



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de la matière

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences de la matière

Filière : Physique

Spécialité : Physique de la matière condensée

Réf. :

Présenté et soutenu par :

KEBAIRI saria

OPTIMISATION DES PROPRIÉTÉS OPTIQUES DE LA FIBRE DANS UNE CHAÎNE DE TÉLÉCOMMUNICATION

Jury :

Mme	GUERGUEB Saïda	MAA	Université de Biskra	Présidente
.				
Mme	BOUDOUR Bariza	MCA	Université de Biskra	Encadrante
.				
M.	MEHAMMEDI Farhat	Pr	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2024-2025

اهداء

إلى من غرست في قلبي حب العلم والمعرفة
إلى من كانت قدوتي ومصدر إلهامي
إلى أمي وأبي،
أهدي هذه المذكرة عربون شكر وامتنان لما بذلتموه من أجلي من جهد وتضحيات،
ولدعائكما الذي كان نور طريقي في كل خطوة.

إلى أساتذتي الكرام
الذين لم يخلوا علينا بعلمهم وتوجيهاتهم،
لكم كل التقدير والاحترام.

إلى أصدقائي وزملائي،
رفاق الدرب الذين شاركوني هذه الرحلة العلمية،
دمتم سندًا ودعمًا.

إلى كل من دعمني بكلمة أو دعاء،
أهدي ثمرة هذا الجهد المتواضع.

Remerciements

Louange à Dieu, par Sa grâce les bonnes actions s'accomplissent et les objectifs sont atteints.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Je remercie tout particulièrement **BOUDOUR Bariza** pour son encadrement, ses conseils précieux et son accompagnement constant tout au long de ce travail.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent également aux membres du jury :

MEHAMMEDI Farhat et **GUERGUEB Saïda**

pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce mémoire, leurs remarques pertinentes et leurs encouragements appréciés.

Je remercie aussi l'ensemble de mes enseignants pour les connaissances transmises et leur soutien tout au long de mon parcours académique.

Un grand merci à mes collègues et amis, pour leur présence, leur entraide et leur motivation.

Enfin, je dédie mes remerciements les plus chaleureux à ma famille, pour leur soutien inconditionnel, leur patience et leur confiance en moi tout au long de mes études.

Que Dieu vous récompense tous et vous accorde réussite et prospérité.

Table de matières

Chapitre I: SYNTHESE SUR LES FIBRES OPTIQUES

Liste de figures	VI
List de Tableau	IX
Introduction générale.....	1
I.1. fibres optiques	4
I.1.1. Historique des fibres optiques	4
I.1.2. Généralités sur la fibre optique	5
I.1.2.1 Définition Fibre optique	5
I.1.2.2. Structure de la fibre optique	6
I.1.2.3. Les types de fibres optiques	7
I.1.2.4. Caractéristiques de Fibre optique	8
I.2. La liaison optique	11
I.2.1. Définition	11
I.2.2. Emetteur optique	11
I.2.2.1 Les diodes électroluminescentes (LED)	12
I.2.2.2. Diode LASER	13
I.2.3. Les modulations	14
I.2.3.1. La modulation	14
I.2.4. Récepteur optique.	14
I.2.3.1. Photo-détecteur	15
I.2.4. Critères de qualité d'une transmission	16
I.2.4.1. Le diagramme de l'œil [18]	17
I.3. La dispersion dans la fibre optique	18
I.3.1. La dispersion modale	20
I.3.2. La dispersion chromatique	21
I.4. Atténuations dans les fibres optiques	22
I.4.1. Atténuation dans la fibre optique [22]	22
I.4.2. Les atténuations dans la fibre optique	23
I.4.2.1 Atténuation intrinsèque	24
I.4.2.2 Les causes principales de l'atténuation dans la fibre optique	24
I.5 Les principaux effets non linéaires	25

I.5.1 Effet Kerr	25
I.5.2 Effet Raman (Diffusion Raman stimulée - SRS)	25
I.5.3 Effet Brillouin (Diffusion Brillouin stimulée - SBS)	26
I.6 Les pertes lors de l'épissage dans la fibre optique (fusion ou mécanique)	26
I.6.1 Épissure par fusion	26
I.6.2 Épissure mécanique	27
I.7 Les avantages des fibres optiques :	29
I.7.1 Caractéristiques électriques	29
I.7.2 Caractéristiques mécaniques des fibres optiques	29
I.7.3 Caractéristiques commerciales des fibres optiques	30

Chapitre II : LES DIFFERENTS TYPES DE COMPENSATIONS

II. Compensation dans les systèmes optiques	32
II.1 Compensation de la dispersion et l'atténuation	32
II.1.1 Méthodes de compensation de la dispersion	32
II.1.1.1 Fibres à dispersion compensée (DCF)	32
II.1.1.2 Réseaux de Bragg en fibre (FBG)	33
II.1.1.3 Compensation électronique par traitement du signal (DSP)	33
II.1.2 Compensation de l'atténuation	34
II.1.2.1 Amplificateurs optiques (EDFA, SOA, Raman, etc.)	34
II.1.3 Autres techniques avancées de compensation du signal	36
II.2 Techniques de multiplexage	37
II.2.1 Multiplexage par répartition de code	37
II.2.2 Multiplexage temporel (TDM)	38
II.2.3 Multiplexage par répartition en fréquence (FDM)	39
II.2.4 La technologie WDM (multiplexage en longueurs d'onde)	41
II.2.4.1 Types de WDM [42]:	41
II.2.4.2 Avantages de la technologie WDM cohérente (résumé) [43]	42
II.3 L'avantage de l'amplification optique [44]	42
II.4 Les inconvénients de l'amplification optique	43

Chapitre III : RÉSULTATS DE LA SIMULATION

III.1 Présentation du logiciel optisystem	45
III.2 Applications du logiciel optisystem	46
III.3 Avantage du logiciel optisystem	47
III.4 Critères de qualité d'une transmission	47
III.4.1 Le taux d'erreur binaire	47

III.4.2 Le facteur de qualité	48
III.4.3 Le diagramme de l'œil	48
III. 5 Présentation d'une liaison par fibre optique :	49
III.5.1 Module d'émission	49
III.5.1.1 Générateur binaire	49
III.5.1.2 Générateur NRZ	49
III.5.1.3 Le laser (cw laser)	50
III.5.1.4 Le modulateur externe	50
III.5.2 Support de transmission	50
III.5.3 Module de réception	50
III.5.3.2 Le photo détecteur PIN	50
III.5.3.3 Filtre de Bessel passe bas	50
III.6 Résultats et interprétations	51
III.6.1. Performances en absence d'un amplificateur	51
III.6.2 Utilisation de l'amplificateur EDFA pour compenser les pertes du signal optique ..	53
III.6.2 Utilisation de l'amplificateur à semi-conducteurs (SOA) pour renforcer le signal dans les réseaux intégrés	58
III.6.3 Utilisation de l'amplificateur Raman pour améliorer la transmission du signal sur de longues distances	64
III.6.4 Comparaison des performances du système sans amplificateur et avec amplificateurs optiques	68
III.6.5 Effet de variation de la puissance émise par le laser	69
CONCLUSION GÉNÉRALE	58
Références	59
RÉSUMÉ	64

Liste de figures

Figure I.1 : Image d'une fibre optique.....	6
Figure I.2 : Schéma d'une fibre optique [5].....	7
Figure I.3: Fibre multimodes à saut d'indice Réf [7].....	7
Figure I.4: Fibre multimodes à gradient d'indice Réf [7].....	8
Figure I.5: la fibre monomode Réf [7]	8
Figure I.6 : Seconde loi de Snell – Réflexion [9]	9
Figure I.7 : Réflexion totale interne [10].....	10
Figure I.8 : Principe de transmission d'un signal dans une fibre	11
Figure I.9 : Diode electroluminescente (LED).....	12
Figure I.10 : diode laser.....	13
Figure I.11 : Schema fonctionnel du recepteur de lumiere	15
Figure I.12 : la photo détection.....	16
Figure I.13 :Visualisation de la qualité du signal numérique à l'aide du diagramme de l'œil [19].....	18
Figure I.14 : Pertes de propagation des fibres optiques standard.....	22
Figure I.15 : Atténuations [30].....	23
Figure 1.16 : Bilan de perte dans une fibre optique [25].....	24
Figure II.1: Principe of fiber bragg gratings.....	6
Figure.II.2: Diagramme du codage des données d'un utilisateur.....	11
Figure.II.3 : Diagramme de multiplexage temporel des données.....	12
Figure II.4: Schéma de principe de Multiplexage fréquentiel.....	13
Figure II.5: Schéma suivant représente 4 bandes de Multiplexage fréquentielFigure.....	13
Figure.II.6: Principe d'une liaison WDM.....	14
Figure III.1 : Schéma de l'interface Optisystem.....	46

Figure III.2 : La liaison optique point à point sans amplificateur.....	49
Figure III.3 : le spectre à la sortie du laser.....	52
Figure III.4 : Train d'impulsion à la sortie de laser.....	52
Figure III.5 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée.....	53
Figure III.6 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée.....	53
Figure III.7 : la liaison optique point à point avec l'amplificateur EDFA.....	54
Figure III.8: le spectre à la sortie de l'amplificateur.....	55
Figure III.9: la sortie de la laser.....	56
Figure III. 10 : train d'impulsion à la sortie de filtre.....	57
Figure III.11 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée.....	58
Figure III.12 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée.....	58
Figure III.13 : la liaison optique point à point avec l'amplificateur SOA.....	59
Figure III.14: le spectre à la sortie de l'amplificateur.....	60
Figure III.15: la sortie de l'amplificateur.....	61
Figure III.16 : Train d'impulsion à la sortie de la impulsions RZ.....	62
Figure III. 17 : train d'impulsion à la sortie de filtre.....	63
Figure III.18 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée.....	64
Figure III.19 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée.....	64
Figure III.20 : la liaison optique point à point avec l'amplificateur Raman.....	65
Figure III.21: le spectre à la sortie de l'amplificateur.....	66
Figure III.22 : la sortie de la l'amplificateur.....	66
Figure III.23 : train d'impulsion à la sortie de filtre.....	67
Figure III.24 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée.....	68
Figure III.25 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée.....	69

Figure III.26 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée.....	71
Figure III.27 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée.....	71

List de Tableau

Tableau I.1 : Comparaison entre l'adhésion mécanique et l'adhésion par fusion.....28.

Tableau II.1:Méthodes de compensation dans les réseaux à fibre optique.....9-10

Introduction générale

Les fibres optiques jouent un rôle fondamental dans les communications de données au niveau mondial. En quelques années, elles ont envahi le secteur des télécommunications, et la majorité des informations que nous envoyons et recevons via Internet passent par elles.

L'invention des lasers, survenue autour de 1960, a permis des essais de transmission dans l'air. Cependant, des problèmes de propagation causés principalement par les fluctuations de l'air ont conduit à l'abandon de cette méthode, qui est maintenant limitée à des communications à courte distance (comme les télécommandes infrarouges et les connexions entre bâtiments), même si l'idée revient pour les liaisons directes entre satellites.

De leur côté, les fibres optiques, qui sont des fils de verre très fins et transparents, reposent sur un principe de lumière connu depuis longtemps. Elles ont d'abord été utilisées pour des applications décoratives, puis pour des usages pratiques comme l'éclairage, l'endoscopie et les mesures optiques à distance. Charles Kao a suggéré leur utilisation dans les télécommunications en 1966, mais ce n'est que dans les années 1970 que cela a été rendu réalisable grâce à des avancées dans la fabrication de fibres optiques en silice. Ces avancées ont permis de réduire les pertes de signal et de renforcer la résistance mécanique des fibres.

Cela a également été possible grâce à l'innovation des diodes laser à semi-conducteurs, qui combinent les avantages des lasers avec la simplicité des composants électroniques, grâce à la technologie des semi-conducteurs composés. Le développement de câbles, connecteurs et composants passifs de haute performance, ainsi que de procédés industriels pour le raccordement, étaient également essentiels pour établir les premières liaisons commerciales autour de 1980.

Depuis plusieurs années, les réseaux optiques sont devenus le choix privilégié pour les transmissions à longue distance. Un des principaux facteurs de cette réussite réside dans la vaste bande passante offerte par la fibre, mais surtout dans ses pertes minimales.

La conception de systèmes de transmission très capacitaires est devenue possible, car la fibre optique représente le support le plus fiable et le moins coûteux en comparaison avec les câbles de cuivre, parmi toutes les alternatives pour créer des réseaux à haut débit et répondre à l'augmentation des besoins des utilisateurs. En outre, avec la montée continue des

échanges et de la demande en services, la fibre optique peut transporter des volumes d'informations très importants, nécessitant un traitement électronique avant et après modulation. C'est dans ce contexte que se situe mon projet, axé sur l'analyse d'une chaîne de transmission optique à signal élevé.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous offrons un aperçu complet des fibres optiques, en décrivant leur composition, les divers types disponibles, leurs caractéristiques, ainsi que les avantages, inconvénients et domaines d'utilisation.

Le deuxième chapitre est dédié aux diverses méthodes de compensation des pertes qui affectent la qualité.

Enfin, le troisième chapitre commence par une présentation du logiciel OptiSystem, suivie d'une description des composants utilisés et de leurs caractéristiques. Une simulation avec des résultats achève ce chapitre.

Comme d'habitude, le mémoire est encadré par une introduction et une conclusion générales.

***Chapitre I: SYNTHESE SUR
LES FIBRES OPTIQUES***

Ce premier chapitre présente les bases essentielles des fibres optiques et de la liaison optique. Il commence par un aperçu historique et général des fibres optiques, incluant leur définition, structure, types et caractéristiques. Ensuite, il explore les composants fondamentaux d'une liaison optique tels que l'émetteur, le récepteur, ainsi que les techniques de modulation et les critères de qualité de transmission, notamment le diagramme de l'œil.

I.1. fibres optiques

I.1.1. Historique des fibres optiques

L'intérêt pour le transport de la lumière à travers des matériaux transparents remonte à l'Antiquité, lorsque les artisans verriers exploitaient ce phénomène à des fins décoratives. À la Renaissance, les artisans vénitiens ont développé des techniques de fabrication semblables à celles utilisées aujourd'hui pour la fibre optique.

La première démonstration scientifique du principe de réflexion totale interne, sur lequel repose la fibre optique, a été réalisée par les physiciens français Colladon et Babinet dans les années 1840, suivie par une expérience similaire de John Tyndall en 1854.

À la fin du XIXe siècle, Alexander Graham Bell a tenté la première transmission de signaux lumineux avec son appareil, le photophone. Cependant, cette invention ne s'est pas généralisée en raison de sa sensibilité aux conditions météorologiques.

Au XXe siècle, des expériences ont été menées pour transmettre des images à travers des fibres de verre. En 1930, Heinrich Lamm réussit à transmettre une image à l'aide de fibres de quartz. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que l'utilisation pratique a véritablement commencé, avec l'invention du fibroscope par van Heel et Hopkins, marquant une avancée majeure dans des domaines comme l'endoscopie médicale.

Avec l'invention du laser en 1960, la transmission d'informations lumineuses sur de longues distances devient envisageable. En 1964, Charles Kao propose l'utilisation conjointe de la fibre optique et du laser pour les télécommunications longue distance. En 1966, avec George Hockham, il démontre expérimentalement la validité de ce concept, ce qui est considéré comme le point de départ des communications optiques.

Cependant, des défis techniques subsistent, notamment les pertes importantes de signal. Ce problème a été partiellement résolu en 1970, lorsque des chercheurs de la société Corning

- Maurer, Schultz et Keck - ont développé les premières fibres en verre à faible perte, rendant possible leur utilisation dans les réseaux de télécommunications.

L'année 1977 marque le premier usage commercial à Chicago, suivie en 1980 par une installation similaire à Paris. Depuis, la technologie de la fibre optique a connu un développement spectaculaire : aujourd'hui, plus de 80 % des communications mondiales longue distance transitent par plus de 25 millions de kilomètres de câbles à fibre optique.

Le déploiement de la fibre au niveau des particuliers a débuté dans les années 1990, avec l'introduction de concepts comme le FTTH (Fiber To The Home) et le FTTB (Fiber To The Building), en réponse à la demande croissante en très haut débit. En 2005, cette technologie a commencé à se généraliser dans les foyers [1].

I.1.2. Généralités sur la fibre optique

I.1.2.1 Définition Fibre optique

La fibre optique est un support fin, composé de verre ou de plastique, utilisé pour transmettre la lumière et permettre le transfert de données sur de longues distances, que ce soit sur terre ou sous la mer. Cette technologie se distingue par une capacité de transmission bien supérieure à celle des câbles coaxiaux, et elle prend en charge les réseaux à large bande, permettant ainsi le transport de divers types de données, tels que la télévision, la téléphonie, la visioconférence ou les échanges informatiques.

Entourée d'une gaine protectrice, la fibre optique permet le transport de signaux lumineux modulés en intensité sur des distances pouvant atteindre plusieurs milliers de kilomètres, tout en conservant une excellente qualité de transmission. Grâce à ces performances, elle a joué un rôle clé dans la révolution des communications optiques, rendant possibles des vitesses et des portées autrefois inaccessibles.

Au-delà de son rôle dans les réseaux de communication, la fibre est également exploitée dans les domaines scientifique et industriel, notamment dans les capteurs de mesure (température, pression, etc.) et dans les techniques d'imagerie [2].

Elle présente de nombreux avantages : une grande capacité de transmission d'informations, une faible sensibilité aux interférences électromagnétiques, une large bande passante, un poids réduit et un diamètre très fin, ce qui en fait une solution idéale pour les infrastructures de télécommunication modernes [3].

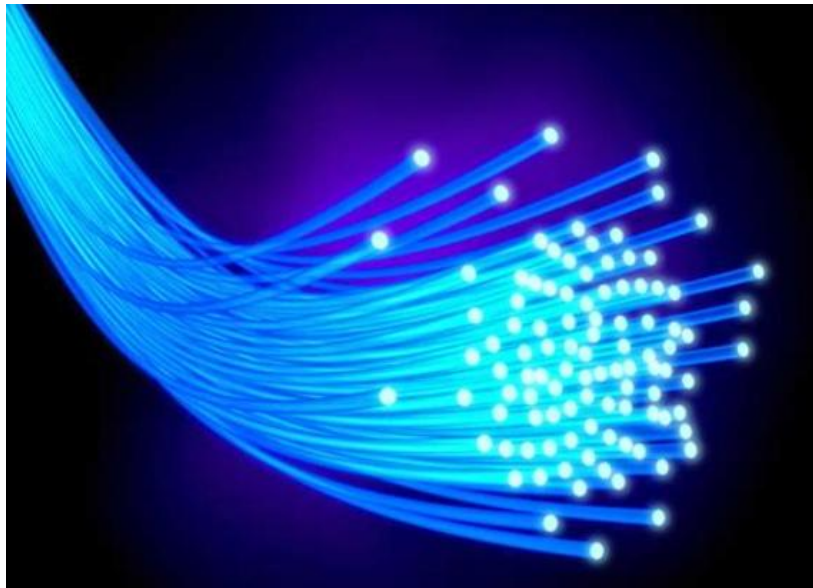


Figure I.1 : Image d'une fibre optique.

I.1.2.2. Structure de la fibre optique

La fibre optique est constituée de plusieurs couches fonctionnelles qui assurent à la fois la transmission efficace de la lumière et la protection mécanique de la structure. Ces composants principaux sont : le cœur, la gaine, et le revêtement protecteur Comme illustré dans la (figure I.2).

Le cœur :

C'est la partie centrale de la fibre optique, fabriquée à base de silice (SiO_2), avec un indice de réfraction élevé n_1 . Il guide la lumière grâce au phénomène de réflexion totale interne. Son diamètre est de quelques dizaines de micromètres.

La gaine :

Enveloppe optique entourant le cœur, faite d'un matériau avec un indice de réfraction plus faible n_2 . Elle permet de confiner la lumière dans le cœur. Son diamètre est de quelques centaines de micromètres.

Le revêtement (ou l'enveloppe protectrice) :

C'est une couche généralement en plastique ou en nylon qui protège la fibre contre les agressions mécaniques, l'humidité, et les attaques chimiques. Elle joue également un rôle dans le maintien de la lumière à l'intérieur du guide d'onde [4].

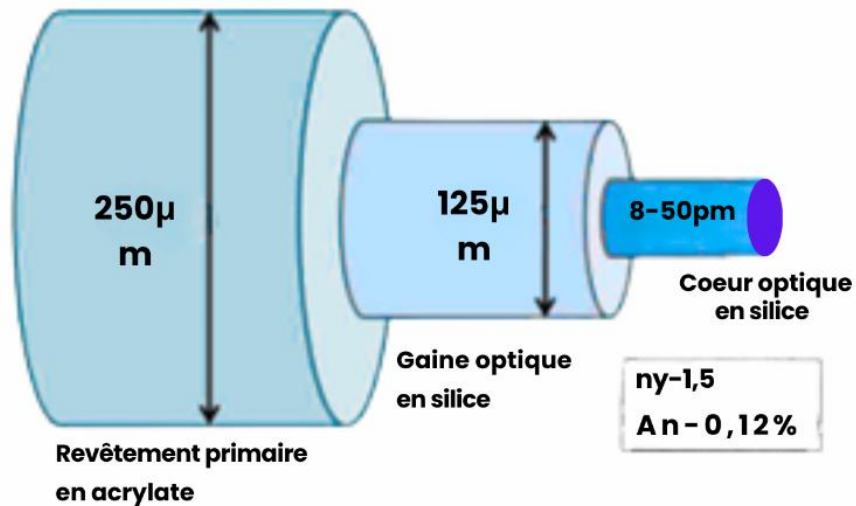


Figure I.2 : Schéma d'une fibre optique [5].

I.1.2.3. Les types de fibres optiques

Les fibres optiques sont classées en deux types principaux [6] :

A) La fibre multimode

elle transmet la lumière à travers plusieurs trajets à l'intérieur du cœur, et se divise en deux sous-types :

➤ Fibre à saut d'indice :

Le cœur et la gaine possèdent des indices de réfraction constants mais différents, ce qui provoque une rupture brutale à l'interface. Les rayons lumineux suivent ainsi plusieurs trajets, entraînant des temps de propagation différents, ce qui provoque une dispersion et une dégradation du signal. Cela peut être observé dans la (figure I.3).



Figure I.3: Fibre multimodes à saut d'indice Réf [7].

➤ Fibre à gradient d'indice :

Son cœur est caractérisé par un indice de réfraction qui varie progressivement de la gaine vers le centre. Cette variation permet de réduire les écarts de temps entre les

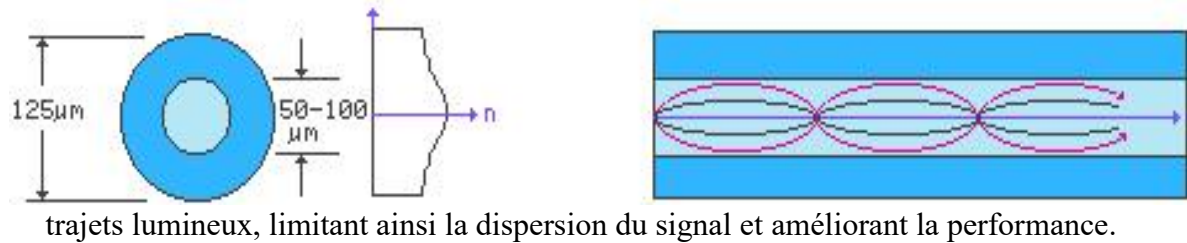


Figure I.4: Fibre multimodes à gradient d'indice Réf [7].

B) La fibre monomode

Elle se distingue par sa capacité à transmettre un seul rayon lumineux (un seul mode) grâce au diamètre très réduit de son cœur, généralement inférieur à 10 micromètres. Ce type de fibre présente une excellente efficacité en matière de réduction de la dispersion, permettant ainsi à l'information d'arriver sans distorsion notable. Grâce à une bande passante très élevée (supérieure à 10 GHz/km), elle est principalement utilisée pour les communications longue distance. Toutefois, elle nécessite des sources lumineuses très précises comme les lasers, ce qui la rend plus coûteuse que les fibres multimodes Selon la (figure I.5).

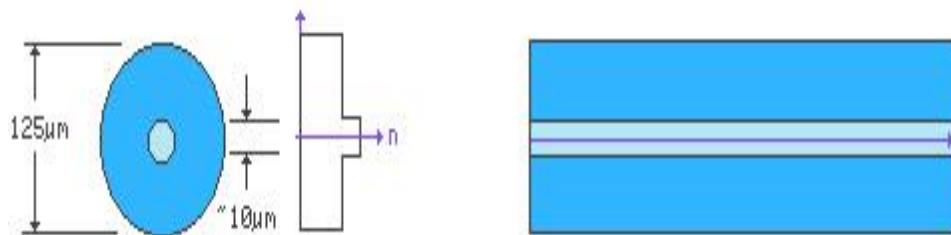


Figure I.5: la fibre monomode Réf [7].

I.1.2.4. Caractéristiques de la Fibre optique

❖ Propagation de la lumière dans une fibre optique

La propagation de la lumière dans une fibre optique repose sur le principe de la réflexion totale interne à l'interface entre le cœur et la gaine de la fibre. Lorsque la lumière pénètre dans la fibre optique, elle se déplace à travers le cœur (partie centrale) en suivant des trajectoires spécifiques [2].

❖ Principe de propagation (Lois de Snell-Descartes)

La propagation de la lumière dans les fibres optiques obéit aux lois de Snell-Descartes, qui décrivent le comportement des rayons lumineux lorsqu'ils passent d'un milieu à un autre [8].

1. Première loi de Snell-Descartes (plan d'incidence) :

Les rayons incident, réfléchi et réfracté appartiennent tous au même plan d'incidence, défini par le rayon incident et la normale au dioptré au point d'incidence.

2. Seconde loi – Réflexion :

Ce concept est présenté dans l'image ci-dessous :

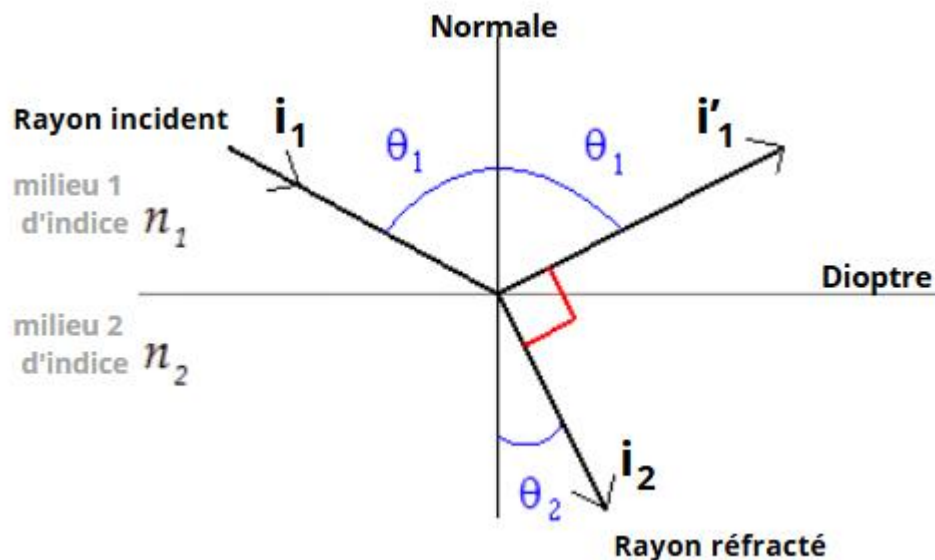


Figure I.6 : Seconde loi de Snell – Réflexion [9].

Lors d'une réflexion, le rayon réfléchi est symétrique au rayon incident par rapport à la normale.

$$i'_1 = -i_1 \quad (\text{I. 1})$$

3. Seconde loi – Réfraction :

Lors de la traversée d'un dioptré, la lumière est déviée selon la relation :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{I. 2})$$

n_1 et n_2 sont les indices des deux milieux.

4. Réfraction limite et réflexion totale :

Réfraction limite : Si la lumière passe d'un milieu moins réfringent à un plus réfringent, l'angle de réfraction atteint une valeur maximale correspondant à une incidence rasante.

Réflexion totale : Si la lumière provient d'un milieu plus réfringent, il existe un angle critique θ_c au-delà duquel toute la lumière est réfléchie.

$$\theta > \theta_c \Rightarrow \text{réflexion totale} \quad (\text{I. 3})$$

Voir la figure I.7 :

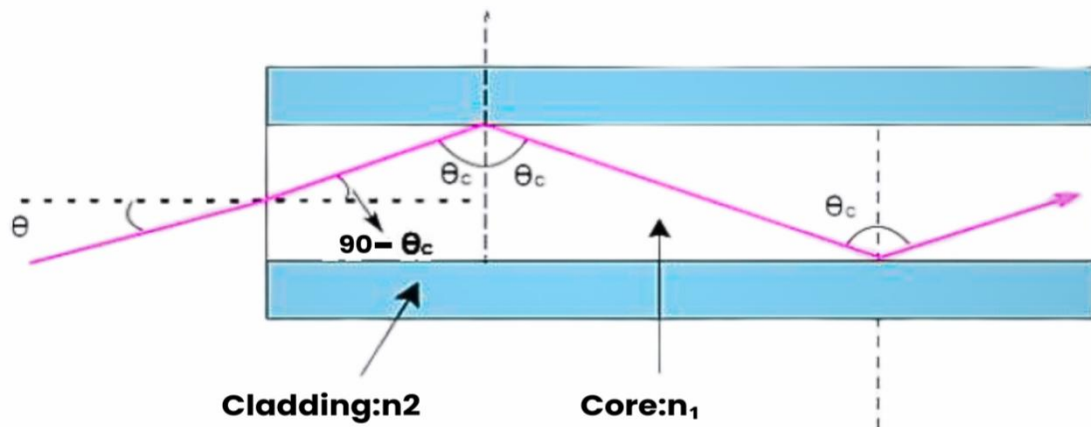


Figure I.7 : Réflexion totale interne [10].

I-2-3-3 – Indice de réfraction et ouverture numérique

Le guidage de la lumière dans une fibre optique dépend des indices de réfraction du cœur et de la gaine :

n_1 : indice du cœur

n_2 : indice de la gaine, avec $n_1 > n_2$

Pour que la lumière soit entièrement réfléchie à l'interface, l'angle d'incidence doit être inférieur à une valeur limite, définie par l'ouverture numérique (NA) :

$$n_0 \cdot \sin(\theta_{\text{limite}}) = \text{NA} \quad (\text{I. 4})$$

où n_0 est l'indice du milieu extérieur (généralement l'air).

La lumière admissible par la fibre doit donc appartenir à un cône d'acceptance, centré autour de l'axe de la fibre, permettant une propagation efficace sans pertes par réflexion.

I.2. La liaison optique

I.2.1. Définition

Depuis le début des télécommunications par fibre optique, le choix des sources optiques s'est porté sur les émetteurs à semi-conducteur à cause de leurs petites dimensions en rapport avec celles du cœur des fibres optiques, de la relative facilité que l'on a à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant, de leur spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation énergétique [11]. Figure I.8 :

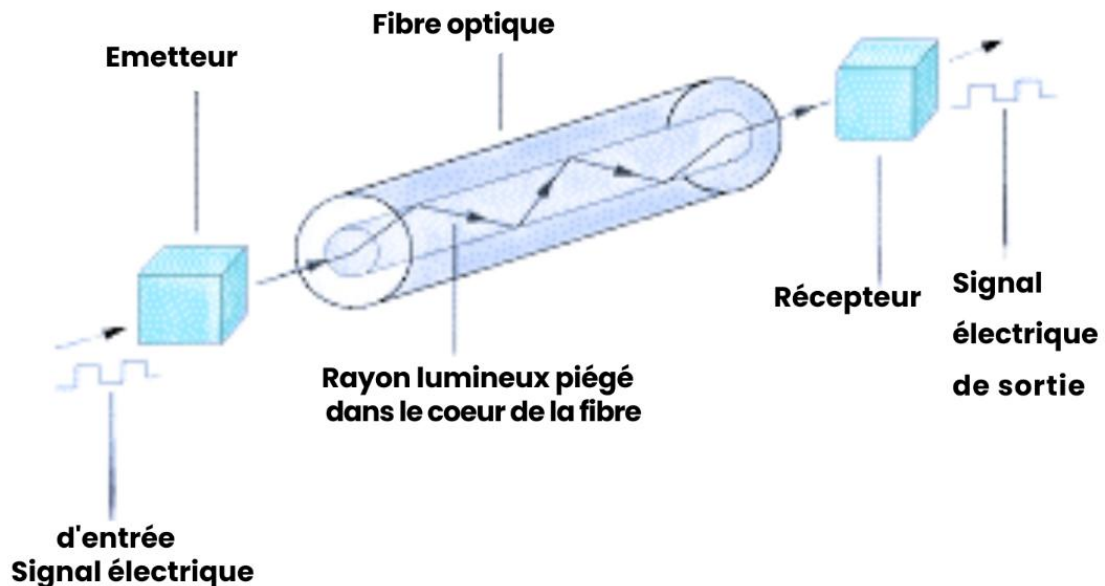


Figure I.8 : Principe de transmission d'un signal dans une fibre

I.2.2. Emetteur optique

Les systèmes de transmission par fibre optique nécessitent l'utilisation de sources lumineuses répondant à des critères spécifiques pour garantir l'efficacité et la stabilité à long terme du système. Parmi ces critères, on trouve la capacité à émettre de la lumière avec une puissance élevée, un coût raisonnable et des dimensions réduites permettant une installation compacte dans le système. De plus, ces composants doivent fonctionner à température ambiante et avoir une longue durée de vie pour assurer la durabilité. Il est également essentiel

que leur largeur spectrale soit relativement étroite afin de limiter la dispersion chromatique, ce qui pourrait affecter la qualité du signal. Enfin, ces composants doivent pouvoir moduler directement la lumière émise en contrôlant le courant électrique, ce qui améliore la précision du signal transmis. Les composants à semi-conducteurs sont les mieux adaptés à ces critères, et ils se divisent en deux catégories principales : les diodes électroluminescentes (LED) et les diodes laser, qui sont largement utilisées dans les applications de fibre optique.

I.2.2.1 Les diodes électroluminescentes (LED)

Le terme LED (Light Emitting Diode), ou DEL en français (Diode Électroluminescente), désigne un composant semi-conducteur capable d'émettre de la lumière lorsqu'un courant électrique le traverse. Les matériaux semi-conducteurs utilisés dans les LED convertissent l'énergie électrique en rayonnement électromagnétique, principalement dans le domaine visible du spectre.

Caractéristiques des LED :

Les diodes électroluminescentes se distinguent par leur faible coût, leur simplicité d'utilisation et leur robustesse. Toutefois, elles présentent certaines limitations en matière de performances optiques. Leur vitesse de commutation est relativement faible, ce qui les rend inadaptées aux transmissions à très haut débit. Elles génèrent un faisceau lumineux large, peu directionnel et de faible intensité, ce qui rend leur couplage avec les fibres optiques moins efficace, en particulier avec les fibres monomodes. Par conséquent, leur usage est généralement limité aux fibres multimodes et aux liaisons sur courtes distances.

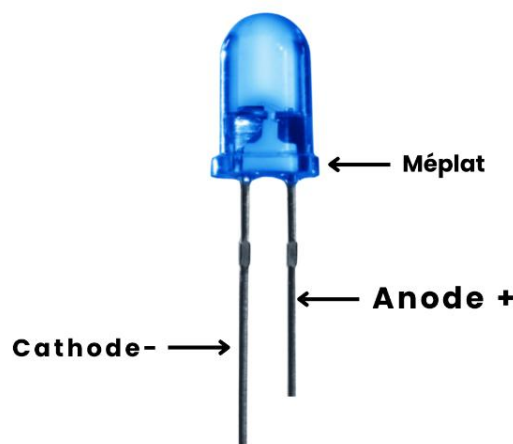


Figure I.9 : Diode électroluminescente (LED).

- ✓ Spectre optique : Les LED possèdent un spectre d'émission large bande, typiquement de 50 à 60 nm, ce qui contribue à une dispersion chromatique importante. Cela restreint leur emploi aux systèmes à bas débit (inférieurs à 622 Mbit/s) et à courte portée voir la figure I.9.
- ✓ Direction de l'émission : Il existe deux types de LED selon la direction du rayonnement émis :
 - LED à émission normale, où la lumière est émise perpendiculairement au plan de la jonction.
 - LED à émission latérale, où l'émission lumineuse se fait parallèlement au plan de la jonction [12].

I.2.2.2. Diode LASER

Les diodes laser représentent la source optique la plus adaptée dans les systèmes de communication par fibre optique, en raison de leur haute efficacité de couplage optique avec le cœur de la fibre qui est représenté dans la figure suivante :



Figure I.10 : diode laser.

Le mot LASER est l'acronyme de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, ce qui signifie amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement. Cet effet physique, connu sous le nom d'effet laser, a été démontré pour la première fois en 1960 par Theodore Maiman [13], à l'aide d'un cristal de rubis.

Ce phénomène repose sur deux principes fondamentaux : l'amplification de la lumière et la rétroaction optique [11].

I.2.3. Les modulations

I.2.3.1. La modulation

constitue une technique essentielle dans la transmission des signaux sur de longues distances. Elle permet d'adapter le signal aux caractéristiques du canal de transmission pour une meilleure efficacité et qualité de communication. On distingue principalement deux grandes catégories de modulation :

 **Modulation analogique** : comprend des techniques telles que l'AM (Amplitude Modulation) et la FM (Frequency Modulation), couramment utilisées dans les stations de radio et les systèmes de radiodiffusion traditionnels.

 **Modulation numérique** : largement utilisée dans les télécommunications modernes en raison de sa robustesse face au bruit, de son efficacité en bande passante, et de sa facilité de traitement numérique. Bien qu'elle soit généralement plus coûteuse à mettre en œuvre que la modulation analogique, elle offre des performances nettement supérieures.

Parmi les techniques de modulation numérique, les plus répandues dans l'industrie sont :

- FSK (Frequency Shift Keying) : modulation par déplacement de fréquence. Elle assure une bonne continuité du signal et réduit les risques de distorsion, de bruit et de mauvaise réception lors de la transmission.
- PSK (Phase Shift Keying) : modulation par changement de phase. Elle est très utilisée dans les systèmes numériques, mais peut introduire des distorsions dues aux sauts de phase, affectant ainsi la qualité du signal transmis [14].

I.2.4. Récepteur optique.

La section de réception constitue l'étape finale de la chaîne de transmission. Sa fonction principale est de recevoir le signal optique transmis à travers la fibre optique, puis de le convertir en un signal électrique afin de permettre l'extraction des données transmises. Comme illustré dans la (figure I.11) [15].

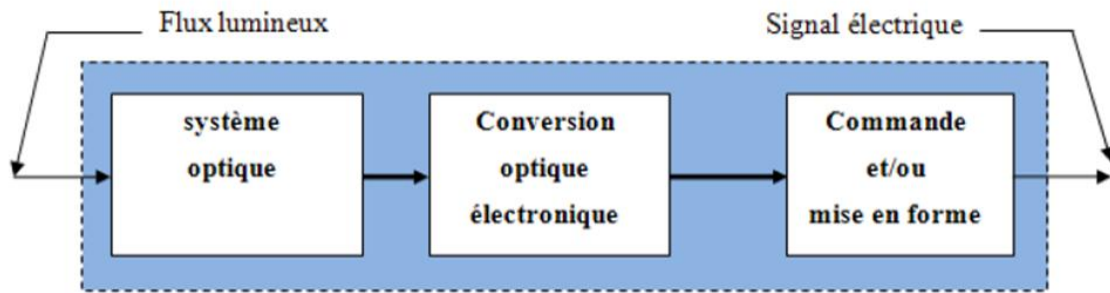


Figure I.11 : Schéma fonctionnel du récepteur de lumière.

I.2.3.1. Photo-détecteur

a. Le photo- détecteur :

Le photo-détecteur est l'appareil chargé de transformer le signal lumineux en un signal électrique, tout en réduisant les perturbations et les distorsions causées par le bruit. Il peut être considéré comme un compteur de photons et un générateur de courant.

Pour remplir ce rôle de manière efficace, un photo-détecteur doit présenter les caractéristiques suivantes :

- Haute sensibilité à la longueur d'onde utilisée dans le système,
- Réponse extrêmement rapide, car il est utilisé dans des systèmes fonctionnant à des débits allant jusqu'à 10 voire 40 Gb/s,
- Faible niveau de bruit pour garantir une réception précise.

Ces exigences sont généralement satisfaites par l'utilisation de photo-détecteurs à base de semi-conducteurs, tels que le silicium ou InGaAs, en raison de leur grande rapidité et de leur facilité d'intégration dans les systèmes. Cependant, certains autres dispositifs peuvent offrir une sensibilité plus élevée, mais sont moins efficaces en termes de rapidité et d'intégration dans le système.

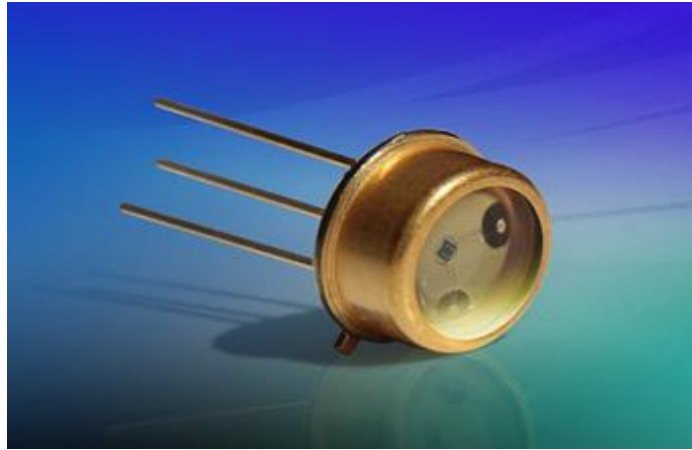


Figure I.12 : la photo détection

Principe de fonctionnement de la photo détection :

La photodiode est un dispositif basé sur des matériaux semi-conducteurs, conçu pour capter les photons transmis par la fibre optique. Sa structure permet de convertir efficacement

l'énergie des photons incidents en électrons dans le matériau semi-conducteur, grâce à un processus d'absorption qui déplace les électrons de la bande de valence vers un niveau d'énergie plus élevé dans la bande de conduction. Ces électrons excités deviennent capables de se déplacer librement dans la structure, générant ainsi un courant électrique. Le nombre d'électrons générés est proportionnel au nombre de photons absorbés.

Cependant, seuls les photons dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite (gap) du semi-conducteur peuvent être absorbés efficacement et générer des paires électrons-trous. Cette largeur de bande (gap) détermine l'énergie minimale nécessaire au fonctionnement de la photodiode. En conséquence, il existe une longueur d'onde de coupure λ_c , au-delà de laquelle le matériau devient transparent à la lumière incidente, n'absorbant plus les photons [16].

I.2.4. Critères de qualité d'une transmission

La transmission réelle du signal diffère de la transmission idéale en raison des imperfections des modules terminaux (émetteur et récepteur), ainsi que des perturbations introduites par le canal de transmission. Pendant la transmission, le signal subit une déformation progressive ainsi que des effets de bruit, ce qui impacte la qualité de réception [11].

Pour évaluer les performances du système de transmission, plusieurs critères techniques sont pris en compte : le taux d'erreur binaire (BER), le facteur Q, l'efficacité spectrale, la puissance, le rapport signal/bruit optique (OSNR), le diagramme de l'œil, ainsi que la marge système et la pénalité de puissance. Dans ce qui suit, nous nous concentrerons en détail sur le diagramme de l'œil, en raison de son importance cruciale dans l'évaluation visuelle de la qualité d'un signal numérique [17].

I.2.4.1. Le diagramme de l'œil [18]

En télécommunications numériques, le diagramme de l'œil constitue une méthode d'analyse essentielle permettant de visualiser les dégradations subies par un signal numérique lors de sa transmission, notamment celles dues au bruit et à la dispersion du canal. Cette représentation graphique permet d'évaluer, de manière simple mais efficace, la qualité du signal reçu avant sa démodulation.

Le principe repose sur la superposition temporelle de multiples séquences de symboles sur un oscilloscope fonctionnant en mode persistance (accumulation). Lorsqu'une séquence aléatoire de bits est injectée dans le système, l'oscilloscope enregistre les transitions successives du signal, ce qui génère une figure caractéristique appelée "œil". En l'absence de bruit, les traces se superposent parfaitement ; en revanche, la présence de bruit provoque une variabilité dans les transitions, ce qui épaissit les contours du diagramme.

Plusieurs paramètres peuvent être extraits visuellement de ce diagramme (Figure I.13) :

- ✓ L'ouverture verticale de l'œil est liée au rapport signal/bruit (SNR) : plus elle est grande, meilleure est la différenciation entre les niveaux logiques.
- ✓ L'ouverture horizontale reflète la tolérance temporelle pour l'échantillonnage, influençant la synchronisation.

Ainsi, plus la zone centrale du diagramme est dégagée et bien définie, plus la qualité du signal numérique transmis est jugée satisfaisante.

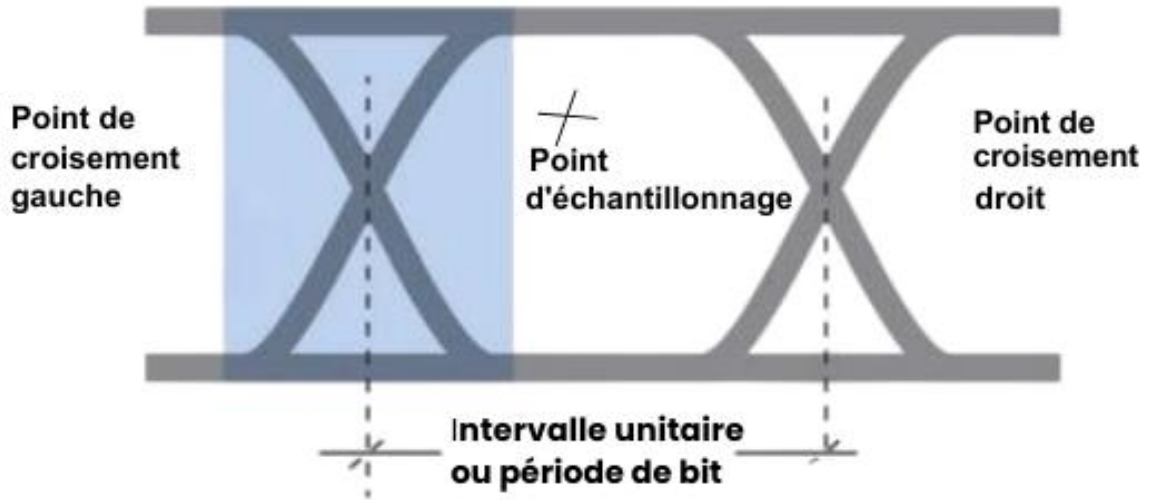


Figure I.13 : Visualisation de la qualité du signal numérique à l'aide du diagramme de l'œil [19].

I.3. La dispersion dans la fibre optique

La dispersion constitue l'un des principaux facteurs limitant la distance de transmission dans une ligne optique. Elle se manifeste par une distorsion des signaux analogiques et par un étalement, voire un recouvrement, des signaux numériques [19].

Dans une fibre optique, la dispersion chromatique totale résulte de deux composantes [20] :

- la dispersion intrinsèque du matériau (D_m) et celle induite par la structure du guide d'ondes (D_g). Ainsi, la dispersion globale peut s'écrire :

$$D = D_m + D_g \quad (I. 5)$$

Lorsqu'une onde se propage dans une fibre optique, elle est caractérisée par une constante de propagation β donnée par :

$$\beta(\omega) = \frac{n_{eff}(\omega) \cdot \omega}{c} \quad (I. 6)$$

Dans le cas de la propagation d'impulsions courtes, la dispersion joue un rôle essentiel car les différentes composantes spectrales se déplacent à des vitesses distinctes, déterminées par la relation $c/n(\omega)$.

Pour décrire précisément cet effet, on développe la constante de propagation β en série de Taylor autour de la fréquence centrale ω_0 de l'impulsion :

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6} \beta_3(\omega - \omega_0)^3 + \dots \quad (I. 7)$$

Où :

$$\beta_n = \left. \frac{d^n \beta}{d\omega^n} \right|_{\omega_0} \quad \text{pour } n=0,1,2 \quad (\text{I. 8})$$

Les deux premiers coefficients β_1 et β_2 sont directement liés à l'indice de phase effectif n_{eff} , et s'expriment comme suit :

$$\beta_1 = \frac{1}{v_g} = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{c} \left(n_{eff} + \omega \cdot \frac{dn_{eff}}{d\omega} \right) \quad (\text{I. 9})$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left(2 \cdot \frac{dn_{eff}}{d\omega} + \omega \frac{d^2 n_{eff}}{d^2 \omega} \right) \quad (\text{I. 10})$$

Ici, v_g désigne la vitesse de groupe, et n_g l'indice de groupe. Le coefficient β_1 est inversement proportionnel à v_g et représente la vitesse de l'enveloppe de l'impulsion, tandis que β_2 décrit la dispersion de vitesse de groupe (GVD).

Dans la littérature, cette dernière est fréquemment exprimée sous la forme suivante :

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = - \frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (\text{I. 11})$$

La dispersion joue un rôle déterminant dans la génération de supercontinuum. Selon qu'on se trouve dans un régime de dispersion normale ($D < 0$) ou anormale ($D > 0$), les mécanismes de formation du supercontinuum diffèrent.

Le profil géométrique de la fibre permet d'ajuster la dispersion chromatique et de contrôler la position de la longueur d'onde de dispersion nulle (ZDW). Par exemple, dans les fibres à cœur suspendu, une réduction du diamètre du cœur peut décaler fortement la ZDW vers des longueurs d'onde plus courtes (du moyen infrarouge vers le proche infrarouge) .

En revanche, les fibres à saut d'indice présentent un impact plus limité sur la ZDW à cause d'un contraste d'indice plus faible. Grâce à une conception adaptée, il est possible de réaliser des fibres à dispersion entièrement normale ("all-normal dispersion") ou présentant une ou plusieurs ZDW.

Enfin, l'utilisation de fibres étirées (tapered fibers) permet d'obtenir des guides d'ondes avec une dispersion modulable . Contrairement aux fibres microstructurées ou à saut d'indice qui sont directement fabriquées à partir de préformes sur une tour de fibrage, les fibres étirées sont souvent modifiées après fabrication, ce qui permet d'atteindre des diamètres très faibles (de quelques microns à quelques dizaines de microns), souvent inaccessibles par étirage direct [20].

I.3.1. La dispersion modale

La dispersion modale se manifeste dans les fibres optiques multimodes en raison de la différence de temps de propagation entre les divers modes guidés. Bien que chaque rayon parcoure la même distance longitudinale dans la fibre, les angles d'incidence différents entraînent des chemins optiques distincts, et donc des temps de transit variés.

Considérons deux rayons extrêmes : l'un empruntant le chemin le plus direct, et l'autre suivant un trajet plus incliné. Si ces deux rayons sont excités simultanément par une impulsion ultracourte à l'instant $t = 0$, ils atteindront l'extrémité de la fibre à des moments différents, notés t_m et t_M . Le décalage temporel entre eux est [19] :

$$\Delta_t = t_M - t_m \quad (\text{I. 12})$$

Dans une situation réelle, l'impulsion incidente excite l'ensemble des modes permis par la fibre, ce qui entraîne un élargissement temporel de l'impulsion à la sortie — phénomène appelé dispersion modale.

La vitesse de propagation d'un mode dépend de son angle par rapport à l'axe longitudinal Z de la fibre. Elle s'exprime par :

$$v_m = \frac{c}{n_1} \cdot \cos(\theta) \quad (\text{I. 13})$$

- Pour le mode fondamental ($m = 0$, $\theta = 90^\circ$) :

$$v_m = \frac{c}{n_1}, \quad \Delta t = \frac{L \cdot n_1}{c} \quad (\text{I. 14})$$

- Pour le mode extrême ($m = m_{max}$), avec :

$$\cos(\theta) = \frac{n_1}{n_2}, \quad v_m = \frac{c \cdot n_2}{n_1^2} = \frac{c \cdot (1 - \Delta)}{n_1}, \quad \Delta_t = \frac{L \cdot n_1 \cdot (1 + \Delta)}{c} \quad (\text{I.15})$$

Où :

- C est la vitesse de la lumière dans le vide.
- n_1 est l'indice de réfraction du cœur.
- n_2 est celui de la gaine.
- Δ est le contraste d'indice relatif.
- L est la longueur de la fibre.

Ainsi, la dispersion modale est l'un des principaux facteurs limitant la bande passante des fibres multimodes, notamment sur de longues distances.

I.3.2. La dispersion chromatique

Dans la pratique, les signaux lumineux ne sont jamais strictement monochromatiques. La lumière émise par une source optique est en réalité constituée d'un ensemble d'ondes de longueurs d'onde différentes. Or, l'indice de réfraction d'un matériau – ici, celui de la fibre optique – varie en fonction de la longueur d'onde. Ce phénomène implique que chaque composante spectrale se propage à une vitesse différente.

- La vitesse de phase v_{ph} , à laquelle chaque composante de la phase de l'onde progresse, est liée à la vitesse de la lumière dans le vide c par la relation suivante :

$$V_{ph} = \frac{c}{n} \quad (I. 16)$$

- Quant à la vitesse de propagation du paquet d'ondes (ou de l'enveloppe de l'impulsion), elle est déterminée par la vitesse de groupe V_g , définie comme :

$$V_g = \frac{c}{N} \quad (I. 17)$$

- où N est l'indice de groupe, qui dépend de l'indice de phase n et de la longueur d'onde λ , selon l'expression :

$$\lambda \frac{dn}{d\lambda} - n = N \quad (I. 18)$$

Dans un milieu non dispersif, N reste constant quelle que soit la longueur d'onde, et le paquet d'ondes conserve sa forme durant la propagation. En revanche, dans un milieu dispersif, l'indice de groupe (et donc la vitesse de groupe) dépend de λ , ce qui entraîne un étalement temporel de l'impulsion — autrement dit, une dispersion chromatique [19].

Cette dispersion devient particulièrement significative lorsque le signal lumineux contient plusieurs longueurs d'onde, soit en raison de la largeur spectrale de la source (comme une LED ou un laser à spectre étroit), soit du fait d'un élargissement naturel du signal autour d'une longueur d'onde centrale (ex. : $\lambda \pm 1$ nm).

La dispersion chromatique se traduit donc par un étalement temporel du signal en sortie, dû aux vitesses de propagation différentes des composantes spectrales. Elle dépend de la longueur d'onde et résulte de la somme de deux effets [21] :

- La dispersion du matériau, liée à la variation de l'indice de réfraction avec la longueur d'onde.
- La dispersion du guide, qui dépend de la structure et du profil d'indice de la fibre.
- Il est ainsi possible de réduire cette dispersion en optimisant le profil de la fibre optique.

Ce phénomène de dispersion, ainsi que son impact sur les pertes de propagation, est illustré dans la (figure I.14).

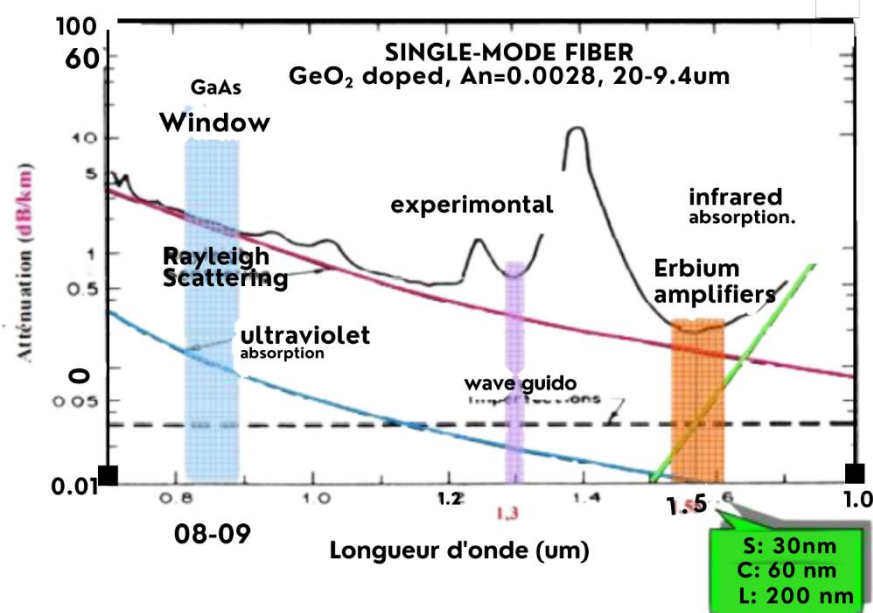


Figure I.14 : Pertes de propagation des fibres optiques standard.

I.4. Atténuations dans les fibres optiques

I.4.1. Atténuation dans la fibre optique [22]

L'atténuation désigne la diminution de la puissance d'un signal optique lors de sa propagation dans une fibre. Elle s'exprime généralement en décibels par kilomètre (dB/km) et se calcule par la formule :

$$\alpha(\lambda)_{dB/Km} = -\frac{10}{L} \left[\frac{P_s}{P_e} \right] \quad (I. 19)$$

Où :

- P_e : puissance d'entrée.
- P_s : puissance de sortie.
- L : longueur de la fibre en kilomètres.

Par rapport aux câbles en cuivre, l'atténuation dans la fibre optique est très faible. Elle dépend principalement de la longueur d'onde utilisée. La valeur minimale théorique pour la

silice est d'environ 0,22 dB/km, mais en pratique, les fibres sont dopées, ce qui génère des pertes supplémentaires par absorption et diffusion.

Deux fenêtres de transmission principales sont utilisées :

- 1300 nm : bande passante de 50 nm, atténuation moyenne $\approx 0,4$ dB/km. Utilisée pour les réseaux métropolitains ou les courtes distances.
- 1550 nm : bande passante de 100 nm, atténuation moyenne $\approx 0,2$ dB/km. Idéale pour les liaisons longue distance à haut débit, grâce à une faible atténuation permettant d'espacer les amplificateurs.

I.4.2. Les atténuations dans la fibre optique

Lors de la propagation d'un rayon lumineux dans une fibre optique, des distorsions apparaissent, principalement dues à la dispersion modale et chromatique. Ces effets limitent la bande passante totale du système et réduisent la qualité du signal reçu, en diminuant le rapport signal/bruit (S/B), ce qui nécessite une puissance d'émission plus élevée pour compenser [23].

L'atténuation dans les liaisons optiques correspond à la perte de puissance optique au cours de la transmission. Elle se divise en deux types principaux :

- **Atténuation intrinsèque** : liée aux propriétés physiques et aux procédés de fabrication de la fibre, tels que l'absorption et la diffusion internes.
- **Atténuation extrinsèque** : engendrée par des pertes au niveau des connexions, telles que les épissures ou les connecteurs, introduites lors de l'assemblage du système de transmission.



Figure I.15 : Atténuations [23].

I.4.2.1 Atténuation intrinsèque

L'atténuation dépend à la fois du matériau constituant la fibre et de la longueur d'onde utilisée, appelée longueur d'onde d'exploitation. La courbe d'atténuation en fonction de la longueur d'onde présente les caractéristiques suivantes :

- Une diminution progressive dans le domaine des courtes longueurs d'onde (ultraviolet) ;
- Des pics localisés liés à l'absorption de certaines impuretés ou éléments dopants.
- Une augmentation de l'atténuation aux longues longueurs d'onde (infrarouge), due principalement à l'absorption vibratoire du matériau.

I.4.2.2 Les causes principales de l'atténuation dans la fibre optique

L'atténuation représente une perte progressive de l'énergie du signal optique au cours de sa propagation. Elle résulte de plusieurs facteurs majeurs, regroupés en trois catégories principales [24] :

- ✚ **Propriétés intrinsèques des matériaux** : telles que la diffusion Rayleigh et l'absorption, qui sont liées à la nature même des matériaux utilisés dans la fabrication de la fibre.
- ✚ **Défauts de fabrication** : incluant les impuretés chimiques, les irrégularités géométriques ou les hétérogénéités dans la structure du cœur ou de la gaine.
- ✚ **Non-respect des règles d'installation** : comme les courbures excessives ou les contraintes mécaniques inappropriées, qui entraînent des pertes par courbure.

Cette atténuation se traduit par une réduction exponentielle de la puissance lumineuse transmise tout au long de la fibre, comme illustré dans le schéma récapitulatif suivant.

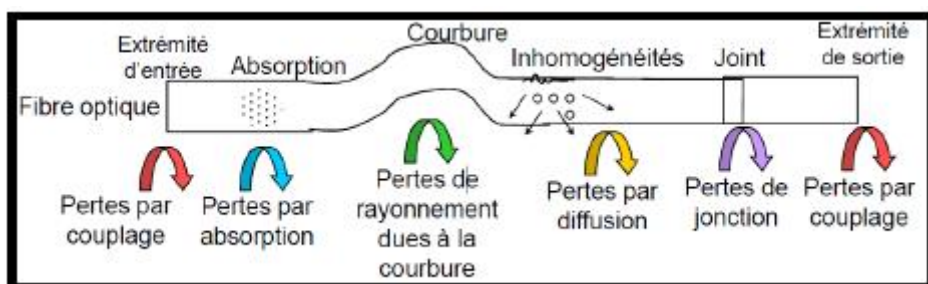


Figure 1.16 : Bilan de perte dans une fibre optique [25].

I.5 Les principaux effets non linéaires

Lorsqu'une onde optique de forte intensité se propage dans une fibre optique monomode, plusieurs phénomènes non linéaires peuvent apparaître en raison de l'interaction entre le champ optique et le matériau de la fibre. Les principaux effets sont [26]:

I.5.1 Effet Kerr

L'effet Kerr optique désigne la dépendance de l'indice de réfraction d'un milieu transparent à l'intensité du champ lumineux appliqué.

Ce phénomène résulte d'une déformation instantanée (temps de réponse de l'ordre de 10^{-15} s) de la répartition électronique des molécules de silice sous l'influence du champ optique.

L'indice de réfraction non linéaire est donné par :

$$n_{NL}(\lambda, I(t)) = n(\lambda) + n_2 I(t) \quad (\text{II.1})$$

où :

$n(\lambda)$ est l'indice linéaire du matériau,

$I(t)$ est l'intensité instantanée de la lumière,

n_2 est le coefficient de réfraction non linéaire.

I.5.2 Effet Raman (Diffusion Raman stimulée - SRS)

Cet effet est lié à l'interaction entre la lumière et les phonons optiques du matériau. Une partie de l'énergie des photons de la pompe est transférée aux phonons, générant une onde de fréquence inférieure (onde Stokes) :

$$\nu_s = \nu_p - \delta_\nu \quad (\text{II.2})$$

où δ_ν est caractéristique du matériau.

À l'inverse, une onde "anti-Stokes" peut être produite si les phonons transfèrent leur énergie aux photons.

I.5.3 Effet Brillouin (Diffusion Brillouin stimulée - SBS)

Ce phénomène résulte de l'interaction du champ optique avec les phonons acoustiques, dus à l'agitation thermique des molécules.

Ces vibrations induisent des variations périodiques de l'indice de réfraction, générant des ondes acoustiques de faible amplitude et provoquant la diffusion du signal lumineux dans toutes les directions.

I.6 Les pertes lors de l'épissage dans la fibre optique (fusion ou mécanique)

La mesure de la perte d'épissure dans les fibres optiques constitue un défi technique, en particulier lorsqu'il s'agit de connexions à faible perte entre des fibres monomodes similaires. Cela nécessite une grande sensibilité de mesure (inférieure à $0,05 \pm 0,005$ dB) afin de garantir la précision des résultats.

La fiabilité de la mesure est influencée par plusieurs facteurs, notamment la répétabilité des résultats et la reproductibilité des mesures.

L'épissage consiste à raccorder deux fibres optiques. Il existe deux types principaux :

I.6.1 Épissure par fusion

La perte par épissure représente l'une des principales sources d'atténuation dans les systèmes à fibre optique. Elle résulte d'un mauvais alignement entre les extrémités des fibres au point de fusion, que ce soit en termes de diamètre, de forme ou de profil de propagation du mode optique. Même en utilisant des fibres identiques (comme la SMF-28), une certaine perte de signal demeure inévitable. Cette perte doit être prise en compte, en particulier dans les systèmes sensibles tels que les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA), et se calcule par la formule [27] :

$$\left[\log_{10} \left(\frac{P_{\text{entree}}}{P_{\text{sortie}}} \right) - \text{Perte de propagation (dB)} \cdot 10 \right] \frac{1}{2} = \text{Perte de fusion (dB)} \quad (\text{I. 20})$$

Où :

- P_{entree} : puissance optique avant la fusion
- P_{sortie} : puissance optique après la fusion
- Perte de propagation : perte due à la transmission dans la fibre elle-même, qu'il faut soustraire pour isoler la perte par fusion.
- La division par 2 est effectuée car la mesure inclut les pertes de deux épissures, en supposant qu'elles sont identiques.

I.6.2 Épissure mécanique

Dans l'épissure mécanique, les extrémités des fibres optiques sont alignées à l'intérieur d'un dispositif mécanique qui utilise un adhésif ou un gel à indice de réfraction adapté afin de réduire les pertes d'insertion et les réflexions.

Cette méthode est principalement utilisée pour les réparations temporaires ou lorsque l'équipement de fusion n'est pas disponible.

Bien qu'elle soit simple et rapide à mettre en œuvre, elle présente généralement des pertes optiques plus élevées et une résistance mécanique plus faible que l'épissure par fusion [28].

➤ Estimation théorique de la perte d'épissure mécanique (Mechanical Splicing Loss)

Contrairement à l'épissure par fusion, dont la perte peut être évaluée à l'aide de formules précises, l'épissure mécanique ne dispose pas d'une équation unique pour mesurer la perte. Elle est généralement estimée à partir de modèles expérimentaux prenant en compte différents facteurs physiques et optiques.

1. Perte par réflexion (Reflection Loss)

La perte de réflexion est calculée selon l'équation de Fresnel :

$$\log_{10} \left(\frac{1}{R} \right) \cdot 10 = L_{reflection} \quad (I. 21)$$

Où :

- $L_{reflection}$: la perte par réflexion en décibels (dB)

- R : le coefficient de réflexion, dépendant de la différence d'indice de réfraction entre les deux fibres connectées.

Bien que la valeur de R soit généralement faible dans une épissure mécanique, cette réflexion peut tout de même influencer la qualité de la transmission optique.

2. Perte liée à l'alignement optique

La perte totale dans une épissure mécanique peut être estimée selon la formule suivante :

$$L_{splice} = L_{mismatch} + L_{reflection} + L_{loss_gel}$$

Avec :

- $L_{mismatch}$: perte due au désalignement géométrique ou aux différences de diamètre entre les fibres.
- $L_{reflection}$: perte par réflexion à l'interface d'épissure.
- L_{loss_gel} : perte induite par l'utilisation du gel ou de l'adhésif servant à aligner les fibres.

Une comparaison entre l'épissure mécanique et l'épissure par fusion est présentée dans le tableau ci-contre [29]

Tableau I.1 : Comparaison entre l'adhésion mécanique et l'adhésion par fusion.

Critère	Adhésion par fusion	Adhésion mécanique
Niveau de perte	Très faible (~0,1 dB)	Relativement plus élevé (~0,2–0,75 dB)
Résistance mécanique	Élevée	Faible à moyenne
Coût	Élevé en raison des équipements requis	Faible
Facilité de mise en œuvre	Nécessite une formation et des équipements spécifiques	Plus facile et plus rapide
Utilisation	Permanente	Temporaire ou en cas de réparation

I.7 Les avantages des fibres optiques :

Par comparaison aux autres supports de transmission existants, la fibre optique présente de nombreux avantages qui justifient son introduction dans les systèmes de transmission.

I.7.1 Caractéristiques électriques

- ✚ Le premier avantage concerne la performance de transmission. La fibre permet le multiplexage en longueur d'onde (WDM) grâce à une bande passante optique extrêmement large, offrant ainsi une capacité de transmission très élevée (pouvant atteindre plusieurs térabits par seconde), ce qui dépasse de loin les capacités des supports électriques ou radio classiques.
- ✚ En outre, elle présente une atténuation très faible, permettant la transmission des signaux sur de longues distances sans recourir fréquemment à des répéteurs.
- ✚ La fibre optique offre également une sécurité électrique élevée, assurant une isolation totale entre les terminaux. Elle peut être utilisée dans des environnements dangereux comme les zones explosives ou sous haute tension. De plus, elle est insensible aux interférences électromagnétiques et n'en génère pas elle-même, ce qui garantit une confidentialité quasi totale — un atout essentiel dans les domaines militaires, bancaires et de transmission de données sensibles [16].

I.7.2 Caractéristiques mécaniques des fibres optiques

Les fibres optiques présentent plusieurs avantages mécaniques qui les rendent particulièrement adaptées aux systèmes de transmission modernes [30] :

- ✚ Faible diamètre et poids réduit, facilitant l'installation et réduisant la charge structurelle.
- ✚ Haute résistance mécanique, permettant une utilisation dans des environnements contraignants, y compris en pose souterraine.
- ✚ Absence de métal, assurant une non-conductivité électrique et une sécurité accrue en milieux sensibles.
- ✚ Ininflammables, ce qui limite les risques d'incendie.
- ✚ Immunité totale aux interférences électromagnétiques, garantissant une qualité de transmission optimale.
- ✚ Faible consommation énergétique pour la transmission du signal.

I.7.3 Caractéristiques commerciales des fibres optiques

Les fibres optiques offrent plusieurs avantages commerciaux et économiques significatifs [31] :

- ✚ Très large bande passante (jusqu'à 1 GHz/km), permettant une transmission de données à très haut débit.
- ✚ Poids très réduit, jusqu'à neuf fois plus léger que les câbles traditionnels.
- ✚ Faible atténuation, permettant des distances de transmission supérieures à 10 km sans répéteur.
- ✚ Excellente qualité de transmission, stable et fiable.
- ✚ Absence totale de rayonnement, idéale pour les environnements sensibles.
- ✚ Résistance aux conditions environnementales extrêmes (température, humidité, agents corrosifs).
- ✚ Coût réduit des matières premières, notamment grâce à l'abondance de la silice.
- ✚ Baisse progressive des prix des fibres, rendant la technologie plus accessible économiquement.

Chapitre II : LES DIFFERENTS TYPES DE COMPENSATIONS

Ce chapitre traite des principales limitations rencontrées dans les systèmes de transmission optique, notamment la dispersion, l'atténuation et les effets non linéaires. Nous présentons d'abord les différentes méthodes de compensation de la dispersion, telles que les fibres à dispersion compensée (DCF), les réseaux de Bragg en fibre (FBG) et le traitement numérique du signal (DSP). Ensuite, nous abordons l'utilisation des amplificateurs optiques et d'autres techniques avancées. Enfin, nous analysons les effets non linéaires majeurs comme l'effet Kerr, la diffusion Raman stimulée (SRS) et la diffusion Brillouin stimulée (SBS), ainsi que les solutions pour les compenser.

II. Compensation dans les systèmes optiques

II.1 Compensation de la dispersion et l'atténuation

II.1.1 Méthodes de compensation de la dispersion

II.1.1.1 Fibres à dispersion compensée (DCF)

Les fibres à dispersion compensée (DCF) ont été introduites dans les années 1980 comme une solution efficace pour corriger les effets de dispersion chromatique dans les systèmes de télécommunications optiques. Ces fibres sont conçues pour posséder une dispersion négative équivalente à celle des fibres de transmission, permettant ainsi d'annuler la dispersion totale du système.

Leur mise en œuvre peut se faire en début de ligne (pré-compensation), en fin de ligne (post-compensation) ou de manière symétrique (entre les amplificateurs), selon l'architecture du réseau. Bien que cette technique soit largement utilisée dans les systèmes WDM avec des fibres monomodes à grande surface effective, elle présente certains inconvénients, tels qu'une perte d'insertion élevée et des distorsions non linéaires en cas de puissances optiques élevées.

D'autres alternatives comme les câbles à dispersion gérée (DM) ou les fibres à dispersion inversée (RDF) ont été développées pour améliorer les performances tout en réduisant les limitations des DCF [32].

II.1.1.2 Dé Réseaux de Bragg en fibre (FBG)

Réseaux de Bragg en fibre (FBG) comme méthode de compensation de la dispersion

Les réseaux de Bragg en fibre (FBG) sont l'une des techniques les plus utilisées actuellement pour la compensation de la dispersion dans les systèmes optiques. Cette technologie repose sur la création d'une modulation périodique de l'indice de réfraction dans le cœur de la fibre optique, réalisée par exposition à un motif d'interférence optique intense. Ce phénomène a été démontré pour la première fois en 1978 par Hill et ses collègues au Centre de recherche en communications (CRC) au Canada.

Le principe de fonctionnement repose sur la réflexion des longueurs d'onde qui satisfont la condition de Bragg, tandis que les autres longueurs d'onde sont transmises. Le choix de la longueur d'onde réfléchie se fait en ajustant la période du réseau, ce qui fait du FBG un filtre optique sélectif, simple et peu coûteux. comme illustré dans la figure suivante:

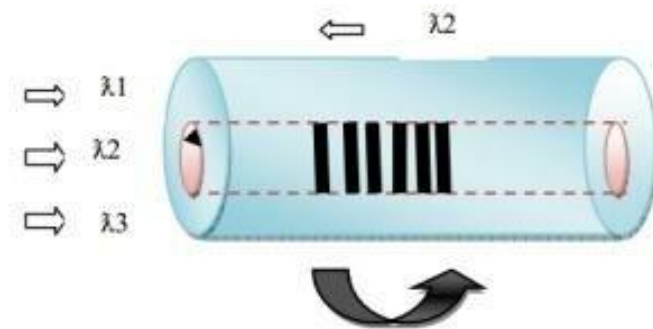


Figure II.1 : Principe des réseaux de Bragg en fibre optique.

Les FBG présentent plusieurs avantages : faible encombrement, faibles pertes d'insertion, compatibilité avec les fibres monomodes, et coût réduit. En plus de la compensation de la dispersion, les FBG sont également utilisés dans d'autres applications telles que les filtres d'ajout/suppression WDM, les lasers de pompage et les stabilisateurs de longueur d'onde [33].

II.1.1.3 Compensation électronique par traitement du signal (DSP)

La compensation électronique de la dispersion (EDC) consiste à corriger les effets de la dispersion chromatique dans le domaine électrique, après conversion du signal optique en signal électrique. Cette méthode utilise des égaliseurs numériques comme l'égaliseur à

rétroaction décisionnelle (DFE) et l'égaliseur anticipatif (FFE) pour atténuer les distorsions provoquées par la transmission dans la fibre.

L'EDC se distingue par sa grande flexibilité, sa mise en œuvre logicielle et sa capacité à corriger plusieurs types de distorsion, notamment la dispersion chromatique (CD) et la dispersion de mode de polarisation (PMD), sans ajouter de composants optiques. Cependant, cette technique présente certaines limites : elle nécessite une forte puissance de traitement, ralentit parfois le débit à cause des conversions numériques/analogiques, et demeure sensible au bruit, ce qui impose une optimisation précise des structures d'égalisation utilisées [34].

II.1.2 Compensation de l'atténuation

II.1.2.1 Amplificateurs optiques (EDFA, SOA, Raman, etc.)

Les types d'amplificateurs optiques

✧ EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier)

En 1987, une équipe de recherche dirigée par Payne à l'Université de Southampton a développé le tout premier amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA), qui est depuis devenu l'une des technologies les plus utilisées dans les systèmes de télécommunications longue distance, notamment dans la bande spectrale de 1550 nm. Ce type d'amplificateur présente plusieurs avantages techniques, tels qu'un faible niveau de bruit, une réduction de la diaphonie entre les canaux, une intégration facile, ainsi qu'une grande flexibilité dans l'utilisation de différentes longueurs d'onde, puisque le gain dépend uniquement de la longueur d'onde de pompage, contrairement aux amplificateurs à semi-conducteurs (SOA). Bien que ces derniers aient connu des avancées, notamment une moindre sensibilité à la polarisation de la lumière, ce qui les rend adaptés à la bande de 1300 nm, les EDFA restent plus performants dans les systèmes à fibre optique. Parmi leurs principaux atouts, on trouve une faible consommation énergétique, une large bande passante et un faible bruit. Le fonctionnement de l'EDFA repose sur le phénomène d'inversion de population, généré par une source de pompage qui excite les ions erbium (Er^{3+}), permettant ainsi l'amplification du signal optique transmis à travers la fibre [35].

✧ Amplificateurs Raman

Les amplificateurs Raman constituent une technologie avancée pour l'amplification des signaux optiques, reposant sur le transfert d'énergie entre deux ondes lumineuses, l'une d'elles étant décalée en fréquence suite à l'interaction Raman entre les photons et les phonons optiques. Le spectre de gain Raman dans les fibres en silice présente une bande passante large dépassant 40 THz, avec un pic dominant à environ 13,2 THz, ce qui correspond à une largeur spectrale d'environ 100 nm dans la bande des télécommunications autour de 1550 nm. Ce gain peut être ajusté en modulant les longueurs d'onde des pompes, permettant d'atteindre une bonne planéité du gain sur une bande étendue (jusqu'à 5 THz).

Bien que le gain Raman dépende fortement de la polarisation, l'utilisation de techniques de pompage à diversité de polarisation permet de contourner cette limitation, tout comme l'usage de fibres non conservatrices de polarisation qui contribuent à « brouiller » cette dépendance. Parmi les principaux avantages des amplificateurs Raman, on note leur compatibilité avec tous les types de fibres, offrant ainsi une solution économique pour l'amélioration des systèmes depuis les extrémités du réseau. De plus, leur gain non résonant couvre une large gamme de longueurs d'onde (de 0,3 à 2 μm), et leur intégration avec des fonctions de compensation de dispersion dans une même fibre optimise la conception des systèmes optiques.

Cependant, certaines limitations freinent leur déploiement massif : une faible efficacité de pompage à faible puissance du signal, la nécessité de longues fibres de gain, un temps de réponse rapide pouvant introduire du bruit supplémentaire, ainsi que des effets non linéaires notables dans les systèmes WDM à forte densité spectrale [36].

✧ Amplificateurs à semi-conducteurs (SOA)

Les amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) sont des dispositifs optoélectroniques capables d'amplifier un signal optique incident grâce à une région active pompée électriquement, permettant l'inversion de population et l'émission stimulée. Contrairement aux lasers, les SOA n'ont pas de rétroaction optique, ce qui exige l'utilisation de techniques comme des couches antireflets ou des facettes inclinées pour éviter les réflexions indésirables. Le gain d'un SOA peut dépendre fortement de la polarisation, influencé par la structure du guide d'onde et les propriétés des matériaux III-V utilisés, principalement autour de 1,3 et 1,55 μm . L'intégration de matériaux quantiques (multi-puits, boîtes ou fils quantiques) dans la zone active permet d'élargir la bande passante et

d'augmenter la puissance de saturation, bien que cela puisse accroître la sensibilité à la polarisation. Des variantes comme le RSOA, utilisé dans les réseaux d'accès, et le GC-SOA (à gain bloqué), conçu pour stabiliser le gain et réduire les distorsions même en présence d'un seul canal, montrent l'évolution continue de cette technologie pour répondre aux exigences croissantes des systèmes optiques modernes [37].

II.13 Autres techniques avancées de compensation du signal

L'illustration ci-dessous donne un aperçu des méthodes de pointe employées pour contrer la diffusion, les distorsions non linéaires et optimiser la qualité de transmission dans le domaine des systèmes de communication optique [37] :

Tableau II.1: Méthodes de compensation dans les réseaux à fibre optique

N°	Technique	Description	Champ d'application
1	Vecteur PMD complémentaire	Élimine les effets de la PMD de premier ordre dans le récepteur optique	Récepteurs à fibre optique
2	Circuits d'égalisation	Réduisent l'interférence inter-symbole (ISI) due à la dispersion via des filtres multiples	Compensation de la dispersion
3	Égaliseurs transversaux	Utilisent des lignes de retard et des étages de gain pour réduire l'ISI	Transmission numérique
4	Égaliseur 4D	Compense la PMD, la CD et le bruit de phase sur des distances allant jusqu'à 1000 km	Réseaux à fibre longue distance
5	Interféromètre asymétrique de Mach-Zehnder (AMZI)	Utilise un grand délai temporel différentiel pour compenser la dispersion et réduire le bruit	Transmission optique
6	AMZI + AWG (Systèmes SAC-OCDMA)	Égaliseur de pente de dispersion pour corriger les distorsions spectrales	Multiplexage codé spectrally

7	Modulateur MZ double + amplificateur EDFA	Améliore le rapport signal/bruit (SNDR) dans les systèmes radio sur fibre (RoF)	Systèmes RoF
8	Égaliseur adaptatif LMS + MLSE	Compense CD et PMD, corrige l'ISI introduit par les filtres anti-repliement	Traitement numérique du signal
9	Égaliseur FFE à coefficients adaptatifs	Réduit l'ISI dû à la dispersion	Transmission haut débit

II.2 Techniques de multiplexage

La bande passante des fibres optiques offre théoriquement la possibilité de concevoir des systèmes de transmission à très haut débit. Cependant, le traitement électronique des données, tant à l'émission qu'à la réception, impose des limitations sur les débits en raison des composants électroniques dont la bande passante est bien inférieure à celle accessible par l'optique. Avec l'augmentation du volume d'informations échangées dans les réseaux de communication et la croissance du nombre d'utilisateurs, il est devenu nécessaire de développer des solutions permettant d'améliorer la capacité des réseaux, tout en profitant de l'avantage qu'offre la fibre optique en termes de largeur de bande. C'est ainsi que des techniques de multiplexage ont été développées, permettant de transmettre N signaux de débit D sur un même canal, équivalant à la transmission d'un signal global de débit $N \times D$.

Toutefois, ces techniques doivent garantir la restitution des données propres à chaque utilisateur après transmission, sans créer d'interférences entre les données des différents utilisateurs. Ainsi, le signal représentant les données de chaque utilisateur se distingue des autres signaux par sa bande spectrale et sa fenêtre temporelle, qui sont finalement séparées grâce à des techniques appropriées de démultiplexage [38]

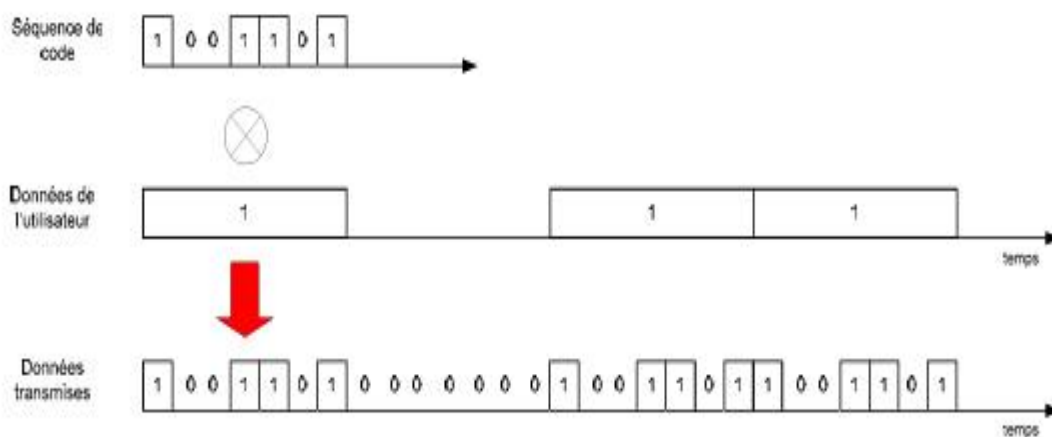
II.2.1 Multiplexage par répartition de code

Le multiplexage par répartition de code (CDM) permet à plusieurs utilisateurs de transmettre simultanément leurs données sur une même bande de fréquence. Le principe repose sur l'attribution, à chaque utilisateur, d'un code unique, également appelé signature, constitué d'une séquence de bits rapides (appelés chips) servant à différencier ces codes des bits de données classiques.

Après encodage, le débit de transmission devient égal au produit du débit des données utilisateur par la longueur du code (7 dans l'exemple de la Figure II.2). Le CDM permet ainsi d'étaler le signal sur une bande spectrale N fois plus large que celle du signal d'origine, où N représente la longueur de la séquence de code.

Bien que tous les utilisateurs partagent le même spectre, leurs signaux restent différenciables grâce à l'utilisation de codes spécifiques à chacun. Cela permet d'éviter les interférences multiples, à condition que les codes attribués soient orthogonaux entre eux [39].

Figure.II.2: Diagramme du codage des données d'un utilisateur [39].



II.2.2 Multiplexage temporel (TDM)

Le multiplexage dans le domaine temporel (TDM – Time Division Multiplexing) repose sur le principe d'allouer l'intégralité de la bande passante à tous les utilisateurs, mais chacun à son tour et de manière séquentielle, comme illustré dans la Figure I.7.

Le temps est divisé en intervalles égaux appelés « time slots », et chaque utilisateur dispose d'un créneau spécifique durant lequel il peut transmettre ses données. Cette technique permet de regrouper plusieurs canaux de communication à faible débit dans un seul canal avec un débit global N fois plus élevé, où N représente le nombre total d'utilisateurs dans le système [40]

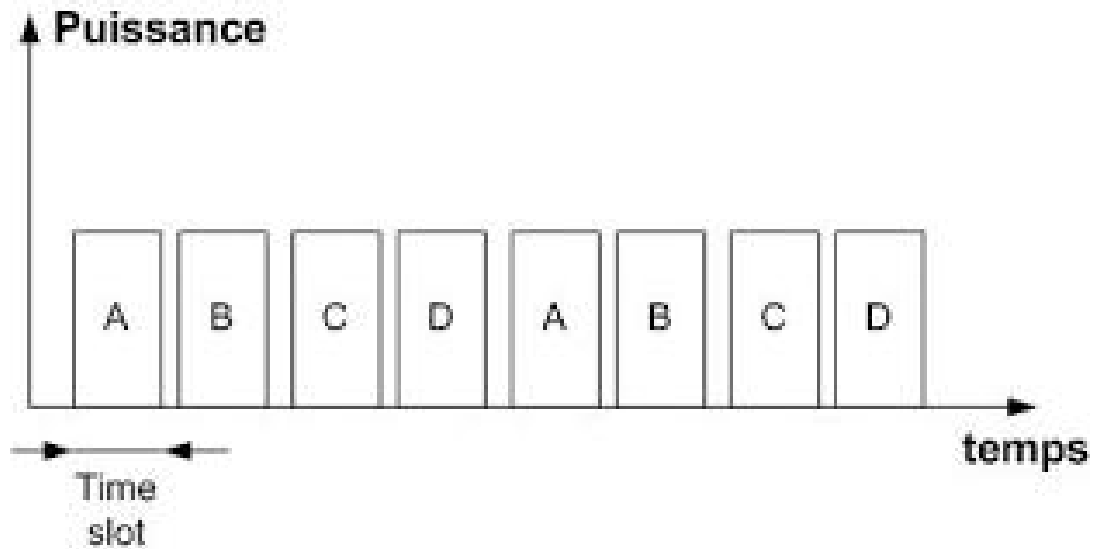


Figure.II.3 : Diagramme de multiplexage temporel des données [40].

II.2.3 Multiplexage par répartition en fréquence (FDM)

Le multiplexage par répartition en fréquence (FDM – Frequency Division Multiplexing) est l'une des plus anciennes techniques de multiplexage, largement utilisée à l'époque où les systèmes téléphoniques étaient entièrement analogiques.

Cette méthode repose sur le partage de la bande passante totale d'un canal de communication en plusieurs sous-bandes, où chaque sous-bande est affectée à une transmission distincte, comme illustré dans la Figure II.4 .

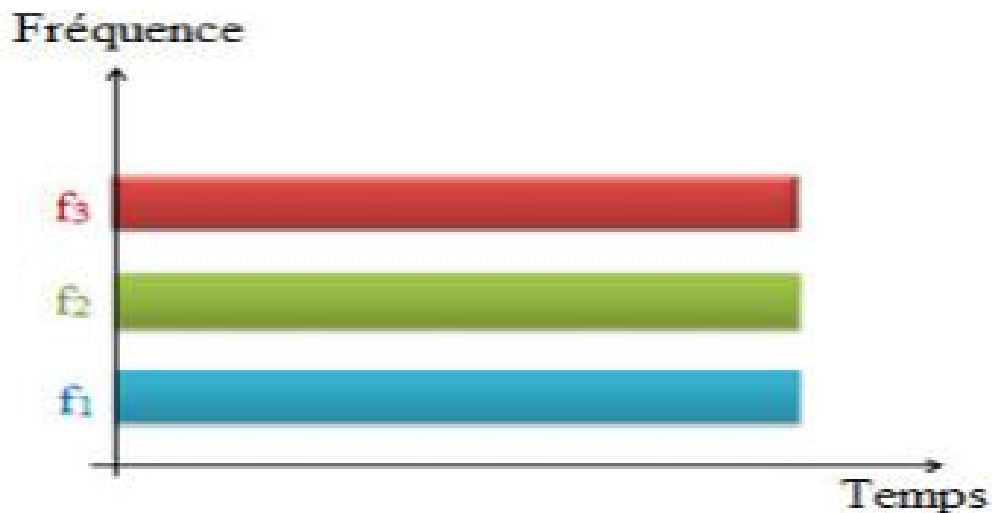
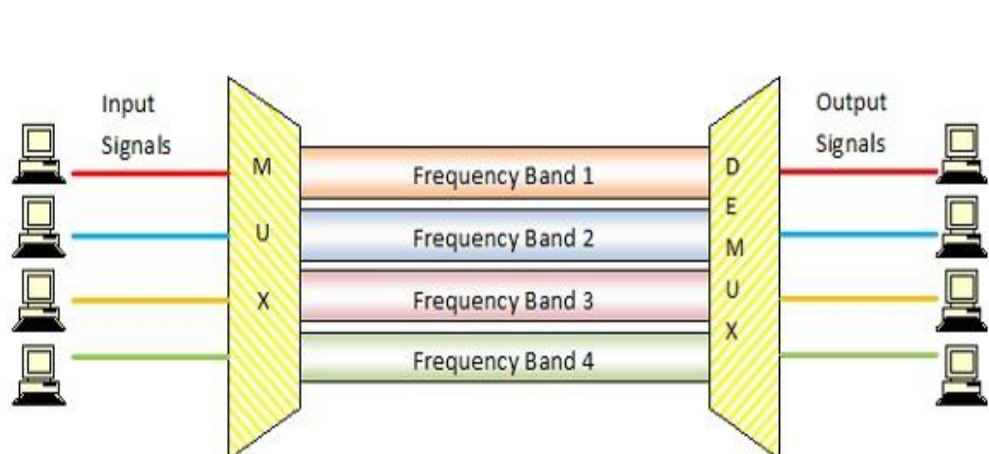


Figure II.4: Schéma de principe de Multiplexage fréquentiel

Le schéma explicatif suivant illustre ce principe :

On y trouve quatre bandes de fréquences, chacune étant utilisée pour transmettre le signal d'un émetteur vers un récepteur. Chaque émetteur se voit attribuer une bande de fréquence spécifique. Ces bandes sont ensuite multiplexées et transmises via un même canal de communication.

À la réception, un démultiplexeur permet de séparer les signaux et de reconstituer les quatre signaux d'origine en tant que sorties distinctes [41].



Figure

II.5: Schéma suivant représente 4 bandes de Multiplexage fréquentiel.

II.2.4 La technologie WDM (multiplexage en longueurs d'onde)

Le multiplexage en longueur d'onde (WDM) permet de partager une fibre optique en attribuant une longueur d'onde spécifique à chaque utilisateur. Cela permet d'augmenter la capacité totale de bande passante, proportionnellement au nombre de longueurs d'onde utilisées et les signaux sont ensuite démultiplexés vers des fibres ou équipements distincts.

II.2.4.1 Types de WDM [42]:

1. CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) :

- ✧ Utilise des longueurs d'onde espacées de 20 nm.
- ✧ Plage : de 1271 nm à 1611 nm (18 longueurs d'onde selon l'ITU).
- ✧ Ne nécessite pas de contrôle strict de la température → coût réduit.

2. DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) :

- ✧ Utilise des longueurs d'onde très rapprochées ($\sim 0,8$ nm ou 100 GHz).
- ✧ Principalement dans la bande C (de 1530 à 1565 nm).
- ✧ Requiert des émetteurs précis et stables thermiquement.
- ✧ Compatible avec les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA) → idéal pour les longues distances.

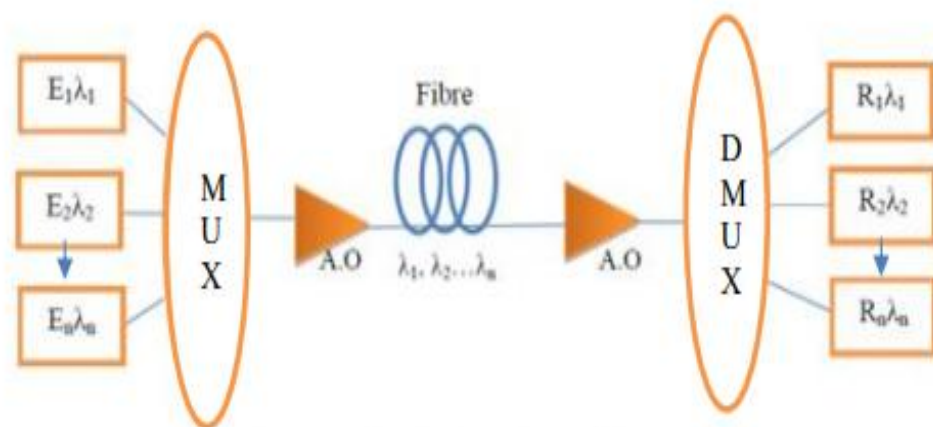


Figure.II.6: Principe d'une liaison WDM [39].

II.2.4.2 Avantages de la technologie WDM cohérente (résumé) [43]

- Haut débit et flexibilité : prend en charge plusieurs formats de modulation et débits.
- Réseaux simplifiés : grâce au codage FEC, moins de régénération, coût réduit.
- Capacité optimisée : le façonnage spectral augmente l'efficacité spectrale
- Moins de dispersion : les DSP corrigent la dispersion sans modules supplémentaires.
- Compatibilité avec fibres anciennes : jusqu'à 400G sur de longues distances.

II.3 L'avantage de l'amplification optique [44]

- ✓ Utilisation de composants issus des télécoms
- ✓ L'usage de diodes laser DFB émettant à 1,56 μm , couramment utilisées dans le secteur des télécommunications, représente un avantage en termes de coût, de disponibilité et de stabilité.
- ✓ Amplification par fibre à plusieurs étages
- ✓ Le laser à semi-conducteur est amplifié à travers plusieurs étages fibrés, ce qui permet d'atteindre des puissances élevées, de plusieurs watts. Cela illustre un cas typique d'amplification optique sans conversion électrique.
- ✓ Stabilité et largeur spectrale réduite
- ✓ Les systèmes amplifiés par fibre conservent une largeur de raie spectrale très faible (moins de 100 kHz), démontrant leur capacité à maintenir la qualité du signal sans distorsion excessive.
- ✓ Intégration flexible d'éléments optiques
- ✓ L'architecture à fibre permet l'intégration facile de modulateurs acousto-optiques et électro-optiques, ce qui augmente la flexibilité fonctionnelle du système optique sans pertes importantes.
- ✓ Haute puissance dans les longueurs d'onde visibles
- ✓ Grâce à l'amplification optique, on peut atteindre des niveaux de puissance significatifs dans le visible après doublage de fréquence, ce qui est essentiel pour des applications telles que le refroidissement d'atomes ou la spectroscopie laser.

II.4 Les inconvénients de l'amplification optique

Bien que la technologie de l'amplification optique offre de nombreux avantages, elle présente également certaines limites qu'il convient de considérer. Parmi les principaux inconvénients, on peut citer [45] :

- ✧ Coût élevé : Les amplificateurs optiques sont onéreux à fabriquer, à acquérir et à entretenir, ce qui peut représenter un obstacle financier pour certains projets.
- ✧ Sensibilité aux variations de température : Les performances de ces amplificateurs peuvent être affectées par les fluctuations thermiques, compromettant ainsi leur stabilité et leur efficacité.
- ✧ Introduction de bruit : À l'instar de tout amplificateur, les amplificateurs optiques peuvent introduire du bruit dans le signal amplifié. Bien que ce bruit puisse être réduit, il peut rester perceptible dans certaines situations.
- ✧ Consommation énergétique élevée : Ces dispositifs nécessitent une quantité significative d'énergie pour fonctionner, ce qui peut poser problème dans les applications soumises à des contraintes strictes en matière de consommation énergétique.
- ✧ Malgré ces limitations, l'amplification optique demeure une technologie essentielle et largement utilisée dans de nombreux domaines liés à l'optique et aux communications optiques.

Chapitre III : RÉSULTATS DE LA SIMULATION

Dans ce chapitre, on va étudier le comportement d'un signal optique dans une chaîne de transmission à fibre optique monomode. On aura donc à tester le comportement du signal optique sur cette ligne de transmission et grâce à des composants employés dans le logiciel de simulation (optisystem) on observera les changements du signal optique dans la ligne de transmission.

Pour pouvoir juger la qualité du signal optique transmis il suffira d'observer le diagramme de L'œil, et afin de visualiser ce diagramme dans le domaine électrique, on utilisera une photodiode et un oscilloscope.

La qualité du signal optique est déterminée en calculant le facteur de qualité fourni avec ce diagramme à l'aide de logiciel de simulation. Tout d'abord nous commençons par une description détaillée du logiciel optisystem puis nous allons définir les éléments qui serviront de critères de qualité pour évaluer la qualité de transmission d'un système de communication optique puis on réalise les résultats de simulation.

III.1 Présentation du logiciel optisystem

Optisystem est un outil qui permet aux scientifiques et aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement de signal, allant du dispositif le plus élémentaire, au système complet de communication. Optisystem est un environnement interactif qui allie des outils numériques efficaces à des fonctionnalités graphiques puissantes et une interface utilisateur très simple

L'interface utilisateur graphique complète est contrôlée la disposition de composants optique, elle contient une fenêtre principale répartie en plusieurs parties figure (III.1) :

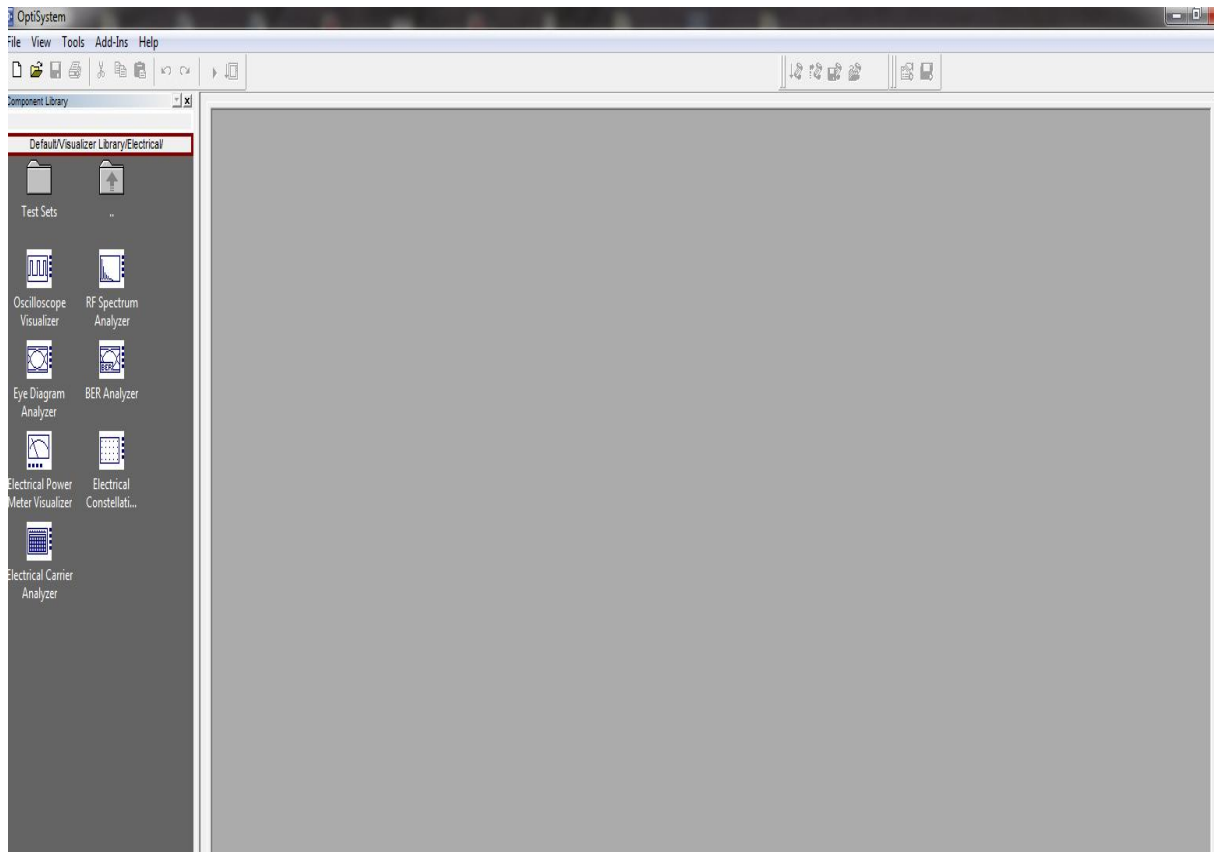


Figure III.1 : Schéma de l'interface Optisystem

- ✓ **Bibliothèque** : une base de données de divers composants.
- ✓ **Editeur du layout** : permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception
- ✓ **Project en cours** : visualisation des divers fichiers et composants correspondant au projet en cours. Sa vaste bibliothèque de composants actifs et passifs comprend des paramètres réalistes, ces capacités peuvent être étendues facilement avec l'ajout de composants et peuvent être liées à un large éventail d'outils. Une interface complète d'utilisateur graphique contrôle la disposition optique des composants, des modèles et des présentations graphiques.

III.2 Applications du logiciel optisystem

- la conception du système de communication optique du composant au niveau de la couche physique.
- le calcul de temps d'erreur binaire (BER) et le calcul de bilan de liaison.
- La conception des réseaux TDM/WDM et de réseaux optiques passifs (PON).
- La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur.

III.3 Avantage du logiciel optisystem

Les avantages du logiciel optisystem sont :

- ✓ Obtenir un aperçu de performances du system de fibre optique.
- ✓ Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation de système.
- ✓ Présentation virtuelle des options de conceptions.

III.4 Critères de qualité d'une transmission

Pour définir la qualité d'une transmission optique, différents critères existent. Les trois principaux critères de qualité d'un signal transmis le taux d'erreur binaire, le facteur de qualité et le diagramme de l'œil. Ces trois critères sont décrits dans la suite.

III.4.1 Le taux d'erreur binaire

Le moyen quantitatif d'évaluer la qualité d'une transmission consiste à évaluer la probabilité d'erreur par élément binaire, qui correspond à la probabilité de prendre une décision erronée sur un élément binaire. Le taux d'erreur binaire (TEB) ou BER (pour Bit Error Rate) est le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits émis. Comme nous l'avons décrit dans la première partie de ce chapitre, le récepteur prend une décision sur la présence d'un symbole «1» ou «0» selon le niveau de signal reçu. Cette décision est prise à l'instant d'échantillonnage et à l'aide d'une bascule de décision pour laquelle la tension reçue au-dessus d'un seuil est considérée comme un symbole «1», et au-dessous de ce seuil comme un symbole 0. Si les fluctuations d'amplitude et temporelles sont importantes, la tension d'un symbole 1 peut passer au-dessous du seuil et la tension d'un symbole 0 au-dessus du seuil, des erreurs sont alors commises.

$$Teb = \frac{\text{nombre de bits erronés}}{\text{nombre de bits transmis}} \quad (III.1)$$

Le taux d'erreur binaire communément accepté dans le milieu des télécommunications optiques est de 10^{-9} , correspondant à une erreur commise sur un milliard de bits lus. On tolère alors un signal de taux d'erreur binaire de 10^{-4} puisqu'il permet après traitement par le code correcteur d'erreurs de retrouver un taux d'erreur binaire de 10^{-12} . Cette tolérance est cependant une marge que les opérateurs assurent, le taux d'erreur binaire en ligne ne dépasse en général pas 10^{-9} .

III.4.2 Le facteur de qualité

Le facteur de qualité est le rapport signal sur bruit électrique en entrée du circuit de décision du récepteur, il est défini par :

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad (\text{III. 2})$$

Où μ_1 et μ_0 sont respectivement les tensions moyennes du symbole 1 et 0 à l'instant de décision, σ_1 et σ_0 et les variances des probabilités de puissance des symboles 1 et 0.

Le facteur de qualité est donc relié au taux d'erreur binaire (TEB) dans l'hypothèse où la distribution de puissance des symboles est gaussienne, par la relation suivante :

$$\text{Teb} = \frac{1}{2} \left[\text{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (\text{III. 3})$$

Ou erf c'est la fonction complémentaire définit par :

$$\text{erfc} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-y^2) \cdot dy \quad \text{III. 4}$$

Il est souvent utilisé plutôt que le taux d'erreur binaire dès lors que le taux d'erreur binaire est

trop faible pour être mesuré. En effet, plus le taux d'erreur binaire est faible, plus le temps de

mesure est long pour une même précision sur la mesure. Expérimentalement, le taux d'erreur binaire n'est par conséquent pas toujours mesurable directement.

Le facteur de qualité est fréquemment utilisé pour quantifier la qualité d'une liaison ; un facteur de qualité correspond à un taux d'erreur binaire de 10^{-9} .

III.4.3 Le diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil est obtenu dans le domaine électrique après détection par une photodiode, un filtre et un amplificateur. Il permet d'avoir une idée de la qualité du signal en termes de bruit d'amplitude, d'interférences entre symboles, de gigue temporelle.

Le diagramme de l'œil n'a toutefois qu'une valeur qualitative, le critère qui permet réellement d'évaluer de manière quantitative la qualité du signal est le taux d'erreur binaire.

III. 5 Présentation d'une liaison par fibre optique :

Une liaison par fibre optique est constituée généralement d'une source lumineuse (DL ou DEL) qui convertit le signal électrique en signal lumineux. Ce signal injecté dans une fibre (SI ou GI) se propage avec certaine atténuation et une certaine dispersion.

A la sortie de la fibre, le signal optique est converti en un signal électrique à l'aide d'un photo-détecteur (PIN ou APD).

Notre objectif de réaliser une liaison optique point à point compatible d'un module de transmission et d'un support de transmission et d'un module de réception.

Voici la liaison ci-dessous (figure III.2)

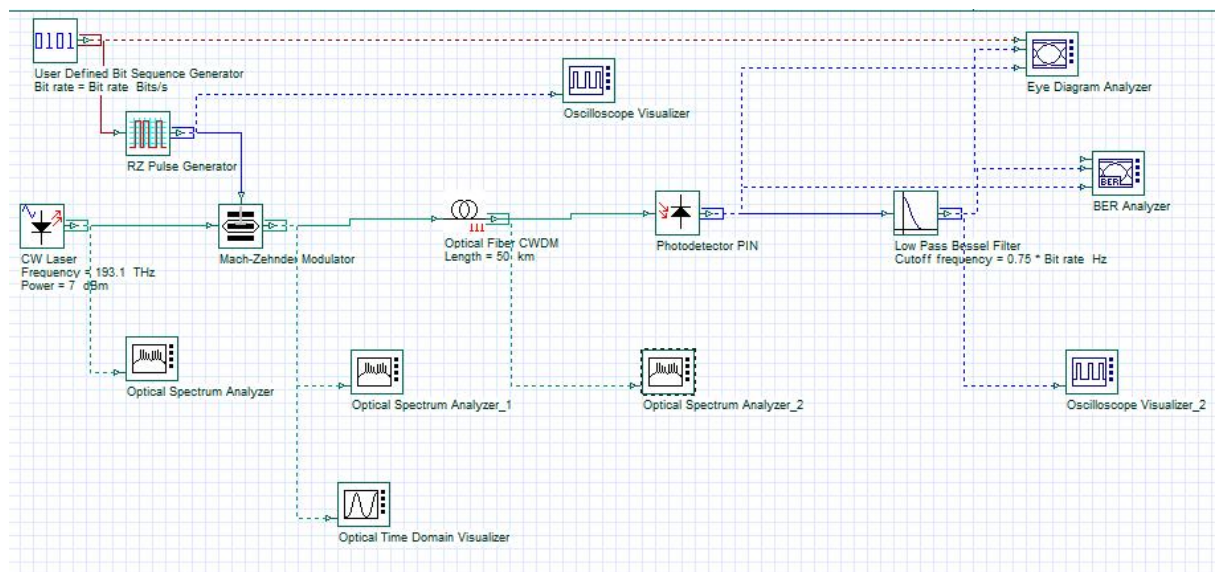


Figure III.2 : La liaison optique point à point sans amplificateur.

III.5.1 Module d'émission

III.5.1.1 Générateur binaire

C'est un générateur qui produit une suite de longueur connue, de « 0 » et de « 1 » logiques, il est dit aléatoire car c'est une suite arbitraire. Cependant, lorsque la suite arrive à son terme, le générateur ne s'arrête pas de fonctionner. La séquence déjà transmise est à nouveau reproduite, d'où le qualificatif de pseudo-aléatoire, le débit utilisé est de 2.5 Gbit/s.

III.5.1.2 Générateur NRZ

Dans le générateur NRZ, la donnée binaire « 1 » est associée à une impulsion optique de durée sensiblement égale au temps symbole (inverse du débit), la donnée « 0 » est associée à l'absence de signal. En pratique on n'a pas une absence totale de signal puisque le taux d'extinction n'est jamais infini.

III.5.1.3 Le laser (cw laser)

Le laser cw (continuous wave) est caractérisé par une fréquence de laser à une fréquence fondamentale de 190.1 THz, line width 10 Mhz et de puissance de 7dbm

III.5.1.4 Le modulateur externe

Le principe de fonctionnement des modulateurs à effet électro-optique repose sur la modification des indices de réfraction d'un matériau biréfringent soumis à un champ électrique. Si une tension est appliquée à l'un des bras d'un interféromètre de mach-zehnder (MZ) de sorte que la différence de phase entre les deux faisceaux de sortie est un multiple impair de π , l'interférence est destructive : l'interféromètre a une transmission nulle. L'interféromètre de MZ constitue donc un modulateur d'amplitude.

III.5.2 Support de transmission

On a utilisé la fibre optique comme un support de transmission ayant une atténuation de 0.2 dB/km, une longueur d'onde de 1550 nm

III.5.3 Module de réception

III.5.3.1 Le photo détecteur PIN

Bien que certains dispositifs soient plus sensibles, les photos détecteurs à semi-conducteurs présentent les avantages d'être rapides et faciles à utiliser.

Les paramètres importants sont la sensibilité et le courant d'obscurité :

La sensibilité (S) relie la puissance lumineuse P_{opt} à la photo courant I_{ph} . Elle augmente avec λ , puis chute à l'approche de la coupure.

Le courant idéal de la sortie I_{ph} de la photodiode est : $I_{ph} = S \cdot P_{opt}$ (pour une longueur d'onde de 1550 nm, la sensibilité est de 0.9 A/W).

Le courant d'obscurité I_{obs} est le courant qui circule dans la jonction en l'absence d'éclairement pour $\lambda=1550$ nm, le $I_{obs}= 5$ nA.

III.5.3.2 Filtre de Bessel passe bas

Le filtre de Bessel est un filtre polynômial tout pôle d'ordre supérieur dont la caractéristique principale est d'offrir un délai constant en bande passante. Concrètement, cela signifie que toutes les fréquences pures, en bande, le traversent en un temps rigoureusement égal. Le filtre de Bessel permet donc de minimiser la distorsion que subit un signal complexe lors d'une opération de filtrage. La fréquence de coupure de ce filtre est de 0,75Hz.

III.6 Résultats et interprétations

Le travail que nous avons effectué consiste principalement d'introduire des dispositifs de compensation (amplificateur, DCF...), pour illuminer les pertes ensuite on varie les paramètres de la liaison, comme la puissance émise par le laser, la longueur de la fibre et on visualise la forme du signal par Optical Spectrum Analyzer

III.6.1. Performances en absence d'un amplificateur

Dans cette section, nous présentons les performances d'un système de communication optique en l'absence de tout amplificateur. L'analyse repose sur trois éléments principaux : le spectre optique à la sortie de la fibre, le diagramme de l'œil (Eye Diagram) et le taux d'erreur binaire (BER). Ces résultats permettent d'évaluer les limitations naturelles du système dues à l'atténuation dans la fibre, aux distorsions accumulées pendant la transmission et à la dégradation de la qualité du signal sans compensation de gain. L'objectif est d'établir une base de comparaison avec les performances après l'introduction d'un amplificateur optique tel que l'EDFA ou le SOA.

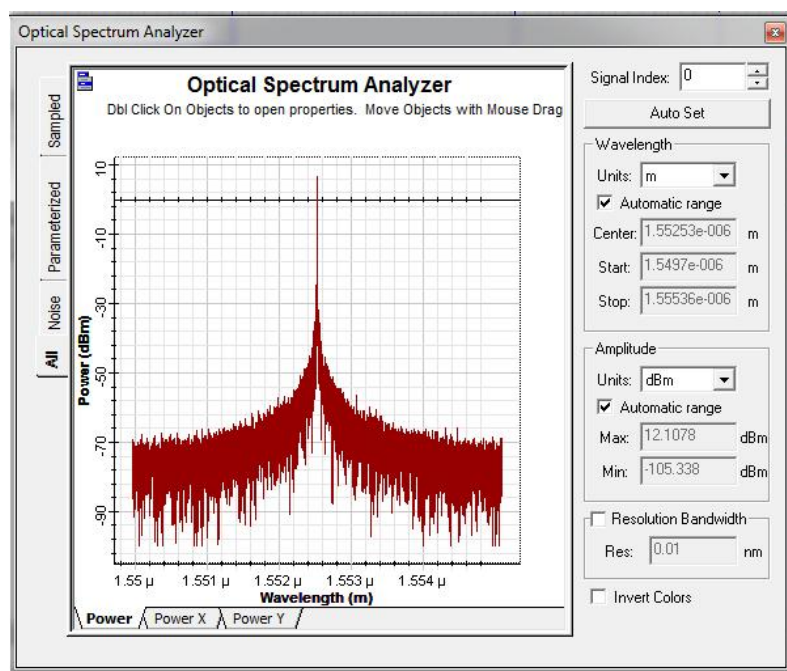


Figure III.3: le spectre à la sortie du laser

Le pic spectral central représente la fréquence du laser, tandis que les ailes latérales indiquent un bruit ou des interférences légères dues à l'absence d'amplification ou de traitement.

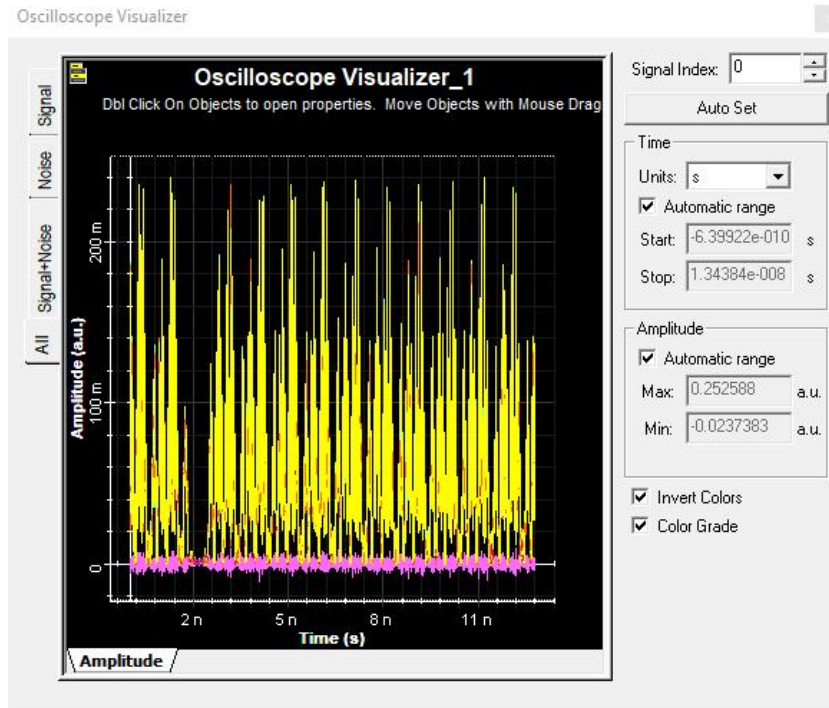


Figure III.4 : Train d'impulsion à la sortie de laser

Le signal temporel montre un motif périodique régulier avec quelques ondulations, indiquant une réception réussie avec un léger bruit.

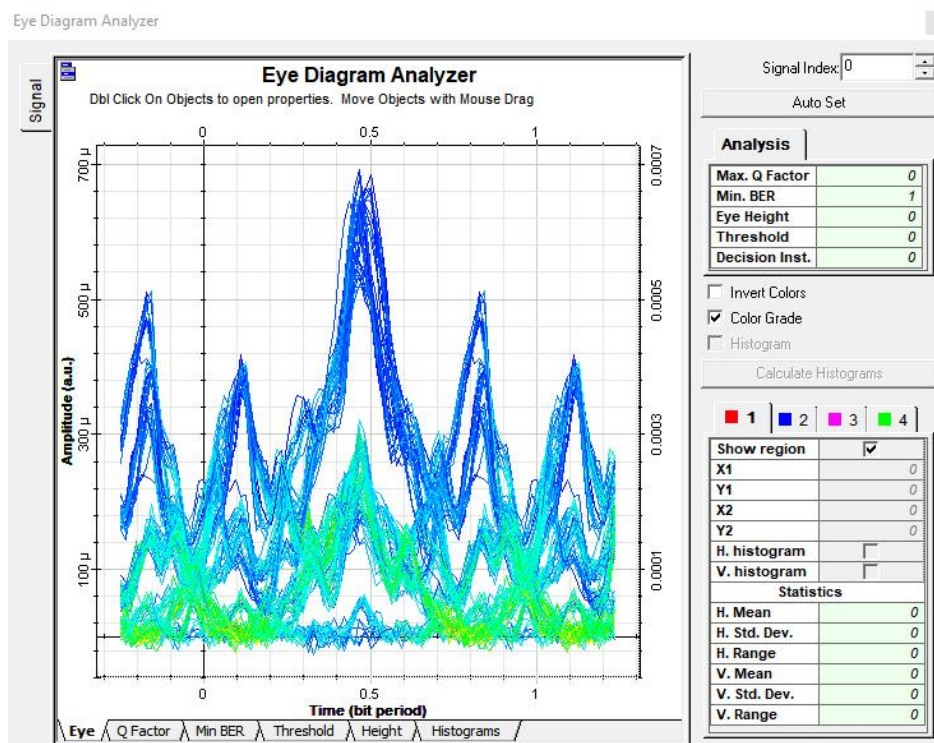


Figure III.5 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée

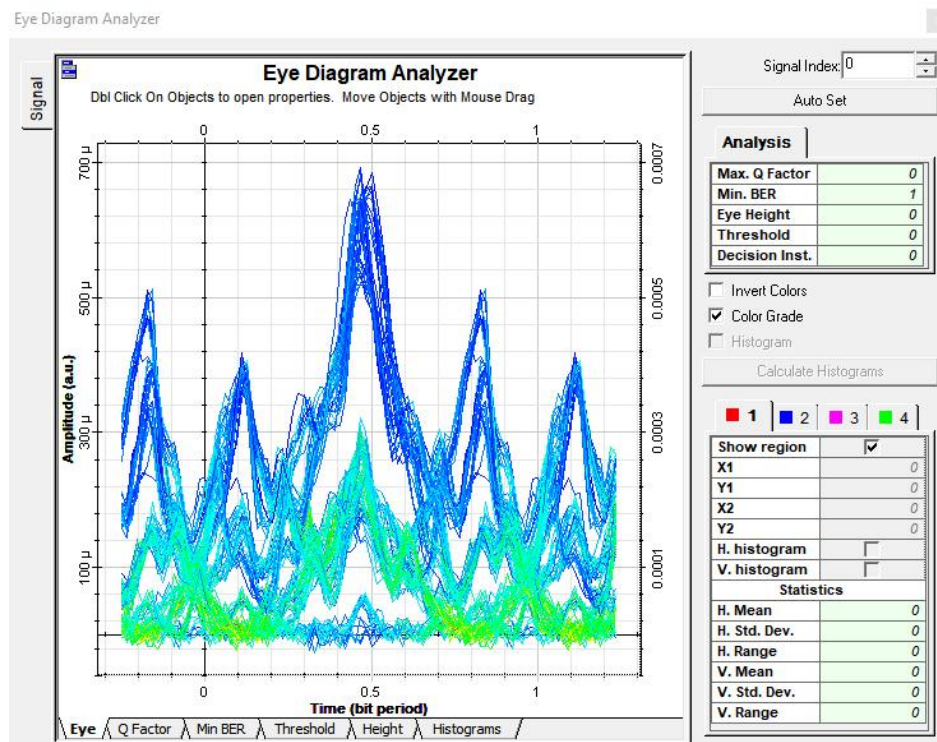


Figure III.6 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée

L'œil est partiellement ouvert, ce qui montre une distinction possible entre les bits malgré une certaine distorsion et interférence.

III.6.2 Utilisation de l'amplificateur EDFA pour compenser les pertes du signal optique

On a utilisé EDFA pour la récupération de signal de sortie de la fibre après l'élargissement par l'effet de la dispersion et l'atténuation au cours de la fibre il est caractérisé par un gain de 20 dB et un (noise figure = 4 dB).

Chapitre III : RÉSULTATS DE LA SIMULATION

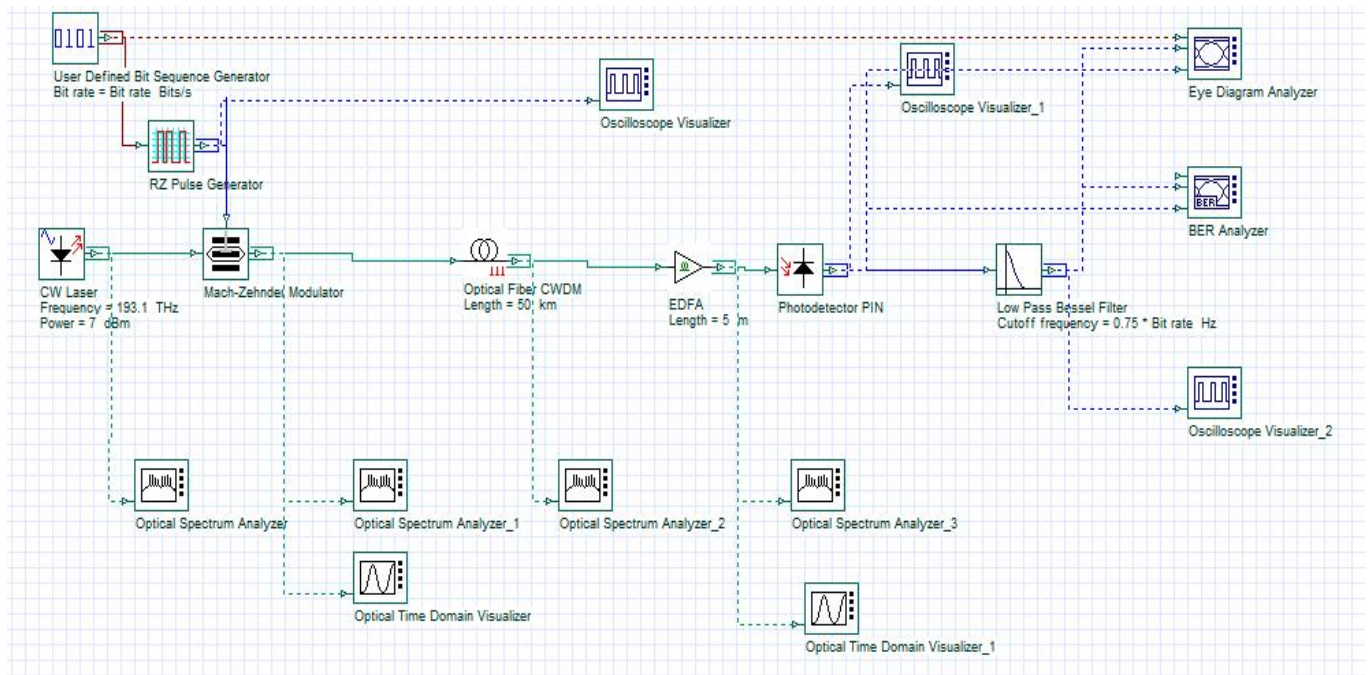


Figure III.7 : la liaison optique point à point avec l'amplificateur EDFA.

Les résultats sont montrés sur les figures (III.8), (III.9), (III.10) (III.11), et (III.12)) à la sortie du laser, fibre, EDFA, filtre.

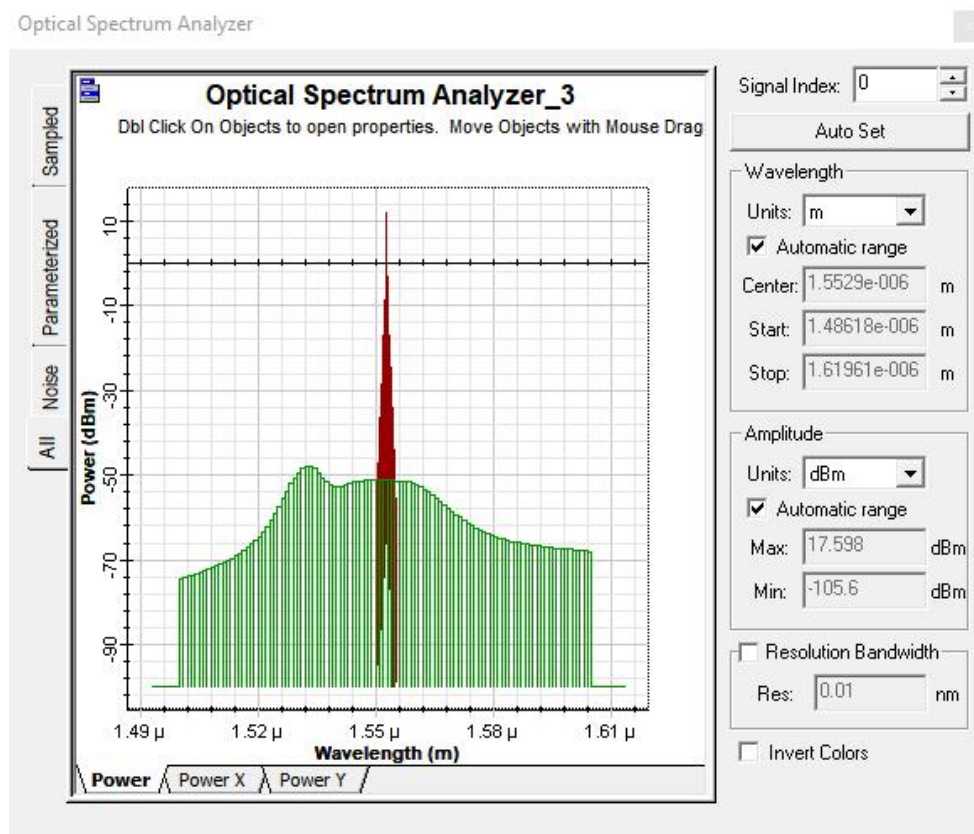


Figure III.8: Ile spectre à la sortie de l'amplificateur

Chapitre III : RÉSULTATS DE LA SIMULATION

L'axe horizontal représente la longueur d'onde (de 1,49 à 1,61 micromètre), correspondant à la plage typique de fonctionnement d'un amplificateur EDFA (environ 1550 nm).

On observe un pic net autour de 1552 nm, correspondant à la longueur d'onde centrale du signal amplifié.

Le spectre est relativement large en raison de la bande passante étendue de l'EDFA. La puissance de crête atteint environ +17,5 dBm, ce qui témoigne d'une performance d'amplification élevée.

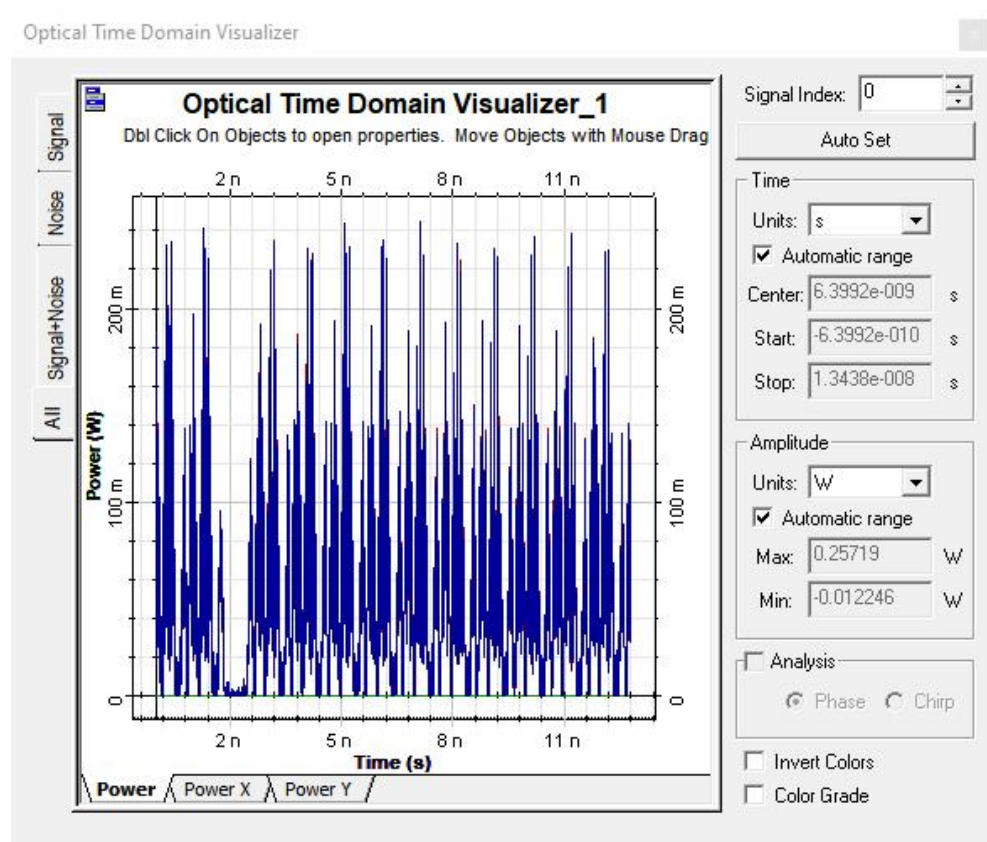


Figure III.9: la sortie de la laser

La couleur bleue représente la variation de la puissance (Power) en watts au cours du temps.

On remarque que la puissance atteint environ 0,25 watt au maximum, ce qui indique une amplification importante.

Le motif des impulsions est similaire à celui du signal temporel, avec une augmentation claire du niveau de puissance par rapport au signal avant amplification.

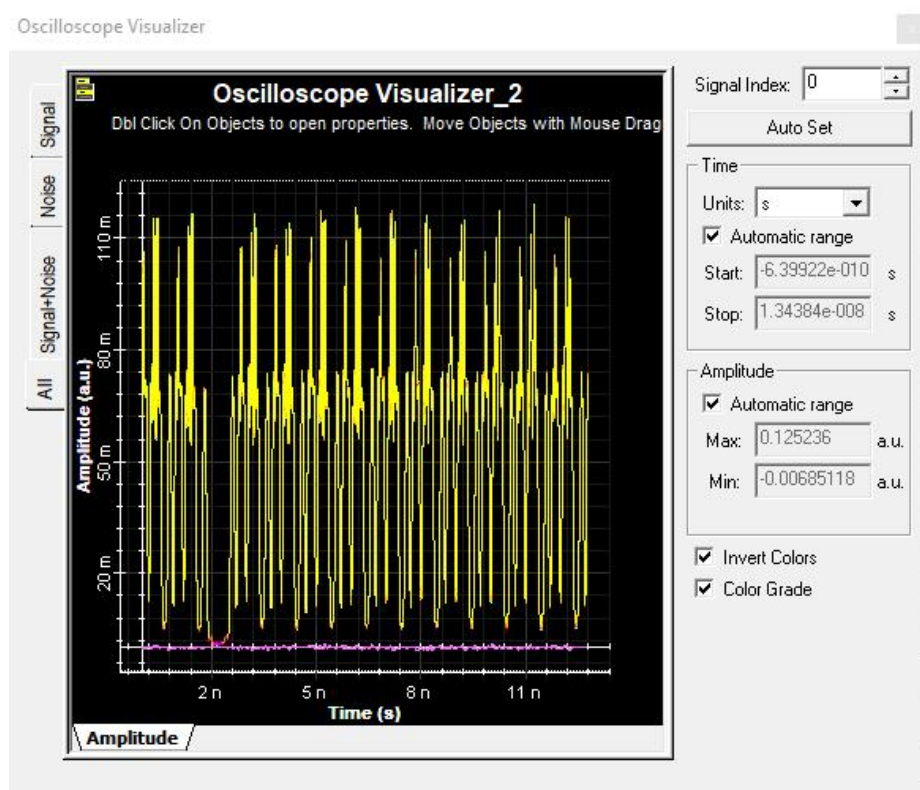


Figure III. 10 : train d'impulsion à la sortie de filtre

La chute importante d'amplitude après le passage par le filtre optique suggère que la plupart des composantes spectrales ont été éliminées, ou que le signal initial était déjà affaibli avant le filtrage. Cette baisse peut également indiquer que la bande spectrale du filtre est trop étroite ou mal alignée avec le spectre de l'impulsion, entraînant ainsi une perte significative de puissance optique.

La différence entre le signal fort après le RZ et le signal affaibli après le filtrage indique que le filtre a réduit la puissance du signal, probablement en raison d'un décalage spectral ou d'un affaiblissement préalable. Cette comparaison permet d'évaluer l'impact du filtrage sur la qualité du signal optique.

- La différence entre le signal fort après le RZ et le signal affaibli après le filtrage indique que le filtre a réduit la puissance du signal, probablement en raison d'un décalage spectral ou d'un affaiblissement préalable. Cette comparaison permet d'évaluer l'impact du filtrage sur la qualité du signal optique.

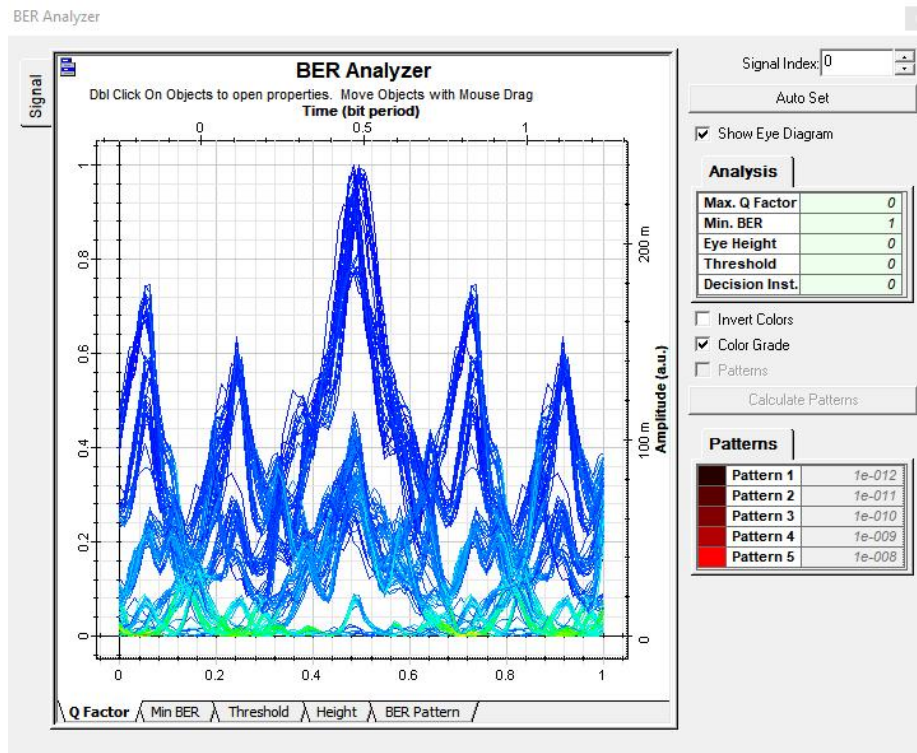


Figure III.11 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée

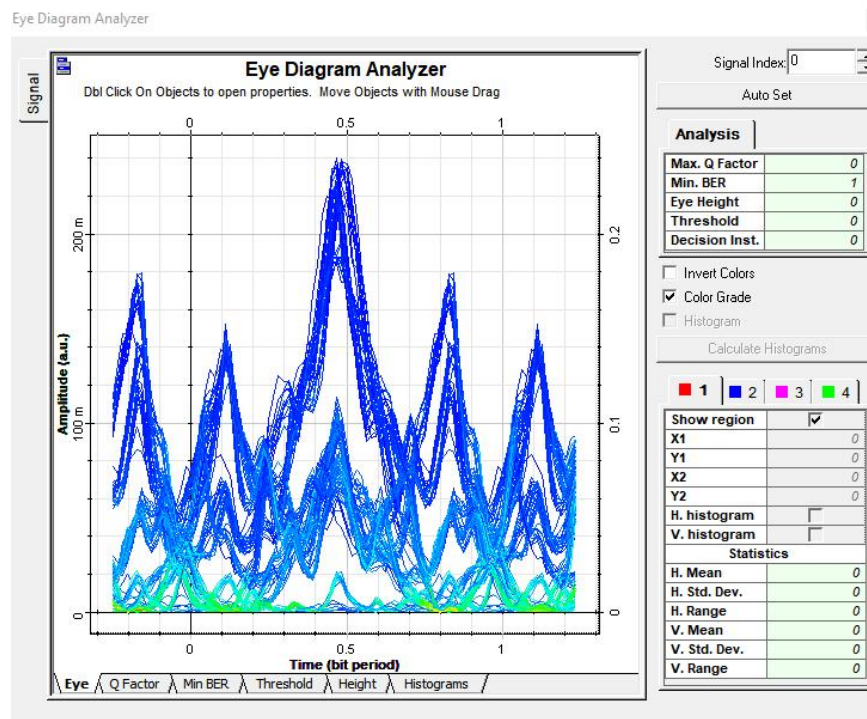


Figure III.12 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée

III.6.2 Utilisation de l'amplificateur à semi-conducteurs (SOA) pour renforcer le signal dans les réseaux intégrés

Un amplificateur optique à semi-conducteur (SOA) a été intégré au système afin d'améliorer la récupération du signal ou d'optimiser les performances globales de la liaison optique.

La figure (III.13) ci-dessous illustre l'architecture générale de cette liaison.

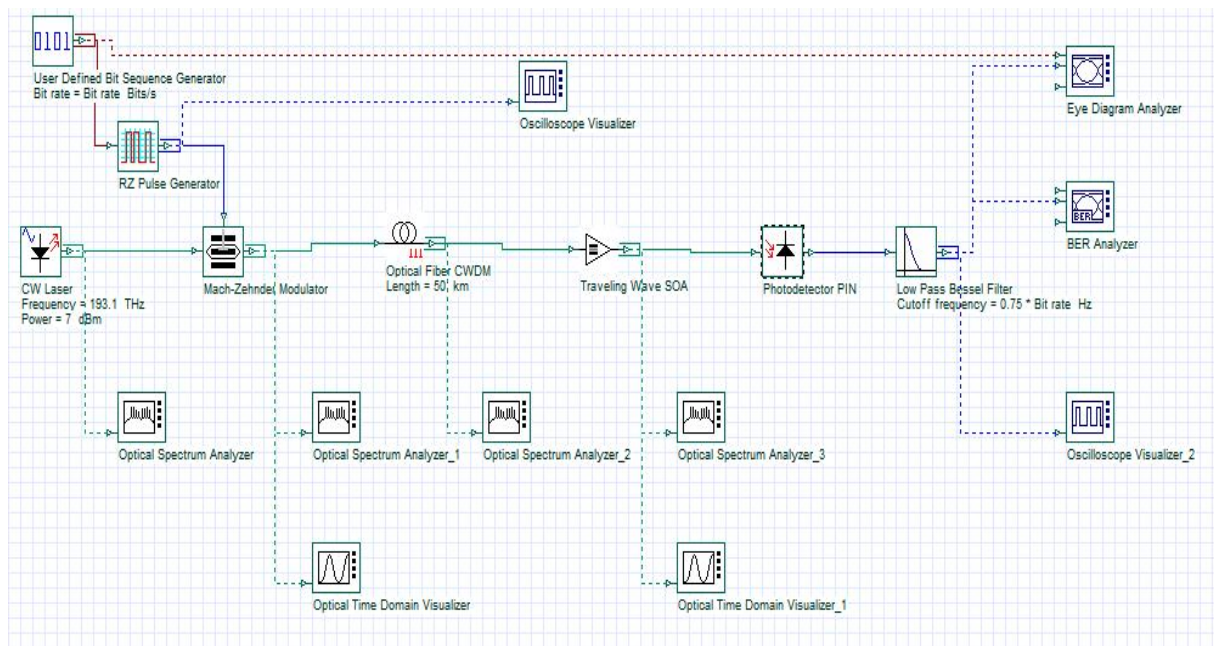


Figure III.13 : la liaison optique point à point avec l'amplificateur SOA.

Les résultats sont montrés sur les figures (III.14), (III.15), (III.16), (III.17), (III.18), et (III.19) à la sortie du laser, fibre, SOA, filtre.

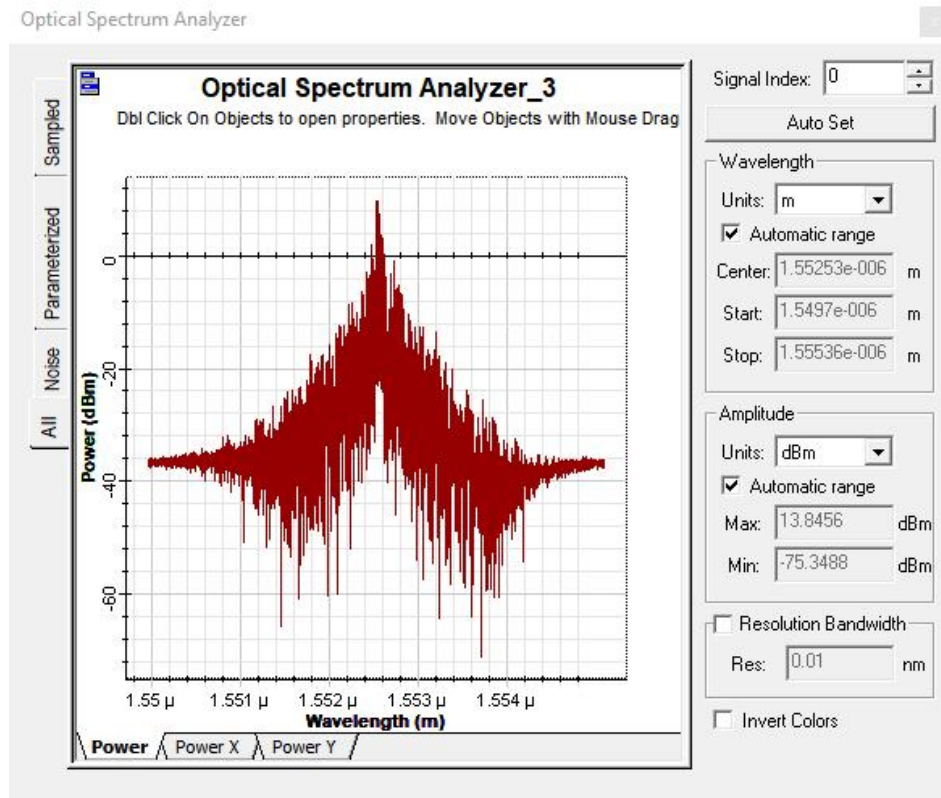


Figure III.14: Ile spectre à la sortie de l'amplificateur

L'apparition d'un spectre large et centré avec un pic net indique que l'amplificateur optique à semi-conducteur (SOA) a amplifié le signal sans perte significative de sa structure spectrale, ce qui est conforme aux caractéristiques du SOA lorsqu'il fonctionne dans une bande spectrale optimale (comme la bande C, par exemple).

Les branches latérales dans le spectre peuvent être le résultat d'effets non linéaires à l'intérieur du SOA, tels que la modulation de gain croisée (XGM) ou le Spectral Hole Burning, des phénomènes typiques de l'amplification en régime de bande partielle.

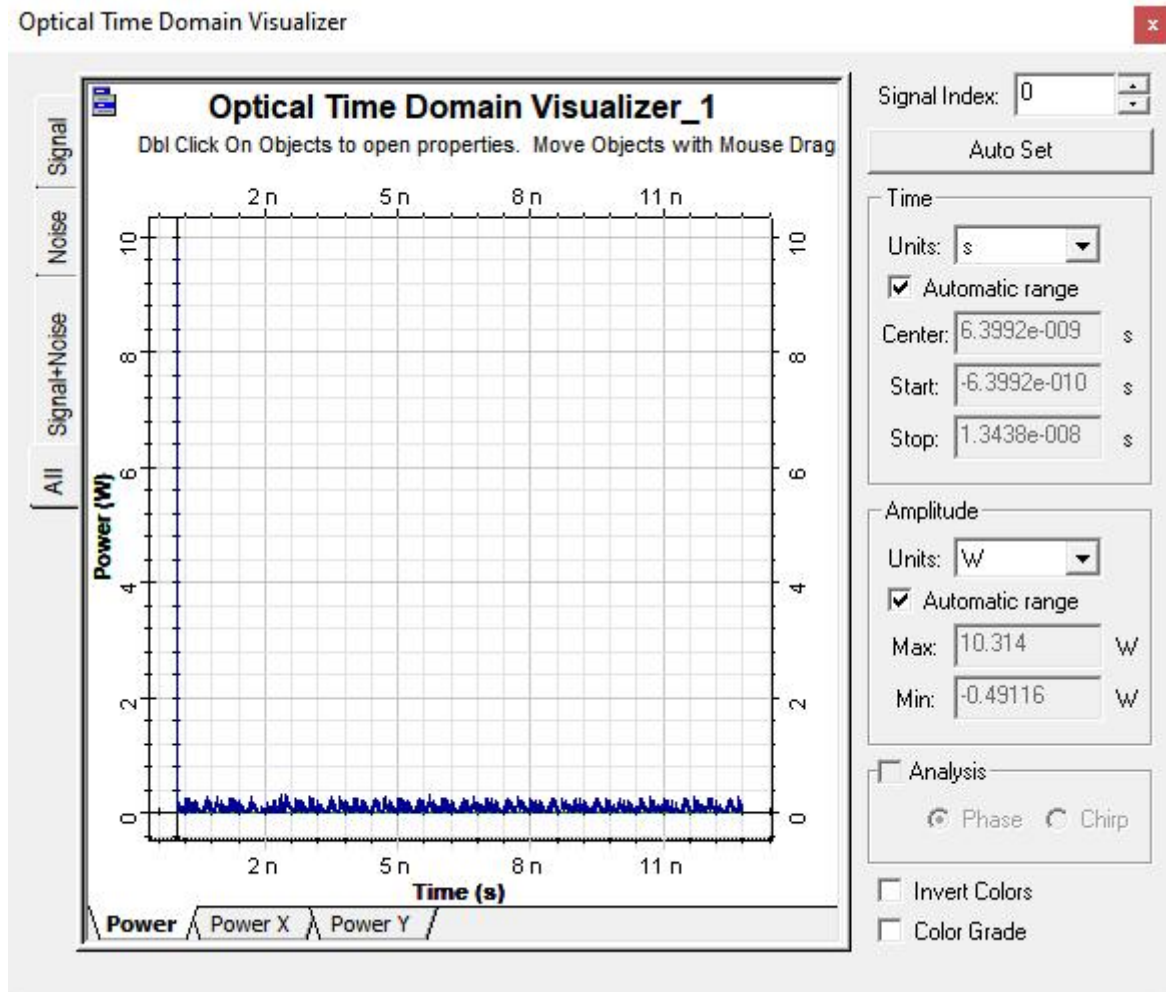


Figure III.15: la sortie de l'amplificateur

Lors de l'analyse du signal dans le domaine temporel, on remarque que le signal est flou, presque plat ou bruité, sans impulsions distinctes. Cela peut être lié aux caractéristiques des amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA), qui peuvent provoquer des distorsions temporelles en raison d'effets tels que le **chirp** ou la **saturation de gain**, notamment lorsque le taux d'impulsions est élevé. Il est possible que des interférences entre les impulsions se produisent à l'intérieur de l'amplificateur, ou qu'il y ait un désalignement entre la fenêtre d'observation temporelle et la durée réelle de l'impulsion. Une autre explication pourrait être que l'amplification par le SOA était déséquilibrée ou saturée, ce qui a entraîné une perte des détails temporels du signal.

En observant les trois spectres, on peut en déduire selon le visualiser oscilloscope :

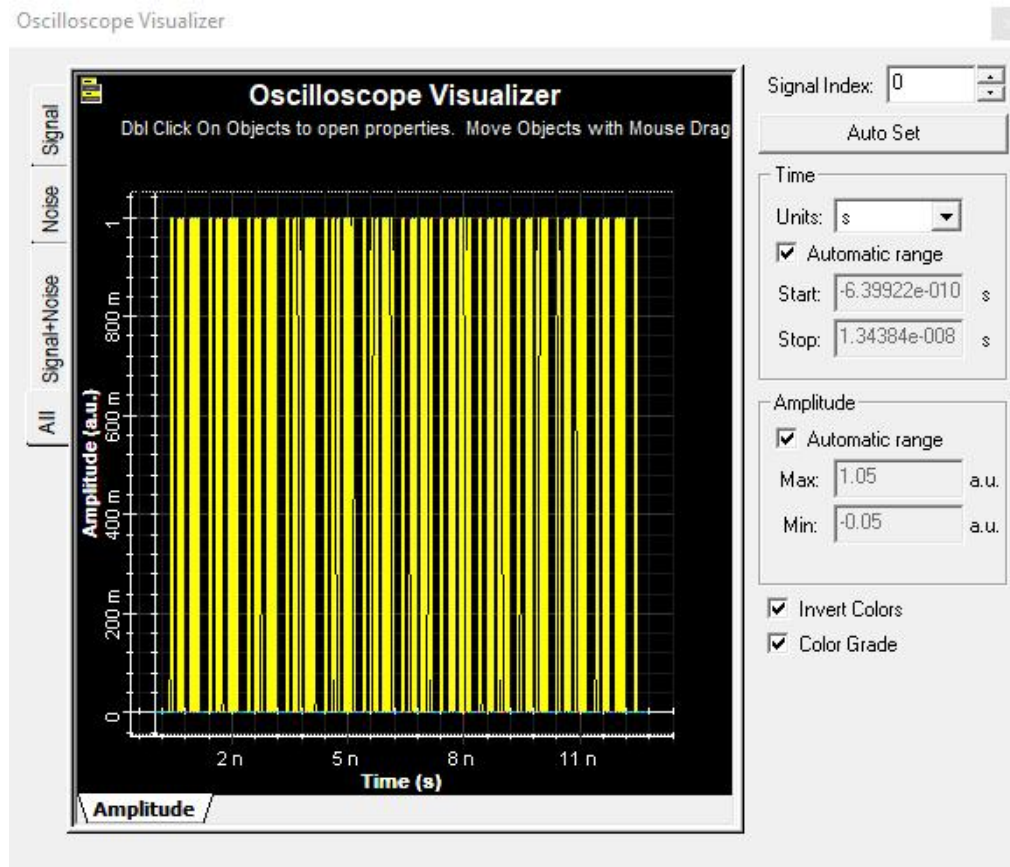


Figure III.16 : Train d'impulsion à la sortie de l'impulsions RZ.

Cette image montre un signal carré régulier issu directement du générateur d'impulsions RZ, servant de référence idéale avant l'amplification par le SOA. La régularité du signal indique qu'il est adapté pour évaluer l'impact du SOA sur la forme des impulsions, toute déviation ultérieure signalant une distorsion due à l'amplification.

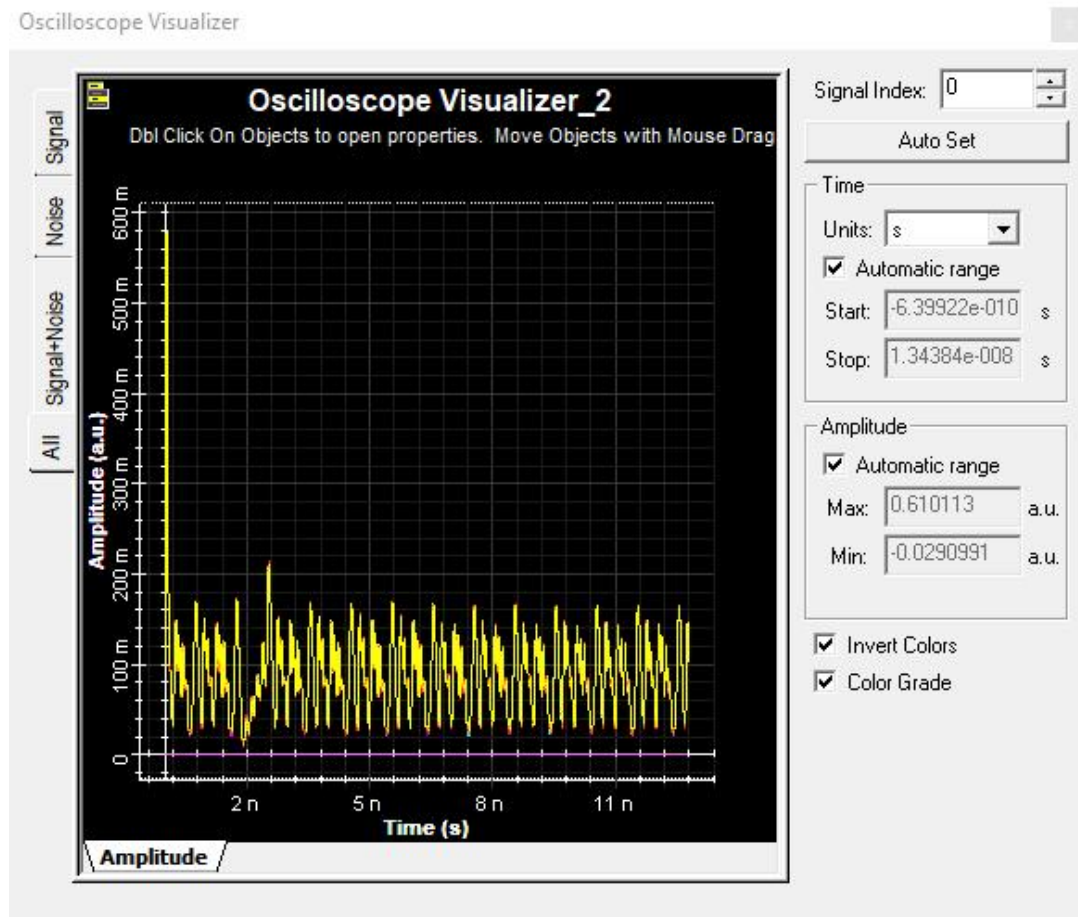


Figure III. 17 : train d'impulsion à la sortie de filtre

L'image montre un signal RZ régulier avant l'entrée dans l'amplificateur SOA, reflétant une forme temporelle idéale. Ce signal sert de référence pour évaluer les performances du SOA, et toute altération ultérieure est attribuée à l'effet de l'amplification.

Chapitre III : RÉSULTATS DE LA SIMULATION

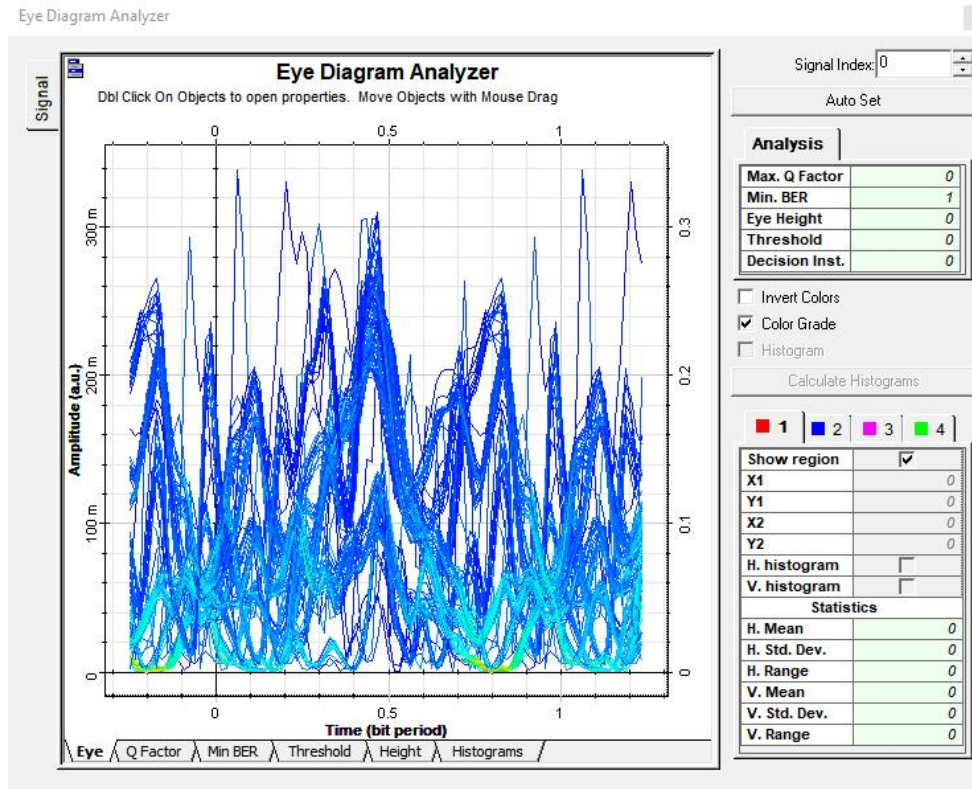


Figure III.18 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée

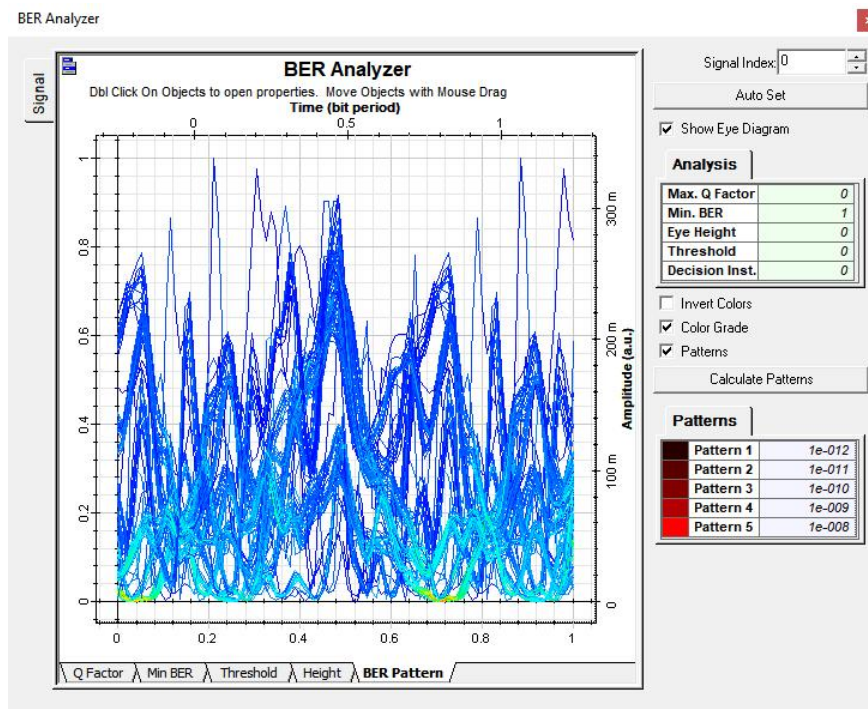


Figure III.19 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée

III.6.3 Utilisation de l'amplificateur Raman pour améliorer la transmission du signal sur de longues distances

Un amplificateur optique Raman a été intégré au système dans le but d'améliorer la récupération du signal optique et d'optimiser les performances globales de la liaison de transmission.

La figure (III.20) ci-dessous présente l'architecture globale de cette liaison optique avec l'intégration de l'amplification Raman.

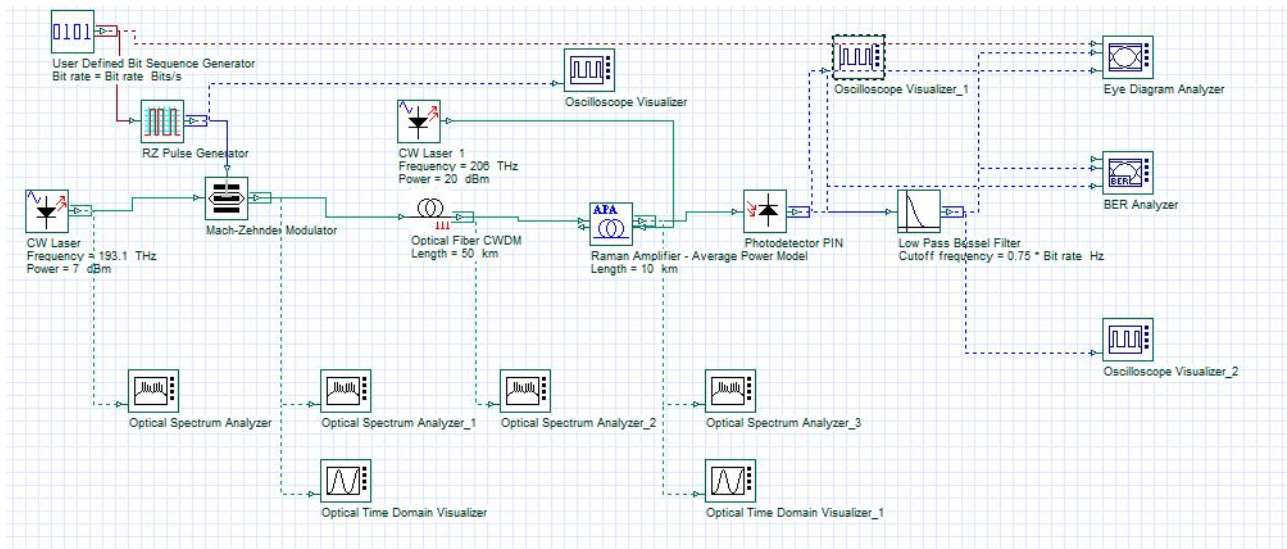


Figure III.20 : la liaison optique point à point avec l'amplificateur Raman.

On peut observer dans le (Figure III.21) un pic spectral net à la longueur d'onde centrale d'environ 1,552 μm , situé dans la bande C allant de 1,486 à 1,618 μm , ce qui indique une amplification efficace du signal optique. L'amplificateur Raman démontre une grande efficacité en renforçant le signal tout en maintenant un spectre propre et sans bruit, confirmant ainsi sa capacité à améliorer la qualité du signal dans les systèmes de communication optique.

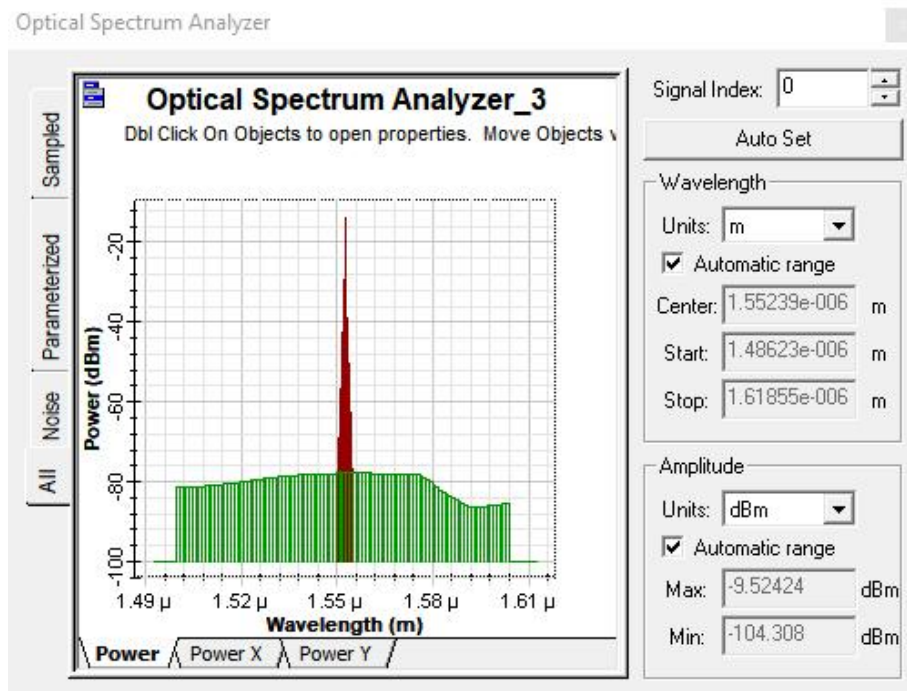


Figure III.21: Ile spectre à la sortie de l'amplificateur

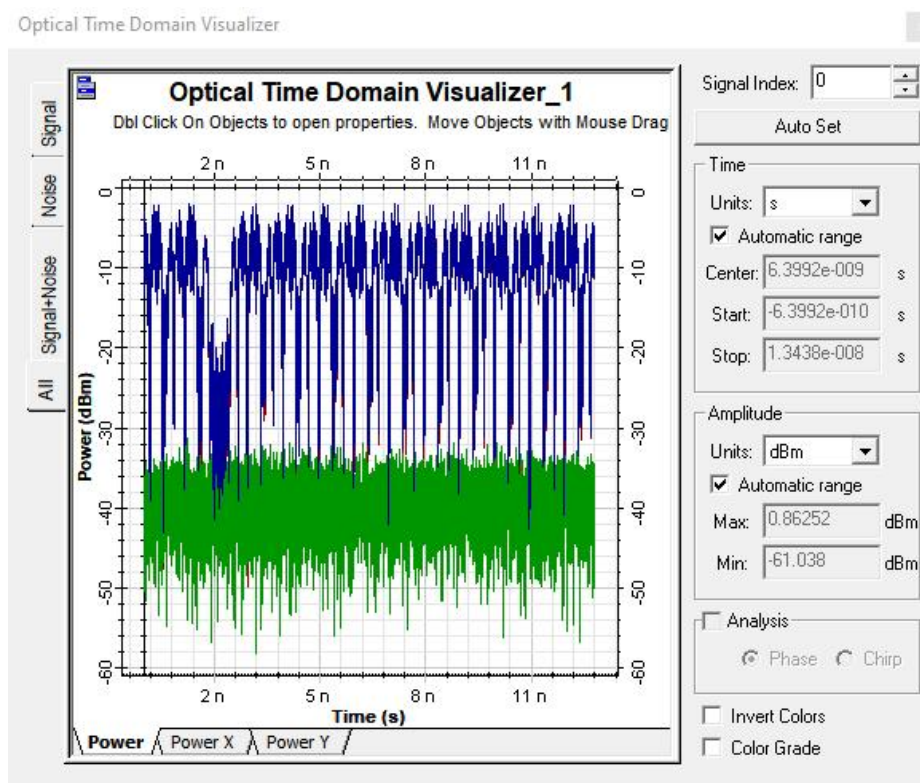


Figure III.22 : la sortie de la l'amplificateur

Chapitre III : RÉSULTATS DE LA SIMULATION

L'image présentée provient de l'outil Optical Time Domain Visualizer et montre un diagramme temporel de la puissance du signal optique en dBm, mesurée en nanosecondes (ns). Cette analyse reflète les performances d'un système de communication optique à haute vitesse.

La courbe bleue représente le signal optique amplifié, tandis que le vert indique le bruit généré par le système ou l'amplification. Le signal amplifié présente des pics réguliers, ce qui montre que l'amplificateur Raman a réussi à augmenter la puissance du signal sans provoquer de distorsion importante. Le signal reste clair et bien défini.

La puissance maximale atteinte est d'environ -0,86 dBm, ce qui est un niveau acceptable dans de nombreuses applications. Cependant, on observe également un niveau de bruit (en vert), attendu dans tout processus d'amplification. La puissance minimale enregistrée est d'environ -61,03 dBm, ce qui indique des instants de faiblesse ou des interférences notables dans le signal.

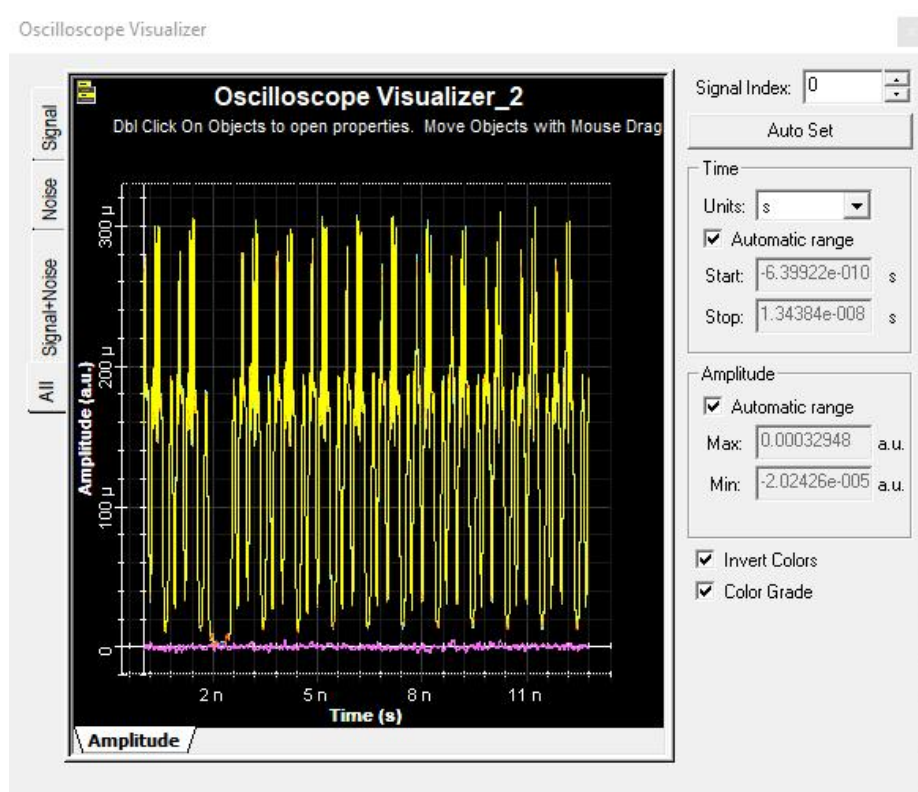


Figure III.23 : train d'impulsion à la sortie de filtre

On observe une forme d'impulsions régulière et répétitive, ce qui indique le passage d'un signal numérique avec un débit d'information constant. L'amplitude maximale du signal

Chapitre III : RÉSULTATS DE LA SIMULATION

atteint environ 0,00032948 a.u., ce qui reflète un bon niveau d'amplification. Cela s'explique par le fait que la forme temporelle régulière et l'absence de distorsion significative indiquent que le signal n'a pas subi de bruit ni d'interférences notables, montrant ainsi que l'amplificateur Raman a amplifié le signal efficacement tout en préservant sa forme temporelle et son contenu informationnel.

La différence entre le signal fort après le RZ et le signal affaibli après le filtrage indique que le filtre a réduit la puissance du signal, probablement en raison d'un décalage spectral ou d'un affaiblissement préalable. Cette comparaison permet d'évaluer l'impact du filtrage sur la qualité du signal optique.

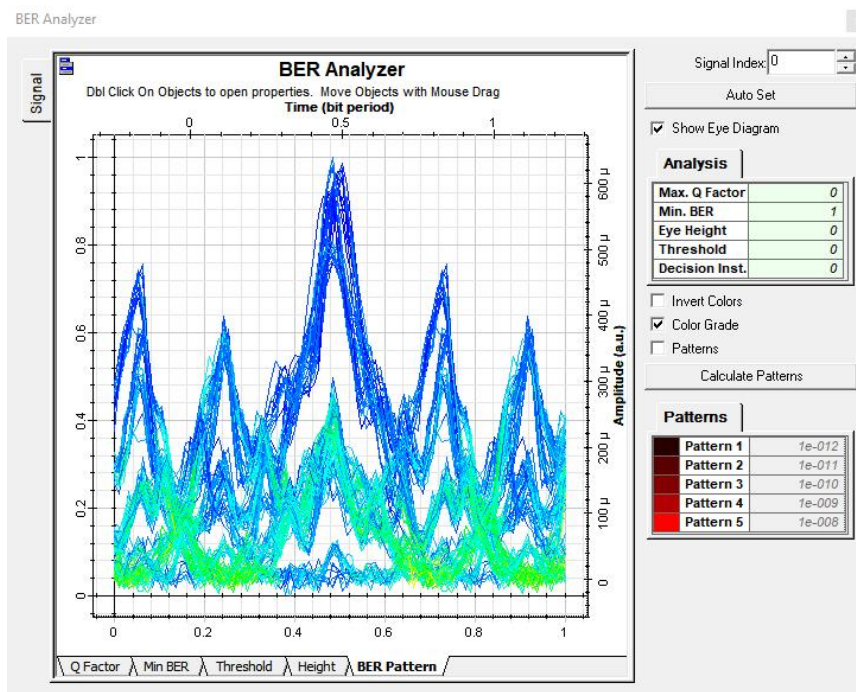


Figure III.24 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée

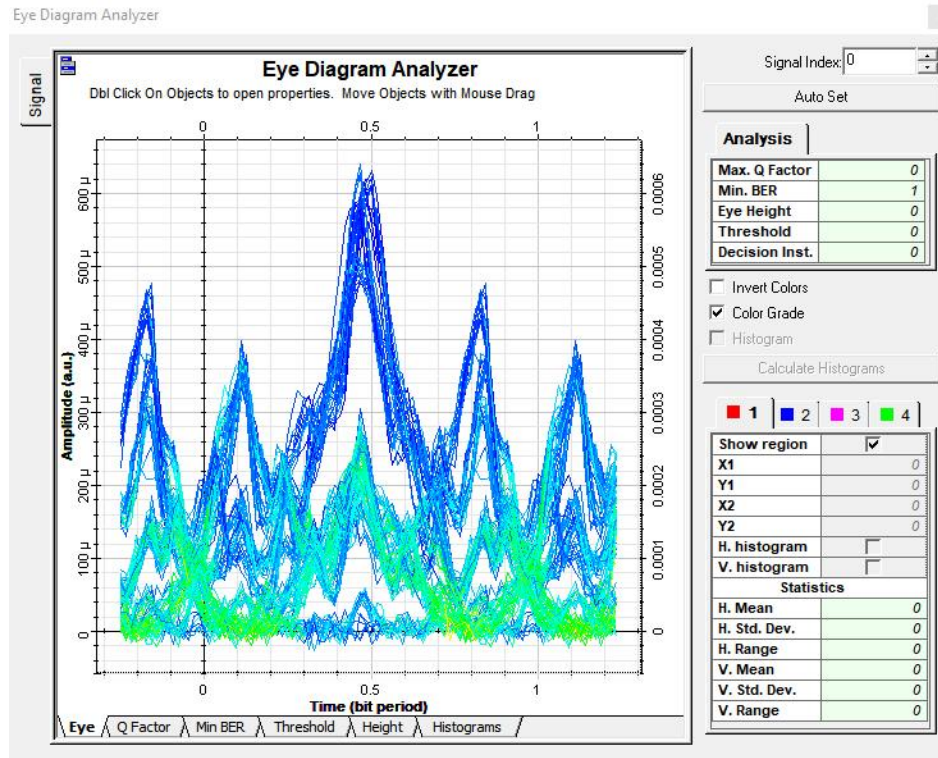


Figure III.25 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée

III.6.4 Comparaison des performances du système sans amplificateur et avec amplificateurs optiques

L'analyse des courbes du système fonctionnant sans amplificateur révèle un spectre optique présentant des bruits latéraux et un pic central limité. Les formes d'onde temporelles et le diagramme de l'œil indiquent une distorsion et une interférence dues à l'atténuation et à la dispersion naturelles dans la fibre optique. Cela se traduit par un taux d'erreur binaire (BER) non optimal, illustrant les limites inhérentes à un système sans amplification.

En comparaison, l'utilisation des trois amplificateurs optiques étudiés précédemment montre une nette amélioration de la qualité du signal :

- Avec l'EDFA, on observe une augmentation significative de la puissance autour de 1550 nm, ainsi qu'une ouverture plus large dans le diagramme de l'œil, signe d'une meilleure distinction entre les bits et d'une réduction des distorsions.

- L'amplificateur SOA assure une amplification efficace dans le domaine temporel avec une conservation de la forme des impulsions. Toutefois, des distorsions spectrales peuvent apparaître en raison de la nature non linéaire du composant.
- Si l'amplification Raman est utilisée, elle permet une amplification répartie le long de la fibre, réduisant ainsi les effets cumulés de la dispersion et de l'atténuation, notamment sur les longues distances.

Le système sans amplification souffre d'une dégradation notable de la puissance et de la qualité du signal. L'ajout d'un amplificateur optique qu'il soit EDFA, SOA ou Raman permet une nette amélioration des performances en termes de spectre, diagramme de l'œil et BER. L'EDFA se distingue par son efficacité spectrale, le SOA par sa compacité, et le Raman par son utilité dans les transmissions longue distance.

III.6.5 Effet de variation de la puissance émise par le laser

- ✓ Les mesures suivantes sont faites en variant la puissance du laser tout en gardant une longueur de la fibre constante avec un débit de 1Gbits/s pour estimer la performance du système on a utilisé l'analyseur de BER.
- ✓ Les résultats de l'analyseur optique sont montrés sur les figures (III.26) et (III.27) :

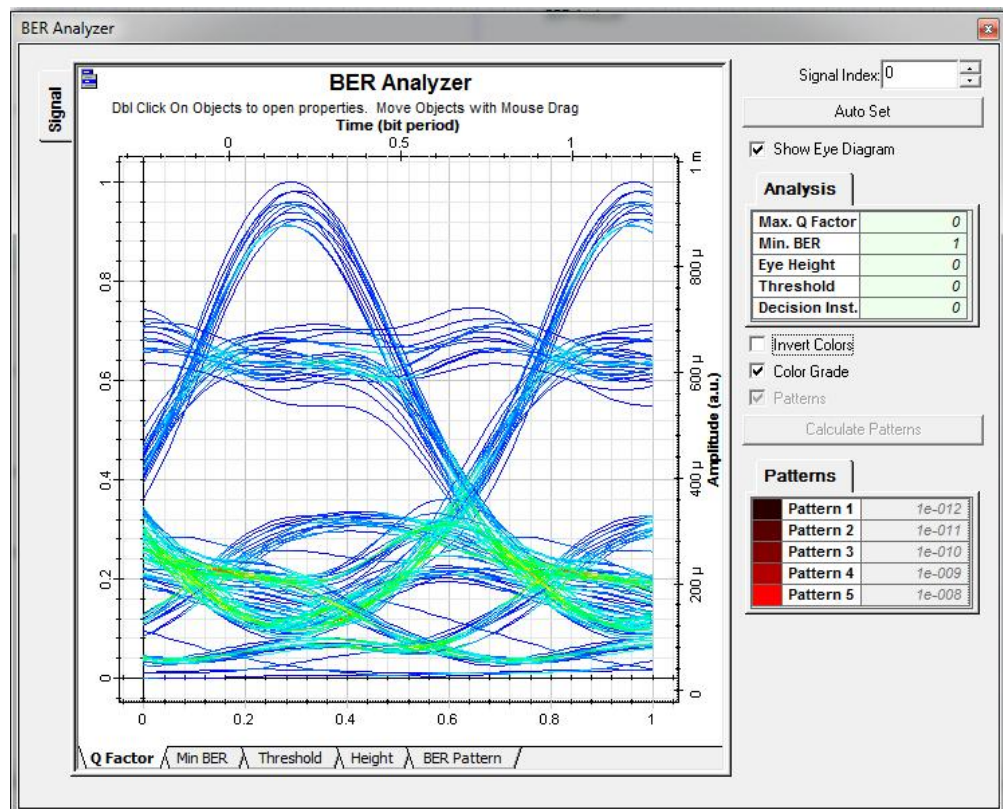


Figure III.26 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée

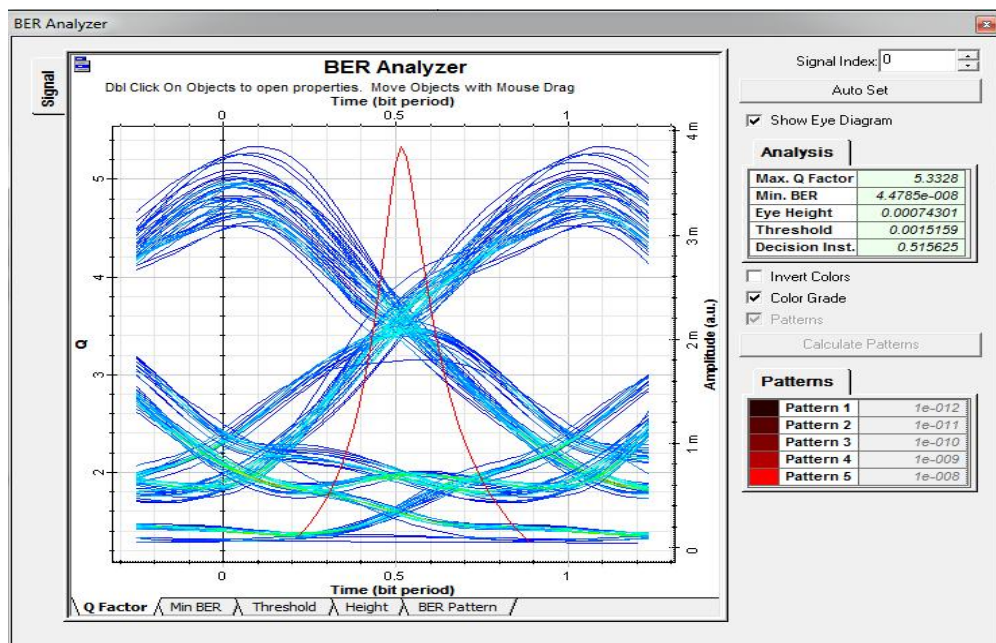


Figure III.27 : Diagrammes de l'œil tracés en sortie de filtre de réception d'une liaison simulée

On constate, que plus on augmente la puissance émise du laser plus on obtient un meilleur facteur de qualité. On a augmentation de facteur de qualité jusqu'à atteindre le meilleur résultat de 5.33. On obtient aussi de très bonnes valeurs du taux d'erreur binaire pour des puissances allant de 0 dBm jusqu'à 4dBm à partir de cette puissance, il se stabilise pour un intervalle allant de 5 dBm à 11 dBm tend vers 0.

CONCLUSION GÉNÉRALE

À travers la simulation d'un système de transmission optique réalisée avec le logiciel OptiSystem, il a été démontré que le système sans amplification souffre d'une dégradation notable de la puissance et de la qualité du signal, comme en témoignent le spectre optique, le diagramme de l'œil (Eye Diagram) et le taux d'erreur binaire (BER). En revanche, l'introduction d'un amplificateur optique — qu'il s'agisse de l'EDFA, du SOA ou de l'amplification Raman — permet une amélioration significative des performances du système.

Chaque amplificateur présente des avantages spécifiques : l'EDFA se distingue par son efficacité spectrale, le SOA par sa compacité, tandis que le Raman est particulièrement adapté aux transmissions sur longues distances.

Par ailleurs, les résultats de simulation ont montré que l'augmentation de la puissance du laser émetteur entraîne une nette amélioration du facteur de qualité (Q-Factor), atteignant une valeur optimale de 5.33. De très bons résultats du BER ont été obtenus pour des puissances comprises entre 0 dBm et 4 dBm, avec une stabilisation et une tendance vers zéro dans l'intervalle 5 dBm à 11 dBm.

Ces résultats soulignent l'importance de l'optimisation des paramètres du système ainsi que du choix rigoureux des composants, afin de garantir une transmission fiable, à haute qualité et à faible taux d'erreur dans les systèmes de communication optique modernes.

Références

- [1] OULADSALAME, M., & OKBAOUI, Y. (2015). Etude des fibres optiques (Licence dissertation, ghardaia).
- [2] SAIDI, R. (2010). Etude d'une Structure de Liaison par Fibre Optique: Caractérisation de la Propagation et Bilan Energétique (Master dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra).
- [3] MIREN, I. (2024). Conception de Capteur à Base des Fibres Optiques (Doctoral dissertation, Université d' Ain-Temouchent Belhadj Bouchaib).
- [4] HALASSA, M., & KHEMISSAT, Y. Etude Des Réseaux De Bragg Dans Les Fibres Optiques (Doctoral dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA).
- [5] Henault, J. M. (2013). Approche méthodologique pour l'évaluation des performances et de la durabilité des systèmes de mesure répartie de déformation: application à un câble à fibre optique noyé dans le béton (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).
- [6] Louiza, O., & Safia, H. (2015). Transmission de Données par voie optique (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [7] Rola, M. R., Titulair, R. N. F. P., Dominique, M. R., de Confère, M., & Fils, M. L. R. (2015). Présenté par: ABDALLAH Salim Said Omar ABDALLAH Salim Said Omar.
- [8] ADOUI, F. (2018). Effet d'une hétéro-jonction dans une fibre optique Multi-matériau (Master dissertation, Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –Bordj Bou Arreridj).
- [9] Guetiteni ,L & Akaba,T. (2021). Etude de la propagation du faisceau gaussien par un système optique (Master dissertation, Université DE MEDEA).
- [10] Madhhar, S. M. K. (2022). Les fibres optiques (Mémoire de licence, Université de Babylone, Faculté de l'éducation pour les sciences pures).

- [11] Verneuil, J. L. (2003). Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s. Université de Limoges, Limoges, 297.
- [12] Bentahar, A. (2021). Polycopié de Cours Optoélectronique.
- [13] Forget, S., Robert-Philip, I., & Balcou, P. (2010). un tour d'horizon. Le BupPhysique Chimie N 927 Octobre 2010, 18.
- [14] AMRANE,Y & ASSELGOU,B.(2012). Etude d'un Banc de transmission d'un signal ECG par fibre optique (Master dissertation, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou).
- [15] Meriem, A., & Aicha, M. E. (2016). La technique WDM en telecoms optiques avancées. Mémoire MASTER.
- [16] MEDJDOUB, F. (201). Optimisation par la simulation système d'une chaine de transmission numérique par fibre optique haut débit (MAGISTER dissertation, Université ABOU BEKR BELKAID - TLEMCEM).
- [17] izé, Y. (2003). Conception d'une boucle de recirculation en fibre optique pour l'analyse de la transmission longue distance [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
- [18] El Islam, L. L. N. (2019). Intitulé: Contribution par simulation aux différentes sources de bruits dans les détecteurs optiques.
- [19] Tektronix. (n.d.). Eye diagram basics tutorial. Tektronix. Retrieved April 5, 2025.
- [20] M,Esteban SERRANO. (2024). Nouvelles sources supercontinuum à fibre optique multimode effilée en verres de chalcogénures pour la gamme infrarouge moyen 2-20 μm (Doctoral dissertation, Université de Bourgogne Franche-Comté).
- [21] Bourkaib, Z., & Chertouh, S. (2010). Étude et supervision des câbles fibres optiques par OMNS (Application sur le réseau d'Algérie Télécom) (Mémoire de fin d'études, diplôme d'Ingénieur d'État en Électronique). Encadré par Lazri Mourad. [Université MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU].

- [22] Bouzid, C., & Nouari, A. (2022). Étude de l'influence de l'atténuation et la dispersion sur la transmission à fibres optiques (Mémoire de fin d'études, Université Kasdi Merbah – Ouargla, Faculté des nouvelles technologies de l'information et de la communication).
- [23] Bendrihem, A. (2008). Etude des phénomènes liés à la propagation dans les fibres optiques (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [24] Wafaa, B., & Chahinez, A.(2022). Etude et Simulation d'une architecture TWDM-PON dans un réseau FTTH pour différents formats de modulations(MASTER dissertation, Université de Mostaganem Abdelhamid Ibn Badis (UMAB) .
- [25] Cherbi-Bazi, L. (2007). Propagation et caractérisation des fibres optiques [Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique d'Alger]. DSpace ENP.
- [26] Djeroud, I., & Benzine, M. (2021). Filtrage biréfringent interférentiel : Application à la compensation de la dispersion chromatique (Mémoire de master académique, Université 8 Mai 1945 – Guelma).
- [27] Gagné-Godbout, L. (2014). Modélisation, fabrication et caractérisation d'un amplificateur à fibre optique à sept cœurs dopés à l'erbium.
- [28] The Fiber Optic Association. (n.d.). Mechanical splices. The FOA Reference For Fiber Optics. Retrieved April 17,
- [29] Belden. (2016, 25 février). Épissage par fusion ou épissure mécanique.
- [30] بحث بكالوريوس غير منشور). جامعة بابل، كلية التربية (الآليات الضوئية البصرية). (2022). مغير، س. م. ك[30]. للعلوم الصرفة، قسم الفيزياء.
- [31] Billami, H., & Bendahmane, R. (2013). Étude d'un réseau optique ADM 10Gbit/s [Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid]. Faculté de Technologie, Département de Génie Électrique et Électronique.
- [32] Kaur, K., & Kaur, B. (2016, November). Dispersion compensation techniques: A review. Research Cell: An International Journal of Engineering Sciences, Special Issue, 20, Vidya Publications. ISSN: 2229-6913 (Print), 2320-0332 (Online).

- [33] Hossain, M. B., Adhikary, A., & Khan, T. Z. (2020). Performance investigation of different dispersion compensation methods in optical fiber communication. *Asian Journal of Research in Computer Science*, 5(2), 36–44.
- [34] Kahlon, N. K., & Kaur, G. (2014). Various dispersion compensation techniques for optical system: A survey. *Open Journal of Communications and Software*, 1(1), 1–4.
- [35] Ben Guehza, M. B., & Kachi, F. (2023). Étude des systèmes de l'amplification dans les réseaux de transmission optique (Mémoire de master académique, Université de Kasdi Merbah Ouargla,).
- [36] Islam, M. N. (2002). Raman amplifiers for telecommunications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 8(3), 548–559.
- [37] Khaleghi, H. (2012). Influence des amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) sur la transmission cohérente de signaux optiques à format de modulation multi-porteuses (CO-OFDM) (Doctoral dissertation, Université de Bretagne occidentale-Brest).
- [38] ARRIBI,M,ELMAHI,A.(2016). La technique WDM en télécoms optiques avancées.(MASTER dissertation, Université de MUSTAPHA STAMBOULI DE MASCARA).
- [39] Merzouk, K. (2008). Étude d'un système bas coût de transmission optique par multiplexage temporel (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG).
- [40] MBOULIFA ,R,KHEMIS ,N . Etude des techniques du multiplexage pour la transmission des systèmes de télécommunication(MASTER dissertation Université Kasdi Merbah Ouargla).
- [41] OTMANI, H., BOULIFA, R., & KHEMIS, N. E. I. Etude des techniques du multiplexage pour la transmission des systèmes de télécommunication (MASTER dissertation Université Kasdi Merbah Ouargla).
- [42] Raharimanitra, F. N. (2012). Contribution à l'étude des architectures basées sur le multiplexage en temps et en longueur d'onde dans le réseau d'accès, permettant la migration vers la nouvelle génération de pon (ng-pon) à 10 gbits/s (Doctoral dissertation, Télécom Bretagne, Université de Bretagne-Sud).

[43] Larry. (2022, juin 8). Qu'est-ce que la technologie WDM cohérente ? FS Community.

[44] Pureur, D., & Biasi, A. (2011). Les lasers à fibre. Photoniques, (51), 47-48.

[45] OTMANI, H., Guehza, B., & Kachi, F. Etude des systèmes de l'amplification dans les réseaux de transmission optique (Doctoral dissertation, UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA).

RÉSUMÉ

La transmission se faisait par des lignes à deux fils ou par des câbles coaxiaux. Avec l'invention du laser en 1960, une nouvelle méthode, celle des télécommunications optiques, a été introduite. L'utilisation de fibres optiques comme support de transmission est devenue largement acceptée dans le monde.

Pour transporter des informations sur de grandes distances via fibre optique, il est crucial de réduire au maximum la dégradation du signal. Cependant, en raison de l'augmentation continue de la vitesse de transmission, la gestion de la distorsion causée par la dispersion et les effets non linéaires devient de plus en plus complexe. Afin de diminuer les pertes et d'augmenter le débit, nous avons réalisé une simulation d'un système de transmission point à point utilisant des fibres optiques. Ceci incluait la variation des longueurs d'onde et l'ajout de dispositifs de compensation, ce qui a abouti à un coefficient de qualité de 6 et un TEB après que le signal ait parcouru 150 km dans la fibre optique.

Mots clés :

Fibre monomode, liaison optique, optisystem, signal.

المخلص:

كانت عملية الارسال تجري عبر خطوط ثنائية السلك او عبر ككابات متحد المحور (كوكسية). ومع اختراع الليزر في عام 1960, تم ادال طريقة جديدة تعرف بالاتصالات الضوئية. وقد أصبح استخدام الألياف البصرية كوسيط للإرسال مقبولا على نطاق واسع في جميع أنحاء العالم.

ولنقل المعلومات لمسافات طويلة عبر الألياف البصرية, من الضروري تقليل تدهور الإشارة إلى أقصى حد ممكن, ومع ذلك, وبسبب الزيادة المستمرة في سرعة الإرسال, أصبحت إدارة التشوه الناتج عن التشتت و التأثيرات غير الخطية مسألة أكثر تعقيدا, ولتقليل الفقدو زيادة معدل النقل, قمنا بماكاة نظام ارسال من نقطة الى نقطة باستخدام الأليا البصرية. وقد شمل ذلك تغيير أطوال الموجات و إضافة أجهزة تعويض, مما ادى الى الحصول على معامل جودة قدره 6 و معدل خطأ في البت جيد بعد ان قطعت الإشارة مسافة 150 كم داخل الليف البصري.

الكلمات المفتاحية:

ألياف أحادية النمط, وصلة بصرية, إشارة, OptiSystem.

Abstract:

Transmission was previously carried out using two-wire lines or coaxial cables. With the invention of the laser in 1960, a new method—optical telecommunications—was introduced. The use of optical fibers as a transmission medium has become widely accepted around the world.

To transmit information over long distances via optical fiber, it is essential to minimize signal degradation as much as possible. However, due to the continuous increase in transmission speed, managing distortion caused by dispersion and nonlinear effects has become increasingly complex.

To reduce losses and increase data rate, we conducted a simulation of a point-to-point transmission system using optical fibers. This included varying the wavelengths and adding compensation devices, which resulted in a quality factor of 6 and a bit error rate (BER) after the signal traveled 150 km through the optical fiber.

Keywords:

Single-mode fiber, optical link, OptiSystem, signal.

تصريح شرفي

خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث

(ملحق القرار 1082 المؤرخ في 2021/12/27)

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED KHIDER - BISKRA

Faculté des SE



أنا الممضي أسفله،

السيد(ة): كبايري سارية.

الصفة: طالب سنة ماستر 2

تخصص: فيزياء مكثفة.

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 203224318 الصادرة بتاريخ: 2018/07/30

المسجل بكلية: العلوم الدقيقة. قسم: علوم المادة

والمكلف بإنجاز أعمال بحث: مذكرة ماستر 2

عنوانها Optimisation des propriétés optiques de la fibre

Dans une chaine de communication.

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في إنجاز البحث المذكور أعلاه وفق ما ينص عليه القرار رقم 1082 المؤرخ في 2021/12/27 المحدد للقواعد المتعلقة بالوقاية من السرقة العلمية ومكافحتها.

التاريخ: 2025/05/04

إمضاء المعني بالأمر