

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC**

TR 61282-5

Première édition
First edition
2002-04

**Guides de conception des systèmes
de communications à fibres optiques –**

**Partie 5:
Adaptation et compensation de la dispersion**

**Fibre optic communication system
design guides –**

**Part 5:
Accommodation and compensation
of dispersion**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC/TR 61282-5:2002

Numérotation des publications

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

Editions consolidées

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

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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

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

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

- **IEC Just Published**

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

- **Service clients**

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

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

Publication numbering

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

Consolidated editions

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

Further information on IEC publications

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

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

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

- **IEC Just Published**

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

- **Customer Service Centre**

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

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

RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT

CEI
IEC

TR 61282-5

Première édition
First edition
2002-04

**Guides de conception des systèmes
de communications à fibres optiques –**

**Partie 5:
Adaptation et compensation de la dispersion**

**Fibre optic communication system
design guides –**

**Part 5:
Accommodation and compensation
of dispersion**

© IEC 2002 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

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

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembe, 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

R

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Domaine d'application et objet.....	8
2 Documents de référence.....	8
3 Limites de dispersion chromatique.....	10
3.1 Dispersion chromatique de fibres à dispersion non décalée.....	10
3.2 Elargissement d'impulsion.....	12
3.3 Longueur limitée par dispersion.....	14
4 Types de compensation de dispersion.....	18
4.1 Compensation passive au long du trajet optique.....	18
4.2 Compensation et accommodation par l'émetteur ou par le récepteur.....	20
4.3 Compensation active au long du trajet optique.....	22
4.4 Compensation par la gestion de dispersion.....	22
5 Paramètres du compensateur de dispersion passive.....	22
5.1 Gamme de longueur d'onde de fonctionnement.....	22
5.2 Dispersion chromatique.....	22
5.3 Taux de compensation de dispersion.....	26
5.4 Perte d'insertion.....	26
5.5 Réflectance.....	28
5.6 Polarisation.....	28
5.6.1 Dispersion du mode de polarisation.....	28
5.6.2 Perte dépendante de la polarisation.....	30
5.7 Non-linéarité optique.....	30
6 Applications du compensateur de dispersion.....	30
6.1 Débits binaires plus élevés.....	30
6.2 Durées plus longues non répétées.....	32
6.3 Emission à longueurs d'ondes multiples.....	32
7 Paramètres du système pour des compensateurs passifs de dispersion.....	34
Annexe A Liste de sigles.....	36
Bibliographie.....	38
Figure 1 – Limites du coefficient de dispersion pour la fibre B1.....	10
Figure 2 – Somme des dispersions d'une fibre B1 et d'un CDP basé sur FDC dans la vitrine de l'AO.....	18
Figure 3 – Caractéristiques de réflectivité et de délai d'un CDP basé sur RBF (la dispersion est la pente de la ligne).....	20
Figure 4 – Compensateurs passifs de dispersion installés à un seul emplacement.....	30
Figure 5 – CDP installés avant les AO de puissance de l'émetteur (le circuit secondaire n'est pas représenté).....	32
Figure 6 – MRF de deux bandes avec un AO et un CDP dans la bande supérieure.....	32
Figure 7 – MRF à canaux multiples dans la bande de l'AO.....	34
Tableau 1 – Limites de longueur calculées (en km) entre régénérateurs pour une atténuation et une dispersion à 1 550 nm.....	16
Tableau 2 – Gammes de longueurs de l'émission avec un CDP conçu pour compenser les longueurs types de la fibre B1.....	24

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope and object.....	9
2 Reference documents.....	9
3 Chromatic dispersion limitations	11
3.1 Chromatic dispersion of dispersion-unshifted fibre.....	11
3.2 Pulse broadening	13
3.3 Dispersion-limited length	15
4 Types of dispersion compensation.....	19
4.1 Passive compensation along the optical path	19
4.2 Compensation and accommodation by the transmitter or receiver	21
4.3 Active compensation along the optical path.....	23
4.4 Compensation by dispersion management.....	23
5 Passive dispersion compensator parameters	23
5.1 Operating wavelength range.....	23
5.2 Chromatic dispersion.....	23
5.3 Dispersion compensation rate	27
5.4 Insertion loss.....	27
5.5 Reflectance	29
5.6 Polarization	29
5.6.1 Polarization-mode dispersion.....	29
5.6.2 Polarization-dependent loss.....	31
5.7 Optical non-linearity	31
6 Dispersion compensator applications.....	31
6.1 Higher bit-rates	31
6.2 Longer unrepeated spans	33
6.3 Multiwavelength transmission.....	33
7 System parameters for passive dispersion compensators	35
Annex A List of acronyms	37
Bibliography.....	39
Figure 1 – Extremes of the dispersion coefficient for B1 fibre.....	11
Figure 2 – Summing the dispersions of a B1 fibre and a DCF-based PDC over the OA window	19
Figure 3 – Reflectivity and time-delay characteristics of an FBG-based PDC (dispersion is the slope of the line)	21
Figure 4 – Passive dispersion compensators placed at one location	31
Figure 5 – PDCs placed before transmitter booster OAs (protect circuit not shown)	33
Figure 6 – Two-band WDM with an OA and a PDC in the upper band	33
Figure 7 – Multichannel WDM in the OA band	35
Table 1 – Calculated length limits (in km) between regenerators as determined by attenuation and dispersion at 1 550 nm	17
Table 2 – Transmission length ranges with a PDC designed to compensate typical lengths of B1 fibre.....	25

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**GUIDES DE CONCEPTION DES SYSTÈMES DE COMMUNICATIONS
À FIBRES OPTIQUES –**

Partie 5: Adaptation et compensation de la dispersion

AVANT-PROPOS

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

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

La CEI 61282-5, qui est un rapport technique, a été établie par le sous-comité 86C: Systèmes et dispositifs actifs à fibres optiques, du comité d'études 86 de la CEI: Fibres optiques.

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

Projet d'enquête	Rapport de vote
86C/291/CDV	86C/347/RVC

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 3.

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

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2006. A cette date, la publication sera

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

FIBRE OPTIC COMMUNICATION SYSTEM DESIGN GUIDES –**Part 5: Accommodation and compensation of 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 technical report may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

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

IEC 61282-5, which is a technical report, has been prepared by subcommittee 86C: Fibre optic systems and active devices, of IEC technical committee 86: Fibre optics.

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

Enquiry draft	Report on voting
86C/291/CDV	86C/347/RVC

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

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 3.

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

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2006. At this date, the publication will be

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

INTRODUCTION

En général, on utilise la compensation de dispersion en même temps que l'amplification optique. Actuellement, l'amplification optique est la plus pratique en employant les amplificateurs aux fibres dopées d'erbium qui fonctionnent dans la gamme de 1 550 nm. De tels systèmes sont utilisés pour étendre les espacements entre les répéteurs régénérateurs et pour augmenter le bilan de puissance pour les applications plus hautes de débit binaire par la largeur de bande. Les compensateurs de dispersion passive (CDP) ont des pertes intrinsèques qui sont surmontées par les amplificateurs optiques (AO). A l'avenir, il est possible que les AO dans la gamme de 1 310 nm ne demandent pas la compensation de dispersion des fibres B1.

Les CDP peuvent être utilisés dans l'environnement intercentraux et en réseau de distribution, pour l'émission analogique ou numérique, dans l'émission continue ou bidirectionnelle, dans l'émission par la longueur d'onde simple ou l'émission par multiplexage à répartition en longueur d'onde, et avec un AO externe. Le CDP aura des ports unimodaux en fibres optiques qui peuvent être des ports avec les fibres enrobées, les fibres tamponnées, le câble en fibres, ou avec les connecteurs optiques intégraux et sans fibres. Alternativement, un ou plusieurs CDP peuvent être utilisés avec un ou plusieurs AO en tant qu'éléments d'un composant intégré.

Dans ce rapport technique, le CDP sera considéré comme une «boîte noire» qui exécute de certaines transformations d'entrée à sortie, sans égards aux technologies particulières qui peuvent être utilisées dans le CDP.

INTRODUCTION

Dispersion compensation is usually used in conjunction with optical amplification. Currently optical amplification is most practical utilizing erbium-doped fibre amplifiers operating in the 1 550 nm region. Such systems are used to extend the spacings between regenerative repeaters and to increase the power budget for higher bit-rate/bandwidth applications. Passive dispersion compensators (PDCs) have intrinsic losses that are overcome by the optical amplifiers (OAs). Future OAs in the 1 310 nm region may not require dispersion compensation of B1 fibre.

PDCs may be used in the interoffice and subscriber loop plant environment, for analogue or digital transmission, in unidirectional and bidirectional transmission, in single-wavelength or wavelength-division-multiplexed transmission, and with an OA external to it. The PDC will have single-mode optical fibre ports that may be ports with coated fibres, buffered fibres, fibre cable, or with integral optical connectors and no fibres. Alternatively, one or more PDCs may be used with one or more OAs as part of an integrated component.

In this technical report, the PDC will be discussed as a "black box" which performs certain input-to-output transforms, without regard to the particular technologies that may be employed within the PDC.

GUIDES DE CONCEPTION DES SYSTÈMES DE COMMUNICATIONS À FIBRES OPTIQUES –

Partie 5: Adaptation et compensation de la dispersion

1 Domaine d'application et objet

La présente partie de la CEI 61282, qui est un rapport technique, s'applique à l'adaptation et à la compensation de la dispersion dans les systèmes de communication à fibres optiques.

En général, la compensation de dispersion et l'adaptation de dispersion sont utilisées dans la gamme de 1 550 nm par des câbles qui incorporent une fibre de la catégorie B1 d'une mode unique conventionnelle (dispersion non décalée) comme illustré dans la CEI 60793-1 et la CEI 60793-2. En cette gamme de longueur d'onde, la fibre a un coefficient de dispersion positive d'une moyenne de 17 ps/nm-km. Il y a deux sous-catégories d'une telle fibre. La longueur d'onde de coupure de la fibre B1 est assez petite pour utiliser la fibre soit en gamme de 1 310 nm soit en gamme de 1 550 nm. La majorité des câbles à fibres optiques installés globalement contient ce type de fibre. La longueur d'onde de coupure de la fibre B1.2 est assez grande pour n'utiliser la fibre qu'en gamme de 1 550 nm. Des systèmes sous-marins utilisent cette fibre.

Les valeurs de dispersion inférieures sont obtenues par une fibre à dispersion décalée de la catégorie B2 et par une fibre de dispersion non nulle de la catégorie B4. On peut de temps en temps utiliser l'adaptation ou la compensation de dispersion avec ces types de fibre, mais on ne discutera que les fibres de la catégorie B1 dans ce rapport technique.

La compensation se réfère aux techniques ou aux composants qui réduisent la valeur de dispersion ou la pente de dispersion d'une liaison à fibres optiques afin d'activer l'émission aux débits numériques binaires plus hauts et aux fréquences analogiques plus hautes que celles qui seraient possibles sans l'utilisation de ces techniques. En réalité, la longueur d'onde de dispersion nulle cumulative du chemin optique va de la gamme de 1 310 nm vers une gamme de 1 550 nm. A quelques égards cumulatifs, on peut faire une liaison de dispersion non décalée d'une fibre B1 avec un compensateur de dispersion alignée pour ressembler à une liaison de fibres B2 de dispersion décalée. Quelques modèles de composants de compensation passive de dispersion comprennent des fibres de compensation de dispersion, des fibres de réseaux de Bragg, et des étalons.

L'adaptation se réfère aux techniques ou aux composants qui utilisent la dispersion afin d'activer l'émission aux débits numériques binaires plus hauts et aux fréquences analogiques plus hautes que celles qui seraient possibles sans l'utilisation de ces techniques. Quelques modèles de composants d'adaptation active de dispersion comprennent la préfluctuation de longueur d'onde optique ou électrique à l'émetteur, l'émission par dispersion, la conversion en onduleur spectrale au milieu de la travée, et le traitement du signal du récepteur. On traitera le sujet d'adaptation dans les révisions à venir de ce rapport technique.

La gestion qui renvoie aux techniques qui font changer le coefficient de dispersion le long du chemin optique (signe et magnitude) demeure à l'étude.

2 Documents de référence

CEI 60793-1 (toutes les parties), *Fibres optiques – Partie 1: Spécification générique*

CEI 60793-2, *Fibres optiques – Partie 2: Spécifications de produits*

FIBRE OPTIC COMMUNICATION SYSTEM DESIGN GUIDES –

Part 5: Accommodation and compensation of dispersion

1 Scope and object

This part of IEC 61282, which is a technical report, applies to the accommodation and compensation of dispersion in fibre optic communication systems.

Generally, dispersion compensation and accommodation is used in the 1 550 nm region with cables incorporating conventional (dispersion-unshifted) single-mode category B1 fibre as shown in IEC 60793-1 and IEC 60793-2. In this wavelength region, the fibre has a positive dispersion coefficient that averages at about 17 ps/nm–km. There are two subcategories of such fibre. The cutoff wavelength of B1 fibre is low enough for the fibre to be used in either the 1 310 nm or the 1 550 nm region. Such fibre makes up the vast majority of installed fibre optic cable world wide. The cutoff wavelength of B1.2 fibre is high enough for the fibre to be used in the 1 550 nm region only. Such fibre is used in some submarine systems.

Smaller values of dispersion are attainable with dispersion-shifted category B2 fibre and with non-zero-dispersion category B4 fibre. Dispersion accommodation or compensation may sometimes be used with these fibre types as well, but only category B1 fibres will be discussed in this technical report.

Compensation refers to techniques or components that reduce the value of the dispersion or the dispersion slope of a fibre optic link to enable transmission at digital bit-rates and at analogue frequencies higher than would be possible without these techniques. Effectively, the cumulative zero-dispersion wavelength of the optical path is moved from the 1 310 nm region to somewhere in the 1 550 nm region. A link of dispersion-unshifted B1 fibre and an in-line dispersion compensator can be made to resemble, in some cumulative respects, a link of dispersion-shifted B2 fibre. Examples of passive dispersion compensating components include dispersion-compensating fibre, fibre Bragg gratings, and etalons.

Accommodation refers to techniques or components that utilize dispersion to enable transmission at digital bit-rates and at analogue frequencies higher than would be possible without these techniques. Examples of active dispersion accommodation include optical or electrical prechirping at the transmitter, dispersion-assisted transmission, midspan spectral inversion, and receiver signal processing. Accommodation will be treated in future revisions of this technical report.

Management referring to techniques that vary the dispersion coefficient along the optical path (both sign and magnitude) remains under study.

2 Reference documents

IEC 60793-1 (all parts), *Optical fibres – Part 1: Generic specification*

IEC 60793-2, *Optical fibres – Part 2: Product specifications*

CEI/TR 61282-3, *Directives de conception pour les systèmes de communication en fibres optiques – Partie 3: Calcul de dispersion en mode de polarisation dans les systèmes en fibres optiques* ¹⁾

CEI/TR 61282-4, *Directives de conception pour les systèmes de communication en fibres optiques – Partie 4: Prise en compte et utilisation des effets de non-linéarité dans les systèmes analogiques et numériques à fibres optiques* ¹⁾

UIT-T Recommandation G.691, *Interfaces optiques pour systèmes monocanaux STM-64, STM-256 et autres systèmes SDH à amplificateurs optiques*

UIT-T Recommandation G.692, *Interfaces optiques pour systèmes multicanaux avec amplificateurs optiques*

UIT-T Recommandation G.957, *Interfaces optiques pour les équipements et les systèmes relatifs à la hiérarchie numérique synchrone*

3 Limites de dispersion chromatique

3.1 Dispersion chromatique de fibres à dispersion non décalée

Comme indiqué ci-dessus, les compensateurs de dispersion sont nécessaires lorsque la fibre de la catégorie B1 est utilisée en conjonction avec des AO, surtout dans la bande C (1 530 nm à 1 565 nm). La figure 1 illustre les coefficients chromatiques limitant de dispersion qui sont caractéristiques de la fibre B1.

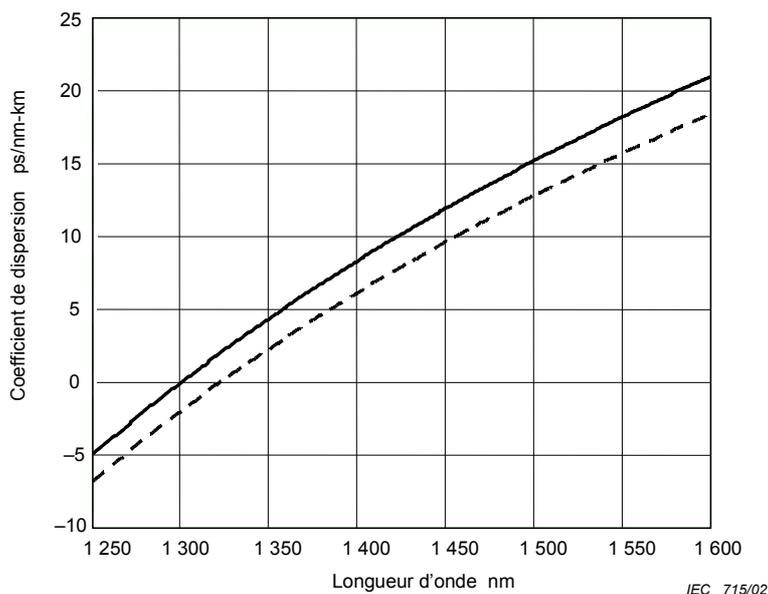


Figure 1 – Limites du coefficient de dispersion pour la fibre B1

Pour satisfaire aux tolérances de fabrication, tout en donnant pourtant satisfaction aux besoins de l'utilisateur, les spécifications pour la fibre B1 permettent une gamme pour les valeurs de la longueur d'onde de dispersion nulle λ_0 , avec une valeur maximale du coefficient de pente de dispersion nulle S_0 de 1 310 nm. La valeur permise la plus basse de λ_0 avec la valeur permise maximale de S_0 entraîne la courbe pleine dans la figure 1; la valeur permise la plus haute de λ_0 avec une valeur basse typique de S_0 entraîne la courbe en tirets. Ceux-ci donnent respectivement les valeurs les plus hautes et les plus basses du coefficient de dispersion à 1 550 nm: environ 18,2 ps/nm-km et au-dessous de 16 ps/nm-km. Les fibres convenables se trouvent entre ces limites.

¹⁾ A publier.
¹⁾ A l'étude.

IEC/TR 61282-3, *Fibre optic communication system design guides – Part 3: Calculation of PMD in fibre optic systems* ¹⁾

IEC/TR 61282-4, *Fibre optic communication system design guides – Part 4: Accommodation and utilization of non-linear effects in single-mode fibre optic systems* ¹⁾

ITU-T Recommendation G.691, *Optical interfaces for single-channel STM-64, STM-256 and other SDH systems with optical amplifiers*

ITU-T Recommendation G.692, *Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers*

ITU-T Recommendation G.957, *Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy*

3 Chromatic dispersion limitations

3.1 Chromatic dispersion of dispersion-unshifted fibre

As discussed above, dispersion compensators are needed when category B1 fibre is used in conjunction with OAs, especially in the C-band (1 530 nm to 1 565 nm). Figure 1 shows the limiting chromatic dispersion coefficients characteristic of B1 fibre.

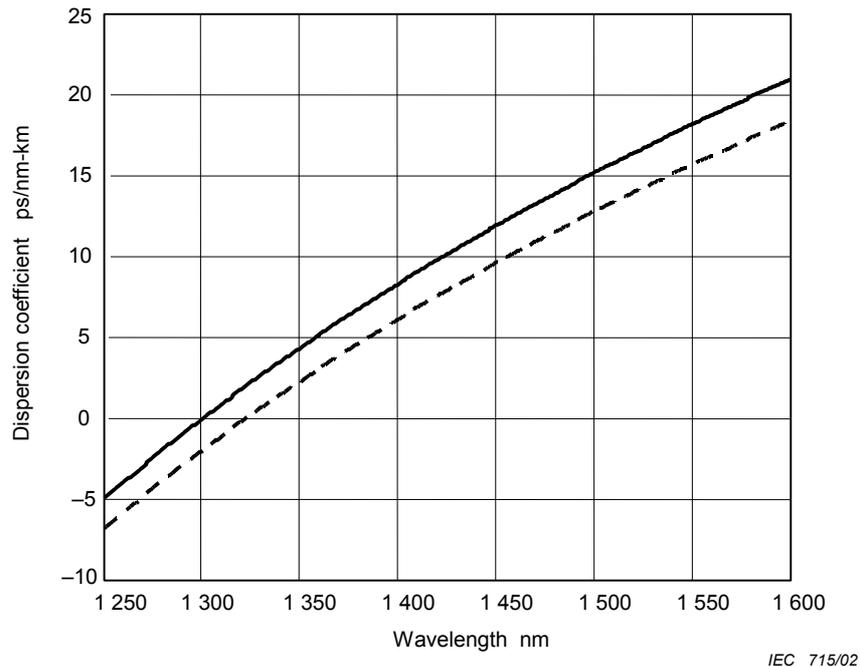


Figure 1 – Extremes of the dispersion coefficient for B1 fibre

To accommodate manufacturing tolerances, while still satisfying user needs, the specifications for B1 fibre allow a range for the values of fibre zero-dispersion wavelength λ_0 , with a maximum value of the zero-dispersion slope coefficient S_0 at 1 310 nm. The lowest allowed value of λ_0 with the maximum allowed value of S_0 results in the solid curve in figure 1; the highest allowed value of λ_0 with a typical low value of S_0 results in the dashed curve. These give the highest and lowest values respectively of the dispersion coefficient at 1 550 nm: about 18,2 ps/nm–km and under 16 ps/nm–km. Acceptable fibres will lie between these limits.

¹⁾ To be published.

¹⁾ Under consideration.

Bien que peu de mesures aient été enregistrées pour des liaisons installées, une valeur moyenne près de 17 ps/nm–km (entre les courbes limites de la figure 1) peut être considérée comme typique à une longueur d'onde de 1 550 nm. Un compensateur correctement accordé peut réduire ceci à 1 ps/nm–km ou moins, mais une compensation aussi soignée n'est pas exigée pour beaucoup d'applications, comme indiqué ci-dessous. Pour certaines applications, la «planéité» de la courbe de dispersion ou la pente de dispersion est importante. A 1 550 nm, le coefficient de la pente de dispersion est d'environ 0,057 ps/nm²–km. Cela signifie qu'au-dessus de la passe-bande de l'AO, le coefficient chromatique de dispersion augmente généralement de 2,0 ps/nm–km entre 1 530 nm et 1 565 nm.

3.2 Elargissement d'impulsion

La longueur au-dessus de laquelle un signal peut être transmis de l'émetteur au récepteur (ou au régénérateur/répéteur) peut être limitée par la puissance/atténuation, par la dispersion, ou par les effets non linéaires. Les amplificateurs optiques peuvent essentiellement enlever la première limitation, et ils peuvent présenter le tiers (qui sera considéré dans un document à venir). Cet article illustre comment les longueurs limitées par dispersion peuvent être étendues par les compensateurs.

Les sources lumineuses utilisées dans les émissions à grande vitesse sont invariablement des lasers du mode unilongitudinal. Les délais différentiels des longueurs d'onde spectrales passant par une fibre sont déterminés en utilisant un coefficient de dispersion entre les limites de la figure 1. La signification d'un coefficient positif de dispersion, qui se produit en haut de λ_0 dans la fibre B1, est que de plus longues longueurs d'onde font faire de plus longues durées de parcours par la fibre que des longueurs d'onde plus petites. Ce retard différentiel mène à l'élargissement d'impulsion dans le domaine numérique ou à la décroissance de fréquence de modulation dans le domaine analogique.

Un spectre stable de source se caractérise partiellement par une longueur d'onde centrale λ et une largeur spectrale effective (valeur efficace) $\Delta\lambda$. (La largeur spectrale est parfois indiquée en termes de fréquence optique, où 1 nm = 125 GHz autour de 1 550 nm.) Si le spectre du laser ne change pas pendant la modulation, c'est-à-dire que la longueur d'onde ne fluctue pas, alors le retard différentiel au long d'une longueur de fibre cause une impulsion de la durée de valeur efficace Δt donnée approximativement par

$$\Delta t(\lambda) = D(\lambda) \times L \times \Delta\lambda \quad (1)$$

Pour un coefficient négatif de dispersion $D(\lambda)$ au-dessous de λ_0 , la dispersion d'impulsion est toujours positive mais le classement de longueur d'onde est renversé de sorte que de plus longues longueurs d'onde arrivent en premier.

La modulation affecte les caractéristiques spectrales. Avec les lasers directement modulés où la modulation numérique ou analogique est appliquée au courant de pilotage par laser, la fluctuation de longueur d'onde peut se produire dans ce que le spectre de longueur d'onde change avec le temps. Par émission numérique, le spectre de source dans l'ensemble se déplace vers des longueurs d'onde plus petites pendant la montée du courant de l'impulsion, et en arrière vers de plus longues longueurs d'onde pendant l'affaiblissement du courant (la fluctuation de longueur d'onde positive). Ceci fait que le spectre couvre effectivement une bande plus large, mais il fait également arriver les longueurs d'onde plus courtes de l'amorce d'impulsion de la fibre de dispersion positive plus tôt que les longueurs d'onde plus longues de la queue d'impulsion, élargissant de ce fait l'impulsion. Inversement, dans la gamme négative de dispersion pour des longueurs d'onde en dessous de λ_0 , la fluctuation de longueur d'onde produira un composant qui réduit les impulsions qui excentrent l'élargissement spectral, et la compression globale d'impulsion peut se produire pour une certaine longueur initiale de fibre, mais elle est vaincue postérieurement par l'élargissement conventionnel. Ceci est une technique d'adaptation de dispersion mentionnée à l'article 1, et sera discutée dans un document à venir.

Although few measurements have been reported for installed links, an average value near 17 ps/nm–km (between the extreme curves of figure 1) may be considered typical at a wavelength of 1 550 nm. A properly tuned compensator can reduce this to 1 ps/nm–km or less, but such careful compensation is not required for many applications, as will be discussed below. For some applications, the "flatness" of the dispersion curve or dispersion slope is important. At 1 550 nm the dispersion-slope coefficient is about 0,057 ps/nm²–km. This means that over the OA bandpass, the chromatic dispersion coefficient typically increases by 2,0 ps/nm–km between 1 530 nm and 1 565 nm.

3.2 Pulse broadening

The length over which a signal can be transmitted from the transmitter to the receiver (or regenerator/repeater) can be limited by power/attenuation, by dispersion, or by non-linear effects. Optical amplifiers can essentially remove the first limitation and they can introduce the third (which will be considered in a future document). This clause shows how dispersion-limited lengths can be extended by compensators.

Light sources used in high-speed communications are invariably single-longitudinal mode lasers. The differential time delays of the spectral wavelengths passing through a fibre are determined using a dispersion coefficient between the extremes of figure 1. The meaning of a positive dispersion coefficient, which occurs above λ_0 in B1 fibre, is that longer wavelengths have longer transit times through the fibre than shorter wavelengths do. This differential delay leads to pulse broadening in the digital domain or to modulation-frequency rolloff in the analogue domain.

A stable source spectrum is partially characterized by a central wavelength λ and a root-mean square (r.m.s.) spectral width $\Delta\lambda$. (Spectral width is sometimes given in terms of optical frequency, where 1 nm = 125 GHz around 1 550 nm.) If the laser spectrum does not change during modulation, that is does not chirp, then the differential delays along a fibre length result in a pulse of r.m.s. duration Δt given approximately by

$$\Delta t(\lambda) = D(\lambda) \times L \times \Delta\lambda \quad (1)$$

For a negative dispersion coefficient $D(\lambda)$ below λ_0 , the pulse spreading is still positive but the wavelength order is reversed so that longer wavelengths arrive first.

Modulation affects spectral characteristics. With directly modulated lasers where the digital or analogue modulation is applied to the laser drive current, chirping can occur in which the wavelength spectrum varies with time. In digital transmission, the source spectrum as a whole moves towards shorter wavelengths during the ramp-up of the pulse, and back towards longer wavelengths during ramp-down (positive chirp). This causes the spectrum to effectively cover a wider band, but it also causes the leading-edge shorter wavelengths to arrive at the end of the positive-dispersion fibre sooner than the trailing edge longer wavelengths, thereby broadening the pulse further. Conversely, in the negative dispersion region for wavelengths below λ_0 , chirping will produce a pulse-narrowing component offsetting the spectral broadening, and overall pulse compression can occur for some initial fibre length after which it is overcome by conventional broadening. This is a technique of dispersion accommodation as mentioned in clause 1, and will be discussed in a future document.

Les détails de fluctuation de longueur d'onde sont plus complexes que ceux qui précèdent, mais au pire, on peut simplement ajouter la largeur de fluctuation de longueur d'onde à la largeur spectrale du laser. La fluctuation de longueur d'onde peut être allégée ou modifiée par un modulateur externe utilisé avec un laser (non modulé) de courant continu. Un modulateur d'électroabsorption semi-conducteur réduit de manière significative la fluctuation de longueur d'onde, mais avec une perte d'insertion considérable. Un modulateur interférométrique électro-optique planaire de lithium niobate Mach-Zehnder a une petite fluctuation accordable, soit positive soit négative, de longueur d'onde. Une fluctuation négative de longueur d'onde peut être utile dans la région du coefficient positif de dispersion de la fibre.

Le contenu informationnel Fourier d'un signal avec un débit binaire très élevé ou de modulation de fréquence peut lui-même être significatif. Pour une modulation sans retour à zéro (NRZ) binaire à un débit binaire B , la largeur en valeur efficace d'une impulsion rectangulaire convertit en largeur spectrale de modulation pertinente de valeur efficace $\Delta\lambda_m$ en termes de longueur d'onde de

$$\Delta\lambda_m = \frac{\sqrt{3} B \lambda^2}{2\pi c} \quad (2)$$

Cette largeur spectrale de signal ajoute en quadrature à la largeur spectrale de la longueur d'onde précédente. Par exemple, pour $B = 10$ Gb/s et $\lambda = 1\,550$ nm, la largeur spectrale est $\Delta\lambda_m = 0,022$ nm. La largeur spectrale modulée totale d'émetteur est

$$W = \sqrt{(\Delta\lambda)^2 + (\Delta\lambda_m)^2} \quad (3)$$

3.3 Longueur limitée par dispersion

Comme indiqué dans la Recommandation G.957 de l'UIT-T, la mise à niveau maximale d'atténuation pour le trajet optique pour les systèmes non amplifiés de SDH (hiérarchie numérique synchrone) à 2,5 Gb/s (STM-16) est 28 dB (entre le connecteur d'émetteur et le connecteur de récepteur). Pour les installations avec un coefficient d'atténuation de câble de 0,28 dB/km (Recommandation G.691 de l'UIT-T), la plage limitée par l'atténuation entre les régénérateurs à 1 550 nm est donnée dans le tableau 1. Cela serait réalisable si la dispersion n'était pas un facteur (et est approprié pour une fibre à dispersion décalée avec le même coefficient d'atténuation). Pour systèmes de 10 Gb/s (STM-64) dans la Recommandation G.691 de l'UIT-T, il y a un budget de 22 dB, mais pour 40 Gb/s (STM-256) il n'y a encore aucune recommandation, mais les valeurs types publiées sont environ de 16 dB. Les longueurs du trajet correspondantes pour ces taux binaires sont également illustrées dans la deuxième colonne du tableau 1.

En négligeant la dispersion, ces distances entre les régénérateurs peuvent être considérablement étendues avec l'utilisation des AO. Ceux-ci sont placés près de l'émetteur comme amplificateur de puissance ou émetteur optiquement amplifié intégré (EOA), près du récepteur comme préamplificateur ou du récepteur optiquement amplifié intégré (ROA), comme amplificateurs intégrés en cascade. Voyons maintenant comment la dispersion limite ces distances.

Comme indiqué dans la Recommandation G.957 de l'UIT-T, la propagation d'impulsion NRZ due à la dispersion chromatique ne doit pas excéder une fraction 'epsilon' de l'intervalle de temps numérique pour permettre une pénalité maximale de puissance de dispersion à un taux particulier de l'erreur de débit binaire (TEB). Pour une pénalité de 1 dB à 10^{-10} TEB, $\epsilon = 0,306$. Cette valeur dépend des paramètres de composants assumés par divers modèles. D'ailleurs, des systèmes récents sont visés à 10^{-12} TEB, ce qui fait que la sensibilité du récepteur doit être abaissée. (Les calculs ne doivent pas être utilisés pour la conception détaillée du système.)

Chirping details are more complex than the above, but in a worst-case approach, one can simply add the chirp width to the spectral width of the laser. Chirping can be alleviated or modified with an external modulator used with a continuous-current (unmodulated) laser. A semiconductor electro-absorption modulator significantly reduces chirp, but with considerable insertion loss. A planar lithium niobate Mach-Zehnder electro-optic interferometric modulator has a small adjustable positive or negative chirp. A negative chirp can be advantageous in the region of positive fibre dispersion coefficient.

The Fourier information content of a signal with a very high bit-rate or modulation frequency can itself be significant. For a binary non-return-to-zero (NRZ) modulation at a bit-rate B , the r.m.s. width of a rectangular pulse converts to an effective r.m.s. modulation spectral width $\Delta\lambda_m$ in wavelength terms of

$$\Delta\lambda_m = \frac{\sqrt{3} B \lambda^2}{2\pi c} \quad (2)$$

This signal spectral width adds in quadrature to the previous wavelength spectral width. For example, for $B = 10$ Gb/s and $\lambda = 1\,550$ nm, the spectral width is calculated to be $\Delta\lambda_m = 0,022$ nm. The total modulated transmitter spectral width is

$$W = \sqrt{(\Delta\lambda)^2 + (\Delta\lambda_m)^2} \quad (3)$$

3.3 Dispersion-limited length

As stated in ITU-T Recommendation G.957, the maximum attenuation upgrade for the optical path for non-amplified SDH (synchronous digital hierarchy) systems at 2,5 Gb/s (STM-16) is 28 dB (between the transmitter connector and the receiver connector). For installations with a 0,28 dB/km cable attenuation coefficient (ITU-T Recommendation G.691), the attenuation-limited span between regenerators at 1 550 nm is given in table 1. This would be achievable if dispersion were not a factor (and is appropriate for dispersion-shifted fibre with the same attenuation coefficient). For 10 Gb/s (STM-64) systems in ITU-T Recommendation G.691, there is a budget of 22 dB, but for 40 Gb/s (STM-256) there are not yet any recommendations, but typical published values are around 16 dB. The corresponding path lengths for these bit-rates are also shown in the second row of table 1.

Neglecting dispersion, these distances between regenerators can be greatly extended with the use of OAs. These are placed near the transmitter as a booster amplifier or integrated optically amplified transmitter (OAT), near the receiver as a pre-amplifier or integrated optically amplified receiver (OAR), or as in-line cascaded amplifiers. Now consider how dispersion limits these distances.

As specified in ITU-T Recommendation G.957, NRZ pulse spreading due to chromatic dispersion should not exceed a fraction "epsilon" of the digital time-slot to allow a maximum allowable dispersion power penalty at a particular bit-error ratio (BER). For a 1 dB penalty at a 10^{-10} BER, $\epsilon = 0,306$. This value depends upon component parameters assumed by various models. Moreover, recent systems are being targeted to a 10^{-12} BER, for which the receiver sensitivity will need to be lowered. (The calculations should not be used for detailed system design.)

Ces considérations mènent à la longueur limitée par dispersion (en km) donnée approximativement par

$$L_D = \frac{10^3}{B \times D \times W} \tag{4}$$

où

$$W = \sqrt{(\Delta\lambda)^2 + (0,00092 \times B \times \lambda^2)^2} \tag{5}$$

pour B en Gb/s, D en ps/nm-km, $\Delta\lambda$ en nm, et λ en μm (pas nm). La largeur spectrale d'un laser monomode longitudinal est habituellement indiquée comme la largeur totale de 20 dB au bas, qui est 6,07 fois la largeur en valeur efficace dans une approximation gaussienne.

Pour la fibre B1 à 1 550 nm, $D(\lambda)$ est nominale 17 ps/nm-km. Le tableau 1 illustre les durées limitées par dispersion de transmission pour plusieurs valeurs de largeur spectrale de source optique pour plusieurs débits binaires numériques. Le cas limité par la modulation correspond à une source idéale ayant une largeur spectrale de zéro ($\Delta\lambda = 0$) si non modulé.

NOTE Ces longueurs ne sont indiquées dans aucune recommandation de l'UIT.

Tableau 1 – Limites de longueur calculées (en km) entre régénérateurs pour une atténuation et une dispersion à 1 550 nm

Source optique 20-dB largeur spectrale nm	STM-16 (~2,5 Gb/s)	STM-64 (~10 Gb/s)	STM-256 (~40 Gb/s)
Limitée par l'atténuation	100	79	57
1	44	11	2,4
0,1	415	65	5,0
0,01	1 250	80	5,1
Limitée par la modulation	1 300	80	5,1

La dispersion n'est pas un facteur limitant où la longueur limitée par dispersion excède la longueur limitée par l'atténuation. Cependant, les amplificateurs optiques peuvent compenser l'atténuation de câble et étendre considérablement la longueur limitée par l'atténuation à plusieurs centaines de kilomètres, de sorte qu'à un certain point la dispersion limite la longueur. Si par l'utilisation de la compensation de dispersion le coefficient de dispersion de fibre B1 est réduit à environ 1 ps/nm-km à une longueur d'onde particulière, ces longueurs limitées par dispersion augmenteront par un facteur d'environ 17. Une compensation plus soignée agrandira ce facteur. Par conséquent, les compensateurs et les amplificateurs optiques sont complémentaires puisque tous deux augmentent les longueurs de transmission. De même, puisque les composants ou techniques compensatoires de dispersion ont une perte d'insertion ou une pénalité de puissance associée à eux, les amplificateurs optiques compensent pour ces derniers.

Aux valeurs très basses de dispersion, les longueurs seront limitées par la dispersion de second ordre. La forme plus générale de l'équation (1) est

$$\Delta t(\lambda) = LW \sqrt{D^2(\lambda) + \frac{1}{2} \left[S(\lambda) + 2 \frac{D(\lambda)}{\lambda} \right]^2 W^2} \tag{6}$$

où

$$S(\lambda) = \frac{dD(\lambda)}{d\lambda} \tag{7}$$

These considerations lead to the dispersion-limited length (in km) given approximately by

$$L_D = \frac{10^3}{B \times D \times W} \quad (4)$$

where

$$W = \sqrt{(\Delta\lambda)^2 + (0,00092 \times B \times \lambda^2)^2} \quad (5)$$

for B in Gb/s, D in ps/nm–km, $\Delta\lambda$ in nm, and λ in μm (not nm). The spectral width of a single-longitudinal mode laser is usually given as the full-width 20 dB down, which is 6,07 times the r.m.s. width in a gaussian approximation.

For B1 fibre at 1 550 nm, $D(\lambda)$ is nominally 17 ps/nm–km. Table 1 shows dispersion-limited transmission span lengths for several values of optical source spectral width for several digital bit-rates. The modulation-limited case corresponds to an ideal source having zero spectral width ($\Delta\lambda = 0$) when unmodulated.

NOTE These lengths are not specified in any ITU recommendation.

Table 1 – Calculated length limits (in km) between regenerators as determined by attenuation and dispersion at 1 550 nm

Optical source 20-dB spectral width nm	STM-16 (~2,5 Gb/s)	STM-64 (~10 Gb/s)	STM-256 (~40 Gb/s)
Attenuation-limited	100	79	57
1	44	11	2,4
0,1	415	65	5,0
0,01	1 250	80	5,1
Modulation-limited	1 300	80	5,1

Dispersion is not a limiting factor wherever the dispersion-limited length exceeds the attenuation-limited length. However, optical amplifiers can compensate for cable attenuation and so considerably extend the attenuation-limited length to several hundreds of kilometres, so that at some point dispersion will limit length. If, by the use of dispersion compensation, the B1 fibre dispersion coefficient is reduced to about 1 ps/nm–km at a particular wavelength, these dispersion-limited lengths will increase by a factor of about 17. More careful compensation will enlarge this factor. Hence, compensators and optical amplifiers are complementary since they both increase transmission lengths. Also, since dispersion-compensating components or techniques have an insertion loss or power penalty associated with them, optical amplifiers compensate for these.

At very low dispersion values, the lengths will be limited by second-order dispersion. The more general form of equation (1) is

$$\Delta t(\lambda) = LW \sqrt{D^2(\lambda) + \frac{1}{2} \left\{ \left[S(\lambda) + 2 \frac{D(\lambda)}{\lambda} \right]^2 W^2 \right\}} \quad (6)$$

where

$$S(\lambda) = \frac{dD(\lambda)}{d\lambda} \quad (7)$$

est le coefficient du pente de dispersion mentionné en 3.1. L'importance du terme de second ordre dépend des valeurs relatives de S , D et W . La dispersion de second ordre est également un facteur pour la compensation de vitrine large, importante pour la transmission de longueurs d'ondes multiples suivant la Recommandation G.692 de l'UIT-T, puisqu'elle s'associe à la variabilité de la dispersion compensée sur la gamme de longueurs d'onde.

4 Types de compensation de dispersion

Plusieurs méthodes de compensation de dispersion ont été enregistrées. D'une façon générale elles essayent de réduire ou de renverser les retards différentiels dans la fibre entre les longueurs d'onde plus courtes et plus rapides et les longueurs d'onde plus longues et plus lentes. La plupart des méthodes dépendent de la longueur de la fibre B1 impliquée, mais un réglage de précision n'est généralement pas exigé. La compensation peut être mise en application à l'émetteur ou au récepteur ou au long du trajet optique. Les effets non linéaires peuvent déterminer la mise en place optimale.

4.1 Compensation passive au long du trajet optique

La fibre à dispersion compensatoire (FDC) a l'avantage de l'insensibilité de polarisation de basse ondulation de dispersion et de grand passe-bande optique. Les CDP basés sur une FDC ont typiquement une dispersion négative, et une pente de dispersion positive ou négative, les deux travaillées par le matériel et particulièrement la dispersion modale. La fibre peut avoir un coefficient de dispersion qui est plusieurs fois celui de la fibre B1, avec une fraction de sa longueur, et avec un coefficient d'atténuation pas beaucoup plus grand. Un type de FDC fonctionne en mode fondamental de l'ordre le plus bas habituel, alors qu'un autre fonctionne en mode de second ordre près de la coupure. Par le dernier, on peut réaliser des valeurs négatives de dispersion très grandes, mais il faut des convertisseurs de mode de sortie et d'entrée.

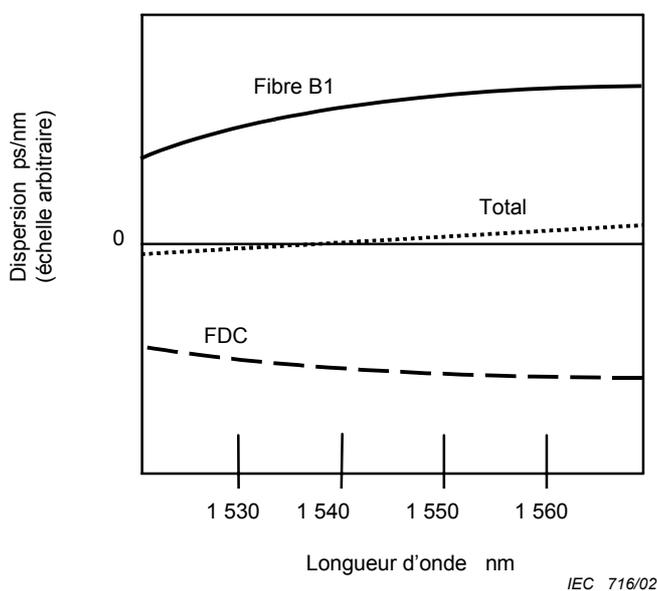


Figure 2 – Somme des dispersions d'une fibre B1 et d'un CDP basé sur FDC dans la vitrine de l'AO

La figure 2 illustre comment la dispersion d'un CDP basé sur FDC et une longueur de la fibre B1 s'ajoutent dans la vitrine de l'AO. Dans l'exemple illustré, le compensateur a une pente de dispersion négative pour contrecarrer la pente de dispersion positive de la fibre B1. Cela aplatit la dispersion totale, qui est nécessaire pour quelques applications MRF.

is the dispersion-slope coefficient mentioned in 3.1. The importance of the second-order term depends upon the relative values of S , D and W . Second-order dispersion is also a factor for wide-window compensation, important for multi-wavelength transmission according to ITU-T Recommendation G.692, since it relates to the variability of the compensated dispersion over the wavelength range.

4 Types of dispersion compensation

Several methods of dispersion compensation have been reported. Generally, they attempt to reduce or reverse the differential delays in the fibre between the faster shorter wavelengths and the slower longer wavelengths. Most methods depend on the length of B1 fibre involved, but fine-tuning is not generally required. Compensation can be implemented at the transmitter or receiver, or along the optical path. Non-linear effects can determine the optimal placement.

4.1 Passive compensation along the optical path

Dispersion-compensating fibre (DCF) has the advantage of polarization insensitivity, low dispersion ripple, and large optical bandpass. DCF-based PDCs typically have a negative dispersion, and a positive or negative dispersion slope, both tailored by material and especially modal dispersion. The fibre may have a dispersion coefficient that is several times that of B1 fibre, with a fraction of its length, and with an attenuation coefficient not much greater. One type of DCF operates in the usual lowest-order fundamental mode, while another operates in the second-order mode near cutoff. The latter can achieve very large negative dispersion values but requires input and output mode converters.

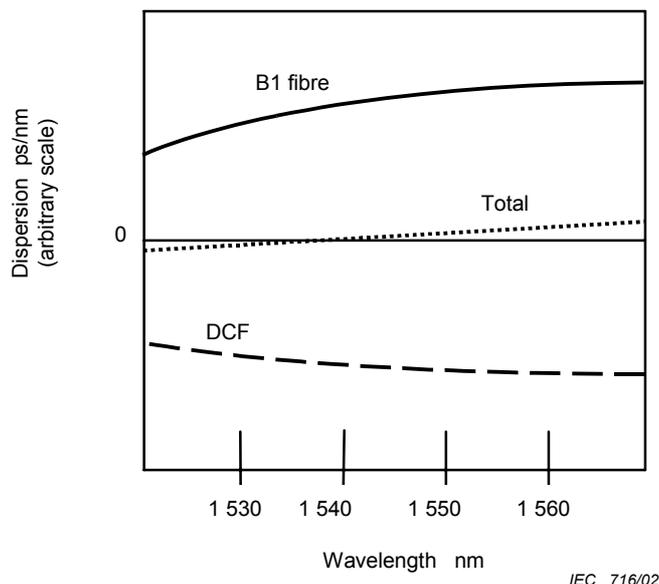


Figure 2 – Summing the dispersions of a B1 fibre and a DCF-based PDC over the OA window

Figure 2 shows how the dispersion of a DCF-based PDC and a length of B1 fibre add in the OA window. In the example shown, the compensator has a negative dispersion slope to counteract the positive dispersion slope of the B1 fibre. This flattens the total dispersion, which is necessary for some WDM applications.

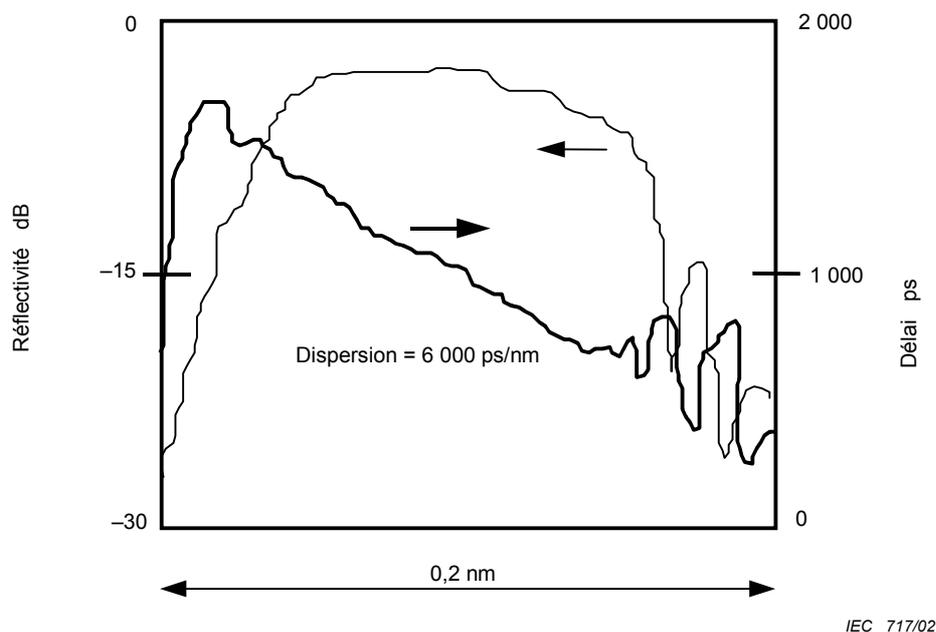


Figure 3 – Caractéristiques de réflectivité et de délai d'un CDP basé sur RBF (la dispersion est la pente de la ligne)

Les réseaux de Bragg intégrés par fibre (RBF) se composent d'un indice de réfraction périodique au long de plusieurs millimètres ou dizaines de millimètres de longueurs de fibre, ont plusieurs utilisations. Pour les compensateurs ils fluctuent de longueur d'onde en période, de sorte que des longueurs d'onde plus courtes voyagent plus loin avant d'être réfléchies par la partie de courte période du réseau, ayant pour résultat un retard en ce qui concerne les longueurs d'onde plus longues. Pour les réseaux de type réfléchissant, un circulateur optique est employé pour séparer les faisceaux lumineux d'entrée et de sortie, et la passe-bande optique utile est déterminée par la réflectivité (qui doit être haute) et le retard de groupe (qui doit être linéaire) comme illustré dans la figure 3. Des «ondulations» peuvent se produire sur la réflectivité et sur les caractéristiques de délai. Des études supplémentaires sont nécessaires. Bien que la passe-bande optique soit étroite, la perte est basse puisque les longueurs de fibre types sont de l'ordre de dizaines ou de centaines de millimètres. Un certain nombre de conceptions qui fonctionnent pendant la transmission sont en développement.

4.2 Compensation et accommodation par l'émetteur ou par le récepteur

Sans compensation, on a intérêt à utiliser des lasers de largeur de raies étroites et de fluctuation de bas de longueur d'onde ou des modulateurs externes. Cependant, la compensation active par l'émetteur peut être exécutée par des méthodes différentes. La préfluctuation de longueur d'onde du signal électrique qui pilote l'émetteur peut être exécutée inversement en quelque sorte aux retards différentiels de longueur d'onde ci-dessus. Avec un autre plan supporté par la dispersion, la modulation optique de fréquence du courant de propulsion (FSK) est convertie par la dispersion de la fibre en modulation d'amplitude (ASK) d'une forme exigeant des circuits modifiés du récepteur. Toutes les techniques basées sur l'émetteur ci-dessus ajoutent à la largeur de bande Fourier du signal, et ceci peut limiter par la suite leur capacité.

Au récepteur, la détection logique peut être utilisée, et ceci produit une fréquence de différence du signal et un oscillateur local. Cette fréquence est ensuite employée pour exécuter la compensation de dispersion. La détection directe exige des techniques plus complexes d'égalisation afin de surmonter les effets de la largeur des raies et de la fluctuation de longueur d'onde de l'émetteur, mais ceux-ci n'ont pas encore été étudiés de façon approfondie.

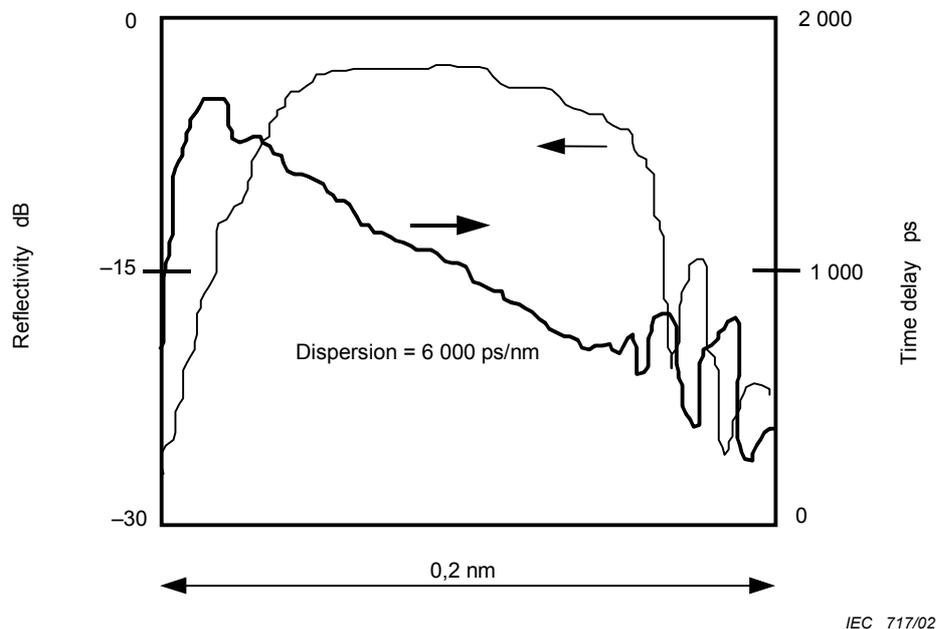


Figure 3 – Reflectivity and time-delay characteristics of an FBG-based PDC (dispersion is the slope of the line)

In-line fibre Bragg gratings (FBGs), consisting of a periodic refractive index along several millimetres or tens of millimetres of fibre lengths, have several uses. For compensators they are chirped in period so that shorter wavelengths travel further before being reflected by the shorter-period portion of the grating, resulting in delay with respect to the longer wavelengths. For reflective-type gratings, an optical circulator is used to separate input and output light beams, and the useful optical bandpass is determined by both the reflectivity (which must be high) and group delay (which must be linear) as shown by figure 3. "Ripples" may occur on both the reflectivity and time-delay characteristics. Further study is needed on this matter. Although the optical bandpass is narrow, the loss is low since fibre lengths are typically tens or hundreds of millimetres. A number of designs that operate in transmission are being developed.

4.2 Compensation and accommodation by the transmitter or receiver

Without compensation, there is an incentive to use narrow-linewidth and low-chirp lasers or external modulators. However, active compensation by the transmitter can be performed in other ways. Prechirping the electrical signal driving the transmitter can be performed in a manner inverse to the wavelength differential delays above. With another "dispersion-supported" scheme, optical frequency modulation of the drive current (FSK) is converted by fibre dispersion into amplitude modulation (ASK) of a form requiring modified receiver circuitry. All of the above transmitter-based techniques add to the Fourier bandwidth of the signal, and this eventually limits their capability.

At the receiver, coherent detection can be used, and this generates a difference frequency of the signal and a local oscillator. This frequency is then used to perform dispersion compensation. Direct detection requires more complex equalization techniques to overcome the effects of transmitter linewidth and chirp, but these have not yet been extensively studied.

4.3 Compensation active au long du trajet optique

Les techniques interférométriques peuvent être employées pour présenter les trajets dépendants de longueur d'onde de différentes longueurs. Puisqu'un retard différentiel de 17 ps (pour 1 km de fibre et les longueurs d'onde séparées de 1 nm) correspond à une longueur différentielle dans le vide d'environ 5,1 mm, une cascade de petits interféromètres planaires peut être utilisée pour la compensation. Les faiblesses de cette technique incluent une passe-bande optique étroite et la dépendance de polarisation, mais des progrès sont réalisés en la matière.

L'inversion spectrale ou la conjugaison de phase exige une puissance élevée de pompe pour avoir la capacité d'interaction au signal. Ceci est fait près du centre d'une plage, de façon que la dernière longueur de la fibre éprouve le spectre inversé. Au premier ordre, la méthode est indépendante de la longueur, la seule de cette caractéristique. Actuellement, elle est toujours trop complexe pour être économiquement pratique.

La modulation auto-phase se fonde sur le fait qu'une haute intensité de la lumière doit augmenter temporellement l'indice de réfraction de la fibre et induire un déphasage optique. Ce déphasage est opposé à celui de la dispersion chromatique positive, et crée une compression d'impulsion dépendant de la longueur comme de la largeur des raies optiques d'émetteur et de la fluctuation de longueur d'onde. Les arrangements d'optimisation sont toujours à l'étude.

4.4 Compensation par la gestion de dispersion

A l'étude.

5 Paramètres du compensateur de dispersion passive

5.1 Gamme de longueur d'onde de fonctionnement

Ceci est indiqué par les longueurs d'onde minimum et maximum, et est parfois appelé passe-bande optique. Tous les paramètres optiques de cette gamme (en termes de valeurs minimales ou maximales permises) doivent être satisfaits. Pour les applications AO à la fibre B1, la seule sorte à l'étude dans ce rapport technique, la gamme de longueurs d'onde de fonctionnement pour les AFDE est de 1 528 nm à 1 565 nm. Les CDP basés sur des FDC peuvent généralement couvrir cette gamme complète, comme dans la figure 2, tandis que la gamme de longueurs d'onde de fonctionnement d'un CDP basé sur RBF peut être limitée à quelques nanomètres en largeur, comme dans la figure 3. Cependant, un CDP particulier basé sur RBF peut être conçu de façon que cet intervalle plus étroit puisse être installé n'importe où dans la pleine gamme de longueurs d'onde de fonctionnement de l'AO. Pour un système MRF, un seul CDP basé sur FDC est généralement suffisant, tandis que plusieurs CDP basés sur RBF peuvent être nécessaires pour différents canaux.

5.2 Dispersion chromatique

Un paramètre important est la dispersion du CDP, une valeur négative en ps/nm, spécifiée par des valeurs maximales et minimales. Ceci peut également être donné en fonction de la longueur d'onde sur la pleine gamme de fonctionnement de longueur d'onde.

Il convient que l'utilisateur sache la valeur positive de dispersion de la liaison installée de la fibre B1 qui doit être compensée à la longueur (aux longueurs) d'onde en question. Cependant, la mesure de la dispersion chromatique n'est généralement pas faite sur le câble installé dans le champ, et puisque la dispersion à 1 550 nm change peu de fibre à fibre, une évaluation de la dispersion de liaison suffit généralement.

4.3 Active compensation along the optical path

Interferometric techniques may be used to introduce wavelength-dependent paths of differing lengths. Since a differential delay of 17 ps (for 1 km of fibre and wavelengths 1 nm apart) corresponds to a differential length in vacuum of about 5,1 mm, a cascade of small planar interferometers can be used for compensation. Technique deficiencies include narrow optical bandpass and polarization dependence, but progress is being made on these.

Spectral inversion or phase conjugation requires a high pump power to interact with the signal. This is done near the centre of a span, so that the latter length of the fibre experiences the inverted spectrum. To first order, the method is independent of length, the only one with this property. Currently, it is still too complex to be economically practical.

Self-phase modulation relies on the fact that a high light intensity will temporally increase the refractive index of the fibre and induce an optical phase shift. This shift is opposite to that of positive chromatic dispersion, and results in pulse compression that is length-dependent as with transmitter optical linewidth and chirp. Optimization schemes are still under study.

4.4 Compensation by dispersion management

Under consideration.

5 Passive dispersion compensator parameters

5.1 Operating wavelength range

This is specified by minimum and maximum wavelengths, and is sometimes called the optical bandpass. All optical parameters (in terms of allowable minimum or maximum values) are to be satisfied within it. For OA applications over B1 fibre, the only kind under consideration in this technical report, the operating wavelength range for EDFAs is from 1 528 nm to 1 565 nm. DCF-based PDCs can generally cover this full range, as in figure 2, whereas the operating wavelength range of an FBG-based PDC may be restricted to a few nanometres or less in width, as in figure 3. However, a particular FBG-based PDC may be designed so that this narrower range may be placed anywhere within the full operating wavelength range of the OA. For a WDM system, a single DCF-based PDC is generally sufficient, whereas several FBG-based PDCs may be needed for various channels.

5.2 Chromatic dispersion

An important parameter is the dispersion of the PDC, a negative value in ps/nm, specified by maximum and minimum values. This may also be given as a function of wavelength over the full operating wavelength range.

A user should ideally know the positive dispersion value of the installed link of B1 fibre that is to be compensated at the wavelength(s) of interest. However, measurement of chromatic dispersion is not commonly made in the field on installed cable, and since the dispersion at 1 550 nm varies little from fibre to fibre, an estimate of the link dispersion will generally suffice.

Un niveau élevé de précision n'est pas actuellement exigé pour la plupart des applications. L'utilisateur peut ne connaître que la longueur globale de la liaison L de la fibre B1 et du coefficient nominal de dispersion D (17 ps/nm-km à 1 550 nm), de sorte que $D \times L$ soit la dispersion approximative à compenser. La dispersion d'un CDP peut être indiquée en termes de dispersion négative ou longueur nominale de la fibre B1 compensée, toutes deux à 1 550 nm. Les CDP sont habituellement disponibles en valeurs discrètes qui peuvent ne pas correspondre exactement à une application particulière. Par conséquent si un compensateur conçu pour une longueur spécifiée L_c ou une dispersion spécifiée $D \times L_c$ de la fibre B1 est installé à la liaison, toute la dispersion (positive ou négative) est $D \times (L - L_c)$. Si $L = L_c$, la dispersion positive de la fibre B1 est équilibrée par la dispersion négative du CDP, et la dispersion totale est exactement de zéro à 1 550 nm.

De l'équation (4) la dispersion exigée pour un débit binaire B du système et une largeur spectrale totale de l'émetteur W est $D \times L_D$. Alors la longueur de la fibre B1, L , est limitée à la longueur maximum indiquée par

$$L_{\max} = L_c + L_D \tag{8}$$

pour la dispersion positive totale, et à la longueur minimale indiquée par le plus grand entre zéro et

$$L_{\min} = L_c - L_D \tag{9}$$

pour la dispersion totale négative. La longueur de la fibre L peut se trouver n'importe où entre ces deux valeurs, et le système ne sera pas limité par la dispersion.

Comme exemple, appliquer un compensateur conçu pour compenser une longueur spécifique de la fibre B1 L_c pour les systèmes dans le tableau 1. Le tableau 2 donne des intervalles des longueurs de fibre B1 (L_{\min} à L_{\max}) permises pour que les systèmes soient dans des limites de dispersion.

Tableau 2 – Gammes de longueurs de l'émission avec un CDP conçu pour compenser les longueurs types de la fibre B1

Débit binaire	Longueur de compensation L_c km	Dispersion ps/nm	L_{\min} à L_{\max} (en km) pour différentes largeurs spectrales de la source			
			1 nm	0,1 nm	0,01 nm	0 nm
STM-16 ~2,5 Gb/s	20	340	0 à 64	0 à 435	0 à 1 270	0 à 1 320
	40	680	0 à 84	0 à 455	0 à 1 290	0 à 1 340
	80	1 360	36 à 124	0 à 495	0 à 1 330	0 à 1 380
STM-64 ~10 Gb/s	20	340	9 à 31	0 à 85	0 à 100	0 à 100
	40	680	29 à 51	0 à 105	0 à 120	0 à 120
	80	1 360	69 à 91	15 à 145	0 à 160	0 à 160
STM-256 ~40 Gb/s	20	340	18 à 22	15 à 25	15 à 25	15 à 25
	40	680	38 à 42	35 à 45	35 à 45	35 à 45
	80	1 360	78 à 82	75 à 85	75 à 85	75 à 85

Le cas de largeur nulle spectrale correspond à la limite de largeur de bande de modulation. Les données ci-dessus correspondent seulement à une longueur d'onde, telle que 1 550 nm, pour laquelle la dispersion du compensateur est indiquée. A noter que les tolérances de longueur deviennent plus étroites à des débits binaires plus élevés, de sorte que la dispersion de la fibre B1 peut devoir être connue plus exactement.

A high level of precision is currently not required for most applications. The user may know only the overall link length L of B1 fibre and the nominal dispersion coefficient D (17 ps/nm–km at 1 550 nm), so that $D \times L$ is the approximate dispersion to be compensated. The dispersion of a PDC may be specified in terms of either the negative dispersion or the nominal length of B1 fibre compensated for, both at 1 550 nm. PDCs are usually available in discrete values that may not exactly match a particular application. Hence if a compensator designed for a specified length L_c or specified dispersion $D \times L_c$ of B1 fibre is installed in the link, the total (positive or negative) dispersion is $D \times (L - L_c)$. If $L = L_c$, the positive dispersion of B1 fibre is balanced by the negative dispersion of the PDC, and the total dispersion is exactly zero at 1 550 nm.

From equation (4) the dispersion required for a system bit-rate B and total transmitter spectral width W is $D \times L_D$. Then the B1 fibre length, L , is limited to the maximum length given by

$$L_{\max} = L_c + L_D \quad (8)$$

for total positive dispersion, and to the minimum length given by the larger of zero or

$$L_{\min} = L_c - L_D \quad (9)$$

for negative total dispersion. Fibre length L may lie anywhere between these two values, and the system will not be dispersion limited.

As an example, apply a compensator designed to compensate a specific B1 fibre length L_c for the systems in table 1. Table 2 gives ranges of B1 fibre lengths (L_{\min} to L_{\max}) allowed for the systems to be within dispersion limits.

Table 2 – Transmission length ranges with a PDC designed to compensate typical lengths of B1 fibre

Bit-rate	Compensation length L_c km	Dispersion ps/nm	L_{\min} to L_{\max} (in km) for various source spectral widths			
			1 nm	0,1 nm	0,01 nm	0 nm
STM-16 ~2,5 Gb/s	20	340	0 to 64	0 to 435	0 to 1 270	0 to 1 320
	40	680	0 to 84	0 to 455	0 to 1 290	0 to 1 340
	80	1 360	36 to 124	0 to 495	0 to 1 330	0 to 1 380
STM-64 ~10 Gb/s	20	340	9 to 31	0 to 85	0 to 100	0 to 100
	40	680	29 to 51	0 to 105	0 to 120	0 to 120
	80	1 360	69 to 91	15 to 145	0 to 160	0 to 160
STM-256 ~40 Gb/s	20	340	18 to 22	15 to 25	15 to 25	15 to 25
	40	680	38 to 42	35 to 45	35 to 45	35 to 45
	80	1 360	78 to 82	75 to 85	75 to 85	75 to 85

The zero spectral width case corresponds to the modulation bandwidth limit. The above holds only for a single wavelength, such as 1 550 nm, for which the dispersion of the compensator is specified. Note that length tolerances become narrower at higher bit-rates, so that the dispersion of the B1 fibre may need to be more accurately known.

Pour un fonctionnement aux canaux multiples à plusieurs longueurs d'onde (dans la bande AO), on peut régler les longueurs de fibre à précision. Il est utile alors de connaître la pente de dispersion du compensateur de dispersion et le coefficient nominal de la pente de dispersion de la fibre B1 (0,057 ps/nm²–km).

Si la dispersion est indiquée dans ps/km ou dans la longueur de la fibre B1 compensée, il convient que les valeurs maximale et minimale, soient de CDP à CDP soit à travers la gamme de longueurs d'onde de fonctionnement, ne soient pas trop différentes l'une de l'autre. Cette variation peut être caractérisée comme la différence au-dessus de la moyenne, ou

$$\text{variation} = 2 \times \frac{\text{max} - \text{min}}{\text{max} + \text{min}} \quad (10)$$

Il convient que ceci ne dépasse pas une certaine valeur.

5.3 Taux de compensation de dispersion

Dans certaines situations il est souhaitable de compenser la dispersion (ps/nm) et la pente de dispersion (ps/nm²) de la fibre B1. Un exemple est un système de débit binaire très élevé aux canaux multiples (longueurs d'onde multiples). On peut définir un taux compensatoire de dispersion (RCD) comme le rapport de la pente négative de dispersion du CDP au coefficient positif de la pente de dispersion, S , de la fibre B1 divisée par le rapport du coefficient négatif de dispersion du CDP au coefficient positif de dispersion, D , de la fibre B1. Par conséquent

$$RCD = F \times \frac{\text{Dispersion CDP-pente}}{\text{Dispersion PDC}} \quad (11)$$

où $F = \frac{D}{S} \approx 290$ à 340 nm pour la fibre B1.1.

Quand le RCD est unité, la dispersion et la pente de dispersion de la liaison sont compensées. L'utilisation de ce paramètre dans la conception de système est toujours à l'étude.

5.4 Perte d'insertion

Un autre paramètre important est la perte d'insertion (PI) du CDP (des connecteurs y compris), donnée par sa valeur maximale en dB. La connaissance de la valeur minimale peut également être utile pour la conception du système. La PI est fonction de la longueur d'onde et peut être compensée par les AO.

On peut définir une figure de mérite (FdM) dans ps/nm–dB comme le rapport (positif) de la magnitude de la dispersion (en ps/nm négatif) à la perte d'insertion (en dB). Comme précédemment, si L_c est exactement la longueur de la fibre compensée, les deux paramètres sont simplement associés comme:

$$\text{FdM (ps/nm–dB)} \times \frac{PI}{L_c} \text{ (dB/km)} = D \text{ (ps/nm–km)} \quad (12)$$

Si α est le coefficient d'atténuation pour la longueur L de la fibre B.1.1, l'atténuation due à la fibre et au CDP est

$$A = \alpha L + PI \quad (13)$$

Une autre FdM peut être définie en dB/km comme la perte d'insertion par longueur de la fibre de la catégorie B1 compensée.

For multi-channel operation at several wavelengths (within the OA band), the fibre lengths can be fine-tuned. It is then helpful to know the dispersion slope of the dispersion compensator and the nominal dispersion-slope coefficient of the B1 fibre (0,057 ps/nm²–km).

Whether dispersion is specified in ps/km or in length of compensated B1 fibre, the maximum and minimum values, either from PDC to PDC or across the operating wavelength range, should not be too different from each other. This variation can be characterized as the difference over the average, or

$$\text{variation} = 2 \times \frac{\text{max} - \text{min}}{\text{max} + \text{min}} \quad (10)$$

This should not exceed some value.

5.3 Dispersion compensation rate

In some situations it is desirable to compensate for both the dispersion (ps/nm) and the dispersion slope (ps/nm²) of the B1 fibre. An example is a multichannel (multi-wavelength) very high bit-rate system. One can define a dispersion-compensating rate (DCR) as the ratio of the negative dispersion slope of the PDC to the positive dispersion-slope coefficient, S , of the B1 fibre divided by the ratio of the negative dispersion coefficient of the PDC to the positive dispersion coefficient, D , of the B1 fibre. Hence

$$DCR = F \times \frac{\text{PDC dispersion slope}}{\text{PDC dispersion}} \quad (11)$$

where $F = \frac{D}{S} \approx 290 \text{ nm to } 340 \text{ nm}$ for B1.1 fibre.

When the DCR is unity, both the dispersion and the dispersion slope of the link are compensated. The use of this parameter in system design is still under study.

5.4 Insertion loss

Another important parameter is the insertion loss (IL) of the PDC (including any connectors), given by its maximum value in dB. Knowing the minimum value can also be useful for system design. The IL is a function of wavelength, and can be compensated for by OAs.

One can define a figure-of-merit (FoM) in ps/nm–dB as the (positive) ratio of the magnitude of the dispersion (in negative ps/nm) to the insertion loss (in dB). As before, if L_C is the length of fibre exactly compensated for, the two parameters are simply related as:

$$\text{FoM (ps/nm–dB)} \times \frac{PI}{L_C} \text{ (dB/km)} = D \text{ (ps/nm–km)} \quad (12)$$

If α is the attenuation coefficient for the length L of B.1.1 fibre, the attenuation due to the fibre and PDC is

$$A = \alpha L + IL \quad (13)$$

Another FoM can be defined in dB/km as the insertion loss per length of category B1 fibre compensated for.

L'utilisation des limites de longueur de l'article précédent donne les limites d'atténuation comme

$$A_{\min} = \alpha(L_c - L_D) + PI \quad (14)$$

et

$$A_{\max} = \alpha(L_c + L_D) + PI \quad (15)$$

5.5 Réflectance

Avec tous les composants, y compris la fibre, des réflexions discrètes et continues, simples et multiples, peuvent se produire. A l'émetteur elles peuvent avoir comme conséquence la conversion interférométrique du bruit de phase en bruit d'intensité, et des signaux parasites au récepteur. La transmission analogique modulée d'amplitude est considérablement plus sensible à ces phénomènes que la transmission numérique. Les conditions correspondantes aux réflexions réduisent au minimum ces problèmes.

En utilisant un compensateur, il y a trois types potentiels de réflexions. Le premier consiste à raccorder par épissure ou à relier la fibre B1 aux ports d'entrée et de sortie. Les deux autres sont internes dans la boîte noire du CDP. Il y a le raccordement de la FDC ou du RBF aux fibres menant aux ports d'entrée et de sortie. Ceci est parfois fait en utilisant une décroissance progressive à fusibles correspondant mieux aux diamètres du champ de mode de différentes fibres à un point. En conclusion, la FDC (si utilisée) est réflective sans interruption sur sa longueur. Cette réflexion est généralement plus grande que celle faite par une fibre B.1 due à la diffusion Rayleigh plus rapide et au diamètre du champ de mode plus petit. Cependant, puisque la longueur totale de la FDC est inférieure à la fibre, la réflexion totale est également inférieure. Le niveau tolérable de rétrodiffusion pour des applications différentes est à l'étude. Les RBF sont beaucoup plus courts que les FDC, et fonctionnent habituellement en mode réflexion.

5.6 Polarisation

Il y a deux phénomènes qui dépendent de l'état de polarisation de la lumière se propageant entre l'émetteur et le récepteur. Les composants au long d'une liaison peuvent changer l'état de polarisation de façons compliquées qui changent selon le temps, les conditions environnementales et la longueur d'onde. Les effets de polarisation peuvent être importants dans les systèmes numériques de haut débit binaire et les systèmes analogiques.

5.6.1 Dispersion du mode de polarisation

La dispersion du mode de polarisation (PMD) est le temps de propagation de groupe différentiel des principaux états de polarisation évoluant au long d'une liaison de fibre. Elle a comme conséquence l'élargissement d'impulsion ou la décroissance de fréquence comme en utilisant la dispersion chromatique, la différence étant qu'elle a des caractéristiques plus statistiques. Pour une liaison globale, ceci est donné comme moyenne en picosecondes (ps), et est dû à la PMD des composants (connecteurs, AO, isolants, etc.) et du câble dans la liaison optique. Le dernier en particulier est statistique, et dépend de la conception de fibre et de câble, du couplage de modes, et d'autres conditions ci-dessus. En raison de la dépendance habituelle de la valeur efficace à l'égard de la longueur, le coefficient de PMD du câble à fibres optiques est généralement donné dans ps/km^{1/2}. Le PMD d'un CDP est généralement donné en ps.

Pour le PMD d'un signal de NRZ, une pénalité par accroissement de sensibilité du récepteur de 0,5 dB à 1 dB, selon la conception de récepteur, se produit lorsque le temps de propagation de groupe instantané bout à bout excède environ 0,3 de la période binaire et que la puissance des deux modes de polarisation est égale. Des méthodologies de conception de système tenant compte de la nature stochastique de la PMD de la fibre et de la PMD d'autres composants, y compris les CDP, sont traitées dans la CEI 61282-3.

Using the length bounds of the previous clause gives the attenuation bounds as

$$A_{\min} = \alpha(L_C - L_D) + IL \quad (14)$$

and

$$A_{\max} = \alpha(L_C + L_D) + IL \quad (15)$$

5.5 Reflectance

With all components, including the fibre, discrete and continuous reflections, both single and multiple, can occur. At the transmitter they can result in interferometric conversion of phase noise to intensity noise, and spurious signals at the receiver. Analogue amplitude-modulated transmission is considerably more sensitive to these phenomena than digital transmission. Corresponding requirements on reflections minimize these problems.

In using a compensator, there are three potential types of reflections. One is in splicing or connecting the B1 fibre to the input and output ports. The other two are internal to the PDC black box. There is the splicing of the DCF or the FBG to the fibres leading to the input and output ports. This is sometimes made using a fused taper to more closely match the mode field diameters of different fibres at a point. Finally, the DCF (if used) is itself continuously reflective along its length. This reflection is generally larger than with B.1 fibre due to the greater Rayleigh scattering and the smaller mode field diameter. However, since the total DCF length is less than the fibre, the total reflection is also less. The tolerable level of backscatter for different applications is under study. FBGs are much shorter than DCF, and usually operate in a reflective mode.

5.6 Polarization

There are two phenomena that depend upon the state of polarization of the light propagating between the transmitter and receiver. The components along a link can vary the state of polarization in complicated ways that vary with time, environmental conditions, and wavelength. Polarization effects can be important in high-bit-rate digital systems and analogue systems.

5.6.1 Polarization-mode dispersion

Polarization-mode dispersion (PMD) is the differential group delay of the principal states of polarization evolving along a fibre link. It results in pulse broadening or frequency rolloff as with chromatic dispersion, with the difference that it is more statistical in nature. For an overall link this is given as the mean in picoseconds (ps), and is due to the PMD of the components (connectors, OAs, isolators, etc.) and cable in the optical link. The latter particularly is statistical, depending upon the fibre and cable design, mode coupling, and other conditions above. Because of the usual square-root dependence on length, the PMD coefficient of optical cable is commonly given in ps/km^{1/2}. The PMD of a PDC is commonly given in ps.

For the PMD of an NRZ signal, an incremental receiver sensitivity penalty of 0,5 dB to 1 dB, depending on receiver design, occurs when the end-to-end instantaneous group delay exceeds about 0,3 of the bit period and the power of the two polarization modes are equal. System design methodologies taking into account the stochastic nature of fibre PMD and the PMD of other components, including PDCs, is treated in IEC 61282-3.

5.6.2 Perte dépendante de la polarisation

La perte dépendante de la polarisation (PDL) dans un système est due à la perte différentielle des états de polarisation évoluant le long d'une liaison de fibre. Pour un composant, la PDL est la variation de la perte d'insertion pour tous les états incidents de polarisation. Il convient que la PDL soit minimale au long d'une liaison pour garder la stabilité de la puissance au récepteur, réduisant au minimum de ce fait la pénalité de puissance du système qui augmente par rapport au débit binaire. On sait peu de chose de la façon dont les PDL s'ajoutent au long d'une liaison, ce qui fait échouer les méthodes habituelles pour prévoir les PMD. Le système PDL peut également interagir avec le gain dépendant de la polarisation de l'AO.

5.7 Non-linéarité optique

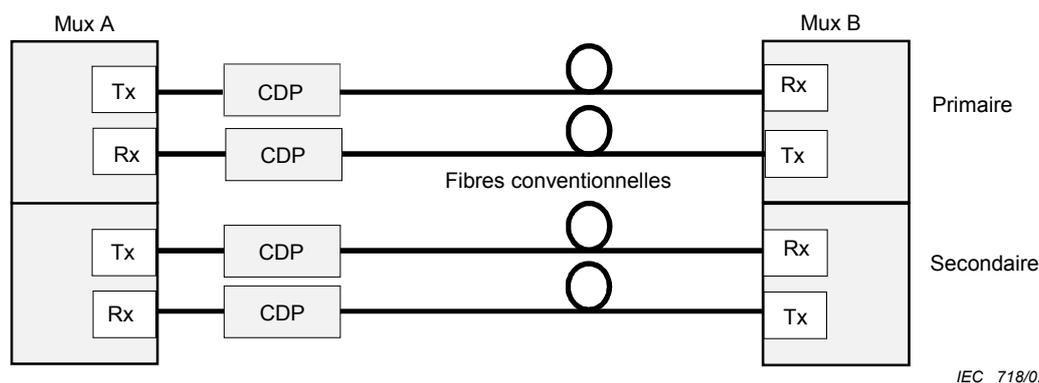


Figure 4 – Compensateurs passifs de dispersion installés à un seul emplacement

Avec l'utilisation d'AO, les niveaux de puissance optiques dans les fibres peuvent être assez grands pour causer une perte excessive et la déformation du signal et l'interférence mutuelle dans des systèmes de longueurs d'onde multiples. Les effets dépendent de la nature du spectre optique transmis et de la conception des fibres, et peuvent se produire dans la fibre B1 et la FDC mais sont susceptibles d'être plus grands dans la FDC à cause de zones pertinentes en général plus petites et également de densités de puissance plus élevées. Il convient donc d'étudier soigneusement le meilleur emplacement. Les effets non linéaires sont traités dans la CEI 61282-4, mais aucune procédure pour les éviter n'est incluse dans le présent rapport technique. L'installation des CDPs dans des liaisons optiques fera l'objet d'études supplémentaires.

6 Applications du compensateur de dispersion

Les emplacements de CDP ci-dessous ne sont donnés qu'à titre d'illustration. D'autres arrangements d'installation détaillés peuvent être choisis, par exemple pour faciliter les effets non linéaires.

6.1 Débits binaires plus élevés

Un effet d'une mise à niveau de 2,5 Gb/s à 10 Gb/s par l'intermédiaire du multiplexage par répartition dans le temps (MRT) est une perte d'environ 6 dB à 8 dB dans la sensibilité du récepteur. La réduction au bilan de puissance d'une liaison est inférieure si un émetteur de haute puissance est utilisé. Une plage courte de la fibre B1 avec un laser de fluctuation de longueur d'onde directement modulé peut être limitée par la dispersion après la mise à niveau, de sorte que si quelques décibels du bilan de puissance restent, ils peuvent être épuisés par un CDP pour alléger le problème. Si aucun amplificateur n'est utilisé, le CDP peut être installé n'importe où le long de la liaison; cependant, la consolidation des CDP dans un emplacement (bureau central), comme illustré à la figure 4, peut simplifier le montage. D'une façon générale le CDP est directionnellement invariable et peut être utilisé dans les systèmes bidirectionnels.

5.6.2 Polarization-dependent loss

Polarization-dependent loss (PDL) in a system is due to the differential loss of the states of polarization evolving along a fibre link. For a component PDL is the variation of insertion loss for all incident states of polarization. PDL should be minimal along a link to maintain the stability of power at the receiver, thereby minimizing the system power penalty that increases with bit-rate. Little is known about how PDLs add along a link, and its presence causes the usual methods of predicting PMD to fail. System PDL may also interact with the polarization-dependent gain of the OAs.

5.7 Optical non-linearity

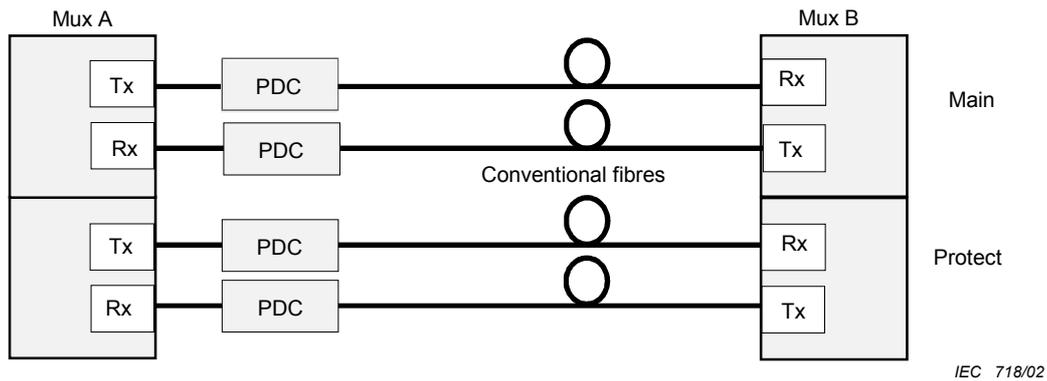


Figure 4 – Passive dispersion compensators placed at one location

With the use of OAs, optical power levels in fibres can be large enough to cause excess loss and distortion of the signal and mutual interference in multi-wavelength systems. The effects depend upon the nature of the transmitted optical spectrum and upon the fibre design, and can occur in both B1 fibre and DCF but are likely to be greater in DCF due to typically smaller effective areas and correspondingly higher power densities, so the optimal placement should be carefully considered. Non-linear effects are treated in IEC 61282-4, but no procedures to avoid them are included in this technical report. The placement of PDCs in optical links is for further study.

6 Dispersion compensator applications

PDC placements below are for illustration only. Other detailed placement schemes may be chosen, for example, to best accommodate non-linear effects.

6.1 Higher bit-rates

One effect of an upgrade from 2,5 Gb/s to 10 Gb/s via time-division multiplexing (TDM) is a loss of about 6 dB to 8 dB in receiver sensitivity. The reduction in link power budget is less if a higher-power transmitter is used. A short span of B1 fibre with a directly modulated chirping laser may be dispersion-limited after the upgrade, so that if a few dB of power budget remains it can be used up by a PDC to alleviate the problem. When no amplifiers are used, the PDC may be placed anywhere along the link; however, consolidating PDCs in one location (central office), as shown in figure 4, may simplify mounting considerations. Generally, the PDC is directionally invariant and can be used in bidirectional systems.

6.2 Durées plus longues non répétées

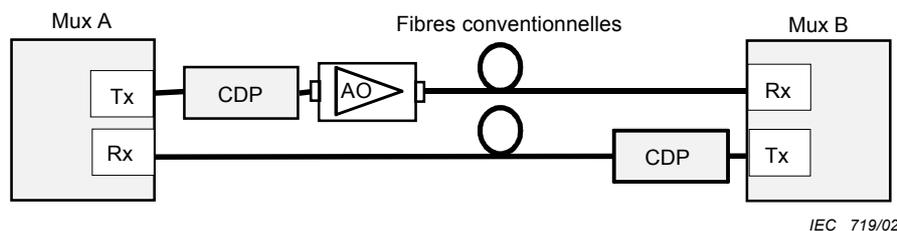


Figure 5 – CDP installés avant les AO de puissance de l'émetteur (le circuit secondaire n'est pas représenté)

Une autre mise à niveau saute la régénération aux bureaux centraux intermédiaires. Ceci excédera la longueur limitée par l'atténuation initiale de sorte que les AO deviennent nécessaires. Ceux-ci sont habituellement installés à l'émetteur comme amplificateurs de puissance ou au récepteur comme préamplificateurs. Pour des liaisons très longues, des amplificateurs intégrés dans des locaux de milieu contrôlé peuvent être utilisés. Pour surmonter la dispersion à travers les longueurs de fibre B1 plus longues, peut-être en conjonction à une mise à niveau de MRT, des compensateurs peuvent être installés au long de la liaison. L'installation est déterminée par les niveaux de puissance appropriés dans ou hors des AO, par les effets évolués de dispersion au long de la liaison, et par la convenance de l'emplacement. La figure 5 est un exemple de compensateur installé avant un AO agissant comme amplificateur de puissance de l'émetteur. Quelques modules peuvent incorporer un compensateur et un ou deux AO dans le même module.

Un compensateur n'est généralement pas installé juste après un amplificateur de puissance, ni juste après une EOA, afin d'éviter les effets non linéaires qui peuvent se produire aux niveaux de puissance élevés. Cependant, un compensateur peut être installé juste après un préamplificateur parce que son niveau de puissance de sortie est généralement assez bas pour éviter les effets non linéaires.

6.3 Emission à longueurs d'ondes multiples

Une autre mise à niveau se fait par le multiplexage par répartition en longueur d'onde (MRF) dans lequel plusieurs longueurs d'onde sont transmises simultanément au long de la fibre comme dans la Recommandation UIT-T G.692. Chaque longueur d'onde émet un canal STM-16 ou STM-64, augmentant de ce fait considérablement la capacité du système. Une autre application est pour le routage de signal dans les réseaux optiques, mais ceci n'est pas discuté ici.

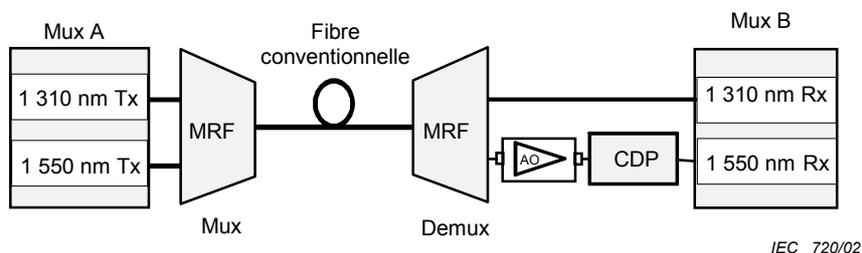


Figure 6 – MRF de deux bandes avec un AO et un CDP dans la bande supérieure

Selon une forme de MRF, les bandes de 1 310 nm et de 1 550 nm sont utilisées, chaque bande portant une ou deux longueurs d'onde. Si le système est optimisé pour la longueur, la bande supérieure peut exiger la compensation de dispersion, et elle peut également exiger un amplificateur optique afin de compenser la perte du compensateur comme illustré à la figure 6.

6.2 Longer unrepeated spans

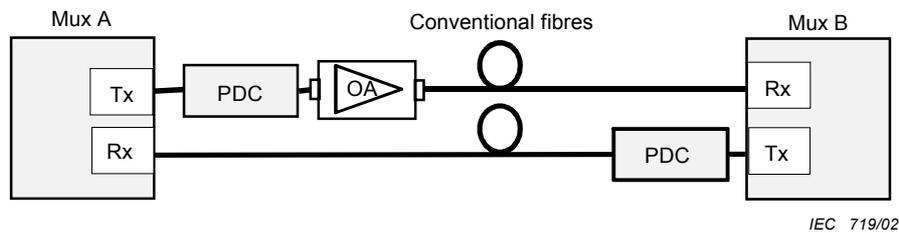


Figure 5 – PDCs placed before transmitter booster OAs (protect circuit not shown)

Another upgrade is bypassing regeneration at intermediate central offices. This will exceed the initial attenuation-limited length so that OAs become necessary. These are usually placed at the transmitter as a booster amplifier or at the receiver as a pre-amplifier. For very long links, in-line amplifiers in controlled-environment vaults can be used. To overcome dispersion over these longer lengths of B1 fibre, possibly in conjunction with a TDM upgrade, one or more compensators can be placed along the link. Placement is determined by appropriate power levels into or out of the OAs, by higher-order dispersion effects along the link, and by convenience of location. Figure 5 is an example of a compensator placed before an OA acting as a transmitter booster amplifier. Some modules may incorporate a compensator and one or two OAs in the same package.

A compensator is generally not placed just after a booster-amplifier, nor just after an OAT, to avoid non-linear effects that can occur at high power levels. However, a compensator may be placed just after a pre-amplifier because its output power level is generally low enough to avoid non-linear effects.

6.3 Multiwavelength transmission

Another upgrade is via wavelength-division multiplexing (WDM) in which several wavelengths are transmitted simultaneously along the fibre as in ITU-T Recommendation G.692. Each wavelength transmits an STM-16 or STM-64 channel, thereby greatly expanding system capacity. Another application is for signal routing in optical networks, but this is not discussed here.

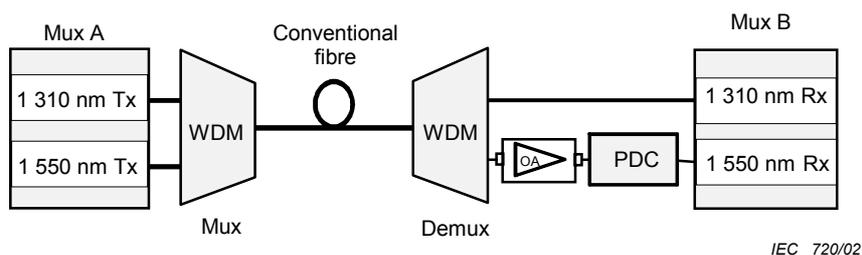


Figure 6 – Two-band WDM with an OA and a PDC in the upper band

In one form of WDM, both the 1 310 nm and 1 550 nm bands are used, each band carrying one or two wavelengths. If the system is optimized for length, the upper band may require dispersion compensation, and it may also require an optical amplifier to make up for the compensator loss as shown in figure 6.

Selon une autre forme de MRF, seule la vitrine de l'AO est utilisée et généralement $n = 4, 8, 16, 32$ canaux ou plus sont utilisés. La figure 7 montre un exemple avec quatre canaux.

L'UIT et d'autres organisations de normalisation sont en train d'établir des normes pour l'allocation de canal de MRF. Ici le CDP est illustré avec un AO intégré. Il est important de noter dans ce qui précède que la compensation de dispersion profite à tous les débits binaires en étendant les longueurs limitées par la dispersion. Cependant, pour des mises à niveau encore plus élevées de MRT, un réglage de précision supplémentaire de la dispersion peut être nécessaire. Pour des mises à niveau de MRF, la pente de dispersion ou la planéité au-dessus de la vitrine de longueur d'onde peut être de plus en plus importante. Le RCD de l'équation (11) peut être utile dans ce cas-ci.

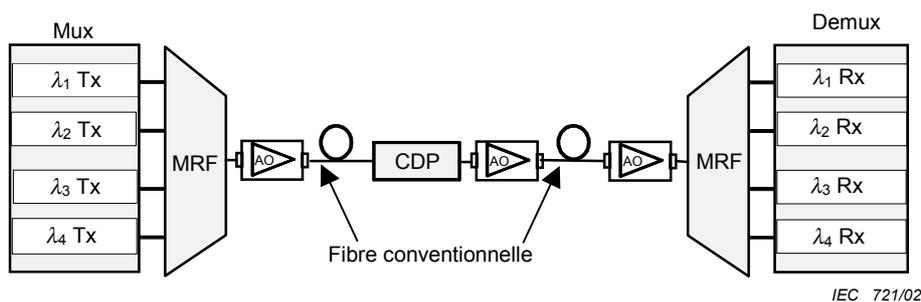


Figure 7 – MRF à canaux multiples dans la bande de l'AO

7 Paramètres du système pour des compensateurs passifs de dispersion

Les paramètres primaires sont ceux qui s'appliquent à la boîte noire du CDP. Des paramètres secondaires dérivent des paramètres primaires. Les deux types peuvent être utiles pour la conception du système. Tous les paramètres sont sujets à des variations de valeur. Cela est dû aux tolérances de fabrication, aux variations par rapport à la longueur d'onde, et aux changements de conditions environnementales.

Paramètres primaires	Unité
Gamme de longueur d'onde fonctionnelle	nm
Dispersion	ps/nm
Pente de dispersion	ps/nm ²
Perte d'insertion	dB
Réflectance	dB
Dispersion en mode de polarisation (PMD)	ps
Perte dépendante de la polarisation (PDL) (à l'étude)	dB
Non-linéarité (à l'étude)	-----

Paramètres secondaires	Unité
Longueur de compensation	km
Figure de mérite (FdM)	dB/(ps/nm)
Coefficient du PMD	ps/km ^{1/2}
Taux de compensation de dispersion (à l'étude)	-----

In another form of WDM, only the OA window is used and typically $n = 4, 8, 16, 32$ or more channels are utilized. Figure 7 shows an example with four channels.

The ITU and other standards organizations are in the process of formulating standards for WDM channel allocation. Here the PDC is shown with an in-line OA. It is important to note in the above that dispersion compensation benefits all bit-rates in extending dispersion-limited lengths. However, for even higher TDM upgrades, some additional fine-tuning of the dispersion may be necessary. For WDM upgrades, the dispersion-slope or flatness over the wavelength window may be increasingly important. The DCR of equation (11) may be useful in this case.

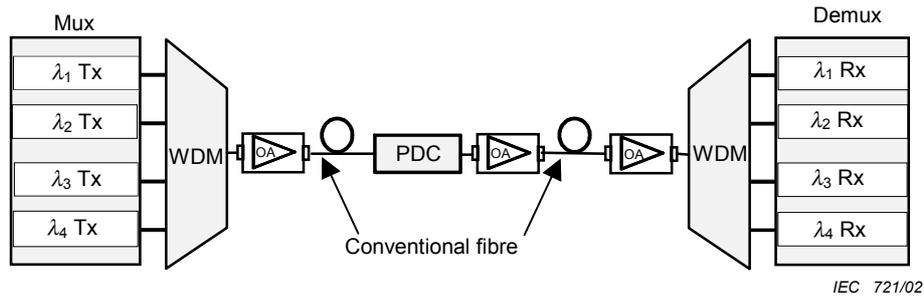


Figure 7 – Multichannel WDM in the OA band

7 System parameters for passive dispersion compensators

Primary parameters are those applying to the PDC black box. Secondary parameters derive from the primary ones. Either or both types may be useful for system design. All parameters will be subject to some variations in value. This will be due to manufacturing tolerances, variations with wavelength, and changes due to environmental conditions.

Primary parameters	Unit
Operating wavelength range	nm
Dispersion	ps/nm
Dispersion slope	ps/nm ²
Insertion loss	dB
Reflectance	dB
Polarization-mode dispersion (PMD)	ps
Polarization-dependent loss (PDL) (under consideration)	dB
Non-linearity (under consideration)	-----

Secondary parameters	Unit
Compensation length	km
Figure-of-merit (FoM)	dB/(ps/nm)
PMD coefficient	ps/km ^{1/2}
Dispersion compensation rate (under consideration)	-----

Annexe A

Liste de sigles

TEB	Taux d'erreurs binaires
FDC	Fibre à dispersion compensatoire
RCD	Rapport de compensation de dispersion
AFDE	Amplificateur à fibre dopée à l'erbium
RBF	Réseau de Bragg intégré par fibre
FdM	Figure de mérite
PI	Perte d'insertion
UIT	Union Internationale des Télécommunications
AO	Amplificateur optique
ROA	Récepteur optiquement amplifié
EOA	Emetteur optiquement amplifié
NRZ	Non-retour à zéro
CDP	Compensateur de dispersion passive
MRT	Multiplexage par répartition dans le temps
MRF	Multiplexage par répartition en longueur d'onde

Annex A

List of acronyms

BER	Bit-error ratio
DCF	Dispersion-compensating fibre
DCR	Dispersion compensation ratio
FBG	Fibre Bragg grating
FoM	Figure of merit
IL	Insertion loss
ITU	International Telecommunication Union
OA	Optical amplifier
OAR	Optically amplified receiver
OAT	Optically-amplified transmitter
NRZ	Non-return-to-zero
PDC	Passive dispersion compensator
TDM	Time-division multiplexing
WDM	Wavelength-division multiplexing

Bibliographie

UIT-T Recommendation G.671, *Caractéristiques de transmission des composants optiques passifs*

Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, second edition (1997), John Wiley & Sons, Inc.

Bibliography

ITU-T Recommendation G.671, *Transmission characteristics of passive optical components*

Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, second edition (1997), John Wiley & Sons, Inc.



LICENSED TO MECON Limited. - RANCHI/BANGALORE
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.



Standards Survey

The IEC would like to offer you the best quality standards possible. To make sure that we continue to meet your needs, your feedback is essential. Would you please take a minute to answer the questions overleaf and fax them to us at +41 22 919 03 00 or mail them to the address below. Thank you!

Customer Service Centre (CSC)

International Electrotechnical Commission

3, rue de Varembé
1211 Genève 20
Switzerland

or

Fax to: **IEC/CSC** at +41 22 919 03 00

Thank you for your contribution to the standards-making process.

A Prioritaire

Nicht frankieren
Ne pas affranchir



Non affrancare
No stamp required

RÉPONSE PAYÉE

SUISSE

Customer Service Centre (CSC)
International Electrotechnical Commission
3, rue de Varembé
1211 GENEVA 20
Switzerland



Q1 Please report on **ONE STANDARD** and **ONE STANDARD ONLY**. Enter the exact number of the standard: (e.g. 60601-1-1)

.....

Q2 Please tell us in what capacity(ies) you bought the standard (tick all that apply). I am the/a:

- purchasing agent
- librarian
- researcher
- design engineer
- safety engineer
- testing engineer
- marketing specialist
- other.....

Q3 I work for/in/as a: (tick all that apply)

- manufacturing
- consultant
- government
- test/certification facility
- public utility
- education
- military
- other.....

Q4 This standard will be used for: (tick all that apply)

- general reference
- product research
- product design/development
- specifications
- tenders
- quality assessment
- certification
- technical documentation
- thesis
- manufacturing
- other.....

Q5 This standard meets my needs: (tick one)

- not at all
- nearly
- fairly well
- exactly

Q6 If you ticked NOT AT ALL in Question 5 the reason is: (tick all that apply)

- standard is out of date
- standard is incomplete
- standard is too academic
- standard is too superficial
- title is misleading
- I made the wrong choice
- other

Q7 Please assess the standard in the following categories, using the numbers:

- (1) unacceptable,
- (2) below average,
- (3) average,
- (4) above average,
- (5) exceptional,
- (6) not applicable

- timeliness.....
- quality of writing.....
- technical contents.....
- logic of arrangement of contents
- tables, charts, graphs, figures.....
- other

Q8 I read/use the: (tick one)

- French text only
- English text only
- both English and French texts

Q9 Please share any comment on any aspect of the IEC that you would like us to know:

.....





Enquête sur les normes

La CEI ambitionne de vous offrir les meilleures normes possibles. Pour nous assurer que nous continuons à répondre à votre attente, nous avons besoin de quelques renseignements de votre part. Nous vous demandons simplement de consacrer un instant pour répondre au questionnaire ci-après et de nous le retourner par fax au +41 22 919 03 00 ou par courrier à l'adresse ci-dessous. Merci !

Centre du Service Clientèle (CSC)

Commission Electrotechnique Internationale

3, rue de Varembé
1211 Genève 20
Suisse

ou

Télécopie: **CEI/CSC** +41 22 919 03 00

Nous vous remercions de la contribution que vous voudrez bien apporter ainsi à la Normalisation Internationale.

A Prioritaire

Nicht frankieren
Ne pas affranchir



Non affrancare
No stamp required

RÉPONSE PAYÉE

SUISSE

Centre du Service Clientèle (CSC)
Commission Electrotechnique Internationale
3, rue de Varembé
1211 GENÈVE 20
Suisse



Q1 Veuillez ne mentionner qu'**UNE SEULE NORME** et indiquer son numéro exact:
(ex. 60601-1-1)
.....

Q2 En tant qu'acheteur de cette norme, quelle est votre fonction?
(cochez tout ce qui convient)
Je suis le/un:

- agent d'un service d'achat
- bibliothécaire
- chercheur
- ingénieur concepteur
- ingénieur sécurité
- ingénieur d'essais
- spécialiste en marketing
- autre(s).....

Q3 Je travaille:
(cochez tout ce qui convient)

- dans l'industrie
- comme consultant
- pour un gouvernement
- pour un organisme d'essais/ certification
- dans un service public
- dans l'enseignement
- comme militaire
- autre(s).....

Q4 Cette norme sera utilisée pour/comme
(cochez tout ce qui convient)

- ouvrage de référence
- une recherche de produit
- une étude/développement de produit
- des spécifications
- des soumissions
- une évaluation de la qualité
- une certification
- une documentation technique
- une thèse
- la fabrication
- autre(s).....

Q5 Cette norme répond-elle à vos besoins:
(une seule réponse)

- pas du tout
- à peu près
- assez bien
- parfaitement

Q6 Si vous avez répondu PAS DU TOUT à Q5, c'est pour la/les raison(s) suivantes:
(cochez tout ce qui convient)

- la norme a besoin d'être révisée
- la norme est incomplète
- la norme est trop théorique
- la norme est trop superficielle
- le titre est équivoque
- je n'ai pas fait le bon choix
- autre(s)

Q7 Veuillez évaluer chacun des critères ci-dessous en utilisant les chiffres
(1) inacceptable,
(2) au-dessous de la moyenne,
(3) moyen,
(4) au-dessus de la moyenne,
(5) exceptionnel,
(6) sans objet

- publication en temps opportun
- qualité de la rédaction.....
- contenu technique
- disposition logique du contenu
- tableaux, diagrammes, graphiques, figures
- autre(s)

Q8 Je lis/utilise: (une seule réponse)

- uniquement le texte français
- uniquement le texte anglais
- les textes anglais et français

Q9 Veuillez nous faire part de vos observations éventuelles sur la CEI:

.....
.....
.....
.....
.....



LICENSED TO MECON Limited. - RANCHI/BANGALORE
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.

ISBN 2-8318-6254-X



9 782831 862545

ICS 33.180.01
