

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique et d'Informatique
Département de Télécommunications



Mémoire de Fin d'Etudes de
MASTER ACADEMIQUE

Filière :
Télécommunications

Spécialité :
Réseaux & Télécommunications

Par :
Tinhinane BOUGHAREB

Thème

**Etude et application des réseaux de bragg pour la
correction de la dispersion chromatique en Fibres
Optiques**

Soutenu le : 24 / 06 / 2024

Devant le jury :

Président : M^{me}.Hammar Karima **MAB UMMTO**

Promoteur : M^r. Ouadah Mohammed Chamse Eddine **MCA UMMTO**

Examinatrice : M^{me}.Abba Faiza **MCB UMMTO**

Année universitaire : 2023-2024

Remerciements

Je tiens à remercier le bon dieu de m'avoir accordée la force, le courage, la patience et la volonté pour mener à terminer mes études et réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers tous ceux qui ont contribué de manière significative à la réalisation de ce mémoire de fin d'études. Mes remerciements les plus sincères vont à mon encadreur **Mr. « OUADAH.M.C »** pour sa guidance éclairée, ses conseils perspicaces et son soutien constant tout au long de ce parcours académique.

Un immense merci également à mes proches, ma famille et mes amis, qui m'ont apporté leur encouragement, leur compréhension et leur soutien indéfectible. Leur présence a été le pilier sur lequel j'ai pu m'appuyer durant les moments de doute et de challenge.

Mes remerciements vont aussi aux membres des jurys pour nous avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers mes collègues de classe et les membres du personnel académique pour les échanges enrichissants, les discussions stimulantes et l'environnement d'apprentissage collaboratif qui ont grandement contribué à l'enrichissement de ce travail.

Enfin, je tiens à remercier toutes les sources de savoir et de recherche qui ont nourri cette étude. Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'inspiration tirée des travaux antérieurs et des ressources académiques consultées.

C'est avec humilité que je présente ces remerciements, conscients que ce travail reflète le fruit d'une collaboration, d'un apprentissage continu et d'un engagement passionné envers la recherche.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents, témoins silencieux de mes nuits d'insomnie et complices de mes rêves, à vous qui avez été la boussole de mon éducation et la source intarissable de soutien. Votre amour inconditionnel et vos sacrifices sont gravés dans chaque mot de ce mémoire, que dieu vous protèges et vous gardes auprès de moi.

A **Mr. «OUADAH.M.C»** guide éclairé qui a partagé son savoir avec générosité, encouragé mes aspirations intellectuelles et insufflé une passion toujours grandissante pour la recherche.

A tous les enseignants qui ont été avec nous tout au long de nos études.

A mes chers (e) magnifiques sœurs « Dyhia, Celia, Lamia » et petit frère « Achour » et mes chers (e) cousins et cousines.

A ma grande famille maternelle LACEB et ma grande famille paternelle BOUGHAREB que dieu vous bénisse.

A mes amis et collègues, compagnons de cette aventure académique, qui ont partagé les hauts et les bas, apporté des rires dans les moments de stress et célébré chaque petite victoire.

A la mémoire de mes chères grands-mères ainsi mon grand-père paternel qui nous ont quittés a jeune âge paix à leur âme.

BOUGHAREB.Tinhinane



Table des matières

Remerciements

Dédicace

Table des matières

Liste des tables

Liste des figures

Liste des abréviations, sigles et acronymes

Introduction générale..... 1

Chapitre 1 : Fondements des Communications Optiques..... 3

Introduction..... 4

1.1 Principes de base des systèmes de communication optique 4

1.2 Chaîne de transmission optique 5

1.3 Emetteurs optiques 5

1.3.1 Diode DEL 6

1.3.2 Diode laser 6

1.3.3 Modulateur 7

1.4 Récepteur optique..... 7

1.4.1 Photodiode PIN..... 7

1.4.2 La photodiode à avalanche (PDA) 8

1.5 Composant clés : La fibre optique 9

1.5.1 Structure et fonctionnement de la fibre optique..... 10

1.5.2 Classification des fibres optiques 12

1.6 Avantages et inconvénients 14

1.7 Applications de la fibre optique..... 15

1.8 Défis de transmission et solution 17

1.8.1 Solution 22

1.9 Technologies de compensation de la dispersion chromatique 24

1.9.1	Fibres compensatrices à dispersion chromatique (DCF).....	25
1.9.2	Réseau Bragg.....	25
Conclusion	.....	26
Bibliographie	.....	28
Chapitre 2 : Applications des réseaux de Bragg	.....	31
Introduction	.....	32
2.1	Historique et développements des réseaux de Bragg	32
2.2	Fonctionnement et principes des réseaux Bragg	33
2.3	Utilisation des réseaux de Bragg dans les télécommunications	34
2.4	Typologie des réseaux de Bragg	35
2.4.1	Réseaux de Bragg uniformes	35
2.4.2	Réseaux de Bragg inclinés « titled » ou blazed	36
2.4.3	Réseaux de Bragg à pas variable ou « chirped ».....	36
2.4.4	Réseaux de Bragg apodisés.....	37
2.5	Techniques de fabrication des réseaux de Bragg	37
2.5.1	Techniques de masque de phase.....	38
2.6	Applications industrielles et futurs développements.....	39
2.6.1	Applications industrielles.....	39
2.6.2	Futurs développements	40
Conclusion	.....	41
Chapitre 3 : Etude et simulation des réseaux de Bragg	.....	48
Introduction	.....	49
3.1	Présentation du logiciel Optisystem	49
3.1.1	Définition.....	49
3.1.2	Principales caractéristiques du logiciel Optisystem	50
3.1.3	Les critères d'évaluation de la qualité dans logiciel Optisystem.....	51
3.1.4	Le rôle des composants dans la chaîne de transmission.....	52
3.2	Simulation d'une chaîne de transmission optique sans fibre de Bragg.....	53

3.3 Simulation d'une chaîne de transmission avec compensation de la dispersion chromatique	57
3.4 Simulation d'une chaîne de transmission avec compensation de dispersion (FBG) dans la technologie (DWDM)	60
Bibliographie	65
Conclusion générale	72
Résumé.....	73

Liste des tables

Tableau 1: Caractéristiques du multiplexage en longueur d'onde [22].	24
Tableau 2: Applications des réseaux de Bragg [6].	35
Tableau 3: Rôle des composants du logiciel Optisystem [6].	53
Tableau 4: La variation de facteur Q et BER en fonction de la puissance.	54
Tableau 5: La variation de facteur Q et BER en fonction de la puissance (Post-FBG).....	57

Liste des figures

Figure 1.1: Fibre optique [27].	4
Figure 1.2: Schéma de principe d'un système de transmission par fibre optique [28].	5
Figure 1.3: Schéma du bloc d'un émetteur optique [29].	5
Figure 1.4: Principe du récepteur optique [30].	7
Figure 1.5: Structure d'une photodiode PIN [31].	8
Figure 1.6: Structure d'une photodiode à avalanche APD [32].	9
Figure 1.7: Structure d'une fibre optique [33].	10
Figure 1.8: Transmission sur fibres optiques [34].	11
Figure 1.9: Fibre multimode à saut d'indice [35].	13
Figure 1.10: Fibre multimode à gradient d'indice [36].	13
Figure 1.11: Fibre monomode [37].	14
Figure 1.12: Atténuation linéaire d'une fibre optique monomode [38].	18
Figure 1.13: Evolution de l'impulsion pendant sa propagation dans la fibre optique [39].	19
Figure 1.14: Contribution de la dispersion matériau (en vert) et de la dispersion guidée (en violet) [40].	20
Figure 1.15: Dispersion modale [41].	21
Figure 1.16: Schéma de principe du multiplexage en longueur d'onde [42].	23
Figure 1.17: Réseaux de Bragg (FBG sur fibre optique) [43].	26
Figure 2.1: Trois réseaux de Bragg sur une même fibre [17].	32
Figure 2.2: Principe de fonctionnement d'un réseau de Bragg [18].	34
Figure 2.3: Principe de fonctionnement du multiplexage en longueur d'onde des réseaux de Bragg [19].	Erreur ! Signet non défini.
Figure 2.4: Représentation schématique du principe de fonctionnement d'un réseau de Bragg à pas uniforme inscrit dans le cœur d'une fibre optique ainsi que ses réponses en transmission et en réflexion [20].	36
Figure 2.5: Réseau de Bragg à pas variable «chirped» [17].	Erreur ! Signet non défini.
Figure 3.1: Interface graphique du logiciel optisystem.	59
Figure 3.2: chaîne de transmission optique simple.	54
Figure 3.3: Diagramme des signaux et analyse du spectre avant compensation.	59
Figure 3.4: Post compensation système.	57
Figure 3.5: Diagramme des signaux et analyse du spectre après compensation.	59
Figure 3.6: Facteur de qualité et taux d'erreur binaire en fonction de la puissance, débit, distance.	62

Liste des abréviations, sigles et acronymes

3G	Troisième Génération
4G	Quatrième Génération
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
BER	Bit Error Rate
CD	Chromatic Dispersion
CW	Continuous Wave
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DB	Décibel
DCF	Dispersion Compensation Fiber
DEMUX	Demultiplexer
D_G	Dispersion du Guide
DL	Diode Laser
D_M	Dispersion du Matériau
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDF	Electricité De France
FBG	Fiber Bragg Grating
FTT_X	Fiber To The X
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISI	Inter-Symbol Interference
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

LED	L ight E mitting D iode
MMF	M ultimode F iber
MUX	M ultiplexer
M-Z	M ach- Z ehnder
NRZ	N on- R eturn-to- Z ero
ON	O uverture N umérique
PDA	P hotodiode A rray
PIN	P ositive – I ntrinsic- N egative
PN	P olarisation N egative
RB	R éseau de B ragg
RDB	R éseau de D iffraction de B ragg
SMF	S ingle M ode F ibre
UDWDM	U ltra D ense W avelength D ivision M ultiplexing
WDM	W avelength D ivision M ultiplexing
λ_B	L ongueur D 'onde de B ragg

Introduction Générale

Introduction générale

L'évolution rapide des technologies de communication exige une constante optimisation des systèmes de transmission optique pour répondre aux demandes croissantes en termes de bande passante et de vitesse de transmission. Dans ce contexte, la gestion efficace de la dispersion dans les fibres optiques revêt une importance cruciale pour assurer des performances de communication fiables et efficaces. La dispersion, qui résulte de la différence de propagation des différentes longueurs d'onde au sein de la fibre, peut entraîner une distorsion temporelle des signaux optiques, limitant ainsi la capacité de transmission et la qualité du signal [1].

Dans ce projet de fin d'étude, nous nous penchons sur l'optimisation des systèmes de transmission optique dans les fibres optiques, en mettant l'accent sur la gestion de la dispersion. Une approche prometteuse pour compenser la dispersion est l'utilisation du réseau de Bragg en fibre (FBG), un composant optique passif présentant plusieurs avantages significatifs. Les FBG offrent une solution élégante grâce à leur simplicité de conception, leur coût abordable, leur faible taux d'insertion et leur spectre de réflexion personnalisable avec une large bande passante.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'efficacité de la compensation de la dispersion à l'aide des FBG dans les systèmes de transmission optique. À travers une analyse détaillée et approfondie, réalisée à l'aide du simulateur OptiSystem, nous examinons l'impact de différentes longueurs de fibre et paramètres sur la performance du système. Les résultats de cette étude sont évalués à l'aide de diagrammes de l'œil dans des graphiques ultérieurs, démontrant ainsi l'efficacité et la fiabilité du système de transmission simulé, en particulier à des vitesses de transmission élevées de l'ordre de 10 Gb/s.

Dans le premier chapitre, nous introduisons les concepts fondamentaux liés à la transmission optique et à la dispersion dans les fibres optiques.

Dans le deuxième chapitre, nous décrirons en détail la méthodologie utilisée pour mener cette étude. Cela inclura une explication des différentes configurations utilisées pour évaluer l'efficacité de la compensation de la dispersion à l'aide des FBG.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous présenterons et analyserons les résultats de notre étude. Nous évaluerons la performance du système de transmission simulé en fonction de différents paramètres, en mettant en évidence l'efficacité de la compensation de la dispersion à

Introduction générale

l'aide des FBG. Les conclusions de cette analyse seront présentées dans la conclusion générale du projet.

***Chapitre 1 : Fondements des
Communications Optiques***

Introduction

De nos jours, les transmissions par fibres optiques sont devenues des techniques courantes et éprouvées dans le domaine de télécommunications [6].

Dans ce premier chapitre, nous plongeons au cœur des systèmes de communication optique, explorant les éléments essentiels qui sous-tendent cette technologie révolutionnaire. Nous débutons par une analyse approfondie des émetteurs optiques et des récepteurs optiques, les piliers fondamentaux de la conversion entre signaux électriques et lumineux. Ensuite, nous examinons en détail la structure et le fonctionnement complexes de la fibre optique, ainsi que les différentes classifications qui guident son utilisation efficace. Nous mettons également en lumière les multiples avantages et applications variées de la fibre optique, tout en relevant les défis inhérents à sa transmission et en explorant les solutions novatrices pour y remédier.

Cette immersion initiale dans les fondements des communications optiques jettera les bases nécessaires pour comprendre en profondeur les développements ultérieurs de ce domaine en constante évolution.

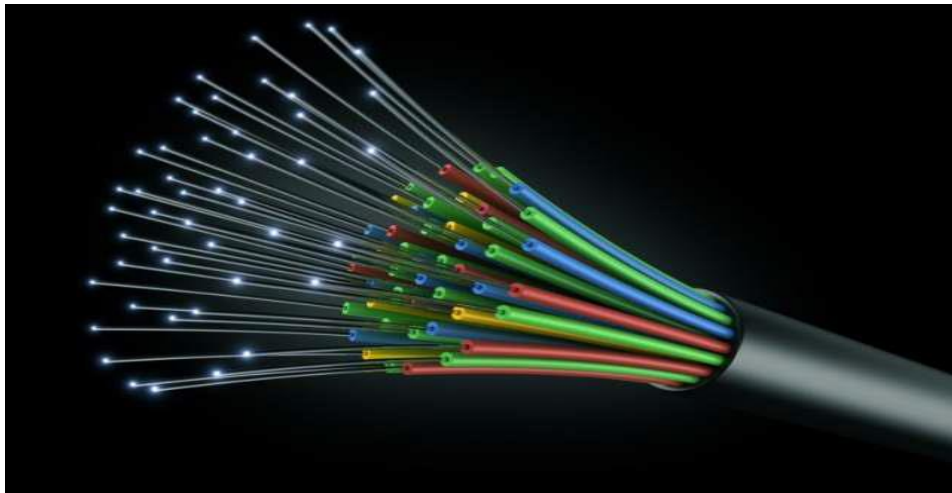


Figure 1.1: Fibre optique [27].

1.1 Principes de base des systèmes de communication optique

Un dispositif de communication optique consolide ces principes fondamentaux et illustre leur dynamique d'interaction. Ce processus implique la conversion d'un signal électrique en signal optique, la transmission de multiples signaux le long d'une voie optique, l'amplification du signal en transit, et enfin la réception et l'analyse des données à l'extrémité de réception. Cette approche a évolué au fil du temps en prenant en considération une pléthore de technologies et d'applications notamment dans le cadre des réseaux métropolitains et longue distance [1].

1.2 Chaîne de transmission optique

Comme dans tout système de communication, la chaîne de transmission comprend des composants tels que des émetteurs de lumière, canal de transmission et le récepteur.

Ce qui distingue ce système réside dans les éléments utilisés pour assurer le transport des données. L'émetteur est constitué d'un dispositif à diode laser ou d'une source laser, capable de transformer un signal électrique sinusoïdal en signal optique. La fibre optique, qui fait office de canal de transmission, transporte une porteuse optique modulée contenant l'information. Enfin, le récepteur, représenté par le photodétecteur, récupère le signal électrique en réalisant une conversion optique-électrique comme illustré dans la **figure 1.2** [1].

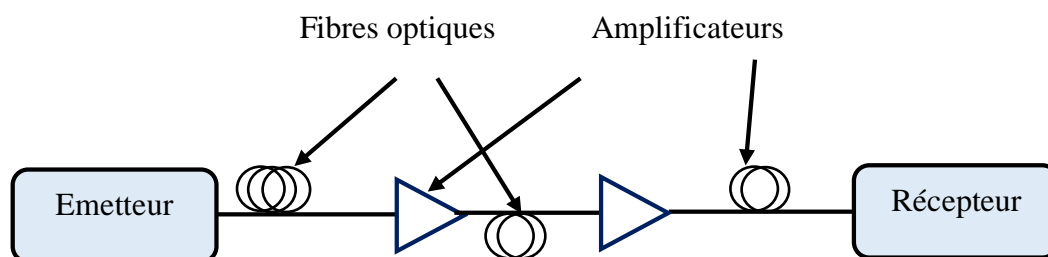


Figure 1.2: Schéma de principe d'un système de transmission par fibre optique [28].

1.3 Emetteurs optiques

L'émetteur optique dans le cadre des télécommunications optiques représente un élément crucial chargé de transformer efficacement l'énergie électrique en énergie optique, tout en garantissant un couplage optimal avec le système de fibre optique. La qualité du signal lumineux émis est un aspect déterminant nécessitant qu'il dépasse un seuil de puissance préétabli et qu'il présente une largeur de bande minimale adéquate pour une utilisation optimale [2].

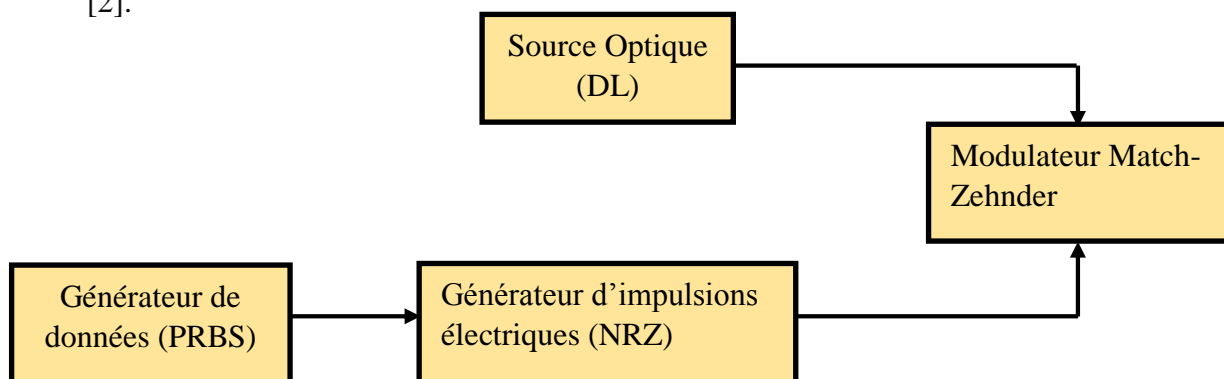


Figure 1.3: Schéma du bloc d'un émetteur optique [29].

Dans ce contexte, où l'utilisation de bandes passantes de plus en plus larges est devenue indispensable le recours à des sources à spectres réduits notamment les diodes laser (DL) et les

diodes électroluminescentes (DEL) s'avère impératif. Ces deux types de sources élaborés à partir de jonctions PN polarisées en direct reposent sur le principe de la recombinaison des paires électron-trou pour assurer leur émission lumineuse. Il est primordial de comprendre que l'efficacité de ces émetteurs optiques est cruciale pour la performance globale des systèmes de télécommunications optiques [2].

1.3.1 Diode DEL

La diode électroluminescente, ou LED (Light Emitting Diode), est une jonction PN composée de semi-conducteurs, où les recombinaisons des porteurs en excès se font principalement par émission de lumière. Sous une tension de polarisation directe les recombinaisons se manifestent dans trois régions distinctes : la zone de charge d'espace, ainsi que les régions neutres n et p. La mobilité élevée des électrons par rapport aux trous favorise leur injection dans la région de type p, ce qui en fait la face émissive de la structure.

Le spectre de la lumière émise par une LED dépend du gap énergétique du matériau de type p, où se produisent la plupart des recombinaisons radiatives ainsi que du type de dopant utilisé [1].

La diode LED se distingue par sa caractéristique d'être une source incohérente et polychromatique, ce qui signifie qu'elle émet une lumière sur une large gamme de longueurs d'onde et de manière non cohérente. Elle est principalement utilisée dans certains aspects des communications optiques où des bandes passantes moins importantes sont nécessaires [2]

1.3.2 Diode laser

Les émetteurs optiques offrent la possibilité de moduler directement la lumière émise en ajustant le courant électrique, présentent un spectre optique relativement étroit et consomment peu d'énergie. La diode laser se distingue comme la source la mieux adaptée pour les applications en télécommunications optiques, offrant une efficacité de couplage optique optimale avec la fibre. Le terme "laser", acronyme de l'expression anglaise "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", traduit littéralement l'amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement.

L'effet laser démontré pour la première fois en 1960 par Mainma à l'aide d'un barreau de rubis repose sur deux principes fondamentaux : l'amplification de la lumière et la rétroaction optique [3].

1.3.3 Modulateur

Dans les systèmes numériques optiques, pour transmettre des informations il est nécessaire de les encadrer sur le signal optique destiné à être transmis à travers la fibre optique. Ce processus, connu sous le nom de modulation constitue une fonction cruciale de tout système de transmission optique [4].

1.4 Récepteur optique

Dans les systèmes de communication optique, diverses méthodes sont employées pour récupérer le signal lumineux. Cependant, l'utilisation d'un détecteur reste indispensable pour convertir le signal optique en signal électrique. Le fonctionnement du photo détecteur repose sur un processus inverse à celui de la génération de rayonnement, lequel pourrait être assimilé à un dispositif de comptage de photons et de génération de courant. Les photo détecteurs sont généralement fabriqués à partir de matériaux tels que le silicium (Si) ou le germanium. On distingue principalement deux types de dispositifs pour cette détection :

- ❖ La photodiode à avalanche (PDA) [5].
- ❖ La photodiode PIN (Positive Intrinsic Negative).

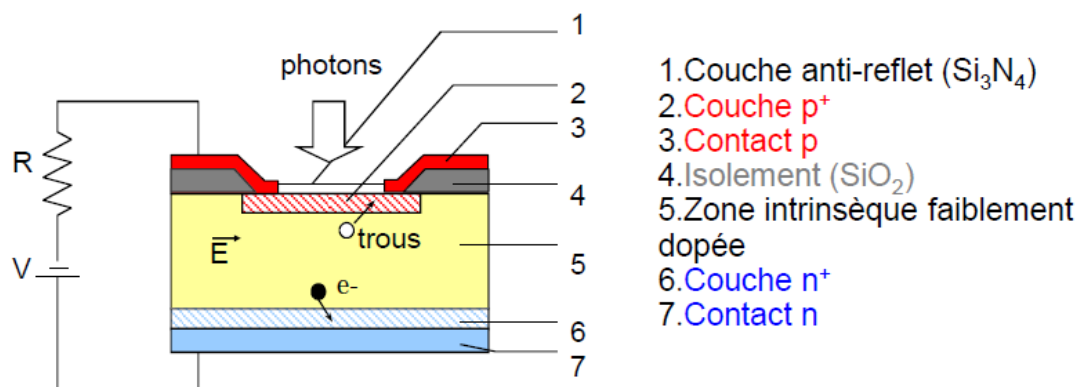


Figure 1.4: Principe du récepteur optique [30].

Le récepteur optique transforme les signaux optiques en signaux électroniques pour récupérer les données initiales. Pour ce faire, il est nécessaire d'intégrer des sous-systèmes de traitement du signal et de synchronisation. Ces éléments sont essentiels pour garantir une transmission efficace et fiable des données optiques vers leur forme électronique d'origine [6].

1.4.1 Photodiode PIN

Dans le cas de la photodiode PIN, le détecteur est constitué d'une diode de type Positive Intrinsic Negative (PIN). Cette diode est composée d'un matériau intrinsèque (i) légèrement dopé en matériau n, inséré entre un substrat de type p et un substrat de type n.

L'absorption des photons se produit dans la zone intrinsèque non dopée (i), où la probabilité de recombinaison des électrons et des trous est faible. Sous l'effet du champ électrique existant dans la photodiode, les électrons libérés dans la région intrinsèque sont poussés vers les zones négatives (n) et positives (p) respectivement où ils sont majoritaires.

La photodiode PIN fonctionne comme un détecteur de type quadratique, ce qui signifie que le photo courant généré est proportionnel à la puissance optique incidente. En outre, la photodiode PIN offre une dynamique de linéarité appréciable une facilité de mise en œuvre et un cout abordable [7].

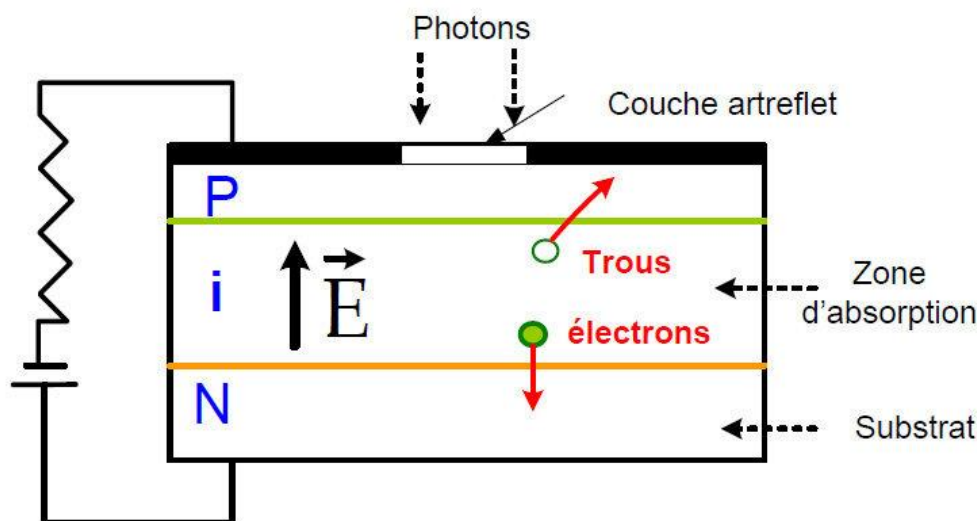


Figure 1.5: Structure d'une photodiode PIN [31].

1.4.2 La photodiode à avalanche (PDA)

La photodiode à avalanche (PDA) est une diode qui exploite un phénomène appelé claquage par avalanche, survenant lorsque les porteurs de charge accélérés par un champ électrique élevé acquièrent des vitesses très élevées et provoquent des collisions générant ainsi des porteurs supplémentaires. Ce processus conduit à une augmentation significative du courant photoélectrique.

Initialement largement utilisée, la PDA voit son utilisation diminuer en raison de l'avènement des préamplificateurs à fibres dopées à l'erbium.

Malgré sa complexité accrue par rapport à la photodiode PIN, la PDA offre l'avantage de permettre la détection de puissances optiques incidentes plus faibles [5].

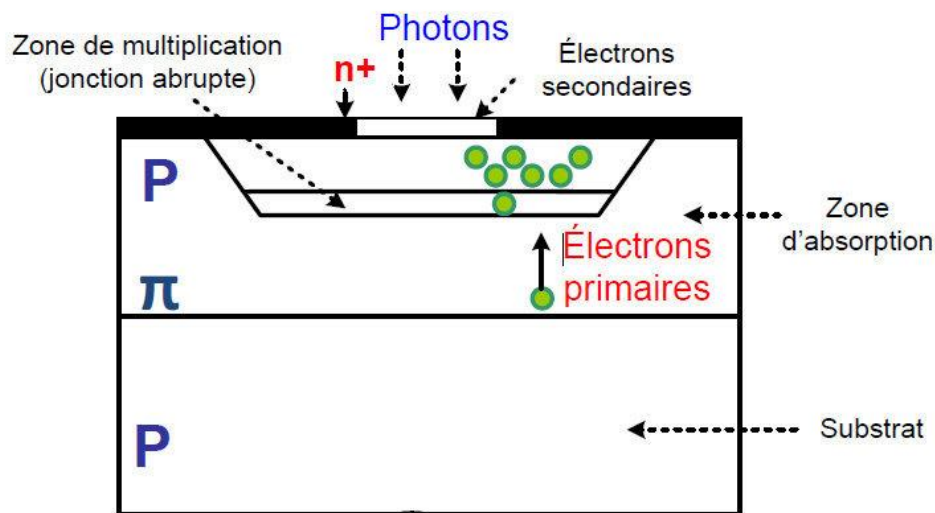


Figure 1.6: Structure d'une photodiode à avalanche APD [32].

Lorsque la puissance lumineuse reçue est extrêmement faible, les courants détectés deviennent également faibles ce qui peut entraîner un rapport signal/bruit peu satisfaisant. Pour améliorer ce rapport, il est nécessaire d'augmenter le courant détecté en utilisant des photodiodes spéciales, telles que les photodiodes à avalanche qui offrent un gain interne. Les photodiodes à avalanche sont des dispositifs dans lesquels une amplification de puissance est réalisée permettant ainsi d'obtenir un signal électrique plus fort même lorsque la puissance lumineuse est très faible. Elles sont choisies pour leurs performances supérieures leur gain élevé et leur réponse rapide. Cependant, elles présentent des inconvénients notamment leur coût plus élevé, leur manipulation plus délicate et leur nécessité d'une polarisation inverse particulièrement forte [8].

1.5 Composant clés : La fibre optique

Une fibre optique fonctionne comme un conduit étroit qui achemine la lumière d'un point à un autre. Elle capture le signal lumineux à une extrémité et le guide jusqu'à l'autre extrémité.

Même en cas de courbure, la perte de lumière est minimale. La fibre se compose de trois couches distinctes : le cœur, le revêtement et la gaine.

Le cœur : c'est la partie centrale de la fibre optique où la lumière se propage.

La gaine : la gaine entoure le cœur de la fibre permet de confiner la lumière dans le cœur en réfléchissant les rayons lumineux vers l'intérieur de la fibre.

Le revêtement : est une couche de polymère qui recouvre la gaine et protège la fibre optique, contre les dommages mécaniques [9].

1.5.1 Structure et fonctionnement de la fibre optique

Une fibre optique se présente sous la forme d'un cylindre en verre, composé d'une partie centrale appelée le cœur ayant un indice de réfraction $n_{\text{cœur}}$ entourée par une gaine optique, ayant un indice de réfraction n_{gaine} plus faible.

Ces deux régions sont cruciales pour le guidage de la lumière et sont fabriquées à partir de matériaux distincts. En général, la fibre optique est revêtue d'une couche protectrice qui ne joue aucun rôle dans le guidage de la lumière. Le matériau de base le plus courant pour la fabrication des fibres optiques est la silice, qui est similaire au verre et se compose principalement de silicium (Si) et d'oxygène (O), avec une formule chimique SiO_2 la **figure 1.7** représente la structure d'une fibre optique [10].

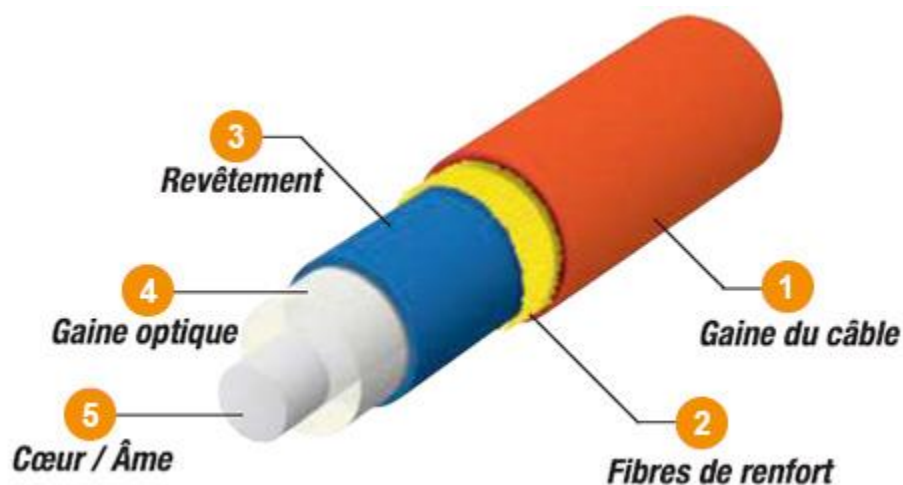


Figure 1.7: Structure d'une fibre optique [33].

Ce composé est présent dans divers minéraux naturels tels que le quartz. Le processus de fabrication d'une fibre optique repose sur l'étirage d'une préforme en verre. Grâce à des techniques sophistiquées, il est possible d'étirer un tube de verre initialement long d'un mètre et large de 10 cm pour le transformer en une fibre optique d'une longueur de 150 km [10].

Lorsqu'un faisceau lumineux pénètre dans une fibre optique par l'une de ses extrémités avec un angle approprié, il subit une série de réflexions totales internes. Ce faisceau se propage alors à travers la fibre jusqu'à son autre extrémité sans subir de perte significative suivant un trajet en zigzag. L'ouverture numérique (ON) d'une fibre optique est définie comme le produit de sinus de l'angle d'ouverture maximal de la fibre et de l'indice de réfraction, détermine la capacité de la fibre à guider la lumière sans pertes ; cet angle est mesuré par rapport à l'axe de la fibre [11].

$$ON = \sin \theta_{max} = \sqrt{n_{coeur}^2 - n_{gaine}^2} \quad 1.1$$

n_{coeur} : Indice de réfraction du cœur

n_{gaine} : Indice de réfraction de la gaine

θ_{max} : Angle d'acceptance maximum

Les rayons lumineux qui tombent à l'intérieur du cône d'acceptance sont réfractés à l'interface cœur-gaine de la fibre et se propagent à travers le cœur selon le principe de la réflexion total interne. Si le diamètre du cœur est assez large plusieurs modes de propagation sont possibles et la fibre est dite multimode (MMF, Multi mode Fibre) avec un diamètre de cœur variant entre 50 et 85 μm comme le montre la **figure 1.8** [11].

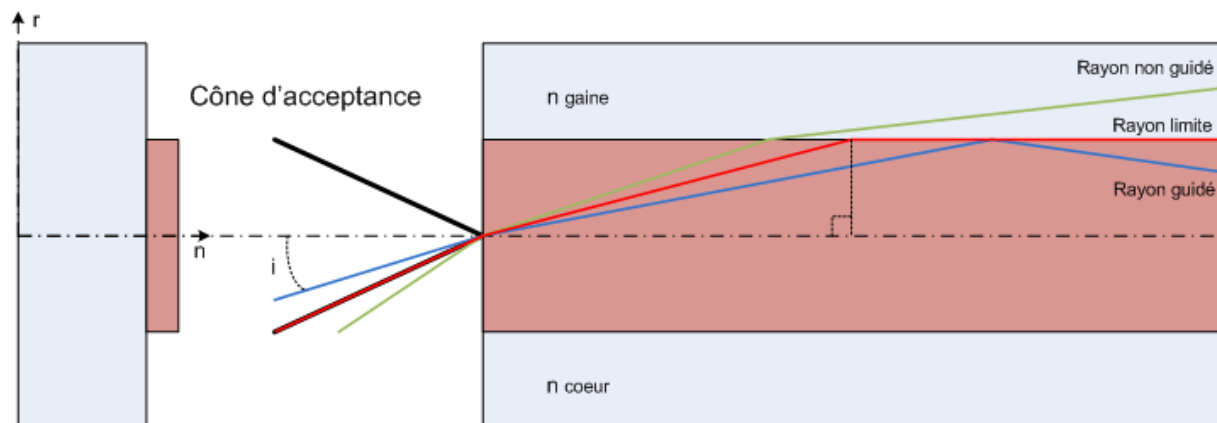


Figure 1.8: Transmission sur fibres optiques [34].

Tel que :

i : Angle d'incidence

r : Rayon réfracté

n : Indice de réfraction

Elle est principalement utilisée dans les réseaux locaux couvrant de courtes distances. Les données à transmettre sont généralement émises par une diode électroluminescente (DEL ou LED) à une longueur d'onde de 850 ou 1300 nm.

En revanche, lorsque le cœur de la fibre est mince par rapport à la longueur d'onde de la transmission, seul un mode de propagation est possible. On parle alors de fibre monomode (SMF, Single Mode Fibre), caractérisée par un cœur très fin d'environ 9 μm de diamètre. Dans ce cas, la transmission des données est assurée par des lasers optiques émettant à des longueurs

d'onde comprises entre 1300 et 1550 nm, avec des amplificateurs optiques disposés à intervalles réguliers [11].

1.5.2 Classification des fibres optiques

Il y a deux catégories principales de fibres optiques :

- ❖ **Fibres multimodes** : Elles permettent à la lumière de se propager selon différents modes à l'intérieur du cœur de la fibre.
- ❖ **Fibres monomodes** : Est un type de fibre conçue pour permettre le passage d'un seul mode de lumière [12].

1.5.2.1 Fibres multimodes

Les fibres multimodes furent pionnières sur le marché, se distinguant par leur capacité à acheminer simultanément plusieurs modes représentant divers trajets lumineux. Toutefois, leur utilisation se trouve restreinte par la présence de dispersion modale qui induit un étirement temporel du signal lumineux. Par conséquent, ces fibres sont principalement employées dans des contextes nécessitant des débits modestes et des distances limitées. Il est possible de réduire cette dispersion à une longueur d'onde spécifique en instituant un gradient d'indice au sein du cœur de la fibre.

Notamment, les fibres multimodes se distinguent par leur diamètre de cœur, qui peut varier de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de micromètres typiquement établi à 50 ou 62.5 microns pour les applications requérant des débits modestes [12].

1.5.2.1.1 Fibre à saut d'indice

Les fibres optiques à saut d'indice se distinguent par la présence d'un noyau transparent à indice de réfraction constant, entouré d'une gaine plus sombre. Cette configuration provoque la réflexion du rayon lumineux à l'interface des deux matériaux. La réflexion qui en résulte modifie le chemin optique, ce qui peut entraîner une dispersion du signal à la sortie[13].

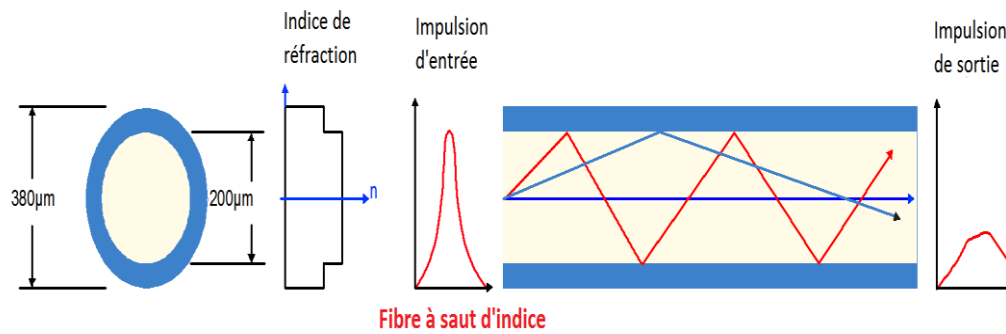


Figure 1.9: Fibre multimode à saut d'indice [35].

1.5.2.1.2 Fibre à gradient d'indice

Dans les fibres à gradient d'indice, l'indice de réfraction évolue de manière progressive depuis le centre jusqu'à la gaine, induisant ainsi une trajectoire plus sinusoïdale pour les rayons lumineux qui s'écartent du centre. Cette évolution conduit à une moindre déviation des rayons lumineux à mesure qu'ils s'éloignent du centre.

En conséquence, la variation du chemin optique est moins prononcée notamment en raison du diamètre plus restreint du cœur, par cette variation d'indice l'étalement du signal est donc atténué [13].

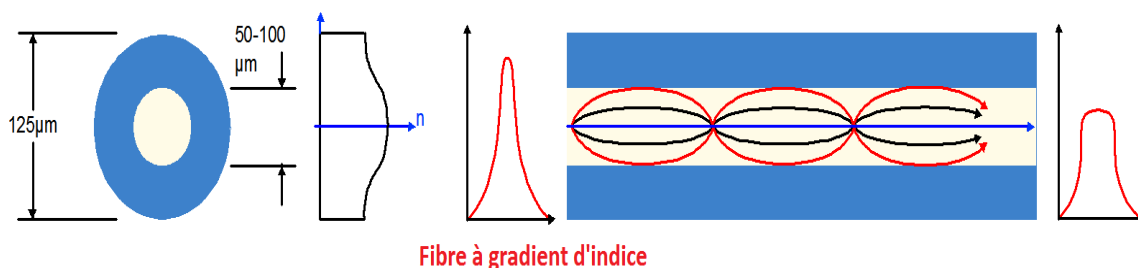


Figure 1.10: Fibre multimode à gradient d'indice [36].

1.5.2.2 Fibres monomodes

Pour les transmissions nécessitant des distances plus importantes et/ou des débits plus élevés, l'utilisation de fibres monomodes (SMF pour "Single Mode Fibre") est recommandée. Ces fibres, plus avancées sur le plan technologique en raison de leur finesse offrent un cœur extrêmement étroit qui ne permet le passage que d'un seul mode de propagation, suivant ainsi une trajectoire directe le long de l'axe de la fibre. Cette caractéristique permet de minimiser les pertes, car il y a moins de réflexions par rapport à une fibre multimode. Les fibres monomodes

conviennent parfaitement aux transmissions à très haut débit sur de très longues distances, telles que les lignes intercontinentales par câble sous-marin [14].

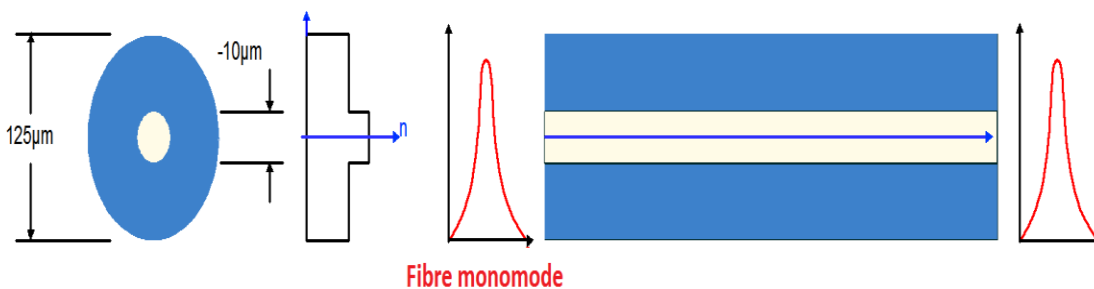


Figure 1.11: Fibre monomode [37].

1.6 Avantages et inconvénients

Avantages

- La fibre optique est complètement résistante aux rayonnements électromagnétiques environnants.
- L'affaiblissement du signal est moindre par rapport à celui d'un conducteur électrique, et les distances parcourues sans nécessité d'installer des amplificateurs sont considérablement accrues.
- La bande passante offerte est généralement bien plus étendue que celle atteignable avec un câble électrique.
- Les pertes sont minimales avec une atténuation du signal pouvant atteindre environ 0,2 dB/km pour une longueur d'onde de 1,55 μm, permettant ainsi des communications optiques sur des distances dépassant 100 km sans nécessité d'amplification intermédiaire, réduisant ainsi les coûts de maintenance.
- La bande passante est considérablement élevée, permettant le transfert de signaux digitaux jusqu'à 5 Tb/s sur des distances atteignant 1500 km.
- Les fibres optiques jouissent d'une immunité au bruit, étant des isolants assurant ainsi une transmission sans perturbation due à des signaux électromagnétiques externes.
- Il n'y a aucun rayonnement externe émis par la fibre optique, garantissant ainsi une isolation complète entre l'émetteur et le récepteur, prévenant toute perturbation électromagnétique.
- En raison de leur caractère isolant les fibres optiques ne provoquent pas de court-circuit en cas de contact accidentel entre deux fibres, éliminant ainsi tout risque d'étincelles dans des environnements inflammables.

- Les fibres optiques résistent mieux aux températures élevées et aux produits corrosifs que le cuivre avec une capacité à supporter des températures pouvant atteindre environ 800°C.
- Les fibres optiques présentent un poids et des dimensions réduits par rapport aux câbles en cuivre de même capacité, offrant ainsi un avantage significatif lors de leur installation [15].

Inconvénients

- L'installation des réseaux de fibre optique peut être plus complexe que celle des câbles en cuivre, bien que des exceptions puissent être faites pour des installations aériennes sur des poteaux dans certains cas spécifiques.
- Les sources lumineuses à faible puissance sont préférées en raison de limitations de puissance, bien que des émetteurs à haute puissance puissent être disponibles moyennant des coûts supplémentaires, pouvant entraîner des dépenses élevées.
- Les câbles de fibre optique sont sensibles aux attaques physiques ; il est donc recommandé d'éviter de tordre ou de plier les câbles optiques pour prévenir tout risque de dommage, contrairement aux câbles en cuivre qui sont plus robustes [15].

1.7 Applications de la fibre optique

L'optique domaine des sciences physiques, explore les propriétés et le comportement de la lumière ainsi que son interaction avec la matière, englobant à la fois les aspects photoniques et électromagnétiques.

Le génie optique résume un large éventail de sciences appliquées liées à l'optique, incluant à la fois les principes optiques classiques et modernes.

Parmi ces disciplines la fibre optique s'est particulièrement démarquée grâce à ses nombreuses applications variées [16] :

-Dans le domaine des télécommunications

Les utilisations initiales de la fibre optique ont principalement concerné les liaisons urbaines à haute capacité, ainsi que les liaisons transocéaniques sous-marines, et les liaisons côtières sans répéteurs.

Par la suite, les liaisons terrestres régionales, nationales et internationales ont connu un essor significatif favorisé par l'entrée de nouveaux opérateurs sur le marché. Il est crucial de noter que ce secteur est sujet à des cycles marqués bien que depuis 2008, une forte croissance ait été observée principalement dans les pays émergents et sur les liaisons internationales.

Le déploiement des réseaux mobiles notamment avec l'avènement de la 3G puis de la 4G, a également contribué à l'importance croissante de la connexion des stations de base [16].

-Dans le domaine des réseaux d'accès

Malgré les expériences initiées dès les années 1980 pour permettre l'accès des abonnés aux services de vidéocommunication et à large bande via la fibre optique, ces réseaux ont longtemps stagné en raison de leurs coûts et de la concurrence de l'ADSL.

Cependant, depuis le début des années 2000 la demande croissante en débits d'accès élevés a ravivé ce marché en particulier avec le déploiement des réseaux FTTx (Fiber To The x), dépassant les 80 millions d'abonnés en 2013 avec une prédominance en Asie [16].

-Les liaisons et réseaux de données

Ont rapidement adopté l'utilisation de fibres optiques, même sur de courtes distances en raison des avantages tels que l'isolement électrique et l'insensibilité aux perturbations électromagnétiques. Les réseaux à haut débit comme Fiber Channel ou Ethernet à 1 et 10 Gbit/s ont été conçus en tenant compte de l'utilisation de la fibre optique et sont désormais étendus à des dimensions métropolitaines, coexistant sans difficultés techniques avec d'autres infrastructures telles que les réseaux ferroviaires ou de transport d'électricité.

En 2009, l'IEEE a standardisé le 100 Gbit/s utilisant de nouvelles techniques de modulation et de multiplexage [16].

-Les applications industrielles et embarquées

Font également un large usage de la fibre optique, en raison de son insensibilité aux parasites notamment dans les domaines de la télémétrie, de la surveillance vidéo et des réseaux de communication automobile et aéronautique [16].

-Les interconnexions optiques

Gagnent en importance avec la parallélisation croissante des architectures électroniques et informatiques, ainsi que l'augmentation des fréquences sur les bus. Les supports optiques sont de plus en plus utilisés pour interconnecter les différentes composantes des systèmes

informatiques et des équipements embarqués, ainsi que pour les architectures multiprocesseurs [16].

-Les applications industrielles et embarquées

Font également un large usage de la fibre optique, en raison de son insensibilité aux parasites notamment dans les domaines de la télémétrie, de la surveillance vidéo et des réseaux de communication automobile et aéronautique [16].

-Les capteurs et l'instrumentation

Sont des dispositifs qui détectent et mesurent des changements physiques puis les convertissent en signaux exploitables, ainsi que pour des applications nécessitant une intégration dans des matériaux ou des structures, ou une haute sécurité et une immunité électromagnétique [16].

-Le transport de lumière à des fins éclairages

De visualisation, d'endoscopie, ainsi que pour le transport de faisceaux laser dans divers domaines industriels, médicaux et énergétiques bénéficie des progrès technologiques réalisés dans le domaine des fibres optiques améliorant leurs performances tout en réduisant leurs coûts [16].

1.8 Défis de transmission et solution

1.8.1 Atténuation

L'affaiblissement ou l'atténuation de la puissance transmise représente l'une des principales difficultés rencontrées dans les systèmes de transmission. Cela se manifeste par une diminution du signal au cours de sa propagation, due à des phénomènes tels que Gbit/s ont été conçus en tenant compte de l'utilisation de la fibre optique et sont désormais étendus à des dimensions métropolitaines, coexistant sans difficultés techniques avec d'autres infrastructures telles que les réseaux ferroviaires ou de transport d'électricité.

En 2009, l'IEEE a standardisé le 100 Gbit/s utilisant de nouvelles techniques de modulation et de multiplexage [17].

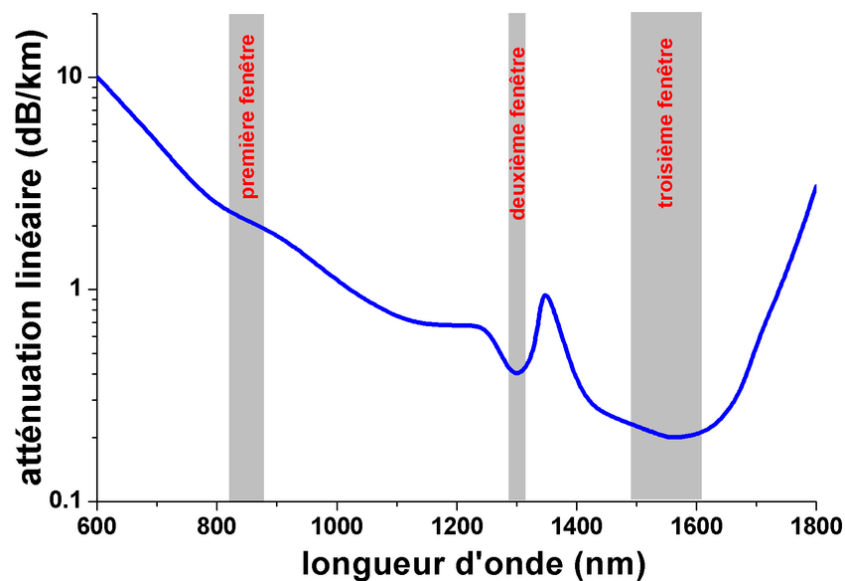


Figure 1.12: Atténuation linéaire d'une fibre optique monomode [38].

L'atténuation dans les fibres optiques résulte de divers mécanismes. Tout d'abord, l'absorption intrinsèque du matériau constituant la fibre entraîne une augmentation significative des pertes aux longueurs d'onde plus courtes [18].

1.8.2 Dispersion

La dispersion fait référence à divers processus qui induisent des écarts dans le temps de propagation des différents modes lumineux, ce qui entraîne une diminution de l'amplitude des fréquences élevées et provoque un étirement temporel des impulsions. La capacité de transmission d'une fibre optique est directement liée à la quantité d'impulsions lumineuses pouvant être transmises par unité de temps.

Lorsque les impulsions se propagent dans une fibre, elles subissent un élargissement temporel connu sous le nom de dispersion temporelle, susceptible de provoquer la fusion de deux impulsions distinctes à la sortie. Par exemple, lorsqu'une impulsion lumineuse très fine est injectée dans une fibre optique, elle stimule tous les modes de propagation de la fibre, ce qui élargit l'impulsion dans le domaine temporel, un phénomène appelé dispersion intermodale.

Si l'intervalle entre deux impulsions est trop court, les signaux peuvent se chevaucher à la sortie, générant des interférences entre les symboles, également connues sous le nom d'interférences entre symboles (ISI). Ainsi, l'élargissement des impulsions nécessite d'augmenter l'intervalle de temps entre les impulsions successives, ce qui réduit la capacité de transmission de la fibre.

Dans le cas des fibres multimodes à saut d'indice, on observe principalement deux formes de dispersion : la dispersion modale ou intermodale, due à la différence dans les temps de propagation des différents modes, et la dispersion chromatique ou intramodale, causée par la variation du temps de propagation de chaque mode en fonction de sa fréquence et, par conséquent, de sa longueur d'onde [7].

1.8.2.1 Dispersion chromatique

La dispersion chromatique (CD, Chromatic Dispersion) désigne l'élargissement temporel subi par un signal lumineux lors de sa propagation dans un milieu. Cet élargissement limite le débit de données dans les systèmes de communication optique, car il nécessite d'augmenter le délai entre deux impulsions lumineuses successives, plusieurs facteurs contribuent à cet élargissement.

Dans le cas de la propagation dans une fibre multimode, les vitesses de groupe des différents modes ne sont pas uniformes pour une longueur d'onde donnée, ce qui engendre ce que l'on appelle la dispersion intermodale.

La dispersion chromatique est également causée par le fait que l'indice de réfraction d'un milieu varie en fonction de la longueur d'onde, tandis que les sources lumineuses utilisées pour transmettre le signal ne sont pas parfaitement monochromatiques, donnant lieu à ce qu'on appelle la dispersion intramodale ou chromatique [19].

Lorsque qu'une impulsion se propage à travers une fibre optique en régime linéaire, elle est soumise à un phénomène de dispersion se manifestant par un élargissement temporel de l'impulsion, comme illustré dans la **figure 1.13** [26].



Figure 1.13: Evolution de l'impulsion pendant sa propagation dans la fibre optique [39].

Dans les fibres monomodes où la lumière se propage dans un seul mode de propagation il existe deux principaux facteurs de dispersion chromatique : la dispersion du matériau D_m et la dispersion du guide D_g [19].

- a) **La dispersion du matériau D_m** : est causé par les propriétés du matériau constituant la fibre optique. Une impulsion lumineuse provenant d'une source optique se compose en réalité de multiples longueurs d'onde. Cela signifie que certaines longueurs d'onde atteignent leur destination plus rapidement que d'autres, ce qui entraîne un étirement de l'impulsion lumineuse dans le temps.

Par exemple, pour la silice D_m varie d'environ -100 ps/km/nm à 0,85 μm à +25 ps/km/nm à 1,55 μm , s'annulant à 1,27 μm [19].

- b) **La dispersion du guide D_g** : quant à elle est due à la structure géométrique spécifique du guide d'onde et dépend des paramètres de la fibre. Elle est toujours négative et varie en fonction de la fréquence normalisée V qui à son tour dépend de la longueur d'onde λ . La dispersion du matériau D_m est donnée par [20,21] :

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{mat}(\lambda)}{d\lambda^2} \quad 1.2$$

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

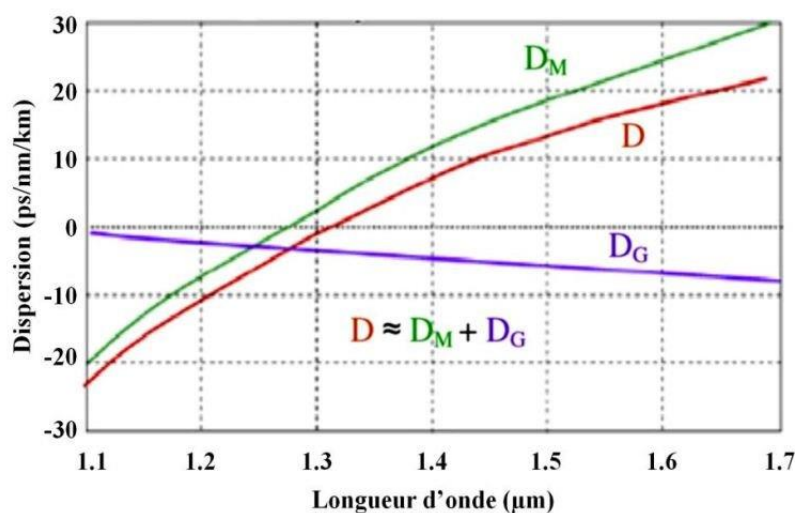


Figure 1.14: Contribution de la dispersion matérielle (en vert) et de la dispersion guidée (en violet) [40].

La dispersion chromatique D est donc la somme de D_m et D_g :

$$D = D_m + D_g \quad 1.3$$

Dans la plage du proche infrarouge, la dispersion dans la silice pour les longueurs d'ondes croissantes montre d'abord une tendance négative ce qui correspond à ce qu'on appelle la dispersion normale. Cette dispersion atteint un point de zéro aux environs de 1310 nm, connu sous le nom de zéro de dispersion avant de devenir positive caractérisant alors ce qu'on appelle la dispersion anormale.

Le zéro de dispersion revêt une importance particulière, car à cette longueur d'onde théoriquement les signaux ne subissent pas de distorsion.

Les fibres optiques monomodes standards présentent une dispersion chromatique d'environ 17 picosecondes par kilomètre par nanomètre autour de 1500 nm. Cette information est cruciale pour comprendre et caractériser les performances des fibres optiques dans les systèmes de communication optique [20].

1.8.2.2 Dispersion modale

La dispersion intermodale également connue sous le nom de dispersion modale, représente la principale source de dispersion dans les fibres multimodes et elle a un impact direct sur la distance de transmission et le débit des informations.

Cette dispersion est spécifique aux fibres multimodes et est absente dans les fibres monomodes. Elle se manifeste par une différence de temps de propagation de la lumière à travers la fibre en fonction des chemins empruntés [7].

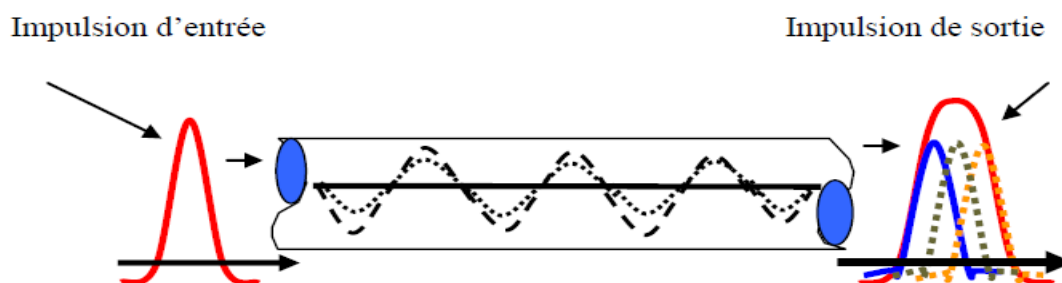


Figure 1.15: Dispersion modale [41].

Dans le cas d'une fibre multimode à saut d'indice, où seules les longueurs de trajet de chaque mode varient tandis que les vitesses demeurent constantes il est possible de calculer la

largeur maximale de l'impulsion reçue. Cette compréhension est cruciale pour concevoir des systèmes de communication optique efficaces [10].

1.8.3 Solutions pour l'élimination de l'atténuation et la dispersion

1.8.3.1 Amplification optique

L'utilisation d'un amplificateur optique offre une solution permettant de contourner les limitations imposées par l'atténuation naturelle de la fibre optique. En effet, grâce à l'amplification la puissance du signal lumineux transmis peut-être considérablement accrue, permettant ainsi de compenser les pertes survenues pendant la transmission.

Il est à noter qu'avec cette amplification vient également l'introduction de bruit dans le signal. Malgré cela, cette approche a donné naissance au concept de système "amplifié", qui est étroitement lié à la technique de multiplexage en longueur d'onde [8].

Cette technique d'amplification repose sur un principe fondamental : l'émission stimulée. Elle implique une amplification directe d'un flux de photons, favorisée par l'introduction d'énergie externe communément appelée "pompage".

Ce pompage crée une inversion de population dans un guide qu'il s'agisse d'un semi-conducteur ou d'une fibre optique, cette inversion de population permet la recombinaison électron-trou, déclenchée par l'incidence d'un photon externe. Cette recombinaison génère alors un deuxième photon entraînant ainsi une amplification du signal initial, il convient de noter que plusieurs mécanismes interviennent dans le processus d'amplification optique, chacun contribuant à l'efficacité globale de l'amplification [8].

1.8.3.2 Le multiplexage en longueur d'onde

(WDM pour l'anglais "Wavelength Division Multiplexing") est une technique de transmission optique qui permet d'envoyer simultanément plusieurs signaux optiques sur une seule fibre en utilisant différentes longueurs d'onde pour chaque signal. Chaque longueur d'onde correspond à une porteuse optique portant un débit spécifique.

Ainsi, la bande passante disponible est divisée en plusieurs sous-bandes chacune dédiée à une voie de transmission distincte. Pour mettre en œuvre le multiplexage WDM il est nécessaire d'avoir un ensemble de diodes laser émettant des longueurs d'onde légèrement différentes mais suffisamment proches pour éviter tout chevauchement lors de la propagation.

Un dispositif appelé multiplexeur/démultiplexeur optique est alors utilisé pour combiner les signaux optiques en entrée dans la fibre et les séparer à la sortie. La fibre optique peut transporter un débit total égal au produit du nombre de signaux (N) par le débit individuel de chaque signal (D_b). Cette capacité de combiner plusieurs signaux optiques sur une seule fibre permet d'augmenter considérablement la capacité de transmission du système, ce qui est souvent désigné comme la capacité du système. Le multiplexage en longueur d'onde est largement utilisé dans les réseaux de télécommunications pour répondre aux besoins croissants en bande passante et en débit de données [3].

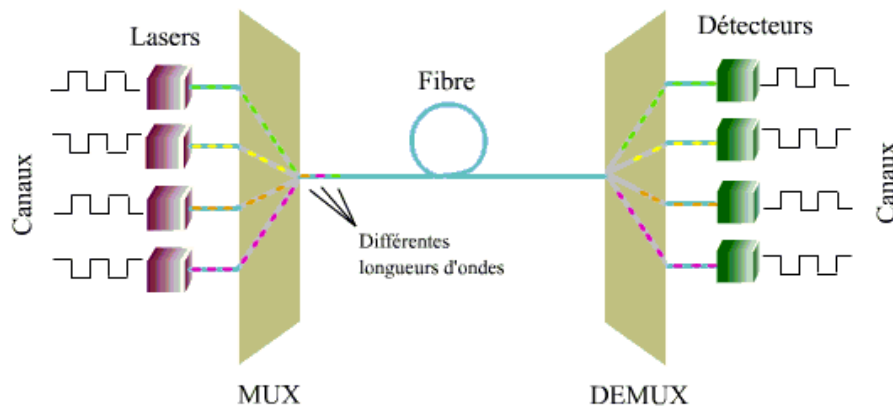


Figure 1.16: Schéma de principe du multiplexage en longueur d'onde [42].

Il existe plusieurs types de WDM : WDM large, WDM dense et WDM ultra-dense. La variation entre ces modes se situe principalement dans l'espacement des canaux optiques utilisés. Voici un tableau qui présente en détail les caractéristiques des modes WDM les plus couramment utilisés [3] :

	Coarse-WDM	Dense-WDM	Ultra-Dense-WDM
Nombre de longueur d'onde	Jusqu'à 16	8 à 128	> 400
Espacement des canaux	20nm à 25nm	0.4nm à 1.6nm	0.08nm
Fenêtre spectrale	~ 1260nm - 1620nm	~ 1500nm - 1600nm	~ 1500nm - 1600nm
Débit par longueur d'onde	1,25 - 2,5 Gbit/s	10Gbit/s - 40Gbit/s	> 40Gbit/s

Tableau 1: Caractéristiques du multiplexage en longueur d'onde [22].

1.9 Technologies de compensation de la dispersion chromatique

La méthode de compensation de dispersion à l'aide de fibres compensatrices (DCF) vise à réduire les effets néfastes de la dispersion le long des liaisons optiques. Ces fibres, caractérisées par une dispersion négative, sont intentionnellement insérées dans la liaison pour annuler la dispersion accumulée. En d'autres termes, un module de compensation de dispersion est équilibré par une fibre d'une longueur spécifique présentant une dispersion de signe opposé à celle de la fibre de transmission.

Pour contrer efficacement la dispersion accumulée sur toute la ligne de transmission, des fibres dédiées à cette fonction, connues sous le nom de fibres à compensation de dispersion (DCF), sont utilisées. Cette approche permet une gestion continue de la dispersion sur l'ensemble du système, réduisant ainsi les interactions indésirables entre la dispersion et les effets non linéaires.

$$D_{SMF} \cdot L_{SMF} = -D_{DCF} \cdot L_{DCF} \quad 1.4$$

Où (D_{SMF} , D_{DCF} , L_{SMF} , L_{DCF}) sont les paramètres de dispersion qui doivent être ajustés avec précision de manière à ce que la dispersion générée par la fibre standard (D_{SMF} , L_{SMF}) soit compensée par la fibre à compensation de dispersion (DCF) tout au long de la transmission [26].

1.9.1 Fibres compensatrices à dispersion chromatique (DCF)

La fibre compensatrice de dispersion ou DCF est une fibre conçue pour annuler la dispersion chromatique qui résulte de la variation de l'indice de réfraction et de la vitesse de groupe du signal en fonction de la longueur d'onde lors de sa propagation dans une fibre monomode.

Son rôle consiste à minimiser les effets néfastes de la dispersion chromatique dans les systèmes de communication optiques. Cela se réalise en choisissant soigneusement le profil d'indice de la fibre. Elle est généralement fabriquée avec un profil de dispersion opposé à celui de la fibre de transmission principale, de sorte que les deux dispersions se compensent mutuellement [23]. Les fibres compensatrices à dispersion chromatique offrent une solution efficace pour surmonter les limitations dues à la dispersion chromatique dans les réseaux de communication optique [24].

1.9.2 Réseau Bragg

Une fibre à réseau de Bragg est une microstructure optique de quelques millimètres, basée sur le principe de la dispersion par une structure périodique. Cette configuration présente une variation locale périodique de la constante de propagation, induite par une variation périodique de l'indice de réfraction du guide d'onde. Cette distribution périodique crée une série de miroirs diélectriques spécifiques à certaines longueurs d'onde. Ainsi, ces réseaux offrent une sélectivité spectrale notable en contrôlant la vitesse de propagation et les caractéristiques dispersives du matériau où la lumière se propage. Cette capacité permet de moduler la vitesse de la lumière, de la ralentir voire de l'arrêter brièvement.

Ces caractéristiques uniques ont conduit à la conception et au développement de nouveaux composants optiques qui jouent un rôle crucial dans l'amélioration des capteurs à fibres optiques [25].

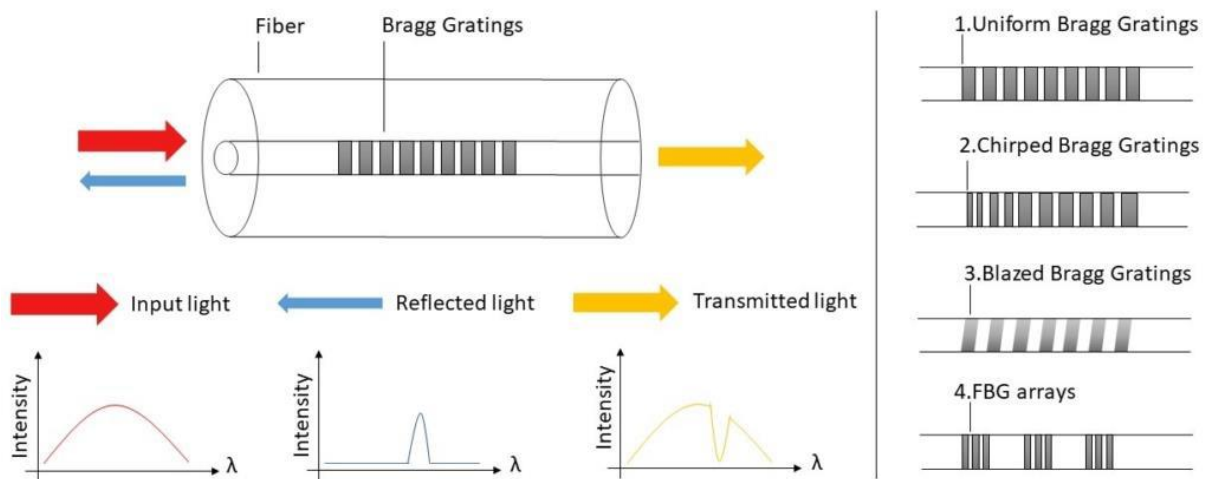


Figure 1.17: Réseaux de Bragg (FBG sur fibre optique) [43].

Conclusion

À travers le premier chapitre consacré aux fondements des communications optiques, nous avons posé les bases théoriques et pratiques essentielles pour comprendre le fonctionnement des systèmes optiques. En explorant les émetteurs, récepteurs, et la structure des fibres optiques nous avons jeté les fondations à notre étude. Ces connaissances sont cruciales pour comprendre et concevoir efficacement des systèmes de communications optiques.

Dans le deuxième chapitre, nous abordons les applications des réseaux de Bragg qui mettra en lumière les nombreuses façons dont les réseaux de Bragg façonnent notre monde moderne grâce à leur capacité à manipuler et à contrôler la lumière de manière précise et efficace. Nous discuterons des principes de fonctionnement des réseaux de Bragg, de leur fabrication, et de leur utilisation dans diverses applications telles que la télémétrie, les capteurs, et les filtres optiques. Les réseaux de Bragg représentent une technologie clé dans l'optimisation de la performance et de la fiabilité des systèmes de communication optique.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] MOULAY Tahar mémoire de fin d'étude « ETUDE ET SIMULATION D'UNE CHAINE DE TRANSMISSION NUMERIQUE SUR FIBRE OPTIQUE HAUT DEBIT » soutenu en 2017.
- [2] MAURY Julien thèse « ETUDE ET CARACTERISATION D'UNE FIBRE OPTIQUE AMPLIFICATRICE ET COMPENSATRICE DE DISPERSION CHROMATIQUE » soutenu le 26 novembre 2003.
- [3] DELLAL Anes & ESSAFI Elamin « ETUDE DE L'AMPLIFICATION DANS LES SYSTEMES DE TRANSMISSION PAR FIBRE OPTIQUE : INT&TIC » soutenu en Juin2010.
- [4] BILLAMI Hanane et BENDAHMANE Raouida « ETUDE D'UN RESEAU OPTIQUE ADM 10 GBIT /S » soutenu en 2013.
- [5] G. Mahlke et P. Gössing « Câbles à fibres optiques » Siemens Aktiengesellschaft et TEKNEA, 1989.
- [6] Eduardo PEREZ VALENZUELA Carlos, thèse l'école nationale supérieure des télécommunications de Bretagne en habilitation conjointe avec l'université de Bretagne sud « FORMATS DE MODULATION POUR LES TELECOMMUNICATIONS OPTIQUES » soutenue le 13 Mars 2006.
- [7] P. Lecoy, Télécoms sur fibres optiques, Lavoisier troisième édition revue et augmentée, 2008.
- [8] MIKKELSEN et al « Monolithic integrated Michelson interferometer with SOA's for high speed all-optical signal processing Proc » Optical Fiber Communications, San Diego, TuH4, February 1995.
- [9] A. Mammam, A.SAYAH et Y. TAMER, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master académique, « Etude Et Simulation D'un Système De Transmission Optique Cohérent » Année Universitaire 2019-2020, pp : 6-9.11-16.
- [10] Les Fibres optiques, Dossier technique, Thème d'autonomie 1999.

- [11] E. Wu, a thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of master of science in physics, « MEASURING CHROMATIC DISPERSION OF SINGLE-MODE OPTICAL FIBRES USING WHITE LIGHT INTERFEROMETRY », the university of auckland, 2006.
- [12] GISIN N, PASSY, BISHOFF J.C and PERNY B, « EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE STATISTICAL PROPERTIES OF POLARIZATION MODE DISPERSION IN SINGLE MODE FIBERS », IEEE Photonics Technology Letters, July 1993, Vol. 5, n°7, pp. 819-821.
- [13] Badreddine Boubir « ETUDE ET OPTIMISATION DES DIFFERENTS PARAMETRES D'UN AMPLIFICATEUR A FIBRE OPTIQUE DOPEE AVEC DES IONS DE TERRES RARES », université d'Annaba, pp 10-11,2009.
- [14] Projet de fin cycle « Analyse Numérique Et Etude Spectrale De Réseaux De Bragg A Fibre : Compensation De La Dispersion Chromatique Dans Une Ligne De Transmission Optique », université de Blida 1,2019.
- [15] Thèmes Actuels En Optique Maurice FRANCON Pr émérite à l'université Pierreet Marie CURRIE. Masson Paris, New York, Barcelone, Milan, Mexico, Saopaulo.
- [16] Direction éditoriale : Emmanuel Leclerc Édition : Céline Poiteaux Fabrication : Estelle Perez Couverture : Isabelle Godenèche Composition : Nord Compo, Villeneuve-d'Ascq
Image de couverture : © zentilia – Fotolia.com © 2015, Lavoisier, Paris ISBN : 978-2-7462-4660-7.
- [17] W. Daum, J. Krauser, P. E. Zamzow et O. Ziemann. POF Handbook « OPTICAL SHORT RANGE TRANSMISSION SYSTEMS » Springer, deuxième édition, 2008.
- [18] J.L.VERNEUIL, thèse de doctorat «SIMULATION DE SYSTEMES DE TELECOMMUNICATIONS PAR FIBRE OPTIQUE A 40 GBIT/S » de l'université de Limoges, novembre 2003.
- [19] Benoît Clouet thèse présentée devant l'université de rennes i, pour obtenir le grade de docteur de l'université de Rennes I Mention : sciences physiques par, FOTON-ENSSAT école nationale supérieure de sciences appliquées et de technologie école doctorale : sciences de la

matière, « ÉTUDE DE LA DISPERSION MODALE DE POLARISATION DANS LES SYSTEMES REGENERES OPTIQUEMENT » en 2009.

[20] F. Baribeau, d'onde' mémoire présenté à la faculté des études supérieures de l'université Laval pour l'obtention du grade de maître des sciences (M.Sc.) « GUIDE D'ONDE EFFILE COMME COMPENSATEUR DE DISPERSION CHROMATIQUE DANS LES SYSTEMES DE COMMUNICATIONS MULTI- LONGUEURS » en Avril, 2001.

[21] P. S. André, A. N. Pinto, J. L. Pinto, « EFFECT OF TEMPERATURE ON THE SINGLE MODES FIBERS CHROMATIC DISPERSION » Journal of Microwaves and Optoelectronics, 3 (2004) 64-70.

[22]https://igm.univmlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/multiplexage.html#wdm.

[23] Johannes Skaar these de doctorat « SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF FIBER BRAGG GRATINGS » Institut of optical research Sweden, 2001.

[24] Abdessamad B « LA COMPENSATION DE DISPERSION CHROMATIQUE POUR LES SYSTEMES DE TRANSMISSION HAUT DEBIT » Institut des Télécommunications Abdelhafidh Boussouf d'Oran, 2006.

[25] J. T. Kringlebotn, J.-L. Archambault, L. Reekie, and D. N. Payne. Er³⁺:yb³⁺ codoped « fiber distributed-feedback laser Opt » Lett., vol., 19:2101.2103, 1994.

[26] rapport tp02 compensation de la dispersion par dcf université hassiba benbouali de chlef, faculté de technologie département électronique, 2021/2022.

[27] <https://www.shutterstock.com/fr/search/fibre-optique>

[28] https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-principe-dun-systeme-de-transmission-par-fibre-optique_fig3_347439264 https://www.researchgate.net/figure/Schema-du-bloc-dun-emetteur-optique-OLT_fig27_340279100

[29] https://www.researchgate.net/figure/Schema-du-bloc-dun-emetteur-optique-OLT_fig27_340279100

[30] https://www.researchgate.net/figure/Structure-dune-photodiode-PIN_fig9_347439266

- [31] <http://for-ge.blogspot.com/2015/04/la-photodiode.html?m=1>
- [32] https://www.researchgate.net/figure/Structure-dune-photodiode-a-avalanche-APD_fig10_347439266
- [33] <http://www.tarluz.com/fr/optical-fiber/introduzione-alla-fibra-ottica/>
- [34] https://igm.univmlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/ouverturenumerique.html
- [35] https://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/types.html
- [36] https://www.researchgate.net/figure/4-Fibre-optique-multimode-a-gradient-dindice-12322-Fibre-optique-multimodes-a-saut_fig4_372523909
- [37] https://www.researchgate.net/figure/3-Fibre-optique-monomode_fig3_372523909?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoiX2RpcmVjdCJ9fQ
- [38] https://www.researchgate.net/figure/Attenuation-lineaire-dune-fibre-optique-monomode-SSMF-en-fonction-de-la-longueur_fig2_278631896
- [39] https://www.memoireonline.com/07/11/4631/m_Contrle-de-la-dispersion-chromatique-dans-les-fibres-optiques--cristaux-photoniques--profil-d6.html
- [40] https://www.researchgate.net/figure/12-Contribution-de-la-dispersion-materiau-en-vert-et-de-la-dispersion-induite-pas_fig10_339375028
- [41] <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/12909/1/Ms.Tel.Beldjilali%2BKhelladi.pdf>
- [42] <http://wapiti.enic.fr/commun/ens/peda/options/ST/RIO/pub/exposes/exposesrio2003ttnfa04/combet-guillaud/html/multiplexage.htm>
- [43] <https://www.idil-fibres-optiques.com/fr/product/reseaux-de-bragg-fbg-sur-fibre-optique/>



Chapitre 2 : Applications des réseaux de Bragg

Introduction

Les réseaux de Bragg (RB) sont des structures périodiques qui diffusent sélectivement la lumière selon la loi de Bragg. Leur utilisation s'étend à divers domaines tels que la photonique, les capteurs optiques et la conception de filtres optiques. Se sont émergés comme des dispositifs optiques remarquables, ouvrant la voie à des avancées significatives dans des domaines allant de la communication optique à la surveillance structurelle [3].

Ce chapitre examinera également les avancées récentes dans la fabrication et la conception de réseau de Bragg, ainsi que les défis et les opportunités futures dans ce domaine en constante évolution.

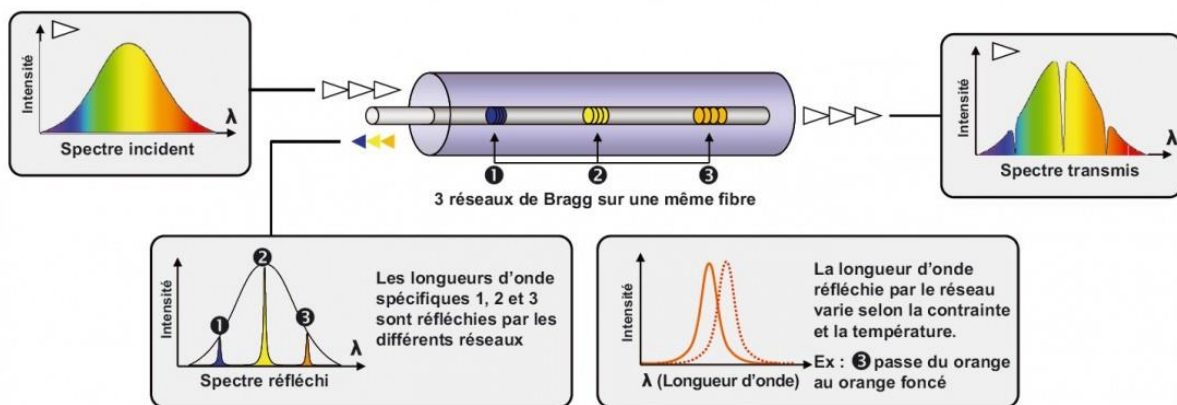


Figure 2.1: Trois réseaux de Bragg sur une même fibre [15].

2.1 Historique et développements des réseaux de Bragg

Les avancées dans la compréhension de la diffraction des rayons X par les structures cristallines ont permis l'établissement de la loi de Bragg par William Henri et son fils, William Lawrence Bragg, en 1915.

Toutefois, ce n'est qu'après plusieurs décennies que cette loi a été appliquée à l'étude de la réflexion des ondes lumineuses. Des expérimentations ultérieures sur la fibre optique ont révélé des constatations significatives à cette époque. Le Dr. K.O. Hill a observé qu'une partie du spectre injecté dans une fibre optique dopée au germanium peut provoquer une réflexion, engendrant ainsi une onde stationnaire et induisant une modulation périodique de l'indice de réfraction le long de l'axe de la fibre.

La principale conséquence de ces découvertes fut l'avènement du premier réseau de Bragg par K.O. Hill du CRC (Centre de recherche en communication) à Ottawa en 1978.

En 1993, une avancée majeure a été réalisée avec l'augmentation significative de la photosensibilité de la fibre optique grâce à un processus d'hydrogénation, permettant la

fabrication de réseaux de Bragg avec des réflectivités proches de 100% dans des fibres optiques standard [1].

L'année 1996 a marqué l'émergence des réseaux de Bragg à long pas, caractérisés par une modulation d'indice sur une échelle de quelques centaines de micromètres, ainsi que par leur capacité à filtrer les longueurs d'onde.

En 1997, le domaine des réseaux de Bragg était déjà bien développé, avec la publication d'articles de synthèse sur les techniques de fabrication, les applications et [2] les méthodes de modélisation associées.

À l'heure actuelle, les progrès technologiques continuent d'exiger des composants toujours plus précis, fiables et abordables. Les réseaux de Bragg à fibre optique, grâce à leurs nombreuses qualités, représentent une solution potentielle à ce défi technologique [3].

2.2 Fonctionnement et principes des réseaux Bragg

La fibre à réseau de Bragg peut être utilisée comme un filtre à bande étroite qui reflète non seulement une portion de la lumière centrée autour de la longueur d'onde du réseau de Bragg, mais plutôt une gamme de longueurs d'onde correspondant à sa structure périodique. Le reste du spectre lumineux traverse la fibre sans altération de ses propriétés jusqu'au prochain réseau de Bragg. La Figure 2.2 illustre la structure d'un réseau de Bragg, ainsi que les spectres transmis et réfléchis.

La longueur d'onde réfléchie par le réseau de Bragg est principalement déterminée par la période de la microstructure et l'indice de réfraction du noyau. En raison de sa symétrie, le réseau de Bragg réfléchit toujours la lumière à la même longueur d'onde, quelle que soit sa source d'origine. Des capteurs spécifiques basés sur des réseaux de Bragg avec des longueurs d'onde prédéterminées peuvent être installés en série le long d'une même ligne optique, souvent jusqu'à un total de 16 capteurs [4]. Le principe des réseaux de Bragg repose sur la condition de Bragg, exprimée par la formule [7] :

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda \quad 2.1$$

Où :

λ : La longueur d'onde de la lumière réfléchie.

n_{eff} : L'indice de réfraction effectif (dans le cœur de la fibre).

Λ : est la période de la modulation d'indice.

La **figure 2.2** illustre le principe de fonctionnement des réseaux de Bragg qui repose sur le principe de la diffraction et de l'interférence de la lumière, chaque variation de l'indice de réfraction provoque une réflexion partielle de la lumière incidente selon le phénomène de réflexion de Fresnel. Lorsque ces réflexions se combinent de manière constructive à une longueur d'onde spécifique, appelée longueur d'onde de Bragg (λ_B), cela témoigne d'un fort couplage entre les modes de propagation. Les propriétés spectrales de la bande réfléchie (ou transmise) peuvent être délibérément choisies, car elles dépendent uniquement des paramètres physiques du réseau [14].

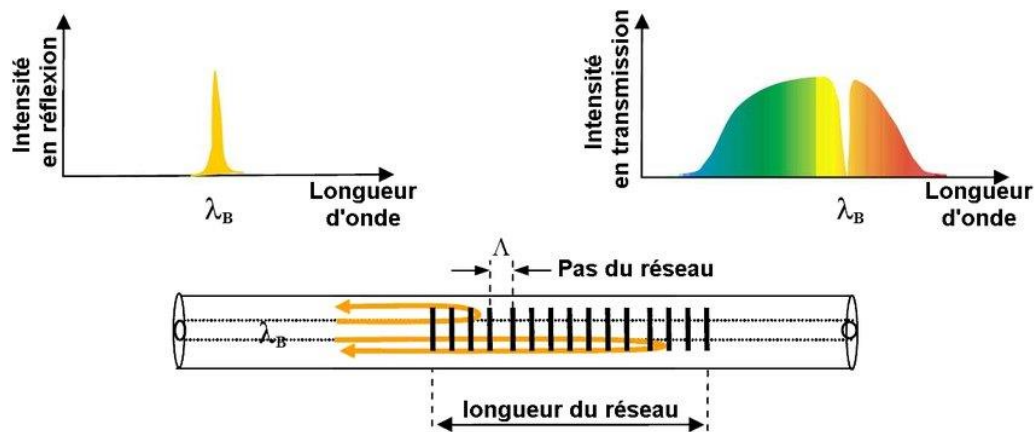


Figure 2.2: Principe de fonctionnement d'un réseau de Bragg [16].

2.3 Utilisation des réseaux de Bragg dans les télécommunications

Les fibres à réseaux de Bragg sont largement utilisées dans les systèmes de communications optiques. Bien que les réseaux de Bragg gravés photo-inscrits dans les fibres optiques ne soient pas nécessaires pour toutes les fonctions telles que l'égalisation du gain des amplificateurs, la stabilisation en longueur d'onde des pompes ou des sources lumineuses, ainsi que pour les lasers à fibre, ils offrent des avantages significatifs. Leurs principaux atouts incluent leurs faibles pertes d'insertion, leur sensibilité minimale à la polarisation et leur grande adaptabilité conceptuelle.

En conséquence, ils sont largement utilisés dans les systèmes de multiplexage en longueurs d'onde (WDM) pour multiplexer et démultiplexer différents canaux de communication optique, ainsi que pour compenser les effets de la dispersion chromatique, assurant ainsi la qualité du signal sur de longues distances [5].

- **Les filtres**

Les réseaux de Bragg agissant comme des dispositifs de filtrage sélectif des longueurs d'onde, ont été initialement mis en œuvre pour des applications de filtrage et de multiplexage. Ces réseaux caractérisés par leur uniformité de périodes courtes, permettent d'obtenir un spectre de filtrage ajusté en modifiant la période du réseau et en variant l'indice de réfraction, ce qui garantit un rejet significatif des canaux adjacents et permet de modéliser diverses formes spectrales, telles que des formes rectangulaires ou multi-crêteaux. Notamment, un réseau de Bragg caractérisé par ses périodes courtes réfléchit la lumière près de la longueur d'onde de Bragg, tout en permettant le passage transparent des autres longueurs d'onde [11].

Domaine	Application
Systèmes de Communications	<ul style="list-style-type: none"> - Amplification des impulsions chirpées. - Compression de l'impulsion. - Compensation de la dispersion.
Lasers	<ul style="list-style-type: none"> - Stabilisation d'un laser à semi-conducteur à Cavity externe. - Lasers semi-conducteur à base de fibre de Bragg.
Détecteurs	<ul style="list-style-type: none"> - Température, pression

Tableau 2: Applications des réseaux de Bragg [5].

2.4 Typologie des réseaux de Bragg

Divers critères discernent les diverses variantes de réseaux de Bragg existants. En premier lieu, on peut les catégoriser selon l'amplitude de la périodicité, ou le pas de leur profil de modulation d'indice [6].

2.4.1 Réseaux de Bragg uniformes

Un réseau de Bragg uniforme est un type spécifique de réseau de Bragg dans lequel la période de modulation de l'indice est constante le long de la fibre optique, cela signifie que la

variation de l'indice de réfraction est uniforme sur toute la longueur du réseau de Bragg. Certains photons sont partiellement réfléchis par le réseau tandis que d'autres sont transmis les réseaux de Bragg agissent comme des filtres centrés autour d'une seule longueur d'onde. Il est fréquent que le réseau de Bragg présente des déviations mineures par rapport à cette structure idéale, soit en raison de sa conception même, soit du fait des techniques de fabrication employées [7].

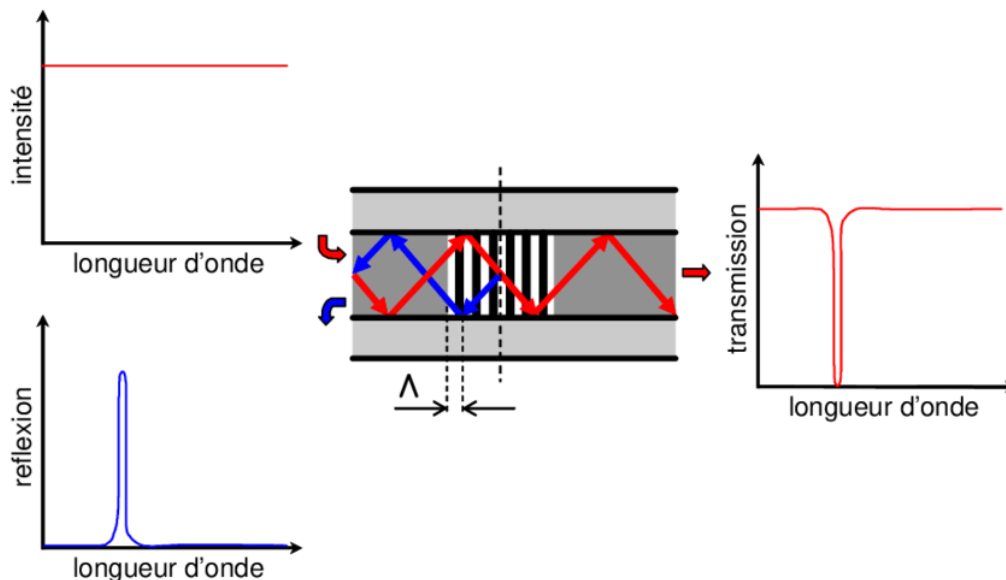


Figure 2.3: Représentation schématique du principe de fonctionnement d'un réseau de Bragg à pas uniforme inscrit dans le cœur d'une fibre optique ainsi que ses réponses en transmission et en réflexion [18].

2.4.2 Réseaux de Bragg inclinés « titled » ou blazed

Un réseau de Bragg "tilted" est une structure optique où les plans réflecteurs ne sont pas strictement perpendiculaires à l'axe de propagation de la lumière, repose sur le phénomène de diffraction de la lumière. Selon la longueur d'onde de la lumière et l'angle d'incidence une partie de la lumière est réfléchie (réflexion de Bragg), à un angle spécifique tandis que le reste peut être transmis à travers le dispositif. Offrant ainsi des possibilités accrues en termes de transmission et de manipulation de la lumière dans les dispositifs optiques [7].

2.4.3 Réseaux de Bragg à pas variable ou « chirped »

Les réseaux à pas variable, également connus sous le terme de "chirpés", se distinguent par leur modulation d'indice en continu formant ainsi des structures dont la périodicité n'est pas strictement définie. Dans certains cas, la large bande passante peut s'étendre sur plusieurs

dizaines ou centaines de nanomètres cela peut varier selon la conception et des exigences de l'application [7].

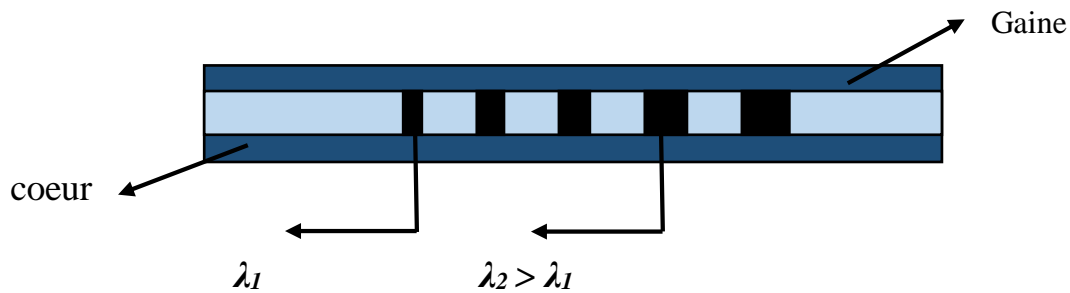


Figure 2.4: Réseau de Bragg à pas variable «chirped» [15].

En général, les réseaux de Bragg à pas variable sont conçus pour offrir une large bande passante tout en maintenant des performances de réflexion élevées sur toute la plage de longueurs d'onde souhaitée. En réfléchissant les longueurs d'onde les plus élevées au début du réseau, on contrebalance leur retard par rapport aux longueurs d'ondes basses présentes dans le front de l'impulsion, selon l'état de l'art actuel un retard supérieur à 1 ns peut être compensé par ce procédé [7].

2.4.4 Réseaux de Bragg apodisés

Les réseaux de Bragg apodisés sont des structures périodiques utilisées dans les dispositifs optiques pour des applications telles que la fabrication de filtres optiques et de lasers à fibre optique. L'apodisation consiste à modifier la distribution spatiale de l'indice de réfraction ou de la périodicité de manière progressive le long du réseau de Bragg. Contrairement aux réseaux de Bragg standard qui ont une amplitude de modulation constante, les réseaux de Bragg apodisés présentent une amplitude de modulation qui varie de manière continue le long de la structure. Cette variation peut être conçue pour obtenir des profils de réponse spectrale spécifiques, permettant ainsi d'améliorer les performances des dispositifs optiques en réduisant les réflexions parasites et en améliorant la sélectivité spectrale [7].

2.5 Techniques de fabrication des réseaux de Bragg

La fabrication d'un réseau de Bragg implique la création de motifs dans le cœur de la fibre optique, induisant ainsi des changements d'indice de réfraction le long de celle-ci. Une méthode couramment utilisée consiste à projeter ces motifs sur la fibre à l'aide d'un rayonnement

ultraviolet de haute résolution, ce qui entraîne une augmentation de l'indice de réfraction dans les zones exposées.

Diverses techniques sont employées pour générer ces motifs parmi celles-ci, on trouve la projection simultanée de deux rayons ultraviolets sur la fibre pour créer un motif d'interférence à très haute résolution. Pour des motifs plus complexes présentant une modulation de pas variable, on utilise généralement un filtre transparent également appelé "masque de phase" positionné entre le rayon ultraviolet et la fibre. Ce masque génère des zones de brillance différentes, induisant ainsi des variations distinctes de l'indice de réfraction dans les sections exposées du cœur de la fibre optique [8].

2.5.1 Techniques de masque de phase

La technique des masques de phases est devenue indispensable pour la fabrication fiable, rapide et reproductible des Réseaux de Diffraction de Bragg (RDB) sur fibre optique [8]. Cette approche, largement adoptée aujourd'hui, répond à la nécessité d'une méthode robuste et moins dépendante de la cohérence du laser utilisé, tout en offrant une grande simplicité dans son montage optique.

En pratique, un masque de phase est constitué d'une lame de silice où sont gravées méticuleusement des bandes rectangulaires espacées régulièrement pour former un réseau. Cette configuration permet de diffracter environ 80% de la lumière du laser incident dans les ordres +1 et -1, lorsque la profondeur est soigneusement ajustée. Ainsi, des interférences se produisent, créant des franges qui se superposent perpendiculairement à l'axe du guide optique et induisant une modulation de l'indice du cœur avec un pas deux fois plus petit que celui du masque [9].

Cette méthode repose sur l'utilisation d'un composant optique diffractif, le masque de phase, composé d'une lame de silice transparente aux ultraviolets, sur laquelle des rainures rectangulaires de profondeur uniforme sont gravées périodiquement. Lorsque le rayonnement ultraviolet traverse le masque, il est diffracté selon les motifs préétablis, initiant ainsi le processus d'inscription du réseau de Bragg sur la fibre optique [9].

2.6 Applications industrielles et futurs développements

2.6.1 Applications industrielles

Domaine de l'aviation

Les réseaux de Bragg jouent un rôle crucial dans le domaine de l'aviation, tant dans les phases de qualification des aéronefs que dans leur exploitation opérationnelle. Leur utilisation est omniprésente et s'avère indispensable pour garantir la sûreté et la fiabilité des appareils. Ces dispositifs ont permis de cartographier de manière précise la répartition thermique autour de l'aéronef, fournissant ainsi des informations cruciales pour déterminer son périmètre de sécurité lors des opérations sur les aéroports. Cette utilisation stratégique des réseaux de Bragg démontre leur valeur inestimable dans le secteur aéronautique, où la sécurité et la performance des avions demeurent des priorités absolues [9].

Dans le domaine de l'automobile

Bien que les réseaux de Bragg puissent être utilisés pour la qualification des processus, la détection de défauts et la mesure de température dans les composants critiques, tels que les structures en fibre de carbone, les systèmes de freinage et les moteurs. Ces applications permettent d'améliorer la sécurité et durabilité des véhicules [9].

La surveillance des structures

Est désormais une spécialité technique à part entière avec une prédominance des méthodes optiques, internes ou externes pour répondre aux besoins croissants en mesures fiables et précises. Ces méthodes permettent de mieux comprendre l'évolution des contraintes subies par les matériaux et l'état de santé des structures construites ou exploitées. Les domaines d'application principaux sont le génie civil, les travaux publics, ainsi que les matériaux et structures composites, couvrant ainsi une vaste gamme d'ouvrages et de sites, terrestres, maritimes, aériens ou spatiaux. Malgré une diversité de principes de mesure par fibres optiques proposés l'approche basée sur les réseaux de Bragg semble promise à une suprématie future dans de nombreux domaines applicatifs, grâce à ses nombreux avantages par ailleurs le concept de structures "intelligentes" basées sur l'utilisation de fibres optiques est en plein essor [10].

Les applications au domaine du génie civil

Se sont diversifiées avec l'intégration de multiples solutions à base de fibres optiques, permettant ainsi la surveillance proactive des infrastructures telles que les digues. Cette approche combine judicieusement différentes technologies telles que les mesures de niveau, les

inclinomètres pour la détection des mouvements de terrain, ainsi que la thermométrie pour détecter les fuites potentielles à l'intérieur des ouvrages en terre.

Cette dernière méthode repose sur la détection des écarts de température entre les zones affectées par une fuite et celles soumises aux conditions ambiantes. Initialement déployée dans le secteur pétrolier pour la surveillance des forages et des conduites, cette technique a été progressivement adaptée par des acteurs tels qu'EDF depuis 2011 pour la surveillance des infrastructures hydrauliques, comme illustré par l'exemple du canal de Curbans en France, où 11 kilomètres de fibre optique ont été déployés [9].

2.6.2 Futurs développements

Les applications des réseaux de Bragg dans les futurs développements technologiques sont prometteuses et diversifiées. Ces réseaux offrent des possibilités innovantes dans plusieurs domaines notamment en télécommunications, en instrumentation optique, en capteurs optiques et en surveillance structurelle. Voici quelques domaines clés où les réseaux de Bragg pourraient jouer un rôle important dans les développements futurs :

2.6.2.1 Télécommunications et réseaux optiques

Les réseaux de Bragg peuvent être utilisés pour créer des filtres optiques hautement sélectifs, ce qui permet d'optimiser l'utilisation des longueurs d'onde dans les réseaux de télécommunications. Leur capacité à créer des filtres optiques précis et efficaces pourrait contribuer à améliorer la qualité et la fiabilité des communications optiques à haute vitesse.

2.6.2.2 Capteurs optiques avancés

Les réseaux de Bragg sont au cœur de nombreux capteurs optiques de haute précision. Leur sensibilité aux variations de température, de contrainte mécanique ou de pression les rend précieux pour une large gamme d'applications, telles que la surveillance des infrastructures, la détection d'intrusions, ou encore la surveillance de processus industriels [10].

2.6.2.3 Imagerie médicale

Les réseaux de Bragg suscitent un intérêt croissant en raison de leurs propriétés optiques unique, tels que les endoscopes à fibres optiques, pour fournir des images de haute résolution à l'intérieur du corps humain. Leur capacité à détecter de petites variations d'indice de réfraction peut permettre de visualiser des structures biologiques avec une grande précision et facilitant le diagnostic dans différents domaines tels que l'ophtalmologie, la dermatologie et la neurologi [11].

2.6.2.4 Développement de matériaux intelligents

Les réseaux de Bragg peuvent être utilisés pour créer des matériaux intelligents capables de s'adapter et de répondre aux variations de leur environnement. Par exemple, ils pourraient être intégrés dans des composites intelligents pour la surveillance en temps réel de la santé des structures, comme les ailes d'avion ou les ponts [12].

2.6.2.5 Sécurité et cryptographie quantique

Les propriétés uniques des réseaux de Bragg, telles que leur capacité à générer des motifs de réflexion optique complexes pourraient être exploitées dans le domaine de la sécurité et de la cryptographie quantique pour développer des systèmes de communication sécurisés et inviolables [12].

Conclusion

En somme, les réseaux de Bragg sont des structures périodiques qui interfèrent avec la propagation de la lumière, offrant des propriétés optiques uniques telles que la réflexion et la transmission sélective des longueurs d'onde.

Représentent une technologie fascinante avec un large éventail d'applications potentielles dans divers domaines. Leurs propriétés optiques remarquables ouvrent la voie à de nombreux développements futurs qui pourraient révolutionner les domaines de la communication, de la médecine, de l'ingénierie et de la sécurité [6].

En communication, les réseaux de Bragg permettent des filtrages précis et des multiplexages de longueurs d'onde dans les réseaux de fibres optiques, améliorant ainsi la capacité et la fiabilité des transmissions de données. Avec leur capacité à s'adapter et à être personnalisés pour des applications spécifiques, les réseaux de Bragg continuent de repousser les limites de l'innovation technologique, promettant des avancées significatives et durables.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] P. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi et W. A. Reed « HIGH PRESSURE H₂ LOADING AS A TECHNIQUE FOR ACHIEVING ULTRAHIGH UV PHOTSENSITIVITY AND THERMAL SENSITIVITY IN GEO₂ DOPED OPTICAL FIBRES » Electronics Letters, vol. 29, pp. 1191–1193, 1993.
- [2] K. O. Hill ET G. Meltz, « LIGHTWAVE APPLICATIONS OF FIBER BRAGG GRATINGS » IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 15, pp. 1391–1404, 1997.
- [3] T. Erdogan « FIBER GRATING SPECTRA » IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 15, pp. 1277–1294, 1997.
- [4] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn. « FORMATION OF BRAGG GRATINGS IN OPTICAL FIBERS BY TRANSVERSE HOLOGRAPHIC METHOD » Opt. Lett, 14:823.825, 1989.
- [5] A. Degachi, K. Ounis et A. Gohmes université echahidhamma lakhdar d'el-oued faculté de technologie département : génie électrique « RESEAU DE BRAGG SUR FIBRE OPTIQUE : APPLICATION A LA COMPENSATION DE LA DISPERSION CHROMATIQUE DANS LES SYSTEMES DE TRANSMISSION OPTIQUE HAUT DEBIT » le 2019 – 2020.
- [6] Guillaume LAFFONT thèse de doctorat présentée à l'université des sciences et technologies de Lille pour obtenir le grade de docteur de l'université de Lille discipline laser, molécules, rayonnement atmosphérique « ÉTUDE ET DÉVELOPPEMENT DE TRANSDUCTEURS ET SYSTEMES DE MESURE A RESEAUX DE BRAGG A TRAITS INCLINÉS PHOTOINSCRITS DANS DES FIBRES OPTIQUES MONOMODES ».
- [7] M. Tahiet M. Chadouli Sabra Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université de Blida 1 Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales IAES Département d'études spatiales « ANALYSE NUMÉRIQUE ET ÉTUDE SPECTRALE DE RESEAUX DE BRAGG A FIBRE : COMPENSATION DE LA DISPERSION CHROMATIQUE DANS UNE LIGNE DE TRANSMISSION OPTIQUE » pp 30 Promotion 2019.

- [8] Pierre Vinchon « OPTIMISATION DE MASQUES DE PHASE POUR L'EXPOSITION DE RESEAUX DE BRAGGA PERIODES VARIABLES SUR FIBRE OPTIQUE », Université du Québec, 2015.
- [9] MEZGHICHE kamel, thèse doctorat « ETUDE ET CARACTERISATION DES RESEAUX DE BRAGG FIBRES « FIBER BRAGG GRATINGS » UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2011.
- [10] H. CHIKH-BLED « ANALYSE ET EXPLOITATION DES PROPRIETES MICROSTRUTURALES DE COMPOSANTS TOUT FIBRE : APPLICATION AUX CAPTEURS » université abou bekr-belkaid tlemcen faculté de technologie / département de télécommunications laboratoire de télécommunications de tlemcen (LTT) pp27-31 -Année Universitaire : 2017 – 2018.
- [11] I. Riant « FIBER BRAGG GRATING FOR OPTICAL TELECOMMUNICATION », C.R.Physique, 2003.
- [12] polyvia-formation.fr, Le développement des produits « intelligents », une opportunité pour les industriels.
- [13] Georges Akhras revue militaire canadienne « DES MATERIAUX INTELLIGENTS ET DES SYSTEMES INTELLIGENTS POUR L'AVENIR » page 28,31.
- [14] minimization of Fresnel « REFLECTION BY ANTIREFLECTION FIBER BRAGG GRATINGS CREATED AT THE FIBER ENDS » 15 APR 2019.
- [15] <https://fr.scaime.com/technologie-des-reseaux-de-bragg>.
- [16] https://www.researchgate.net/figure/Principe-de-fonctionnement-dun-reseau-de-Bragg_fig26_44279233
- [17] https://www.researchgate.net/figure/Principe-de-fonctionnement-du-multiplexage-en-longueur-donde-des-reseaux-de-Bragg_fig20_50313084
- [18] https://www.researchgate.net/figure/Representation-schematique-du-principe-de-fonctionnement-dun-reseau-de-Bragg-a-pas_fig5_335460067

*Chapitre 3 : Etude et
simulation des réseaux de
Bragg*

Introduction

La transmission sur de longues distances représente un défi significatif en raison de la dispersion, qui doit être atténuée pour maintenir les performances du système. À des distances étendues, l'élargissement des impulsions peut causer un nombre accru d'erreurs lors de la réception, compromettant ainsi la fiabilité des données transmises. Parmi les solutions envisagées, les fibres à réseaux de Bragg (FBG) offrent une méthode efficace pour compenser la dispersion accumulée dans les fibres optiques.

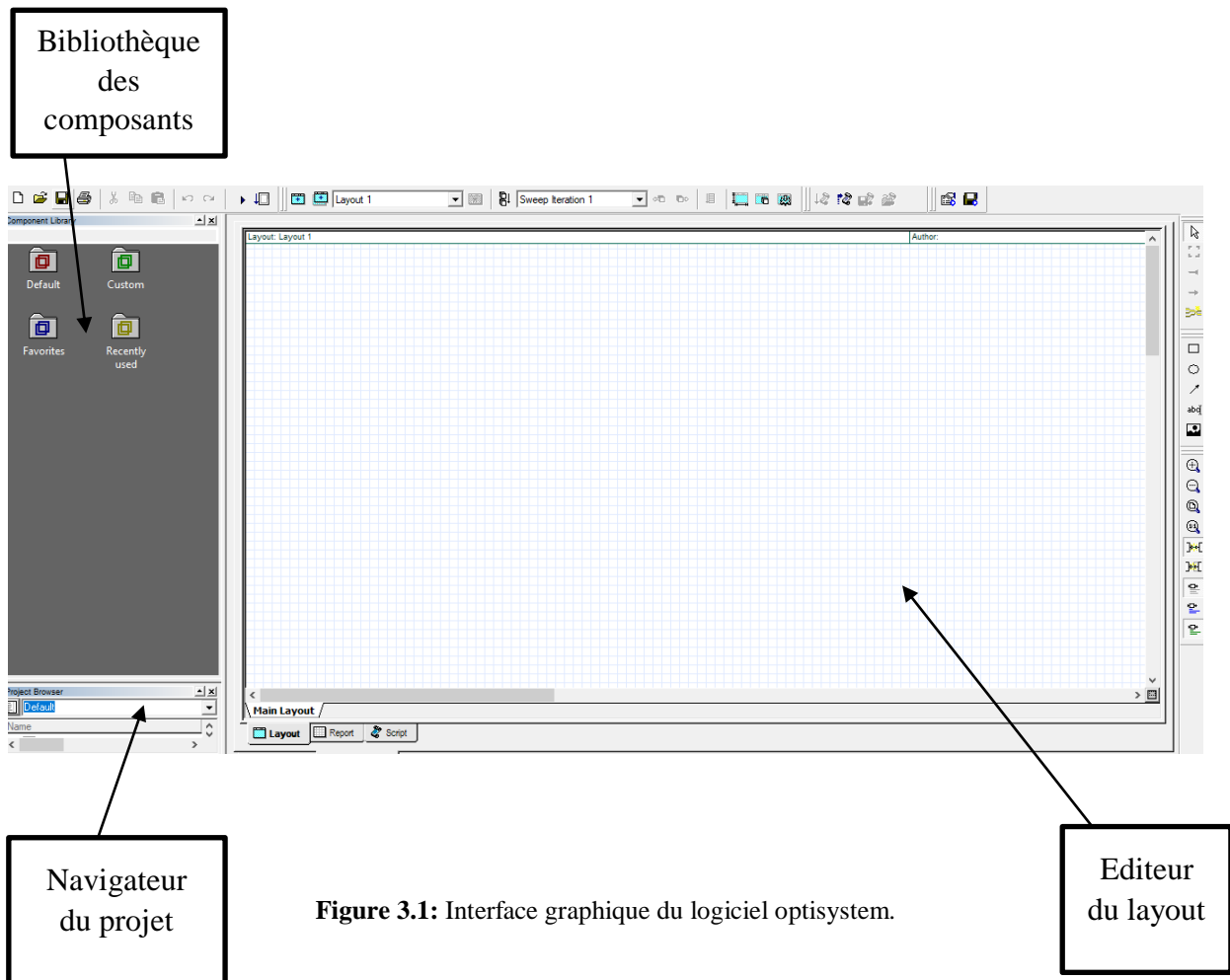
Nous prévoyons de mener une étude et une simulation utilisant les FBG dans une chaîne de transmission optique, à l'aide du logiciel OptiSystem. Cette analyse comprendra une explication des paramètres du système, une évaluation du taux d'erreur sur les bits (BER), du facteur de qualité (Q-factor), ainsi qu'une interprétation du diagramme de l'œil [1].

3.1 Présentation du logiciel Optisystem

3.1.1 Définition

Le logiciel Optisystem, développé par la société canadienne Optiwave, permet aux ingénieurs et chercheurs de concevoir, simuler et analyser avec une grande précision des systèmes de transmission optique. Il offre une flexibilité exceptionnelle en intégrant des fonctions personnalisées définies par l'utilisateur, ce qui étend considérablement la gamme des systèmes pouvant être simulés.

Optisystem permet de tester et d'optimiser efficacement tous types de liaisons optiques, en utilisant une modélisation réaliste et détaillée des systèmes de communication par fibre optique. Ses capacités avancées incluent la simulation de composants photoniques à l'échelle nanométrique, des circuits, des processus et des matériaux [2].



3.1.2 Principales caractéristiques du logiciel Optisystem

Les caractéristiques principales du logiciel Optisystem comprennent :

- Les composants virtuels de la bibliothèque reproduisent fidèlement le comportement et les effets spécifiés, avec une précision sélectionnable, et offrent une efficacité comparable à celle des composants réels.
- La bibliothèque de composants permet l'entrée de paramètres mesurables à partir de périphériques réels, intégrant ainsi des équipements de test et de mesure de divers fournisseurs.
- Les outils de visualisation avancée génèrent des signaux audios ainsi que des diagrammes d'état de polarisation et d'autres caractéristiques pertinentes.

- Il est possible de connecter un nombre illimité de visualiseurs au moniteur via le même port [2].

3.1.3 Les critères d'évaluation de la qualité dans logiciel le Optisystem

Pour évaluer la qualité de la transmission optique, trois critères principaux sont utilisés :

- Taux d'erreurs binaires (BER).
- Facteur de qualité (Q).
- Diagramme de l'œil.

• Taux d'erreurs binaires (BER)

Dans les systèmes de transmission numérique, où les données sont envoyées sous forme de séquences binaires, le critère essentiel pour évaluer la qualité du signal est la comparaison entre la séquence binaire transmise et celle reçue. Le taux d'erreurs binaires (BER) mesure le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre total de bits transmis. Le BER est un indicateur crucial de la performance du système, permettant de détecter tout problème de transmission nécessitant des ajustements pour garantir l'intégrité des données [4].

$$BER = \frac{\text{nombre de bits erronée}}{\text{nombre de bits transmis}} \quad 3.1$$

• Facteur de qualité

Le facteur de qualité, également connu sous le nom de facteur Q, d'un système, est une mesure sans dimension du taux d'amortissement d'un oscillateur. Il est généralement défini comme le rapport d'énergie suivant :

$$Q \stackrel{\text{def}}{=} 2\pi \times \frac{E_{sys}}{E_{dis}} \quad 3.2$$

Où E_{sys} représente l'énergie maximale contenue dans le système et E_{dis} l'énergie dissipée par le système au cours d'une période.

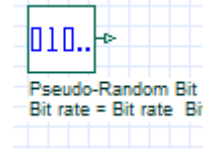
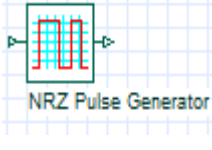
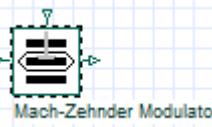
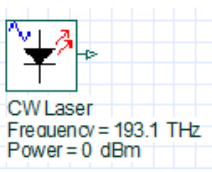
Un facteur de qualité élevé indique que les oscillations d'un résonateur libre persisteront plus longtemps, reflétant une faible dissipation d'énergie et une efficacité accrue du système. Le facteur Q est donc un indicateur essentiel de la performance des systèmes oscillatoires, influençant leur stabilité et leur capacité à maintenir des oscillations régulières [5].

• **Diagramme de l'œil**

Le diagramme de l'œil est une méthode avancée pour visualiser la qualité du signal, en évaluant le bruit d'amplitude, les interférences inter-symboles et la gigue temporelle. Il se caractérise par la superposition de multiples symboles binaires dans le domaine temporel. En environnement de laboratoire, ce diagramme est généré après la détection par photodiode, avec un oscilloscope synchronisé sur la fréquence de l'horloge [3].

À partir du diagramme de l'œil, il est possible d'évaluer facilement la qualité du signal. Un œil ouvert, où les niveaux des symboles "1" sont clairement distincts de ceux des symboles "0", indique un signal de bonne qualité. En revanche, si la dégradation du signal rend difficile la distinction entre ces niveaux, on parle d'un œil fermé, que ce soit horizontalement ou verticalement. La fermeture du diagramme de l'œil suggère une qualité de signal insuffisante, souvent due à des problèmes comme le bruit, les interférences inter-symboles ou la gigue temporelle.

3.1.4 Le rôle des composants dans la chaîne de transmission

Composants	Leurs rôles
	<p>Générateur de Séquence de Bits Pseudo-aléatoire (PRBS) : Un générateur de nombres pseudo-aléatoires (PRNG), également connu sous le nom de générateur de bits pseudo-aléatoires déterministes (DRBG), est un algorithme utilisé pour produire une séquence de nombres dont les propriétés sont similaires à celles de séquences de nombres aléatoires.</p>
	<p>Générateur d'Impulsions NRZ : Le générateur d'impulsions NRZ produit un signal électrique codé en non-retour à zéro qui dépend d'une séquence de bits en entrée. L'utilisateur peut spécifier une séquence de bits qui influencera la sortie du générateur d'impulsions.</p>
	<p>Modulateur Mach-Zehnder : Le modulateur Mach-Zehnder est employé pour contrôler l'amplitude d'une onde optique donnée. L'onde optique d'entrée est répartie en deux bras d'un interféromètre à guide d'onde. L'application d'une tension à l'un des bras induit un déphasage pour l'onde traversant ce bras.</p>
	<p>Laser Continu (CW) : Une onde continue ou CW est une onde électromagnétique avec une amplitude et une fréquence constante. Dans le domaine des télécommunications, une onde continue est utilisée pour moduler l'information en variant la durée des périodes d'activation et de désactivation du signal porteur sinusoïdal.</p>

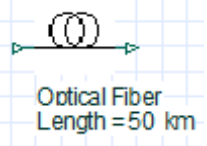
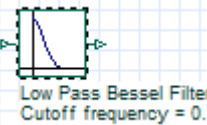
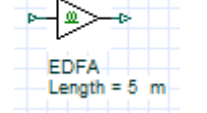
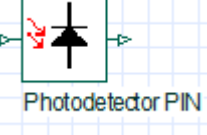
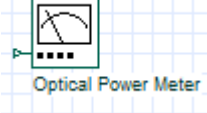
 <p>Optical Fiber Length = 50 km</p>	<p>Fibres Optiques : Les fibres optiques sont largement utilisées dans les capteurs chimiques et biocapteurs optiques. Elles permettent également la transmission d'énergie, convertie en électricité par des cellules photovoltaïques exposées à la lumière.</p>
 <p>Low Pass Bessel Filter Cutoff frequency = 0.75</p>	<p>Filtre de Bessel : Un filtre de Bessel est un type de filtre linéaire analogique utilisé dans les applications RF et électroniques. Il présente une réponse en phase plate maximale, préservant ainsi la forme d'onde des signaux dans sa bande passante avec une transition douce.</p>
 <p>EDFA Length = 5 m</p>	<p>Amplificateur Optique : Utilisé pour augmenter la puissance des signaux optiques affaiblis lors de leur transmission à travers les fibres optiques, simulant ainsi une amplification effective dans les systèmes de communication optique.</p>
 <p>Photodetector PIN</p>	<p>Photodétecteur PIN : Le photodétecteur PIN fonctionne en séparant les porteurs photo-générés dans la région de déplétion et en collectant ces porteurs à travers une jonction polarisée en inverse. Cela génère un courant électrique dans un circuit externe, connu sous le nom de photocourant.</p>
 <p>Optical Power Meter</p>	<p>Photomètre de Puissance Optique : Utilisé pour mesurer avec précision la puissance optique d'un signal et visualiser cette mesure afin de faciliter l'analyse et la surveillance des niveaux de puissance optique.</p>

Tableau 3: Rôle des composants du logiciel Optisystem [6].

3.2 Simulation d'une chaîne de transmission optique sans fibre de Bragg

La configuration fondamentale de notre système comprend principalement trois composants essentiels : un émetteur, une fibre optique et un récepteur.

Dans notre système de simulation, nous utilisons une diode laser à onde continue (CW) émettant à une longueur d'onde de 193,1 THz comme source lumineuse. Un générateur de séquence produit la séquence de signal numérique requise, qui est ensuite convertie en un signal d'impulsion électrique par un générateur d'impulsions non-retour à zéro (NRZ). Ce signal électrique traverse un modulateur Mach-Zehnder (M-Z), où l'effet électro-optique est appliqué à l'onde optique, transformant ainsi le signal en un signal optique à l'entrée de la fibre.

Le débit de transmission global est de 10 Gb/s avec une fenêtre de transmission à 1550 nm et une atténuation typique de 0.20 dB/km. Les détails des paramètres de simulation sont spécifiés dans la figure 3.2.

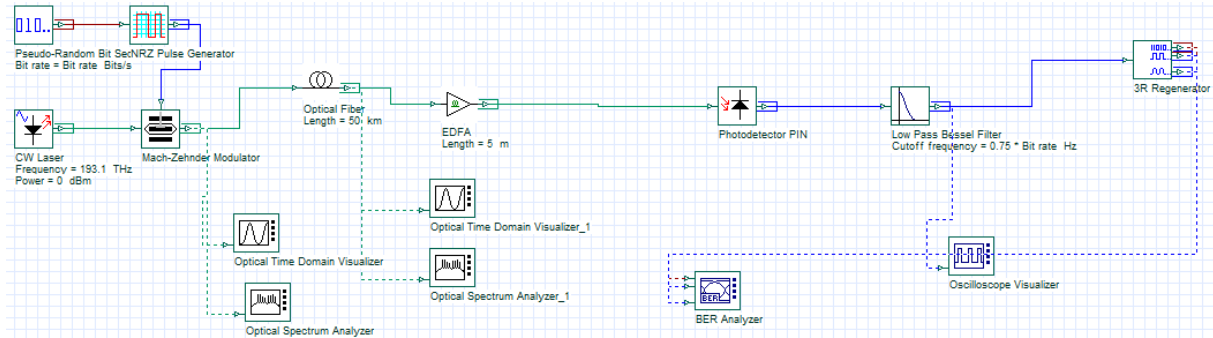


Figure 3.2: chaîne de transmission optique simple.

Pour le débit binaire et la longueur de la fibre sont constant :

- Débit : 10 Gbit/s
- Longueur de la fibre : 50 km

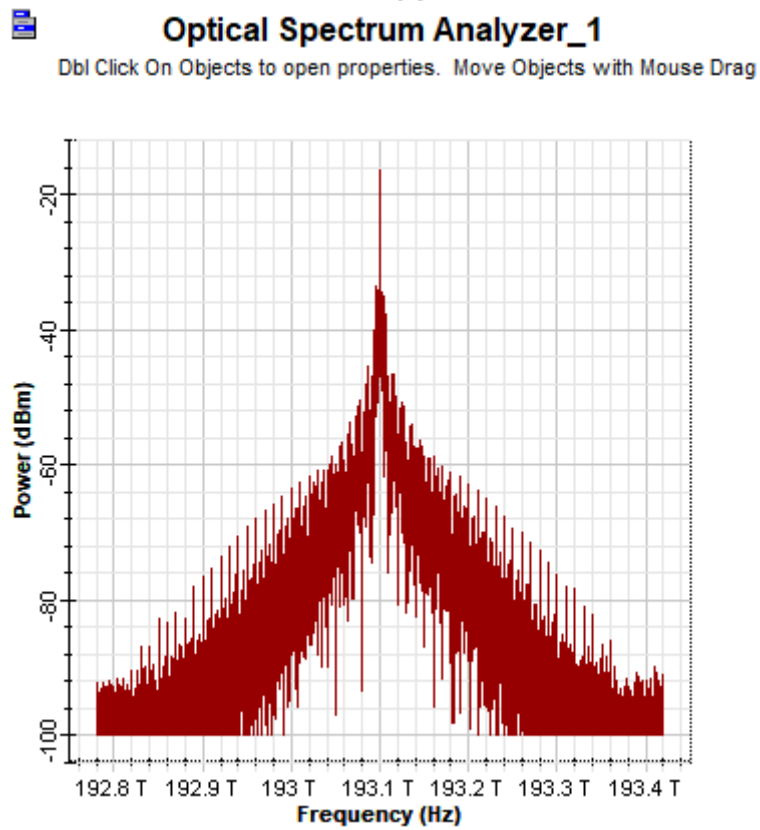
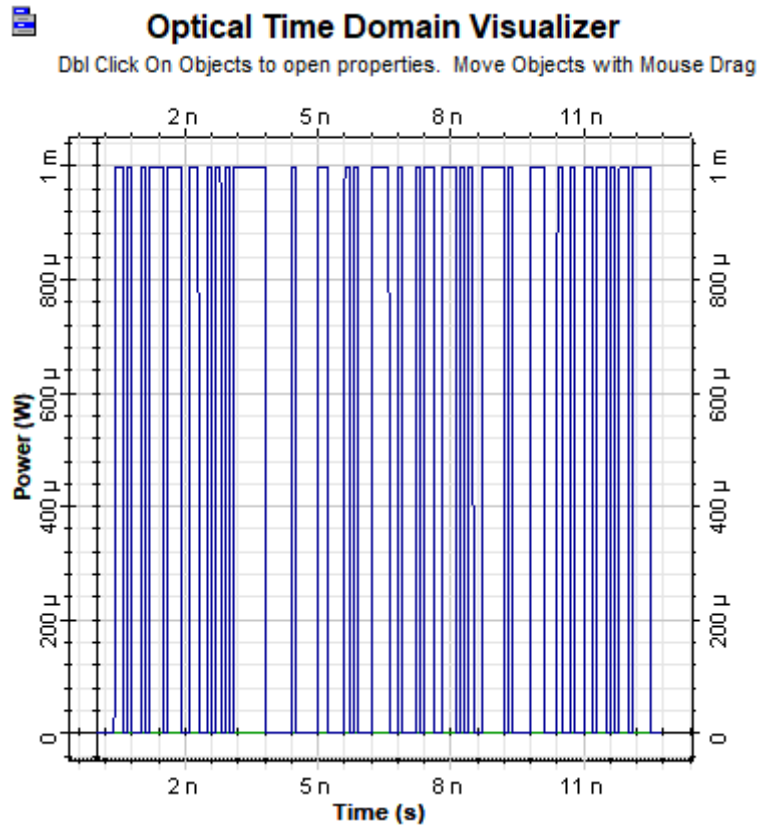
Dans cette simulation on varie la puissance pour calculer le facteur de qualité (Q) et le taux d'erreur binaire (BER).

Puissance (dBm)	Débit binaire (Gbits/s)	Longueur de la fibre (Km)	Facteur de qualité	Taux d'erreur binaire
0	10	50	10.9944	2.02 e-28

Tableau 4: La variation de facteur Q et BER en fonction de la puissance.

Les résultats de simulation pour un système de communication par fibre optique sont présentés dans ce tableau. Le système utilise une puissance de 0 dBm, un débit binaire de 10 Gbit/s et une longueur de fibre de 50 km. Le facteur de qualité (Q) mesuré est de 10.9944, ce qui indique une haute qualité de signal. De plus, le taux d'erreur binaire (BER) est extrêmement bas, ce qui témoigne d'une transmission quasiment parfaite.

On observe que l'augmentation de la puissance est corrélée à une augmentation du facteur de qualité et à une diminution du taux d'erreur binaire.



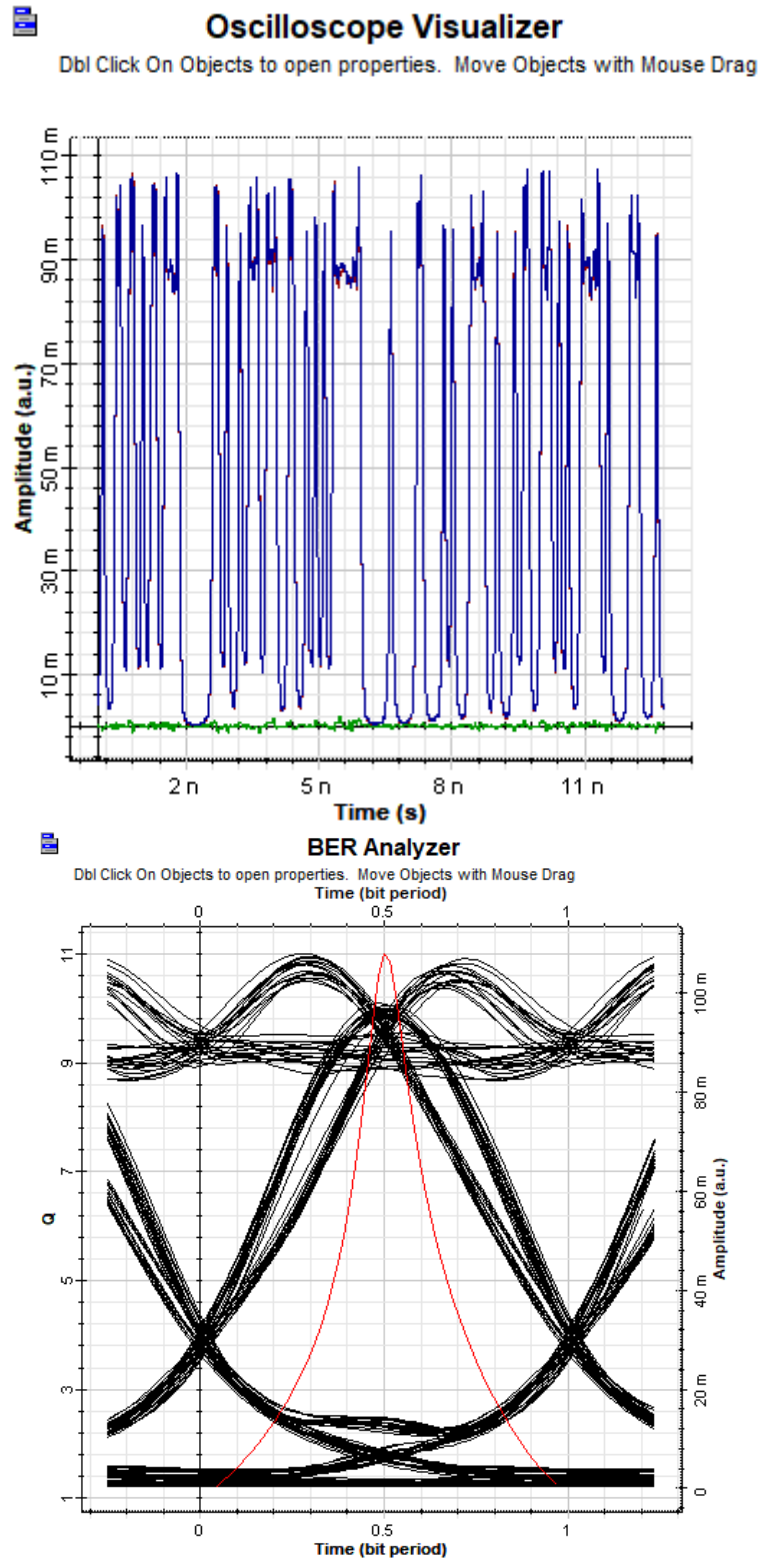


Figure 3.3: Diagramme des signaux et analyse du spectre avant compensation.

• **Interprétation des résultats**

Dans cette première simulation, nous avons modélisé une chaîne de transmission optique simple sans compensation de dispersion, ce qui a mis en évidence plusieurs problèmes :

- Distorsion de la forme d'onde : Le signal reçu présente des altérations dues à la dispersion chromatique, affectant la forme originale de l'onde.
- Interférences entre les symboles : Les données commencent à se superposer, entraînant des erreurs de transmission.
- Diagramme de l'œil : Cette représentation visuelle de la qualité de la transmission apparaît floue et mal définie, signalant une mauvaise qualité de transmission.

3.3 Simulation d'une chaîne de transmission avec compensation de la dispersion chromatique

Dans cette section, nous examinerons une étude générale sur l'utilisation de réseaux de Bragg en fibre optique pour la compensation de la dispersion chromatique (FBG).

Dans cette simulation, les mêmes composants que ceux de la simulation précédente sont utilisés, à l'exception du réseau de Bragg. Nous avons évalué l'efficacité de la technique de compensation placée après la fibre optique, comme illustré dans la figure 3.4.

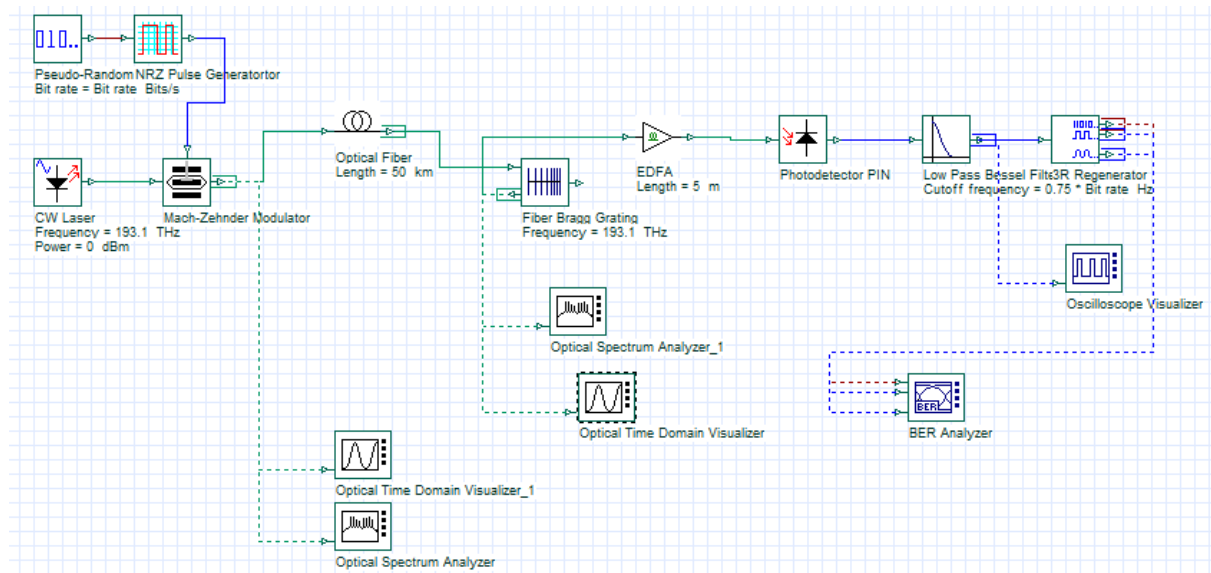
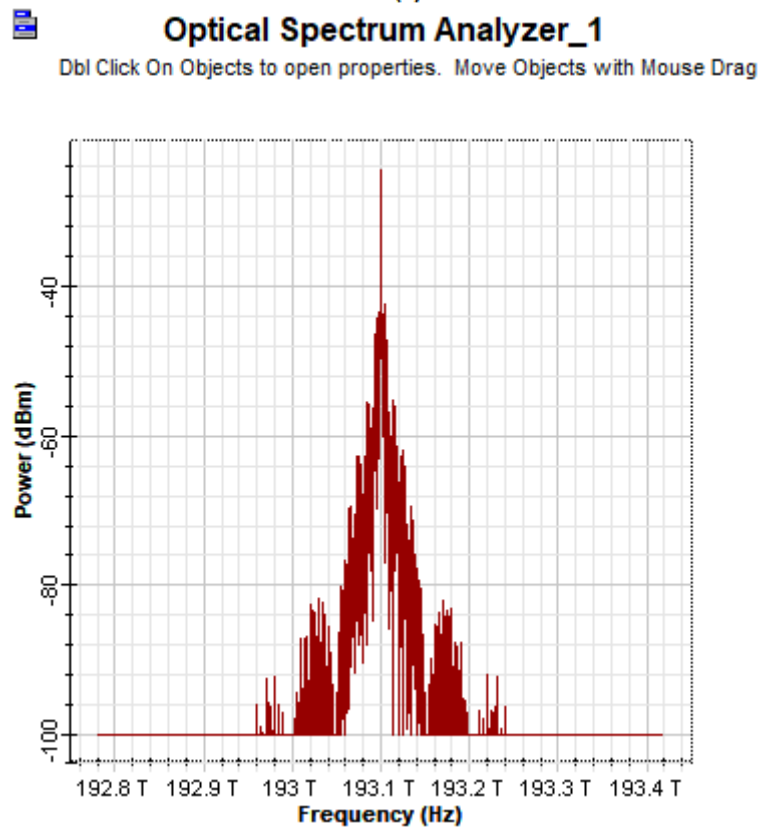
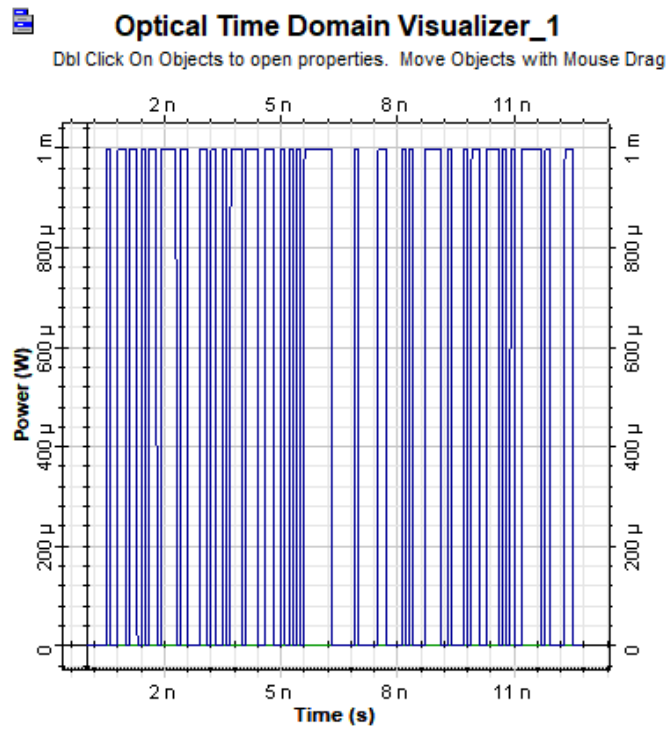


Figure 3.4: Post compensation système.

Puissance (dBm)	Débit binaire (Gbits/s)	Longueur de la fibre (Km)	Facteur de qualité	Taux d'erreur binaire
0	10	50	11.2779	8.3883 e-30

Tableau 5: La variation de facteur Q et BER en fonction de la puissance (Post-FBG).

- Simulation et résultat



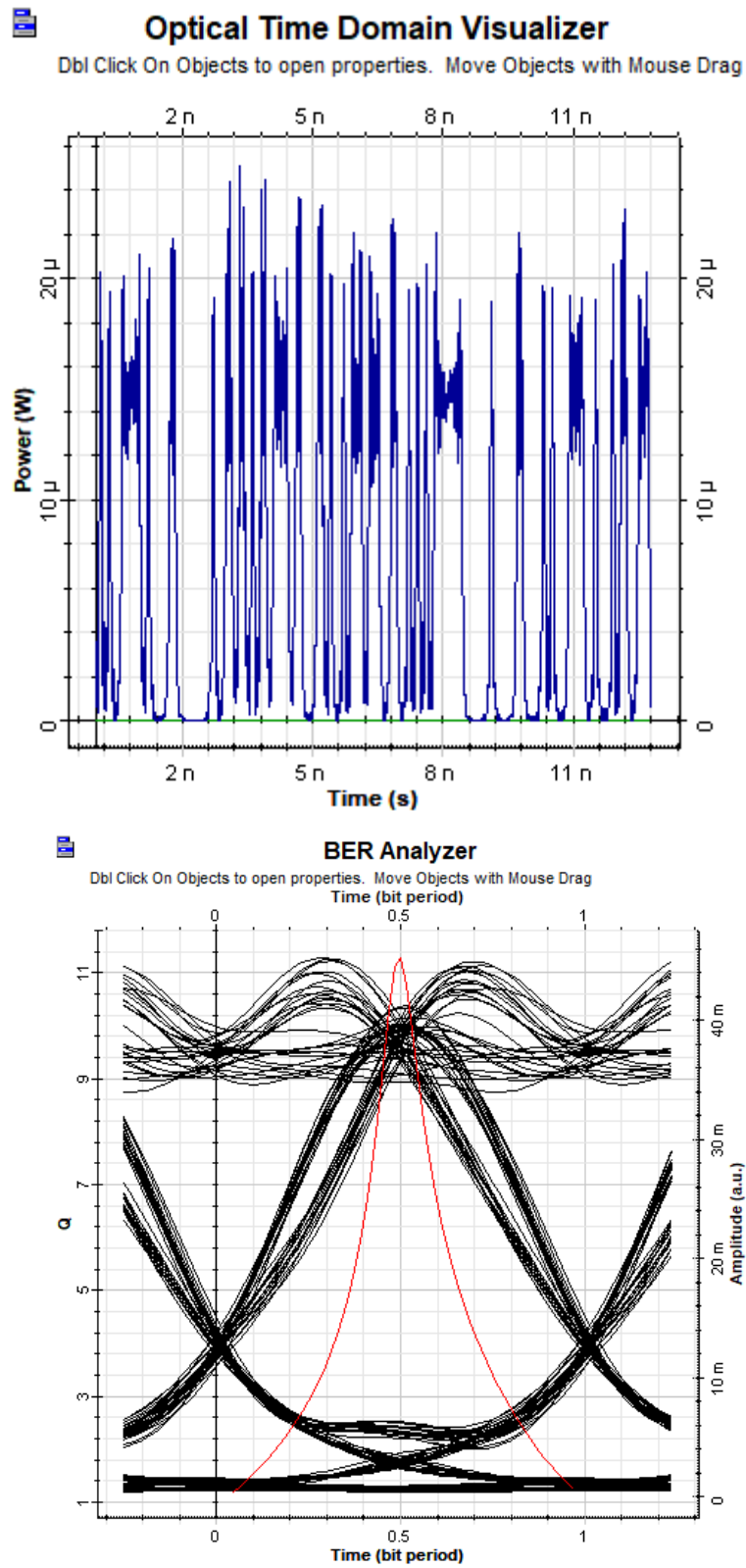


Figure 3.5: Diagramme des signaux et analyse du spectre après compensation.

Dans cette simulation, nous avons observé les points suivants :

- Le spectre optique est beaucoup plus étroit et mieux défini, avec des composantes fréquentielles concentrées autour de la fréquence centrale.
- Les puissances des différentes composantes fréquentielles sont plus uniformes et moins étalées, ce qui indique une meilleure gestion de la dispersion.
- Ce spectre suggère que le compensateur de dispersion FBG a efficacement réduit la dispersion chromatique. La netteté du spectre correspond à une meilleure qualité de transmission, avec un facteur de qualité Q amélioré et un diagramme de l'œil plus clair.

- **Comparaison avant et après compensation :**

- **Avant Compensation :** Le graphique montre un spectre élargi et une puissance répartie sur une large gamme de fréquences, indiquant une dispersion élevée et une qualité de transmission médiocre.

- **Après Compensation :** Le graphique montre un spectre plus concentré et mieux défini, indiquant que le compensateur FBG a réussi à réduire la dispersion et à améliorer la qualité de transmission.

Ces observations confirment que la compensation de dispersion, en particulier à l'aide d'un réseau de Bragg fibré (FBG), est efficace pour améliorer les performances du système optique en réduisant la dispersion chromatique et en augmentant la clarté du diagramme de l'œil.

En conclusion, la technique Post-FBG s'est révélée être la plus efficace pour compenser la dispersion et améliorer la qualité de transmission, avec un diagramme de l'œil significativement plus clair et des performances globales optimisées.

3.4 Simulation d'une chaîne de transmission avec compensation de dispersion (FBG) dans la technologie (DWDM)

La technologie Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) permet de transmettre plusieurs canaux optiques sur une seule fibre en utilisant différentes longueurs d'onde. Pour maximiser l'efficacité de transmission, il est crucial d'optimiser les paramètres de puissance, de débit et de distance.

Dans cette simulation, nous avons fixé le débit à 10 Gbit/s avec un espacement de fréquences de 100 GHz, et nous analysons les performances pour le premier utilisateur en faisant varier la puissance, la distance et le débit. Cette étude nous permet d'évaluer l'impact de ces paramètres sur la performance du système DWDM.

Les schémas représentés dans la **figure 3.6** illustrent la variation du facteur de qualité, du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance, du débit binaire ainsi que de la distance de la fibre.

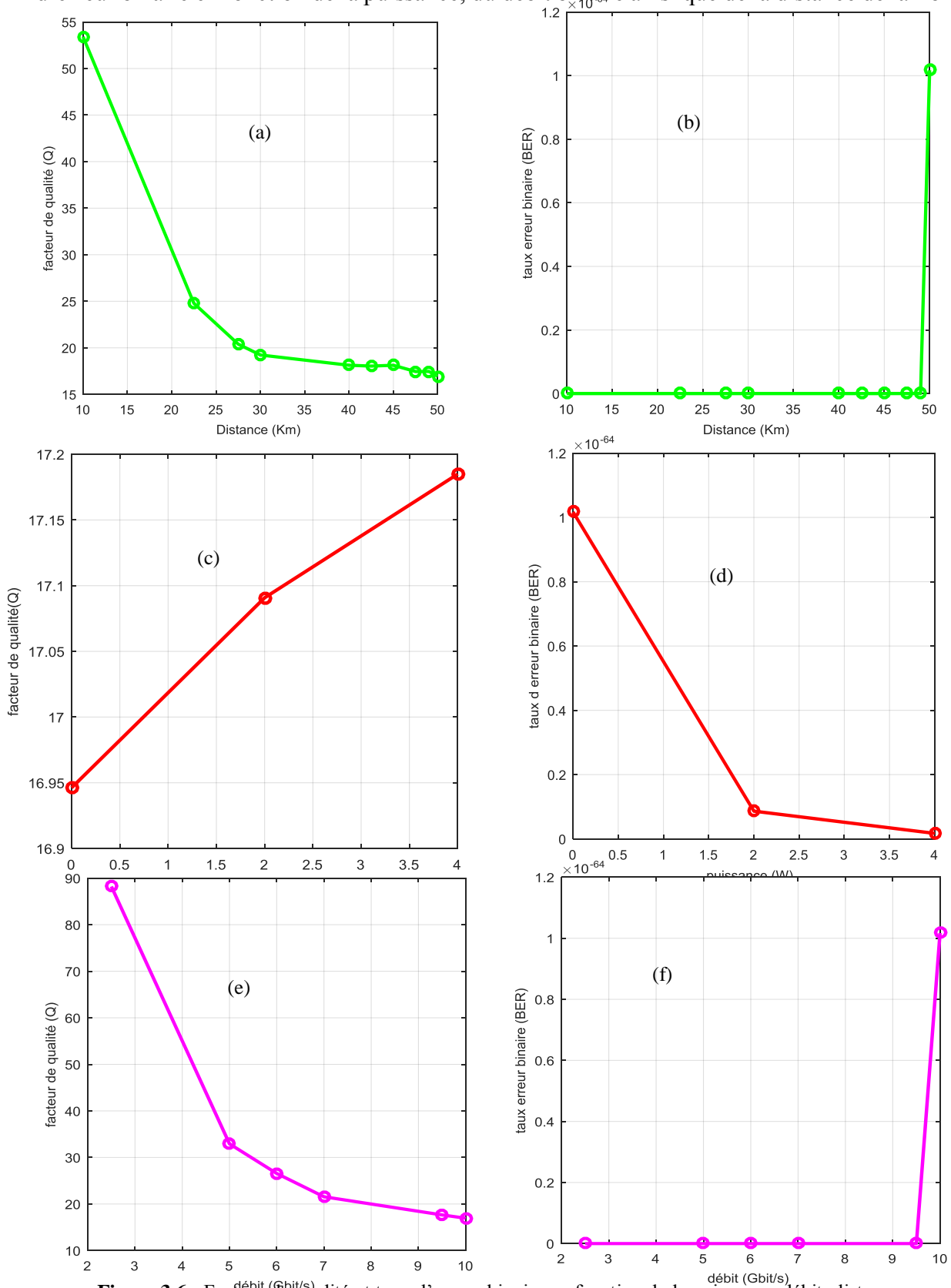


Figure 3.6 : Facteur de qualité et taux d'erreur binaire en fonction de la puissance, débit, distance.

Pour analyser les performances du système DWDM, nous avons fait varier les paramètres suivants : la puissance, la distance et le débit binaire.

Dans la figure 3.6(a), on observe que l'augmentation de la puissance entraîne une augmentation du facteur de qualité, ce qui reflète une amélioration de la performance qualitative. Inversement, la figure 3.6(b) montre que le taux d'erreur binaire diminue à mesure que la puissance augmente, indiquant une réduction des erreurs et une amélioration de la qualité de transmission.

La figure 3.6(c) révèle que le facteur de qualité diminue significativement avec l'augmentation de la distance. Cela démontre que plus la distance de transmission est grande, plus la qualité du signal est affectée. Le signal se dégrade rapidement jusqu'à environ 25 km, après quoi il se stabilise. Malgré cette dégradation, la précision des données transmises reste élevée sur de longues distances.

Enfin, la figure 3.6(f) montre que le taux d'erreur binaire reste extrêmement bas pour des débits allant jusqu'à 9 Gb/s, indiquant une transmission presque sans erreur dans cette plage de débits. Cependant, à 10 Gb/s, il y a une augmentation significative du taux d'erreur binaire, ce qui signale une dégradation de la précision de transmission à ce débit élevé.

En variant ces paramètres, nous pouvons comprendre comment chaque facteur influence la qualité du signal et la performance globale du système DWDM.

Conclusion

Dans cette étude, nous avons exploré l'utilisation des réseaux de Bragg pour atténuer la dispersion chromatique dans les fibres optiques en utilisant le logiciel OptiSystem. À travers nos simulations, nous avons examiné les effets de la dispersion chromatique sur la qualité de transmission des signaux optiques dans une chaîne de transmission simple ainsi qu'avec l'intégration de la technique DWDM.

Nos analyses des résultats ont révélé que l'absence de compensation de la dispersion chromatique entraîne des problèmes significatifs tels que la distorsion de la forme d'onde, des interférences entre les symboles et un diagramme de l'œil flou, compromettant ainsi la qualité de la transmission optique.

Toutefois, en intégrant un compensateur de dispersion basé sur les réseaux de Bragg en fibre (FBG) dans nos simulations, nous avons observé une nette amélioration de la qualité de transmission. Les FBG se sont avérés efficaces pour réduire la dispersion chromatique, restaurer la forme d'onde du signal et améliorer la clarté du diagramme de l'œil.

Ces résultats soulignent le potentiel des réseaux de Bragg en fibre comme solution efficace pour la correction de la dispersion chromatique dans les systèmes de fibres optiques. Cette étude contribue à une meilleure compréhension de l'impact des FBG sur les performances des systèmes de transmission optique et ouvre la voie à des applications pratiques dans le domaine des communications optiques à haut débit.

Bibliographie

Bibliographie

[1] M.DRIF& B.BENABDELOUAHED UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID TLEMCEN
DEPARTEMENT DE TELECOMMUNICATIONS Sujet 89Contribution à la compensation de
la dispersion chromatique en utilisant des fibres compensatrices et des fibres de Bragg99 PP 48
le 03 /07 / 2019

[2] <https://fr.readkong.com/page/tp-n-1-initiation-a-l-utilisation-du-logiciel-optisystem-8033967>

[3] Y.Frignac, « contribution à l'ingénierie des systèmes de transmission terrestres sur fibre optique utilisant le multiplexage en longueur d'onde de canaux modules au débit de 40 Gbit/s », Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des télécommunications, spatialité électronique et communication, Avril 2003.

[4] M. LEFRANÇOIS, « Etude de technologies avancées pour l'optimisation des systèmes de transmission optique multiplexés en longueur d'onde au débit de 40 Gbit/s », Thèse de Doctorat de l'université Paris-Sud, décembre 2007.

[5] https://fr.wikipedia.org/wiki/Facteur_de_qualit%C3%A9

[6] mémoire de master « étude des systèmes de l'amplification dans des réseaux de transmission optiques » soutenu publiquement le : 20/6/2023.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, ce projet de fin d'étude a permis d'approfondir notre compréhension de l'optimisation des systèmes de transmission optique dans les fibres optiques, en mettant en lumière l'importance cruciale de la gestion de la dispersion pour des communications efficaces. Grâce à une analyse approfondie et détaillée, nous avons pu évaluer l'efficacité de la compensation de la dispersion à l'aide des FBG, un composant clé dans cette démarche.

Nos résultats ont démontré que l'utilisation des FBG pour la compensation de la dispersion offre une solution prometteuse, offrant une performance fiable et efficace dans des conditions variées. Les avantages des FBG, tels que leur simplicité de conception, leur coût abordable et leur large bande passante, en font une option attrayante pour les ingénieurs et les chercheurs travaillant dans le domaine des communications optiques.

En outre, les résultats obtenus à travers notre analyse démontrent clairement que la performance du système de transmission simulé est satisfaisante, notamment à des vitesses de transmission élevées de 10 Gb/s. Ces conclusions renforcent l'importance des FBG dans la conception de systèmes de transmission optique robustes et efficaces, ouvrant ainsi la voie à de futures recherches et développements dans ce domaine en constante évolution.

Pour les perspectives futures, il serait intéressant d'explorer d'avantage les possibilités d'amélioration de la compensation de la dispersion en utilisant d'autres techniques ou en combinant les FBG avec d'autres dispositifs optiques. De plus, des études sur l'impact de facteurs externes tels que la température et la pression sur la performance des FBG pourraient fournir des informations précieuses pour leur intégration dans des environnements réels. Enfin, l'extension de cette recherche à des vitesses de transmission encore plus élevées et à d'autres types de fibres optiques pourrait également contribuer à une meilleure compréhension et à une utilisation plus étendue des FBG dans les systèmes de communication optique.

Résumé

Ce projet de fin d'étude explore l'optimisation des systèmes de transmission optique dans les fibres optiques, en mettant l'accent sur le rôle crucial de la gestion de la dispersion pour des performances de communication efficaces. Le réseau de Bragg en fibre (FBG) émerge comme un composant pivot pour la compensation de la dispersion en raison de sa simplicité, de son coût abordable, de son faible taux d'insertion et de son spectre de réflexion personnalisable avec une large bande passante. À travers une analyse exhaustive utilisant le simulateur OptiSystem, l'étude examine la compensation de la dispersion à l'aide de FBG sur différentes longueurs de fibre et paramètres. Les résultats, évalués à travers des diagrammes de l'œil dans des graphiques ultérieurs, démontrent l'efficacité du système de transmission simulé, notamment à une vitesse de 10 Gb/s.

Mots-clés : Système de transmission optique, Réseau de Bragg en fibre (FBG), compensation de la dispersion, simulateur OptiSystem, paramètres.

Abstract

This end-of-study project explores the optimization of optical transmission systems in optical fibers, emphasizing the crucial role of dispersion management for effective communication performance. Fiber Bragg Grating (FBG) emerges as a pivotal component for dispersion compensation due to its simplicity, affordable cost, low insertion loss, and customizable reflection spectrum with wide bandwidth. Through comprehensive analysis utilizing the OptiSystem simulator, the study investigates dispersion compensation using FBG across different fiber lengths and parameters. The results, evaluated through eye diagrams in subsequent graphs, demonstrate the efficiency of the simulated transmission system, notably at a speed of 10 Gb/s.

Keywords: Optical Transmission System, Fiber Bragg Grating (FBG), dispersion compensation, Optisystem simulator, parameters.

ملخص

هذا المشروع الختامي يستكشف تحسين أنظمة النقل الضوئي في الألياف البصرية، مع التركيز على الدور الحاسم لإدارة التشتت لتحقيق أداء اتصال فعال. تبرز شبكة براغ للألياف البصرية (FBG) كمكون رئيسي لتعويض التشتت بسبب بساطتها وتكلفتها المعقولة وانخفاض فقدان الإدخال وطيف الانعكاس القابل للتخصيص مع عرض نطاق ترددي واسع. من خلال تحليل شامل باستخدام محاكي OptiSystem، تستكشف الدراسة تعويض التشتت باستخدام FBG عبر أطوال ومعلمات مختلفة للألياف. تظهر النتائج، التي تم تقييمها من خلال الرسوم التوضيحية للعين في الرسوم البيانية التالية، كفاءة النظام المحاكي للنقل، ولا سيما بسرعة 10 جيجابت في الثانية.

الكلمات الرئيسية:

نظام النقل الضوئي، شبكة براغ للألياف البصرية (FBG)، تعويض التشتت، محاكي OptiSystem، المعلمات.