajectories on the Poincaré sphere	103
Figure I.3 – Differences between PSP trajectories and the three Stokes parameters from Figure I.2	103
Figure I.4 – Rectangular system of coordinates defined by the response Stokes vectors and direction angles of the polarization dispersion vector in this system of coordinates	105
Figure I.5 – Arc of a circle described by the output SOP in the interval $[\omega, \omega + \Delta\omega]$	107
Table D.1 – Comparison of PMD methods and calculations from the COST 241 PMD Round Robin	73
Table D.2 – Matrix of PMD measurement methods	75

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

FIBRES OPTIQUES –

Partie 1-48: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Dispersion de mode de polarisation

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 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 60793-1-48 a été établie par le sous-comité 86A: Fibres et câbles, du comité d'études 86 de la CEI: Fibres optiques.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
86A/849/FDIS	86A/858/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.

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

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

OPTICAL FIBRES –

**Part 1-48: Measurement methods and test procedures –
Polarization mode dispersion**

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 60793-1-48 has been prepared by subcommittee 86A: Fibres and cables, of IEC technical committee 86: Fibre optics.

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

FDIS	Report on voting
86A/849/FDIS	86A/858/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.

La CEI 60793-1-4X de la CEI 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
- 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 de 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 polarisation¹
- Partie 1-49: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Retard différentiel de mode²

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.

¹ A publier.

² A publier.

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
- 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 dispersion¹
- Part 1-49: Measurement methods and test procedures – Differential mode delay²

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.

¹ To be published.

² To be published.

INTRODUCTION

La dispersion de mode de polarisation (PMD) provoque l'élargissement d'une impulsion optique dans le domaine temporel. Cette dispersion pourrait détériorer les qualités de fonctionnement d'un système de télécommunication. L'effet peut être lié aux vitesses différentielles de phase et de groupe et aux temps d'arrivée $\delta\tau$ correspondants des différentes composantes de polarisation du signal. Pour une source à bande suffisamment étroite, l'effet peut être lié à un retard de groupe différentiel (DGD), $\Delta\tau$, entre paires d'états principaux de polarisation (PSP) polarisées orthogonalement, pour une longueur d'onde donnée. Pour une transmission à large bande, les temps divergent et conduisent à une impulsion de sortie élargie dans le domaine temporel. Dans ce cas, l'élargissement peut être lié à la moyenne des valeurs du DGD.

Pour des grandes longueurs de fibres, le DGD est aléatoire tant dans le domaine temporel que dans le domaine spectral, dans la mesure où il dépend des détails de la biréfringence sur toute la longueur de la fibre. Il est également sensible aux variations de température et aux perturbations mécaniques le long de la fibre. Pour cette raison, une façon utile de caractériser la PMD des fibres de grande longueur est de le faire en terme de valeur attendue $\langle\Delta\tau\rangle$, c'est-à-dire le DGD moyen sur toute la longueur d'onde. En principe, la valeur attendue $\langle\Delta\tau\rangle$ ne subit pas de grandes modifications pour une fibre donnée, d'un jour à l'autre ou d'une source à l'autre, à la différence des paramètres $\delta\tau$ ou $\Delta\tau$. De plus, $\langle\Delta\tau\rangle$ est un moyen de prévision utile des qualités de fonctionnement des systèmes optiques.

Le terme «PMD» est utilisé à la fois dans un sens général désignant deux modes de polarisation ayant des vitesses de groupes différentes, et dans le sens spécifique de la valeur attendue $\langle\Delta\tau\rangle$. Le DGD, $\Delta\tau$, ou l'élargissement d'impulsion, $\delta\tau$, peuvent faire l'objet d'une moyenne sur la longueur d'onde, conduisant à $\langle\Delta\tau\rangle_\lambda$, ou sur la durée, conduisant à $\langle\Delta\tau\rangle_t$, ou sur la température, conduisant à $\langle\Delta\tau\rangle_T$. Dans la plupart des cas, il n'est pas nécessaire de faire la distinction entre ces différentes options pour obtenir $\langle\Delta\tau\rangle$.

La longueur de couplage l_c est la longueur de fibre ou de câble avec laquelle un couplage appréciable commence à se produire entre les deux états de polarisation (SOP). Si la longueur de fibre L satisfait à la condition $L \ll l_c$, le couplage de mode est négligeable et $\langle\Delta\tau\rangle$ augmente avec la longueur de fibre. Le coefficient de la PMD correspondant est:

$$\text{coefficient de PMD «de faible longueur»} = \langle\Delta\tau\rangle/L \quad (1)$$

Dans la pratique, les fibres sont presque toujours en régime $L \gg l_c$ et le couplage de mode est aléatoire. Si l'on établit que le couplage de mode est aléatoire, $\langle\Delta\tau\rangle$ augmente avec la racine carrée de la longueur de la fibre, et

$$\text{coefficient de PMD «de grande longueur»} = \langle\Delta\tau\rangle/\sqrt{L} \quad (2)$$

Le texte fournit des moyens pour décider de l'opportunité d'utiliser l'Equation (1) ou l'Equation (2) pour calculer le coefficient de la PMD. Les unités types sont ps pour $\Delta\tau$, km pour L , ps/km pour la PMD «faible longueur» et ps/ $\sqrt{\text{km}}$ pour la PMD «grande longueur». Voir 5.1 et l'Annexe H pour obtenir plus de détails sur la détermination du régime de couplage de mode.

INTRODUCTION

Polarization mode dispersion (PMD) causes an optical pulse to spread in the time domain. This dispersion could impair the performance of a telecommunications system. The effect can be related to differential phase and group velocities and corresponding arrival times $\delta\tau$ of different polarization components of the signal. For a sufficiently narrow band source, the effect can be related to a differential group delay (DGD), $\Delta\tau$, between pairs of orthogonally polarized principal states of polarization (PSP) at a given wavelength. For broadband transmission, the delays bifurcate and result in an output pulse that is spread out in the time domain. In this case, the spreading can be related to the average of DGD values.

In long fibre spans, DGD is random in both time and wavelength since it depends on the details of the birefringence along the entire fibre length. It is also sensitive to time-dependent temperature and mechanical perturbations on the fibre. For this reason, a useful way to characterize PMD in long fibres is in terms of the expected value $\langle\Delta\tau\rangle$, or the mean DGD over wavelength. In principle, the expected value $\langle\Delta\tau\rangle$ does not undergo large changes for a given fibre from day to day or from source to source, unlike the parameters $\delta\tau$ or $\Delta\tau$. In addition, $\langle\Delta\tau\rangle$ is a useful predictor of lightwave system performance.

The term “PMD” is used both in the general sense of two polarization modes having different group velocities, and in the specific sense of the expected value $\langle\Delta\tau\rangle$. The DGD $\Delta\tau$ or pulse broadening $\delta\tau$ can be averaged over wavelength, yielding $\langle\Delta\tau\rangle_\lambda$, or time, yielding $\langle\Delta\tau\rangle_t$, or temperature, yielding $\langle\Delta\tau\rangle_T$. For most purposes, it is not necessary to distinguish between these various options for obtaining $\langle\Delta\tau\rangle$.

The coupling length l_c is the length of fibre or cable at which appreciable coupling between the two SOPs begins to occur. If the fibre length L satisfies the condition $L \ll l_c$, mode-coupling is negligible and $\langle\Delta\tau\rangle$ scales with fibre length. The corresponding PMD coefficient is

$$\text{“short-length” PMD coefficient} = \langle\Delta\tau\rangle/L. \quad (1)$$

Fibres in practical systems are nearly always in the $L \gg l_c$, regime and mode-coupling is random. If mode-coupling is found to be random, $\langle\Delta\tau\rangle$ scales with the square root of fibre length, and

$$\text{“long-length” PMD coefficient} = \langle\Delta\tau\rangle/\sqrt{L} \quad (2)$$

The text provides means for deciding when it is appropriate to use Equations (1) or (2) to calculate the PMD coefficient. Typical units are ps for $\Delta\tau$, km for L , ps/km for short-length PMD, and ps/ $\sqrt{\text{km}}$ for long-length PMD. See 5.1 and Annex H for more details on determining the mode-coupling regime.

FIBRES OPTIQUES –

Partie 1-48: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Dispersion de mode de polarisation

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60793 s'applique à trois méthodes de mesure de la dispersion de mode de polarisation (PMD) qui sont décrites à l'Article 3. Elle établit les prescriptions uniformes pour mesurer la PMD de la fibre optique contribuant ainsi au contrôle des fibres et des câbles dans les relations commerciales.

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 1-1: Spécification générale – Généralités*

CEI 60793-1-44:2001, *Fibres optiques – Partie 1-44: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Longueur d'onde de coupure*

CEI 60793-1-50:2001, *Fibres optiques – Partie 1-50: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Chaleur humide (essai continu)*

CEI 60793-2-50:2002, *Fibres optiques – Partie 2-50: Spécifications de produits – Spécification intermédiaire pour les fibres unimodales de classe B*

CEI 60794-3:2001, *Câbles à fibres optiques – Partie 3: Spécification intermédiaire – Câbles extérieurs*

CEI 61280 (toutes les parties), *Procédures d'essai de base des sous-systèmes de télécommunication à fibres optiques*

CEI 61282-3:2002, *Guides de conception des systèmes de communication à fibre optiques – Partie 3: Calcul de la dispersion en mode de polarisation* (disponible en anglais seulement)

3 Généralités

Trois méthodes sont décrites pour mesurer la PMD (voir Annexes A, B et C pour plus de détails). Les méthodes sont indiquées ci-dessous dans leur ordre de présentation. Pour certaines méthodes, plusieurs approches sont également proposées pour analyser les résultats mesurés.

Méthode A **Analyseur fixe**

Comptage des extrema (EC)

Transformée de Fourier (FT)

OPTICAL FIBRES –

Part 1-48: Measurement methods and test procedures – Polarization mode dispersion

1 Scope

This part of IEC 60793 applies to three methods of measuring PMD, which are described in Clause 3. It establishes uniform requirements for measuring the PMD of optical fibre, thereby assisting in the inspection of fibres and cables for commercial purposes.

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 1-1: Generic specification – General*

IEC 60793-1-44:2001, *Optical fibres – Part 1-44: Measurement methods and test procedures – Cut-off wavelength*

IEC 60793-1-50:2001, *Optical fibres – Part 1-50: Measurement methods and test procedures – Damp heat (steady state)*

IEC 60793-2-50:2002, *Optical fibres – Part 2-50: Product specifications – Sectional specification for class B single-mode fibres*

IEC 60794-3:2001, *Optical fibre cables – Part 3: Sectional specification – Outdoor cables*

IEC 61280 (all parts), *Fibre optic communication subsystem basic test procedures*

IEC 61282-3:2002, *Fibre optic communication system design guides – Part 3: Calculation of polarization mode dispersion in fibre optic systems*

3 General

Three methods are described for measuring PMD (see Annexes A, B and C for more details). The methods are listed below in the order of their introduction. For some methods, multiple approaches of analysing the measured results are also provided.

Method A **Fixed analyser**

Extrema counting (EC)

Fourier transform (FT)

Méthode B **Evaluation des paramètres de Stokes**

Analyse des valeurs propres de la matrice de Jones (JME)

Analyse de la sphère de Poincaré (PSA)

Etat de polarisation (SOP)

Méthode C **Interférométrie**

Couplage de mode négligeable

Couplage de mode aléatoire

Toutes ces méthodes sont appropriées pour des mesures en laboratoire sur des longueurs de fabrication (d'usine) de fibres optiques et de câbles optiques. Pour toutes ces méthodes, des modifications dans le déploiement de l'échantillon peuvent fausser les résultats. Pour des longueurs installées, seule la Méthode C convient pour mesurer un câble optique susceptible de bouger ou de vibrer.

Toutes ces méthodes prescrivent des sources lumineuses contrôlées au niveau d'un ou de plusieurs états de polarisation (SOP). Toutes ces méthodes nécessitent l'injection de lumière dans un large domaine spectral (c'est-à-dire, ayant une largeur comprise entre 50 nm et 200 nm) afin d'obtenir une valeur de PMD qui soit caractéristique du domaine (c'est-à-dire 1 300 nm ou 1 550 nm). Les méthodes diffèrent sur les points suivants:

- a) les caractéristiques de la longueur d'onde de la source;
- b) les caractéristiques physiques qui sont réellement mesurées,
- c) les méthodes d'analyse.

La Méthode A mesure la PMD en mesurant une réponse à une variation de la lumière à bande étroite dans une gamme de longueurs d'onde. Au niveau de la source, la lumière est polarisée linéairement pour un ou plusieurs états de polarisation. Pour chaque état, la variation de la puissance de sortie filtrée à travers un analyseur de polarisation fixe, par rapport à la puissance détectée sans l'analyseur, est mesurée en fonction de la longueur d'onde. La fonction mesurée résultante peut être analysée de deux manières:

- En comptant le nombre de pics et de creux (comptage des extrema) de la courbe et en appliquant une formule précédemment indiquée [1]³ pour être en accord avec la moyenne des valeurs du retard de groupe différentiel (DGD). Cette analyse est considérée comme une approche dans le domaine de fréquences.
- En prenant la transformée de Fourier de la fonction mesurée. Cette transformée équivaut à l'élargissement d'impulsion obtenu par la transmission à large bande de la Méthode C. Une caractérisation appropriée de la largeur de la fonction transformée concorde avec les valeurs moyennes du DGD.

La Méthode B mesure la PMD en mesurant une réponse à une variation d'un rayonnement lumineux à bande étroite dans une gamme de longueurs d'onde. Au niveau de la source, la lumière a une polarisation linéaire pour un ou plusieurs états de polarisation. Le vecteur de Stokes de la lumière en sortie est mesuré pour chaque longueur d'onde. La variation de ces vecteurs de Stokes en fonction de la fréquence angulaire (longueur d'onde) ω et en fonction de la variation (éventuelle) de l'état de polarisation en entrée permet d'obtenir le retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde, par le biais de relations fondées sur les définitions suivantes:

$$\frac{ds(\omega)}{d\omega} = \Omega(\omega) \times s(\omega) \quad (3a)$$

³ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie.

Method B Stokes parameter evaluation

Jones matrix eigenanalysis (JME)

Poincaré sphere analysis (PSA)

State of polarization (SOP)

Method C Interferometry

Negligible mode-coupling

Random mode-coupling

All these methods are suitable for laboratory measurements of factory lengths of optical fibre and optical fibre cable. For all methods, changes in the deployment of the specimen can alter the results. For installed lengths, only Method C is appropriate for measurements of installed optical fibre cable that may be moving or vibrating.

All methods require light sources that are controlled at one or more SOPs. All methods require injecting light across a broad spectral region (i.e. 50 nm to 200 nm wide) to obtain a PMD value that is characteristic of the region (i.e. 1300 nm or 1550 nm). The methods differ in

- a) the wavelength characteristics of the source;
- b) the physical characteristics that are actually measured;
- c) the analysis methods.

Method A measures PMD by measuring a response to a change of narrowband light across a wavelength range. At the source, the light is linearly polarized at one or more states of polarization. For each state, the change in output power that is filtered through a fixed polarization analyser, relative to the power detected without the analyser, is measured as a function of wavelength. The resulting measured function can be analysed in one of two ways.

- By counting the number of peaks and valleys (extrema counting) of the curve and application of a formula that has been shown [1]³ to agree with the average of DGD values. This analysis is considered as a frequency domain approach.
- By taking the Fourier transform of the measured function. This transform is equivalent to the pulse spreading obtained by the broadband transmission of Method C. Appropriate characterization of the width of the transform function agrees with the average of DGD values.

Method B measures PMD by measuring a response to a change of narrowband light across a wavelength range. At the source, the light is linearly polarized at one or more states of polarization. The Stokes vector of the output light is measured for each wavelength. The change of these Stokes vectors with angular optical frequency (wavelength), ω and with the (optional) change in input state of polarization yields the DGD as a function of wavelength through relationships that are based on the following definitions:

$$\frac{ds(\omega)}{d\omega} = \Omega(\omega) \times s(\omega) \quad (3a)$$

³ Figures in square brackets refer to the bibliography.

$$\Delta\tau(\omega) = \|\Omega(\omega)\| \quad (3b)$$

où

s est le vecteur de Stokes en sortie;

Ω est le vecteur de dispersion de polarisation dans la direction des PSP;

$\Delta\tau$ est le DGD.

Pour les deux méthodes d'analyses des valeurs propres de la Matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (JME et PSA) linéaires, trois états de polarisation (SOP), positionnés de façon nominale à 0°, 45° et 90° (orthogonaux sur la sphère de Poincaré), doivent être injectés pour chaque longueur d'onde. Pour l'analyse des états de polarisation (SOP), un seul état d'entrée est requis.

La méthode d'analyse des valeurs propres de la Matrice de Jones (JME) est appliquée en transformant les vecteurs de Stokes de sortie en matrices de Jones [2], en combinant de façon appropriée les matrices à des longueurs d'onde voisines et en utilisant les valeurs propres du résultat pour calculer le DGD, grâce à une formule d'argument à la fréquence de base.

La méthode d'analyse de la sphère de Poincaré (PSA) est appliquée en effectuant un calcul algébrique matriciel sur les vecteurs de Stokes de sortie normalisés pour déduire le vecteur de Stokes de sortie associé à la biréfringence circulaire au niveau de deux longueurs d'onde voisines, puis en appliquant une formule en Arc sinus pour obtenir le DGD.

La méthode de l'état de polarisation (SOP) est fondée sur une évaluation par morceaux de l'équation 3a en utilisant les vecteurs de Stokes normalisés mesurés.

Les méthodes d'analyses des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (JME et PSA) sont mathématiquement équivalentes pour des hypothèses communes. La méthode des états de polarisation (SOP) donne des résultats corrects lorsque le transit du vecteur de Stokes de sortie s'est bien déroulé (couplage de mode négligeable), mais elle peut donner des résultats incorrects lorsque le vecteur de Stokes de sortie change rapidement et aléatoirement. Le temps de mesure supplémentaire, requis pour les trois états de polarisation d'entrée pour les méthodes d'analyses des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (JME et PSA), permet de renforcer la fiabilité de la mesure.

La Méthode C est basée sur une source de lumière à large bande qui est linéairement polarisée. La corrélation croisée du champ électromagnétique émergent est déterminée par le diagramme d'interférence de la lumière en sortie. La caractérisation de ce diagramme est effectuée soit en calculant la largeur efficace pour des échantillons à couplage de mode aléatoire, soit en évaluant le «pic» le plus extrême de l'interférogramme pour des échantillons à couplage de mode négligeable. En ce qui concerne les échantillons à couplage de mode aléatoire, la largeur efficace est liée à la valeur moyenne du retard de groupe différentiel (PMD).

Des informations communes aux trois méthodes sont fournies aux Articles 3 à 9. et des exigences relatives à chaque méthode individuelle figurent respectivement dans les Annexes A, B et C.

3.1 Méthode d'essai de référence

La Méthode B, c'est-à-dire l'évaluation des paramètres de Stokes (uniquement pour les méthodes d'analyses des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (JME et PSA)), constitue la méthode d'essai de référence («RTM») qui doit être utilisée pour régler les litiges.

$$\Delta\tau(\omega) = \|\Omega(\omega)\| \quad (3b)$$

where

$\mathbf{s}$ is the output Stokes vector;

Ω is the polarization dispersion vector in the direction of the PSPs;

$\Delta\tau$ is the DGD.

For both the JME and PSA analysis approaches, three linear SOPs at nominally 0°, 45°, and 90° (orthogonal on the Poincaré sphere) must be launched for each wavelength. For the SOP analysis, only one input state is required.

The JME approach is completed by transforming the output Stokes vectors to Jones matrices [2], appropriate combination of the matrices at adjacent wavelengths, and a calculation using the eigenvalues of the result to obtain the DGD, by application of an argument formula, at the base frequency.

The PSA approach is completed by doing matrix algebra on the normalized output Stokes vectors to infer the output Stokes vector associated with circular birefringence at two adjacent wavelengths, followed by the application of an arcsine formula to obtain the DGD.

The SOP approach is based on a piecewise evaluation of Equation (3a) using the normalized measured Stokes vectors.

The JME and PSA approaches are mathematically equivalent for common assumptions. The SOP approach yields valid results when the transit of the output Stokes vector is well-behaved (negligible mode-coupling) but can produce incorrect results when the output Stokes vector changes rapidly and randomly. The extra measurement time required for the three input states of polarization for JME and PSA result in a more robust measurement.

Method C is based on a broadband light source that is linearly polarized. The cross-correlation of the emerging electromagnetic field is determined by the interference pattern of the output light. The characterization of this pattern is either done by computing the r.m.s width for randomly mode-coupled specimens or by evaluation of the most extreme interferogram “spike” for specimens with negligible mode-coupling. For random mode-coupled specimens, the r.m.s width relates to the average DGD (PMD).

Information common to all three methods is contained in Clauses 3 to 9, and requirements pertaining to each individual method appear in Annexes A, B, and C, respectively.

3.1 Reference test method

Method B, Stokes parameter evaluation (only JME and PSA approaches), is the reference test method (RTM), which shall be the one used to settle disputes.

3.2 Applicabilité

La PMD dans une fibre est un paramètre statistique. La CEI 60794-3 contient une prescription statistique sur la PMD, qui est fondée sur des mesures échantillonnées effectuées sur un câble optique et sur des calculs relatifs à des liaisons bout à bout. La CEI 60793-2-50 fait état d'une valeur maximale facultative pour des fibres individuelles non câblées à l'appui des résultats relatifs à des fibres câblées – à condition que l'on ait démontré, pour un modèle de câble donné, la stabilité de la relation entre des mesures effectuées sur des fibres non câblées et sur des fibres câblées.

Il convient de choisir le déploiement de la fibre ou du câble de manière à minimiser tout couplage de mode induit de l'extérieur. Les sources d'un tel couplage de mode externe peuvent être:

- a) une tension excessive;
- b) une flexion excessive induite par
 - entrecroisements des fibres sur un touret de transport;
 - aplatissement d'une fibre dans un câble sur une bobine de trop petite taille;
 - rayon de courbure trop petit;
- c) torsion excessive.

Il convient d'évaluer la reproductibilité des mesures individuelles après avoir soumis la fibre à des perturbations, pour permettre un échantillonnage de toute la plage de combinaisons de couplages de modes. Pour cela, il est par exemple possible de faire varier légèrement la température ou d'effectuer des petits ajustements dans le déploiement. L'Annexe D fournit des informations sur la comparaison entre les méthodes, basées sur des études d'essai interlaboratoire. Gisin [3] a fait état d'une limite de reproductibilité fondamentale pour des mesures montrant que la reproductibilité augmente proportionnellement à la PMD et à la largeur spectrale de la source. L'Annexe E fournit des informations sur des méthodes permettant d'améliorer la précision.

La CEI 61282-3 contient des directives relatives au calcul de la PMD pour des systèmes comprenant d'autres composants tels que des compensateurs de dispersion ou des amplificateurs optiques. Des méthodes d'essai relatives aux amplificateurs optiques sont données dans la CEI 61280.

4 Appareillage

L'appareillage suivant est commun aux trois méthodes de mesure. Les Annexes A, B et C contiennent des dessins ainsi que d'autres prescriptions nécessaires aux équipements respectivement utilisés dans chacune des trois méthodes.

4.1 Source de lumière et polariseurs

Se reporter aux Annexes A, B et C pour les choix détaillés des caractéristiques spectrales de la source de lumière. La source doit générer un rayonnement suffisant à la ou aux longueurs d'onde prévues et son intensité doit être stable pendant une période suffisamment longue pour effectuer la mesure.

Pour toutes les méthodes, il est nécessaire que la lumière soit polarisée linéairement avant d'être injectée dans la fibre. Utiliser un dispositif de réglage de polarisation pour transformer la lumière de la source et la faire passer à un état à peu près circulaire pour le centre de la gamme de longueurs d'onde utilisée. Utiliser un polariseur pour transformer cette lumière en lumière à polarisation linéaire à un ou plusieurs états. Le polariseur peut faire partie d'un groupe de trois polariseurs orientés à 0°, 45° et 90°. Dans un montage à faisceau ouvert, le réglage de la polarisation peut être effectué au moyen d'une lame à retard. Il est possible de vérifier le montage du dispositif de réglage de la polarisation en mesurant la puissance

3.2 Applicability

PMD in fibre is a statistical parameter. IEC 60794-3 includes a statistical requirement on PMD that is based on sampled measurements of optical fibre cable and calculations for concatenated links. IEC 60793-2-50 includes an optional maximum for individual uncabled fibres for support of cabled results – provided that the relationship of measurements on uncabled fibre and cabled fibre have been demonstrated to be stable for a given cable construction.

The fibre or cable deployment should be selected so externally induced mode-coupling is minimized. Sources of such external mode-coupling can be:

- a) excessive tension;
- b) excessive bending induced from
 - fibre cross-overs on a shipping reel;
 - crimping of fibre within a cable on a spool that is too small;
 - too small a bend radius;
- c) excessive twist.

Reproducibility of individual measurements should be evaluated after perturbing the fibre to allow sampling the full range of mode-coupling combinations. This can be done by, for example, changing the temperature slightly or making small adjustments in the deployment. Annex D includes information on the inter-comparison of the methods based on round-robin studies. Gisin [3] reported a fundamental reproducibility limit for measurements showing that the reproducibility increases as the PMD increases and as the spectral width of the source increases. Annex E includes information on approaches to improving the precision.

Guidelines for the calculation of PMD for systems that include other components such as dispersion compensators or optical amplifiers are given in IEC 61282-3. Test methods for optical amplifiers are given in IEC 61280.

4 Apparatus

The following apparatus is common to all three measurement methods. Annexes A, B, and C include layout drawings and other equipment requirements for each of the three methods, respectively.

4.1 Light source and polarizers

See Annexes A, B, and C for detailed options of the spectral characteristics of the light source. The source shall produce sufficient radiation at the intended wavelength(s) and be stable in intensity over a time period sufficient to perform the measurement.

For all methods, the polarization of the light is required to be linearly polarized before it is injected into the fibre. Use a polarization adjuster to transform the source light to a state that is roughly circular for the centre of the wavelength range being used. Use a polarizer to transform this light to linear polarization at one or more states. The polarizer can be one of a set of three oriented at 0°, 45°, and 90°. In an open-beam set-up, a wave plate may perform the polarization adjustment. The polarization adjuster set-up can be verified by measuring the output power at the three linear polarizations. If the output powers are within 3 dB of one another, the adjuster set-up is suitable.

de sortie pour les trois polarisations linéaires. Si les puissances de sortie sont situées à 3 dB les unes des autres, le montage du dispositif de réglage de la polarisation est convenable.

Pour les Méthodes A et B, la largeur spectrale effective de la source, $\Delta\lambda$, doit être suffisamment étroite pour que la lumière provenant de la fibre reste polarisée dans toutes les conditions de mesure. Un degré de polarisation (DOP) de 90 % ou plus est préférable, bien que des mesures puissent être effectuées avec des valeurs aussi faibles que 25 % avec une précision réduite. Pour une valeur donnée du retard de groupe différentiel (DGD), $\Delta\tau$, le degré de polarisation (DOP) le plus faible qui peut en résulter est donné par la relation suivante:

$$DOP(\%) = 100 \exp \left[- \frac{1}{4 \ln(2)} \left(\frac{\pi c \Delta\tau \Delta\lambda}{\lambda_0^2} \right)^2 \right] \quad (4)$$

en supposant une largeur de spectre gaussien (largeur à mi-hauteur) centrée en λ_0 (c étant la vitesse de la lumière dans le vide.)

Pour la Méthode C, le rapport d'extinction du polariseur sur toute la largeur spectrale de la source doit être supérieur à 20 dB.

Pour la Méthode B, l'analyse par états de polarisation (SOP), le contrôleur de polarisation est réglé de manière à optimiser les conditions de détermination de l'angle de rotation de la sphère de Poincaré, si nécessaire, en choisissant un état d'entrée pour lequel la variation des vecteurs de Stokes de sortie en fonction de la longueur d'onde est maximale.

4.2 Optique d'entrée

Il est possible d'utiliser un système de lentilles optiques ou une fibre amorce pour exciter l'échantillon en essai. Il est souhaitable que la puissance couplée à l'échantillon en essai soit relativement insensible à la position de son extrémité d'entrée. Pour cela, il est possible d'utiliser un faisceau d'injection qui sature spatialement et angulairement l'extrémité d'entrée de la fibre.

Si une épissure en bout est utilisée, il est nécessaire d'utiliser une substance adaptatrice d'indice entre la fibre amorce et l'échantillon en essai afin d'éviter les phénomènes d'interférence. La puissance couplée à la fibre doit être stable pendant toute la durée de la mesure.

4.3 Positionneur d'entrée

Prévoir des moyens permettant de positionner l'extrémité d'entrée de l'échantillon en essai par rapport à la source de lumière. On peut, par exemple, utiliser des étages de micropositionneur à trois axes (x-y-z), ou des dispositifs de couplage mécanique tels que des connecteurs, des épissures sous vide, ou des épissures à trois tiges, etc. La position de la fibre doit rester stable pendant toute la durée de l'essai.

4.4 Extracteur de mode de gaine

Utiliser un dispositif qui extrait les modes de gaine. Dans certaines conditions, le revêtement de la fibre remplira cette fonction.

4.5 Filtre de mode d'ordre élevé

Utiliser un moyen permettant d'éliminer des modes de propagation d'ordre élevé dans la gamme de longueur d'onde désirée, qui est supérieure ou égale à la longueur d'onde de coupure de l'échantillon en essai (se reporter à la CEI 60793-1-44). Par exemple, une boucle d'un rayon de 30 mm sur la fibre suffit généralement.

For Methods A and B, the effective spectral width of the source, $\Delta\lambda$, shall be narrow enough so that light emerging from the fibre remains polarized under all conditions of measurement. A degree of polarization (DOP) of 90 % or greater is preferred, although measurements may be performed with values as low as 25 % with reduced precision. For a given value of DGD, $\Delta\tau$, the lowest DOP which can result is given by

$$DOP(\%) = 100 \exp \left[- \frac{1}{4 \ln(2)} \left(\frac{\pi c \Delta\tau \Delta\lambda}{\lambda_0^2} \right)^2 \right] \quad (4)$$

assuming a Gaussian spectrum width (full-width half-max) centred at λ_0 (c is the speed of light in vacuum.)

For Method C, the polarizer extinction ratio over the source spectral width shall be >20 dB.

For Method B, the SOP approach, the polarization controller is set to optimize the conditions for the determination of the rotation angle on the Poincaré sphere, if necessary, by selecting an input state for which the variation in the output Stokes vectors with wavelength is maximal.

4.2 Input optics

An optical lens system or fibre pigtail may be employed to excite the specimen. It is recommended that the power coupled into the specimen be relatively insensitive to the position of its input end face. This can be accomplished by using a launch beam that spatially and angularly overfills the input end face.

If using a butt splice, employ index-matching material between the fibre pigtail and the specimen to avoid interference effects. The coupling shall be stable for the duration of the measurement.

4.3 Input positioner

Provide means of positioning the input end of the specimen to the light source. Examples include the use of x-y-z micropositioner stages, or mechanical coupling devices such as connectors, vacuum splices, three-rod splices, etc. The position of the fibre shall remain stable over the duration of the measurement.

4.4 Cladding mode stripper

Use a device that extracts cladding modes. In some circumstances, the fibre coating will perform this function.

4.5 High-order mode filter

Use a means to remove high-order propagating modes in the desired wavelength range that is greater than, or equal to, the cut-off wavelength (see IEC 60793-1-44) of the specimen. For example, a one-turn bend of radius = 30 mm on the fibre is generally sufficient.

4.6 Positionneur de sortie

Prévoir un moyen adapté pour aligner l'extrémité de la fibre par rapport à l'optique de sortie. Un tel couplage peut inclure l'utilisation de lentilles, ou il peut s'agir d'un connecteur mécanique couplé à une fibre amorce de détecteur.

Prévoir un moyen, tel qu'un microscope à vision latérale ou une caméra munie d'un réticule, pour placer la fibre à une distance fixe par rapport à l'optique de sortie. Cela peut suffire à assurer seulement un ajustement longitudinal si la fibre est maintenue dans le plan latéral par un dispositif tel qu'une plaque à succion.

4.7 Optique de sortie

Se reporter à l'Annexe A, B ou C, selon le cas.

4.8 Détecteur

Pour la détection de signal, on utilise un détecteur optique linéaire et stable sur la gamme des intensités et des durées de mesure rencontrées en effectuant la mesure. Un système type pourrait être constitué d'une détection synchrone par un amplificateur verrouillé à découpage, un wattmètre optique, un analyseur de spectre optique ou un polarimètre. Pour utiliser l'ensemble de la gamme spectrale de la source, il faut que le système de détection ait une gamme de longueurs d'onde qui couvre les longueurs d'onde produites par la source de lumière. Pour plus de détails, se reporter à l'Annexe A, B ou C, selon le cas.

4.9 Calculateur

Utiliser un calculateur pour effectuer des opérations telles que la commande de l'appareillage, les mesures d'intensité et le traitement des données pour obtenir les résultats finaux.

5 Echantillonnage et échantillons en essai

Un échantillon en essai est constitué d'une longueur connue de fibre optique unimodale (CEI 60793-2-50) qui peut être câblée ou non. L'échantillon et les fibres amorces doivent être fixés en position à une température ambiante constante pendant toute la durée de la mesure. Sauf spécification contraire, des conditions ambiantes normales doivent être employées. Dans le cas de fibres et câbles installés, on peut utiliser les conditions de déploiement courantes.

On peut observer la stabilité mécanique et thermique du dispositif d'essai en utilisant les procédures qui suivent. Pour la Méthode A, la puissance de sortie provenant de la fibre à une longueur d'onde fixe est mesurée avec l'analyseur de sortie en place. Pendant une période correspondant à une mesure type complète, il convient que la variation de la puissance de sortie soit faible par rapport aux variations produites par une modification de la longueur d'onde. Pour la Méthode B, on visualise l'état de polarisation de sortie de la fibre en essai sur l'affichage d'une sphère de Poincaré. Pendant une période correspondant à une paire adjacente de mesures de matrice de Jones, il convient que la variation de la polarisation de sortie soit faible par rapport à la variation produite par une modification de la longueur d'onde. La Méthode C est normalement efficace par rapport à une légère variation de la température ou à de légers déplacements de la fibre.

Les extrémités de sortie d'entrée et de sortie de l'échantillon en essai doivent être préparées comme il se doit, conformément aux prescriptions applicables à l'appareillage et à la procédure. Des précautions doivent être prises pour éviter tout problème de réflexion.

4.6 Output positioner

Provide a suitable means for aligning the fibre output end face to the output optics. Such coupling may include the use of lenses or may be a mechanical connector to a detector pigtail.

Provide means such as a side-viewing microscope or camera with a cross-hair to locate the fibre at a fixed distance from the output optics. It may be sufficient to provide only longitudinal adjustment if the fibre is constrained in the lateral plane by a device such as a vacuum chuck.

4.7 Output optics

See Annex A, B, or C, as appropriate.

4.8 Detector

For signal detection, an optical detector is used which is linear and stable over the range of intensities and measurement times that are encountered in performing the measurement. A typical system might include synchronous detection by a chopper/lock-in amplifier, an optical power meter, optical spectrum analyser, or a polarimeter. To use the entire spectral range of the source, the detection system must have a wavelength range which includes the wavelengths produced by the light source. See Annex A, B, or C, as appropriate, for additional details.

4.9 Computer

Use a computer to perform operations such as controlling the apparatus, taking intensity measurements, and processing the data to obtain the final results.

5 Sampling and specimens

A specimen is a known length of single-mode optical fibre (IEC 60793-2-50) which may or may not be cabled. The sample and pigtails must be fixed in position at a nominally constant temperature throughout the measurement. Standard ambient conditions shall be employed unless otherwise specified. In the case of installed fibres and cables, prevailing deployment conditions may be used.

Mechanical and temperature stability of the test device may be observed by the following procedures. For Method A, the output power from the fibre at a fixed wavelength is measured with the output analyser in place. In a time period corresponding to a typical complete measurement, the output power change should be small relative to the changes produced by a wavelength increment. For Method B, the output state of polarization of the test fibre on a Poincaré sphere display is viewed. In a time period corresponding to an adjacent pair of Jones matrix measurements, the output polarization change should be small relative to the change produced by a wavelength increment. Method C is normally robust with regard to slight temperature change or fibre movements.

End faces for the input and output ends of the test sample must be prepared as appropriate for the requirements of the apparatus and procedure. Precautions shall be taken to avoid any reflections.

5.1 Longueur des échantillons en essai

La longueur des échantillons en essai dépend de trois facteurs:

- a) le coefficient de PMD minimal prescrit;
- b) le régime de couplage de mode;
- c) le rapport signal à bruit.

Chaque méthode et procédure d'essai sont limitées à une valeur minimale de PMD (ps) qui peut être mesurée. Dans un grand nombre de cas, cette valeur minimale peut être déterminée sur une base théorique. Elle peut être également déterminée expérimentalement par l'analyse de la distribution mesurée. Pour des fibres en régime de couplage de mode élevé, le coefficient de PMD minimal est déterminé en divisant la valeur de PMD par la racine carrée de la longueur de la fibre (km). Dans le cas d'un couplage de mode négligeable, on divise par la longueur. La longueur mesurée et la valeur de PMD minimale mesurable détermineront alors le coefficient de PMD minimal mesurable. Pour effectuer la mesure, on peut choisir des fibres ou des câbles ayant des longueurs suffisantes pour permettre d'atteindre ce minimum. En variante, on peut couper les échantillons en essai à une longueur satisfaisante. La valeur de PMD minimale mesurable doit être documentée. La longueur de chaque échantillon en essai doit être notée.

NOTE La longueur peut être également limitée par la méthode de déploiement (se reporter à 5.2) et par la gamme dynamique de l'appareil de mesure.

Les valeurs spécifiées dans la CEI 60794-3 et la CEI 60793-1-50 expriment le coefficient de PMD en $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ – en effet, ces documents supposent que la longueur mesurée suffit à induire le régime de couplage de mode aléatoire. Pour un type donné de fibre ou un modèle donné de câble, il est possible de confirmer cela en expérimentant la technique de mesure à fibre coupée qui consiste à couper l'échantillon entre les mesures et à déterminer la valeur de PMD à chaque longueur de l'échantillon. Les longueurs de fibres, au-dessus desquelles la valeur de PMD dépend de la racine carrée de la longueur, peuvent être considérées comme des longueurs à couplage de mode aléatoire. L'Annexe H fournit des informations supplémentaires sur la confirmation des hypothèses relatives au couplage de mode aléatoire.

La gamme dynamique est limitée par la méthode, la puissance de la source et l'affaiblissement global de l'échantillon en essai, qui est affecté par la longueur. En général, cette limite doit être déterminée sur la base de mises en œuvre spécifiques par des moyens expérimentaux. Cette limite doit être documentée.

5.2 Déploiement

Le déploiement de la fibre ou du câble peut influencer le résultat. Pour des mesures normales destinées à évaluer la conformité à la spécification, les prescriptions suivantes s'appliquent.

5.2.1 Fibre non câblée

Il est nécessaire de maintenir la fibre à une tension minimale, soit en l'enroulant de manière lâche autour d'une bobine ayant une surface lisse, soit en la déployant en boucles sur une surface lisse et plane (lissage au moins équivalent à celui d'un papier de qualité 88 g/m^2)

Dans les deux cas, la fibre doit être déployée de telle sorte qu'elle ne repasse pas sur elle-même et qu'elle présente des rayons de courbure supérieurs à 15 cm. Certaines fibres amorces sur lesquelles la fibre est raccordée doivent aussi avoir des rayons de courbures supérieurs à 15 cm.

Pour les mesures les plus précises des échantillons avec une faible PMD, utiliser la méthode d'évaluation des paramètres de Stokes. Pour la fibre et le câble optique, les mesures de PMD ont une variabilité inhérente aux échantillons, laquelle augmente quand la valeur de PMD diminue ou quand la fenêtre de la longueur d'onde qui est échantillonnée diminue [3].

5.1 Specimen length

The specimen length is dictated by three factors:

- a) minimum desired PMD coefficient;
- b) mode-coupling regime;
- c) signal-to-noise ratio.

Each test method and implementation is limited to a minimum PMD value (ps) that can be measured. In many cases, this minimum can be determined on the basis of theory. It can also be determined experimentally by examining the measured distribution. For fibres in the high mode-coupling regime, the minimum PMD coefficient is determined by dividing the PMD value by the square root of the fibre length (km). For the negligible mode-coupling case, the division is by the length. The length that is measured and the minimum measurable PMD value will therefore determine the minimum measurable PMD coefficient. Fibres or cables with lengths sufficient to achieve this minimum can be selected for measurement. Alternatively, specimens can be cut to a length that is satisfactory. The minimum measurable PMD value shall be documented. The length of the individual specimens shall be recorded.

NOTE The length may also be limited by the deployment method (see 5.2) and instrument dynamic range.

The values specified in IEC 60794-3 and IEC 60793-1-50 express the PMD coefficient in terms of ps/ $\sqrt{\text{km}}$ – in effect, these documents assume that the length measured is sufficient to induce the randomly mode-coupled regime. For a given fibre type or cable construction, this can be confirmed by doing a cut-back experiment in which the PMD value is measured on a specimen at each of several lengths – achieved by cutting the specimen back between measurements. Lengths above which there is a square-root dependence of the PMD value on length may be considered as randomly mode-coupled. Annex H provides additional information on the confirmation of the randomly mode-coupled assumptions.

The dynamic range is limited by the method, the source power, and the overall loss of the specimen, which is affected by length. This limit must generally be determined on the basis of specific implementations by experimental means. This limit shall be documented.

5.2 Deployment

The deployment of the fibre or cable can influence the result. For normal measurements to be used in specification conformance evaluation, the following requirements apply.

5.2.1 Uncabled fibre

The fibre shall be kept at minimal tension either by loosely wrapping it on a spool with a smooth surface or by deploying in loops on a flat smooth surface (smoothness equivalent or better than paper of grade 88 g/m²).

In either case, the fibre shall be deployed without crossing over itself and with bend radii in excess of 15 cm. Any pigtails to which the fibre is connected shall also have bend radii in excess of 15 cm.

For the most accurate measurements of specimens with low PMD, use the Stokes parameter evaluation method. For optical fibre and cable, PMD measurements have an inherent sampling variability that increases as the PMD value decreases or as the wavelength window that is sampled in the measurement decreases [3]. When PMD measurements are combined

Si les mesures de PMD sont combinées pour évaluer la spécification statistique du câble à fibre optique (se reporter à la CEI 60794-3), cette variabilité donne une possible exagération de la valeur de conception de liaison (PMD_Q). Pour des expériences dans lesquelles des valeurs précises de PMD sont nécessaires, les procédures de l'Annexe E sont recommandées. Cette annexe appelle à des essais complémentaires à la suite des perturbations multiples des échantillons individuels.

NOTE Il est possible d'utiliser d'autres types de déploiement, s'il est démontré que ces déploiements peuvent être appliqués aux valeurs mesurées sur des fibres câblées ou à d'autres conditions de déploiement.

5.2.2 Câble optique

Il est possible que les mesures de PMD sur des fibres contenues dans des câbles enroulés autour de bobines d'expédition ne reflètent pas toujours les valeurs de PMD fonctionnellement pertinentes pour des fibres se trouvant dans la configuration de déploiement de câbles installés. Par conséquent, pour démontrer la conformité à la spécification concernant la PMD d'une fibre câblée, il est possible d'utiliser d'autres configurations de déploiement ou d'autres fonctions de nappage permettant d'établir un lien entre la valeur de PMD sur bobine et la valeur de PMD hors bobine. La configuration exacte du déploiement doit être convenue entre le fournisseur et le client.

6 Procédure

- 6.1 Déployer la fibre ou le câble et préparer les extrémités.
- 6.2 Fixer les extrémités à l'optique d'entrée et à l'optique de sortie.
- 6.3 Utiliser le calculateur pour effectuer les analyses et les mesures indiquées dans les Annexes A, B et C pour les trois méthodes de mesure.
- 6.4 Remplir les documents.

7 Calcul ou interprétation des résultats

Les Equations (1) et (2) permettent de calculer le coefficient de PMD à partir de la valeur de PMD mesurée. Le paragraphe 5.1 et l'Annexe H fournissent des informations permettant de déterminer la formule qu'il faut utiliser. Pour une fibre ou un câble d'une longueur supérieure à 1 km, on observe normalement un couplage de mode aléatoire.

Les Annexes A, B et C contiennent des calculs permettant de convertir les données mesurées en valeurs de PMD.

La CEI 60794-3 et la CEI 61282-3 contiennent des calculs permettant de déterminer la valeur de conception de liaison, PMD_Q , le retard de groupe différentiel maximal, DGD_{max} et la probabilité de le dépasser, P_F . La CEI 61282-3 contient également des calculs permettant de combiner ces valeurs avec les valeurs de PMD d'autres éléments du réseau.

8 Documentation

8.1 Informations requises pour chaque mesure

- a) Identification de l'échantillon en essai
- b) Date de l'essai
- c) Longueur de l'échantillon en essai
- d) Coefficient de PMD et ses unités ($ps/\sqrt{km}$ ou ps/km)
- e) Zone de la longueur d'onde (exemple: 1 300 nm ou 1 550 nm)

to evaluate the statistical specification of optical fibre cable (see IEC 60794-3), this variability leads to a possible overstatement of the link design value (PMD_Q). For experiments in which precise PMD values are needed, the procedures of Annex E are recommended. This annex calls for retests following multiple perturbations of the individual specimens.

NOTE Alternative deployments may be used if applicability to values measured on cabled fibres or other deployment conditions are demonstrated.

5.2.2 Optical fibre cable

PMD measurements on fibres in cables wound on shipping drums may not always reflect the functionally relevant PMD values for fibres in the installed cable deployment configuration. Consequently, to demonstrate compliance with the cabled-fibre PMD specification, alternative deployment configurations or mapping functions relating on-drum PMD value to off-drum PMD value may be used. The exact deployment configuration shall be agreed upon between the supplier and the customer.

6 Procedure

- 6.1 Deploy the fibre or cable and prepare the ends.
- 6.2 Attach the ends to the input and output optics
- 6.3 Engage the computer to complete the scans and measurements found in Annexes A, B, and C for the three measurement methods.
- 6.4 Complete documentation.

7 Calculation or interpretation of results

Equations (1) and (2) provide the calculation of the PMD coefficient from the PMD value that is measured. Subclause 5.1 and Annex H provide information on how to determine which formula to use. For fibre and cable in excess of 1 km, random mode-coupling is normally observed.

Annexes A, B, and C provide calculations to convert the measured data into PMD values.

IEC 60794-3 and IEC 61282-3 provide calculations for computing the link design value, PMD_Q, the maximum differential group delay DGD_{max} and the probability of exceeding it, P_F . IEC 61282-3 also provides calculations to combine these values with the PMD values of other network elements.

8 Documentation

8.1 Information required for each measurement

- a) Specimen identification
- b) Testing date
- c) Specimen length
- d) PMD coefficient and its units (ps/ $\sqrt{\text{km}}$ or ps/km)
- e) Wavelength region (for example, 1 300 nm or 1 550 nm)

8.2 Informations nécessairement disponibles

- a) Méthode de mesure utilisée
- b) Méthode de calcul utilisée
- c) Description de la méthode de déploiement (y compris tout mécanisme de soutien de la fibre)
- d) Gamme de longueur d'onde
- e) Pour les Méthodes A et B, le nombre de longueurs d'onde échantillonnées
- f) Pour la Méthode C, le type de détection des franges
- g) Description de l'équipement
- h) Date du dernier étalonnage
- i) Preuve à l'appui du régime de couplage de mode (indiqué par les unités du coefficient de PMD)
- j) Pour la Méthode B employant une source à bande étroite, la résolution de la gamme de longueurs d'onde et le nombre de longueurs d'onde
- k) Pour la Méthode B employant une source à large bande, la longueur d'onde centrale et la largeur de raie à -3 dB

9 Informations relatives à la spécification

- a) Type de fibre ou de câble
- b) Critères de rejet ou d'acceptation
- c) Zone de longueur d'onde
- d) Tout écart par rapport à cette procédure

8.2 Information to be available

- a) Measurement method used
- b) Calculation approach used
- c) Description of the deployment method (including any fibre support mechanism)
- d) Wavelength range
- e) For Methods A and B, the number of wavelengths sampled
- f) For Method C, the type of fringe-detection technique
- g) Description of the equipment
- h) Date of latest calibration
- i) Evidence supporting the mode-coupling regime (indicated by units of the PMD coefficient)
- j) For Method B with narrowband source, the wavelength range, resolution and number of wavelengths
- k) For Method B with broadband source, the centre wavelength and -3 dB linewidth

9 Specification information

- a) Type of fibre or cable
- b) Failure or acceptance criteria
- c) Wavelength region
- d) Any deviations from this procedure

Annexe A (normative)

Méthode de mesure par analyseur fixe

Cette annexe contient les prescriptions spécifiques à la Méthode A.

A.1 Appareillage

La Figure A.1 illustre les schémas fonctionnels possibles.

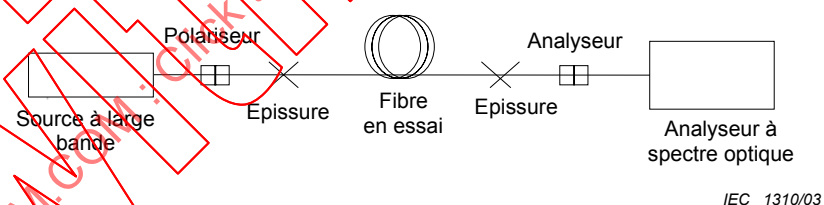
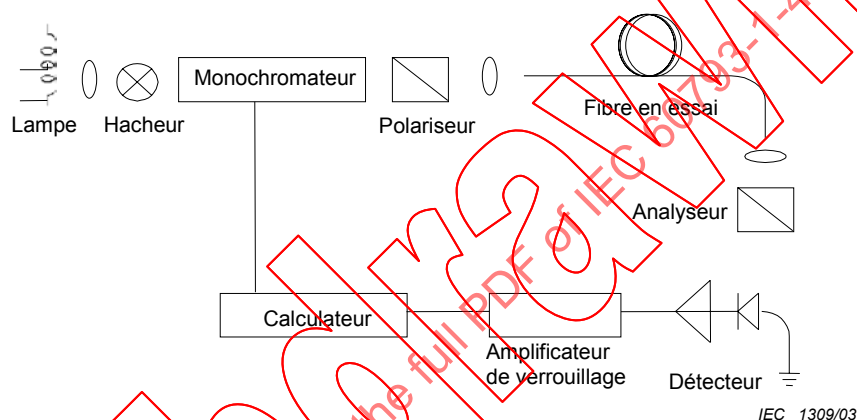


Figure A.1 – Schémas relatifs à l'analyseur fixe

A.1.1 Source de lumière

Dans tous les cas, il est possible d'utiliser deux types de sources de lumière, selon le type d'analyseur. Il est possible d'utiliser une source à bande étroite telle que la combinaison d'une lampe à large bande et d'un monochromateur illustrée dans la Figure A.1a associée à un analyseur de polarisation. Il est possible d'utiliser la source à large bande illustrée dans la Figure A.1b avec un analyseur à filtre passe-bande étroit tel qu'un analyseur de spectre optique ou un interféromètre utilisé comme un analyseur de spectre par la transformée de Fourier placé avant l'analyseur. Dans le cas d'une source à large bande, on prendra comme largeur spectrale la largeur du filtre, pour les besoins des calculs.

Annex A (normative)

Fixed analyser measurement method

This annex contains requirements specific to Method A.

A.1 Apparatus

Figure A.1 shows possible block diagrams.

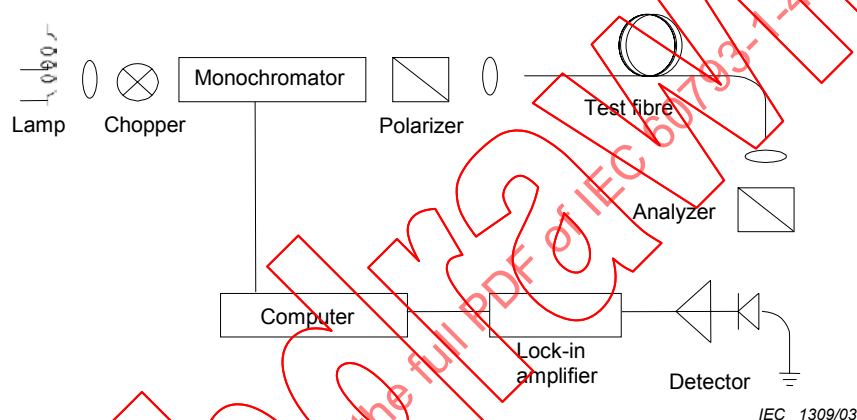


Figure A.1a – Narrowband source

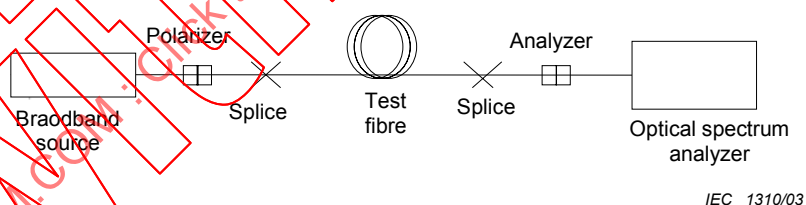


Figure A.1b – Broadband source

Figure A.1 – Block diagrams for fixed analyser

A.1.1 Light source

In all cases, two kinds of light sources may be used, depending on the type of analyser. A narrowband source, such as the broadband lamp and monochromator combination shown in Figure A.1a, can be used with a polarization analyser. A broadband source as shown in Figure A.1b can be used with a narrow bandpass filtering analyser such as an optical spectrum analyser or an interferometer used as a Fourier transform spectrum analyser placed before the analyser. In the case of a broadband source, the width of the filter is taken as the spectral width for the purpose of calculations.

In both cases, the spectral width shall be sufficiently small to maintain the desired degree of polarization (see 4.1). In both cases, the range of wavelengths shall be sufficient to provide a PMD measurement of sufficient precision at the specified wavelength region (see Clause A.3).

Dans les deux cas, la largeur spectrale doit être suffisamment faible pour maintenir le degré de polarisation prescrit (se reporter à 4.1). Dans les deux cas, la gamme de longueurs d'ondes doit être suffisamment étendue pour permettre de mesurer la PMD avec une précision suffisante dans la zone de longueur d'onde spécifiée (se reporter à l'Article A.3).

Pour que toutes les caractéristiques dans le spectre optique aient une résolution adéquate, il convient que la largeur spectrale soit comme suit:

$$\Delta\lambda / \lambda_0 < (8\nu\Delta\tau_{\max})^{-1} \quad (\text{A.1})$$

où

$\nu = c/\lambda$ est la fréquence optique;

$\Delta\lambda$ est la largeur spectrale;

$\Delta\tau_{\max}$ est le retard de groupe différentiel (DGD) maximal prévu.

Pour une longueur d'onde λ voisine de 1 550 nm, l'Equation (A.1) se ramène à la condition où il convient que $\Delta\lambda$ (nm) soit inférieure à la réciproque de $\Delta\tau$ (ps).

A.1.2 Analyseur

L'orientation angulaire de l'analyseur n'est pas critique, mais il est souhaitable qu'elle reste fixe pendant toute la durée de la mesure. Avec un couplage de mode négligeable ou de faibles valeurs de PMD, un réglage fin de l'analyseur peut s'avérer utile pour maximiser l'amplitude des oscillations illustrées à la Figure A.2 – on peut également y parvenir par rotation de la fibre au niveau des épissures ou des connecteurs.

NOTE Il est possible de remplacer l'analyseur par un polarimètre.

A.2 Procédure

A.2.1 Gamme de longueurs d'onde et modification de longueur d'onde

La procédure consiste à mesurer la puissance en fonction des longueurs d'onde (ou des fréquences optiques) sur l'étendue d'une gamme à un incrément de longueur d'onde défini une fois avec l'analyseur dans le trajet optique et une fois sans l'analyseur dans le trajet optique. La gamme de longueurs d'onde peut influencer la précision du résultat (se reporter à l'Article A.3). Il convient de choisir l'incrément de longueur d'onde de manière à satisfaire l'Equation A.1, sachant que l'incrément de longueur d'onde remplace $\Delta\lambda$.

Si la méthode de transformée de Fourier est utilisée, il convient que la taille d'échelon soit uniforme dans le domaine fréquentiel optique et que le nombre d'échelons soit une puissance de 2. La taille d'échelon du monochromateur, exprimée dans le domaine fréquentiel optique, $\delta\nu$, doit être inférieure d'un facteur deux à la «fréquence d'oscillation» correspondant au retard de groupe différentiel (DGD) maximal mesuré. En raison de la grande quantité de puissance à l'extérieur du moment d'ordre deux pour les fibres à couplage de mode aléatoire, il est nécessaire que la condition de Nyquist soit égale à au moins trois fois la fréquence du moment d'ordre deux pour le retard de groupe différentiel (DGD) maximal prévu. A savoir:

$$\frac{1}{6\delta\nu} > \Delta\tau_{\max} \quad (\text{A.2})$$

NOTE 1 Si, à partir de la transformée de Fourier, il semble évident qu'une quantité importante d'énergie est présente au voisinage de $\Delta\tau_{\max}$, il convient de réduire l'incrément et de répéter la mesure.

NOTE 2 La largeur spectrale de la source est généralement égale ou inférieure au plus petit incrément de longueur d'onde. Par exemple, pour $\Delta\tau_{\max} = 0,67$ ps, une largeur spectrale du monochromateur de 2 nm à 1 550 nm ($\delta\nu = 249$ GHz) est une valeur typique.

To insure that all features in the optical spectrum are adequately resolved, the spectral width should satisfy

$$\Delta\lambda / \lambda_0 < (8\nu\Delta\tau_{\max})^{-1} \quad (\text{A.1})$$

where

$\nu = c/\lambda$ is the optical frequency;

$\Delta\lambda$ is the spectral width;

$\Delta\tau_{\max}$ is the maximum anticipated DGD.

For λ in the vicinity of 1 550 nm, Equation (A.1) reduces to the condition that $\Delta\lambda$ (nm) should be less than the reciprocal of $\Delta\tau$ (ps).

A.1.2 Analyser

The angular orientation of the analyser is not critical but should remain fixed throughout the measurement. With negligible mode-coupling or low PMD values, some adjustment of the analyser may be helpful in maximizing the amplitude of the oscillations in Figure A.2 – which can also be achieved by rotating the fibre at splices or connectors.

NOTE The analyser can be replaced by a polarimeter.

A.2 Procedure

A.2.1 Wavelength range and increment

The procedure requires measuring the power as a function of wavelengths (or optical frequencies) over a range at a defined wavelength increment once with the analyser in the optical path and once without. The wavelength range can influence the precision of the result (see Clause A.3). The wavelength increment should be selected to satisfy Equation (A.1), with the wavelength increment replacing $\Delta\lambda$.

If the Fourier transform method is used, the step size should ideally be uniform in optical frequency and the number of steps should be a power of 2. The monochromator step-size, expressed in optical frequency, $\delta\nu$, must be a factor of two smaller than the “oscillation frequency” corresponding to the maximum DGD measured. Because of the large amount of power outside the second moment for randomly mode-coupled fibres, the Nyquist condition must be at least three times the frequency of the second moment for the maximum anticipated DGD. That is:

$$\frac{1}{6\delta\nu} > \Delta\tau_{\max} \quad (\text{A.2})$$

NOTE 1 If, from the Fourier transform, it is evident that there is significant energy near $\Delta\tau_{\max}$, the measurement should be repeated with a reduced increment.

NOTE 2 The source spectral width is generally equal to, or less than, the smallest wavelength increment. For example, for $\Delta\tau_{\max} = 0,67$ ps, a monochromator spectral width of 2 nm at 1 550 nm ($\delta\nu = 249$ GHz) is typical.

A.2.2 Balayages

Effectuer un balayage avec l'analyseur installé dans le trajet optique. Enregistrer la puissance reçue en la désignant par $P_A(\lambda)$.

Retirer l'analyseur du trajet optique et répéter le balayage. Enregistrer la puissance reçue en la désignant par $P_{Tot}(\lambda)$.

Calculer le rapport de puissance, $R(\lambda)$, comme suit. La Figure A.2 montre un exemple de résultats de couplage de mode à la fois négligeable et aléatoire.

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_{Tot}(\lambda)} \quad (A.3)$$

Il existe une autre procédure qui consiste à laisser l'analyseur en place lors du second balayage, mais à lui faire subir une rotation de 90°. Enregistrer la puissance en la désignant par $P_B(\lambda)$. La formule relative au rapport de puissance s'exprime alors comme suit:

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_A(\lambda) + P_B(\lambda)} \quad (A.4)$$

NOTE 1 Le rapport P_A/P_B pourrait être également utilisé si on utilise le comptage d'extrema.

NOTE 2 Si un polarimètre est utilisé comme élément de détection, les paramètres de Stokes normalisés sont mesurés en fonction de la longueur d'onde. Les trois fonctions spectrales (une par élément de vecteur) sont indépendantes de la puissance reçue et elles correspondent aux trois fonctions indépendantes de rapports de puissance qui peuvent être analysées de la même manière.

A.2.2 Complete the scans

Complete the scan with the analyser in the light path. Record the received power as $P_A(\lambda)$.

Remove the analyser from the light path and repeat the scan. Record the received power as $P_{\text{Tot}}(\lambda)$.

Calculate the power ratio, $R(\lambda)$ as follows. Figure A.2 shows an example of both negligibly and randomly mode-coupled results.

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_{\text{Tot}}(\lambda)} \quad (\text{A.3})$$

An alternative procedure is to leave the analyser in place on the second scan but rotate it 90° . Record the power as $P_B(\lambda)$. The formula for the power ratio is then:

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_A(\lambda) + P_B(\lambda)} \quad (\text{A.4})$$

NOTE 1 The ratio, P_A/P_B , could also be used when extrema counting is used.

NOTE 2 If a polarimeter is used as the detection element, the normalized Stokes parameters are measured versus wavelength. The three spectral functions (one per vector element) are independent of received power and correspond to three independent power ratio functions that can be analysed in the same way.

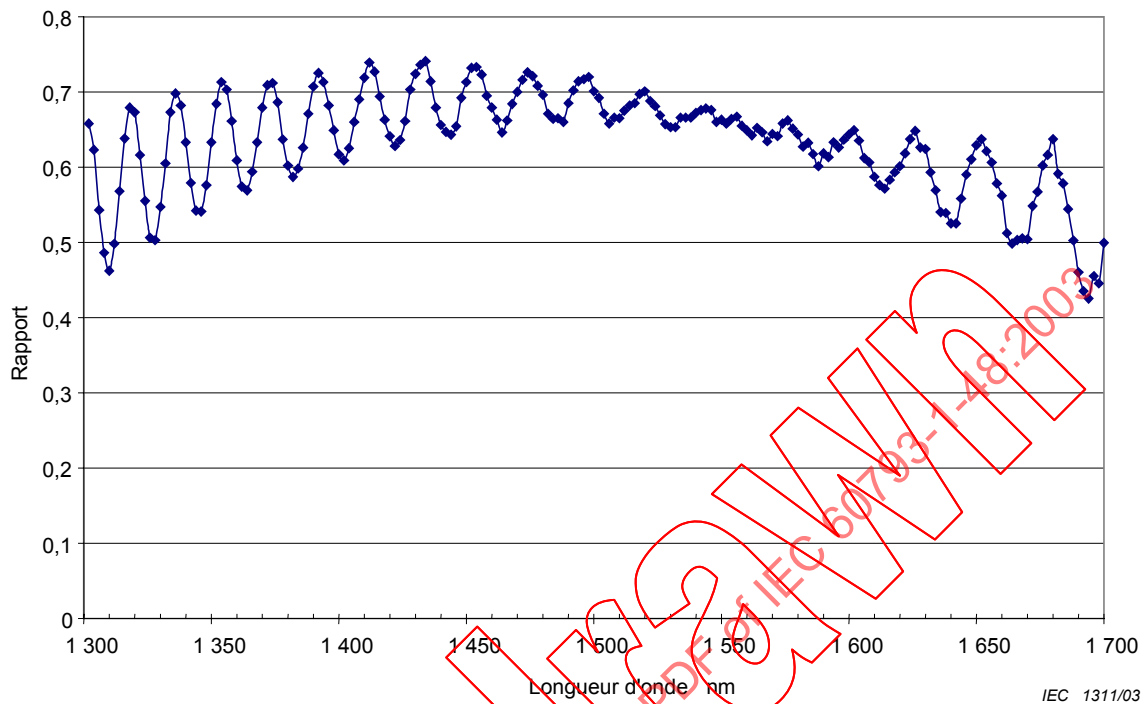


Figure A.2a – Résultats d'analyseur fixe pour un échantillon à couplage de mode négligeable

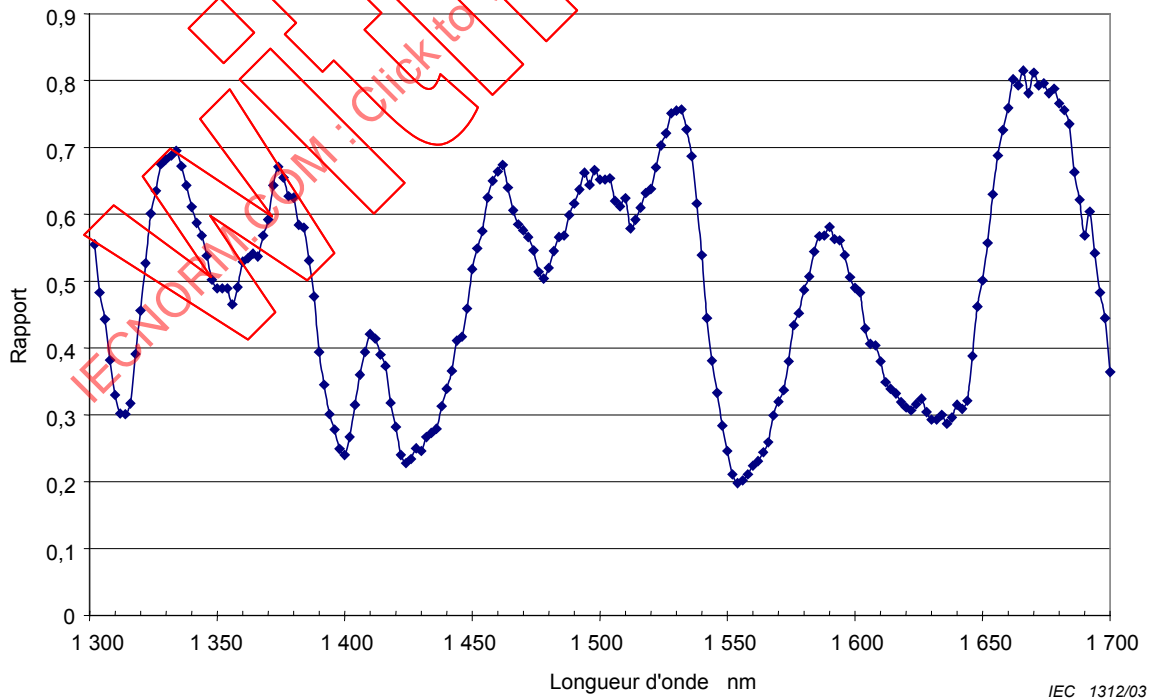


Figure A.2b – Résultats d'analyseur fixe pour un échantillon à couplage de mode aléatoire

Figure A.2 – Exemple de fonction R pour la méthode à analyseur fixe

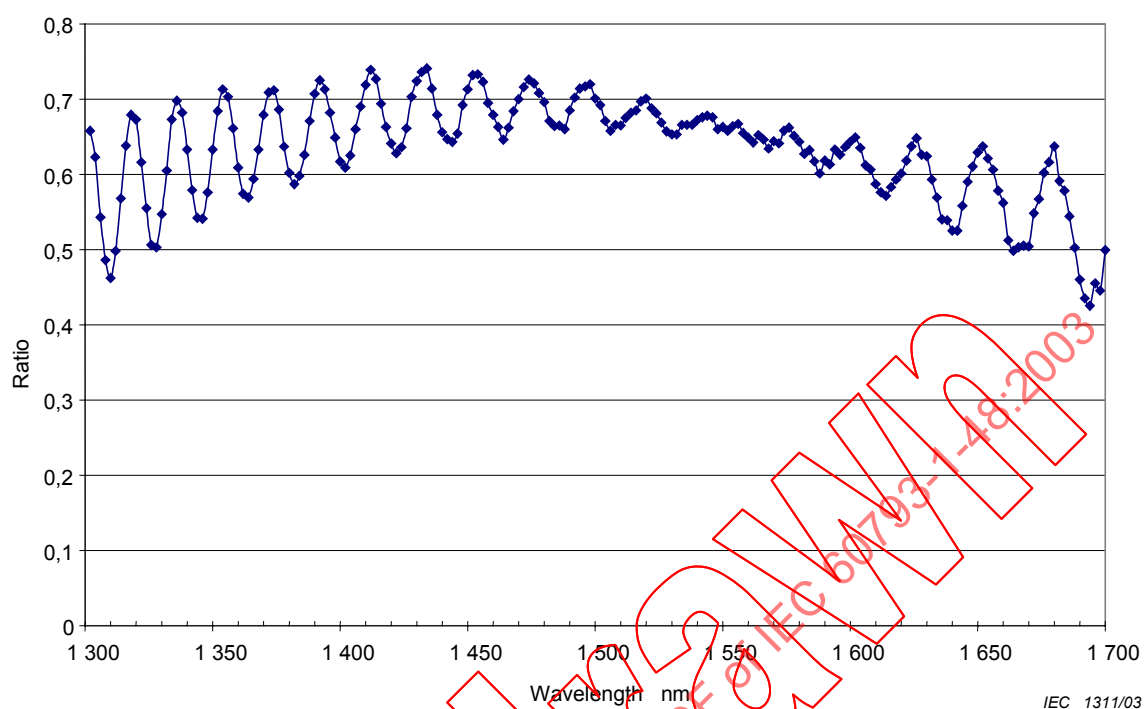


Figure A.2a – Fixed analyzer results for a negligible mode-coupled sample

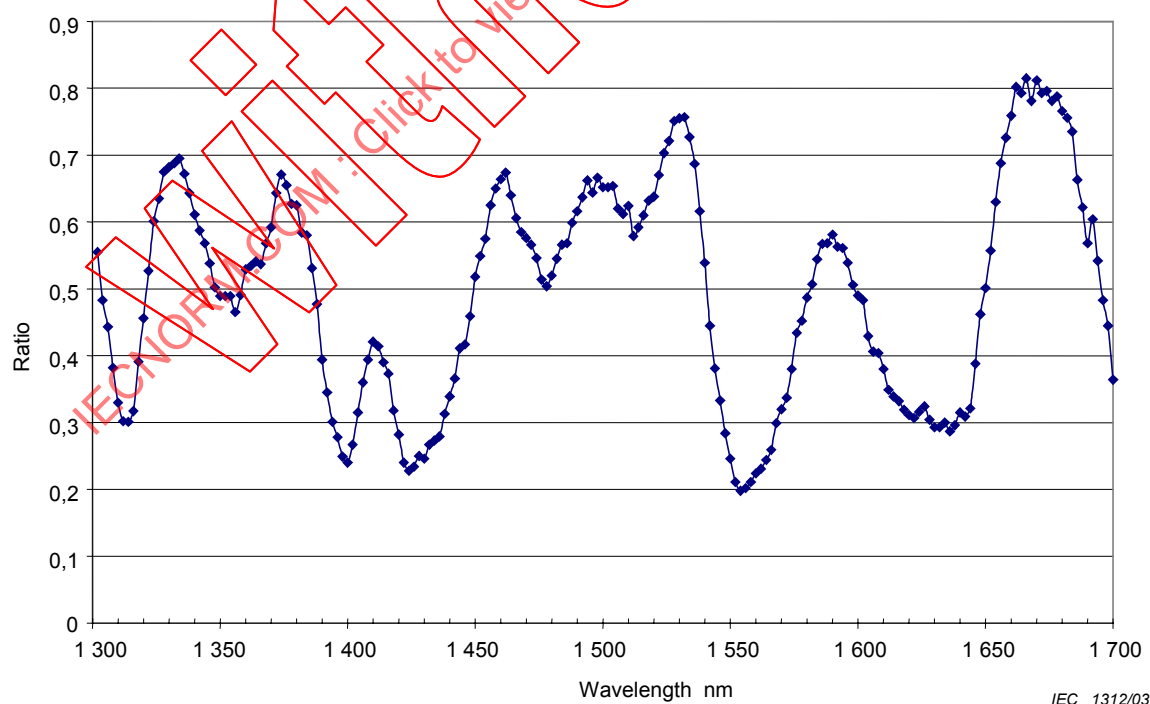


Figure A.2b – Fixed analyzer results for a randomly mode-coupled sample

Figure A.2 – Examples of the R-function for the fixed analyser method

A.3 Calculs

Il existe deux méthodes de calcul de PMD à partir de la fonction R mesurée:

- Comptage des extrema;
- Transformée de Fourier.

A.3.1 Comptage des extrema

Il convient d'obtenir $R(\lambda)$ à des intervalles de longueur d'onde à espacements réguliers entre une longueur d'onde minimale λ_1 et une longueur d'onde maximale λ_2 . E est le nombre d'extrema (maximum et minimum) à l'intérieur de la fenêtre. En variante, il est possible de redéfinir la gamme de longueurs d'onde de manière à ce que λ_1 et λ_2 coïncident avec les extrema, auquel cas E est le nombre d'extrema (incluant λ_1 and λ_2) moins un. Se reporter à l'Annexe F pour obtenir plus de détails sur un algorithme susceptible de faciliter l'identification des extrema. La formule pour la valeur de PMD, $\langle \Delta \tau \rangle$, est la suivante:

$$\langle \Delta \tau \rangle = \frac{kE\lambda_1\lambda_2}{2c(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (\text{A.5})$$

où

c est la vitesse de la lumière dans le vide;

k est un facteur de couplage de mode égal à 1,0 en l'absence de couplage de mode aléatoire et à 0,82 dans la limite de couplage de mode aléatoire.

Si un polarimètre est utilisé comme élément de détection, la moyenne des valeurs dérivées des trois réponses aux paramètres de Stokes normalisés est prise comme valeur finale de PMD.

A.3.2 Transformée de Fourier

Dans cette méthode, une analyse de Fourier de $R(\lambda)$, généralement exprimée dans le domaine de fréquence optique ν , est utilisée pour déduire la PMD. La transformée de Fourier transforme ces données de domaine de fréquence optique en domaine temporel. La transformée de Fourier fournit informations directes concernant la distribution des temps d'arrivée de la lumière $\delta\tau$. Ces données sont post-traitées comme décrit ci-dessous pour en déduire la PMD attendue, $\langle \Delta \tau \rangle$, pour la fibre en essai. Cette méthode est applicable aux fibres à couplage de mode négligeable ou aléatoire. Se reporter à l'Annexe G pour une justification théorique plus détaillée de la méthode.

A.3.2.1 Prétraitement des données et transformée de Fourier

Pour utiliser cette méthode, la transformée de Fourier nécessite normalement des intervalles égaux de fréquence optique, de telle sorte que les données $R(\lambda)$ soient collectées à des valeurs λ et qu'elles forment des intervalles égaux dans le domaine fréquentiel optique. En variante, des données prises à des intervalles λ égaux peuvent être ajustées (par exemple, en utilisant un ajustement par fonction spline du 3^e degré) et l'interpolation utilisée pour produire ces points ou des techniques d'estimation spectrale plus avancées peuvent être utilisées. Dans chaque exemple, le rapport $R(\lambda)$ à chaque valeur λ utilisée est calculé en utilisant l'Equation (A.3) ou l'Equation (A.4), selon le cas approprié.

Il est permis de procéder à une correction de zéro ou à l'interpolation de données et au retrait du niveau continu sur les données de rapport $R(\lambda)$. Le fenêtrage des données peut également être utilisé comme une étape de préconditionnement avant la transformée de Fourier. La transformée de Fourier est maintenant effectuée pour produire la distribution des données en amplitude $P(\delta\tau)$ pour chaque valeur de $\delta\tau$.

A.3 Calculations

There are two approaches for calculating PMD from the R function that is measured:

- extrema counting;
- Fourier transform.

A.3.1 Extrema counting

The function, $R(\lambda)$, should be obtained at equally spaced wavelength intervals from a minimum wavelength of λ_1 to a maximum wavelength of λ_2 . E is the number of extrema (both maxima and minima) within the window. Alternatively, the wavelength range can be redefined so that λ_1 and λ_2 coincide with extrema, in which case E is the number of extrema (including λ_1 and λ_2) minus one. See Annex F for details of an algorithm that may facilitate the identification of extrema. The formula for the PMD value, $\langle \Delta \tau \rangle$, is:

$$\langle \Delta \tau \rangle = \frac{kE\lambda_1\lambda_2}{2c(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (\text{A.5})$$

where

c is the speed of light in vacuum; and

k is a mode-coupling factor which equals 1,0 in the absence of random mode-coupling and 0,82 in the limit of random mode-coupling.

If a polarimeter is used as the detection element, the average of the values derived from the three normalized Stokes parameter responses is taken as the final value of PMD.

A.3.2 Fourier transform

In this method, a Fourier analysis of $R(\lambda)$, usually expressed in the optical frequency domain ν , is used to derive PMD. The Fourier transform transforms this optical frequency domain data to the time domain. The Fourier transform yields direct information on the distribution of light arrival times $\delta\tau$. These data are post-processed as described below to derive the expected PMD, $\langle \Delta \tau \rangle$, for the fibre under test. This method is applicable to fibres with negligible or random mode-coupling. Refer to Annex G for a more detailed theoretical background of the method.

A.3.2.1 Data pre-processing and Fourier transformation

To use this method, the Fourier transform normally requires equal intervals in optical frequency so that $R(\lambda)$ data are collected at λ values in such a way that they form equal intervals in the optical frequency domain. Alternatively, data taken at equal λ intervals may be fitted (for example, by using a cubic spline fit) and interpolation used to generate these points, or more advanced spectral estimation techniques can be used. In each instance, the ratio $R(\lambda)$ at each λ value used is calculated using Equation (A.3) or Equation (A.4) as appropriate.

Zero-padding or data interpolation and d.c. level removal may be performed on the ratio data, $R(\lambda)$. Windowing the data may also be used as a pre-conditioning step before the Fourier transform. The Fourier transform is now carried out to yield the amplitude data distribution $P(\delta\tau)$ for each value of $\delta\tau$.

A.3.2.2 Adaptation des données de transformation

Les données issues de la transformée de Fourier à zéro $\delta\tau$ ont peu de signification dans la mesure où, sauf si elles ont été éliminées avec soin, les composantes continues de $R(\lambda)$ peuvent être dues en partie à la perte d'insertion de l'analyseur, par exemple. Lorsque le niveau continu n'est pas supprimé, jusqu'à deux points de données sont généralement shuntés (non utilisés) dans tout calcul ultérieur. Une variable, j , peut être définie de manière à ce que le «premier bin valide» situé au-dessus de zéro $\delta\tau$ qui est inclus dans les calculs corresponde à $j = 0$.

Pour supprimer le bruit de mesure des calculs suivants, $P(\delta\tau)$ est comparé à un niveau de seuil T_1 , réglé normalement à 200 % du niveau de bruit efficace du système de détection. Il est maintenant nécessaire de déterminer si la fibre a un couplage de mode négligeable ou aléatoire.

S'il s'avère que les premiers points X valables de $P(\delta\tau)$ sont tous inférieurs à T_1 , cela indique qu'il faut que $P(\delta\tau)$ ait des caractéristiques d'impulsion discrètes qui sont typiques des fibres à couplage de mode négligeable (se reporter à l'Annexe G). La valeur de X est égale à trois, sauf si une correction de zéro est utilisée dans l'analyse de Fourier. Dans ce cas, la valeur de X peut être déterminée à partir de

$$\frac{3 \times (\text{le nombre de points de données d'origine})}{(\text{longueur totale de réseau après correction de zéro})}$$

La PMD est calculée en utilisant l'Equation (A.6) pour une fibre à couplage de mode négligeable, ou en utilisant l'Equation (A.7) pour une fibre à couplage de mode aléatoire.

A.3.2.2.1 Calcul de la dispersion de mode de polarisation (PMD) pour des fibres à couplage de mode négligeable

Pour une fibre à couplage de mode négligeable (par exemple, une fibre à haute biréfringence) ou pour un composant biréfringent, $R(\lambda)$ ressemble à une onde modulée (voir Figure A.2a). La transformée de Fourier donnera un résultat $P(\delta\tau)$ contenant un transitoire discret à un emplacement correspondant au temps d'arrivée d'impulsion relatif, $\delta\tau$, dont le centre est la valeur PMD $\langle \Delta\tau \rangle$.

Pour définir le centre du transitoire $\langle \Delta\tau \rangle$, les points où $P(\delta\tau)$ dépasse un second niveau de seuil prédéterminé T_2 , fixé typiquement à 200 % du niveau de bruit efficace du système de détection, sont utilisés dans l'équation.

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau) \delta\tau_e]}{\sum_{e=0}^{M'} P_e(\delta\tau)} \quad (\text{A.6})$$

où $M'+1$ est le nombre de points de données de P dans le transitoire qui dépassent T_2 . $\langle \Delta\tau \rangle$ dans l'Equation (11) est normalement indiqué en picosecondes. Si le dispositif en essai est une fibre de longueur L , le coefficient de PMD peut être calculé en utilisant l'Equation (1). Si aucun transitoire n'est détecté (c'est-à-dire $M' = 0$), alors la PMD est égale à zéro. D'autres paramètres, tels que la largeur efficace du transitoire et/ou la valeur de pic du transitoire, peuvent être notés.

Si le dispositif en essai contient un ou plusieurs éléments biréfringents, il se produira plus d'un transitoire. Pour un nombre n de fibres/dispositifs mis bout à bout, on obtiendra jusqu'à $2^{(n-1)}$ transitoires.

A.3.2.2 Transform data fitting

Fourier transform data at zero $\delta\tau$ has little meaning since, unless carefully removed, d.c. components in $R(\lambda)$ may be partially due to insertion loss of the analyser for example. When the d.c. level is not removed, up to two data points are generally bypassed (not used) in any further calculations. A variable, j , can be defined so that the 'first valid bin' above zero $\delta\tau$ that is included in calculations corresponds to $j = 0$.

In order to remove measurement noise from subsequent calculations, $P(\delta\tau)$ is compared to a threshold level T_1 , typically set to 200 % of the r.m.s. noise level of the detection system. It is now necessary to determine whether the fibre is negligibly or randomly mode-coupled.

If it is found that the first X valid points of $P(\delta\tau)$ are all below T_1 , this indicates that $P(\delta\tau)$ must have discrete spike features characteristic of negligibly coupled fibres (see Annex G). The value of X is equal to three, unless zero-padding is used in the Fourier analysis. In that case, the value of X can be determined from

$$\frac{3 \times (\text{the number of original data points})}{(\text{total length of array after zero - padding})}$$

PMD is calculated using Equation (A.6) for a negligible mode-coupling fibre or Equation (A.7) for a random mode-coupling fibre.

A.3.2.2.1 PMD calculation for fibres with negligible mode coupling

For a negligibly coupled fibre (for example, a high birefringence fibre) or for a birefringent component, $R(\lambda)$ resembles a chirped sine wave (Figure A.2a). Fourier transform will give a $P(\delta\tau)$ output containing a discrete spike at a position corresponding to the relative pulse arrival time, $\delta\tau$, the centroid of which is the PMD value $\langle\Delta\tau\rangle$.

To define the spike centroid $\langle\Delta\tau\rangle$ those points where $P(\delta\tau)$ exceeds a second pre-determined threshold level T_2 , typically set to 200 % of the r.m.s. noise level of the detection system are used in the equation:

$$\langle\Delta\tau\rangle = \frac{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau)\delta\tau_e]}{\sum_{e=0}^{M'} P_e(\delta\tau)} \quad (\text{A.6})$$

where $M' + 1$ is the number of data points of P within the spike which exceed T_2 . $\langle\Delta\tau\rangle$ in Equation (11) is typically quoted in picoseconds. If the device under test is a fibre of length, L , the PMD coefficient may be calculated using Equation (1). If no spike is detected (i.e., $M' = 0$), then PMD is zero. Other parameters such as the r.m.s. spike width and/or spike peak value may be reported.

If the device under test contains one or more birefringent elements, more than one spike will be generated. For a number n of concatenated fibres/devices, up to $2^{(n-1)}$ spikes will be obtained.

A.3.2.2.2 Calcul de la dispersion de mode de polarisation (PMD) pour des fibres à couplage de mode aléatoire

Dans les exemples de couplage de mode aléatoire, $R(\lambda)$ devient une forme d'onde complexe similaire à celle illustrée dans la Figure A.2b, les caractéristiques exactes étant fondées sur les statistiques réelles du processus de couplage à l'intérieur de la fibre/du câble. Les données ayant subi la transformée de Fourier deviennent maintenant une distribution $P(\delta\tau)$ représentant l'autocorrélation de la distribution de probabilité de temps d'arrivée d'impulsion lumineuse, $\delta\tau$, dans la fibre (se reporter à l'Annexe G et à la Figure A.3).

En comptant à partir de $j = 0$, on détermine le premier point de P qui dépasse T_1 , et qui est suivi d'au moins X points de données en dessous de T_1 . Ce point représente le dernier point significatif (c'est-à-dire «l'extrémité») de la distribution $P(\delta\tau)$, pour une fibre à couplage de mode aléatoire, qui n'est pas véritablement affectée par le bruit de mesure. La valeur $\delta\tau$ pour ce point est notée $\delta\tau_{\text{last}}$, et la valeur de j à $\delta\tau_{\text{last}}$ est notée M'' . Cette fibre a un couplage de mode aléatoire; se reporter à l'Annexe H pour déterminer si elle a un couplage de mode aléatoire.

La racine carrée du moment d'ordre deux, σ_R , de cette distribution définit PMD $\langle\Delta\tau\rangle$ de la fibre, et est donnée par

$$\langle\Delta\tau\rangle = \sigma_R = \left\{ \frac{\sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau) \delta\tau_j^2]}{\sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau)]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.7})$$

A.3.2.2.3 Calcul de la dispersion de mode de polarisation (PMD) pour des systèmes de fibres à couplage mélangé

Il peut y avoir des exemples où des fibres/composants à couplage négligeable et une ou plusieurs fibres à couplage aléatoire sont mis bout à bout pour former le système en essai. Dans ce cas, il est possible que la détermination du centre, Equation (A.6), et la dérivation du moment d'ordre deux, Equation (A.7), s'avèrent nécessaires. Noter que les transitoires dans $P(\delta\tau)$ ne peuvent être déterminées qu'au-delà du $\delta\tau_{\text{last}}$ calculé.

A.3.2.2.2 PMD calculation for fibres with random mode-coupling

In instances of random mode-coupling, $R(\lambda)$ becomes a complex waveform similar to Figure A.2b, the exact characteristics being based on the actual statistics of the coupling process within the fibre/cable. The Fourier transformed data now becomes a distribution $P(\delta\tau)$ representing the auto-correlation of the probability distribution of light pulse arrival times, $\delta\tau$, in the fibre (see Annex G and Figure A.3).

Counting up from $j = 0$, the first point of P is determined which exceeds T_1 , and which is followed by at least X data points which fall below T_1 . This point represents the last significant point in (i.e., the 'end' of) the distribution $P(\delta\tau)$, for a randomly mode-coupled fibre, that is not substantially affected by measurement noise. The $\delta\tau$ value for this point is denoted $\delta\tau_{\text{last}}$, and the value of j at $\delta\tau_{\text{last}}$ is denoted M'' . This fibre is randomly mode-coupled; refer to Annex H to determine if it is randomly mode-coupled.

The square root of the second moment, σ_R , of this distribution defines the fibre PMD $\langle \Delta\tau \rangle$, and is given by

$$\langle \Delta\tau \rangle = \sigma_R = \left\{ \frac{\sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau) \delta\tau_j^2]}{\sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau)]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.7})$$

A.3.2.2.3 PMD calculation for mixed-coupling fibre systems

There may be instances where both negligibly coupled fibre/components and randomly coupled fibre(s) are concatenated to form the system under test. In this case, both centroid determination, Equation (A.6), and the second moment derivation, Equation (A.7), may be required. Note that spikes in $P(\delta\tau)$ may only be determined beyond the $\delta\tau_{\text{last}}$ computed.

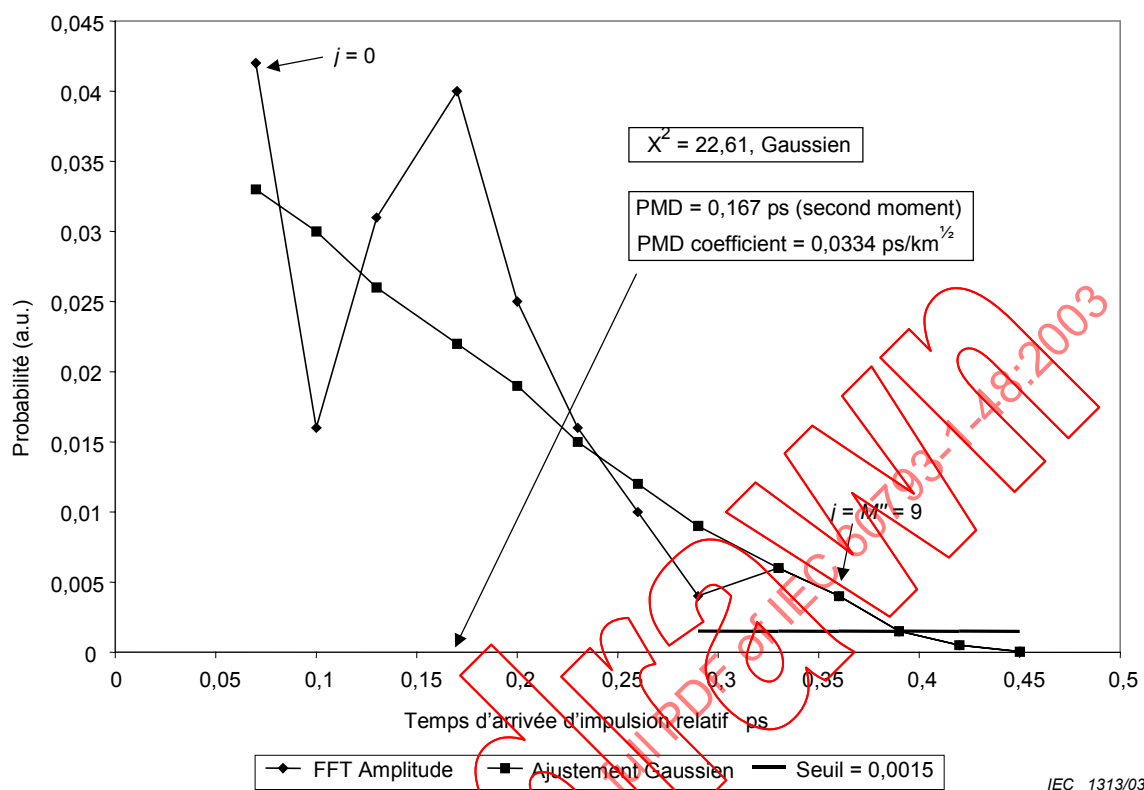


Figure A.3 – La dispersion de mode de polarisation (PMD) par l'analyse de Fourier

A.3.2.3 Plage spectrale

Pour les fibres à couplage aléatoire, il est nécessaire d'utiliser une plage spectrale suffisante pour former un ensemble spectral (moyenne) avec une précision suffisante. L'incertitude statistique peut être réduite en utilisant la plage spectrale la plus large possible (au moins 200 nm, par exemple). Il faut que la précision requise et donc la plage spectrale soient spécifiées avant la mesure.

En complément, de très faibles valeurs $\delta\tau$ donneront de très longues périodes en $R(\lambda)$, et il convient que la plage spectrale de λ_1 à λ_2 couvre au moins deux «cycles» complets, si possible. La plage spectrale couverte définit la valeur $\delta\tau$ la plus faible qui peut être résolue en $P(\delta\tau)$, $\delta\tau_{\min}$.

$$\delta\tau_{\min} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)c_0} \quad (\text{A.8})$$

où le facteur 2 est introduit pour permettre que deux points de données en P et adjacents à zéro soient généralement ignorés. Par exemple, pour $\lambda_1 = 1270$ nm, $\lambda_2 = 1700$ nm, $\delta\tau_{\min} = 0,033$ ps.

Pour des fibres à PMD importante et à couplage négligeable, avec des données de rapport $R(\lambda)$ ressemblant à celles illustrées dans la Figure A.2a, la prescription relative au moyennage spectral décrit ci-dessus peut être assouplie et la plage spectrale peut être réduite (par exemple $(\lambda_2 - \lambda_1) \sim 30$ nm) afin de permettre la variation de PMD en fonction de la longueur d'onde (se reporter à l'Annexe G) à examiner.

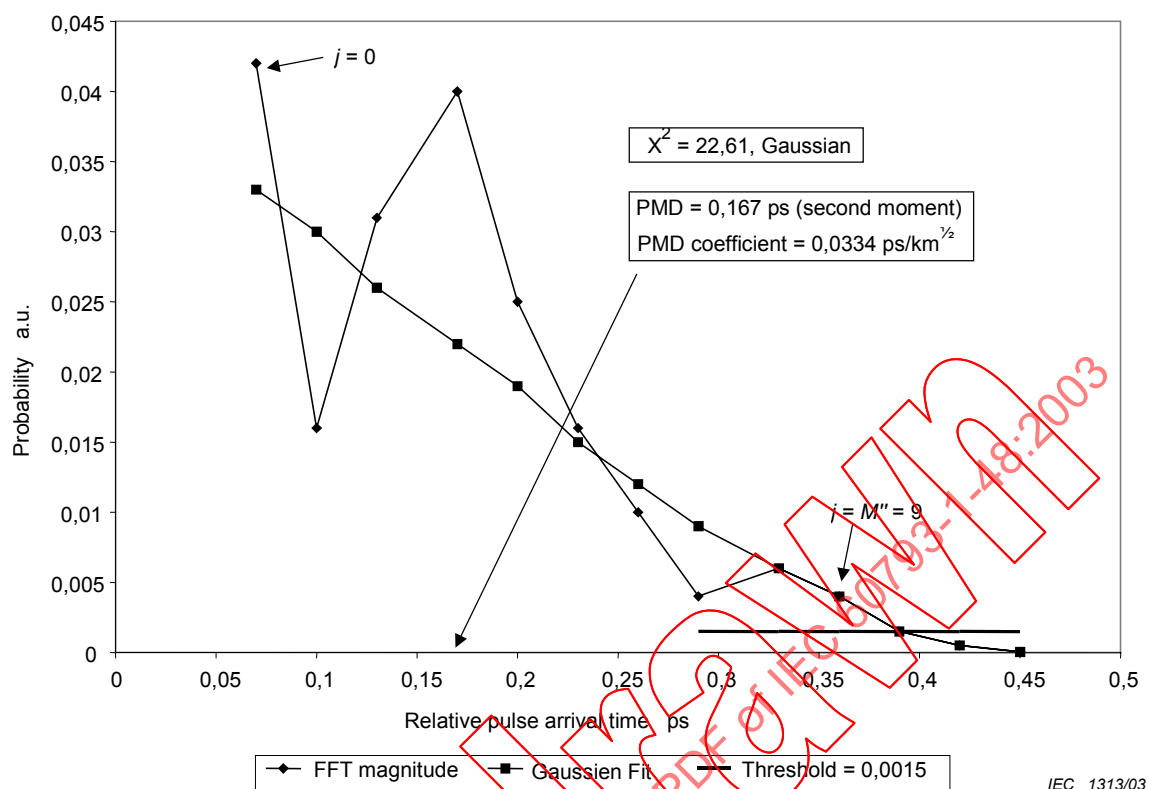


Figure A.3 – PMD by Fourier analysis

A.3.2.3 Spectral range

For randomly coupled fibres, sufficient spectral range must be used to form the spectral ensemble (average) with sufficient precision. Using the widest possible spectral range (for example, at least 200 nm) may minimize the statistical uncertainty. The precision required and therefore spectral range must be specified prior to the measurement.

In addition, very low $\delta\tau$ values will give very long periods in $R(\lambda)$, and the spectral range λ_1 to λ_2 should cover at least two complete 'cycles' if possible. The spectral range covered defines the smallest $\delta\tau$ value that can be resolved in $P(\delta\tau)$, $\delta\tau_{\min}$:

$$\delta\tau_{\min} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)c_0} \quad (\text{A.8})$$

where the factor 2 is introduced to allow for the fact that two data points in P at, and adjacent to, zero are generally ignored. For example, for $\lambda_1 = 1270$ nm, $\lambda_2 = 1700$ nm, $\delta\tau_{\min} = 0,033$ ps.

For negligibly coupled high PMD fibres with ratio data $R(\lambda)$ resembling Figure A.2a, the requirement for spectral averaging described above may be relaxed, and the spectral range reduced (for example, $(\lambda_2 - \lambda_1) \sim 30$ nm) in order to allow variation of PMD with wavelength (see Annex G) to be examined.

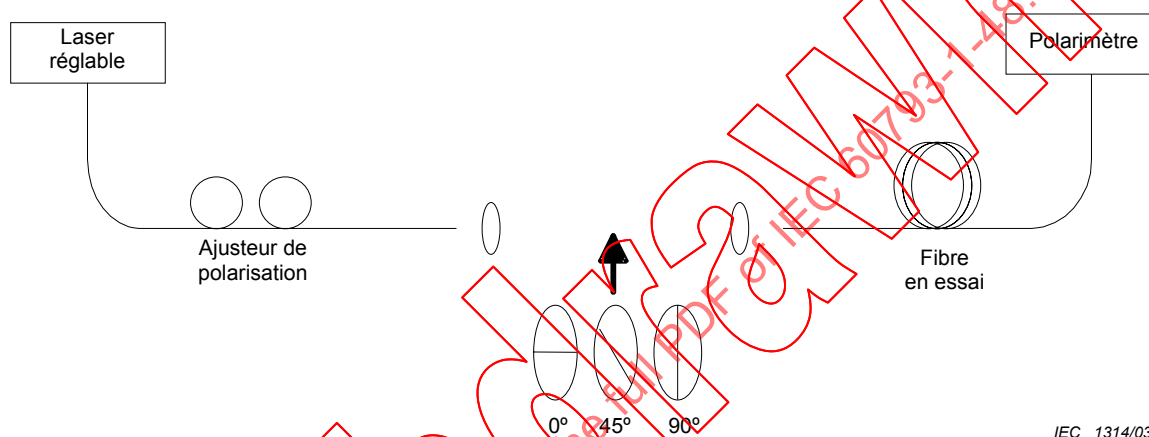
Annexe B (normative)

Méthode d'évaluation de Stokes

Cette annexe contient les prescriptions spécifiques à la Méthode B.

B.1 Appareillage

La Figure B.1 illustre une représentation schématique possible pour la Méthode B.



IEC 1314/03

Figure B.1 – Représentation schématique pour la Méthode B

B.1.1 Source de lumière

Dans tous les cas, il est possible d'utiliser deux types de sources de lumière, selon le type de polarimètre. Une source à bande étroite, telle que le laser réglable indiqué à la Figure B.1, peut être utilisée avec un analyseur de polarisation. En variante, on peut utiliser une source à large bande avec un polarimètre à filtre passe-bande fin tel qu'un analyseur de spectre optique ou un interféromètre utilisé comme un analyseur de spectre par transformée de Fourier placé avant le polarimètre. Dans le cas d'une source à large bande, on prendra comme largeur spectrale la largeur du filtre, pour les besoins des calculs.

Dans les deux cas, la largeur spectrale doit être suffisamment faible pour maintenir le degré de polarisation prescrit (se reporter à 3.1). Dans les deux cas, la gamme de longueurs d'ondes doit être suffisamment étendue pour permettre de mesurer la dispersion de mode de polarisation (PMD) avec une précision suffisante dans la zone de la longueur d'onde spécifiée (se reporter à l'Article B.3).

En ce qui concerne les analyses des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (JME et PSA), le polariseur doit être capable de commuter entre trois polarisations linéaires orthogonales (nominalement 0° , 45° et 90°) pour chaque longueur d'onde mesurée.

B.1.2 Polarimètre

Utiliser un polarimètre pour mesurer les vecteurs de Stokes de sortie pour chaque polarisation et chaque longueur d'onde d'entrée sélectionnée.

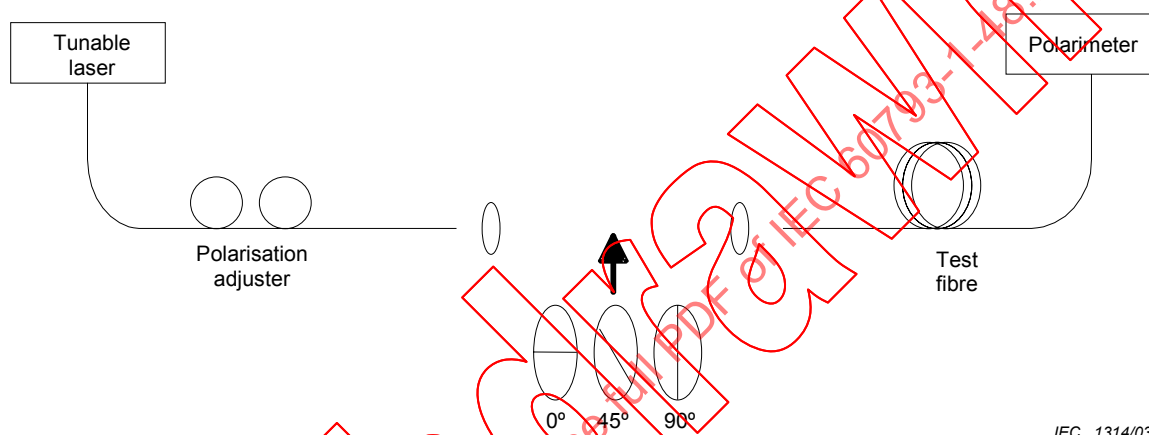
Annex B (normative)

Stokes evaluation method

This annex contains requirements specific to Method B.

B.1 Apparatus

Figure B.1 shows a possible block diagram for Method B.



IEC 1314/03

Figure B.1 – Block diagram for Method B

B.1.1 Light source

In all cases, two kinds of light sources may be used, depending on the type of polarimeter. A narrowband source such as a tunable laser shown in Figure B.1 can be used with a polarization analyser. Alternatively, a broadband source can be used with a narrow bandpass filtering polarimeter such as an optical spectrum analyser or an interferometer used as a Fourier transform spectrum analyser placed before the polarimeter. In the case of a broadband source, the width of the filter is taken as the spectral width for the purpose of calculations.

In both cases, the spectral width shall be sufficiently small to maintain the desired degree of polarization (see 3.1). In both cases, the range of wavelengths shall be sufficient to provide a PMD measurement of sufficient precision at the specified wavelength region (see Clause B.3).

For the JME and PSA approaches, the polarizer must be capable of switching between three linear polarizations that are orthogonal (nominally 0° , 45° , and 90°) for each wavelength measured.

B.1.2 Polarimeter

Use a polarimeter to measure the output Stokes vectors for each selected input polarization and wavelength.

B.2 Procédure

La sortie de la fibre est couplée au polarimètre. Les longueurs d'onde sont balayées sur une plage appropriée pour la zone de la longueur d'onde et la précision prescrite (se reporter à l'Article B.3) avec un incrément de longueur d'onde, $\delta\lambda$. Pour des sources à bande étroite, l'incrément de longueur d'onde est donné en fonction de la valeur DGD maximale prévue, $\Delta\tau_{\max}$, de la longueur d'onde de la zone mesurée, λ_0 , et de la vitesse de la lumière dans le vide, c , comme suit:

$$\delta\lambda \leq \frac{\lambda_0^2}{2c \Delta\tau_{\max}} \quad (\text{B.1})$$

Par exemple, le produit du DGD maximal et de la taille d'échelon doit rester inférieur à 4 ps·nm pour une longueur d'onde de 1550 nm et à 2,8 ps·nm pour une longueur d'onde de 1300 nm. Cette prescription permet de s'assurer que, d'une longueur d'onde d'essai à la suivante, l'état de polarisation de sortie effectue une rotation de moins de 180° autour de l'axe des états principaux de la sphère de Poincaré. Si on ne peut pas effectuer un calcul approximatif de $\Delta\tau_{\max}$, on peut effectuer une série de mesures sur des échantillons sur toute la gamme des longueurs d'onde, en utilisant pour chaque mesure une paire de longueurs d'onde très voisines qui conviennent pour la largeur spectrale et l'échelon de réglage minimal de la source optique. On multiplie le retard de groupe différentiel (DGD) maximal ainsi mesuré par un coefficient de sécurité de trois, on remplace $\Delta\tau_{\max}$ par cette valeur dans l'expression ci-dessus et on calcule la valeur de $\delta\lambda$ à utiliser dans la mesure réelle. Si l'on craint que l'intervalle de la longueur d'onde utilisé pour une mesure soit trop grand, on peut répéter la mesure en utilisant un plus petit intervalle de longueur d'onde. Si la forme de la courbe de variation du DGD en fonction de la longueur d'onde et le retard de groupe différentiel (DGD) moyen restent inchangés, cela signifie que l'intervalle de longueur d'onde initial était satisfaisant.

Pour des sources à large bande, la largeur de bande de résolution (RBW) de l'analyseur doit remplir la condition suivante:

$$RBW_{\lambda} \leq \frac{\lambda_0^2}{5c \Delta\tau_{\max}} \quad (\text{B.2})$$

Les données de mesure sont regroupées pour chaque longueur d'onde. Pour les méthodes de calcul d'analyses des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (JME et PSA), les trois polarisations d'entrée sont orientées entre les valeurs nominales de 0°, 45° et 90° pour chaque longueur d'onde et respectivement enregistrées dans les vecteurs $\hat{H}$, $\hat{V}$ et $\hat{Q}$. Pour les méthodes d'analyses des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (PSA et JME), les vecteurs de sortie sont normalisés par rapport à la longueur unitaire. Pour la méthode des états de polarisation (SOP), le vecteur de sortie pour chaque longueur d'onde est enregistré en tant que s .

B.3 Calculs

Les trois méthodes de calcul nécessitent toutes l'évaluation des différences entre les vecteurs à une fréquence optique angulaire, ω , et la suivante à $\omega + \Delta\omega$. (La fréquence optique angulaire est donnée par $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$.) Les trois méthodes de calcul aboutissent toutes à une série de valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde. La Figure B.1 fournit un exemple d'une telle fonction. En variante, les valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) peuvent être affichées sous la forme d'un histogramme tel que celui illustré à la Figure B.3. La moyenne de ces valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) est considérée comme la valeur de PMD utilisée conjointement à l'Equation (1) ou (2) pour

B.2 Procedure

The output of the fibre is coupled to the polarimeter. The wavelengths are scanned across a range appropriate for the wavelength region and desired precision (see Clause B.3) with a wavelength increment, $\delta\lambda$. For narrowband sources, the wavelength increment is given in terms of the maximum anticipated DGD value, $\Delta\tau_{\max}$, the wavelength of the region measured, λ_0 , and the speed of light in vacuum, c , as:

$$\delta\lambda \leq \frac{\lambda_0^2}{2c \Delta\tau_{\max}} \quad (\text{B.1})$$

For example, the product of maximum DGD and step size shall remain less than 4 ps.nm at 1 550 nm and less than 2,8 ps.nm at 1 300 nm. This requirement ensures that from one test wavelength to the next, the output state of polarization rotates less than 180° about the principal states axis of the Poincaré sphere. If a rough estimate of $\Delta\tau_{\max}$ cannot be made, a series of sample measurements is performed across the wavelength range, each measurement using a closely spaced pair of wavelengths appropriate to the spectral width and minimum tuning step of the optical source. The maximum DGD measured in this way is multiplied by a safety factor of three, this value is substituted for $\Delta\tau_{\max}$ in the above expression and the value of $\delta\lambda$ to be used in the actual measurement is computed. If there is concern that the wavelength interval used for a measurement was too large, the measurement may be repeated with smaller wavelength interval. If the shape of the curve of DGD versus wavelength and the mean DGD are essentially unchanged, the original wavelength interval was satisfactory.

For broadband sources, the resolution bandwidth (RBW) of the analyser must satisfy the following:

$$RBW_{\lambda} \leq \frac{\lambda_0^2}{5c \Delta\tau_{\max}} \quad (\text{B.2})$$

The measurement data are gathered for each wavelength. For the JME and PSA calculation approaches, the three input polarizations cycled between nominal 0°, 45°, and 90° for each wavelength and recorded in the output vectors, $\hat{H}$, $\hat{Q}$, and $\hat{V}$, respectively. For the PSA and JME approaches, the output vectors are normalized to unit length. For the SOP method, the output vector for each wavelength is recorded as $\mathbf{s}$.

B.3 Calculations

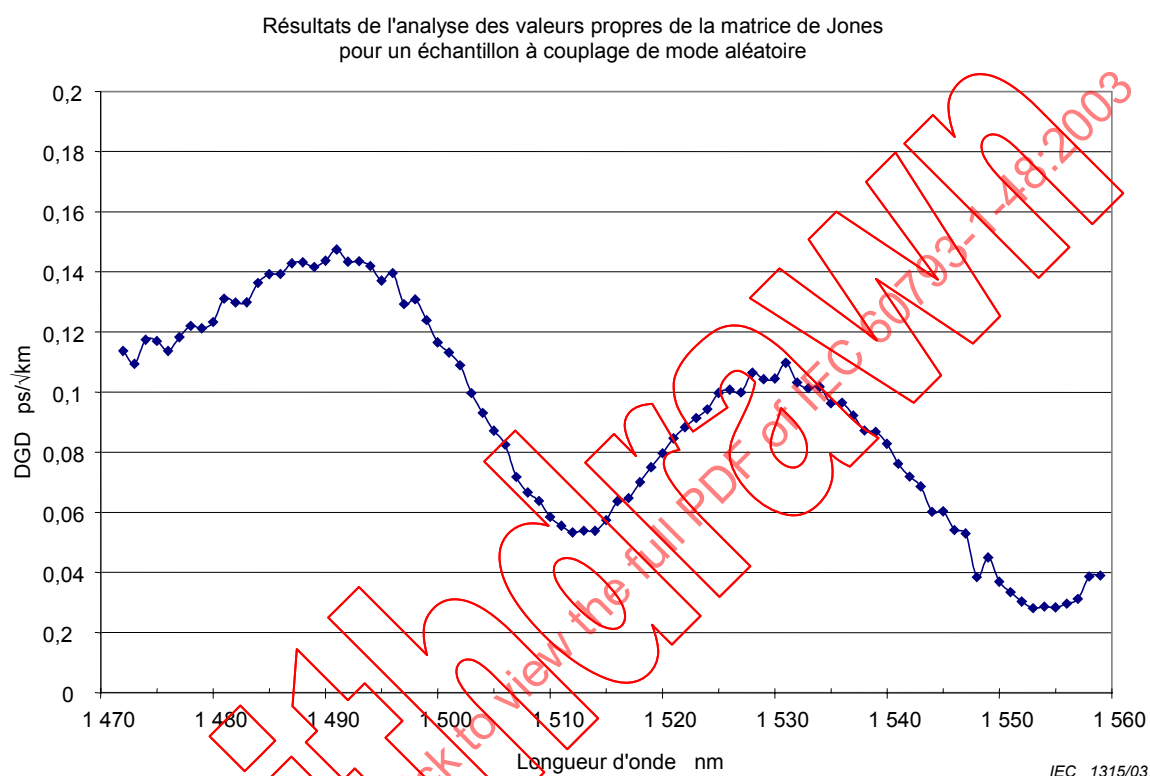
All three calculation approaches require evaluation of differences between the vectors at one angular optical frequency, ω , and the next at $\omega + \Delta\omega$. (Angular optical frequency is given by

$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$.) All three calculation approaches result in a series of DGD values versus

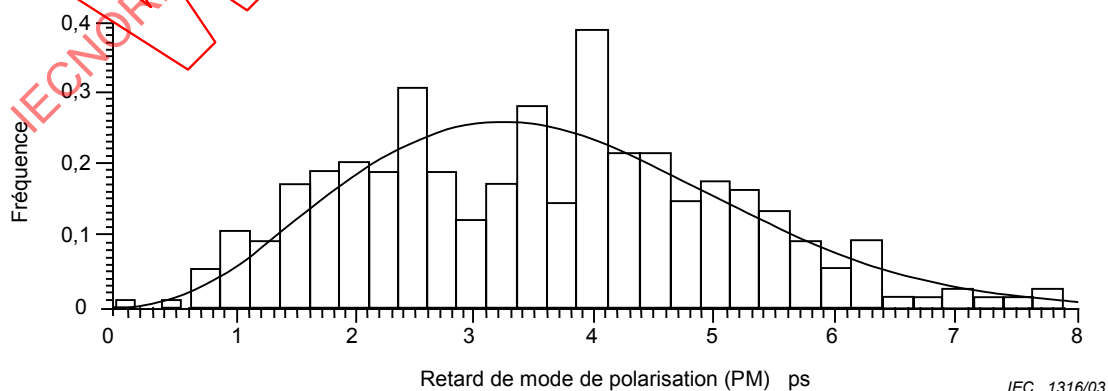
wavelength. Figure B.1 shows an example of such a function. Alternatively, the DGD values may be displayed as a histogram such as Figure B.3. The average of these DGD values is reported as the PMD value that is used in conjunction with Equations (1) or (2) to calculate the PMD coefficient. See Annex H for information related to the evaluation of the mode-coupling regime using DGD values.

calculer le coefficient de PMD. Se reporter à l'Annexe H pour plus de détails concernant l'évaluation du régime de couplage de mode utilisant les valeurs du retard de groupe différentiel (DGD).

Se reporter à l'Annexe I pour obtenir des informations sur le lien théorique entre les méthodes de calcul des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (JME et PSA). Le calcul employé dans la méthode des états de polarisation (SOP) est similaire, mais moins fiable.



**Figure B.2 – Retard de groupe différentiel (DGD)
en fonction de la longueur d'onde**



NOTE Une courbe de Maxwell est superposée à l'histogramme.

Figure B.3 – Histogramme des valeurs du retard de groupe différentiel (DGD)

See Annex I for information on the theoretical linkage between the JME and PSA calculation approaches. The calculation for the SOP approach is related but not as robust.

Jones Matrix Eigen-analysis results for a randomly mode-coupled sample

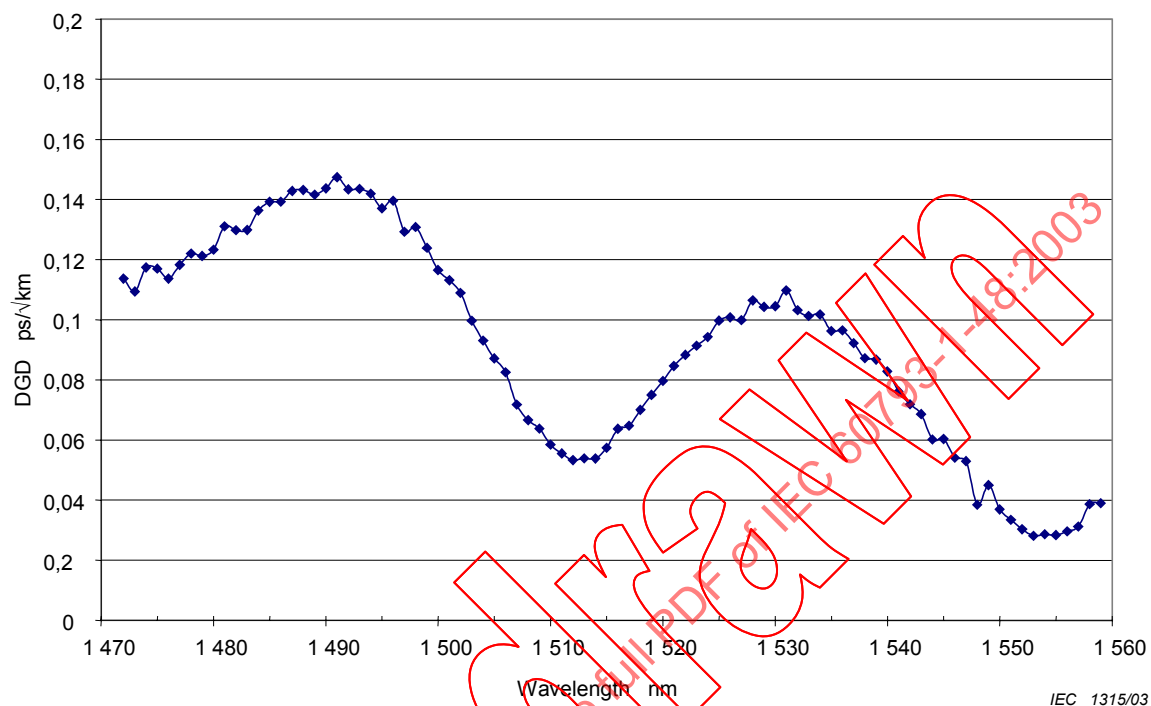
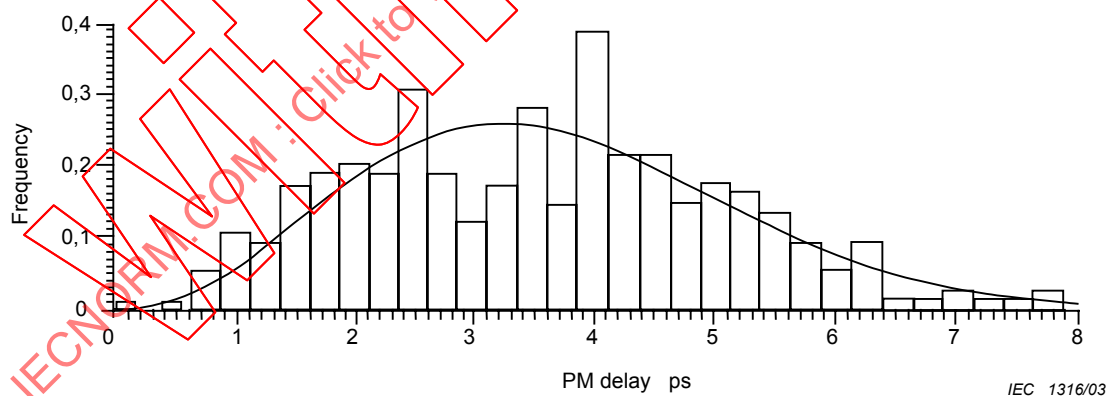


Figure B.2 – DGD versus wavelength



NOTE A Maxwell curve is superimposed on the histogram.

Figure B.3 – Histogram of DGD values

B.3.1 Analyse des valeurs propres de la matrice de Jones (JME)

En ce qui concerne l'analyse des valeurs propres de la Matrice de Jones (JME), la matrice de Jones de réponse est calculée à chaque longueur d'onde à partir des paramètres de Stokes. Pour chaque intervalle de longueur d'onde, on calcule le produit de la matrice de Jones $T(\omega + \Delta\omega)$ à la fréquence optique supérieure et de l'inverse de la matrice de Jones $T^{-1}(\omega)$ à la fréquence optique inférieure. Le retard de groupe différentiel (DGD) $\Delta\tau$ pour l'intervalle de longueur d'onde particulier est déterminé à partir de l'expression suivante:

$$\Delta\tau = \frac{\left| \text{Arg} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \right|}{\Delta\omega} \quad (\text{B.3})$$

où ρ_1 et ρ_2 sont les valeurs propres complexes de $T(\omega + \Delta\omega)^{-1}(\omega)$ et Arg est la fonction argument, à savoir, $\text{Arg}(\eta e^{i\theta}) = \theta$. Pour les besoins de l'analyse des données, chaque valeur du retard de groupe différentiel (DGD) est prise pour représenter le retard de groupe différentiel au milieu de l'intervalle de longueur d'onde correspondant. La série de valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) obtenues à partir d'une série d'intervalles de longueurs d'onde sur une gamme de longueurs d'ondes comprend une mesure unique.

B.3.1.1 Calcul de la matrice de Jones

R.C. Jones a donné un algorithme explicite pour déterminer de manière expérimentale la matrice de Jones de transmission directe T d'un dispositif optique inconnu, linéaire, ne variant pas dans le temps [2]. La restriction de linéarité exclut les dispositifs optiques qui génèrent de nouvelles fréquences optiques. La restriction d'invariance dans le temps s'applique uniquement à la transformation de polarisation causée par le dispositif et n'inclut pas le retard de phase optique absolu. C'est la raison pour laquelle la présente technique peut être utilisée pour caractériser les réseaux de fibres, même si le retard de phase à travers la fibre dérive pendant la mesure.

La mesure de la matrice de Jones nécessite l'application de trois états connus de lumière polarisée linéairement au dispositif ou à la fibre en essai. Dans le processus décrit ci-dessous, les états linéaires orientés à 0° , 45° et 90° sont utilisés, comme cela est décrit par Jones. Les calculs peuvent être généralisés pour s'adapter à d'autres états d'entrée.

Tout vecteur de Jones V peut être complètement spécifié par une magnitude, une phase absolue et un vecteur unitaire $\hat{V}$ qui localise l'état de polarisation sur la sphère de Poincaré. Pour mesurer la matrice de Jones d'un dispositif, un stimulus de champ optique de polarisation linéaire parallèle à l'axe des x (0°) est d'abord généré et le vecteur unité de réponse $\hat{H}$ qui en résulte est mesuré à la sortie du dispositif. De la même manière, des stimuli de champs de polarisation linéaire parallèle à l'axe des y (90°) et parallèle à la bissectrice de l'angle entre les axes positifs x et y (45°) donnent respectivement lieu à des vecteurs unités réponses $\hat{V}$ et $\hat{Q}$.

Trois rapports complexes indépendants des intensités des trois stimuli de champs peuvent maintenant être formés à partir des composantes en x et y de $\hat{H}$, $\hat{V}$ et $\hat{Q}$:

$$k_1 = \hat{h}_x / \hat{h}_y \quad k_2 = \hat{v}_x / \hat{v}_y \quad k_3 = \hat{q}_x / \hat{q}_y \quad (\text{B.4})$$

B.3.1 Jones matrix eigenanalysis (JME)

For the JME, the response Jones matrix is computed at each wavelength from the Stokes parameters. For each wavelength interval, the product of the Jones matrix $T(\omega + \Delta\omega)$ at the higher optical frequency and the inverse Jones matrix $T^{-1}(\omega)$ at the lower optical frequency are computed. The DGD $\Delta\tau$ for the particular wavelength interval is found from the following expression:

$$\Delta\tau = \left| \frac{\text{Arg} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)}{\Delta\omega} \right| \quad (\text{B.3})$$

where ρ_1 and ρ_2 are the complex eigenvalues of $T(\omega + \Delta\omega)T^{-1}(\omega)$ and Arg denotes the argument function, that is, $\text{Arg}(\eta e^{i\theta}) = \theta$. For purposes of data analysis, each DGD value is taken to represent the differential group delay at the midpoint of the corresponding wavelength interval. The series of DGD values obtained from a series of wavelength intervals across a wavelength range comprises a single measurement.

B.3.1.1 Jones matrix calculation

R.C. Jones gave an explicit algorithm for experimentally determining the forward transmission Jones matrix T of an unknown linear, time-invariant optical device [2]. The restriction of linearity precludes optical devices that generate new optical frequencies. The restriction of time invariance applies only to the polarization transformation caused by the device, and does not include the absolute optical phase delay. Therefore, this technique can be used to characterize fibre networks even when the phase delay through the fibre is drifting during the measurement.

Measurement of the Jones matrix requires the application of three known states of linearly polarized light to the device or fibre under test. In the process described below, linear states oriented at 0° , 45° and 90° are used, as described by Jones. The mathematics may be generalized to accommodate other input states.

Any Jones vector V can be completely specified by a magnitude, an absolute phase, and a unit vector $\hat{V}$ which locates the SOP on the Poincaré sphere. To measure the Jones matrix of a device, a stimulus optical field of linear polarization parallel to the x (0°) axis is first generated, and the resulting response unit vector $\hat{H}$ is measured at the output of the device. Similarly, stimulus fields of linear polarization parallel to the y (90°) axis, and parallel to the bisector of the angle between the positive x and y axes (45°) result in response unit vectors $\hat{V}$ and, $\hat{Q}$ respectively.

Three complex ratios independent of the intensities of the three stimulus fields can now be formed from the x and y components of $\hat{H}$, $\hat{V}$, and $\hat{Q}$:

$$k_1 = \hat{h}_x / \hat{h}_y \quad k_2 = \hat{v}_x / \hat{v}_y \quad k_3 = \hat{q}_x / \hat{q}_y \quad (\text{B.4})$$

Un quatrième rapport $k_4 = (k_3 - k_2) / (k_1 - k_3)$ est ensuite trouvé. Jusqu'à une constante complexe β , la matrice de transmission de Jones T est donnée par

$$T = \begin{bmatrix} k_1 k_4 & k_2 \\ k_4 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

B.3.1.2 Détermination des retards de groupes différentiels

Par définition des états principaux de polarisation (PSP), un dispositif ou un réseau général est associé à une paire d'états principaux d'entrée $\hat{y}(\omega)$ qui, étant donné que l'état de polarisation en entrée est maintenu constant alors que la fréquence optique en radians ω est légèrement modifiée, donne une paire d'états principaux de sortie dont les vecteurs unités sont invariants au premier ordre en ω . Pour une matrice de transmission générale de Jones $T(\omega)$, on peut exprimer les états principaux de polarisation (PSP) de sortie comme une magnitude $\sigma(\omega)$ et une phase absolue $\phi(\omega)$ fois un vecteur unité $\hat{y}(\omega)$, qui spécifie l'état de polarisation des états principaux de polarisation (PSP) de sortie.

$$y(\omega) = T(\omega)\hat{x}(\omega) = \sigma(\omega)e^{i\phi(\omega)}\hat{y}(\omega) \quad (\text{B.6})$$

$\sigma(\omega)$ et $\phi(\omega)$ peuvent varier avec ω , mais $\hat{y}(\omega)$ est invariant en fréquence au premier ordre par définition des états principaux de polarisation (PSP) de sortie. En utilisant des primes pour marquer la dérivation par rapport à ω , la dérivation de (B.6) donne

$$y' = T\hat{x}' = [\sigma'(\sigma + i\phi')]\hat{y} + \sigma e^{i\phi}\hat{y}' \quad (\text{B.7})$$

La première dérivée de la phase absolue ϕ' est le retard de groupe τ_g à travers le réseau. Si le réseau n'est pas parfaitement polarisant, sa matrice de transmission T est non singulière et l'entrée peut être exprimée en fonction de la sortie comme $\hat{x} = T^{-1}y$. En réglant explicitement $\hat{y}'$ à zéro, on obtient la relation de valeur propre

$$\sigma e^{i\phi}\hat{y} = T T^{-1} - [(\sigma'/\sigma + j\tau_g)]\hat{y} = 0 \quad (\text{B.8})$$

Les parties imaginaires des valeurs propres du produit de matrice sont des retards de groupe associés aux états principaux de polarisation (PSP), et le retard différentiel $\Delta\tau$ qui conduit à la PMD est donné par la différence de la partie imaginaire de deux valeurs propres. Les états principaux de polarisation (PSP) de sortie eux-mêmes sont les vecteurs propres de $T' T^{-1}$, qui peuvent être non unitaires pour des réseaux avec perte dépendant de la polarisation, auquel cas les états principaux de polarisation (PSP) de sortie ne sont pas nécessairement orthogonaux.

La mesure de T' et T , y compris la mesure de la phase absolue, devrait permettre le calcul direct des deux retards de groupe et de $\Delta\tau$ mais, dans la pratique, deux restrictions sont imposées par la technique de mesure d'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones précédemment décrite. Au lieu de mesurer directement T' , il faut faire une approximation avec $T' \sim [T(\omega + \Delta\omega) - T(\omega)] / \Delta\omega$ pour un $\Delta\omega$ fini. Si l'intervalle de fréquence $\Delta\omega$ est assez faible pour que chaque état principal de polarisation (PSP) de sortie subisse à peu près la même perte à ω et $\Delta\omega$, alors $\sigma'\Delta\omega/\sigma \sim 0$ et (B.8) peut être réécrite comme suit:

$$[T(\omega + \Delta\omega)T^{-1}(\omega) - (1 + j\tau_g \Delta\omega)]\hat{y} = 0 \quad (\text{B.9})$$

A fourth ratio $k_4 = (k_3 - k_2)/(k_1 - k_3)$ is then found. To within a complex constant β , the transmission Jones matrix T is then given by

$$T = \begin{bmatrix} k_1 k_4 & k_2 \\ k_4 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

B.3.1.2 Differential group delay determination

By definition of the PSP, a general device or network has associated with it a pair of input principal states $\hat{x}(\omega)$ which, as the input SOP is held constant while the radian optical frequency ω is changed a small amount, result in a pair of output principal states whose unit vectors are invariant to first order over ω . For a general transmission Jones matrix $T(\omega)$, we can express an output PSP as a magnitude $\sigma(\omega)$ and absolute phase $\phi(\omega)$ times a unit vector $\hat{y}(\omega)$ which specifies the SOP of the output PSP:

$$y(\omega) = T(\omega)\hat{x}(\omega) = \sigma(\omega)e^{i\phi(\omega)}\hat{y}(\omega) \quad (\text{B.6})$$

$\sigma(\omega)$ and $\phi(\omega)$ may vary with ω , but $\hat{y}(\omega)$ is frequency-invariant to first order by definition of the output PSP. Using primes to denote differentiation with respect to ω , differentiation of (B.6) results in

$$y' = T\hat{x}' = [\sigma'/(\sigma + i\phi)]y + \sigma e^{i\phi}\hat{y}' \quad (\text{B.7})$$

The first derivative of the absolute phase ϕ' is the group delay τ_g through the network. If the network is not perfectly polarizing, its transmission matrix T is non-singular, and the input can be expressed in terms of the output as $\hat{x} = T^{-1}y$. Explicitly setting $\hat{y}'$ to zero, we obtain the eigenvalue relation

$$\sigma e^{i\phi}\hat{y}' = T T^{-1} - [(\sigma'/\sigma + j\tau_g)]y = 0 \quad (\text{B.8})$$

The imaginary parts of the eigenvalues of the matrix product are the group delays associated with the PSPs, and the differential delay $\Delta\tau$ which leads to PMD is given by the difference of the imaginary part of the two eigenvalues. The output PSP themselves are the eigenvectors of $T' T^{-1}$, which may be non-unitary for networks with polarization-dependent loss, in which case the output PSPs are not necessarily orthogonal.

Measurement of T' and T , including measurement of the absolute phase, would allow direct calculation of the two group delays and $\Delta\tau$, but in practice two restrictions are imposed by the Jones matrix measurement technique previously described. Instead of measuring T' directly, we must approximate it as $T' \sim [T(\omega + \Delta\omega) - T(\omega)]/\Delta\omega$ for a finite $\Delta\omega$. If the frequency interval $\Delta\omega$ is small enough so that each output PSP suffers nearly the same loss at ω and $\Delta\omega$, then $\sigma'\Delta\omega/\sigma \sim 0$ and (B.8) can be rewritten as

$$[T(\omega + \Delta\omega)T^{-1}(\omega) - (1 + i\tau_g \Delta\omega)]y = 0 \quad (\text{B.9})$$

La seconde restriction provient du fait que $T(\omega + \Delta\omega) T^{-1}(\omega)$, et donc ses valeurs propres associées ρ_1 et ρ_2 , ne peuvent être déterminées que dans le cadre d'une constante complexe, ce qui empêche de déterminer individuellement les deux retards de groupe. Lorsque la perte à travers le dispositif en essai est indépendante de la polarisation, les valeurs propres de $T(\omega + \Delta\omega) T^{-1}(\omega)$ sont déterminées comme $\beta\rho_1$ et $\beta\rho_2$, où β est une constante complexe et $\rho_k = \exp(i\tau_{g,k} \Delta\omega)$. Le retard de groupe différentiel $\Delta\tau$ peut donc être exprimé comme

$$\Delta\tau = |\tau_{g,1} - \tau_{g,2}| = |\text{Arg}(\rho_1 / \rho_2) / \Delta\omega| \quad (\text{B.10})$$

où ρ_1 et ρ_2 sont les valeurs propres de $T(\omega + \Delta\omega) T^{-1}(\omega)$ et Arg représente la fonction argument, à savoir $\text{Arg}(ae^{i\theta}) = \theta$. En présence de perte dépendante de la polarisation, les valeurs propres peuvent encore être approximées comme

$$\rho_k = 1 + i\tau_{g,k} \Delta\omega \equiv \exp(i\tau_{g,k} \Delta\omega) \quad (\text{B.11})$$

Dans la pratique, on peut réduire l'impact de la perte dépendante de la polarisation sur la mesure de $\Delta\tau$ en utilisant des intervalles plus faibles de fréquence optique en radians $\Delta\omega$. Dans tous les cas, la condition $\Delta\tau\Delta\omega < \pi$ doit être satisfaite pour éviter les ambiguïtés de la fonction argument à valeurs multiples.

B.3.2 Calcul du retard de groupe différentiel (DGD) – Analyse de la sphère de Poincaré (PSA)

L'Annexe H fournit quelques informations sur la dérivation théorique de cette méthode de calcul.

A partir des vecteurs de Stokes normalisés mesurés $\hat{H}$, $\hat{V}$, $\hat{Q}$, calculer

$$\hat{h} = \hat{H}, \quad \hat{q} = \frac{\hat{H} \times \hat{Q}}{|\hat{H} \times \hat{Q}|} \times \hat{H}, \quad \hat{v} = \frac{\hat{Q} \times \hat{V}}{|\hat{Q} \times \hat{V}|} \times \hat{Q} \quad (\text{B.12})$$

afin que l'analyse soit indépendante des états de polarisation d'entrée et qu'il ne soit donc pas nécessaire de les connaître.

A partir des vecteurs de Stokes $\hat{h}$, $\hat{v}$ et $\hat{q}$, former les produits vectoriels $\hat{c} = \hat{h} \times \hat{q}$ et $\hat{c}' = \hat{q} \times \hat{v}$ à chaque longueur d'onde. Pour chaque intervalle de longueur d'onde, calculer les différences finies

$$\begin{aligned} \Delta\hat{h} &= \hat{h}(\omega + \Delta\omega) - \hat{h}(\omega) & \Delta\hat{q} &= \hat{q}(\omega + \Delta\omega) - \hat{q}(\omega) & \Delta\hat{v} &= \hat{v}(\omega + \Delta\omega) - \hat{v}(\omega) \\ \Delta\hat{c} &= \hat{c}(\omega + \Delta\omega) - \hat{c}(\omega) & \Delta\hat{c}' &= \hat{c}'(\omega + \Delta\omega) - \hat{c}'(\omega) \end{aligned} \quad (\text{B.13})$$

Trouver le DGD, $\Delta\tau$, pour un intervalle de longueur d'onde particulier, à partir de l'expression suivante:

$$\Delta\tau = \frac{1}{\Delta\omega} \cdot \left[\arcsin\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2} (\Delta\hat{h}^2 + \Delta\hat{q}^2 + \Delta\hat{c}^2)}\right) + \arcsin\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2} (\Delta\hat{q}^2 + \Delta\hat{v}^2 + \Delta\hat{c}'^2)}\right) \right] \quad (\text{B.14})$$

Chaque valeur du retard de groupe différentiel (DGD) est prise pour représenter le retard de groupe différentiel au milieu de l'intervalle de longueur d'onde correspondant.

The second restriction arises from the fact that $T(\omega + \Delta\omega)T^{-1}(\omega)$, and therefore its associated eigenvalues ρ_1 and ρ_2 , can be determined only to within a complex constant, preventing determination of the two group delays individually. When the loss through the device under test is independent of polarization, the eigenvalues of $T(\omega + \Delta\omega)T^{-1}(\omega)$ are determined to be $\beta\rho_1$ and $\beta\rho_2$, where β is a complex constant and $\rho_k = \exp(i\tau_{g,k}\Delta\omega)$. The differential group delay $\Delta\tau$ can therefore be expressed as

$$\Delta\tau = |\tau_{g,1} - \tau_{g,2}| = |\text{Arg}(\rho_1 / \rho_2) / \Delta\omega| \quad (\text{B.10})$$

where ρ_1 and ρ_2 are the eigenvalues of $T(\omega + \Delta\omega)T^{-1}(\omega)$ and Arg denoted the argument function, that is, $\text{Arg}(ae^{i\theta}) = \theta$. In the presence of polarization-dependent loss, the eigenvalues can still be approximated as

$$\rho_k = 1 + i\tau_{g,k} \Delta\omega \equiv \exp(i\tau_{g,k} \Delta\omega) \quad (\text{B.11})$$

In practice, the impact of polarization-dependent loss on the measurement of $\Delta\tau$ can be reduced by using smaller intervals of radian optical frequency, $\Delta\omega$. In all cases, the condition $\Delta\tau\Delta\omega < \pi$ must be satisfied in order to avoid the ambiguities of the multiple-valued argument function.

B.3.2 PSA DGD calculation

Annex H has some of the theoretical derivation of this calculation approach.

From the measured normalized Stokes vectors $\hat{H}$, $\hat{V}$, $\hat{Q}$, compute

$$\hat{h} = \hat{H}, \quad \hat{q} = \frac{\hat{H} \times \hat{Q}}{|\hat{H} \times \hat{Q}|} \times \hat{H}, \quad \hat{v} = \frac{\hat{Q} \times \hat{V}}{|\hat{Q} \times \hat{V}|} \times \hat{Q} \quad (\text{B.12})$$

in order to make the analysis independent of the input SOPs and consequently having no need to know them.

From the Stokes vectors $\hat{h}$, $\hat{v}$ and $\hat{q}$, form the vector products $\hat{c} = \hat{h} \times \hat{q}$ and $\hat{c}' = \hat{q} \times \hat{v}$ at each wavelength. For each wavelength interval, compute the finite differences,

$$\begin{aligned} \Delta\hat{h} &= \hat{h}(\omega + \Delta\omega) - \hat{h}(\omega) & \Delta\hat{q} &= \hat{q}(\omega + \Delta\omega) - \hat{q}(\omega) & \Delta\hat{v} &= \hat{v}(\omega + \Delta\omega) - \hat{v}(\omega) \\ \Delta\hat{c} &= \hat{c}(\omega + \Delta\omega) - \hat{c}(\omega) & \Delta\hat{c}' &= \hat{c}'(\omega + \Delta\omega) - \hat{c}'(\omega) \end{aligned} \quad (\text{B.13})$$

Find the DGD, $\Delta\tau$, for a particular wavelength interval from the following expression:

$$\Delta\tau = \frac{1}{\Delta\omega} \cdot \left[\arcsin\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2}(\Delta\hat{h}^2 + \Delta\hat{q}^2 + \Delta\hat{c}^2)}\right) + \arcsin\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2}(\Delta\hat{q}^2 + \Delta\hat{v}^2 + \Delta\hat{c}'^2)}\right) \right] \quad (\text{B.14})$$

Each DGD value is taken to represent the differential group delay at the midpoint of the corresponding wavelength interval.

B.3.3 Etat de polarisation (SOP)

Pour l'analyse des états de polarisation, le tracé sur la sphère de Poincaré décrivant l'évolution des états de polarisation (SOP) avec la longueur d'onde est reconstruit à partir des paramètres de Stokes mesurés. Le tracé est analysé par tranche, en tenant compte des intervalles de longueur d'onde (qui peuvent inclure plus de deux échelons de longueur d'onde), de sorte que les hypothèses assurant l'existence des PSP bien déterminés tiennent. L'axe PSP local sur la sphère de Poincaré et l'angle de rotation correspondant $\Delta\theta$ causé par la variation de longueur d'onde considérée $\delta\lambda$ sont alors déterminés au moyen de considérations géométriques simples. Une procédure possible pourrait être l'analyse du tracé sur la sphère de Poincaré en considérant les points mesurés trois par trois et en trouvant le point d'intersection des axes des segments identifiés par les deux paires de points. En partant de ce point, il est possible de calculer la valeur de $\Delta\theta$ en utilisant des relations trigonométriques.

Le retard de groupe différentiel (DGD) doit être calculé à partir de la relation.

$$\Delta\tau = \left| \frac{\Delta\theta}{2\pi\Delta f} \right| = \left| \frac{\Delta\theta}{2\pi c \cdot \delta\lambda} \right| \cdot \lambda_i \lambda_f \quad (\text{B.15})$$

où λ_i et λ_f sont respectivement les longueurs d'onde initiale et finale de $\delta\lambda$.

B.3.3 State of polarization (SOP)

For the SOP analysis, the trace on the Poincaré sphere describing the evolution of the SOP with wavelength is reconstructed from the measured Stokes parameters. The trace is analysed piecewise, considering wavelength intervals (which may include more than two wavelength steps) such that the assumptions ensuring the existence of well-determined PSP hold. The local PSP axis on the Poincaré sphere and the corresponding rotation angle $\Delta\theta$ caused by the considered wavelength variation $\delta\lambda$ are then determined by means of simple geometrical considerations. A possible procedure could be the analysis of the trace on the Poincaré sphere by considering the measured points three by three and finding the point of intersection of the axes of the segments identified by the two pairs of points. Starting from this point it is possible to calculate the value of $\Delta\theta$ by means of trigonometric relationships.

The DGD shall be computed from the relation:

$$\Delta\tau = \left| \frac{\Delta\theta}{2\pi\Delta f} \right| = \left| \frac{\Delta\theta}{2\pi c \cdot \delta\lambda} \cdot \lambda_i \lambda_f \right| \quad (\text{B.15})$$

where λ_i and λ_f are respectively the initial and the final wavelength of $\delta\lambda$.

Annexe C (normative)

Méthode par interférométrie

La présente annexe contient des prescriptions détaillées pour effectuer des mesures de PMD par la Méthode C.

C.1 Appareillage

La Figure C.1 illustre des représentations schématiques relatives à deux montages.

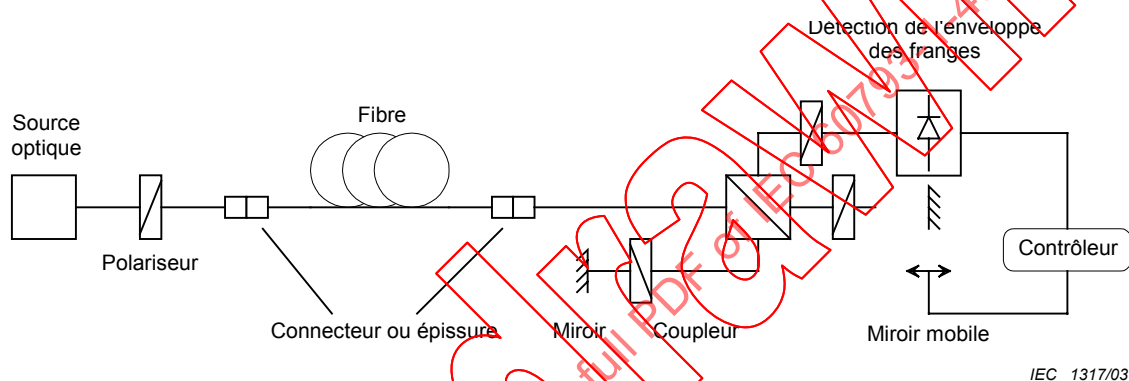


Figure C.1a – Interféromètre de Michelson

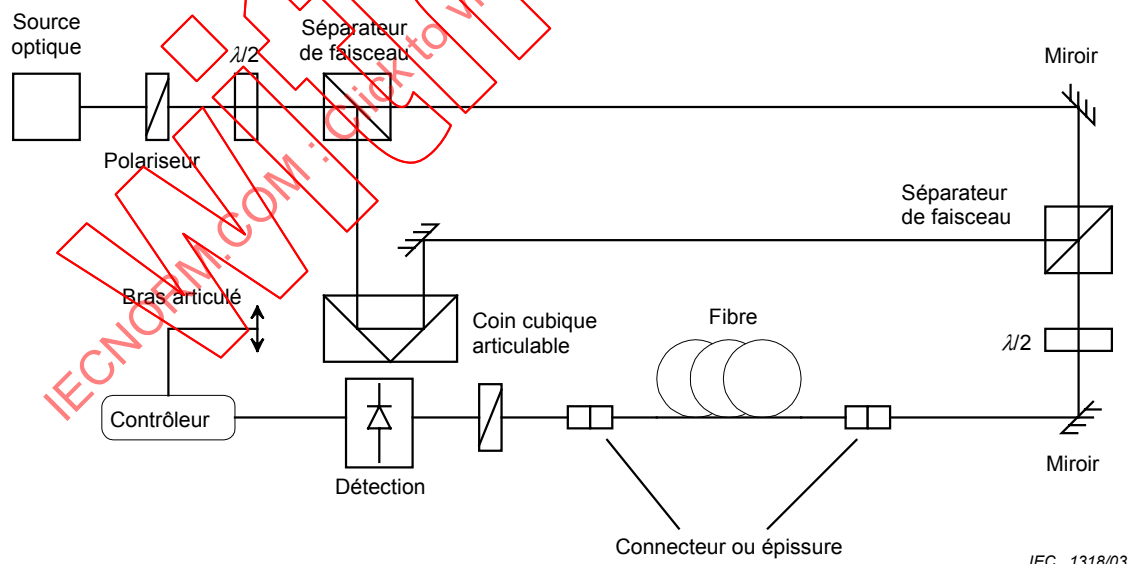


Figure C.1b – Interféromètre de Mach-Zehnder

Figure C.1 – Représentation schématique pour la Méthode C

Annex C (normative)

Interferometry method

This Annex contains detailed requirements for completing PMD measurements using Method C.

C.1 Apparatus

Figure C.1 shows block diagrams for two implementations.

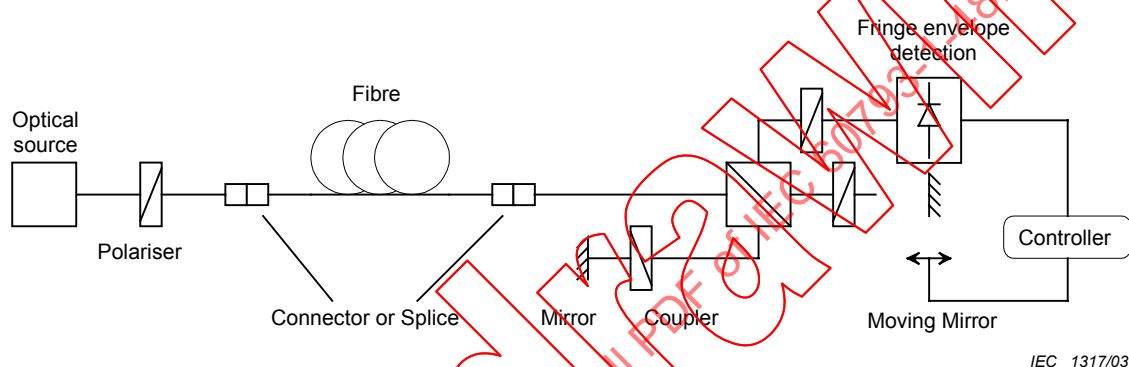


Figure C.1a – Michelson interferometer

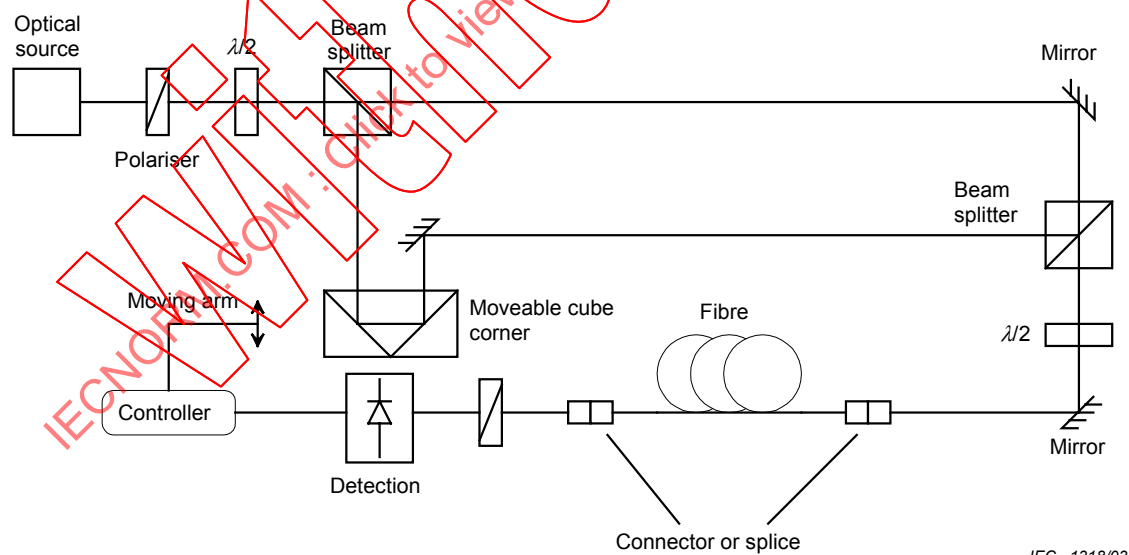


Figure C.1b – Mach-Zehnder interferometer

Figure C.1 – Schematic diagram for Method C

C.1.1 Source de lumière

On utilise une source de lumière à large bande qui émet un rayonnement aux longueurs d'onde de mesure prévues, telle qu'une diode électroluminescente ou une source super-fluorescente. La longueur d'onde centrale, λ_0 , doit se situer dans la fenêtre 1310 nm ou 1550 nm. La forme spectrale doit être approximativement gaussienne, sans ondulations susceptibles d'influencer la fonction d'autocorrélation de la lumière émergente. Il est nécessaire que la largeur de raie de la source (-3 dB), $\Delta\lambda$, soit connue pour calculer le temps de cohérence, t_c , qui est déterminé à partir de l'équation suivante:

$$t_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda_c} \quad (\text{C.1})$$

Il faut que la largeur spectrale de la source soit assez large pour permettre d'échantillonner les variations dans la zone de longueur d'onde mesurée. Une largeur spectrale de 70 nm constitue une valeur typique.

C.1.2 Séparateur de faisceau

Le séparateur de faisceau est utilisé pour séparer la lumière polarisée incidente en deux composantes qui se propagent dans les bras de l'interféromètre. Le séparateur peut être un coupleur à fibres optiques ou un séparateur cubique de faisceau.

C.1.3 Interféromètre

L'interféromètre peut être soit en espace libre ou soit fibré. Il peut s'agir d'un interféromètre de type Michelson ou Mach-Zehnder et il peut être situé à l'extrémité côté source ou côté détecteur de la fibre en essai. Une lame quart d'onde, par exemple, peut être utilisée pour éliminer la réponse de pic d'autocorrélation de l'interféromètre.

C.2 Procédure

C.2.1 Etalonnage

Le matériel est étalonné en vérifiant la mécanique de la ligne de retard avec une fibre biréfringente de retard de PMD connu. En variante, une «fibre étalon» de PMD connue peut être utilisée. Les conditions ambiantes et la fibre d'injection doivent être stables pendant toute la durée de la mesure.

C.2.2 Procédure d'essai

Une extrémité de la fibre en essai est couplée à la sortie polarisée de la source de lumière polarisée. L'autre extrémité est couplée à l'entrée de l'interféromètre. Ceci peut être réalisé au moyen de connecteurs à fibres normaux, d'épissures ou par un système d'alignement de fibre. Si ce dernier est utilisé, il convient d'appliquer une petite quantité d'huile adaptatrice d'indice au niveau des raccords pour éviter les problèmes de réflexion.

La puissance de sortie optique de la source de lumière est réglée à une valeur de référence caractéristique pour le système de détection utilisé. Pour obtenir un contraste de frange suffisant, la puissance optique doit être pratiquement la même dans les deux bras.

Une première acquisition est réalisée en déplaçant le miroir du bras de l'interféromètre et en enregistrant l'intensité de la lumière. A partir du motif de franges obtenu pour un état de polarisation choisi, le retard de PMD peut être calculé comme décrit à l'Article C.3. Un exemple typique de motif de franges pour un couplage de mode de polarisation négligeable et aléatoire est représenté à la Figure C.2.

C.1.1 Light source

A broadband light source is used that emits radiation at the intended measurement wavelengths, such as a light-emitting diode or a superfluorescent source. The central wavelength, λ_0 , shall be within the 1310 nm or 1550 nm windows. The spectral shape shall be approximately Gaussian, without ripples that could influence the auto-correlation function of the emerging light. The spectral source line width (–3 dB), $\Delta\lambda$, must be known to calculate the coherence time, t_c , which is determined with the following:

$$t_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda_c} \quad (\text{C.1})$$

The source linewidth must be broad enough to sample the variations in the wavelength region that is measured. A typical value is 70 nm.

C.1.2 Beam splitter

The beam splitter is used to split the incident polarized light into two components propagating in the arms of the interferometer. The splitter can be an optical fibre coupler or a cube beam splitter.

C.1.3 Interferometer

The interferometer can be an air type or a fibre type. It can be of Michelson or Mach-Zehnder type and located at the source or at the detector end of the fibre under test. A quarter waveplate, for example, can be used to remove the auto-correlation peak response of the interferometer.

C.2 Procedure

C.2.1 Calibration

The equipment is calibrated by checking the mechanics of the delay line with a birefringent fibre of known PMD delay. Alternatively, a “golden fibre” of known PMD may be used. The environment and the launching fibre shall be stable during the measurement period.

C.2.2 Routine operation

One end of the fibre under test is coupled to the polarized output of the polarized light source. The other end is coupled to the interferometer input. This can be done by standard fibre connectors, splices or by a fibre alignment system. If the latter is used, some index matching oil at the joints avoids reflections.

The optical output power of the light source is adjusted to a reference value characteristic for the detection system used. To get a sufficient fringe contrast, the optical power in both arms shall be almost identical

A first acquisition is made by moving the mirror of the interferometer arm and recording the intensity of the light. From the obtained fringe pattern for one selected state of polarization, the PMD delay can be calculated as described in Clause C.3. A typical example of a fringe pattern for negligible and random polarization mode-coupling is shown in Figure C.2.

Dans le cas d'un couplage de mode de polarisation insuffisant ou en cas de faible PMD, il est recommandé de répéter la mesure pour les différents états de polarisation ou de moduler l'état de polarisation pendant la mesure pour obtenir un résultat qui est une moyenne de tous les états de polarisation.

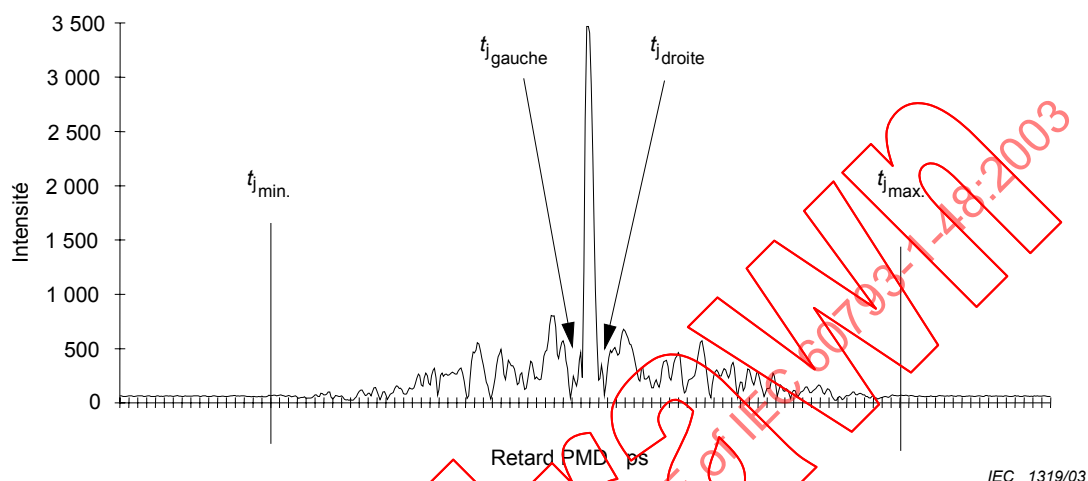


Figure C.2a – Couplage de mode aléatoire

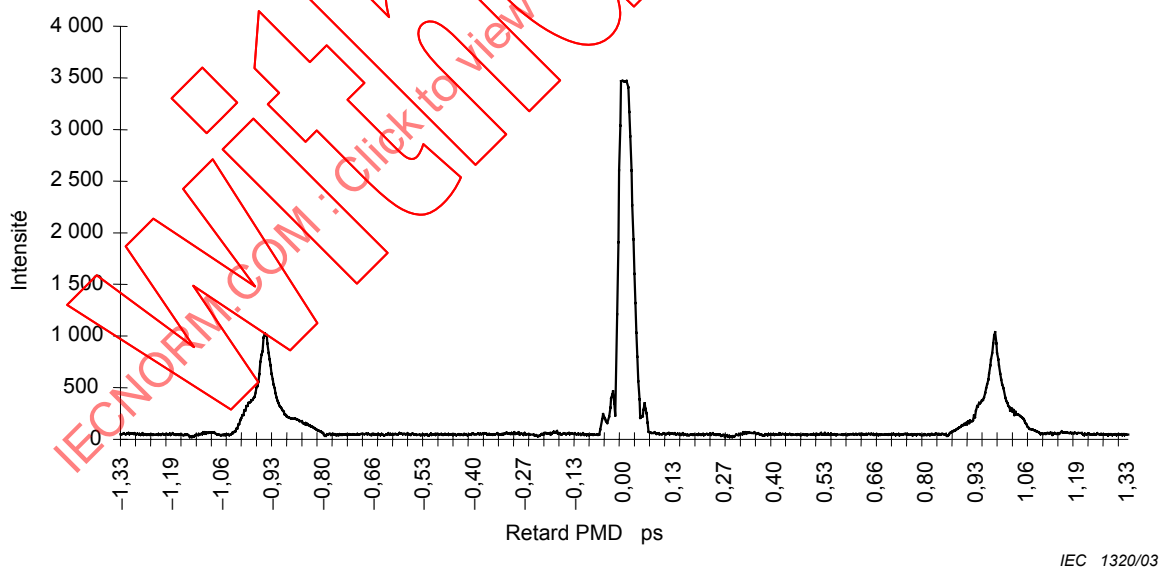


Figure C.2b – Couplage de mode négligeable

Figure C.2 – Données typiques obtenues par la Méthode C

In case of insufficient polarization mode-coupling, or in case of low PMD, it is recommended that the measurement be repeated for different SOPs or that the polarization state be modulated during the measurement in order to obtain a result which is an average over all SOPs.

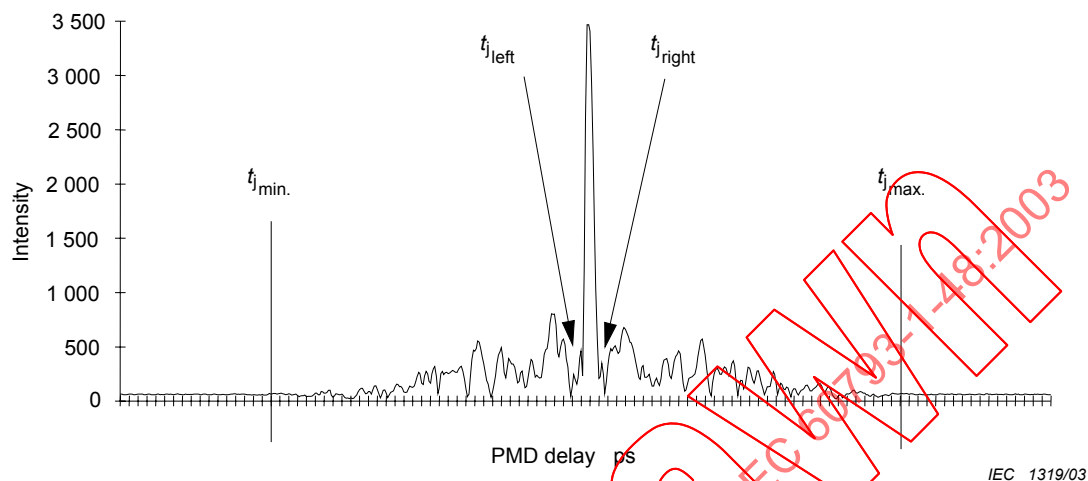


Figure C.2a – Random mode-coupling

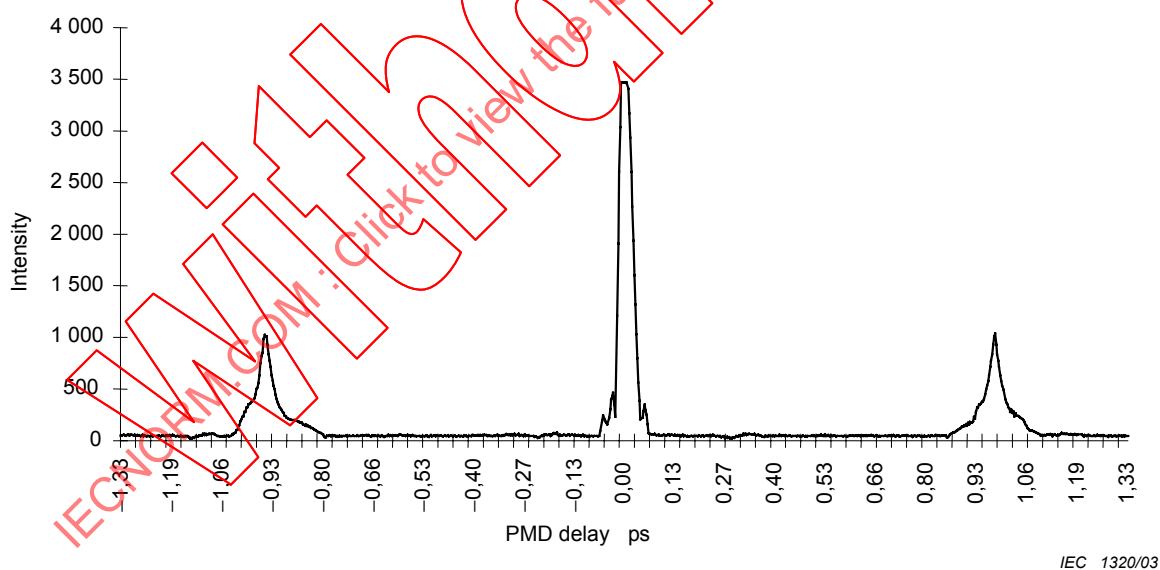


Figure C.2b – Negligible mode-coupling

Figure C.2 – Typical data obtained by Method C

C.3 Calculs

Les calculs sont divisés entre régime de couplage de mode négligeable et régime de couplage de mode aléatoire. Pour les deux régimes, la forme de l'interférogramme – en ne tenant pas compte du pic central – est caractérisée.

C.3.1 Couplage de mode négligeable

Dans le cas du couplage de mode négligeable, le retard de PMD est déterminé à partir de la séparation des deux pics de cohérence satellites, chacun retardé à partir du centre par le retard de groupe différentiel du dispositif en essai. Dans ce cas, le retard de groupe différentiel (DGD) est équivalent au retard de PMD.

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{2\Delta L}{c_0} \quad (\text{C.2})$$

où ΔL est le déplacement de la ligne de retard optique entre les deux pics de cohérence satellites et c_0 la vitesse de la lumière en espace libre. Le coefficient de PMD est donné par $\langle \Delta\tau \rangle / L$, où L est la longueur de la fibre en km.

C.3.2 Couplage de mode aléatoire

Dans le cas du couplage de mode aléatoire, la détermination du retard de PMD est fondée sur l'enveloppe de l'interférogramme du motif de franges. Le retard de PMD $\Delta\tau$ est déterminé à partir du moment d'ordre deux (valeur quadratique moyenne) de la fonction d'autocorrélation du signal détecté (interférogramme).

$$\langle \Delta\tau \rangle = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma_\varepsilon \quad (\text{C.3})$$

où σ_ε est la moitié de la largeur de la gaussienne calculée à partir de l'interférogramme comme décrit à l'Annexe J. Le coefficient de PMD est donné par $\langle \Delta\tau \rangle / \sqrt{L}$, où L est la longueur de la fibre en km. L'Equation C.3 s'applique à une définition de la valeur quadratique moyenne du retard de groupe différentiel (DGD); il se peut qu'un coefficient différent soit nécessaire pour une définition en valeur moyenne du retard de groupe différentiel (DGD).

L'Annexe J donne un exemple d'algorithme pour déterminer le retard de PMD $\Delta\tau$ à partir d'un interférogramme. Il est possible d'utiliser d'autres algorithmes, par exemple fondés sur l'intégration cumulative.

C.3 Calculations

The calculations are divided into the negligible mode-coupling regime and the random mode-coupling regime. For both, the spread in the interferogram – discounting the central peak – is characterized.

C.3.1 Negligible mode-coupling

In the case of negligible mode-coupling the PMD delay is determined from the separation of the two satellite coherence peaks each delayed from the centre by the differential group delay of the device under test. For this case the DGD is equivalent to the PMD delay.

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{2\Delta L}{c_0} \quad (\text{C.2})$$

where ΔL is the moving path of the optical delay line between the two satellite coherence peaks and c_0 the light velocity in free space. The PMD coefficient is given by $\langle \Delta\tau \rangle / L$ where L is the fibre length in km.

C.3.2 Random mode-coupling

In the case of random mode-coupling the determination of the PMD delay is based on the envelope of the fringe-pattern interferogram. The PMD delay $\Delta\tau$ is determined from the second moment (r.m.s. width) of the auto-correlation function of the detected signal (interferogram).

$$\langle \Delta\tau \rangle = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma_\varepsilon \quad (\text{C.3})$$

where σ_ε is the half-width of the Gaussian calculated from the interferogram as described in Annex J. The PMD coefficient is given by $\langle \Delta\tau \rangle / \sqrt{L}$ where L is the fibre length in km. Equation (C.3) applies to an r.m.s. DGD definition; a different coefficient may be necessary for an average DGD definition.

Annex J gives an example of an algorithm to determine the PMD delay $\Delta\tau$ from an interferogram. Other algorithms are possible; for instance, they can be based on cumulative integration.

Annexe D (informative)

Résultats d'intercomparaison de la dispersion de mode de polarisation (PMD) et observations

L'intérêt pour la PMD a commencé à faire son chemin dans l'industrie commerciale des fibres optiques. Avec cet intérêt croissant, le besoin en méthodes d'essai normalisées a progressé. En matière de PMD, comme pour beaucoup d'autres paramètres de fibres, il existe plusieurs techniques fiables pour la réalisation de la mesure. Le développement de ces techniques en procédures d'essai normalisées a été rapide pour répondre aux besoins de l'industrie. Néanmoins, compte tenu de la nature complexe de la PMD dans les fibres de télécommunication standard, il y a beaucoup de subtilités dans la mesure de ce paramètre. Les comparaisons de mesures interlaboratoires indiquent que des désaccords systématiques et aléatoires de $\pm 10\%$ à $\pm 20\%$ entre les méthodes de mesure et les calculs sont courants. Comme les travaux pour le développement des mesures de PMD se poursuivent, on s'attend à une amélioration de l'accord entre ces techniques. Cependant, à l'heure actuelle, l'accord interlaboratoire de $\pm 10\%$ à $\pm 20\%$ est considéré comme la technique de pointe. Le but de la présente annexe est de résumer brièvement le niveau de compréhension actuel à propos de la mesure de la PMD, le niveau démontré d'accord entre les procédures de mesure de PMD et de signaler les domaines actuellement à l'étude.

Pour illustrer le niveau actuel d'accord sur la PMD, le Tableau D.1 et la Figure D.1 présentent les résultats de deux séquences de mesures interlaboratoires. Les résultats de la séquence interlaboratoire PMD COST 241 [4], indiqués au Tableau D.1, sont composés des mesures effectuées sur deux jeux de produits fibres. Les produits sont des fibres épissurées hautement biréfringentes conçues pour fournir des qualités de fonctionnement de PMD stables, tout en simulant le couplage de mode aléatoire des fibres de télécommunication typiques. Les produits ont été mesurés par 11 participants utilisant au moins une des trois techniques. Les résultats ont montré un accord en moyenne de -13% à $+54\%$ pour tous les ensembles de données et de $\pm 15\%$ si les jeux de données en italique sont enlevés.

A la Figure D.1, on fournit les résultats d'une expérimentation de séquence interlaboratoire de l'industrie par la Méthode A. Dans cette séquence interlaboratoire, 20 ensembles de données d'analyseurs fixes (A à T), générés selon la Méthode A, ont été remis à cinq participants. Chaque participant a calculé les valeurs de PMD à partir de chaque ensemble de données en utilisant au moins une des Méthodes A, B et C. Les ensembles de données ont été choisis de manière à couvrir une gamme de rapport signal à bruit (S/N) représentant une grande variété de mises en œuvre de systèmes de mesure. Les résultats indiquent des accords allant de -33% à $+45\%$, en excluant le participant B qui utilisait un algorithme hybride, avec généralement un meilleur accord démontré sur les S/N supérieurs d'ensembles de données.

La source des désaccords systématiques est actuellement à l'étude au sein de la communauté des mesures. Ces désaccords peuvent provenir de plusieurs sources parmi lesquelles les seuils des processus de mesure, les filtres, la définition de PMD utilisée et les méthodes numériques. Chaque méthode détermine une valeur de PMD à partir des données de mesure selon la manière dont la PMD est définie. Par exemple, l'interférométrie et la méthode de l'analyseur fixe par transformée de Fourier mettent l'accent sur «l'élargissement d'impulsions» comme phénomène de PMD, alors que l'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones et le comptage des extrema à analyseur fixe mettent l'accent sur le retard de groupe différentiel entre les états principaux de polarisation. Bien que ces deux interprétations soient valables et utiles, elles peuvent être à l'origine de différences numériques significatives.

Annex D (informative)

PMD intercomparison results and observations

Interest in PMD has begun to find its way into the commercial optical fibre industry. As this interest has grown, the need for standardized testing methods has grown with it. With PMD, like many other fibre parameters, there exists more than one viable technique by which the measurement can be performed. Development of these techniques into standard testing procedures has progressed quickly to meet industry needs. However, due to the complex nature of PMD in standard telecommunications-grade fibre, many subtleties exist in the measurement of this parameter. Inter-laboratory measurement comparisons indicate that systematic and random disagreements of $\pm 10\%$ to $\pm 20\%$ between measurement methods and calculations are common. As work continues in the development of PMD measurements, agreement between these techniques is expected to improve. However, at the present time, inter-laboratory agreement of $\pm 10\%$ to $\pm 20\%$ is considered to be state-of-the-art. The purpose of this annex is to briefly summarize the present level of understanding regarding PMD measurement, the demonstrated level of agreement between PMD measurement procedures, and to point out the areas presently under continuing study.

To illustrate the present level of PMD agreement, the results of two inter-laboratory round robins are shown here in Table D.1 and Figure D.1. The results of the COST 241 PMD Round Robin [4], given here in Table D.1, are comprised of measurements performed on two sets of fibre artefacts. The artefacts are spliced high-birefringent fibres designed to provide stable PMD performance while simulating the random mode-coupling of typical telecommunications fibre. The artefacts were measured by 11 participants using one or more of three techniques. Results showed agreement to the mean from -13% to $+54\%$ for all data sets, and about $\pm 15\%$ if italicized data sets are removed.

In Figure D.1, the results of a industry round robin experiment by Method A are shown. In this round robin, 20 sets of fixed analyser data (A through T) generated according to Method A were distributed to five participants. Each participant calculated the PMD values from each data set using one or more of Methods A, B and C. The data sets were selected to span a range of signal-to-noise (S/N) ratio representing a wide variety of measurement system implementations. The results indicate agreement ranging from -33% to $+45\%$, excluding participant B who was using a hybrid algorithm, with generally better agreement being demonstrated on the higher S/N data sets.

The source of systematic disagreements is currently under study within the measurement community. These disagreements can result from several sources including measurement process thresholds, filters, the definition of PMD employed, and numeric approaches. Each method determines a PMD value from the measurement data in accordance with how PMD is defined. For example, interferometry and Fourier-transformed fixed analyser point to “pulse spreading” as the PMD phenomenon, and Jones Matrix Eigenanalysis and cycle-counted fixed analyser point to the differential group delay between principal states of polarization. Although both of these interpretations are valid and useful, they may be the source of significant numerical differences.

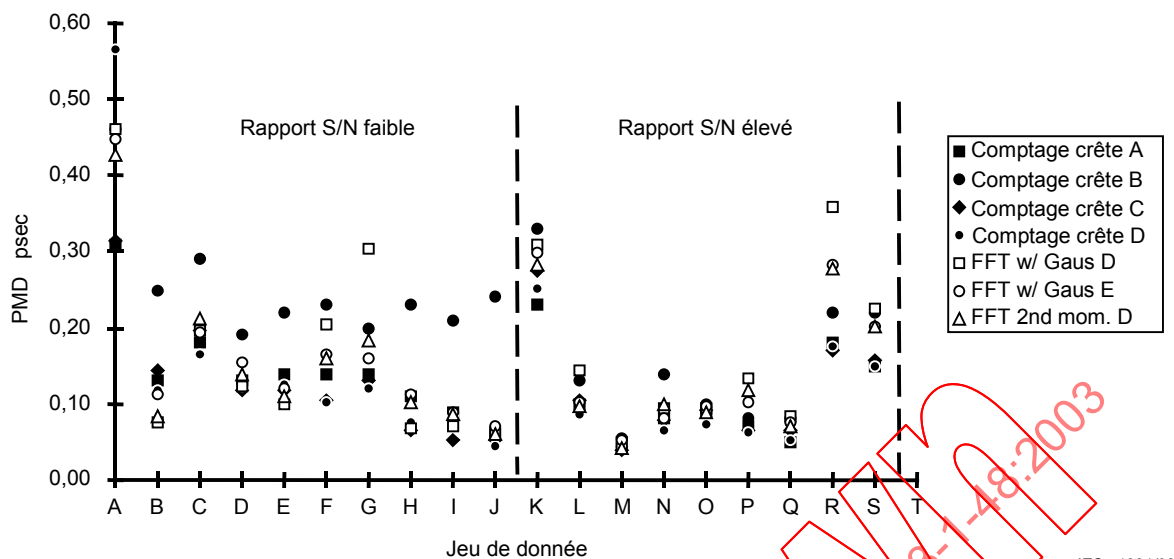
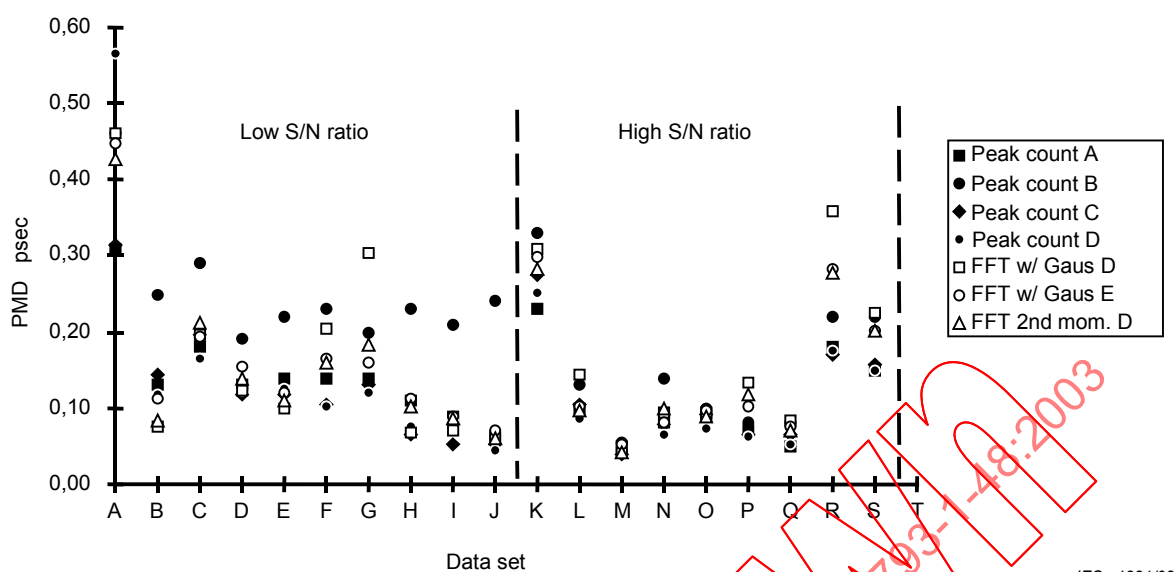


Figure D.1 – Comparaison des méthodes PMD et des calculs à partir des tests interlaboratoires

Les observations suivantes indiquent certaines des préoccupations concernant les différences numériques de PMD. On considère des fibres de grande longueur et un couplage de mode aléatoire important, car des fibres de plus faible longueur et à plus faible dispersion de PMD compliquent encore plus le problème.

- Il est difficile de comparer des méthodes de mesure avec la précision nécessaire pour quantifier toutes les sources de déviation.
- La simulation extensive et l'expérience de mesure [2] montrent un accord statistique relativement bon entre la méthode à analyseur fixe avec comptage de cycles et l'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones. C'est parce que le facteur de couplage de mode (k) a été choisi pour définir la PMD et donc produire le retard de groupe différentiel moyen sur une gamme de longueur d'onde. Si l'on se réfère à la Figure 1.2, les deux méthodes du haut sont en accord raisonnable.
- Il existe un large consensus sur le fait qu'il est souhaitable que les réponses approximativement gaussiennes produites par interférométrie et par l'analyseur fixe par transformée de Fourier soient équivalentes et présentent un bon accord statistique entre elles. Si l'on se réfère au Tableau D.2, les deux méthodes du bas devraient être en accord.
- Une différence numérique entre l'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones et l'interférométrie est actuellement en cours d'étude. Une recommandation a été publiée [3] selon laquelle il est souhaitable que la valeur efficace du retard de groupe différentiel sur la gamme de longueurs d'onde de mesure remplace la valeur moyenne en tant que vraie mesure de PMD pour l'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones. La valeur efficace et la valeur moyenne sont liées par un facteur numérique de 1,085 [3] qui, de ce fait, représente une source de différence numérique dans les résultats présentés.
- Le comptage des extrema et l'analyse de la transformée de Fourier, les deux moyens d'interprétation des données d'analyseur fixe doivent, par déduction des observations 2, 3 et 4, présenter des différences numériques en PMD. Le facteur numérique est normalement le même que celui de l'observation 4. Se reporter aux quarts supérieur et inférieur de la partie gauche du Tableau D.2.
- Noter qu'une différence numérique est observée principalement dans la dimension verticale du Tableau D.2, c'est-à-dire entre les quarts supérieur et inférieur. Horizontalement, les mesures sont en accord raisonnable, ou doivent normalement l'être.
- Toute variation dans la définition de la PMD pour une méthode affectera au moins une autre méthode. Par exemple, si la valeur efficace du retard de groupe différentiel était adoptée comme la vraie valeur de PMD, la valeur de k dans la méthode de comptage des extrema à analyseur fixe nécessiterait une modification pour maintenir l'accord.



IEC 1321/03

Figure D.1 – PMD wavelength scan data round robin

The following observations indicate some of the concerns about PMD numerical differences. Long fibres with high, random mode-coupling are assumed shorter length, lower PMD fibres complicate this even further.

- It is difficult to compare measurement methods to the precision required to quantify all sources of bias.
- Extensive simulation and measurement experience [2] shows fairly good statistical agreement between fixed analyser method with cycle or extrema counting and Jones matrix eigenanalysis. This is because the mode-coupling factor (k) was chosen to define PMD, and therefore produce the average differential group delay over a wavelength range. Referring to Figure I.2, the top two methods are in reasonable agreement.
- It is widely agreed that the roughly Gaussian responses produced by interferometry and Fourier transformed fixed analyser should be equivalent and that there should be good statistical agreement among them. Referring to Table D.2, the two lower methods should agree.
- A numerical difference between Jones matrix eigenanalysis and interferometry is currently being explored. It has been published [3] that the r.m.s. value of differential group delay across the measurement wavelength range should replace the average value as the true measure of PMD for Jones matrix eigenanalysis. The r.m.s. and mean values are related by a numerical factor of 1,085 [3] which, therefore, represents a source of numerical difference in reported results.
- Cycle or extrema counting and Fourier analysis, the two means of interpreting fixed analyser data, must, by deduction from observations 2, 3, and 4, exhibit numerical differences in PMD. The numerical factor is expected to be the same as in observation 4. Refer to the upper and lower left quadrants of Table D.2.
- Note that numerical difference is observed mainly in the vertical dimension of Table D.2, i.e. between upper and lower quadrants. Horizontally, the measurements are in reasonable agreement, or are expected to be.
- Any changes in the definition of PMD for one method will affect at least one other method. For instance, if the r.m.s. value of differential group delay were adopted as the true value of PMD, the value of k in the fixed analyser method with cycle or extrema counting would need to change to maintain agreement.

Tableau D.1 – Comparaison des méthodes et calculs de la dispersion de mode de polarisation (PMD) à partir de la séquence interlaboratoire PMD COST 241

Laboratoire	Fibres à haute biréfringence mises bout à bout			
	Montage 3		Montage 4	
	1300 nm	1500 nm	1300 nm	1550 nm
1P	2,58	2,31	9,55	12,90
2P	2,05	<i>a</i>	10,31	<i>a</i>
3P	<i>a</i>	2,70	<i>a</i>	8,50
4P	<i>a</i>	<i>1,10</i>	<i>a</i>	12,00
5P	<i>a</i>	1,96	<i>a</i>	<i>5,20</i>
6P	<i>a</i>	2,02	<i>a</i>	9,79
7P	<i>a</i>	1,99	<i>a</i>	9,68
8P	<i>a</i>	2,25	<i>a</i>	10,80
1I	1,96	2,26	8,39	9,10
2I	1,90	2,10	9,20	7,50
3I	1,78	1,85	8,70	8,50
4I	1,88	<i>a</i>	4,55	<i>a</i>
5I	2,30	<i>1,50</i>	9,00	10,40
6I	<i>3,18</i>	2,76	12,65	10,57
15F	<i>a</i>	2,44	<i>a</i>	12,02
16F	<i>a</i>	2,40	<i>a</i>	12,00
Moyenne	2,06	2,25	9,96	10,29
Sigma	0,28	0,29	1,45	1,64
Moyenne P	2,32	2,21	9,93	10,61
Sigma P	0,37	0,28	0,54	1,62
Moyenne I	1,96	2,24	9,59	9,21
Sigma I	0,20	0,38	1,74	1,29
NOTE Les valeurs en italique ne sont pas utilisées pour calculer les moyennes				
P: Etats principaux (Méthode B)				
I: Méthode par interférométrie (Méthode C)				
F: Analyseur fixe (Méthode A)				
^a Non mesuré.				

**Table D.1 – Comparison of PMD methods and calculations
from the COST 241 PMD Round Robin**

Laboratory	Concatenated hi-bi fibres			
	Set-up 3		Set-up 4	
	1 300 nm	1 500 nm	1 300 nm	1 550 nm
1P	2,58	2,31	9,55	12,90
2P	2,05	a	10,31	a
3P	a	2,70	a	8,50
4P	a	<i>1,10</i>	a	12,00
5P	a	1,96	a	<i>5,20</i>
6P	a	2,02	a	9,79
7P	a	1,99	a	9,68
8P	a	2,25	a	10,80
1I	1,96	2,26	<i>8,39</i>	9,10
2I	1,90	2,10	9,20	7,50
3I	1,78	1,85	8,70	8,50
4I	1,88	a	<i>4,55</i>	a
5I	2,30	<i>1,50</i>	9,00	10,40
6I	<i>3,18</i>	2,76	12,65	10,57
15F	a	2,44	a	12,02
16F	a	2,40	a	12,00
Mean	2,06	2,25	9,96	10,29
Sigma	0,28	0,29	1,45	1,64
Mean P	2,32	2,21	9,93	10,61
Sigma P	0,37	0,28	0,54	1,62
Mean I	1,96	2,24	9,59	9,21
Sigma I	0,20	0,38	1,74	1,29
NOTE The values in italics are not used to calculate averages.				
P: Principal states (Method B)				
I: Interferometry method (Method C)				
F: Fixed analyser (Method A)				
a Not measured.				

Tableau D.2 – Matrice de méthodes de mesure de PMD

Méthode par analyseur fixe avec comptage des extrema	Analyse des valeurs propres de la matrice de Jones
Méthode par analyseur fixe avec transformée de Fourier	Interférométrie

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60793-1-48:2003

Table D.2 – Matrix of PMD measurement methods

Fixed analyser method with cycle or extrema counting	Jones matrix Eigenanalysis
Fixed analyser method with Fourier transform	Interferometry

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60793-1-48:2003

Withd2AM

Annexe E (informative)

Stratégies d'amélioration de la précision

E.1 Mesures uniques/multiples

Dans les cas où une mesure unique n'est pas suffisante pour déterminer le type de couplage de mode ou pour déterminer $\langle \Delta \tau \rangle$ avec la précision voulue, il est possible que l'on soit amené à agrandir l'ensemble de données en combinant les données DGD provenant de mesures multiples, ou en étendant la gamme de longueurs d'onde dans le cas d'un couplage de mode aléatoire. Cette approche est valable si le comportement de couplage de mode de la fibre est suffisamment modifié entre les mesures. Des exemples de stratégies pour agrandir l'ensemble de données de mesure sont décrits ci-après. On considère que ces stratégies ont le même degré de validité.

La PMD peut être mesurée à un grand nombre de températures. Si la température de la fibre en essai est contrôlée par une enceinte climatisée, il convient de faire varier la température par paliers d'au moins 5 °C pour produire des variations significatives dans les effets de couplage de mode. Il est souhaitable que les variations de température soient approximativement égales afin d'obtenir un degré d'indépendance plus important parmi les mesures.

On peut également effectuer des mesures multiples à des températures multiples en positionnant dans le temps les mesures pour tirer parti des variations quotidiennes de la température de l'air ambiant. Il s'agit d'une stratégie commune dans le cas des fibres câblées. Des mesures sont effectuées lorsque la température a varié de manière significative afin d'atteindre un degré d'indépendance plus élevé parmi les mesures. La température des fibres câblées peut également être modifiée en faisant passer un courant à travers l'élément de fil autour duquel les fibres sont déployées.

Si la fibre est bobinée de manière lâche, la configuration du couplage de mode peut être modifiée en repositionnant la fibre sur la bobine. Pour repositionner la bobine, il existe divers moyens, comme par exemple, faire vibrer la bobine ou la retourner.

Il est également possible d'agrandir l'ensemble de données de PMD en mesurant de nombreuses fibres produites selon un procédé de fabrication fixe.

E.2 Méthode A

Une mesure unique utilisant la Méthode A constitue une moyenne sur une plage de longueur d'onde. S'il y a des extrema E dans $R(\lambda)$ dans cette plage, alors la valeur résultante de PMD aura, en couplage de mode aléatoire, une incertitude de dérive standard σ , où

$$(\sigma / \langle \Delta \tau \rangle)^2 \sim 0,5/E \quad (\text{E.1})$$

Dans l'analyse de Fourier, il y aura une incertitude correspondante qui dépendra du choix de la plage de longueur d'onde et de la valeur $\langle \Delta \tau \rangle$.

Annex E (informative)

Strategies for improving precision

E.1 Single versus multiple measurements

In cases where a single measurement is not sufficient to determine the type of mode-coupling or determine $\langle \Delta \tau \rangle$ to the desired precision, it may be necessary to enlarge the data set by combining DGD data from multiple measurements, or by increasing the wavelength range in the case of random mode-coupling. This approach is valid if the mode-coupling behaviour of the fibre is sufficiently changed between measurements. Example strategies for enlarging the measurement data set are described below. These strategies are considered equally valid.

PMD may be measured at a variety of temperatures. If the temperature of the test fibre is controlled by means of an environmental chamber, the temperature should be changed in increments of at least 5° C to produce significant changes in the mode-coupling effects. Temperature increments should be approximately equal in order to achieve a larger degree of independence among the measurements.

Multiple measurements at multiple temperatures may also be accomplished by timing the measurements to take advantage of daily ambient air temperature changes. This is a common strategy in the case of cabled fibre. Measurements are performed when the temperature has changed significantly to achieve a greater degree of independence among the measurements. The temperature of cabled fibre can be changed by passing a current through the wire element around which the fibres are deployed.

If the fibre is loosely spooled, the mode-coupling configuration can be changed by rearranging the fibre on the spool. Means of rearranging the fibre include vibrating or turning the spool.

The PMD data set can also be enlarged by measuring multiple fibres produced by a fixed manufacturing process.

E.2 Method A

A single measurement using Method A constitutes an average over a wavelength range. If there are E extrema in $R(\lambda)$ in this range, then the resulting value of PMD will have, under random mode-coupling, a one-standard-deviation uncertainty σ , where

$$(\sigma / \langle \Delta \tau \rangle)^2 \sim 0,5 / E \quad (\text{E.1})$$

In Fourier analysis, there will be a corresponding uncertainty, dependent on the choice of wavelength range and $\langle \Delta \tau \rangle$ value.

L'incertitude peut être réduite en effectuant un nombre total de N mesures et en modifiant la température ou la configuration mécanique de la fibre entre les mesures. Si la variation de température ou les perturbations mécaniques donnent lieu à des réponses de mesure suffisamment indépendantes les unes des autres, le fait d'effectuer de nombreuses mesures produira une incertitude de $\sigma/N^{1/2}$ dans la valeur moyenne. Si on dispose d'un temps de mesure suffisant, N peut être assez élevé pour réduire l'incertitude dans la valeur moyenne de PMD pour atteindre un critère de précision prédéterminé.

Lorsqu'une fibre à couplage de mode aléatoire est mesurée une seule fois, σ de l'Equation (E.1) pourrait être une fraction substantielle de $\langle \Delta\tau \rangle$. Si une seule mesure est effectuée, un rapport pourrait être mis à disposition pour en fournir la justification. Certains exemples de circonstances dans lesquels les mesures uniques sont justifiées, sont donnés ci-dessous.

EXEMPLE 1

Supposons qu'il faille fournir une population de fibres couplées en mode au sein de laquelle chaque fibre devra satisfaire à une spécification de PMD maximale de $\langle \Delta\tau \rangle_0$. Etant donné que la PMD $\langle \Delta\tau \rangle$ mesurée sur une fibre individuelle est une variable aléatoire dont σ n'est jamais égale à zéro, alors la vraie $\langle \Delta\tau \rangle$ de la fibre peut être supérieure à $\langle \Delta\tau \rangle_0$, même si la $\langle \Delta\tau \rangle$ obtenue à partir d'une mesure unique est inférieure à $\langle \Delta\tau \rangle_0$. Pour garantir, avec 98 % de chance de réussite, que la vraie $\langle \Delta\tau \rangle$ de la fibre est inférieure à $\langle \Delta\tau \rangle_0$, la valeur de PMD obtenue à partir d'une seule mesure de fibre devra satisfaire

$$\langle \Delta\tau \rangle < \langle \Delta\tau \rangle_0 - 2\sigma \quad (\text{E.2})$$

Cela équivaut à imposer une spécification de bande de protection de $\langle \Delta\tau \rangle_0 - 2\sigma$. Les fibres qui sont conformes à cette prescription lors d'une mesure unique pourraient être acceptées avec 98 % de chance de réussite dans la population de fibres qui satisfont à une spécification maximale de PMD de $\langle \Delta\tau \rangle_0$.

EXEMPLE 2

Supposons qu'il faille fournir une population de N fibres couplées en mode, tout en sachant que la PMD moyenne de la population est inférieure à $\langle \Delta\tau \rangle_0$. Dans ce cas, la moyenne $\langle \Delta\tau \rangle$, résultant de la mesure unique de chaque fibre dans la population, devra satisfaire

$$\overline{\langle \Delta\tau \rangle} < \langle \Delta\tau \rangle_0 - 2\sigma / N^{1/2} \quad (\text{E.3})$$

Cela donne 98 % de chance de réussite pour que la moyenne vraie de la population soit inférieure à $\langle \Delta\tau \rangle_0$, même si $\langle \Delta\tau \rangle$ peut dépasser $\langle \Delta\tau \rangle_0$ pour certaines fibres individuelles.

The uncertainty can be reduced by making a total of N measurements and changing the temperature or mechanical configuration of the fibre between measurements. If the temperature or mechanical perturbations produce measurement responses which are sufficiently independent of one another, the taking of multiple measurements results in an uncertainty $\sigma/N^{1/2}$ in the mean value. If sufficient measurement time is available, N can be made large enough to reduce the uncertainty in the mean PMD value to meet a predetermined precision criterion.

When a randomly mode-coupled fibre is measured only once, σ from Equation (E.1) could be a substantial fraction of $\langle \Delta\tau \rangle$. If only one measurement is performed, a report could be made available to provide the justification. Some examples of circumstances in which single measurements are justified are given below.

EXAMPLE 1

Suppose that a population of mode-coupled fibres must be supplied in which each fibre must meet a maximum PMD specification of $\langle \Delta\tau \rangle_0$. Since the PMD $\langle \Delta\tau \rangle$ measured on an individual fibre is a random variable whose σ never equals zero, then the fibre's true $\langle \Delta\tau \rangle$ may be greater than $\langle \Delta\tau \rangle_0$ even though the $\langle \Delta\tau \rangle$ obtained from a single measurement is less than $\langle \Delta\tau \rangle_0$. To ensure with 98 % confidence that the fibre's true $\langle \Delta\tau \rangle$ is less than $\langle \Delta\tau \rangle_0$, the PMD value obtained from a single fibre measurement must satisfy

$$\langle \Delta\tau \rangle < \langle \Delta\tau \rangle_0 - 2\sigma \quad (\text{E.2})$$

This is equivalent to imposing a guard band specification of $\langle \Delta\tau \rangle_0 - 2\sigma$. Fibres meeting this requirement in a single measurement could be accepted with 98 % confidence into the population of fibres that meet a maximum PMD specification of $\langle \Delta\tau \rangle_0$.

EXAMPLE 2

Suppose that a population of N mode-coupled fibres must be supplied, with the mean PMD of the population being less than $\langle \Delta\tau \rangle_0$. In this case, the mean $\langle \Delta\tau \rangle$ resulting from measuring each fibre in the population once must satisfy

$$\overline{\langle \Delta\tau \rangle} < \langle \Delta\tau \rangle_0 - 2\sigma / N^{1/2} \quad (\text{E.3})$$

This gives 98 % confidence that the true mean of the population is less than $\langle \Delta\tau \rangle_0$, even though $\langle \Delta\tau \rangle$ may exceed $\langle \Delta\tau \rangle_0$ for some individual fibres.

Annexe F (informative)

Algorithme d'identification de pic pour le comptage d'extrema utilisé dans la Méthode A

F.1 Introduction

En présence de bruit et/ou de couplage de mode aléatoire, l'identification des extrema en $R(\lambda)$ peut parfois être ambiguë. Un algorithme mathématique est nécessaire pour rendre cette identification rapide et objective. L'algorithme suivant est donné comme un exemple dont la validité a été constatée.

F.2 Lissage

Dans un ensemble de longueurs d'ondes régulièrement espacées $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$, le rapport de puissance de la Figure A.2a ou de la Figure A.2b de l'Annexe A est mesuré. Appelons ces valeurs mesurées $\{f_1, f_2, \dots, f_N\}$. Pour réduire l'effet du bruit, les données sont lissées en appliquant une méthode des moindres carrés. Pour chaque λ_i , un polynôme d'ordre inférieur est ajusté aux $2m + 1$ valeurs mesurées $\{f_{i-m}, \dots, f_i, \dots, f_{i+m}\}$ centrées en λ_i . On s'est aperçu qu'un polynôme de degré trois avec $m = 8$ fonctionnait bien sur la plupart des données de PMD.

Un polynôme de degré trois centré en λ_i a la forme générale suivante

$$R_i(\lambda) = a_i + b_i(\lambda_i - \lambda) + c_i(\lambda_i - \lambda)^2 + d_i(\lambda_i - \lambda)^3 \quad (\text{F.1})$$

En utilisant la méthode des moindres carrés pour calculer les coefficients,

$$a_i = \gamma_0^m f_i + \sum_{j=1}^m \gamma_j^{(m)} (f_{i+j} + f_{i-j}) \quad (\text{F.2})$$

$$b_i = \frac{1}{h} \sum_{j=1}^m a_j^{(m)} (f_{i+j} + f_{i-j}) \quad (\text{F.3})$$

où h est l'espacement entre les longueurs d'onde et

$$\gamma_j^{(m)} = 3 \frac{3m^2 + 3m - 5j^2 - 1}{(2m+1)(2m-1)(2m+3)} \quad (\text{F.4})$$

$$a_j^{(m)} = \frac{5j[7j^2(3m^2 + 3m - 1) - 5(3m^4 + 6m^3 - 3m + 1)]}{m(m+1)(2m+1)(4m^4 + 8m^3 - 7m^2 - 11m + 6)} \quad (\text{F.5})$$

Après évaluation de a_i et b_i , on obtient

$$c_i = \frac{3}{h^2} \frac{\sum_{j=-m}^m f_{i+j} - (2m+1)a_i}{m(m+1)(2m+1)} \quad (\text{F.6})$$

Annex F (informative)

Peak identification algorithm for extrema counting used in Method A

F.1 Introduction

In the presence of noise and/or random mode-coupling, the identification of extrema in $R(\lambda)$ may sometimes be ambiguous. A mathematical algorithm is needed to make this identification rapid and objective. The following algorithm is offered as an example of one that has been found to work.

F.2 Smoothing

At an evenly spaced set of wavelengths $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$, the power ratio in Figure A.2a or Figure A.2b in Annex A is measured. Call these measured values $\{f_1, f_2, \dots, f_N\}$. To reduce the effect of noise, the data are smoothed with a running least-square procedure. For each λ_j , a low-order polynomial is fitted to the $2m + 1$ measured values $\{f_{i-m}, \dots, f_i, \dots, f_{i+m}\}$ centred at λ_j . A cubic polynomial with $m = 8$ has been found to work well on most PMD data.

A cubic polynomial centred at λ_j has the general form

$$R_i(\lambda) = a_i + b_i(\lambda_i - \lambda) + c_i(\lambda_i - \lambda)^2 + d_i(\lambda_i - \lambda)^3 \quad (\text{F.1})$$

Using the method of least squares to calculate the coefficients,

$$a_i = \gamma_0^{(m)} f_i + \sum_{j=1}^m \gamma_j^{(m)} (f_{i+j} + f_{i-j}) \quad (\text{F.2})$$

$$b_i = \frac{1}{h} \sum_{j=1}^m a_j^{(m)} (f_{i+j} - f_{i-j}) \quad (\text{F.3})$$

where h is the spacing between wavelengths and

$$\gamma_j^{(m)} = 3 \frac{3m^2 + 3m - 5j^2 - 1}{(2m+1)(2m-1)(2m+3)} \quad (\text{F.4})$$

$$a_j^{(m)} = \frac{5j[7j^2(3m^2 + 3m - 1) - 5(3m^4 + 6m^3 - 3m + 1)]}{m(m+1)(2m+1)(4m^4 + 8m^3 - 7m^2 - 11m + 6)} \quad (\text{F.5})$$

Once a_j and b_j are evaluated, we find

$$c_i = \frac{3}{h^2} \frac{\sum_{j=-m}^m f_{i+j} - (2m+1)a_i}{m(m+1)(2m+1)} \quad (\text{F.6})$$

$$d_i = -\frac{5}{h^3} \frac{3 \sum_{j=-m}^m j f_{i+j} + h b_i m(m+1)(2m+1)}{m(m+1)(2m+1)(3m^2+3m-1)} \quad (\text{F.7})$$

La valeur lissée $R_i(\lambda_i)$ remplace alors la valeur mesurée f_i . En plus de cette valeur unique $R_i(\lambda_i)$, la fonction lissée $R_i(\lambda)$ à partir de l'Equation (F.1) est nécessaire pour calculer la dérivée en $\lambda = \lambda_i$ à l'Article F.3.

F.3 Définition d'un extremum

Une fois que les fonctions lissées $R_i(\lambda)$ ont été calculées, leurs dérivées $dR_i/d\lambda$ peuvent être calculées. Si la dérivée change de signe entre les valeurs adjacentes

$\frac{dR_{K-1}}{d\lambda}(\lambda_{K-1})$ et $\frac{dR_K}{d\lambda}(\lambda_K)$ le milieu $(\lambda_{K-1} + \lambda_K) / 2$ ou un point interpolé est identifié comme un extremum.

F.4 Validité

Certains extrema peuvent résulter de faibles oscillations parasites qui ne sont pas liées à la PMD (par exemple, bruit de mesure). Ils peuvent être éliminés en soumettant tous les extrema identifiés à l'Article F.3 à un essai. Pour chaque valeur maximale locale $R(\max)$, calculer le rapport

$$\frac{R(\max) - R(\text{nearest min})}{R(\text{global max}) - R(\text{global min})} \quad (\text{F.8})$$

où «global» se rapporte à la plage entière de données allant de λ_1 à λ_N . $R(\max)$ constitue un maximum acceptable uniquement si ce rapport dépasse une valeur prédéterminée (pouvant être typiquement de l'ordre de quelques pour-cent). De la même manière, $R(\min)$ est un minimum acceptable uniquement si le rapport

$$\frac{R(\text{nearest max}) - R(\min)}{R(\text{global max}) - R(\text{global min})} \quad (\text{F.9})$$

dépasse la même valeur prédéterminée.

F.5 Qualité d'adaptation

Un essai de qualité d'adaptation est utile pour s'assurer que les valeurs lissées $R_i(\lambda_i)$ représentent fidèlement les rapports de puissance mesurés f_i . A titre d'exemple, on pourrait exiger que l'erreur quadratique moyenne

$$D^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [f_i - R_i(\lambda_i)]^2 \quad (\text{F.10})$$

soit inférieure à 0,3. Si cette condition n'est pas respectée, des changements peuvent s'avérer nécessaires; par exemple, en répétant la mesure avec plus de points de données par période d'oscillation.

$$d_i = -\frac{5}{h^3} \frac{3 \sum_{j=-m}^m j f_{i+j} + h b_i m(m+1)(2m+1)}{m(m+1)(2m+1)(3m^2+3m-1)} \quad (\text{F.7})$$

The smoothed value $R_i(\lambda_i)$ then replaces the measured value f_i . In addition to this single value $R_i(\lambda_i)$, the smoothed function $R_i(\lambda)$ from Equation (F.1) is needed in order to calculate the derivative at $\lambda = \lambda_i$ in Clause F.3.

F.3 Definition of an extremum

Once the smoothed functions $R_i(\lambda)$ have been calculated, their derivatives $dR_i/d\lambda$ can be calculated. Whenever the derivative changes sign between the adjacent values

$\frac{dR_{K-1}}{d\lambda}(\lambda_{K-1})$ and $\frac{dR_K}{d\lambda}(\lambda_K)$ the midpoint $(\lambda_{K-1} + \lambda_K) / 2$, or an interpolated point, is identified as an extremum.

F.4 Robustness

Some extrema may be the result of small spurious oscillations that are unrelated to PMD (for example, measurement noise). These can be eliminated by subjecting all of the extrema identified in Clause F.3 to a test. For each local maximum value $R(\text{max})$, calculate the ratio

$$\frac{R(\text{max}) - R(\text{nearest min})}{R(\text{global max}) - R(\text{global min})} \quad (\text{F.8})$$

where “global” refers to the entire data range from λ_1 to λ_N . $R(\text{max})$ is an acceptable maximum only if this ratio exceeds some predetermined value (which might typically be a few per cent). Similarly, $R(\text{min})$ is an acceptable minimum only if the ratio

$$\frac{R(\text{nearest max}) - R(\text{min})}{R(\text{global max}) - R(\text{global min})} \quad (\text{F.9})$$

exceeds the same predetermined value.

F.5 Goodness-of-fit

A goodness-of-fit test is useful in assuring that the smoothed values $R_i(\lambda_i)$ faithfully represent the measured power ratios f_i . As an example, one could require the mean square error

$$D^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [f_i - R_i(\lambda_i)]^2 \quad (\text{F.10})$$

to be less than 0,3. If this condition is violated, some change may be necessary; for example, repeating the measurement with more data points per period of the oscillation.

Annexe G (informative)

Support théorique de l'analyse de Fourier pour la Méthode A

G.1 Introduction

Dans le cas d'un couplage de mode de polarisation négligeable d'une fibre ou d'un élément biréfringent unique, le rapport $R(\lambda)$ peut être dérivé comme une simple onde sinusoïdale modulée (se reporter à l'Annexe A) dans le domaine de longueur d'onde (voir Figure A.2a). Si les données sont tracées dans le domaine fréquentiel optique, la modulation est éliminée et la «fréquence» de l'onde sinusoïdale résultante est liée au temps d'arrivée relatif de l'impulsion, $\delta\tau$, ou simplement à la valeur de PMD $\langle\Delta\tau\rangle$ associée à la biréfringence qui produit l'oscillation.

En cas de couplage aléatoire, de nombreuses arrivées d'impulsions, $\delta\tau$, sont présentes avec différents niveaux relatifs et $R(\lambda)$ devient une fonction extrêmement complexe. Cela conduit au principe selon lequel si une analyse non pondérée du contenu spectral (par exemple, transformée de Fourier rapide) de $R(\lambda)$ devait être effectuée, on obtiendra la fonction d'autocorrélation $P(\delta\tau)$ de la distribution des arrivées d'impulsions individuelles et de leurs niveaux relatifs. Le moment d'ordre deux de cette distribution $P(\delta\tau)$ définira la valeur attendue de PMD, $\langle\Delta\tau\rangle$. Les statistiques de couplage aléatoire prévoient qu'il est souhaitable que la distribution $P(\delta\tau)$ tombe sur une courbe gaussienne ainsi, en comparant la distribution à une distribution gaussienne, on peut déduire le degré du caractère aléatoire dans le couplage.

G.2 Support théorique

La fibre en essai entre le polariseur et l'analyseur/polarimètre peut être simulée de manière théorique par un modèle simple. Si un élément ou une fibre biréfringent simple (c'est-à-dire, un cas de mode de couplage négligeable) est placé entre des polariseurs croisés, chacun à 45° par rapport aux axes de biréfringence de la fibre, le rapport de transmission de la lumière R' en fonction de la longueur d'onde, λ , est donné par:

$$R' = \sin^2 (\pi (\Delta n \cdot L) / \lambda) \quad (G.1)$$

où

Δn est la biréfringence de la fibre ou de l'élément

L est la longueur de la fibre

En formulant l'Equation (G.1) en fréquence optique ν , on obtient:

$$R' = \sin^2 [\pi (\Delta n \cdot L) / c_0] \nu] \quad (G.2)$$

où c_0 est la vitesse de la lumière en espace libre.

A présent, la PMD du dispositif est définie par

$$\delta\tau = \Delta n L / c_0 \quad (G.3)$$

où nous avons négligé tout terme de dispersion (habituellement faible) dans Δn par souci de clarté.

Annex G (informative)

Fourier analysis theoretical background for Method A

G.1 Introduction

In the case of negligible polarization mode-coupling or a simple birefringent fibre/element, the ratio $R(\lambda)$ may be derived as a simple chirped sine wave (see Annex A) in the wavelength domain (see Figure A.2a). If the data is plotted in the optical frequency domain, the chirp is removed, and the 'frequency' of the resulting sine wave is related to the relative pulse arrival time, $\delta\tau$, or simply the PMD value $\langle\Delta\tau\rangle$ associated with the birefringence that produces the oscillation.

In the case of random coupling, many pulse arrivals, $\delta\tau$, are present with different relative strengths, and $R(\lambda)$ becomes an extremely complex function. This leads to the concept that if an unweighted analysis of the spectral content (for example, the fast Fourier transform) of $R(\lambda)$ were to be performed, the autocorrelation function $P(\delta\tau)$ of the distribution of the individual pulse arrivals and their relative strengths will be obtained. The second moment of this distribution $P(\delta\tau)$ will define the expected value of PMD, $\langle\Delta\tau\rangle$. The statistics of random coupling dictate that the distribution $P(\delta\tau)$ should fall on a Gaussian curve, thus comparing the distribution to a Gaussian permits the degree of randomness in the coupling to be inferred.

G.2 Theoretical background

The fibre under test between the polarizer and analyser/polarimeter may be simulated theoretically by a simple model. If a simple birefringent fibre or element (i.e., negligible mode-coupling case) is placed between crossed polarizers, each at 45° to the fibre birefringence axes, the light transmission ratio R' as a function of wavelength, λ , is given by

$$R' = \sin^2 (\pi (\Delta n \cdot L) / \lambda) \quad (\text{G.1})$$

where

Δn is the birefringence of the fibre/element;

L is the fibre length.

Formulating Equation G.1 in optical frequency ν , we obtain

$$R' = \sin^2 [\pi (\Delta n \cdot L) / c_0] \nu] \quad (\text{G.2})$$

where c_0 is the velocity of light in free space.

Now, the PMD of the device is defined as

$$\delta\tau = \Delta n L / c_0 \quad (\text{G.3})$$

where we have neglected any (usually small) dispersion term in Δn for clarity.

En utilisant l'Equation (G.3) dans l'Equation (G.2) et en reformulant:

$$R' = (1 - \cos 2\pi \nu \delta\tau) / 2 \quad (G.4)$$

L'examen de l'Equation (G.4) révèle que R' est une onde cosinusoidale avec une «fréquence» d'oscillation, F , donnée par:

$$F = \delta\tau \quad (G.5)$$

En d'autres termes, le contenu spectral de R' a une composante unique à $\delta\tau$. Dans la mesure où le contenu spectral peut être obtenu par la transformée de Fourier de R' , la transformée de Fourier de R' indiquerait une «pointe» unique à $\delta\tau$ dans le domaine issue de la transformée (dans ce cas le domaine temporel). La transformée de Fourier fonctionne du domaine fréquentiel optique au domaine temporel. L'effet du terme dispersif omis dans l'Equation (G.3) est d'élargir ou de «brouiller» légèrement la pointe dans le domaine temporel. La PMD de la fibre/du dispositif en essai est alors tout simplement la position centrale de cette pointe dans la transformation. L'intensité de la pointe dépendra des orientations du polariseur et de l'analyseur par rapport aux axes de polarisation de fibre à l'entrée et à la sortie. Cependant, on peut montrer que la position $\delta\tau$, c'est-à-dire l'indication de PMD, ne varie pas en fonction des orientations du polariseur/analyseur. Ainsi, la PMD peut être mesurée indépendamment de la rotation de l'épissure de la fibre, de la position du polariseur, etc.

En étendant cette analyse au cas où la fibre a un couplage de mode aléatoire, on peut voir que les temps d'arrivée d'impulsion de «chemin» individuel provenant du couplage de mode donneront lieu chacun à une pointe correspondante dans la transformée de Fourier, avec une amplitude dépendant de l'orientation de polarisation relative vers le polariseur/analyseur et sur la puissance relative véhiculée par le chemin, sans aucun autre facteur de pondération. La transformée de Fourier est donc compatible avec la nature statistique de PMD dans les fibres et les données représentent l'autocorrélation de la distribution de temps d'arrivée d'impulsion.

Le modèle de PMD dans les fibres à couplage aléatoire montre qu'une impulsion d'entrée brève sortira de la fibre comme une impulsion lumineuse élargie avec une forme nominale gaussienne. La distribution de probabilité de l'impulsion de sortie est centrée sur le temps d'arrivée moyen de l'impulsion lumineuse (retard de groupe moyen), où $\delta\tau = 0$. Par conséquent, pour des fibres à couplage aléatoire, on s'attend à avoir une distribution $P(\delta\tau)$ dans le spectre de Fourier qui est gaussienne et centrée autour de $\delta\tau = 0$ (c'est-à-dire centrée à la «fréquence» zéro). Dans la mesure où la transformée de Fourier d'une fonction réelle est symétrique par rapport à la «fréquence» zéro, la transformée qui en résulte est une gaussienne unilatérale.

Il est possible de déterminer si les données d'amplitude $P(\delta\tau)$ sont suffisamment proches de la forme gaussienne pour que le couplage de mode puisse être considéré comme aléatoire. Le but est de déterminer si l'Equation (2) peut être utilisée pour calculer le coefficient de PMD à partir de la PMD, $\langle \Delta\tau \rangle$. Une méthode qui peut être utilisée est l'essai du χ^2 en prenant l'hypothèse d'une équation gaussienne adaptée.

L'équation gaussienne adaptée a la forme suivante:

$$P'_j(\delta\tau) = A_{\text{median}} \exp [-\delta\tau_j^2 / (2\sigma_R^2)] \quad (G.6)$$

où A_{median} est une constante et $P'_j(\delta\tau)$ est la fonction de probabilité prévue à la valeur temporelle $\delta\tau_j$. La procédure est comme suit:

Using Equation (G.3) in Equation (G.2) and reformulating:

$$R' = (1 - \cos 2\pi \nu \delta\tau)/2 \quad (\text{G.4})$$

Examination of Equation (G.4) reveals that R' is a cosine wave with an oscillation 'frequency', F , given by

$$F = \delta\tau \quad (\text{G.5})$$

In other words, the spectral content of R' has a single component at $\delta\tau$. Since the spectral content may be obtained by Fourier transform of R' , the Fourier transform of R' would show a single 'spike' at $\delta\tau$ in the transform domain (in this case the time domain). The Fourier transform operates from the optical frequency domain to the time domain. The effect of the dispersive term omitted in Equation (G.3) is to slightly broaden or 'smear' the spike in the time domain. The PMD of the fibre/device under test is then simply the centroid position of this spike within the transform. The spike intensity will depend on the orientations of the polarizer and analyser relative to the fibre polarization axes at input and output. However, it can be shown that the position $\delta\tau$, i.e., the PMD indication, does not change with polarizer/analyser orientations. Thus, PMD may be measured independently of fibre-splice rotation, polarizer position, etc.

Extending this analysis to the case where the fibre has random mode-coupling, we can see that the individual 'path' pulse arrival times arising from the mode-coupling will each give rise to a corresponding spike in the Fourier transform, with an amplitude dependent on relative polarization orientation to the polarizer/analyser and on the relative power being carried by that path, with no other weighting factors. The Fourier transform is therefore compatible with the statistical nature of PMD in fibres, and the data represent the auto-correlation of the pulse arrival time distribution.

The model of PMD in fibres with random coupling shows that a short input pulse will emerge from the fibre as a broadened light pulse with a nominally Gaussian shape. The probability distribution of the output pulse is centred on the mean arrival time of the light pulse (the average group delay), where $\delta\tau = 0$. Therefore, for randomly coupled fibres, we expect a distribution $P(\delta\tau)$ within the Fourier spectrum which is Gaussian, centred around $\delta\tau = 0$ (i.e., centred at zero "frequency"). Since the Fourier transform of a real function is symmetric about zero "frequency", the resulting transform is a one-sided Gaussian.

It can be determined whether the amplitude data $P(\delta\tau)$ is sufficiently close to Gaussian that the mode-coupling may be assumed to be random. This is to determine if Equation (2) may be used to calculate the PMD coefficient from the PMD, $\langle\Delta\tau\rangle$. One method that can be used is a chi-squared test assuming a fitted Gaussian equation.

The Gaussian equation fitted has the form:

$$P'_j(\delta\tau) = A_{\text{median}} \exp [-\delta\tau_j^2 / (2\sigma_R^2)] \quad (\text{G.6})$$

where A_{median} is a constant and $P'_j(\delta\tau)$ is the predicted probability function at time value $\delta\tau_j$.

- a) En réaménageant l'Equation (G.6), on obtient une estimation de la valeur A , A_j , à partir de chaque point de donnée $P_j(\delta\tau)$, de $j = 0$ à $j = M''$, en utilisant:

$$A_j = P'_j(\delta\tau) / \exp[-\delta\tau^2 / (2\sigma_R^2)] \quad (G.7)$$

où $j = 0, 1, \dots, M''$

- b) En prenant les valeurs A_j , la valeur finale de A est obtenue à partir de leur valeur médiane, A_{median} , donnée en ordonnant d'abord A_j en ordre croissant et en utilisant:

$$M'' \text{ pair: } A_{\text{median}} = A_{M''/2} \quad (G.8a)$$

$$M'' \text{ impair: } A_{\text{median}} = \{A_{(M''+1)/2} + A_{(M''+2)/2}\} / 2 \quad (G.8b)$$

- c) En utilisant A_{median} dans l'Equation (G.6), les valeurs de distribution (gaussiennes) prévues $P'_j(\delta\tau)$ sont déterminées et l'essai du χ^2 est effectué en utilisant l'équation:

$$\chi^2 = \sum_{j=0}^{M''} \left[2 \left[P_j(\delta\tau) / P'_j(\delta\tau) \right]^2 \right] \quad (G.9)$$

- d) Si

$$\chi^2 < \chi^2_{(a)} \quad (G.10a)$$

et

$$\chi^2 < \chi^2_{(1-a)} \quad (G.10b)$$

où $\chi^2_{(a)}$ est la valeur critique de la distribution du χ^2 au niveau a (par exemple 0,01) pour $2(M'' + 1)$ degrés de liberté. L'adaptation gaussienne est acceptée et les données sont donc aléatoires. L'Equation (2) peut être utilisée pour calculer le coefficient de PMD.

- e) Si la condition n'est pas remplie, les données sont considérées comme non aléatoires et l'Equation (2) ne peut pas être appliquée. Le coefficient de PMD n'est pas défini dans ce cas.

L'incertitude statistique dans l'essai du χ^2 est définie par le niveau a (dans ce cas 1 %). Ainsi, 1 % des essais peuvent donner la mauvaise décision quant à savoir si les données sont suffisamment aléatoires pour l'utilisation de l'Equation (2) pour obtenir le coefficient de PMD. Il est possible d'utiliser des mesures multiples de PMD pour améliorer l'incertitude de mesure (se reporter à l'Annexe E). Les mesures individuelles peuvent passer avec succès ou non l'essai du χ^2 et, dans ces conditions, la moyenne des valeurs de PMD $\langle \Delta \tau \rangle$ est calculée. La normalisation de longueur selon les Equations (1) ou (2) est alors appliquée, le choix de l'équation étant fait selon que la majorité des mesures uniques dans l'ensemble passe avec succès ou non l'essai du χ^2 . Indépendamment du choix de l'équation, le moment d'ordre deux définira toujours la PMD, $\langle \Delta \tau^2 \rangle$.

La Figure A.3 illustre un exemple de résultat par transformée de Fourier obtenu avec une fibre de 25 km de long avec un couplage aléatoire. Dans ce cas, M'' était déterminé comme égal à 9, et l'Equation (G.9) donnait $\chi^2 = 22,61$. Vu que pour $2(M'' + 1) = 20$, $\chi^2_{(a)}$ est égal à 37,6 and $\chi^2_{(1-a)}$ est égal à 8,26, les deux conditions de l'Equation (G.10) sont remplies. Les données sont donc gaussiennes, couplées de manière aléatoire, ce qui a permis d'utiliser l'Equation (2) pour calculer le coefficient de PMD.

The procedure is as follows.

- a) Rearranging Equation (G.6), an estimate of the value of A , A_j , is obtained from each data point $P_j(\delta\tau)$ from $j = 0$ to $j = M''$, using

$$A_j = P'_j(\delta\tau) / \exp [-\delta\tau^2 / (2\sigma_R^2)] \quad (\text{G.7})$$

where $j = 0, 1, \dots, M''$

- b) Taking the A_j values, the final value of A is obtained from their median value, A_{median} , given by first arranging A_j in ascending order and using

$$M'' \text{ pair: } A_{\text{median}} = A_{M''/2} \quad (\text{G.8a})$$

$$M'' \text{ impair: } A_{\text{median}} = \{A_{(M''+1)/2} + A_{(M''+2)/2}\} / 2 \quad (\text{G.8b})$$

- c) Using A_{median} in Equation (G.6) the predicted (Gaussian) distribution values $P'_j(\delta\tau)$ are determined, and the chi-squared test carried out using the equation.

$$\chi^2 = \sum_{j=0}^{M''} \left[2 \left\{ P_j(\delta\tau) / P'_j(\delta\tau) \right\}^2 \right] \quad (\text{G.9})$$

- d) If $\chi^2 < \chi^2_{(a)}$ (G.10a)

and $\chi^2 < \chi^2_{(1-a)}$ (G.10b)

where $\chi^2_{(a)}$ is the critical value of the chi-squared distribution at level a (for example, 0,01) for $2(M'' + 1)$ ° of freedom, the Gaussian fit is accepted and the data is therefore random. Equation (2) may then be used to calculate the PMD coefficient.

- e) If the condition is not met, the data is deemed to be non-random, and Equation (2) may not be applied. The PMD coefficient is not defined in this case.

NOTE The statistical uncertainty in the chi-squared test is defined by the level a (in this case 1 %). Thus 1 % of tests can give the wrong decision whether the data is sufficiently random for Equation 2 to be used to obtain the PMD coefficient. Multiple PMD measurements may be used to improve the measurement uncertainty (see Annex E). Individual measurements may or may not pass the chi-squared test, and, in this instance, the mean of the PMD $\langle \Delta\tau \rangle$ values are calculated. Length normalization according to Equations (1) or (2) is then applied, the choice of equation being made by whether the majority of single measurements in the set fail or pass the chi-squared test respectively. Regardless of the choice of equation, the second moment will always define the PMD, $\langle \Delta\tau^2 \rangle$.

An example of the Fourier transform output obtained in a fibre of length 25 km with random coupling is shown in Figure A.3. In this case M'' was determined to be 9, and Equation (G.9) gave $\chi^2 = 22,61$. Since for $2(M'' + 1) = 20$, $\chi^2_{(a)}$ is 37,6, and $\chi^2_{(1-a)}$ is 8,26, both conditions of Equation (G.10) are met. The data is therefore Gaussian, randomly coupled, so that Equation (2) has been used to obtain the PMD coefficient.

Annexe H (informative)

Détermination du régime de couplage de mode à partir des valeurs du retard de groupe différentiel (DGD)

H.1 Historique

De grandes longueurs de fibres optiques unimodales présentent un certain degré de »couplage de mode«, processus par lequel l'énergie qui se propage par les modes de polarisation rapide et lent d'un segment de la fibre est couplée dans le sens direct et en retour par des perturbations locales de biréfringence le long de la fibre. Pour une fibre de grande longueur, l'effet cumulatif de ce phénomène fait que $\Delta\tau$ dépend à la fois de la longueur d'onde et de l'environnement de la fibre. Le degré de couplage de mode détermine également la manière dont $\langle\Delta\tau\rangle$ augmente en fonction de la longueur de la fibre. La présente annexe fait état d'essais spécifiques pour déterminer le type de couplage de mode que présente une fibre ou un ensemble de fibres; à savoir: aléatoire, semi-aléatoire ou négligeable. Si l'essai de couplage de mode aléatoire est passé avec succès, $\langle\Delta\tau\rangle$ augmente en fonction de la racine carrée de la longueur de la fibre et il est correct d'exprimer la PMD en utilisant le coefficient de PMD de fibre de grande longueur. Si l'essai de couplage de mode négligeable est passé avec succès, $\langle\Delta\tau\rangle$ augmente directement avec la longueur de la fibre et il est correct d'exprimer la PMD en utilisant le coefficient de PMD de fibre de faible longueur. Si aucun de ces essais n'est passé avec succès, la PMD n'est pas définie en fonction de la longueur et il convient de n'utiliser aucun coefficient de PMD.

H.2 Essai relatif au couplage de mode aléatoire

La forme attendue de distribution de $\Delta\tau$ en fonction de la longueur d'onde est maxwellienne dans le cas du couplage de mode aléatoire, tandis que $\Delta\tau$ aura une valeur unique sur une plage de longueurs d'onde en l'absence de couplage de mode. La distribution de probabilité de Maxwell est donnée par:

$$f(\Delta\tau) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\Delta\tau^2}{\alpha^3} e^{-\frac{\Delta\tau^2}{2\alpha^2}} \quad (\text{H.1})$$

où $\Delta\tau$ est le retard de groupe différentiel (DGD) correspondant à un intervalle de longueur d'onde particulier et α est le seul paramètre qui spécifie une distribution de Maxwell.

L'évaluation statistique de l'ensemble de données commence par la détermination de α en utilisant «l'estimation de probabilité maximale» définie, pour une distribution de Maxwell attendue, par

$$\alpha^2 = \frac{1}{3N} \sum \Delta\tau_i^2 \quad (\text{H.2})$$

évaluée pour $i = 1 \dots N$, où $\Delta\tau_i$ sont les valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) mesurées sur N intervalles de longueur d'onde.

Annex H (informative)

Determination of mode-coupling regime from DGD values

H.1 Background

Long lengths of single-mode optical fibre exhibit some degree of “mode-coupling”, the process by which energy propagating in the fast and slow polarization modes of a segment of the fibre is coupled back and forth by local birefringence perturbations along the fibre. For a long fibre, the cumulative effect of this phenomenon is that $\Delta\tau$ is a function of both wavelength and fibre environment. The degree of mode-coupling also determines how $\langle\Delta\tau\rangle$ scales with fibre length. This annex provides specific tests for determining the type of mode-coupling exhibited by a fibre or ensemble of fibres; random, semi-random or negligible. If the test for randomness is met, $\langle\Delta\tau\rangle$ scales with the square root of fibre length, and it is valid to express PMD using the long-length PMD coefficient. If the test for negligible mode-coupling is met, $\langle\Delta\tau\rangle$ scales directly with fibre length, and it is valid to express PMD using the short-length PMD coefficient. If neither test is met, the length dependence of PMD is not defined and neither PMD coefficient should be used.

H.2 Test for random mode-coupling

The expected shape of the distribution of $\Delta\tau$ with wavelength is maxwellian in the case of random mode-coupling, whereas $\Delta\tau$ will have a single value across a range of wavelengths in the absence of mode-coupling. The Maxwell probability distribution is given by

$$f(\Delta\tau) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\Delta\tau^2}{\alpha^3} e^{-\frac{\Delta\tau^2}{2\alpha^2}} \quad (\text{H.1})$$

where $\Delta\tau$ is the DGD corresponding to a particular wavelength interval and α is the single parameter which specifies a Maxwell distribution.

Statistical evaluation of the data set starts with determination of α using “maximum likelihood estimation”, defined for an expected Maxwell distribution by

$$\alpha^2 = \frac{1}{3N} \sum \Delta\tau_i^2 \quad (\text{H.2})$$

evaluated for $i = 1 \dots N$, where $\Delta\tau_i$ are the DGD values measured across N wavelength intervals.

La qualité d'adaptation à la courbe théorique de Maxwell est déterminée en utilisant l'essai du χ^2 de Pearson. On construit un histogramme sur la plage s'étendant de 0 à 4α pour représenter les valeurs observées et les valeurs attendues. Le nombre de bins est choisi de manière à correspondre aux nombre de points de données divisé par cinq. Pour chaque bin, le compte attendu est calculé à partir de la distribution de probabilité de Maxwell, de la largeur de bin et du nombre de points de données. Avant d'appliquer l'essai du χ^2 de Maxwell, les bins des histogrammes sont consolidés par introduction des bins extérieurs, jusqu'à ce que chaque dernier bin contienne au moins cinq comptages attendus. L'essai du χ^2 de Pearson est appliqué:

$$\chi^2 = \sum \frac{(\text{observed} - \text{expected})^2}{\text{expected}} \quad (\text{H.3})$$

où «*observed*» représente le nombre de comptages de mesure et «*expected*» le nombre de comptages attendus, respectivement, dans un bin particulier. La somme est prise sur l'ensemble de l'étendue de l'histogramme consolidé. La probabilité significative ou «*valeur-p*» est déterminée à partir de tableaux normalisés utilisant la valeur de χ^2 et les degrés de liberté (nombre de bins moins un). La signification s'étend de 0 à 1 et donne la probabilité qu'un autre ensemble de données de même taille provenant d'une population similaire de données de mesure ait une adaptation égale ou supérieure à la distribution de probabilité de Maxwell. Au fur et à mesure que les distributions s'approchent de la valeur maxwellienne, la valeur p s'approche de zéro. Se reporter à la Figure H.1 pour des exemples d'évaluations de statistiques de mesure de PMD. L'essai du χ^2 de Pearson est très sensible. Une valeur p inférieure à 0,95 indique que la fibre en essai présente un couplage de mode aléatoire.

H.3 Essai relatif à l'absence de couplage de mode

Si l'écart type de $\Delta\tau$ sur la plage de longueur d'onde de mesure est inférieur à 1/10 de la moyenne, on considère que la fibre en essai présente un couplage de mode négligeable (un dispositif «déterministe») et on peut exprimer la PMD par le coefficient de PMD de «faible longueur» $<\Delta\tau>/L$.

H.4 Degré de couplage de mode pour la Méthode A

$R(\lambda)$ croise sa valeur moyenne une fois pour chaque extremum dans $R(\lambda)$ lorsqu'il n'y a pas de couplage de mode (voir Figure A.2a). Ainsi, le rapport des extrema sur les croisements avec le niveau moyen est 1 dans la limite d'aucun couplage de mode. Comme indiqué à la Figure A.2b, le couplage de mode fait passer le rapport au-dessus de 1. Dans la limite d'un mode de couplage aléatoire et d'un grand nombre d'extrema, le rapport théorique est proche de 1,54 [2] (réf. 1, Annexe J, Equation 34). Ainsi, le rapport mesuré dans la technique de comptage des extrema indique s'il convient d'utiliser l'Equation (H.1) ou l'Equation (H.2) pour calculer le coefficient de PMD. Dans une population de 93 fibres à couplage de mode aléatoire (câblées et non câblées), 97 % des fibres avaient un rapport $> 1,15$.

Si des mesures multiples sont effectuées pour améliorer la précision (se reporter à l'Annexe E), le rapport peut dépasser 1,15 pour certaines mesures, mais pas pour d'autres. L'application de l'Equation (H.1) ou de l'Equation (H.2) à la moyenne des mesures dépend du critère qui est satisfait pour la majorité des mesures.

Goodness-of-fit to the theoretical Maxwell curve is determined using the Pearson chi-square test. A histogram spanning the range $0 \dots 4\alpha$ is constructed to represent the observed and expected values. The number of bins is chosen to be the number of data points divided by 5. For each bin, the expected count is computed from the Maxwell probability distribution, the bin width and the number of data points. Prior to application of the Pearson chi-square test, the bins of the histograms are consolidated from the outer bins inwards, until each of the ultimate bins contains at least five expected counts. The Pearson chi-square test is applied

$$\chi^2 = \sum \frac{(\text{observed} - \text{expected})^2}{\text{expected}} \quad (\text{H.3})$$

where “observed” represents the number of measurement counts and “expected” represents the number of expected counts, respectively, in a particular bin. The summation is taken across the entire span of the consolidated histogram. The significance probability or “p-value” is determined from standard tables using the value of χ^2 and the degrees of freedom (number of bins minus one). The significance ranges from 0-1 and gives the probability that another, same-sized data set from a similar population of measurement data would have an equal or better fit to the Maxwell probability distribution. As distributions approach maxwellian, the p-value approaches zero. See Figure H.1 for example assessments of PMD measurement statistics. The Pearson chi-square test is very sensitive. A p-value smaller than 0,95 indicates that the test fibre is randomly mode-coupled.

H.3 Test for absence of mode-coupling

If the standard deviation of $\Delta\tau$ across the measurement wavelength range is less than 1/10 of the mean, the test fibre is considered to exhibit negligible mode coupling (a “deterministic” device) and PMD may be expressed by the “short-length” PMD coefficient $\langle \Delta\tau \rangle / L$.

H.4 Degree of mode-coupling for Method A

$R(\lambda)$ crosses its mean value once for every extremum in $R(\lambda)$ when there is no mode-coupling (see Figure A.2a). Thus, the ratio of extrema to mean-level crossings is 1 in the limit of no mode-coupling. As seen in Figure A.2b, mode-coupling causes this ratio to exceed 1. In the limit of random mode-coupling and a large number of extrema, the theoretical ratio approaches 1,54 [2] (ref.1, Annex J, Equation 34). Thus, the ratio measured in the cycle or extrema counting technique is an indicator of whether Equation (H.1) or Equation (H.2) should be used in calculating the PMD coefficient. In one population of 93 randomly mode-coupled fibres (both cabled and uncabled), 97 % of the fibres had a ratio $> 1,15$.

If multiple measurements are made to improve the precision (see Annex E), the ratio may exceed 1,15 for some measurements, but not for others. Whether Equation (H.1) or Equation (H.2) is applied to the mean of the measurements depends on which criterion is satisfied for the majority of the measurements.

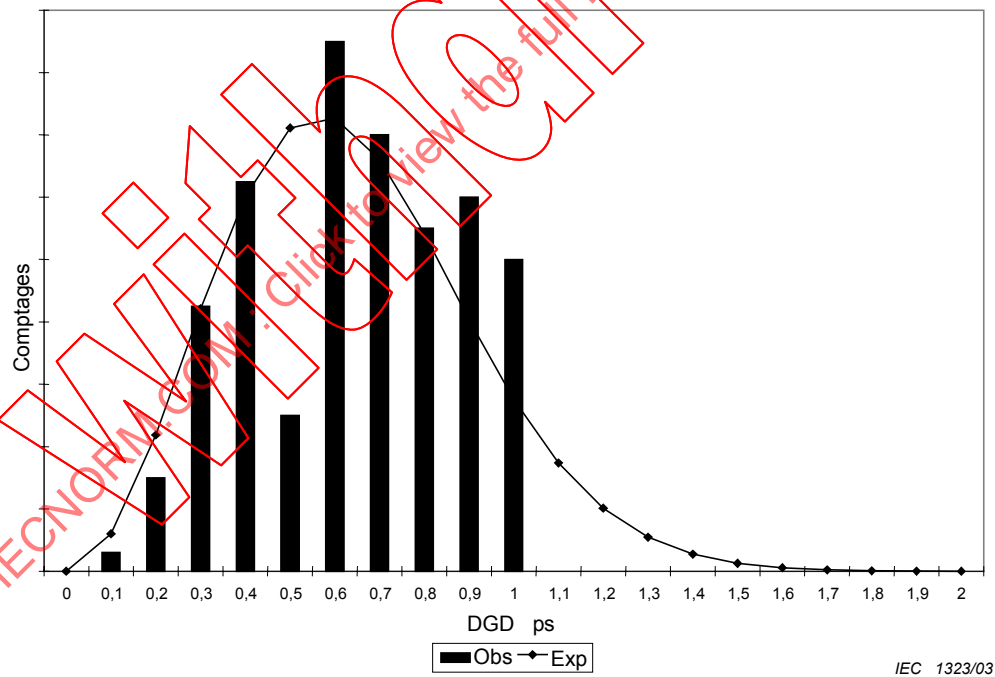
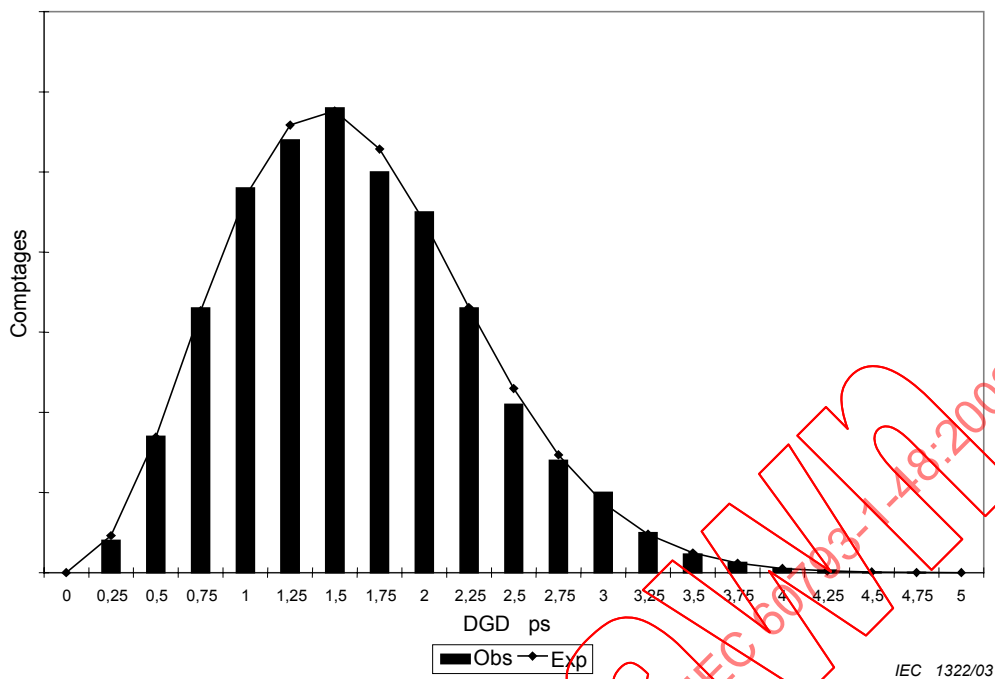


Figure H.1 – Exemple d'estimation de statistiques de mesures de PMD – Valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) mesurées et idéales avec superposition des courbes de Maxwell

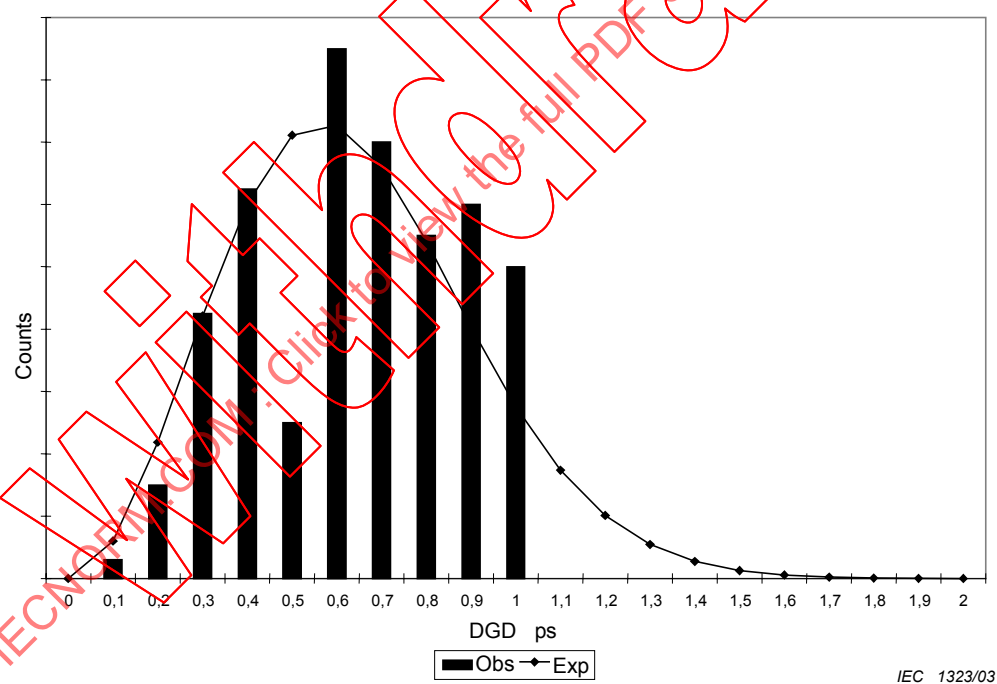
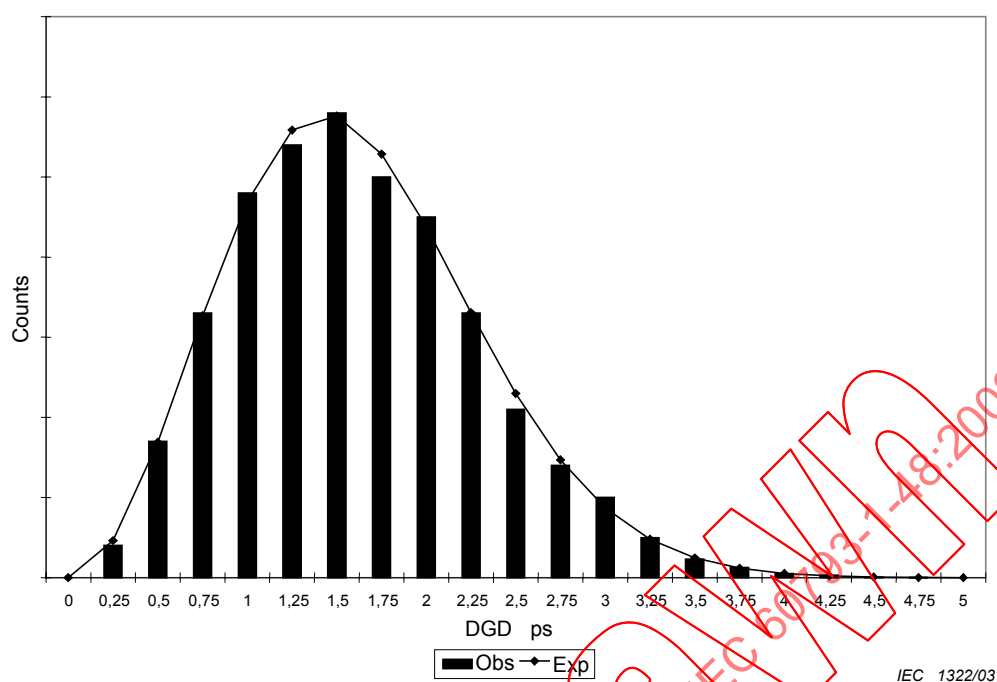


Figure H.1 – Example assessments of PMD measurement statistics – measured and ideal DGD values with superimposed Maxwell curves

Annexe I (informative)

Equivalence formelle des méthodes d'analyses des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (PSA et JME) et comparaison des résultats

I.1 Introduction

Les procédures d'essai relatives à l'analyse de la sphère de Poincaré (PSA) et à l'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones (JME) sont identiques. Les deux méthodes déterminent le retard de groupe différentiel (DGD) et les états principaux de polarisation (PSP) à partir des mêmes données brutes, c'est-à-dire les vecteurs de Stokes normalisés à la sortie du dispositif en essai en fonction de la fréquence optique ω , pour un nombre d'états de polarisation (SOP) en entrée. La méthode d'analyse de la sphère de Poincaré (PSA) est directement appliquée dans la représentation des paramètres de Stokes des états de polarisation (SOP), alors que la méthode d'analyse des valeurs propres de la Matrice de Jones (JME) est appliquée dans la représentation du vecteur d'état de polarisation (ou vecteur de Jones normalisé), après la transformation des vecteurs de Stokes en vecteurs d'états de polarisation.

Dans les paragraphes ci-après, il est démontré que les méthodes d'analyses des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (PSA et JME) sont formellement équivalentes. La matrice de dispersion de polarisation est identifiée dans la représentation du vecteur de Jones qui équivaut au vecteur de dispersion de polarisation complexe ou généralisée dans la représentation du vecteur de Stokes. Une expression simple de la matrice de dispersion de polarisation en fonction du vecteur de dispersion de polarisation établit le lien conceptuel entre les deux méthodes d'analyse. Une formule est également fournie pour un calcul simple du retard de groupe différentiel (DGD) dans des conditions de faible perte dépendant de la polarisation (PDL), qui équivaut à «l'approximation exponentielle» utilisée dans la méthode d'analyse des valeurs propres de la Matrice de Jones (JME) ».

I.2 Lien fondamental entre les méthodes d'analyses des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (JME et PSA)

Le vecteur de Jones normalisé peut être perçu comme le vecteur d'état mécanique quantique représentant l'état de polarisation de chaque photon individuel dans une onde totalement polarisée. D'autre part, le vecteur normalisé de Stokes, $\hat{s}$, peut être défini comme la valeur moyenne du moment cinétique du photon (en unités de $\hbar$) De ce fait, $\hat{s} = \langle e | \hat{\sigma} | e \rangle$ où $|e\rangle$ est le vecteur de Jones normalisé et $\hat{\sigma}$ est l'opérateur de Pauli.

Les méthodes d'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (JME et PSA) sont fondées sur les équations de mouvement de l'état de polarisation (SOP) à la sortie du dispositif en essai, en fonction de la fréquence optique ω . La dérivée de $\hat{s}$, $d\hat{s}/d\omega$, peut être trouvée à partir de $d|e\rangle/d\omega$, en partant de $\hat{s} = \langle e | \hat{\sigma} | e \rangle$. Afin d'obtenir des équations formellement identiques, il est pratique d'utiliser la matrice de densité de polarisation, $\rho = |e\rangle\langle e|$, à la place du vecteur d'état. Ceci permet d'éliminer l'encombrant facteur de phase qui apparaît dans $|e\rangle$. L'équation de mouvements peut être écrite comme suit:

Annex I (informative)

Formalistic equivalence of PSA and JME and result comparison

I.1 Introduction

The test procedures for PSA and JME are the same. The two approaches determine the differential group delay (DGD) and the principal states of polarization (PSP) from the same raw data, i.e. the normalized Stokes vectors at the output of the device under test as a function of the optical frequency ω , for a number of input states of polarization (SOP). The PSA is performed directly in the Stokes parameter representation of the SOP, while the JME is performed in the polarization state-vector (or normalized Jones vector) representation, after transformation of the Stokes vectors into polarization state-vectors.

In the following subclauses, PSA and JME are demonstrated to be formally equivalent. The polarization dispersion matrix is identified in the Jones-vector representation that is equivalent to the complex or generalized polarization dispersion vector in the Stokes vector representation. A simple expression of the polarization dispersion matrix as a function of the polarization dispersion vector establishes the conceptual link between the two analyses. A formula is also provided for a simple calculation of DGD in low polarization-dependent loss (PDL) conditions, which is the equivalent of the “exponential approximation” used in JME.

I.2 Fundamental link between JME and PSA

The normalized Jones vector can be viewed as the quantum mechanical state-vector representing the SOP of each individual photon or a fully polarized wave. On the other hand, the normalized Stokes vector, $\hat{s}$, can be defined as the mean value of the photon angular momentum (in units of $\hbar$). Hence, $\hat{s} = \langle e | \hat{\sigma} | e \rangle$ where $|e\rangle$ is the normalized Jones vector and $\hat{\sigma}$ is the Pauli operator.

JME and PSA are based on the equations of motion of the SOP at the output of the device under test, as a function of optical frequency ω . The derivative of $\hat{s}$, $d\hat{s}/d\omega$, can be found from $d|e\rangle/d\omega$ starting from $\hat{s} = \langle e | \hat{\sigma} | e \rangle$. In order to obtain formally identical equations, it is convenient to use the polarization density matrix, $\rho = |e\rangle\langle e|$, instead of the state-vector. This eliminates the cumbersome phase factor that appears in $|e\rangle$. The equation of motions can be written as

$$\frac{d\hat{s}}{d\omega} = \frac{1}{2} [\vec{\Omega} - i(\vec{\Omega} \times \hat{s})] \times \hat{s} + \text{c.c.} \quad \frac{d\rho}{d\omega} = [\Omega - \text{Tr}(\Omega\rho)]\rho + \text{h.c.} \quad (1.1)$$

où c.c. représente l'expression conjuguée complexe et h.c. représente le conjugué hermitien. Le vecteur de dispersion de polarisation complexe ou généralisé, $\vec{\Omega}$, et la matrice de dispersion de polarisation, Ω , sont liés à la matrice de Jones (T) par les relations suivantes:

$$W = \frac{dT}{d\omega} T^{-1} \quad \Omega = W - \frac{1}{2} \text{Tr}(W) \mathbb{1} \quad (1.2)$$

$$\Omega = \frac{i}{2} (\vec{\Omega} \cdot \hat{\sigma}) \quad (1.3)$$

où

Tr est la trace de la matrice; et

$\mathbb{1}$ est la matrice unité.

Dans la théorie de base de l'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones (JME), les états principaux de polarisation (PSP) et le retard de groupe différentiel (DGD) sont définis comme les vecteurs propres et la différence de valeurs propres de W (partie imaginaire). A partir de l'Equation (1.2), les vecteurs propres et la différence de valeurs propres de $\vec{\Omega}$ peuvent être perçus comme identiques à ceux de W . Le lien établissant l'équivalence conceptuelle entre les méthodes d'analyses des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (PSA et JME) est l'expression de Ω en fonction de $\vec{\Omega}$ (1.3). De manière simple, connaissant $\vec{\Omega}$, le vecteur obtenu par la méthode d'analyse de la sphère de Poincaré (PSA), on peut déduire Ω , la matrice qui définit le retard de groupe différentiel (DGD) et les états principaux de polarisation (PSP) dans l'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones (JME).

1.3 Comparaison des résultats obtenus par les méthodes d'analyses des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (PSA et JME)

Pour illustrer l'identité des deux analyses, le retard de groupe différentiel (DGD) a été calculé à la fois à partir de la méthode d'analyse de la sphère de Poincaré (PSA) et de la méthode d'analyse des valeurs propres de la Matrice de Jones (JME), en fonction de la fréquence optique. La simulation a été réalisée avec une concaténation de 20 lames à longueur d'onde avec des retards et des orientations aléatoires des axes de biréfringence. Dans la méthode PSA, le retard de groupe différentiel (DGD) a été déduit à partir des différences finies $\Delta\hat{s}_a$ correspondant aux états de polarisation d'entrée $a = i, j, k$ par l'intermédiaire de la formule suivante:

$$DGD = \frac{2}{\Delta\omega} \arcsin \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2} \sum_a \Delta\hat{s}_a^2} \right] \quad (1.4)$$

où $\Delta\omega$ est l'échelon de fréquence optique en radians. L'échelon de fréquence relative était $\Delta\omega \cdot \Delta\tau_{\max} = 0,2\pi$.

$$\frac{d\hat{s}}{d\omega} = \frac{1}{2} [\bar{\Omega} - i(\bar{\Omega} \times \hat{s})] \times \hat{s} + \text{c.c.} \quad \frac{d\rho}{d\omega} = [\Omega - \text{Tr}(\Omega\rho)]\rho + \text{h.c.} \quad (1.1)$$

where c.c. stands for the complex conjugate expression and h.c. for the hermitian conjugate. The complex or generalized polarization dispersion vector, $\bar{\Omega}$, and the polarization dispersion matrix, Ω , are related to the Jones matrix (T) through the following relations:

$$W = \frac{dT}{d\omega} T^{-1} \quad \Omega = W - \frac{1}{2} \text{Tr}(W) \mathbb{1} \quad (1.2)$$

$$\Omega = \frac{i}{2} (\bar{\Omega} \bullet \hat{\sigma}) \quad (1.3)$$

where

Tr is the trace of the matrix; and

$\mathbb{1}$ is the identity matrix.

In the basic theory of JME, the PSPs and DGD are defined as the eigenvectors and difference-of-eigenvalues of W (imaginary part). From Equation (1.2), the eigenvectors and difference-of-eigenvalues of Ω can be seen to be the same as those of W . The link establishing the conceptual equivalence of PSA and JME is the expression of Ω as a function of $\bar{\Omega}$ (Equation (1.3)). Simply, knowing $\bar{\Omega}$, the vector obtained via PSA, one can deduce Ω , the matrix that defines the DGD and PSPs in JME.

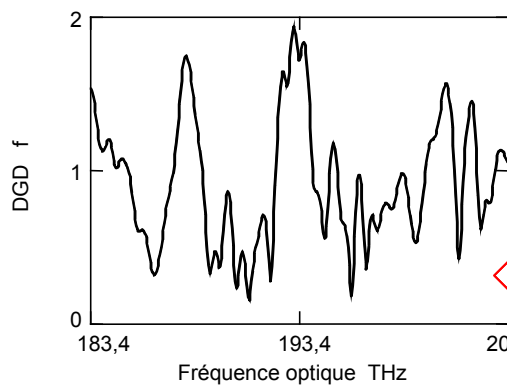
1.3 Comparison of results obtained through PSA and JME

To illustrate the identity of the two analyses, the DGD was calculated from both PSA and JME, as a function of the optical frequency. The simulation was performed with a concatenation of 20 waveplates with random delays and orientations of the birefringence axes. In PSA, the DGD was deduced from the finite differences $\Delta\hat{s}_a$ corresponding to input SOPs $a = i, j, k$, through the following formula,

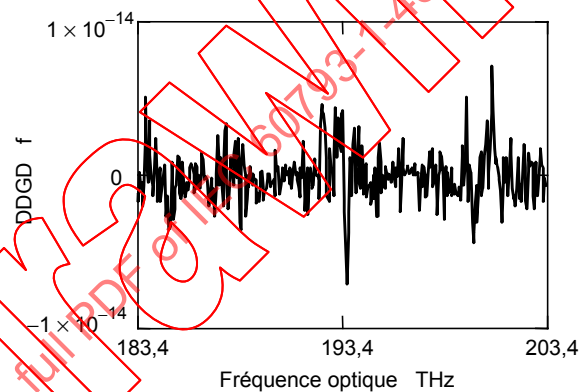
$$DGD = \frac{2}{\Delta\omega} \arcsin \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2} \sum_a \Delta\hat{s}_a^2} \right] \quad (1.4)$$

where $\Delta\omega$ is the radian optical frequency step. The relative frequency step was $\Delta\omega \cdot \Delta\tau_{\max} = 0,2\pi$.

L'Article suivant, I.4, donne la dérivation de l'Equation (I.4). L'équation (I.4) est obtenue en utilisant l'équivalent de l'approximation exponentielle de l'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones (JME), qui consiste à supposer que la matrice de dispersion de polarisation (vecteur) est constante sur l'intervalle de fréquence, de telle sorte que la matrice de Jones puisse être écrite comme une exponentielle, à savoir $T(\omega + \Delta\omega) = \exp(\Delta\omega W) T(\omega)$. L'équivalent dans la méthode d'analyse de la sphère de Poincaré (PSA) consiste à tenir compte du fait que le chemin suivi par l'état de polarisation entre deux points ne se situe pas le long de $\Delta\hat{s}$ mais le long d'un arc de cercle sous-tendu par $\Delta\hat{s}$. Les angles entre les vecteurs de Stokes étant conservés en l'absence de PDL (rotation), on peut déduire le troisième résultat (k) correspondant à l'état de polarisation d'entrée circulaire à partir des deux premières mesures (i, j), les états de polarisation d'entrée linéaires étant orientés à 0° et à 45° par rapport à un axe de référence donné. Les courbes du DGD obtenues à partir des deux analyses sont illustrées dans la Figure I.1a.



IEC 1324/03



IEC 1325/03

Figure I.1a – Courbes de variation du DGD

Figure I.1b – Différence entre les valeurs du DGD

NOTE Ces courbes sont obtenues à partir des méthodes d'analyses des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (PSA et JME), pour une concaténation simulée de 20 lames à longueur d'onde avec des retards et des orientations aléatoires des axes de biréfringence. On a trouvé que la valeur de PMD (ou DGD efficace) moyennée sur une plage de 20 THz centrée à 193,4 THz (1 550 nm) était égale à 1,01 ps. L'échelon de fréquence relative est $\delta f \cdot DGD_{\max} = 0,1$.

Figure I.1 – Variation du DGD en fonction de la fréquence optique

Les deux courbes ont été superposées sur le graphique. La différence entre les valeurs de la dispersion de mode de polarisation (PMD) est $\Delta PMD = 2,2 \times 10^{-16}$. La différence entre les valeurs du retard de groupe différentiel (DDGD) est indiquée dans la Figure I.1b en fonction de la fréquence optique. La valeur quadratique moyenne de cette différence est $DDGD_{\text{rms}} = 1,6 \times 10^{-15}$. Ces différences résiduelles sont imputées à des erreurs d'arrondis.

Les PSP obtenus à partir des deux analyses sont indiqués à la Figure I-2.