

الج م م ه و ر ي ة ال ج ز ا ئ ر ي ة ال د ي م ة ر ا ئ ط ي ة
ال ش ع ب ي ة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزار ة ال ة ع ل ي م ال ع م ال ي و ال ب ئ ي
ال ع م م ي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة سعيدة - د. الطاهر مولاي -

Université Saïda – Dr. Tahar Moulay –
Faculté de Technologie



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **Diplôme de MASTER** en Télécommunications

Spécialité : Systèmes de télécommunications

Par: M. REMLI Ahmed Alaa Eddine

Compensation de la dispersion dans une transmission par fibre optique

Soutenu, le 22/06/ 2024, devant le jury composé de :

M. MOKADEM.D

MCB

Président

M. MANSOURI.B

MCA

Rapporteur

M. BOUDKHIL .A

MCA

Examinateur

Remerciements

Nous remercions "Dieu" le tout puissant, de nous avoir accordé le courage, la patience et la volonté pour mener à terme ce travail. En témoignage de nos profondes reconnaissances, nous devons remercier toutes les personnes qui nous ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce projet.

Nous adressons nos reconnaissances et nos remerciements à nos encadreurs Mr.MANSOURI.B. A de nous avoir honoré par leur encadrement, pour leur disponibilité, leur orientation et leur précieux conseils qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous remercions les membres du jury, Mr.BOUDKHIL.A et Mr. MOKADEM.D d'avoir accepté de juger notre travail.

Nos remerciements vont aussi à nos familles et amis qui nous ont prodigué conseils et encouragements

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissance et de respect :

A la femme qui m'a mis au monde, celle qui a sacrifié tout pour moi Son temps, son bonheur, sa santé : ma mère, le noyau de mon esprit.

A mon père, source d'énergie de ma réussite, Ecole de mon éducation et principe de la vie,

Que DIEU les préserves pour moi

A mes frères

A mes sœurs

A toute ma famille paternelle et maternelle

A tous mes amis, tous ceux qui j'ai passé des meilleurs moments et gardé de très bon souvenirs

ALAA

Table des matières

Liste de figure

Liste de tableau

Introduction générale	1
-----------------------------	---

CHAPITRE 01 : Généralité La chaîne de transmission

I. Introduction	2
II. Historique	2
III. Principe de fonctionnement de la fibre optique	4
IV. Présentation de la chaîne de transmission par fibre optique	5
V. Bloc d'émission	6
V.1. Source optique	6
V.2. Technique de modulation	6
VI. Techniques de multiplexage	7
VI.1. La technique OTDMA	7
VI.2. La technique OFDA	8
VI.3. La technique WDMA	8
VI.4. La technique OCDMA	9
VI.5. La technique SDM	9
VII. Canal de transmission dans les liaisons optiques	10
VII.1. Atténuation	11
VII.2. Dispersion modale (intermodale).....	11
VII.3. Dispersion chromatique (intra modale).....	12
VIII. Bloc de réception	12
VIII.1. La photodiode PIN	13

VIII.2. La photodiode avalanche APD.....	13
IX. Fibre optique	13
IX.1Définition	13
IX.2 La structure des câbles à fibres optiques	14
X. Composition de la fibre optique	14
X.1. Les verres	14
X.2. Les liquides	14
X.3. Le plastique.....	14
X.4. La silice.....	14
XI. Types de câbles à fibre optique	14
XI.1 Fibre optique multimode	15
XI.2 Fibre optique monomode	15
XII. Comparaison entre les différents types de fibres optiques	17
XX. Les applications des fibres optiques	18
XX.1 Les télécommunications	18
XX.2 Les réseaux sous-marins	18
XX.3 Applications militaires	19
XX.4 Applications diverses	19
XXX. Les avantages et les inconvénients de la fibre optique	20
XXX.1 Les avantages	20
XXX.2 Les inconvénients	21
XL. Propriétés linéaires des fibres optiques	21
XL.1 Pertes dans les fibres optiques	22
XL.1.1 Atténuation	22

XL.1.2 Absorption	23
XL.1.2.1 L'absorption intrinsèque	23
XL.1.2.2 Absorption extrinsèque	23
XL.1.3 Pertes par diffusion	23
XL.1.4 Pertes par rayonnement	24
XL.1.5 Pertes par couplage	24
XL.2 Dispersion chromatique	25
XL.3. Dispersion d'une fibre monomode	26
L.La Conclusion	28

CHAPITRE 02 : La dispersion chromatique

I. Introduction	30
II. La dispersion	30
II.1 La dispersion chromatique.....	31
II.1.1. La dispersion matérielle D_m	32
II.1.2. La dispersion de guide d'onde D_g	33
II.2. La dispersion modale (ou intermodale)	33
II.3. Dispersion de mode de polarisation (PMD)	34
III.1. Technique compensation de dispersion par des fibres compensatrice (DCF)	36
III.1.1. Avantages de DCF.....	37
IV. Conclusion	38

CHAPITRE 03 : Résultat de Simulation

I. Introduction	40
II. Chaine de transmission de base	40
III. Fibres compensatrices de dispersion chromatique (DCF)	42
a. Pré-DCF.....	43
b. Post-DCF	45
c. Pré-post DCF	47
IV .Résultats et discutions.....	51

V. Conclusion	52
----------------------------	-----------

LES FIGURES

Chapitre 01 : Généralité sur la chaîne de transmission

Figure I.1 : Schéma descriptif du guidage de la lumière dans un jet d'eau par Colladon	2
Figure I.2 : Ouverture numérique.....	4
Figure I.3 : Schéma explicatif d'un système de transmission optique.....	4
Figure I.4 : Schéma de la modulation a : directe et b : externe.....	5
Figure I.5 : Système d'émission et de réception dans la technique OTDMA.....	7
Figure I.6 : Répartition fréquentielle des porteuses (OFDMA).....	7
Figure I.7: schéma d'un multiplexage en longueur d'onde WDM.....	8
Figure I.8: Schéma d'un câble à fibre optique.....	9
FigureI.9: Schéma des fibres optiques a : multimode à gradient d'indice, b : multimode à saut d'indice et c : monomode.....	9
Figure I.10: l'effet de l'atténuation.....	10
Figure I.11: le phénomène de dispersion intermodale.....	10.
Figure I.12: dispersion chromatique.....	11
Figure I.13: Structure d'une photodiode PIN.....	12
Figure I.14 : Profil de l'indice de réfraction pour les trois types de fibres optiques conventionnelles (fibre multimode à saut d'indice, fibre multimode à gradient d'indice et fibre monomode à saut d'indice).....	15
Figure I.15 : Illustration schématique de la dégradation du signal.....	20
Figure I.16 : Schéma récapitulatif des différents types de pertes dans une fibre optique...	24
Figure I.17 : Effet de la dispersion chromatique.....	24
Figure I.18 : Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique totale d'une fibre silice monomode à saut d'indice.....	26

Chapitre 02 : La dispersion chromatique

Figure. II.1 : Évolution de l'impulsion pendant sa propagation dans la fibre optique	29
Figure II.2: Dispersion chromatique.....	30
Figure. II.3 : Effet de la dispersion chromatique : le signal qui se propage s'élargit.....	30
Figure. II.2 : Influence de la dispersion modale sur une impulsion optique.....	33
Figure. II.4 : Dispersion de mode de polarisation (PMD).....	34
Figure. II.5 : Pré-compensation DCF.....	36
Figure. II.6 : Post-compensation DCF.....	36
Figure. II.7 : Pré poste-compensation DCF.....	36

Chapitre 03 : Résultat de simulation

Figure. III.1 : Chaine de transmission de base.....	43
Figure.III.2 : Les diagrammes de l'œil (a) pour 10Gbps, (b) pour 20Gbps, (c)pour 40Gbps et (d) pour 60Gbps.....	44
Figure.III.3 : Chaîne de simulation du Pré-DCF.....	46
Figure.III.4 : Chaîne de simulation du Post-DCF.....	46
Figure.III.5 : Chaîne de simulation du Pré-post DCF.....	47
Figure.III.6. : Facteur de qualité en fonction du débit pour Pré-DCF, Post-DCF, Pré post-DCF.....	50

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Comparaison entre les différents types de fibre optiques.....	16
Tableau.III.1 : Paramètres de simulation.....	43
Tableau. III.2 : Paramètres de simulation avec DCF.....	45
Tableau. III.3 : Diagrammes de l'œil pour Pré-DCF, Post-DCF, Pré post-DCF avec les différents débits binaires.....	48
Tableau. III.4 : Analyse de Pré-DCF.....	49
Tableau. III.5 : Analyse de Post-DCF.....	49
Tableau.III.6 : Analyse de Pré post-DCF.....	49

Introduction générale

Introduction Générale

Introduction Générale :

Les réseaux de communication optique jouent un rôle essentiel dans le monde moderne, supportant une croissance exponentielle du trafic de données à travers le globe. Grâce à leur capacité à transporter d'énormes quantités de données à des vitesses élevées sur de longues distances, les fibres optiques sont devenues la colonne vertébrale des infrastructures de télécommunications. Cependant, pour exploiter pleinement leur potentiel, il est crucial de comprendre et de gérer les phénomènes physiques qui peuvent affecter la qualité de transmission, tels que la dispersion.

Ce mémoire se compose de trois chapitres principaux, chacun abordant des aspects essentiels de la transmission optique, de la dispersion et des techniques de compensation.

Dans le **1^{er}** Chapitre on a introduit les concepts fondamentaux de la transmission optique. Il couvre la structure de base d'une chaîne de transmission optique, incluant les sources de lumière, les fibres optiques et les récepteurs. Ce chapitre établit le cadre nécessaire pour comprendre comment les signaux optiques sont générés, transmis et reçus, en mettant en évidence les défis techniques et les solutions pratiques pour optimiser la performance des systèmes optiques. Et le **2^{ème}** Chapitre se concentre sur le phénomène de la dispersion dans les fibres optiques. La dispersion, principalement divisée en dispersion chromatique et modale, cause un élargissement des impulsions lumineuses, affectant la clarté et la précision des signaux transmis. Ce chapitre explique en détail les mécanismes sous-jacents de la dispersion, ses effets sur la transmission des données, et pourquoi sa gestion est cruciale pour maintenir la qualité des communications optiques. Le **3^{ème}** chapitre présente une analyse approfondie basée sur des simulations pour évaluer les techniques de compensation de la dispersion. En utilisant des outils de simulation avancés, ce chapitre compare différentes approches et démontre que l'utilisation de fibres compensatrices de dispersion (DCF) est la méthode la plus efficace pour atténuer les effets de la dispersion. Les résultats montrent que la configuration Post-DCF offre les meilleures performances, améliorant significativement le facteur de qualité (Q) et réduisant le taux d'erreur binaire (BER).

Chapitre 1 :

Généralité sur

la chaîne de

transmission

Chapitre 1 : Généralité sur la chaîne de transmission

I. Introduction :

Une fibre optique est un mince fil fait de verre ou de plastique qui a la capacité de transporter la lumière, permettant ainsi la transmission d'informations. Elle offre une vitesse de transfert supérieure aux câbles coaxiaux et peut servir de support à un réseau à large bande passante, transportant divers types de données comme la télévision, la téléphonie, la vidéoconférence ou les données informatiques. Ce concept de fibre optique a été développé dans les années 1970 dans les laboratoires de Corning Glass Works, désormais Corning Incorporated.

Protégée par une gaine, la fibre optique peut acheminer de la lumière sur des distances de plusieurs centaines, voire milliers, de kilomètres. Le signal lumineux, codé par des variations d'intensité, permet de transmettre une grande quantité d'informations. En offrant des communications sur de très longues distances et à des débits inédits, les fibres optiques ont été un élément clé dans la révolution des télécommunications. Leurs propriétés sont également exploitées dans des domaines tels que la détection (températures, pression, etc.), l'imagerie et l'éclairage.

La fibre optique est un outil polyvalent utilisé dans divers domaines, tels que les techniques non linéaires, l'amplification et la génération de super continuums pour des applications médicales. Dans les réseaux informatiques comme Ethernet, elle peut être connectée à d'autres équipements grâce à un émetteur-récepteur. Ce chapitre explore en détail les différents composants et types de fibre optique.

II. Historique :

L'étude de transmission de la lumière est très ancienne, déjà en 1841, le suisse Colladon montrait que la lumière était guidée dans les filets d'un jet d'eau à Genève (Figure I.1). L'année suivante, en 1842, Jacques Babinet constatait la même chose dans les filets d'eau et des bâtons en verre. En 1880, William Wheeler employait justement des tubes de verre pour éclairer un lieu avec une source lumineuse placée ailleurs : la lumière pouvait être guidée par du verre. En 1888, Roth et Reuss utilisaient des tubes de verre en médecine pour éclairer les cavités et les viscères du corps [1].

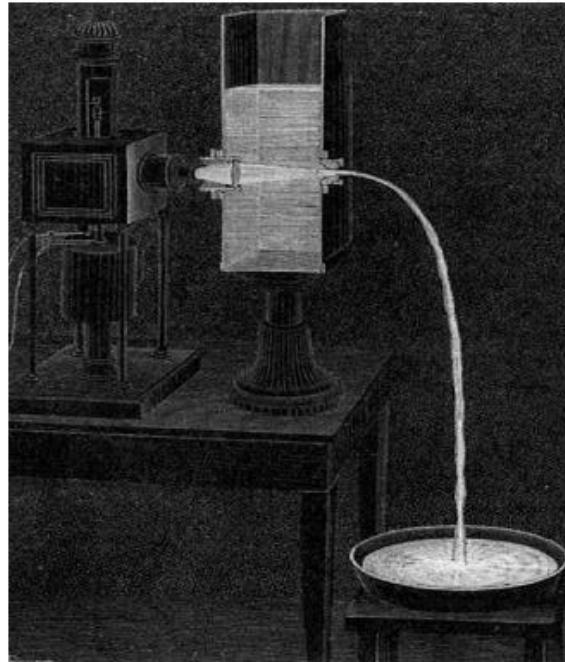


Figure I.1 : Schéma descriptif du guidage de la lumière dans un jet d'eau par Colladon [2].

On doit la première tentative de communication optique à Alexander Graham Bell, connu pour l'invention du téléphone. En effet, il mit au point, au cours des années 1880, le photophone. Cet appareil permettait de transmettre la lumière sur une distance de 200 mètres. La voix, amplifiée par un microphone, faisait vibrer un miroir qui réfléchissait la lumière du soleil. Quelque 200 mètres plus loin, un second miroir captait cette lumière pour activer un cristal de sélénium et reproduire le son voulu. Le récepteur de cet appareil était presque identique à celui du premier téléphone. Bien qu'opérationnelle en terrain découvert, cette méthode s'avéra peu utilisée. La pluie, la neige et les obstacles qui empêchaient la transmission du signal condamnèrent cette invention, bien qu'il considérait lui-même que le photophone était sa plus grande invention, puisqu'elle permettait une communication sans fil. En 1927 que Baird et Hansell eurent l'idée de travailler sur les fibres optiques au sens où nous l'entendons aujourd'hui. Ils tentèrent par la suite de mettre au point un dispositif d'images pour télévision à l'aide de fibres, mais, bien que brevetée, cette réalisation n'eut jamais vraiment d'application. C'est à partir de 1930 que l'on commence à travailler sérieusement pour la réalisation de fibres optiques. La première application fructueuse de la fibre optique apparue seulement en 1950 avec le fibroscope, créé par Van Heel. Grâce à ce dispositif, on pouvait observer avec beaucoup plus d'efficacité (et beaucoup moins de traumatisme) l'intérieur du

Chapitre 1 : Généralité sur la chaîne de transmission

corps humain et les soudures à l'intérieur des réacteurs d'avions. Malheureusement, la qualité optique de la silice ne permettait pas l'utilisation de ce dispositif sur de grandes longueurs de fibres. Dès la fin des années 1960 naît l'idée de fabrication de fibres optiques de silice pure permettant de transporter la lumière sur de grandes distances, tout en ayant une atténuation la plus faible possible. En 1968, Kwen Chi Kao réalise des fibres de silice avec des pertes de quelques dB/km [3] dans le proche infrarouge. Deux ans après, en 1970, trois inventeurs (Robert Maurer, Peter Schultz et Donald Beck de la compagnie Corning Glass Works de New-York) réussirent à mettre au point une fibre optique efficace et rentable en termes de transmission d'informations (20 dB/km à ~ 1000 nm) [4]. Leur fibre optique était en mesure de transporter 65 000 fois plus d'informations qu'un simple câble de cuivre. En dehors de la société Corning, plusieurs laboratoires de recherche dont Bells Telephon Laboratories montrèrent que des fibres optiques, en silice dopée ou non, pouvaient être fabriquées avec des longueurs de plusieurs kilomètres et avec des pertes de l'ordre de quelques dB/km [5].

Le premier système de communication téléphonique optique fut installé au centre-ville de Chicago en 1977. En 1979, des pertes de l'ordre de 0,2 dB/km ont été mesurées à la longueur d'onde de $1,55 \mu\text{m}$ [6]. Une telle valeur signifiait qu'il était possible de transporter un signal optique sur une centaine de kilomètres sans utiliser de répéteur. La liaison optique entre les centraux téléphoniques des Tuileries et Philippe-Auguste, à Paris fut en 1982 la première liaison optique en France [7]. On estime qu'aujourd'hui que plus de 80 % des communications à longues distances sont transportées par plus de 25 millions de kilomètres de câbles à fibres optiques partout dans le monde. Dans une première phase (entre 1984 et 2000), la fibre optique a surtout été utilisée pour des applications nécessitant de forts débits. Cependant avec la baisse des coûts et les besoins croissants des particuliers pour le haut débit d'information, on envisage depuis 2005 son arrivée même chez les particuliers : FTTH ((en) Fiber to the Home), FTTB ((en) Fiber to the Building), FTTC ((en) Fiber to the Curb), etc....

III. Principe de fonctionnement de la fibre optique :

Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre optique sans perte, en empruntant un parcours en zigzag. La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec très peu de pertes même lorsque la fibre est courbée. Une fibre optique est souvent décrite selon deux paramètres :

Chapitre 1 : Généralité sur la chaîne de transmission

a. **La différence d'indice normalisé** : qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine :

$$\Delta = \frac{n_c - n_g}{n_c}$$

Où n_c est l'indice de réfraction du cœur, et n_g celui de la gaine.

b. **L'ouverture numérique** : ((en) numerical aperture), qui est concrètement le sinus de l'angle d'entrée maximal θ_0 de la lumière dans la fibre pour que la lumière puisse être guidée sans perte, mesuré par rapport à l'axe de la fibre, Figure I.2. L'ouverture numérique d'une fibre optique est égale à :

$$ON = \sin \theta = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

n_c : indice de cœur

n_g : indice de gain

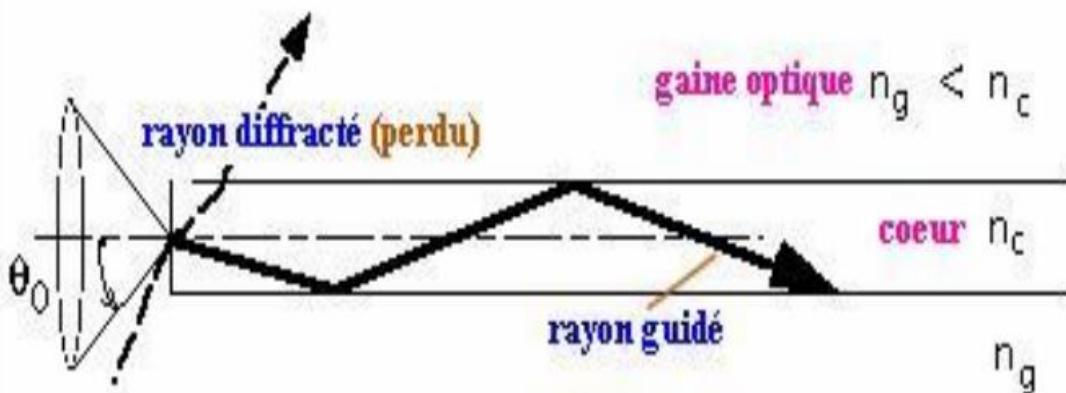


Figure I.2 : Ouverture numérique.

IV. Présentation de la chaîne de transmission par fibre optique :

La liaison optique est basée sur trois blocs fondamentaux pour assurer le transfert des données, elle est constituée d'un émetteur optique qui sert à envoyer des données (signal électrique) par le câble optique et les convertis à un signal optique qui se propage avec une certaine atténuation et dispersion, à la fin, au niveau du récepteur optique, le signal propagé sera converti en un signal électrique avec une diminution des pertes de donnée (figure 1.3)[8].

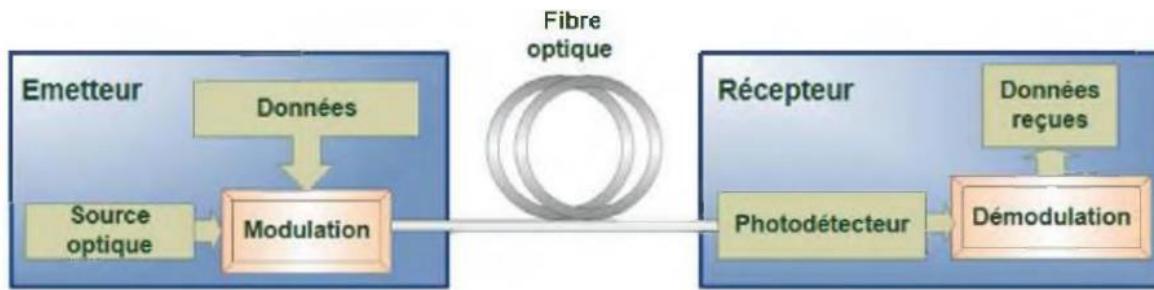


Figure I.3 : Schéma explicatif d'un système de transmission optique.

V. Bloc d'émission :

Ce bloc est constitué d'un ensemble de composant optoélectronique qui assure la conversion d'un signal électrique en un signal optique, ces composantes essentielles sont des sources optiques (LED et LASER) ainsi que des modulateurs optiques.

V.1. Source optique :

Une liaison optique contient deux sources optiques tel que, la diode électroluminescente LED (Light Emitting diodes) souvent utilisée dans les fibres optiques multimode pour but de délivrer une puissance optique à une centaine mW et un débit allant jusqu'à 5Mbits/s et elle présente un spectre d'émission assez large ainsi la diode LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) qui a pour but de délivrer une puissance et une bande passante très importante elle présente un spectre d'une faible largeur [9] [10]

V.2. Technique de modulation :

Pour envoyer le signal électrique, il faut premièrement le convertir en un signal optique afin de l'imprimer sur le signal lumineux pour le transmettre dans un système numérique optique, c'est ce qu'on appelle une modulation. Cette dernière est composée d'une modulation directe qui sert à moduler le signal électrique à travers la diode laser à un signal optique (figure 1.2.a) d'une certaine puissance délivrer elle est facile à réalisé avec un coût réduit ainsi une modulation externe qui est la méthode la plus connue dans les liaisons optiques à haut débit sur des longues distances, cette modulation sert à moduler le signal lumineux obtenu à la sortie du laser à un signal optique (figure I.4) qui subit des dégradations elle as une bande passante plus élevée. Pour les longues distances ou les puissances sont très faible et la qualité du signal diminue on doit injecter un amplificateur pour une bonne transmission [10].

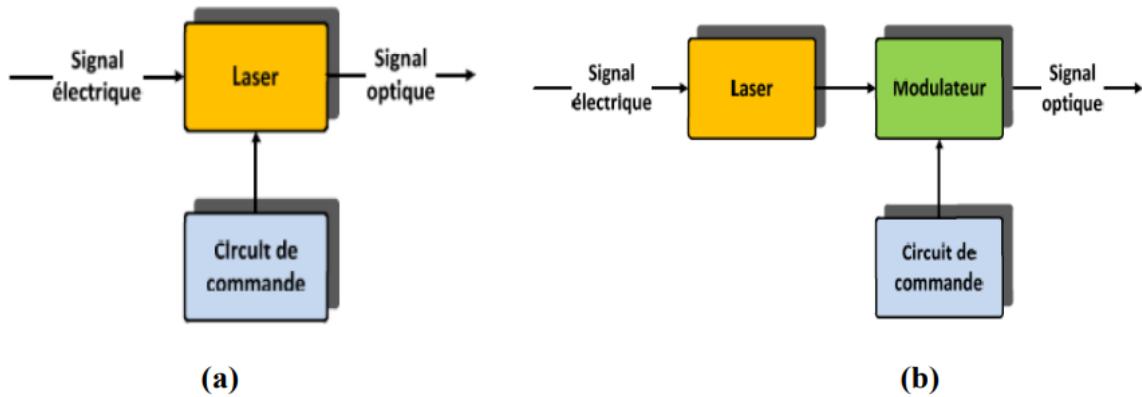


Figure I.4 : Schéma de la modulation a : directe et b : externe.

VI. Techniques de multiplexage :

Le développement des services multimédias qui demande des débits élevés pour répondre aux besoins des utilisateurs, le traitement électronique d'information à l'émission et à la réception impose des limitations en termes de débit. Pour cela les chercheurs permettent de distinguer plusieurs techniques de multiplexage pour les réseaux FH de transmission des signaux, La technique TDMA (Time Division Multiple Access) est basée sur la répartition des ressources dans le temps, elle permet aux utilisateurs de transmettre plusieurs informations sur un même canal mais avec différents intervalles de temps « time slot » qui ont été allouées, à la réception, il suffit d'effectuer l'opération de démultiplexage pour récupérer les données; La technique FDMA (Frequency Division Multiple Access) consiste à découper la bande fréquentielle et attribuée chacune à un utilisateur, à la réception sur la bande de fréquence on trouve un filtre sélectif qui permet de récupérer les données, et la technique CDMA (Code Division Multiple Access) permet une transmission des données simultanément sur la même bande de fréquence son principe est d'attribuer à chaque utilisateur un code associé qui lui permet de le distinguer à la réception et l'accès à la totalité de la bande [8] [10]. Ces techniques de multiplexage sont aussi adaptées au canal optique, on distingue ainsi :

VI.1. La technique OTDMA :

L'OTDMA (Optical Time Division Multiple Access) est basée sur un multiplexage temporel purement optique utilisé pour les systèmes électroniques dont les débits de transmission sont limités à 10 Gb/s, au début des années 90 elle est développée dans le but de dépasser cette limite et approché des débits de Térabit/s. À l'émission, elle est constituée d'une source laser qui produit des impulsions très courtes appliquées à l'entrée d'un ensemble de modulateurs

Chapitre 1 : Généralité sur la chaîne de transmission

assurant la modulation de la lumière par les données des utilisateurs suivie d'un système de ligne à retard et d'un multiplexage optique avant la transmission dans la fibre [8].

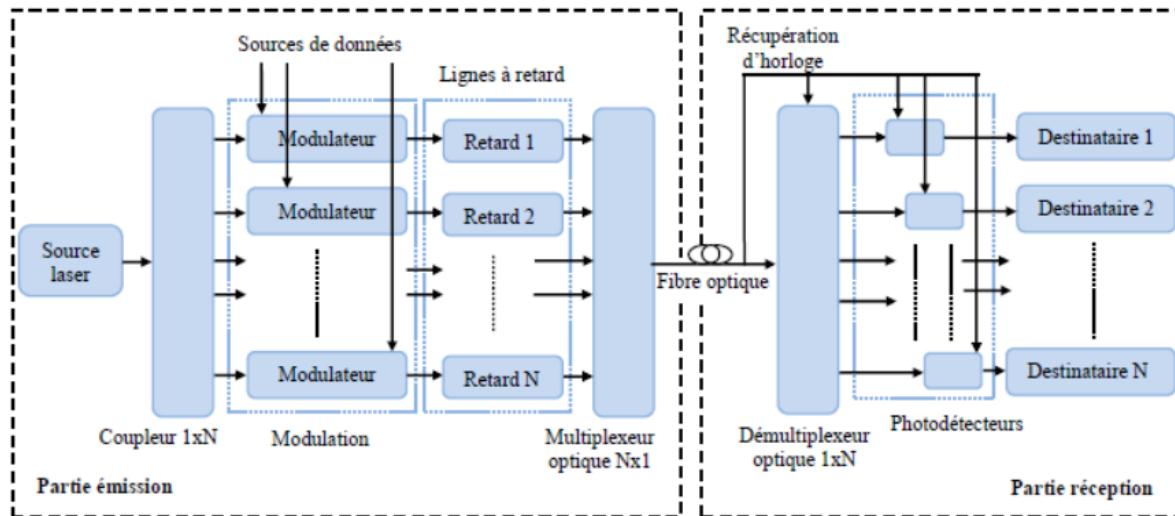


Figure I.5 : Système d'émission et de réception dans la technique OTDMA.

VI.2. La technique OFDMA :

L'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une technique de multiplexage ayant pour objectif de répartir sur un grand nombre de sous-porteuse les données numériques que l'on veut transmettre tel qu'on voit sur la figure(I.6) [8]

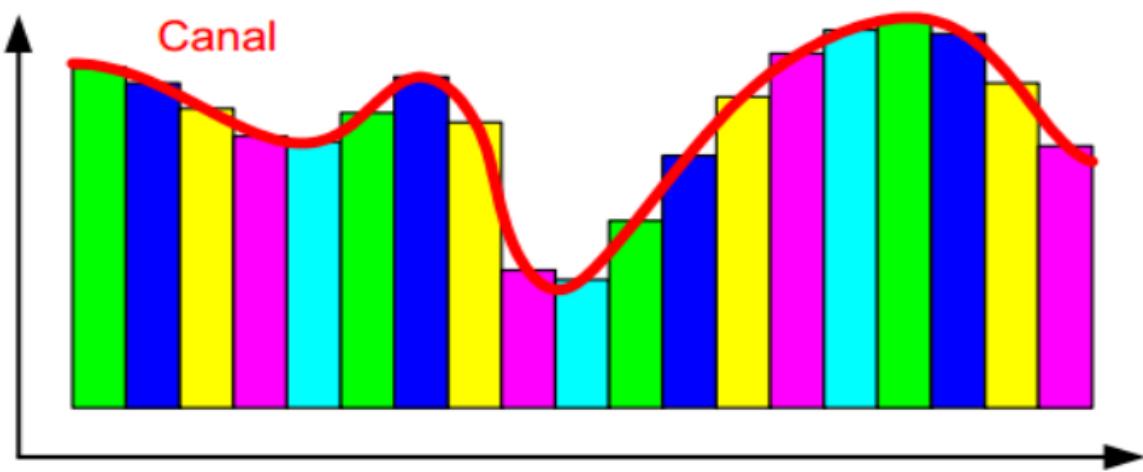


Figure I.6 : Répartition fréquentielle des porteuses (OFDMA).

VI.3. La technique WDMA :

WDM (Wavelength Division Multiple Access) est équivalent au système FDMA, utilisé dans les réseaux étendus WAN (Wide Access Networks) et les réseaux MAN (Metropolitan Access Networks) basé sur le multiplexage en longueur d'onde produit en optique. Dans cette technique chaque utilisateur occupe des longueurs d'ondes différentes. Les signaux optiques émis par les sources sont appliqués à l'entrée des modulateurs optiques qui permettent de les modulés par les données. En sortie des modulateurs les signaux sont multiplexés et transmis simultanément dans la même fibre optique à la réception, les signaux reçus sont démultiplexés pour les envoyés à chaque destinataire (figure I.7) [8].

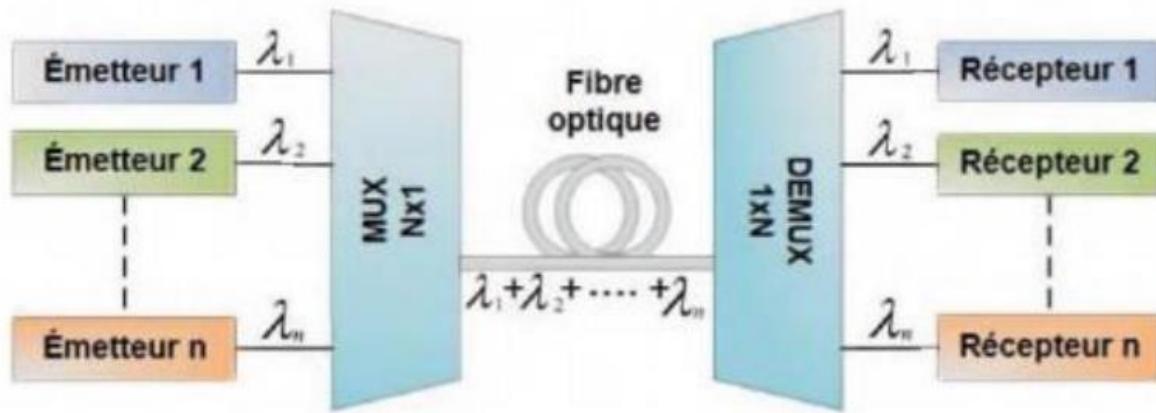


Figure I.7: schéma d'un multiplexage en longueur d'onde WDM.

VI.4. La technique OCDMA :

L'OCDMA est basée sur les concepts du CDMA radiofréquence où les différents utilisateurs partagent le même canal optique et que chacun à son propre code et sa propre séquence d'étalement. La réalisation CDMA optique est totalement différente du CDMA radio car elles sont entre deux milieux de propagation différents. [11].

VI.5. La technique SDM :

SDM (Spatial Division Multiplexing) est considérée comme une dernière évolution dans la transmission par fibre optique, elle a pour but d'augmenter la capacité du système de transmission et faciliter son amplification dans les réseaux centraux pour un moindre prix, tous les paramètres pour une bonne transmission optique sont étudiés dans cette technique comme la phase, la polarisation, la fréquence... [12].

VII. Canal de transmission dans les liaisons optiques :

Le canal de transmission est la partie la plus essentielle, qui est un fil en verre ou en plastique de forme cylindrique, constitué d'une couche centrale d'indice de réfraction n_1 entourée d'une autre d'indice n_2 appelé respectivement cœur/gaine, tel que $n_1 > n_2$, l'ensemble est entouré par un revêtement [9].

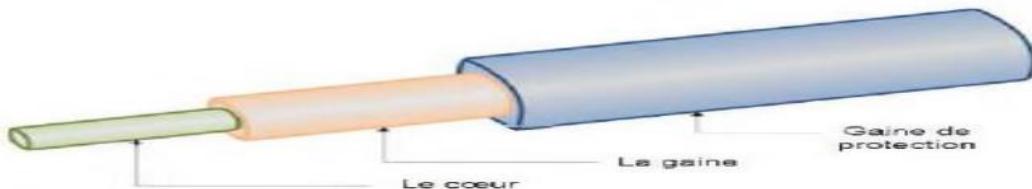


Figure I.8: Schéma d'un câble à fibre optique.

Ce moyen de transmission peut être classifié en 2 catégories : multimode et monomode, la première est moins coûteuse, utilisée dans des liaisons de courte distance, elle utilise la diode électro-luminissante (LED) comme émetteur optique, ce type de fibre est caractérisé par la propagation de plusieurs modes le long de la fibre, si ces derniers arrivent au même temps on parle d'une fibre multimode à gradient d'indice, sinon on dit que la fibre est à saut d'indice. La deuxième catégorie (fibre monomode) est utilisée par des opérateurs de télécommunication pour des longues et très longues distances car elle est caractérisée par un diamètre du cœur très faible, d'une façon à permettre uniquement la propagation du rayonnement central, en utilisant généralement la diode laser comme émetteur électro-optique, donc ce type de fibre est plus cher, car elle est caractérisé par une bande passante très élevée et un phénomène d'atténuation très faible [13].

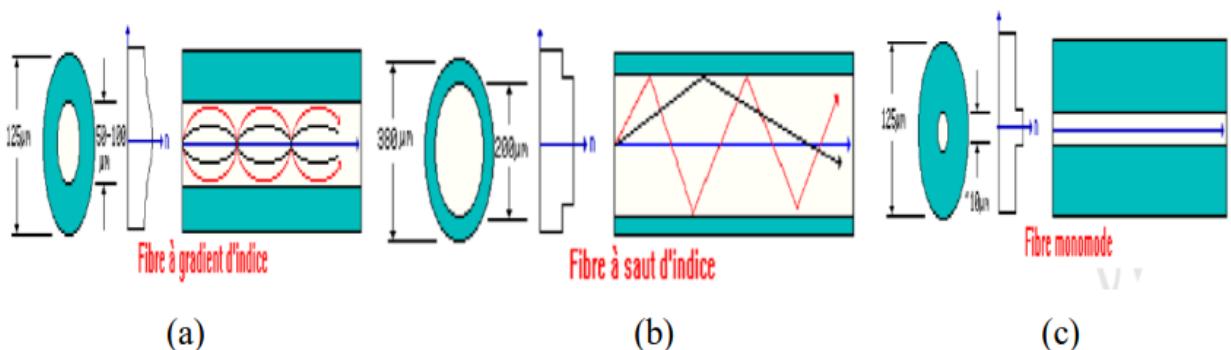


Figure I.9: Schéma des fibres optiques a : multimode à gradient d'indice, b : multimode à saut d'indice et c : monomode

Chapitre 1 : Généralité sur la chaîne de transmission

Malgré les performances de ces fibres optiques, les signaux qui les traversent subissent des perturbations lors de la propagation. Les différents types de pertes sont liés à des effets linéaires ou non linéaires. Les effets linéaires englobent les phénomènes d'atténuation et de dispersion qui se présente comme suit :

VII.1. Atténuation :

L'atténuation dans la fibre optique dépend de la nature de cette dernière (monomode ou multimode), elle influe sur la puissance du signal transmis et traduit son affaiblissement et sa diminution au cours de sa propagation due aux phénomènes d'absorption [14].

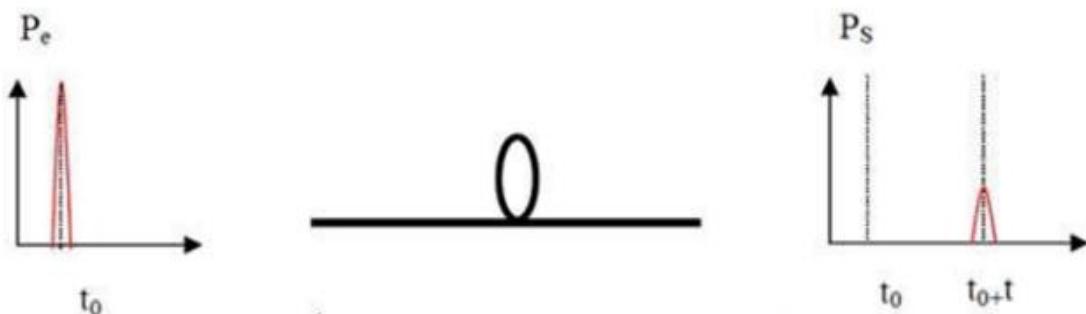


Figure I.10: l'effet de l'atténuation.

VII.2. Dispersion modale (intermodale) :

Ce type de dispersion est dû à la différence des distances parcourue par les différents modes (signaux) et la différence des vitesses de ces derniers. Ce phénomène existe dans les fibres multimode à saut d'indice, contrairement aux fibres multimode à gradient d'indice qu'il a éliminé car dans ce type de fibre les rayons (mode) proches de l'axe principal de la fibre se propagent avec une faible vitesse et ce qui sont loin de l'axe sont accélérés d'une façon à permettre à tous les modes d'arriver au même temps à la sortie de la fibre [14].

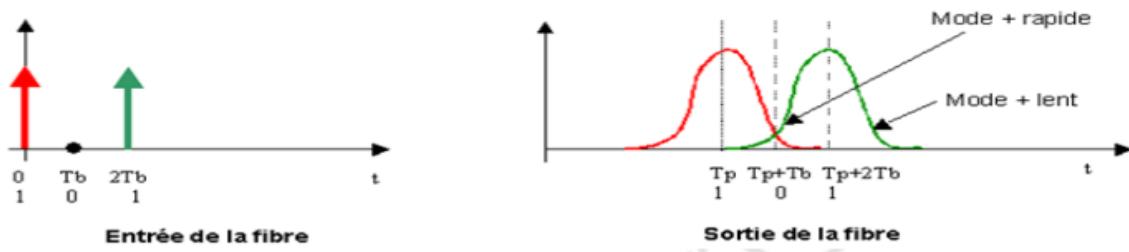


Figure I.11: le phénomène de dispersion intermodale.

VII.3. Dispersion chromatique (intra modale) :

Elle concerne les fibres monomodes que les multimodes, due principalement à l'émetteur car chaque source lumineuse présente un étalement spectrale non nul, dans le cas d'un élargissement important, les différentes longueurs d'onde émises par la source vont se propager le long de la fibre avec des durées différentes provoquant ainsi une dispersion [14]. La dispersion totale est la somme des dispersions due au matériau causée par le fait que l'indice de réfraction du verre n'est pas le même pour toutes les longueurs d'onde et la dispersion du guide d'onde qui est lié à la contribution de la géométrie du guidage de la fibre [13] [15]

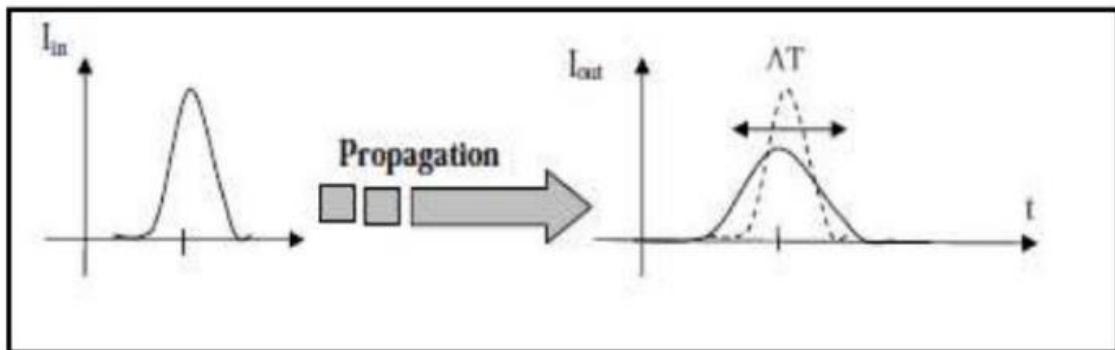


Figure I.12: dispersion chromatique.

Il existe aussi des effets non-linéaires qui sont des effets parasites qui dégradent les performances quand les puissances véhiculées deviennent élevées, parmi ces effets en retrouve l'effet de Kerr qui consiste à la variation (augmentation) de l'indice de réfraction du matériau en fonction de l'intensité du signal optique, l'effet de RAMAN qui est l'effet le plus connu des effets non linéaire, il s'agit de l'échange d'énergie entre l'onde optique et les vibrations du matériau, ce phénomène apparaît lorsque la puissance optique dépasse un certain seuil [16].

VIII. Bloc de réception :

Le bloc de réception est le module finale d'une liaison optique, il consiste à transformer le signal optique reçu en un signal électrique, afin d'extraire l'information envoyée grâce à des photos détecteurs, généralement la photodiode PIN est la plus utiliser.

VIII.1. La photodiode PIN :

Pour obtenir un photondéTECTeur plus efficace il faut une combinaison électrons-trous, où les photons sont absorbés dans une couche I sans aucune lumière ainsi les couches traversée par la lumière P ou N soient avec une épaisseur faible. La photodiode PIN est réalisée en trois parties de semi-conducteur, la couche I à grande résistivité est placée entre deux couches fortes N et P afin que les photons incidents sont absorbés seulement par la couche I [16].

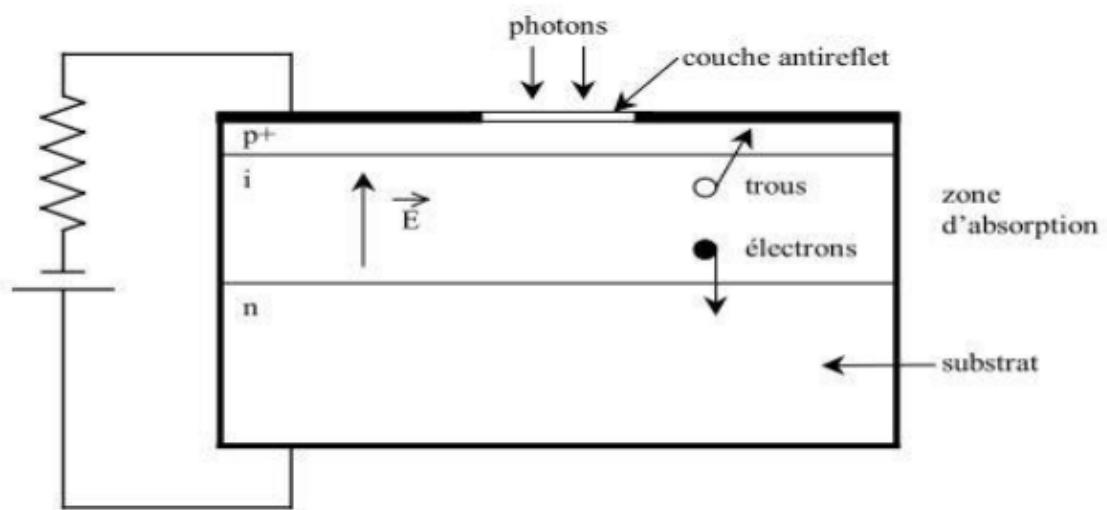


Figure I.13: Structure d'une photodiode PIN.

VIII.2. La photodiode avalanche APD:

La photodiode APD est une photodiode PIN où en réalisant une amplification de puissance, qui permet d'extraire un signal électrique fort même pour une puissance lumineuse faible. Les photodiodes à avalanche sont meilleures grâce à leurs performances, leurs gains importants et leurs temps de réponse, mais elles sont plus coûteuses et difficiles à utiliser [17].

IX. Fibre optique :

IX.1 Définition :

Les câbles à fibres optiques sont une technologie de pointe utilisée pour transmettre des informations sous forme d'impulsions lumineuses à travers des brins de fibre de verre ou de plastique. Contrairement aux lignes de communication métalliques traditionnelles, les câbles à fibres optiques offrent une bande passante plus élevée, leur permettant de transporter

Chapitre 1 : Généralité sur la chaîne de transmission

davantage de données. Leurs propriétés uniques ont conduit à leur utilisation intensive dans les télécommunications, les réseaux informatiques et diverses autres industries.

IX.2 La structure des câbles à fibres optiques :

Un câble à fibre optique se compose de plusieurs parties. En son cœur se trouve la fibre optique, qui transporte les signaux lumineux. Autour de ce noyau se trouve la couche de revêtement qui réfléchit la lumière vers le noyau, empêchant ainsi la perte de signal et permettant à la lumière de parcourir de grandes distances. Autour de ces couches se trouvent des gaines et des vestes de protection,

X. Composition de la fibre optique :

Pour composer une fibre, il est nécessaire d'avoir des matériaux avec la plus faible atténuation possible et de bonnes propriétés mécaniques. Il existe donc : [18]

X.1. Les verres : qui possèdent de bonnes propriétés mécaniques, mais de trop grandes atténuations (de 40 à 50 dB par km). Ainsi, elles sont utilisées plutôt sur de courtes distances (en HI-FI par exemple).

X.2. Les liquides : ils sont des atténuations très faibles. On peut rencontrer des fibres à "curliquide" constituées par des liquides tels que l'hexachlorobutadiène ou encore le tetrachloroéthylène.

X.3. Le plastique : dont les avantages sont le prix et la facilité de pose. Les fibres en plastique sont utilisées surtout dans les réseaux locaux et dans le matériel grand public.

X.4. La silice : qui présente une absorption extrêmement faible pour les longueurs d'onde courantes, mais ses propriétés mécaniques sont médiocres. C'est avec cette sorte de fibre que l'on obtient les meilleurs résultats.

La silice est un composé oxygéné du silicium, de formule $Si_{2}O_{5}$ [19], présent dans un grand nombre de minéraux, tels que le quartz, la calcédoine et l'opale. La silice est un matériau dispersif, c'est à dire que son indice de réfraction dépend de la longueur d'onde.

XI. Types de câbles à fibre optique :

Il existe deux principaux types de câbles à fibres optiques : monomode et multimode. Fibre monomode les câbles optiques ont un petit diamètre d'âme, permettant à la lumière de

Chapitre 1 : Généralité sur la chaîne de transmission

voyer sur un seul chemin, ce qui les rend idéaux pour les transmissions longue distance. D'un autre côté, les câbles à fibres optiques multimodes ont un noyau plus grand, permettant à la lumière de voyager selon plusieurs chemins. Cela les rend adaptés aux transmissions sur de courtes distances.

XI.1 Fibre optique multimode :

Les fibres multimodes ont été les premiers sur le marché, ils ont un cœur de diamètre plus important que les fibres monomodes. Le gros diamètre du cœur de la fibre empêche la bonne direction du rayon lumineux ce qui cause la réfraction du rayon lumineux sous plusieurs angles d'incidences. Cette fibre fut l'une des premières réalisations. Cette dernière classe de fibres à donner naissance à deux familles distinctes [19]. Les fibres à saut d'indice présentent une discontinuité de l'indice à l'interface cœur-gaine, alors que pour les fibres à gradient d'indice la variation d'indice est continue de l'indice de cœur à l'indice de gaine

XI.2 Fibre optique monomode

Les fibres monomodes sont généralement des fibres à saut d'indice et à petit cœur, dans lesquelles un seul mode de propagation est possible, ce qui permet un bon guidage du rayon lumineux et empêche les réflexions abusives et permet une bonne transmission dans la fibre. C'est ce type de fibre que l'on utilise pour des transmissions de données rapides et sur de grandes distances [20], [21]. (La Figure I.14) est une représentation schématique de ces trois types de fibre.

Profil d'indice

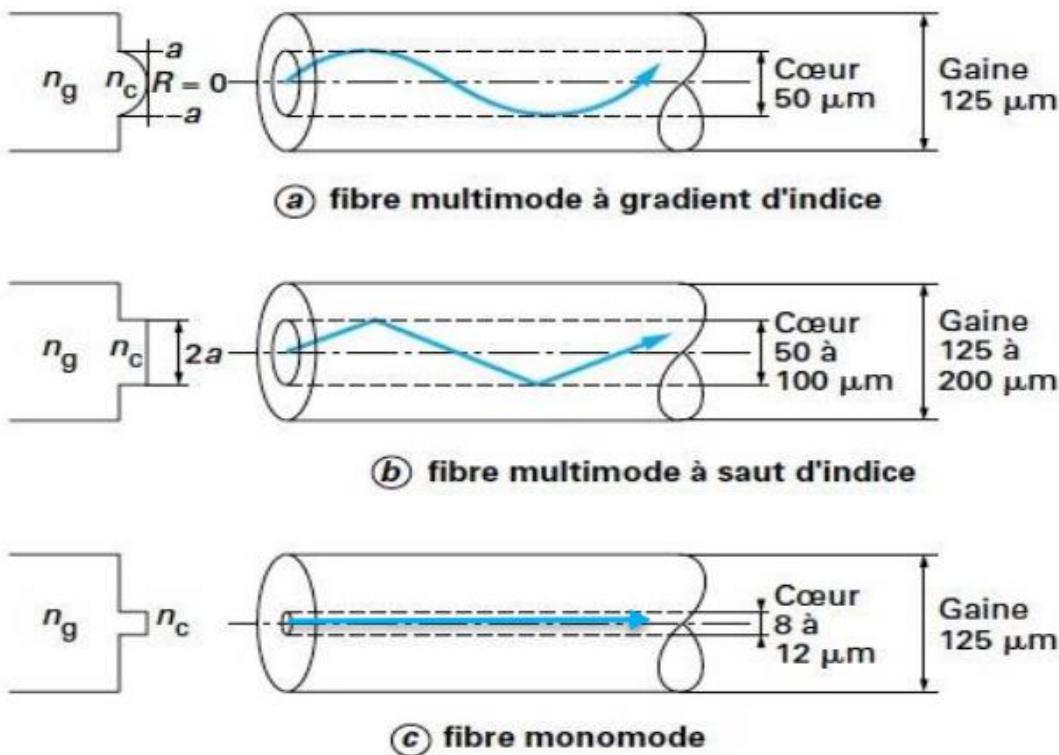


Figure I.14 : Profil de l'indice de réfraction pour les trois types de fibres optiques conventionnelles (fibre multimode à saut d'indice, fibre multimode à gradient d'indice et fibre monomode à saut d'indice).

XII. Comparaison entre les différents types de fibres optiques

Le tableau I.1 présente un récapitulatif comparatif des avantages, des inconvénients et de l'application pratique entre les différents types de fibres optiques.

Structures	Avantages	Inconvénients	Applications pratiques
Multimode à saut d'indice (SI)	Grande ouverture numérique, connexion facile, faible prix, facilité de mise en œuvre	Pertes, dispersion et distorsion, élevées du signal	Communications courtes distances, réseaux locaux
Multimode à gradient d'indice (GI)	Bande passante raisonnable et bonne qualité de transmission	Difficile à mettre en œuvre	Communications courtes et moyennes distances
Monomode	Bande passante très grande, atténuation très faible, faible dispersion	Prix très élevé	Communications longues distances

Tableau I.1 : Comparaison entre les différents types de fibre optiques.

Chapitre 1 : Généralité sur la chaîne de transmission

XX. Les applications des fibres optiques :

Les fibres optiques trouvent plusieurs domaines d'applications telles que les télécommunications, les applications militaires, la médecine, calcul de la distance, etc...

XX.1 Les télécommunications :

De nos jours il faut que les informations se propagent très vite. Pour cela ces dernières sont envoyées par les réseaux qui permettent de mettre en relation un grand nombre de personnes. La communication et l'échange important d'informations sont possibles grâce aux réseaux. De plus en plus, ces réseaux utilisent comme moyen de transmission la fibre optique ; son utilisation permet la réception et l'émission de données de manière très rapide et avec une plus grande sûreté de transmission. En téléphonie, les câbles coaxiaux sont remplacés peu à peu par des fibres optiques. En effet, la fibre optique est plus économique sur longues distances et le nombre de composants est moins important. La fibre optique a également été retenue dans ce domaine, car sur de longues distances, son affaiblissement faible évite des répéteurs supplémentaires, à la différence du coaxial et des liaisons hertziennes. Le premier réseau urbain en fibre optique date de 1980 à Paris, entre deux centrales téléphoniques. Les premières commandes ont été passées en 1982 et le début des réalisations massives remonte à 1983. L'utilisation des fibres monomodes débute en 1987. Actuellement trois quarts des fibres sont installés en région parisienne entre des centres téléphoniques. Elles fonctionnent sans répéteurs à 34 Mbits/s. Fin 1988, 150000 km de fibres optiques étaient en service et 300000 km étaient commandés.

XX.2 Les réseaux sous-marins :

Pour répondre à l'explosion de la demande de réseaux de télécommunication à forte capacité, des milliers de kilomètres de câbles sous-marins à fibres optiques sont posés au fond des mers partout dans le monde.

La demande de réseaux large bande (transmission de données à grande vitesse) atteint aujourd'hui, à l'échelle mondiale, une ampleur sans précédent sous l'effet de deux facteurs : d'une part, la croissance inexorable de l'Internet et d'autre part, la poursuite de la déréglementation des marchés des télécoms.

Le boom de la demande liée au Web a été particulièrement remarquable. En 1998, pour la première fois, le trafic de données à travers l'Atlantique et le Pacifique a été plus important que le trafic téléphonique.

Chapitre 1 : Généralité sur la chaîne de transmission

La libéralisation des marchés des télécommunications a suscité l'émergence de plus de 4000 nouveaux opérateurs dans le monde qui ont chacun pour objectif d'offrir à leurs clients une capacité de transmission peu coûteuse et de qualité.

Les réseaux sous-marins offrent les capacités et les débits requis pour transporter le volume de données générées par l'Internet. Certains groupes sont capables d'offrir des solutions intégrées qui associent les réseaux sous-marins aux systèmes terrestres, radio et satellitaires.

XX.3 Applications militaires :

Son utilisation est également intéressante pour les militaires car elle propose de nombreux avantages comme son faible poids, sa faible taille, et son insensibilité au brouillage et à la détection. Une nouvelle application vient d'être inventée à savoir le missile à fibre optique : Le Polyphème. C'est un missile qui file à plus de 500 km/h, dévidant derrière lui une bobine de fibre optique qui le relie au poste de tir, et qui permet de le guider jusqu'à sa cible via un opérateur agissant grâce à une caméra embarquée. La fibre optique, d'un diamètre de quelques microns, flotte au gré du vent sur plusieurs dizaines de kilomètres. Comme l'explique son "inventeur", Alain Rageot, chef de projet pour la bobine de fibre, "dans les situations de guerres modernes, les dispositifs de brouillage et certaines radiations électromagnétiques empêchent les guidages par télécommunications hertziennes, de plus, celles-ci sont limitées par le relief environnant. D'où l'idée de mettre un fil à la patte du missile pour contrôler son vol jusqu'à l'impact".

Sur le marché très pointu des missiles (estimé à 10000 unités), outre les capacités technologiques, le prix est un facteur décisif. Lorsqu'un hélicoptère attaque un objectif au canon ou à la roquette il est vulnérable aux défenses anti-aériennes de l'adversaire. Plutôt que de risquer la vie de l'équipage et l'appareil, il est préférable de tirer un missile depuis un véhicule lanceur qui peut rester à plusieurs dizaines de kilomètres de la menace.

Toute la difficulté réside dans la maîtrise du dévidage à grande vitesse avec transmission optique en continu. Il a fallu quelques 400 tests, la plupart en simulation de vol, pour parvenir à une solution satisfaisante.

XX.4 Applications diverses :

La fibre optique est utilisée dans le domaine de la médecine pour filmer des endroits sensibles ou inaccessibles du corps humain, du fait de la réalisation de caméra et de câbles de très petite taille. Avec de la fibre optique on peut calculer la distance d'un objet par rapport à

Chapitre 1 : Généralité sur la chaîne de transmission

un autre, des vitesses de rotation et des vibrations. Mais tous ces petits systèmes sont plus précis que les autres systèmes de même utilité mais utilisant d'autre technologie de détection.

Pour finir, on peut citer une utilisation qui n'offre aucune utilité à part celle de l'esthétique et de la décoration, ce sont les « fleurs » en fibres optiques dont leurs extrémités brillent de toutes les couleurs.

XXX. Les avantages et les inconvénients de la fibre optique :

Les fibres optiques présentent plusieurs avantages comme elles présentent aussi des inconvénients.

XXX.1 Les avantages :

Les fibres optiques présentent donc plusieurs avantages sur leur homologue le cuivre. Nous pouvons débuter la longue liste en nommant évidemment la vitesse ; comme nous l'avons amplement expliqué, la lumière qui voyage dans la fibre se propage à près de 300000 km/s, ce qui crée une vitesse de transmission relativement instantanée. La seule restriction sur la vitesse se trouvant être la dispersion. La rapidité des fibres reste incontestablement plus grande que celle des fils de cuivre. Le deuxième grand avantage des fibres est la légèreté des matériaux utilisés pour leur conception. Un câble optique pèse beaucoup moins qu'un câble de cuivre. Ceci, en conjonction avec le type des matériaux utilisés, rend l'utilisation et la manipulation des fibres optiques énormément plus faciles et avantageuses.

De plus, cette légèreté ne signifie pas nécessairement la fragilité. La gaine protectrice du câble accomplit très bien sa tâche en rendant ce moyen de communication très rigide et très peu corrosif. Par exemple un câble optique de 62.5 micromètres peut soutenir une charge de près de 150 livres.

Il a aussi été observé plusieurs fois que la fibre optique est plus rentable à long terme que le fil de cuivre. La manutention est beaucoup moins nécessaire ce qui donne la possibilité d'établir un réseau plus fiable, plus rentable, et surtout, plus efficace.

Un troisième avantage majeur est que le signal qui voyage dans la fibre est insensible aux champs magnétiques ou divers bruits pouvant créer une distorsion sur les signaux voyageant dans des fils de cuivres. Nous venons de citer les avantages de la fibre optique par rapport aux moyens de transmission usuels, examinons maintenant les inconvénients que la fibre comporte

Chapitre 1 : Généralité sur la chaîne de transmission

XXX.2 Les inconvénients :

Par contre, il reste deux problèmes majeurs que les fibres optiques ne règlent pas, bien qu'elles aident à les diminuer grandement. Premièrement, il y a ce qu'on appelle l'atténuation, ou la perte de force du signal lumineux. Les ondes voyageant sous forme de flux dans une fibre ne sont pas toutes alignées et parallèles ; elles ont toutes une même direction générale, mais n'ont pas toutes le même parcours.

Ceci fait que chaque onde ne se reflète pas au même moment et qu'il peut donc arriver que, à la suite de plis ou de virages dans le câble, une certaine quantité d'ondes lumineuses, ayant dépassé l'angle critique, soit perdue. La force du signal final est moindre que celle du signal initial dû à la perte de certaines ondes lumineuses.

Pour une fibre optique commerciale, l'atténuation est calculée en décibels par kilomètre (dB/km), soit la quantité de décibels perdus au cours d'un kilomètre, et peut varier de 0,5 dB/km jusqu'à 1000 dB/km pour un câble à noyau large.

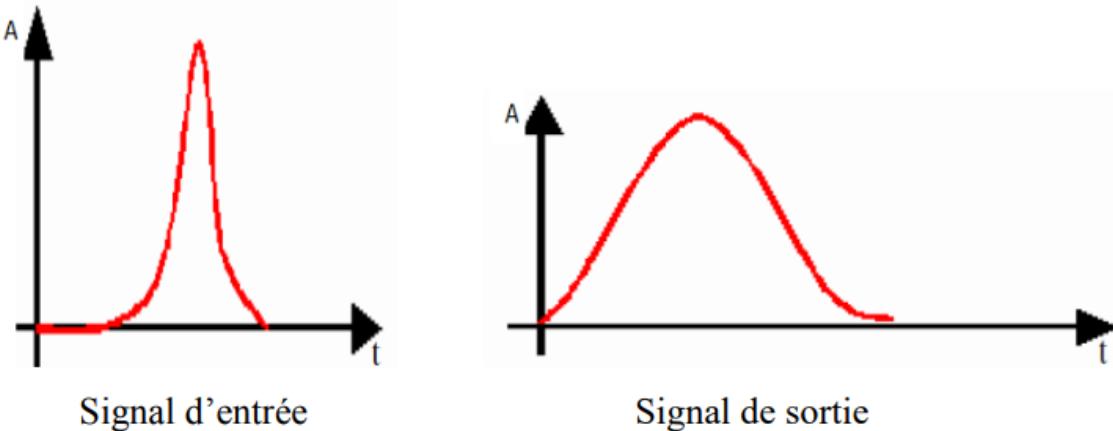
Le deuxième problème majeur découlant aussi du non parallélisme des ondes est la dispersion. Si une onde voyage en zigzag, rebondissant d'un côté à l'autre du noyau, elle parcourt beaucoup plus de distance qu'une onde voyageant en ligne droite. En faisant un plus long parcourt pour la même vitesse de propagation, elle prend du retard sur celle qui voyage en ligne droite.

Ceci crée le phénomène d'allongement du signal, ou de dispersion dans le temps. Dans le cas où un deuxième signal serait émis trop rapidement derrière le premier, il pourrait se créer une superposition où le récepteur ne saurait plus différencier les deux signaux. On appelle largeur de spectre la fréquence maximale à laquelle on peut émettre des signaux successifs sans avoir de superposition.

Par contre, il est possible de réduire ce problème en réduisant le diamètre du noyau. Plus celui est petit, moins les ondes voyageant en zigzag prennent de retard sur les autres, et plus la largeur de spectre peut être grande.

XL. Propriétés linéaires des fibres optiques :

Deux phénomènes distincts participent à la dégradation d'une impulsion lumineuse lors de sa propagation dans une fibre (Figure I.15). D'une part, son amplitude décroît (pertes), d'autre part, l'impulsion s'étale (dispersion) : au fur et à mesure qu'une impulsion se propage, elle est d'une part atténuée (pertes), d'autre part élargie.



XL.1 Pertes dans les fibres optiques :

De nombreux phénomènes participent à l'atténuation du signal lors de sa propagation. Certains sont liés au matériau et à sa « qualité » (absorption, diffusion) d'autres sont liés à des « fuites » du champ électromagnétique hors de la fibre.

XL.1.1 Atténuation :

L'atténuation caractérise l'affaiblissement du signal au cours de la propagation. Soient $P(0)$ et $P(L)$ les puissances à l'entrée et à la sortie d'une fibre optique de longueur L . L'atténuation linéaire se traduit alors par une décroissance exponentielle de la puissance en fonction de la longueur de fibre (loi de Beer-Lambert) :

$$P(L) = P(0)e^{-\alpha L}$$

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln \frac{P(0)}{P(L)} \text{ (1 /Km)}$$

Où α est le coefficient d'atténuation linéaire. On utilise souvent le coefficient α_{dB} exprimé en dB/km et relié à α par:

$$\alpha_{dB} = 4.343 \text{ Km}^{-1}$$

Le principal atout des fibres optiques est une atténuation extrêmement faible. L'atténuation va varier suivant la longueur d'onde. La diffusion Rayleigh limite ainsi les performances dans le domaine des courtes longueurs d'onde (domaine du visible et du proche ultraviolet). Un pic d'absorption, dû à la présence de radicaux OH dans la silice, pourra également être observé

Chapitre 1 : Généralité sur la chaîne de transmission

autour de 1 385 nm [22]. Les progrès les plus récents dans les techniques de fabrication permettent de réduire ce pic.

Les fibres en silice connaissent un minimum d'atténuation vers 1 550 nm. Cette longueur d'onde du proche infrarouge sera donc privilégiée pour les communications optiques. De nos jours, la maîtrise des procédés de fabrication permet d'atteindre couramment une atténuation aussi faible que 0,2 dB/km à 1 550 nm : après 100 km de propagation, il restera donc encore 1 % de la puissance initialement injectée dans la fibre, ce qui peut être suffisant pour une détection. Si l'on désire transmettre l'information sur des milliers de kilomètres, il faudra avoir recours à une réamplification périodique du signal, le plus généralement par l'intermédiaire d'amplificateurs optiques qui allient simplicité et fiabilité

XL.1.2 Absorption :

Sous l'influence d'un photon d'énergie suffisante, un électron peut être porté à un niveau d'énergie supérieur à celui où il se trouvait. Une partie de l'énergie du rayonnement incident est ainsi absorbée par le matériau. (Conversion d'énergie optique en énergie thermique).

XL.1.2.1 L'absorption intrinsèque :

L'absorption intrinsèque est due au matériau constituant la fibre. On peut observer deux types d'absorption intrinsèque : les absorptions dues aux vibrations de liaisons et celles dues aux transitions électroniques

XL.1.2.2 Absorption extrinsèque :

Deux types d'absorption extrinsèque sont observés : les absorptions dues aux sels de métaux de transition et celles dues aux polluants organiques.

XL.1.3 Pertes par diffusion :

Ces pertes sont dues à la variation microscopique de la densité des matériaux. Cette variation va engendrer une variation de l'indice de réfraction et par la suite le chemin de faisceau lumineux ne reste pas de même et la lumière va être rediffuse où une partie de la puissance peut s'échapper hors le cœur. Il existe essentiellement deux processus de diffusion élastique (sans changement de fréquence du rayonnement) participant aux pertes lors de la propagation dans une fibre optique : la diffusion Rayleigh et la diffusion de Mie.

XL.1.4 Pertes par rayonnement :

A partir du moment où on injecte la lumière dans le cône d'acceptante, la condition de réflexion totale à l'interface cœur-gaine est remplie et les modes devraient se propager sans « sortir » du cœur. Toutefois, lorsque la fibre est courbée, les conditions de guidage changent et certains modes peuvent ne plus être en condition de réflexion totale, ils sont alors réfractés dans la gaine [23]. La présence de défauts géométriques à l'interface cœur-gaine (microcourbure et/ou macrocourbures) peut engendrer également « une fuite » des modes dans la gaine. L'étude de la courbure d'une fibre à saut d'indice a été réalisée par C. Vassale [24].

XL.1.5 Pertes par couplage :

Lors de l'injection dans la fibre optique l'intégralité du rayonnement incident ne rentre pas dans le cœur ou ne se propage pas dans la fibre. Trois principales raisons à cela : - Lors qu'il existe une discontinuité d'indice, une partie de la lumière est réfléchie (réflexion de Fresnel). L'intensité réfléchie est d'autant plus importante que la différence d'indice des deux milieux est grande. Pour des fibres en verre de chalcogénures As₂S₃, 17% de la lumière (en réflexion normale) est réfléchie à la surface du dioptre. Ce pourcentage augmente avec la valeur de l'angle d'incidence. Le même phénomène se reproduit en sortie de fibre lors du passage du cœur à l'espace libre. La qualité du couplage (quantité de lumière injectée dans la fibre) dépend donc très fortement de la qualité de la surface transverse de la fibre (clivage). - pour les fibres à petit cœur la dimension de la tache au point de focalisation des optiques de couplage peut être bien supérieure au diamètre du cœur de la fibre optique. Une partie de la lumière est alors injectée dans la gaine où elle peut se propager sur une certaine longueur (mode de gaine). - pour se propager dans la fibre optique, la lumière doit être injectée dans le cône d'acceptante, les rayons en dehors du cône d'acceptante « fuient » sont réfractés dans la gaine. Pour éviter ce problème, il faut adapter l'optique d'injection à l'ouverture numérique de la fibre. Là encore, la quantité de lumière injectée effectivement dans le cœur dépend de la qualité de la surface transverse de la fibre (clivage). Ces pertes ne dépendent pas de la qualité de la fibre, n'interviennent pas dans l'atténuation. Finalement dans une fibre optique, les différents types de pertes qui sont susceptibles d'exister sont représentés par le schéma de la Figure I.16 :

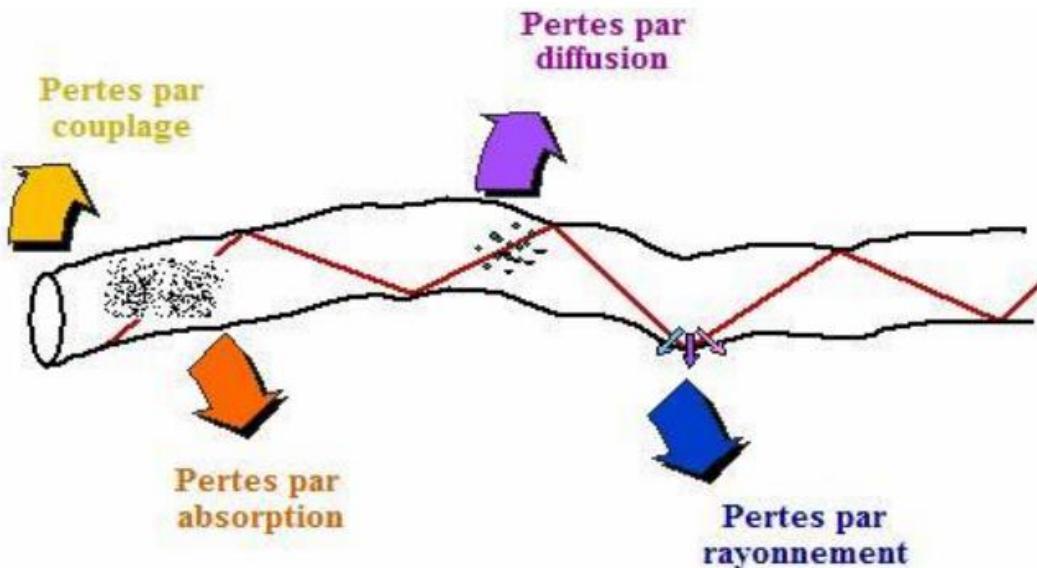


Figure I.16 : Schéma récapitulatif des différents types de pertes dans une fibre optique

XL.2 Dispersion chromatique :

Le phénomène de dispersion chromatique est lié à la dépendance de l'indice de réfraction linéaire du milieu n à la longueur d'onde. Ainsi une impulsion se propageant dans une fibre optique subira un étalement temporel plus ou moins important en fonction de sa longueur d'onde centrale et de sa largeur temporelle. La dispersion chromatique se manifeste donc par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation. La fibre se comporte comme un filtre passe-bas. Sa valeur peut donc être modifiée et contrôlée par l'introduction d'un dopage particulier ou, par une modification des paramètres optogéométriques du guide (Figure I.17).

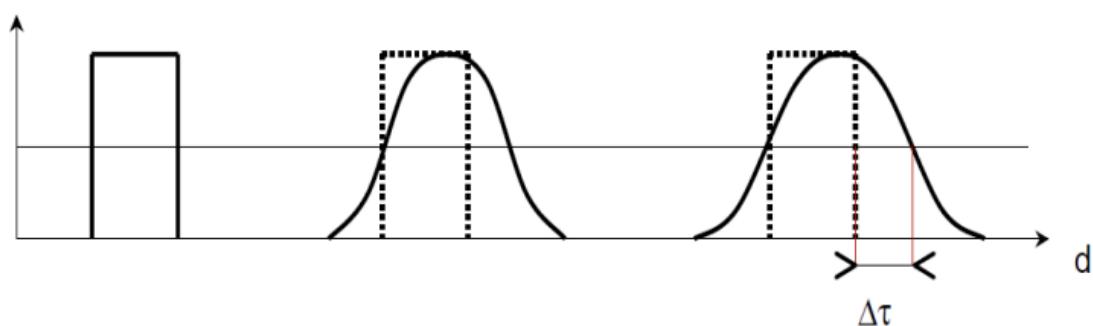


Figure I.17 : Effet de la dispersion chromatique.

Chapitre 1 : Généralité sur la chaîne de transmission

Une des causes de l'élargissement d'une impulsion est la dispersion intermodale. L'énergie lumineuse injectée à l'entrée de la fibre est répartie entre différents modes. Les différents modes se propagent dans le cœur avec la vitesse :

$$V_m = \frac{c}{n_1} \cdot \sin \theta_m$$

V_m : Composante suivant l'axe de propagation de la vitesse.

Mode le plus lent : $\theta = \theta_{lim}$, alors $V_{min} = \frac{c}{n_1} \cdot \sin \theta_{lim}$

Mode le plus rapide : $\theta = \frac{\pi}{2}$, alors $V_{max} = \frac{c}{n_1}$

Après un trajet d'une distance L , le décalage est : $\Delta\tau = \frac{L}{c} \frac{n_1(n_1-n_2)}{n_2}$

Où L est la distance de la trajectoire, c : la vitesse de la lumière dans le vide (3.10^8)

n_1 : indice de cœur et n_2 est l'indice du gain

La vitesse de propagation moyenne d'une impulsion est égale à la vitesse de groupe du mode fondamental. Le problème vient de ce que le temps de propagation de groupe varie avec la longueur d'onde. Or les sources de rayonnement lumineux ne sont pas rigoureusement monochromatiques.

XL.3. Dispersion d'une fibre monomode :

Dans le cas d'une fibre monomode, seule la dispersion chromatique est présente. Il y a deux causes à prendre en compte :

- l'indice qui varie en fonction de la longueur d'onde (dispersion matériau).
- la vitesse de groupe qui varie avec la longueur d'onde (dispersion guide d'onde).

Ces deux effets peuvent donc se compenser à certaines longueurs d'onde (Figure I.18). En ajustant la dispersion du guide (la dispersion matériau n'étant pas modifiable), on peut minimiser la dispersion totale à la longueur d'onde de travail.

Fibre à saut d'indice (diamètre de cœur = 4 μm) :

$$n_{\text{cœur}} = 1,46, n_{\text{gaine}} = 1,455$$

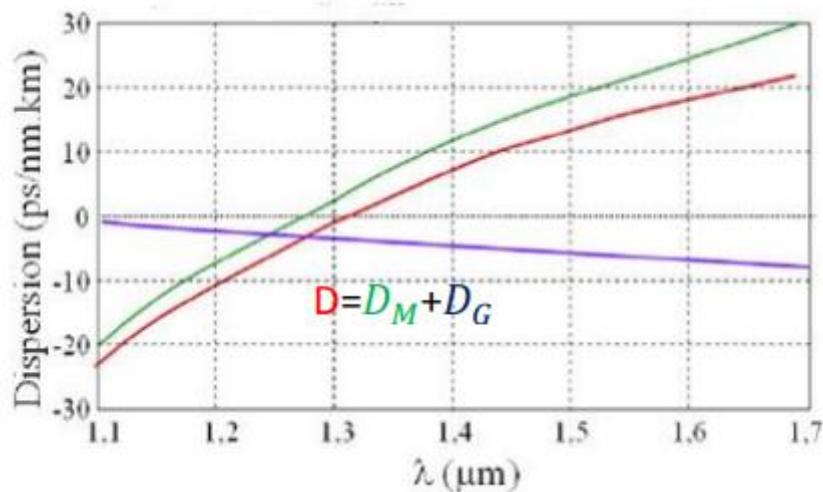


Figure I.18 : Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique totale d'une fibre silice monomode à saut d'indice.

Dans une fibre monomode, la dispersion totale est la somme algébrique de la dispersion du matériau et de la dispersion du guide.

Dans la littérature, la dispersion chromatique est souvent caractérisée par l'une des deux grandeurs β_2 ou D avec :

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2} \right)$$

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 (\text{Ps. nm}^{-1} \cdot \text{Km}^{-1})$$

Suivant le signe de D , on distingue deux régimes de fonctionnement différents :

1- Pour $D < 0$ ($\beta_2 > 0$) : la fibre présente une dispersion dite normale, les composantes hautes fréquences (décalées vers le bleu) d'une impulsion se déplacent plus lentement que les composantes basses fréquences (décalées vers le rouge).

2- Pour $D > 0$ ($\beta_2 < 0$) : la fibre présente une dispersion dite anormale, les composantes hautes fréquences (décalées vers le bleu) d'une impulsion se déplacent plus vite que les composantes basses fréquences (décalées vers le rouge).

Chapitre 1 : Généralité sur la chaîne de transmission

Pour limiter l'étalement temporel d'une impulsion lumineuse se propageant dans une fibre, deux solutions sont possibles.

- l'utilisation d'une fibre dont la dispersion est nulle à la longueur d'onde de l'impulsion. Pour la fibre représentée dans la Figure I.9 la dispersion chromatique de la fibre ne peut être annulée qu'à des longueurs d'onde supérieures à $1,27\mu\text{m}$.
- faire transiter l'impulsion allongée dans une fibre présentant une dispersion de signe opposé.

L. Conclusion :

Le premier chapitre de ce document offre une vue d'ensemble complète de la technologie de transmission par fibre optique, couvrant ses principes fondamentaux, ses composants essentiels, et les techniques utilisées pour optimiser les performances de la transmission. En retracant l'historique des fibres optiques, nous comprenons l'évolution de cette technologie, de ses débuts rudimentaires à sa place prépondérante dans les communications modernes.

Les sections sur les principes de fonctionnement et la chaîne de transmission décrivent en détail comment les fibres optiques permettent la propagation efficace de la lumière, assurant une communication rapide et fiable sur de longues distances. La présentation des composants tels que les émetteurs, les récepteurs, et les types de fibres (multimode et monomode) met en lumière les choix technologiques qui influencent la performance et l'application des systèmes de fibres optiques.

Les techniques de modulation et de multiplexage, y compris TDMA, FDMA, CDMA, et WDM, démontrent la sophistication et la flexibilité des réseaux optiques pour gérer des volumes de données toujours croissants et diversifiés. La description des perturbations, telles que l'atténuation et la dispersion, ainsi que des solutions pour les minimiser, souligne les défis techniques et les innovations nécessaires pour maintenir l'intégrité des transmissions optiques.

En intégrant des aspects comme la maintenance, la sécurité, et les considérations environnementales, le chapitre fournit une perspective holistique sur la gestion et l'optimisation des réseaux de fibres optiques. Les sections sur les normes et les protocoles de communication assurent que les lecteurs comprennent l'importance de l'interopérabilité et de la conformité aux standards internationaux pour la cohérence et la fiabilité des réseaux.

Enfin, en explorant les applications avancées et les tendances futures, le chapitre met en lumière le potentiel des fibres optiques à répondre aux besoins croissants en matière de

Chapitre 1 : Généralité sur la chaîne de transmission

communication à haut débit, d'internet des objets, et de technologies émergentes comme les réseaux quantiques et définis par logiciel.

Ainsi, ce chapitre établit une base solide pour comprendre les éléments critiques des systèmes de transmission par fibre optique, leur fonctionnement, leurs applications actuelles, et leur évolution future. Il prépare le lecteur à plonger plus profondément dans les aspects techniques et les innovations qui continueront de façonner le domaine des communications optiques...

Chapitre 2 :

La dispersion

chromatique

Chapitre 2 : la dispersion chromatique

I. Introduction :

L'augmentation du débit sur les lignes de transmission utilisées aujourd'hui a fait de la dispersion un problème majeur. La dispersion de vitesse de groupe induite dans la fibre perturbe la propagation du signal dans les réseaux de télécommunications optiques. Le phénomène se traduit par l'élargissement temporel des impulsions lumineuses constituant le signal, ce qui a pour effet d'introduire des distorsions dans le signal transmis en bout de fibre. Il est donc impératif de compenser la dispersion cumulée au cours de sa propagation. Pour remédier à ces problèmes d'élargissement temporel nous allons nous focaliser sur les techniques de compensation de la dispersion chromatique. Deux techniques de compensation seront envisagées : la première utilise la fibre compensatrice (DCF), tandis que la seconde utilise la fibre de Bragg (FBG). Ces deux composants vont nous permettre de compenser la dispersion chromatique.

II. La dispersion :

Lorsqu'une impulsion se propage en régime linéaire dans une fibre optique, elle subit un phénomène de dispersion qui se traduit par un étalement temporel de celle-ci (figure. II.1). [25]

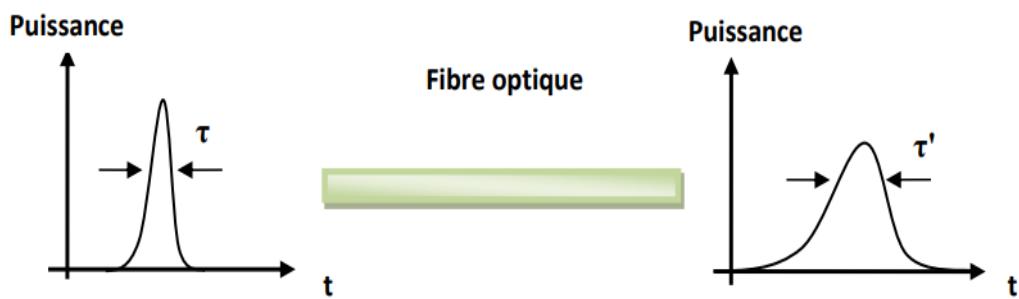


Figure. II.1. Évolution de l'impulsion pendant sa propagation dans la fibre optique.

Une impulsion lumineuse s'élargit lorsqu'elle se propage le long de la fibre. Cette distorsion est la conséquence de la dispersion, au sens large la dispersion est définie comme étant l'étalement ou l'élargissement de l'impulsion dans une fibre optique. Des éléments tels que l'ouverture numérique, le diamètre du noyau, l'indice de réfraction, la longueur d'onde ou encore et la largeur de ligne du laser

Chapitre 2 : la dispersion chromatique

peuvent causer l'impulsion à s'élargir. La dispersion augmente le long de la longueur de la fibre [26]. Les liaisons optiques à longue distance utilisent une fibre monomode, et donc la dispersion intermodale n'est pas présente. Il existe plusieurs types de dispersion contribuant à l'étalement de l'impulsion au cours de sa propagation dans le guide : Dispersion modale, dispersion chromatique dont la dispersion matérielle et la dispersion du guide d'onde et la dispersion de polarisation.

II.1 La dispersion chromatique

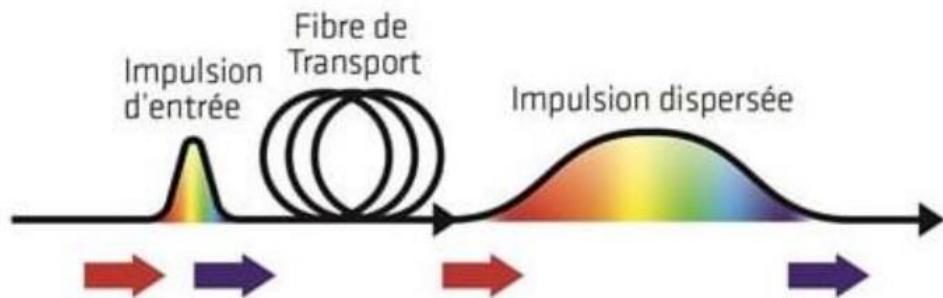


Figure II.2: Dispersion chromatique

La dispersion chromatique ou intermodale est un paramètre important dans une fibre optique. Quand une onde électromagnétique interfère avec les électrons liés d'un diélectrique, la réponse du support dépend de la fréquence optique ω . Cette propriété, connue sous le nom de dispersion chromatique, se manifeste à travers la dépendance fréquentielle de l'indice de réfraction $n(\omega)$. L'origine de la dispersion chromatique est liée à la caractéristique des fréquences de résonance pour lesquelles le support吸 les radiations électromagnétiques à travers les oscillations des électrons liés. Elle induit un élargissement temporel des impulsions se propageant dans la fibre.



Figure. II.3. Effet de la dispersion chromatique : le signal qui se propage s'élargit.

Chapitre 2 : la dispersion chromatique

En d'autres termes, la déformation de l'impulsion qui se propage dans la fibre est due au fait que la source transmet des impulsions qui contiennent une distribution bien déterminée de longueurs d'ondes autour de l'onde centrale. Chaque longueur d'onde se propage avec une vitesse différente causant ainsi l'élargissement de l'impulsion originale [27].

D_c : Elle limite aussi la distance sur laquelle un signal peut être transmis sans régénération électronique du signal numérique d'origine. Cette distance est appelée limite de dispersion ou longueur de dispersion chromatique . Elle représente la distance de transmission au bout de laquelle une impulsion s'élargira de l'intervalle d'un bit. La limite de dispersion estimée pour un signal de largeur spectrale $\Delta\lambda$ est donnée par [28].

$$L_D \approx \frac{1}{2.B.D_C.\Delta\lambda}$$

Où B est le débit de transmission.

Cela veut dire aussi que pour une longueur de transmission donnée L, la dispersion chromatique limite également le débit qu'on peut transmettre dans une liaison optique.

La dispersion chromatique, c'est un paramètre important dans une fibre optique. Elle comporte la dispersion du matériau (est causée par la dépendance de l'indice de réfraction de la longueur d'onde) et la dispersion du guide d'onde (Elle est causée par le fait que la répartition de la lumière du mode fondamental sur le cœur et la gaine dépend de la longueur d'onde) ; elle s'exprime alors selon:

$$D_c = D_m + D_g$$

II.1.1. La dispersion matérielle D_m :

Elle trouve son origine dans la dépendance fréquentielle de la réponse des électrons de valence du matériau diélectrique (silice) soumis à un champ optique excitateur. Cette réponse dynamique se traduit par une dépendance fréquentielle de l'indice de réfraction du matériau. Cette dépendance de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde induit une modification de la vitesse de groupe propre au milieu et doit être incluse dans les lois de propagation de la lumière dans le guide [30].

L'expression de la dispersion du matérielle s'exprime par la relation suivante :

$$D_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{coeur}}{d\lambda^2}$$

D'où :

λ : Longueur d'onde.

c : vitesse de la lumière.

II.1.2. La dispersion de guide d'onde D_g :

La dispersion du guide d'onde est particulièrement importante pour les fibres monomodes ; Le fait que les ondes se propagent dans un guide et non dans un milieu illimité entraîne une dépendance de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde. Cette influence du guidage correspond à une nouvelle contribution à l'évolution spectrale des temps de groupe [31]. La dispersion de guide d'onde liée à la structure géométrique du guide d'onde, elle résulte de la variation de la constante de propagation β avec la fréquence normalisée V (qui dépend-elle même de la longueur d'onde λ) ; la dispersion du guide est toujours négative et dépend des paramètres de la fibre [32].

Le paramètre de dispersion du guide est défini par la relation :

$$D_g = -\frac{n_1 \Delta}{c \lambda} \left[V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \right] \quad [Ps. \, nm^{-1}. \, Km^{-1}]$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

C : est la vitesse de la lumière dans le vide.

Δ : est la différence d'indice.

Et :

$$V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \approx 0.08 + 0.5439(2.834 - V^2)$$

V : La fréquence spatiale normalisée

En combinant les équations (Dm) et (Dg) . La dispersion chromatique s'écrit sous la forme suivante :

$$D_c = -\frac{\Delta n_1}{c \lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} - \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d \lambda^2}$$

II.2. La dispersion modale (ou intermodale)

La dispersion modale vient du fait que les différents modes d'une fibre ont leur vitesse de groupe propre et donc au bout d'un certain temps de propagation, les différents modes seront décalés les uns par rapport aux autres. Au moment de détecter le signal, les modes seront combinés au niveau du détecteur ayant pour conséquence une impulsion élargie. L'ensemble des retards entre les différents rayons qui composent le signal lumineux, détermine en réception une distorsion du signal électrique obtenu par le convertisseur optique-électrique. Cette distorsion est la Dispersion Modale ; ce phénomène apparaît dans les fibres multimodes à saut d'indice ou à gradient d'indice. et dans le cas d'une fibre optique monomode, cette

dispersion est nulle. La dispersion modale D_{mod} est l'élargissement temporel maximum τ d'une impulsion par unité de longueur de la fibre [27].

$$D_{mod} = \frac{t_{max} - t_{min}}{L} = \frac{\tau}{L} \text{ [Ps/km]}$$

t_{max} et t_{min} représentent respectivement le temps de parcours du mode le plus lent et celui du mode le plus rapide.

L : longueur de la fibre optique. Par conséquent, les modes ne seront pas reçus en même temps et le signal sera déformé, l'impulsion est alors étalée (figure II.2).

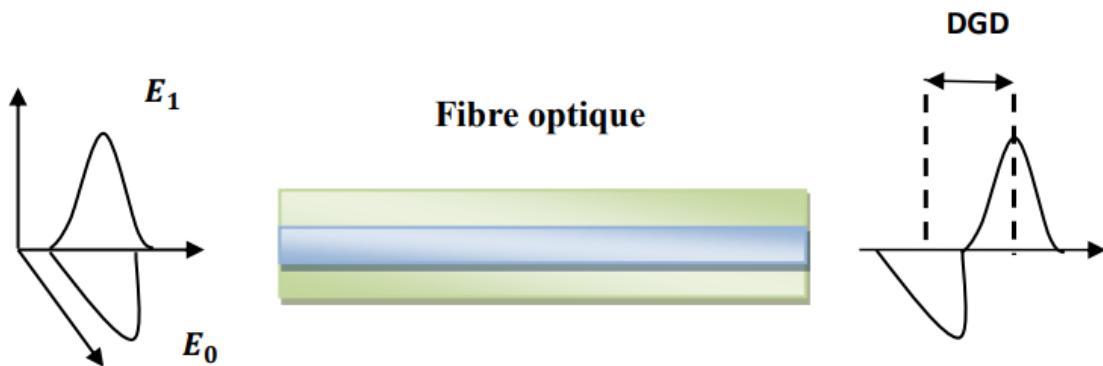


Figure. II.2. Influence de la dispersion modale sur une impulsion optique.

II.3. Dispersion de mode de polarisation (PMD)

La dispersion de polarisation ou PMD (Polarisation Mode Dispersion) est un autre type de dispersion. La vitesse de transfert de données (bande passante) dans la fibre optique diminue par la dispersion de polarisation ; l'origine de la PMD vient du fait que le mode fondamental d'une fibre optique monomode (LP01) est une combinaison de deux modes électromagnétiques dégénérés (LP_{01}^X et LP_{01}^Y) identifiés par deux directions de polarisation orthogonales qui ne se propagent pas à la même vitesse de groupe dans la fibre si celle-ci présente une biréfringence résiduelle de forme ou de contrainte. Cette variation de vitesse provoque un déphasage entre les deux composantes du mode fondamental et par conséquent, introduit un phénomène de dispersion ; la dispersion de polarisation [33].

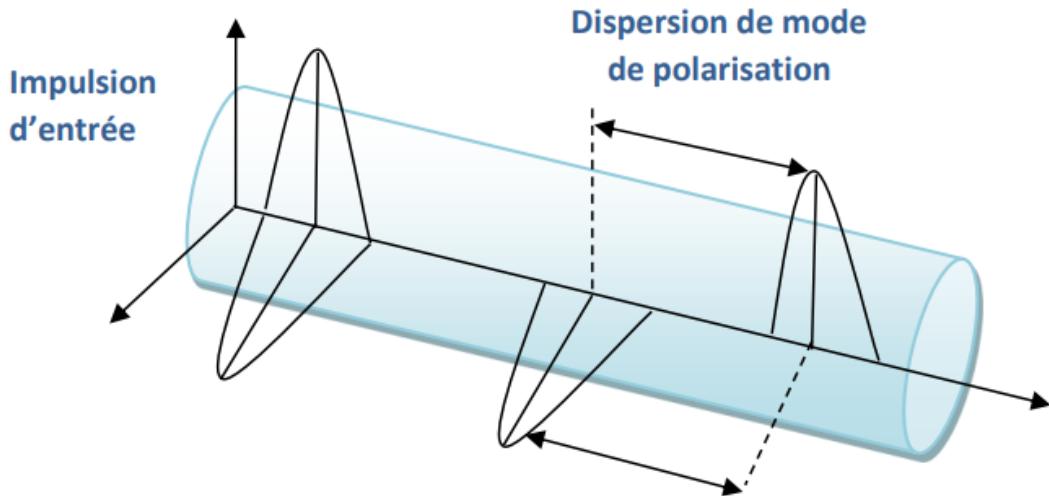


Figure. II.4. Dispersion de mode de polarisation (PMD).

Considérons le cas idéal de symétrie parfaite, la biréfringence de phase ou modale est donnée par :

$$B = |n_x - n_y|$$

où n_x et n_y sont les indices de réfraction du cœur de la fibre respectivement suivant l'axe lent, et l'axe rapide.

La longueur de battement L_B est la longueur de propagation dans laquelle les états de polarisation sont identiques dont la différence de phase entre les deux polarisations orthogonales soit de 2π .

$$L_B = \frac{\lambda}{B}$$

En outre, plus la biréfringence est élevée, plus que la longueur de battement est petite. Ce type de dispersion est moins facile à maîtriser car il varie d'une façon aléatoire avec le temps. Une façon d'éliminer la PMD est l'exploitation des fibres à maintien de polarisation à cœur elliptique ; à biréfringence de contrainte (Bow-tie et Panda). Ces fibres présentent la particularité d'avoir deux axes orthogonaux de propagation qui ne sont pas uniformes, l'un étant plus rapide que l'autre. Ainsi, la lumière linéaire polarisée suivant chacun des deux axes, se propage à une vitesse différente sur chacun d'eux, conduisant alors à une biréfringence linéaire [27].

III.1. Technique compensation de dispersion par des fibres compensatrice (DCF) :

Les fibres à compensation de dispersion sont des fibres à dispersion négatives qui sont insérées dans la liaison optique pour compenser la dispersion accumulée. Un module de compensation de dispersion est donc compensé par une fibre de longueur prédéterminée et de dispersion égale et de signe opposé à celle de la fibre de transmission.

Donc il est nécessaire de compenser la dispersion accumulée dans les fibres tout le long de la ligne de transmission par des fibres spécifiquement allouées à cela, comme la fibre dite « à compensation de dispersion », ou DCF.

En outre plutôt que de compenser en une seule fois la dispersion accumulée dans tout le système au niveau du récepteur, il est nécessaire de répartir la compensation de la dispersion tout le long du système afin de minimiser les interactions entre la dispersion et les effets nonlinéaires le long de la ligne. C'est le principe de la gestion de la dispersion. Pour cela, il suffit de choisir une fibre dont *DDCF* et *LDCF* compensent *DSMF* et *LSMF* du tronçon de fibre de la ligne de transmission telle que [31].

$$D_{SMF}L_{SMF} = -D_{DCF} \cdot L_{DCF}$$

Où *DSMF*; *DDCF*; *LSMF*; *LDCF* sont respectivement les paramètres de dispersion et les longueurs de fibre monomode et la fibre compensatrice de la dispersion. Dans la technique des fibres à compensation de dispersion, nous utilisons une fibre ayant une dispersion négative élevée ainsi qu'une fibre standard. La quantité de lumière dispersée par une fibre normale est réduite ou même annulée en utilisant une fibre à compensation de dispersion ayant une très grande valeur de dispersion de signe opposé par rapport à celle d'une fibre standard.

Trois sortes de compensation de dispersion sont possibles en fonction de la position DCF, la pré-DCF la post-DCF et la symétrique (pré post-DCF).

- **Pré-compensation** : dans ce type de technique de compensation, la fibre de compensation de dispersion à dispersion négative est placée avant la fibre monomode standard (SMF) à dispersion positive.

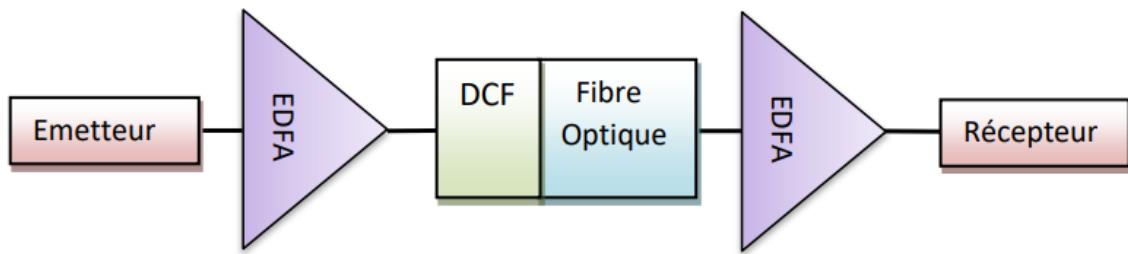


Figure. II.5. Pré-compensation DCF.

- **Poste-compensation** : C'est l'inverse dans ce type de technique de compensation, la fibre de compensation de dispersion à dispersion négative est placée après la fibre monomode standard (SMF) à dispersion positive.

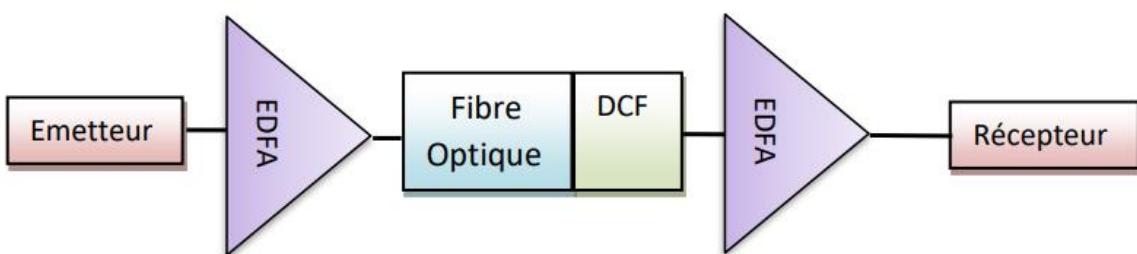


Figure. II.6. Post-compensation DCF.

- **Pré Post-Compensation** : Dans cette technique de compensation, la fibre de dispersion compensant la dispersion négative est placée avant ainsi qu'après la fibre monomode standard (SMF) pour compenser la dispersion positive de la fibre standard.

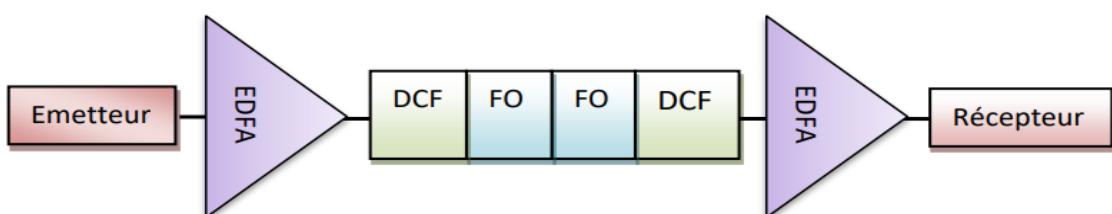


Figure. II.7. Pré poste-compensation DCF.

III.1.1. Avantages de DCF

- L'avantage majeur de cette technique est son caractère large bande, d'autant plus qu'il est possible, de concevoir une DCF compensant également la pente de dispersion
- Ils peuvent être facilement intégrés avec une bonne fiabilité.
- Le DCF fournit une compensation continue sur une large gamme de longueurs d'onde.
- Le module DCF devrait avoir une faible perte d'insertion, une faible dispersion en mode de polarisation et une faible non-linéarité optique.

Chapitre 2 : la dispersion chromatique

- En plus de ces caractéristiques, la fibre DCF devrait avoir un coefficient de dispersion chromatique élevé pour minimiser la taille d'un module DCF.

Conclusion :

Ce deuxième chapitre a exploré de manière approfondie le phénomène de la dispersion dans les fibres optiques, une composante critique influençant la performance des systèmes de télécommunications optiques. La dispersion, causée par la propagation non uniforme de différentes longueurs d'onde ou modes à travers la fibre, peut dégrader les signaux et limiter les capacités de transmission des réseaux optiques.

En examinant les types principaux de dispersion - dispersion chromatique, dispersion modale et dispersion de mode de polarisation (PMD) - ce chapitre met en lumière leurs mécanismes et leurs impacts distincts sur la qualité des signaux. La dispersion chromatique, en particulier, résulte de la dépendance de la vitesse de propagation de la lumière à sa longueur d'onde, tandis que la dispersion modale est spécifique aux fibres multimodes où différents modes voyagent à des vitesses différentes. La PMD, quant à elle, découle de légères asymétries dans la fibre, entraînant des différences de vitesse entre les composantes de polarisation de la lumière.

Pour atténuer ces effets indésirables, diverses techniques de compensation de la dispersion ont été discutées. Les fibres à compensation de dispersion (DCF) et les réseaux de Bragg (FBG) sont deux méthodes couramment utilisées pour corriger la dispersion et restaurer l'intégrité des signaux optiques sur de longues distances. L'importance croissante de ces techniques reflète la nécessité d'optimiser la performance des réseaux optiques modernes face à l'augmentation des débits de données et des exigences en bande passante.

En conclusion, la gestion efficace de la dispersion est indispensable pour le bon fonctionnement des systèmes de communication optique. Ce chapitre a fourni une base solide sur les différents types de dispersion, leurs impacts et les méthodes pour les compenser. La compréhension et la maîtrise de la dispersion sont cruciales pour le développement et la maintenance des infrastructures de télécommunications de nouvelle génération, permettant des transmissions plus rapides, fiables et sur de plus longues distances. La poursuite de l'innovation dans les techniques de compensation et les matériaux de fibre optique promet d'ouvrir

Chapitre 2 : la dispersion chromatique

de nouvelles perspectives pour surmonter les défis posés par la dispersion et améliorer encore les performances des réseaux optiques.

Chapitre 3 :

Résultat de

simulation

I. Introduction :

Le problème majeur de la transmission à longue distance est la dispersion qui doit être réduite sinon elle dégrade les performances du système. Après une certaine distance de propagation, l'élargissement des impulsions provoque un nombre important d'erreurs à la fin de réception et par conséquent l'information peut être dégradée. Parmi les alternatives, les fibres compensatrices de dispersion (DCF) constituent une bonne alternative afin de compenser la dispersion accumulée dans la fibre.

Le présent chapitre a pour objectif d'étudier les techniques de compensation de dispersion chromatique dans une liaison de transmission numérique par fibre optique à un débit variant de 10Gb/s à 60 Gb/s. Ce travail, a été effectué à l'aide du logiciel de simulation « Optisystem 7.0 », qui est un outil performant permettant de réaliser et simuler des chaines de transmissions optiques.

Nous allons tout d'abord commencer par une chaîne de transmission basique sans compensation. Ensuite nous ajouterons au fur et à mesure des blocs supplémentaires pour améliorer la qualité de la transmission. Dans un premier temps nous allons utiliser la technique DCF avec la fibre monomode standard (SMF). On abordera ensuite la compensation de dispersion chromatique dans les liaisons optiques hauts débits.

II. Chaîne de transmission de base :

La figure (III.1) ci-dessous représente une chaîne de transmission optique simple sans compensation de dispersion. Ce schéma décrit les composants utilisés pour l'analyse de l'effet de la dispersion. La performance de la liaison optique est estimée via deux critères, le facteur de qualité Q et le taux d'erreur binaire BER. Sachant que, pour maintenir une bonne qualité de transmission dans le domaine des télécommunications on doit avoir un facteur Q supérieur à 6 ce qui correspond à un taux d'erreurs binaire BER inférieur à 10^{-9} .

Cette chaîne de base est composée essentiellement de trois sections : un émetteur, fibre optique et un récepteur.

Un Laser modulé avec un générateur NRZ et un modulateur Mach Zehnder joue le rôle d'émetteur. Un photodéTECTeur de type PIN est utilisé comme récepteur pour effectuer l'opération inverse de l'émetteur optique. Il est connecté à un filtre électrique passe-bas avec une fréquence de coupure 0.75 fois la fréquence de rythme. Pour illustrer les résultats nous utiliserons un analyseur de BER.

Les paramètres utilisés dans cette simulation sont donnés dans le tableau III.1 ci-dessous.

Chapitre 3 : Résultat de simulation

Paramètres	Valeurs	Unité
Débit	10 to 60	Gbps
Longueur de SMF	100	km
Puissance	10	dBm
Fréquence	193.1	THz

Tableau.III.1. Paramètres de simulation

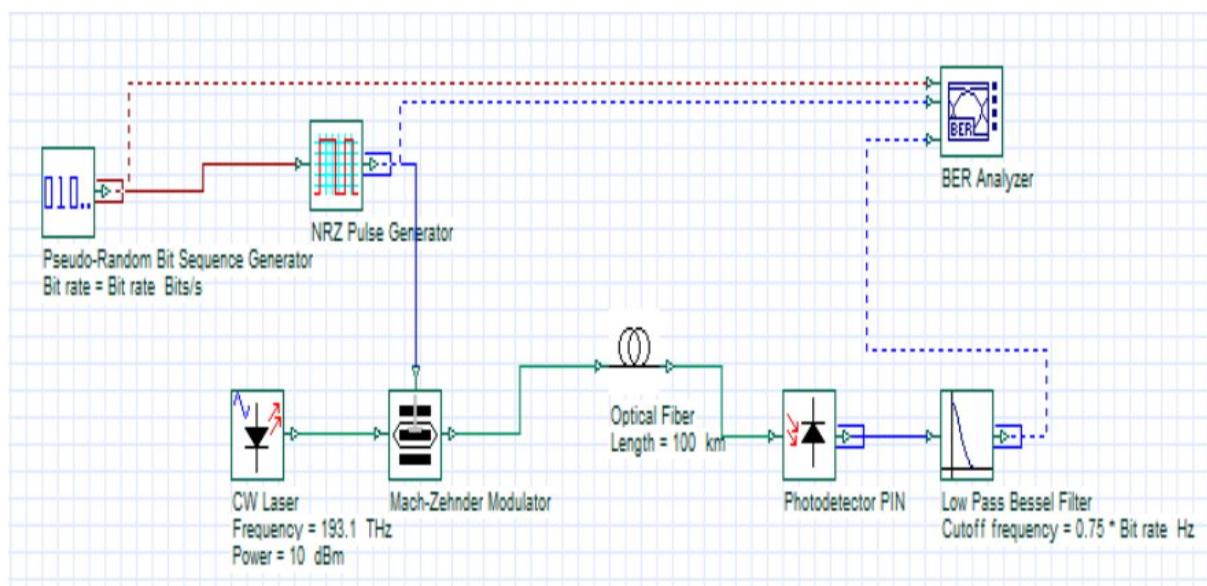


Figure. III.1. Chaine de transmission de base

Les diagrammes de l'œil correspondant à différents débits (10, 20, 40,60 Gbps) pour une distance de 100 Km sont représentés sur les figures suivantes :

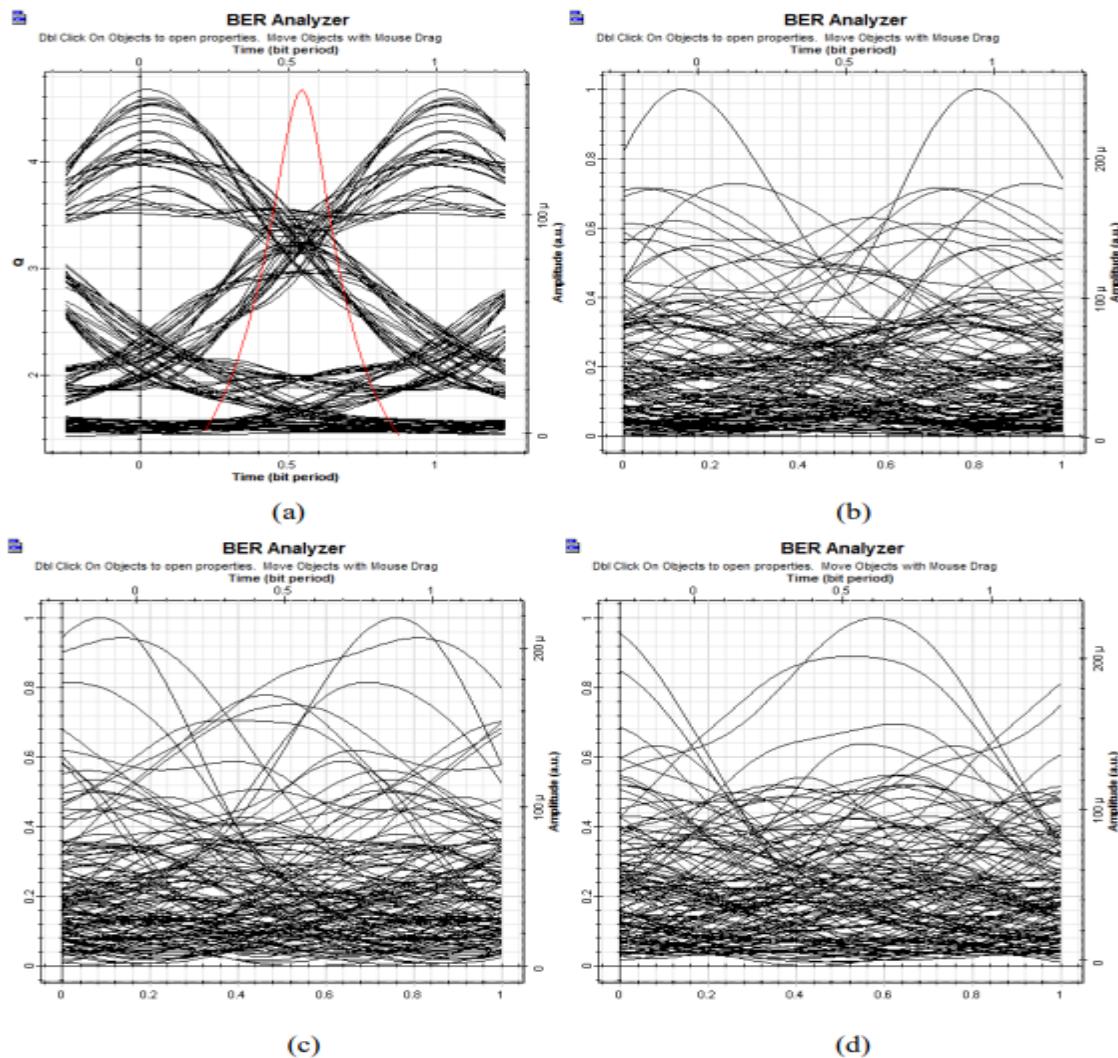


Figure.III.2. Les diagrammes de l'œil (a) pour 10Gb/s, (b) pour 20Gb/s, (c) pour 40Gb/s et (d) pour 60Gb/s

On peut remarquer sur ces diagrammes une hauteur de l'œil et un facteur Q très petits ayant pour origines une dispersion très élevée. On peut observer également que le débit a une relation inversement proportionnelle avec la qualité de transmission : plus le débit est grand plus la qualité du signal reçu est faible.

III .Fibres compensatrices de dispersion chromatique (DCF) :

Dans cette section on va présenter les résultats obtenus en utilisant les fibres compensatrices de dispersion (DCF) et des amplificateurs optiques (fibres amplificatrices) afin de compenser les pertes dues à l'atténuation (un amplificateur avec un gain de 20dB après le SMF et un autre avec un gain de 12.8dB après le DCF). La fibre optique utilisée de type SMF a une longueur de 100 km avec une dispersion chromatique de 17 ps/nm/km. Par conséquent, la dispersion cumulée totale est de $17 \times 100 = 1760$ ps/nm. Cette

Chapitre 3 : Résultat de simulation

dispersion peut être compensée en utilisant une fibre compensatrice de dispersion chromatique de type DCF de longueur de 21.25 km et ayant une dispersion de -80 ps/km/nm.

Le tableau ci-dessous rassemble les différents paramètres Tableau.

CW Laser	
Fréquence	193.1 THz
Puissance	10 dBm
SMF	
Longueur d'onde utilisé	1550 nm
Pente de dispersion	0.08 ps/nm/Km
DCF	
Longueur d'onde de référence	1550 nm
Longueur	21.25 km
Pente de dispersion	-0.35 ps/nm ² /km
EDFA	
Paramètre de bruit	4 dB
Bande passante du bruit	13 TH

Tableau. III.2. Paramètres de simulation avec DCF

Trois techniques de compensation seront étudiées selon la position du **DCF** :

a. Pré-DCF : où la DCF est placée avant le SMF pour compenser la dispersion positive de la fibre standard. La figure (III.3) montre une chaîne de simulation du Pré-DCF.

Chapitre 3 : Résultat de simulation

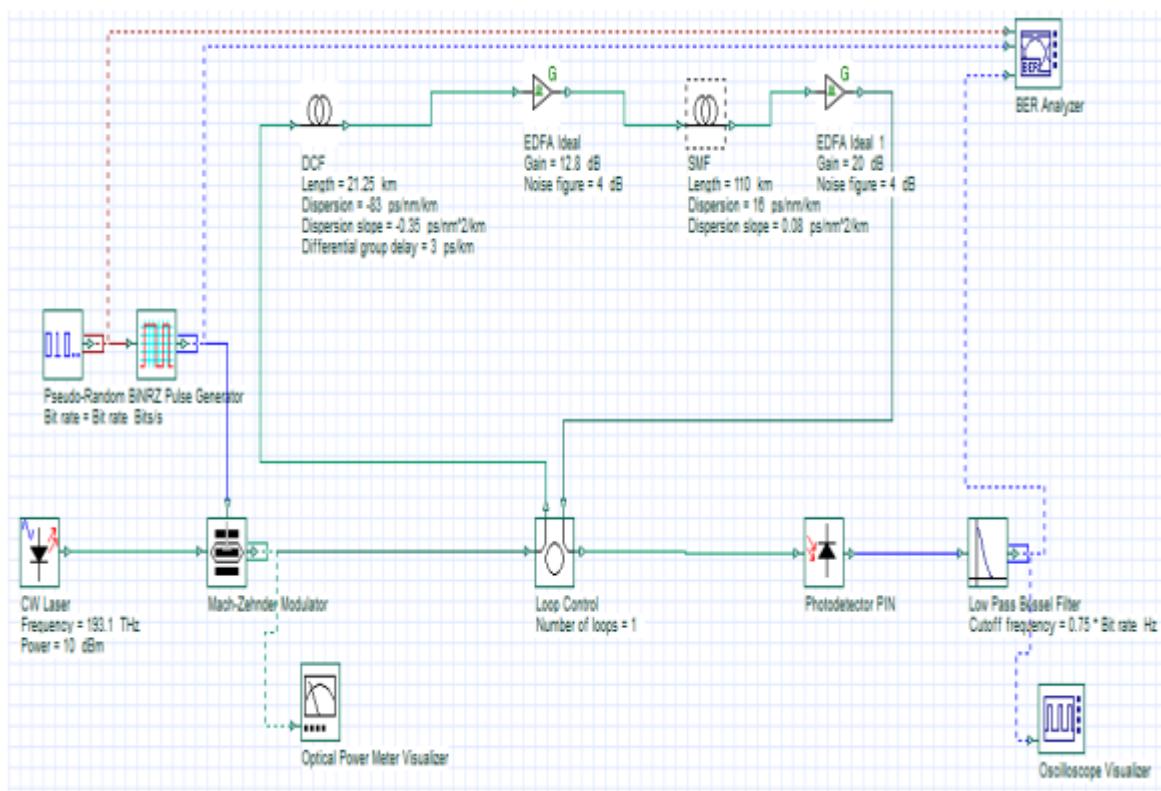


Figure.III.3. Chaîne de simulation du Pré-DCAF

Interprétation :

Cette configuration de chaîne de transmission optique avec pré-compensation de dispersion est conçue spécifiquement pour optimiser la qualité de la transmission sur de longues distances. Le rôle principal de cette architecture est de minimiser les dégradations du signal optique liées aux effets de la dispersion chromatique, qui tend à étaler temporellement les impulsions et ainsi dégrader le débit de transmission.

La fibre DCF (Dispersion Compensating Fiber) joue un rôle essentiel dans ce système. Elle est positionnée en amont de la liaison longue distance et a pour fonction de compenser de manière précise la dispersion chromatique accumulée dans la fibre monomode standard. Cela permet de recompackter les impulsions optiques et de préserver l'intégrité du signal.

Les amplificateurs optiques EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) quant à eux assurent un niveau de puissance optique suffisant tout au long de la transmission, compensant les pertes linéaires de la fibre. Ils permettent ainsi de maintenir un rapport signal sur bruit élevé malgré les longues distances parcourues.

Chapitre 3 : Résultat de simulation

Enfin, les filtres passe-bas jouent un rôle crucial dans la réduction du bruit optique, en éliminant les composantes spectrales parasites générées par les processus d'amplification. Cela facilite grandement l'analyse précise du taux d'erreur binaire (BER) ainsi que la visualisation claire du signal optique reçu.

Les performances globales de ce système de transmission dépendent de manière critique de la qualité et de l'optimisation de chacun de ces composants clés. Une gestion rigoureuse des pertes optiques et des distorsions tout au long de la chaîne de transmission est également primordiale pour assurer une qualité de service optimale sur de très longues distances.

b. Post-DCF : où la DCF de dispersion négative est placée après le SMF pour compenser la dispersion positive de la fibre standard comme le montre la figure (III.4).

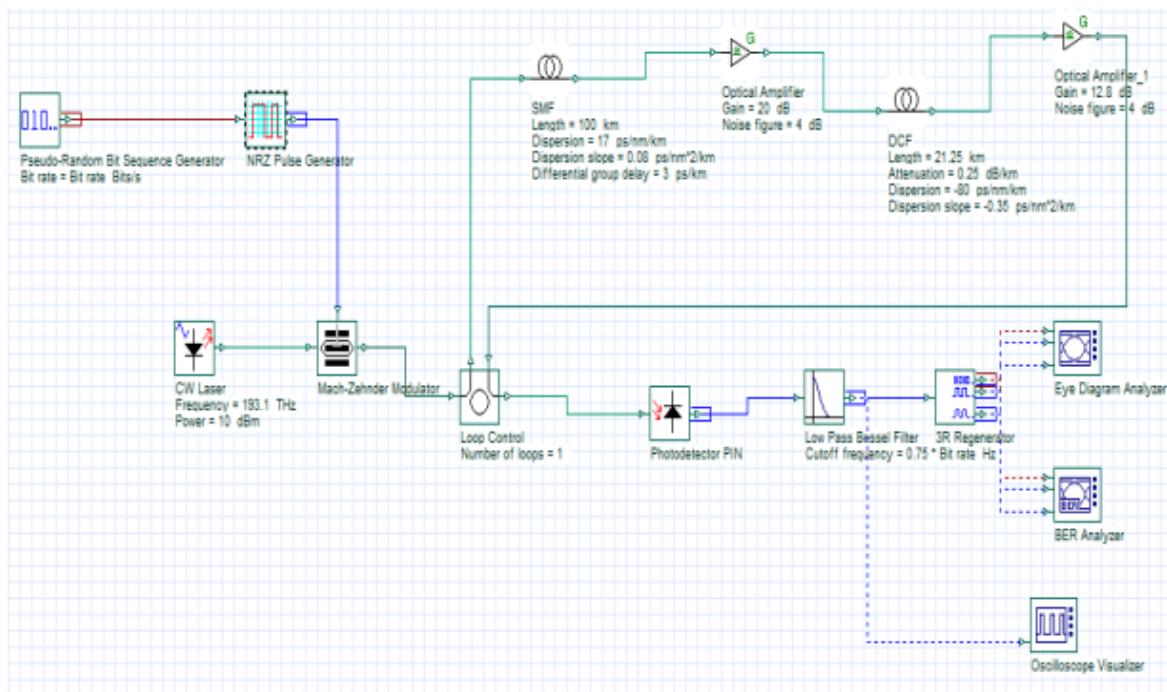


Figure.III.4. Chaîne de simulation du Post-DCF

Interprétation :

La chaîne de simulation du Post-DCF (Dispersion Compensation Fiber) présentée démontre comment la combinaison de techniques de pré-amplification, de compensation de dispersion, et de post-amplification peut optimiser de manière significative les performances des systèmes de communication optique modernes. En corrigeant efficacement la dispersion chromatique, qui est l'un des principaux défis des réseaux optiques longue distance, et en maintenant une puissance de signal adéquate tout au long de la transmission, cette configuration innovante assure une transmission fiable, de haute qualité et sur de très longues distances. Les résultats de cette étude soulignent l'importance cruciale de ces techniques de traitement du signal dans les réseaux optiques actuels et futurs, où la demande en termes de débit, de capacité et de portée ne cesse de croître. En effet, les besoins en bande passante sont de plus en plus importants avec l'essor du haut débit, de la vidéo 4K/8K, de la 5G et des applications de cloud computing qui nécessitent des infrastructures optiques performantes et évolutives. Au-delà des aspects techniques, cette approche innovante contribue également à réduire les coûts opérationnels et d'investissement liés au déploiement et à la maintenance des réseaux optiques longue distance. En optimisant les paramètres de transmission, elle permet notamment de limiter le nombre d'amplificateurs et de répéteurs nécessaires, tout en améliorant la fiabilité et la durée de vie du système dans son ensemble. Cela représente un enjeu majeur pour les opérateurs télécoms confrontés à des défis économiques et environnementaux croissants.

Chapitre 3 : Résultat de simulation

C. Pré-post DCF : où la DCF est placée avant et après le SMF pour compenser la dispersion positive de la fibre standard. La figure III.5 montre une chaîne de simulation du Pré-post DCF.

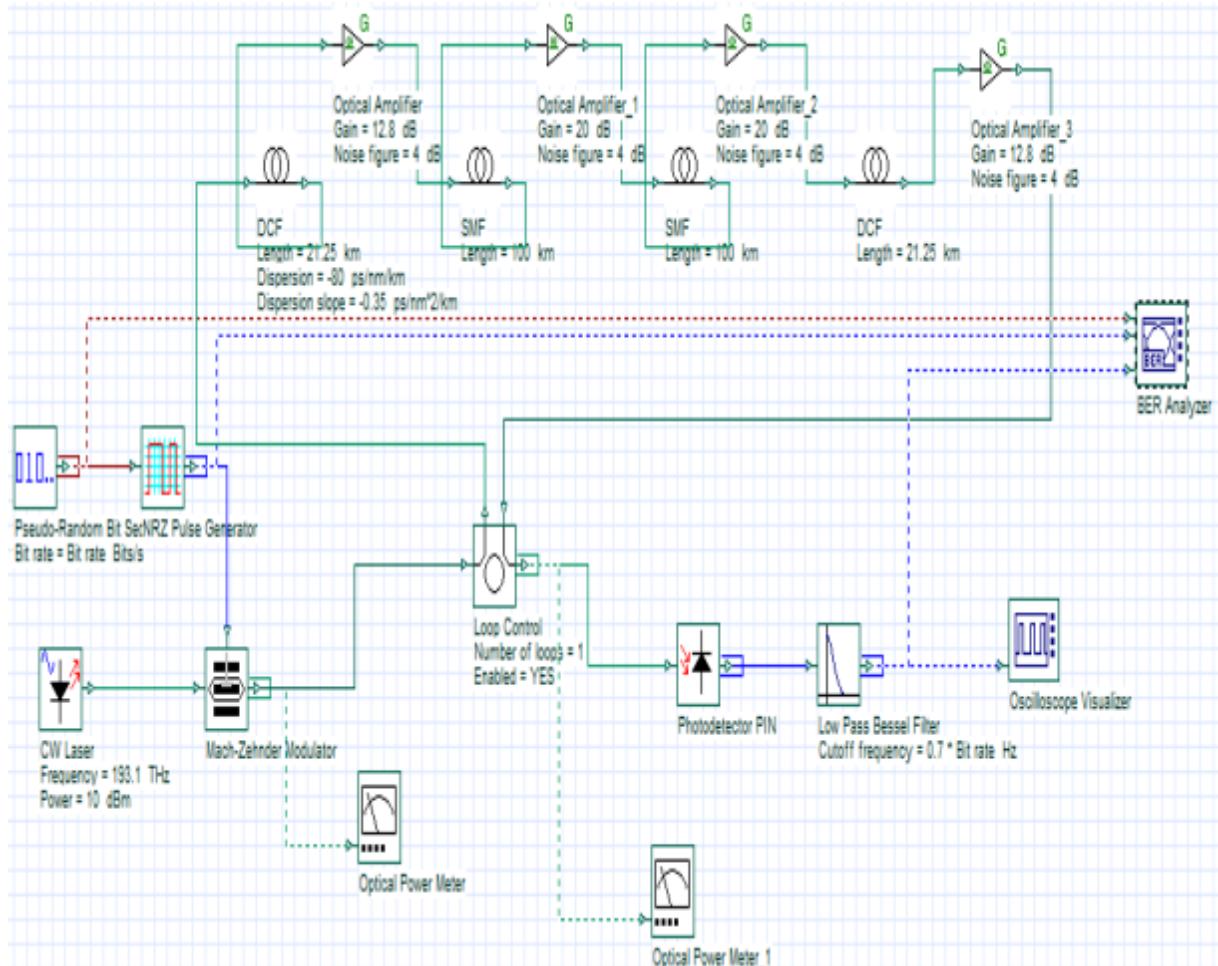


Figure.III.5. Chaîne de simulation du Pré-post DCF.

Interprétation :

La chaîne de transmission optique utilisant la configuration Pré-post DCF (Dispersion Compensation Fiber) est une solution de pointe pour les systèmes de communication optique longue distance. Cette approche combine des techniques avancées de compensation de la dispersion chromatique et de l'amplification optique, permettant d'assurer une transmission de données de très haute qualité et d'une fiabilité remarquable. Les résultats des études menées sur cette configuration ont démontré une amélioration significative de la qualité du signal optique transmis, avec une réduction substantielle du taux d'erreurs. Cela souligne l'importance cruciale de la compensation de la dispersion chromatique et de l'amplification optique dans les systèmes de communication optique modernes, qui doivent relever les défis posés par des exigences toujours plus élevées en termes de débit, de capacité et de portée des réseaux. Cette solution de transmission optique avancée repose sur l'utilisation stratégique de fibres à compensation de dispersion (DCF) placées en amont et en aval de la liaison optique principale. Grâce à ce positionnement judicieux, les effets néfastes de la dispersion chromatique, qui peuvent gravement dégrader la qualité du signal, sont efficacement compensés. De plus, l'intégration d'étages d'amplification optique, tels que des amplificateurs à fibre dopée, permet de maintenir un niveau de puissance optique suffisant sur de longues distances, évitant ainsi les pertes excessives qui pourraient compromettre la transmission. L'adoption de cette configuration Pré-post DCF dans les réseaux de communication optique actuels permet de répondre de manière optimale aux exigences toujours plus élevées en termes de vitesse de transmission, de capacité de transport des données et de portée des liaisons. Elle représente ainsi une solution de pointe pour le déploiement de systèmes de communication optique longue distance, fiables, robustes et performants, essentiels au développement des infrastructures de télécommunications de nouvelle génération.

Chapitre 3 : Résultat de simulation

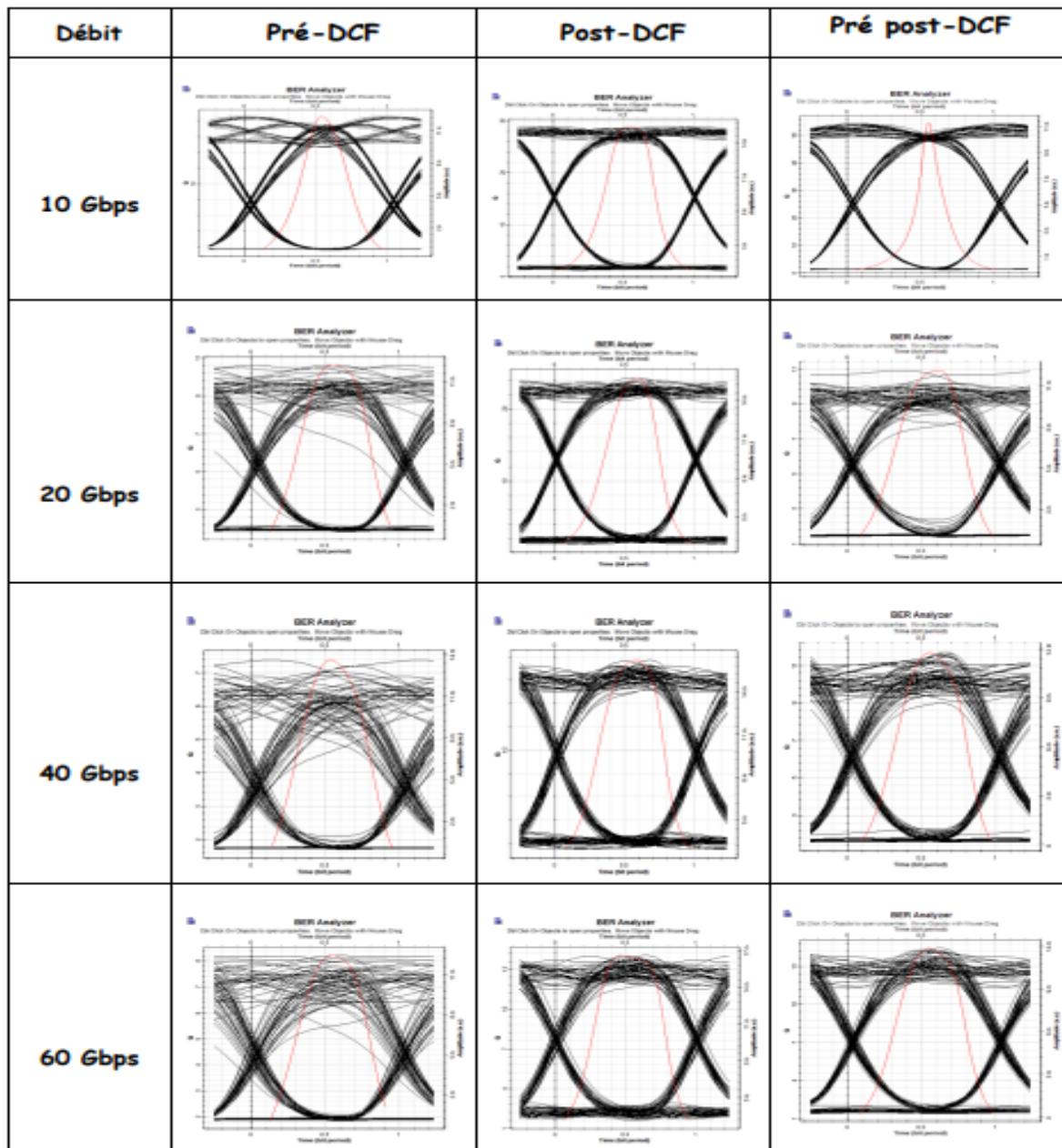


Tableau. III.3. Diagrammes de l'œil pour Pré-DCF, Post-DCF, Pré post-DCF avec les différents débits binaires.

Chapitre 3 : Résultat de simulation

Débit	10Gbps	20 Gbps	40 Gbps	60 Gbps
Facteur de qualité Q	17.0908	7.354334	6.21446	2.2386
BER	5.27256e-066	7.23807 e-014	2.08151 e-010	0.01223776
Hauteur de l'œil	0.00553784	0.00396824	0.0032922	-0.00146043

Tableau. III.4. Analyse de Pré-DCF.

Débit	10 Gbps	20 Gbps	40 Gbps	60 Gbps
Facteur de qualité Q	28.9437	24.2884	17.7296	14.0346
BER	1.46433 e-184	1.20328 e-130	1.12758 e-070	4.38284 e-045
Hauteur de l 'œil	0.0103607	0.010048	0.00961787	0.00905976

Tableau. III.5. Analyse de Post-DCF

Débit	10 Gbps	20 Gbps	40 Gbps	60 Gbps
Facteur de qualité Q	54.3823	10.9209	11.6764	14.4475
BER	0	3.9945 e-028	6.98601 e-032	1.02682 e-047
Hauteur de l'œil	0.00949731	0.00714474	0.00734049	0.00802616

Tableau.III.6. Analyse de Pré post-DCF

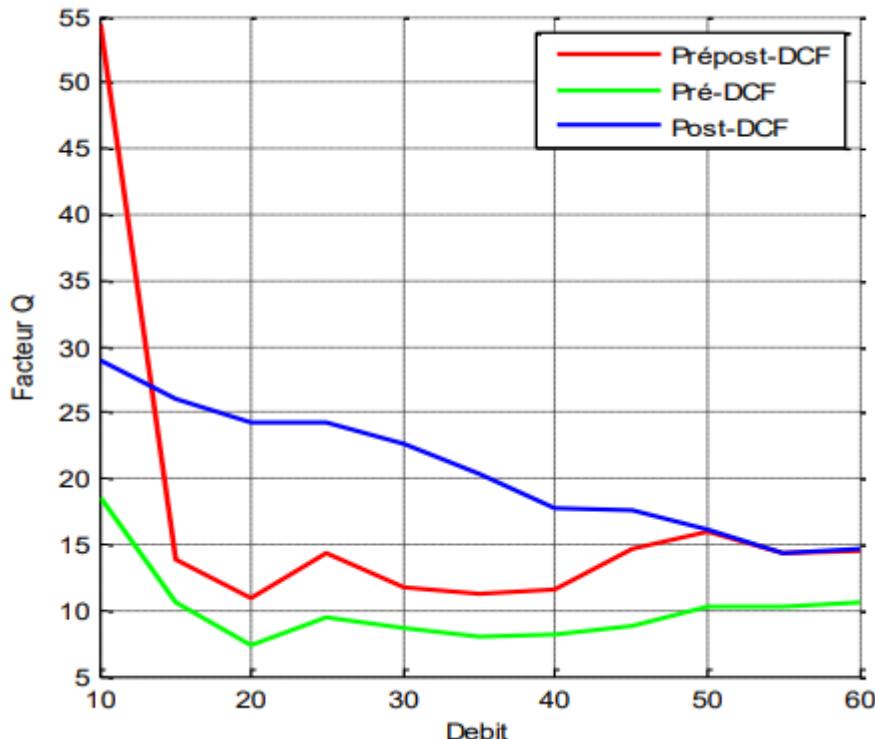


Figure.III.6. Facteur de qualité en fonction du débit pour Pré-DCF, Post-DCF, Pré post-DCF

IV. Résultats et discutions :

Trois chaines de transmission (Pré-DCF, Post-DCF, Pré post-DCF) pour des débits variant de 10 à 60 Gbps sont été mises en œuvre, et analysées. Les diagrammes de l’œil correspondants sont présentés dans le tableau (III.3).

Les tableaux III.4, III.5 et III.6 présentent les facteurs de qualité Q, les valeurs de BER ainsi que les hauteurs de l’œil pour chaque technique. La figure.III.6 donne le facteur de qualité en fonction du débit pour les différentes techniques. Ces résultats peuvent s’interpréter de la manière suivante :

- Pour Pré-DCF, les hauteurs de l’œil sont basses et étroites et les lignes sont séparées les unes des autres. Le facteur de qualité Q est très faible ($Q=18.5686$ à 10 Gbps), ce qui correspond à une dispersion élevée.
- Pour Post-DCF on remarque que les résultats sont meilleurs que le premier cas de Pré-DCF, les diagrammes de l’œil sont plus ouverts que dans Pré-DCF, les lignes convergent les unes aux autres. Le facteur de qualité est élevé mais avec un petit pourcentage de dispersion.
- Pour Pré post-DCF nous avons une bonne ouverture du diagramme de l’œil à 10 Gbps avec un facteur de qualité de 54.3823 puis elle dégrade rapidement avec l’augmentation du débit ($Q=10.9209$ à 20 Gbps).

Chapitre 3 : Résultat de simulation

Après cette dégradation les diagrammes de l'œil restent ouverts mais pas autant que le Post-DCF. Finalement on peut conclure que la dispersion chromatique et d'autres effets non-linéaires peuvent être atténués en utilisant la fibre compensatrice de dispersion (DCF). Les résultats obtenus montrent que le Post DCF est une bonne technique de compensation.

V. Conclusion :

L'objectif de nos travaux était d'étudier quelques solutions de compensation de la dispersion chromatique dans les liaisons optiques en utilisant le logiciel OptiSystem.

Le chapitre consacré à la simulation et à la compensation de la dispersion chromatique dans les fibres optiques met en lumière l'importance de cette problématique pour la transmission à longue distance. La dispersion, si elle n'est pas correctement gérée, peut gravement dégrader les performances du système en élargissant les impulsions et en augmentant le taux d'erreur binaire (BER).

Les simulations effectuées à l'aide du logiciel OptiSystem 7.0 ont permis d'évaluer l'efficacité de différentes techniques de compensation, notamment l'utilisation de fibres compensatrices de dispersion (DCF). Les résultats montrent que le DCF est une méthode très efficace pour atténuer la dispersion chromatique.

Les trois configurations de DCF testées - Pré-DCF, Post-DCF et Pré-post-DCF - ont montré des améliorations significatives de la qualité du signal. Parmi ces configurations, la méthode Post-DCF s'est révélée être la plus performante. Les résultats obtenus indiquent que la Post-DCF offre le meilleur compromis en termes de facteur de qualité (Q) et de taux d'erreur binaire (BER) à différents débits, avec des diagrammes de l'œil plus ouverts et des hauteurs d'œil optimales.

Ainsi, les fibres compensatrices de dispersion (DCF), particulièrement en configuration Post-DCF, constituent une solution optimale pour réduire la dispersion et améliorer la fiabilité et la qualité des transmissions optiques à haute vitesse. Cette conclusion souligne l'importance de continuer à développer et à optimiser les techniques de compensation de la dispersion pour répondre aux besoins croissants des réseaux de communication modernes.

Conclusion Générale

Cette mémoire, structurée en trois chapitres, explore les aspects fondamentaux et avancés de la transmission optique, en mettant un accent particulier sur la dispersion et ses techniques de compensation. Voici une récapitulation et une synthèse des principaux points abordés dans chaque chapitre. Dans Le 1^{er} chapitre on a présenté une vue d'ensemble de la chaîne de transmission optique. Il détaille les composants essentiels tels que les sources de lumière, les fibres optiques, les détecteurs et les amplificateurs. Ce chapitre établit les bases en expliquant les principes de fonctionnement et les défis inhérents à la transmission de données optiques, notamment l'importance de maintenir l'intégrité du signal sur de longues distances.

Le **2^{ème}** chapitre se concentre sur la dispersion dans les fibres optiques, un phénomène clé qui limite les performances des systèmes de transmission optique. Il décrit les différents types de dispersion, tels que la dispersion modale, chromatique et la dispersion des modes de polarisation (PMD). Ce chapitre souligne l'impact de la dispersion sur l'élargissement des impulsions lumineuses et la dégradation du signal, rendant la compréhension et la gestion de la dispersion cruciales pour optimiser les réseaux de communication optique. Le 3^{ème} chapitre utilise des simulations pour analyser l'efficacité des différentes techniques de compensation de la dispersion, avec un focus particulier sur les fibres à compensation de dispersion (DCF). Les résultats des simulations démontrent que la méthode DCF, surtout en configuration Post-DCF, est la plus efficace pour atténuer les effets de la dispersion. Cette section met en évidence les améliorations significatives en termes de facteur de qualité (Q) et de taux d'erreur binaire (BER), confirmant que l'intégration de DCF dans les systèmes de transmission optique est essentielle pour maintenir des transmissions de haute qualité.

En conclusion, cette mémoire met en évidence l'importance critique de la gestion de la dispersion dans les systèmes de communication optique. À travers une analyse détaillée des composants de la chaîne de transmission, une exploration des types et des effets de la dispersion, et des simulations rigoureuses, il est clair que les fibres à compensation de dispersion (DCF) offrent une solution optimale pour améliorer la performance des transmissions optiques.

La compréhension approfondie de ces concepts et la mise en œuvre de solutions efficaces comme le DCF permettent non seulement de surmonter les limitations imposées par la dispersion mais aussi de propulser les capacités des réseaux de communication optique vers des débits de données plus élevés et des distances de transmission plus longues. Ainsi, cette

étude contribue de manière significative à l'avancement des technologies de communication optique, ouvrant la voie à des innovations futures et à une connectivité globale améliorée.

Références bibliographique

- [1] Burgami reacherch (www.burgami.com).
- [2] J. D. Colladon, "Nature magazine", (1884).
- [3] K. C. Kao and G. A. Hockham, "Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies", Proc. IEE, 1151–1158, (1966).
- [4] www.Corning.com
- [5] R. Maurer, D. Beck, P. Schultz, US Patent N° 3711262, (1970).
- [6] K.L. Walker, "AT&T Technical Journal ", 69, (1990).
- [7] R. Bouillie and J. Moalic, "Fiber and Integrated Optics", 4, (1982).
- [8] Victor Girondin, thèse de doctorat « Étude et modélisation d'un modulateur à électro-absorption pour des applications de transmission radio sur fibre de signaux ULB aux fréquences centimétriques - Simulation système et caractérisation d'une liaison radio sur fibre à modulation externe », l'université Pierre et Marie Curie, 2016.
- [9] BENZERDJEB. C et SELKA.S, mémoire fin d'étude « encodage de l'amplitude spectrale pour OCDMA », Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2013.
- [10] LOUAZANI.M et MEDDANE.S, mémoire fin d'étude (étude des réseaux d'accès optique exploitant le multiplexage en longueurs d'onde), université de Tlemcen, 2017.
- [11] FSAIFES.I, thèse de doctorat « Encodage et Décodage Temporels "Tout Optique" à Réseaux de Bragg pour l'Accès Multiple », École Doctorale d'Informatique Télécommunications et Electronique de Paris, 2007.
- [12] AWWAD.E, thèse de doctorat « Emerging Space-Time Coding Techniques for Optical Fiber Transmission Systems (Techniques Émergentes de Codage Espace-Temps pour les Systèmes de Communications Optiques) », TELECOM Paris Tech, 2015.
- [13] AMARI.C, mémoire de fin d'étude « optimisation des paramètres d'une liaison optique », Université de Bejaia, 2013.
- [14] GRAINI.L, thèse de doctorat « application des similarités dans les systèmes de télécommunications par fibre optique à très haut débit », Université Badji Mokhtar Annaba, 2017.
- [15] CHERBI.L, thèse de doctorat « propagation et caractérisation des fibres optiques », Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [16] REDJDAL.K, mémoire fin d'étude « étude d'une chaîne de télécommunication optique », Université de Bejaia, 2013.

- [17] : DRIF+BENABDELOUHAD. 2019 univ tlm
- [18] G. P. Agrawal, "Nonlinear fiber optics", Academic press, Third edition, (2001).
- [19] Les Fibres optiques, "Dossier technique ", Thème d'autonomie, (1999).
- [20] E. Wu, "Measuring chromatic dispersion of single-mode optical fibers using white light interferometry", a thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Physics, the University of Auckland, (2006).
- [21] F. Baribeau, "Guide d'onde effilé comme compensateur de dispersion chromatique dans les systèmes de communications multi- longueurs d'onde" mémoire présenté à la faculté des études supérieures de l'université Laval pour l'obtention du grade de maître des sciences (Ms.), Avril, (2001).
- [22] Julien Maury, "Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Limoges", (2003).
- [23] School of Electronic and Communications Engineering, "Bending Loss and Reliability in Optical Fibres", (2002)
- [24] C. Vassalo, Tome 2, Eyrolles, 29 (1985)
- [25] : DRIF+BENABDELOUHAD. 2019 univ tlm
- [26] Laurent COLOMER, « Les mesures de dispersion chromatique (DC) », Conférences Opto 2005.
- [27] M. OUADAH, « Etude des Fibres Microstructurées Compensatrices de Dispersion Chromatique », Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen – Faculté de TECHNOLOGIE, 2017.
- [28] S. BENAMEUR, « La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable », Thèse de Doctorat Cotutelle, Université de LIMOGES et université de SIDI BEL-ABBES, 30 Juin 2015.
- [29] N. BOUDRIOUA, "Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique vers une compensation électronique de la PMD", Thèse de Doctorat, Université Paul Verlaine – Metz, octobre 2007.
- [30] Younes ZOUINE, « contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant la technique CDMA, Thèse de Doctorat, Université de LIMOGES, octobre 2005.
- [31] Julien MAURY, « Étude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique », Thèse de Doctorat, Université de LIMOGES, novembre 2003.

[32] N. BOUDRIOUA, "Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique vers une compensation électronique de la PMD", Thèse de Doctorat, Université Paul Verlaine – Metz, octobre 2007.

[33] GRAINI Leila, « Applications des similaritons dans les systèmes de télécommunications par fibre optique à très haut débit », Thèse de Doctorat, Université de Badji Mokhtar-Annaba, Avril 2017.

La liste des acronymes :

- **LED** : Light Emetting Diode (Diode Électroluminescente).
- **WDM** : Wave Length Division Multipling (Multiplexage en Longueur D'onde).
- **MUX** : Multiplexer.
- **DEMUX** : Demultiplexer.
- **DL** : Diode LASER.
- **LASER** : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Amplificateur de Lumière Par Emission Stimulée).
- **DFB** : Distributed Feedback.
- **DBR**: Distributed Bragg Reflector.
- **MMZ**: Modulator Mach-Zehnder.
- **ON** : Ouverture Numérique.
- **FO** : Fibre optique.
- **SMF**: Single-Mode Fiber.
- **MMF**: Multimode Fiber.
- **NRZ**: Non-return to Zero.
- **PIN**: Positive Intrinsic Negative.
- **LPF**: Low Pass Filter.
- **EDFA**: Erbium Doped Fiber Amplifier.
- **PE** : Puissance d'entré.
- **PS** : Puissance de sortie.
- **DCF**: Dispersion-Compensating Fiber.
- **FBG**: Fiber Bragg Grating.
- **Dmod** : Dispersion modale.
- **DC** : Dispersion chromatique.
- **Dm** : Dispersion de matériel.
- **Dg** : Dispersion de guide.
- **nc** : indice de cœur
- **ng** : indice de gain
- **Gbps** : gigabits par seconde
- **PMD**: Polarization Mode Dispersion.
- **BER**: Bit-Error-Rate.
- **PRBS**: Pseudo Random Binary Sequence.
- **SI** : Saut d'indice.
- **FPB** : Filtre Passe Bas
- **OTDMA** : Optical Time Division Multiple Access
- **OFDM** : Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- **WDMA** : Wavelength Division Multiple Access
- **OCDMA** : Optical Code Division Multiple Access
- **SDM** : Spatial Division Multiplexing
- **WDM** : Wavelength Division Multiplexing

- **PIN** : Positive-Intrinsic-Negative
- **APD** : Avalanche Photodiode

Résumé

Ce mémoire traite de la compensation de la dispersion dans les transmissions par fibre optique afin de répondre à la demande croissante de transmission de données à haute vitesse. Il est structuré en trois chapitres:

1. La Chaîne de Transmission: introduction aux éléments fondamentaux des chaînes de transmission optique, incluant les sources lumineuses, les fibres optiques et les récepteurs, ainsi que les techniques de modulation et de multiplexage.
2. La Dispersion Chromatique: explication des phénomènes de dispersion chromatique et modale, et présentation des techniques de compensation telles que l'utilisation de fibres à réseaux de Bragg et de fibres compensatrices de dispersion (DCF).
3. Résultats de Simulation: analyse comparative des différentes approches de compensation de la dispersion, démontrant l'efficacité de l'utilisation de fibres compensatrices de dispersion pour améliorer les performances des systèmes de transmission optique.

La conclusion souligne l'importance de la gestion de la dispersion pour les réseaux de communication optique et met en avant les contributions du mémoire, tout en proposant des pistes pour des recherches futures.

ملخص

تناولت هذه الأطروحة تعويض التشتيت في عمليات نقل الألياف الضوئية من أجل تلبية الطلب المتزايد على نقل البيانات عالي السرعة. وهي مقسمة إلى ثلاثة فصول:

1. سلسلة الإرسال: مقدمة للعناصر الأساسية لسلسلة الإرسال الضوئي، بما في ذلك مصادر الضوء والألياف الضوئية وأجهزة الاستقبال الضوئية، بالإضافة إلى تقنيات التشكيل وتعدد الإرسال
 2. التشتيت اللوني: شرح لظواهر التشتيت اللوني والمعياري، وعرض لتقنيات التعويض مثل استخدام الألياف (DCF) براغ الشبكية والألياف المغيرة للتشتت
 3. نتائج المحاكاة: تحليل مقارن لأساليب مختلفة لتعويض التشتيت، مما يدل على فعالية استخدام الألياف المغيرة للتشتت لتحسين أداء أنظمة الإرسال الضوئي.
- تؤكد الخاتمة على أهمية إدارة التشتيت لشبكات الاتصالات الضوئية وتسلط الضوء على إسهامات الأطروحة، مع اقتراح سبل البحث المستقبلي

Abstract

This dissertation deals with dispersion compensation in optical fiber transmissions to meet the growing demand for high-speed data transmission. It is structured in three chapters:

1. The Transmission Chain: introduction to the fundamental elements of optical transmission chains, including light sources, optical fibers and receivers, as well as modulation and multiplexing techniques.
2. Chromatic Dispersion: explanation of chromatic and modal dispersion phenomena, and presentation of compensation techniques such as the use of Bragg grating fibers and dispersion compensating fibers (DCF).
3. Simulation results: comparative analysis of different approaches to dispersion compensation, demonstrating the effectiveness of using dispersion-compensating fibers to improve the performance of optical transmission systems.

The conclusion underlines the importance of dispersion management for optical communication networks and highlights the contributions of the thesis, while suggesting avenues for future research.