

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية  
Université Saad DAHLEB de Blida 1

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Electronique



## Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

---

---

# Conception et Simulation de la technique CDMA sur une liaison optique

---

---

Présenté par :

**Hasnaoui Heyam Meriem**

**Fekir Nour El Imène**

Encadré par :

**M<sup>r</sup> M. BENSEBTI**

**Juillet 2023**

## Dédicace

*Avec Tous Mes Sentiments De Respect, Avec L'expérience Da Ma Reconnaissance, Je Dédie*

*Ma Remise De Diplôme Et Ma Joie :*

*A Ma Reine, Mon Paradis, La Prunelle De Mes Yeux, La Source De Ma Joie Et Mon  
Bonheur, Ma Lune Et Le Fil D'espoir Qui Allumer Mon Chemin, Maman Votre Affection  
Ma Couvre, Votre Bienveillance Ma Guide Et Votre Présence Été Ma Source De Force Pour  
Affronter Les Différents Obstacles.*

*A Mon Roi, Qui M'a Fait Une Femme, Ma Source De Vie Et D'affection. Papa Mon  
Support Qu'était Toujours A Mes Cotes Pour Me Soutenir Et M'encourager.*

*A Mon Frère Haythem, Pour L'amour Qu'il Me Reserve. Puisse Dieu Te Donne La Santé, Le  
Bonheur, Le Courage Et Surtout La Réussite.*

*A M'adorable Petite Sœur Hanaa Qui Savent Toujours Comment Procurer La Joie Et Le  
Bonheur Pour Toute La Famille. Que Dieu La Protégée Et Leur Offre La Chance Et La  
Réussite.*

*Sans Oublier Mon Binôme Nour El Imène Pour Son Soutien Moral, Sa Patience Et Sa  
Compréhension Tout Au Long De Ce Projet.*

*A Ma Chère Amie Hadri Nesrine En Témoignage De L'amitié Qui Nous Uni, Des Souvenirs  
Et De Tous Les Moments Que Nous Avons Passées Ensemble.*

*A Tout Ce Qu'ont Participer A Ma Réussite Et A Tous Qui M'aîmer.*

**HEYAM MERIEM**

## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, À ma chère mère. Les mots ne suffisent pas pour exprimer toute ma reconnaissance pour toi. Merci infiniment pour ton amour inconditionnel, ton soutien constant et tes encouragements tout au long de mon parcours d'études. Je ne serais pas là où je suis aujourd'hui sans toi. Tu es ma plus grande source d'inspiration. Je te suis éternellement reconnaissante.*

*À mon cher grand-père et à ma chère grand-mère, Vos sages conseils, votre affection et vos histoires inspirantes ont enrichi ma vie. Je vous suis reconnaissante pour les valeurs que vous m'avez transmises et pour le soutien inconditionnel que vous m'avez apporté tout au long de mon parcours.*

*À mes chères sœurs, Vous êtes mes compagnons de vie, mes confidentes et mes meilleures amies. Votre présence et votre soutien m'ont permis de surmonter les défis et de croître en tant que personne. Je vous remercie pour votre amour inébranlable et votre encouragement constant. Je suis honorée de partager cette réussite avec vous.*

*À mon cher fiancé, Tu es mon roc, ma source d'inspiration et mon plus grand soutien. Ta présence à mes côtés a été une bénédiction pendant cette période de ma vie. Je te suis infiniment reconnaissante pour ton amour, ta patience et ta compréhension.*

*À toute ma famille, À toute personne que j'ai aimée.*

*À mon binôme Heyam, Merci pour ta collaboration et ton engagement continu, tu es formidable ! je te souhaite tout le succès et l'épanouissement que tu mérites.*

*Avec gratitude, Nour El-Imène*

## Remerciement

*Nous Remercions Le Bon Dieu Qui Nous A Donné Le Courage, La Patience, La Santé Et La Volonté D'arriver A La Fin De Ce Projet.*

*Nous Tenons A Remercier Chaleureusement Mr BENSEBTI MESSAOUD Qui Nous A Fait L'honneur D'être Notre Encadreur Et Pour La Confiance Qu'ils Nous Ont Témoignées Et Les Précieux Conseils Prodigés Ainsi Que Le Suivi Constant Tout Au Long De La Période De La Réalisation De Ce Travail, Qu'ils Trouvent Ici Notre Profonde Gratitude Et Toute Notre Reconnaissance Et Notre Respect.*

*Nos Vifs Remerciements Vont Également Aux Membres Du Jury Pour L'intérêt Qu'ils Ont Porté A Notre Recherche En Acceptant D'évaluer Ce Travail Et De L'enrichir Par Leurs Propositions.*

*Nous Adressons Nos Sincères Remerciements A Tous Les Professeurs Intervenants Et Toutes Les Personnes Qu'ont Guidé Nos Réflexions Par Leurs Conseils Et Leurs Critiques Et Ont Accepté De Répondre A Nos Questions Durant Nos Recherches Surtout MR. RAHMANI AMINE.*

*Tous Nos Respects Et Nos Grattitudes A Tous Ceux Qui Ont Contribué De Prêt Ou De Loin A La Réalisation De Ce Travail.*

## ملخص

الهدف من الرسالة هو إجراء تحليل متعمق لأداء نظام النقل البصري OCDMA مع التشفير الطيفي SAC-OCDMA (الوصول المتعدد للقسم البصري المرمز الطيفي). تمت دراسة أداء النظام من حيث معدل الخطأ في البتات (BER) ومخطط العين. يتم استخدام Fiber Bragg Grating (FBG) كأجهزة تشفير وفك تشفير في هذا النظام. تؤكد نتائج المحاكاة أن أداء النظام قد تحسن بشكل ملحوظ مع انخفاض عدد المستخدمين النشطين. ومع ذلك، مع زيادة طول الألياف الضوئية ومعدل البت في النظام، يميل الأداء إلى أن يصبح مشابهًا. تقدم هذه الدراسة تطبيقًا محتملاً في شبكات الوصول الضوئية، حيث ينشط عدد قليل من المستخدمين إحصائيًا في وقت واحد.

**الكلمات الرئيسية:** FBG ، SAC-OCDMA ، OCDMA

## Résumé

La mémoire de fin d'études a pour objectif d'effectuer une analyse approfondie des performances d'un système de transmission optique OCDMA à encodage spectral SAC-OCDMA (Spectral Amplitude Coded-Optical Division Multiple Access). Les performances du système ont été étudiées en termes de taux d'erreur binaire (BER) et de diagramme de l'œil. Les fibres à réseau de Bragg (FBG) sont utilisées comme dispositifs de codage et de décodage dans ce système. Les résultats des simulations confirment que les performances du système sont considérablement améliorées avec un faible nombre d'utilisateurs actifs. Cependant, à mesure que la longueur de la fibre optique et le débit binaire augmentent dans le système, les performances tendent à devenir similaires. Cette étude présente une application potentielle dans les réseaux d'accès optiques, où statistiquement peu d'utilisateurs sont actifs simultanément.

**Mots clé :** OCDMA, SAC-OCDMA, FBG.

## Abstract

The objective of this thesis is to perform a detailed analysis of the performance of an OCDMA optical transmission system using Spectral Amplitude Coded-Optical Division Multiple Access (SAC-OCDMA). The system performance is evaluated in terms of Bit Error Rate (BER) and Eye Diagram. FBGs are utilized as encoding and decoding devices in this system. Simulation results confirm that the system performance is significantly improved with a low number of active users. However, as the fiber length and bit rate increase in the system, the performances tend to become similar. This study presents a potential application in optical access networks, where statistically few users are active simultaneously.

**Keywords:** OCDMA, SAC-OCDMA, FBG

# Table des matières

---

Liste des Figures	
Liste des tableaux	
Liste des acronymes	
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I GENERALITES SUR LA CHAINE DE TRANSMISSION OPTIQUE.....	3
I.1. Introduction.....	4
I.1. Présentation d'une chaine de transmission par fibre optique.....	4
I.2. Structure générale d'une chaine de transmission optique.....	4
I.3. Fibre optique.....	4
I.3.1 Types de fibre optique.....	5
I.3.1.1 Fibre optique monomode (SMF).....	5
I.3.1.2 Fibre optique multimodes (MMF).....	6
I.3.2. Différence entre fibre monomode et fibre Multimodes.....	6
I.4. Caractéristiques de la fibre monomodale.....	7
I.4.1. Dimension.....	7
I.4.2. Bande passante.....	7
I.4.3. Effets linéaires.....	8
I.4.3.1 Pertes d'atténuation.....	8
I.4.3.2 Dispersion chromatique.....	9
I.4.3.3 Dispersion modale de polarisation.....	10
I.4.4. Effets non-linéaires.....	11
I.4.4.1 Effet Kerr.....	11
I.4.4.2 Effet Raman.....	11
I.4.4.3 Effet Brillouin.....	12
I.4.4.4 Effet de mélange de fréquences.....	12
I.5. Bloc d'émission optique.....	12
I.5.1. Modulation optique.....	12
I.5.1.1 Modulation directe.....	12
I.5.1.2 Modulation externe.....	13
I.5.1.3 Comparaison entre les deux modulations.....	13

I.6. Bloc de réception optique .....	14
I.7. Amplificateurs optiques .....	15
I.7.1. Amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (EDFA).....	16
I.7.2. Amplificateurs à semi-conducteurs .....	16
I.7.3. Amplificateurs à Raman.....	17
I.8. Accès Multiple optiques.....	17
I.8.1. Accès multiples par répartition en longueur d'onde (WDM) .....	17
I.8.2. Accès multiple par répartition temporelle en optique (OTDMA).....	18
I.8.3. Accès multiple par répartition de code optique (OCDMA).....	19
I.9. Comparaison entre les trois techniques d'accès multiple optique .....	19
I.10. Avantage d'une liaison optique .....	20
I.11. Inconvénients d'une liaison optique .....	21
I.12. Application des liaisons optiques.....	21
I.13. Conclusion .....	22
CHAPITRE II Techniques d'Accès Multiple Optique OCDMA .....	23
II.1. Introduction.....	24
II.2. Accès Multiple par répartition de code optique (OCDMA) .....	24
II.2.1 Principe d'OCDMA.....	24
II.3. Étalement de spectre au CDMA .....	26
II.3.1. Principes d'étalement de spectre .....	26
II.3.2. Techniques d'étalement de spectre .....	27
II.3.2.1 Étalement de spectre à séquence direct (DS-SS).....	27
II.3.2.2 Étalement de spectre à saut de fréquence (FH-SS).....	27
II.3.2.3 Étalement avec saut de temps (TH-SS) .....	27
II.3.3. Avantages de l'étalement de spectre.....	28
II.4. Architecture d'OCDMA .....	28
II.5. Différentes approches de l'OCDMA .....	29
II.5.1 OCDMA cohérent.....	29
II.5.2 OCDMA incohérent.....	29
II.6. Codeurs et décodeurs optiques OCDMA .....	29
II.6.1. Réseaux de Bragg .....	29

II.7. Différentes méthodes d'encodage OCDMA.....	30
II.7.1. OCDMA par encodage temporel .....	30
II.7.2. OCDMA par encodage spectral .....	31
II.7.2.1 OCDMA par encodage spectral de phase (SPE-OCDMA Spectral Phase Encoding OCDMA).....	31
II.7.2.2 OCDMA par encodage spectral d'amplitude (SAC-OCDMA Spectral Amplitude Coding OCDMA).....	32
II.8. Techniques de détection en SAC-OCDMA.....	33
II.8.1 Détection directe .....	33
II.8.2 Détection balancée.....	34
II.8.3. Comparaison entre détection directe et détection balancée .....	35
II.9. Avantages de la technique d'accès multiple en code OCDMA .....	35
II.10. Conclusion .....	35
CHAPITRE III Simulation et Interprétation des Résultats .....	37
III.1. Introduction .....	38
III.2. Présentation du logiciel de simulation OptiSystem.....	38
III.3. Caractéristiques du logiciel OptiSystem .....	39
III.4. Application du logiciel OptiSystem .....	39
III.5. Avantages du logiciel OptiSystem .....	40
III.6. Interface du logiciel OptiSystem .....	40
III.7. Affichage des résultats à partir d'un appareil .....	42
III.8. Critère de qualité de la transmission optique .....	42
III.9. Topologie du système SAC-OCDMA .....	43
III.9.1. Partie émission .....	45
III.9.2. Partie de transmission.....	47
III.9.3. Partie réception .....	47
III.10. Paramètre de simulation .....	49
III.11. Présentation de la simulation .....	50
III.12. Résultats de simulation.....	51
III.13. Impact de la bande passante des réseaux de Bragg sur les performances du système .....	54
III.13.1 Interprétation des résultats.....	55

III.14. Impact du débit binaire sur les performances du système .....	55
III.14.1 Interprétation des résultats .....	56
III.15. Impact de la puissance optique sur les performances du système .....	57
III.15.1 Interprétation des résultats .....	58
III.16. Impact de nombre d'utilisateur sur les performances du système .....	58
III.16.1 Interprétation des résultats .....	59
III.17. Impact de la longueur de la fibre optique sur les performances du système .....	59
III.17.1 Interprétation des résultats .....	61
III.17.2 Amélioration de la Topologie .....	62
III.17.3 Interprétation des résultats .....	66
III.18. Conclusion .....	66
Conclusion générale .....	67
Bibliographie .....	68

## Liste des Figures

---

<b>Figure I. 1:</b> Schéma d'une chaîne de transmission optique .....	4
<b>Figure I. 2:</b> Structure de la Fibre Optique .....	5
<b>Figure I. 3:</b> La fibre optique monomode.....	6
<b>Figure I. 4:</b> La fibre optique Multimodes.....	6
<b>Figure I. 5:</b> Schéma d'une liaison optique avec compensation.....	10
<b>Figure I. 6:</b> Schéma synoptique de la modulation directe.....	13
<b>Figure I. 7:</b> schéma synoptique de la modulation externe .....	13
<b>Figure I. 8:</b> schéma synoptique d'un bloc de réception optique.....	14
<b>Figure I. 9:</b> Schéma d'un amplificateur à fibre dopée à l'Erbium .....	16
<b>Figure I. 10:</b> Schéma d'un accès multiple en longueur d'onde WDMA .....	18
<b>Figure I. 11:</b> Chaîne de Transmission en OTDMA.....	18
<b>Figure I. 12:</b> Technique d'Accès Multiple CDMA .....	19
<b>Figure II. 1:</b> Codage des données en OCDMA.....	25
<b>Figure II. 2:</b> Architecture d'un émetteur-récepteur.....	25
<b>Figure II. 3:</b> Principe d'étalement de spectre .....	26
<b>Figure II. 4:</b> OCDMA avec émetteurs et récepteurs optiques en configuration en étoile .....	28
<b>Figure II. 5:</b> Génération d'une séquence en utilisant des réseaux de Bragg photo inscrits dans une même fibre.....	30
<b>Figure II. 6:</b> Représentation schématique du DS-OCDMA.....	31
<b>Figure II. 7:</b> Codage spectral OCDMA.....	31
<b>Figure II. 8:</b> Représentation schématique du SPE-OCDMA .....	32
<b>Figure II. 9:</b> Représentation schématique du SAC-OCDMA.....	32
<b>Figure II. 10:</b> Architecture d'un système SAC – OCDMA à détection directe.....	33
<b>Figure II. 11:</b> Architecture d'un système SAC-OCDMA à détection balancée .....	34
<b>Figure III. 1:</b> Interface graphique du logiciel OptiSystem.....	41
<b>Figure III. 2:</b> Barre d'état du logiciel OptiSystem .....	41
<b>Figure III. 3:</b> Barre de menu du logiciel OptiSystem .....	41
<b>Figure III. 4:</b> Fenêtre de lancement de simulation.....	42
<b>Figure III. 5:</b> : schéma du système SAC-OCDMA (Nombre d'utilisateur N=3).....	44
<b>Figure III. 6:</b> Bloc d'émission pour chaque utilisateur .....	45
<b>Figure III. 7 :</b> White Light Source .....	45

<b>Figure III. 8:</b> Pseudo-Random Bit Sequence Generator.....	45
<b>Figure III. 9:</b> Non-Return à Zero Pulse Generator.....	46
<b>Figure III. 10:</b> Modulateur Mach-Zehnder .....	46
<b>Figure III. 11 :</b> Uniform Fiber Bragg Grating .....	46
<b>Figure III. 12 :</b> Power Combiner .....	46
<b>Figure III. 13:</b> Canal de transmission la fibre optique .....	47
<b>Figure III. 14:</b> Bloc de réception pour chaque utilisateur.....	47
<b>Figure III. 15 :</b> Power Splitter.....	47
<b>Figure III. 16 :</b> Uniform Fiber Bragg Grating et photodétecteurs en bloc de la réception .....	48
<b>Figure III. 17 :</b> Filtre Passe-Bas de type Bessel.....	48
<b>Figure III. 18:</b> Diagramme d'œil et BER de premier utilisateur (L=10 km).....	52
<b>Figure III. 19 :</b> Diagramme d'œil et BER de deuxième utilisateur (L=10 km) .....	53
<b>Figure III. 20 :</b> Diagramme d'œil et BER de troisième utilisateur (L=10 km) .....	53
<b>Figure III. 21:</b> Courbe d'évolution de BER en fonction de variation de bande passante.....	55
<b>Figure III. 22:</b> Courbe d'évolution de BER en fonction de variation de débit binaire .....	56
<b>Figure III. 23:</b> Courbe d'évolution de taux de BER en fonction de variation de la puissance optique.....	58
<b>Figure III. 24 :</b> Courbe d'évolution de BER en fonction de la longueur de la fibre des trois utilisateurs .....	60
<b>Figure III. 25:</b> Diagramme d'œil des trois utilisateurs (L=100 km) .....	61
<b>Figure III. 26 :</b> Amélioration à l'aide d'un amplificateur EDFA et d'une fibre compensatrice ..	62
<b>Figure III. 27 :</b> Courbe de BER en fonction de variation de la longueur de la fibre pour la chaîne améliorée .....	63
<b>Figure III. 28:</b> Diagramme d'œil de premier utilisateurs (L=100 km) après amélioration .....	64
<b>Figure III. 29 :</b> Diagramme d'œil du deuxième utilisateur (L=100 km) après amélioration .....	65
<b>Figure III. 30 :</b> Diagramme d'œil du troisième utilisateur (L=100 km) après amélioration .....	65

## Liste des tableaux

---

---

<b>Tableau I. 1:</b> Comparaison entre fibre monomode et multimode.....	7
<b>Tableau I. 2:</b> Comparaison entre les différentes techniques d'accès multiple.....	19
<b>Tableau III. 1:</b> Paramètre de simulation des composants d'émission.....	49
<b>Tableau III. 2:</b> Paramètre du canal de transmission.....	49
<b>Tableau III. 3:</b> Paramètre de simulation des composants de réception.....	50
<b>Tableau III. 4:</b> Les mesures du taux d'erreur binaire BER.....	51
<b>Tableau III. 5:</b> Évolution du BER par rapport la bande passante.....	54
<b>Tableau III. 6:</b> Évolution du BER par rapport le débit binaire.....	56
<b>Tableau III. 7:</b> Évolution du BER par rapport la puissance optique.....	57
<b>Tableau III. 8:</b> Evaluation de BER des trois utilisateurs.....	59
<b>Tableau III. 9:</b> Évolution du BER par rapport la longueur de la fibre optique.....	60
<b>Tableau III. 10:</b> Évolution du BER de la chaine améliorée.....	63

## Liste des acronymes

---

---

### A

**AWG:** Arrayed Waveguide Gratings.

---

### B

**BER:** Bit Error Rate.

**BPON:** Broadband Passive Optical Network.

---

### C

**CDMA :** Code Division Multiple Access.

---

### D

**DCF:** Dispersion Compensating Fiber.

**DGD:** Differential Group Delay.

**DL:** Diode Laser.

**DS:** Direct Sequence.

**DS-SS:** Direct Sequence Spread Spectrum.

---

### E

**EDFA:** Erbium Doped Fiber Amplifier.

---

### F

**FBG:** Fiber Bragg Grating.

**FH-SS:** Frequency Hopping Spread Spectrum.

**FODL:** Fiber Optical Delay Line.

**FSO:** Free Space Optics.

---

### G

**GPON:** Gigabit Passive Optical Network.

---

### L

**LAN:** Local Area Network.

**LASER:** Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

---

### M

**MMF :** Multi Mode Fiber.

---

### N

**NRZ:** Non-Return-to-Zero.

---

### O

**OCDMA:** Optical Code Division Multiple Access.

**OTDMA:** Optical Time Division Multiple Access.

---

### P

**PMD:** Polarization Mode Dispersion.

**PRBS:** Pseudo-Random Bit Sequence Generator.

---

### S

**SAC-OCDMA:** Spectral Amplitude Coding OCDMA.

**SMF:** Single Mode Fiber.

**SPE-OCDMA:** Spectral Phase Encoding OCDMA.

**SOA:** Semi-conductor Optical Amplifier

---

## **T**

**TDMA:** Time Division Multiple Access.

**TH-SS:** Time Hopping Spread Spectrum.

---

## **U**

**UFBG:** Uniform Fiber Bragg Grating.

---

## **W**

**WAN:** Wide Area Network.

**WDM :** Wavelength Division Multiplexing.

---

# Introduction générale

---

Les réseaux d'accès actuels sont essentiels pour la connectivité mondiale, permettant aux utilisateurs d'accéder à une multitude de services et d'applications à haut débit. Grâce à une évolution technologique continue, ces réseaux se développent afin de répondre aux exigences croissantes en termes de connectivité, offrant des débits plus élevés, une latence réduite et une expérience utilisateur améliorée. Ils exploitent des technologies optiques, telles que les fibres optiques, pour garantir une connectivité haut débit à large bande passante. Comparés aux technologies filaires traditionnelles, les réseaux d'accès optiques offrent des débits plus rapides, une meilleure stabilité de la connexion et des distances de transmission plus étendues. Ces réseaux tirent parti de diverses techniques, telles que la division de fréquence, la division de code et la division dans le temps, pour permettre à plusieurs utilisateurs de partager efficacement les ressources du réseau.

BPON (Broadband Passive Optical Network) et le GPON (Gigabit Passive Optical Network) sont des technologies de réseaux d'accès optique qui utilisent la technique TDMA (Time Division Multiple Access) pour permettre à plusieurs utilisateurs de partager la même infrastructure optique, en divisant la bande passante en intervalles de temps dédiés. Or cette technique est vulnérable aux attaques des réseaux car elle utilise le multiplexage de puissance optique. L'idée de ce projet de fin d'étude est de déployer la technique OCDMA (Optical Code Division Multiple Access) pour remédier aux problèmes de sécurité associés à la technique TDMA. En effet, elle attribue un code distinct à chaque utilisateur, ce qui permet de protéger les données transmises.

Ce manuscrit est structuré comme suit :

Dans le chapitre I, nous allons introduire par une généralité concernant la chaîne optique, en abordant les différents éléments qui la composent : le canal de transmission et ses caractéristiques, le bloc d'émission et les techniques de modulation utilisées, ainsi que le bloc de réception et les composants optoélectroniques associées. Ensuite, nous présenter brièvement les principes des différentes techniques d'accès multiple utilisées dans les systèmes de communication optique. Enfin, nous mettrons en évidence les avantages et les applications d'une liaison optique.

Dans le chapitre II, notre attention sera portée sur la technique d'accès multiple OCDMA, en examinant en détail son principe, les différentes approches et techniques d'encodage et de détection utilisées. Nous aborderons également le codeur et décodeur spécifique utilisé dans cette technique. Enfin, nous mettrons en évidence les avantages et les applications de cette technique.

Dans le chapitre III, notre étude se focalise sur la simulation d'un système SAC-OCDMA basé sur une fibre à réseau de Bragg à l'aide d'OptiSystem. L'objectif principal est d'évaluer les performances du système en faisant varier plusieurs paramètres, tels que la bande passante, le débit binaire, la puissance optique, le nombre d'utilisateurs et la longueur de la fibre optique. Cette analyse approfondie permettra d'évaluer les performances du système en termes de taux d'erreurs binaires et de diagrammes de l'œil.

Enfin, nous finalisons notre travail par une conclusion générale.

**CHAPITRE I**  
**GENERALITES SUR LA**  
**CHAINE DE**  
**TRANSMISSION OPTIQUE**

---

---

## I.1. Introduction

Au début des années 1980, la fibre optique est devenue une technologie de communication essentielle pour les réseaux de télécommunications à longue distance, offrant une bande passante plus élevée et une qualité de signal supérieure à celle des câbles coaxiaux et des lignes téléphoniques en cuivre. Au fil des décennies, la technologie de la fibre optique a connu des avancées significatives, notamment en matière de fabrication de fibres plus minces et plus résistantes, ainsi que de développement de nouveaux types de fibres pour répondre aux besoins spécifiques des applications de communication. Aujourd'hui, La technologie continue de se développer rapidement et le monde vise à utiliser des liaisons optiques pour augmenter le débit de transmission des données.

### I.1. Présentation d'une chaîne de transmission par fibre optique

Une liaison optique est une connexion de communication qui utilise la technologie de la fibre optique pour transmettre des signaux de lumière. Les liaisons optiques peuvent être utilisées pour transmettre des signaux numériques ou analogiques source à un point destination sur de longues distances à travers des câbles de fibres optiques. Pour transmettre l'information, le signal électrique initial est converti en signal optique à l'aide d'un émetteur, puis est transmis à travers une fibre optique. À la réception, le signal optique est converti en signal électrique via un récepteur, ce qui permet de récupérer l'information transmise.

### I.2. Structure générale d'une chaîne de transmission optique

La structure de la communication optique est composée d'un ensemble des éléments dans un système de communication optique.

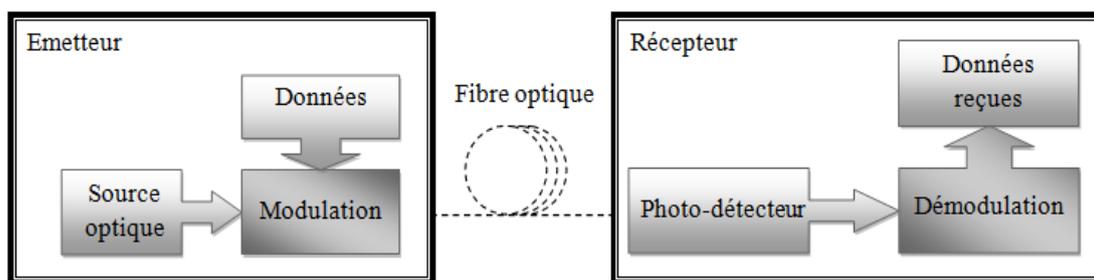


Figure I. 1: Schéma d'une chaîne de transmission optique

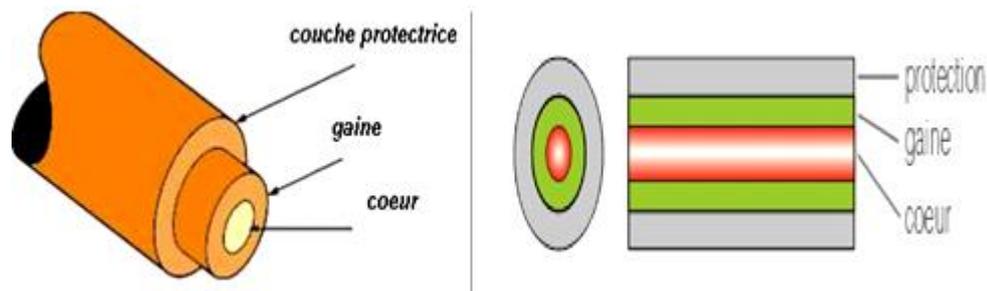
### I.3. Fibre optique

La fibre optique est une technologie de communication qui utilise des fils de verre ou de plastique très fins pour transmettre des signaux de lumière sur de longues distances, ces fils sont constitués de : [1]

**Cœur** : une zone centrale transparente de quelques micromètres, parcourue la lumière émise par une diode électroluminescente ou une source laser.

**Gaine** : une zone qui enveloppe le cœur avec indice de réfraction plus faible qui garantit que le signal lumineux reste dans la fibre.

**Revêtements de protection** : Assure une protection mécanique de la fibre optique contre les parasites, elle est de l'ordre de 230µm.



**Figure I. 2:** Structure de la Fibre Optique

La fibre optique offre une bande passante élevée, une meilleure qualité de signal et une meilleure résistance aux interférences électromagnétiques, ce qui en fait une technologie privilégiée pour les réseaux de télécommunications à longue distance et les réseaux de données à haut débit. Son utilisation permet de répondre aux besoins croissants de transmission de données numériques ou analogiques de manière efficace et fiable.

### **I.3.1 Types de fibre optique**

Il existe différents types de fibres optiques, adaptés à diverses applications et besoins spécifiques. Les deux principaux types de fibres optiques sont la fibre monomode (SMF – Single Mode Fiber) et la fibre multimode (MMF – Multi Mode Fiber).

#### **I.3.1.1 Fibre optique monomode (SMF)**

La fibre monomode se compose d'un très petit noyau à un diamètre de cœur minuscule (5 à 10 microns) et le diamètre extérieur de la gaine est de 125 µm. Elle ne permet la transmission que d'un seul mode de lumière ce qui la rend idéale pour les longues distances sans atténuation ou perte de signal significative. Mais elle est plus coûteuse. La fibre monomode offre une bande passante plus élevée et une qualité de transmission plus élevée, elle est utilisée dans les réseaux à haute vitesse et les réseaux grandes distances (WAN – Wide Area Network). [2]

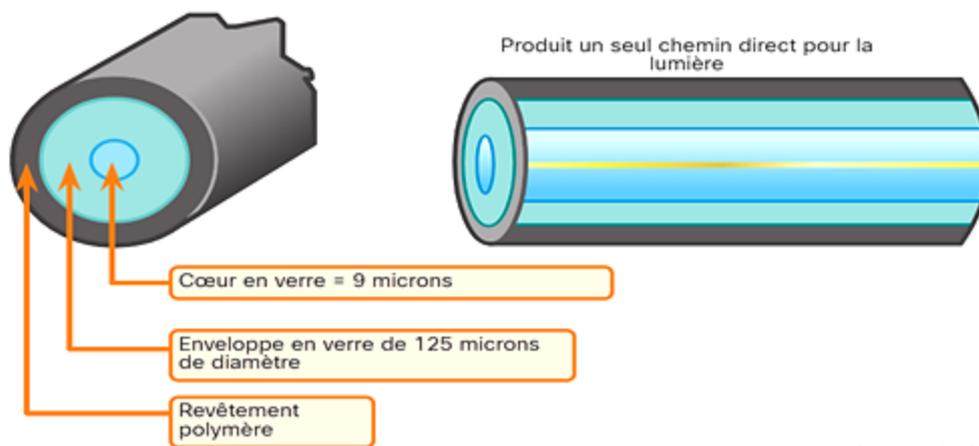


Figure I. 3: La fibre optique monomode

### I.3.1.2 Fibre optique multimodes (MMF)

La fibre multimode se compose d'un noyau plus important à diamètre du cœur est plus grand (50-63 microns) et sa gaine externe est de 125  $\mu\text{m}$ . Elle permet à plusieurs modes de lumière de passer à travers la fibre, les signaux peuvent être transmis sur des distances plus courtes avant d'être affaiblis ou dégradés. La fibre multimode est moins coûteuse que la fibre monomode et peut être utilisée pour les réseaux locaux (LAN – Local Area Network) et les connexions de courte distance.

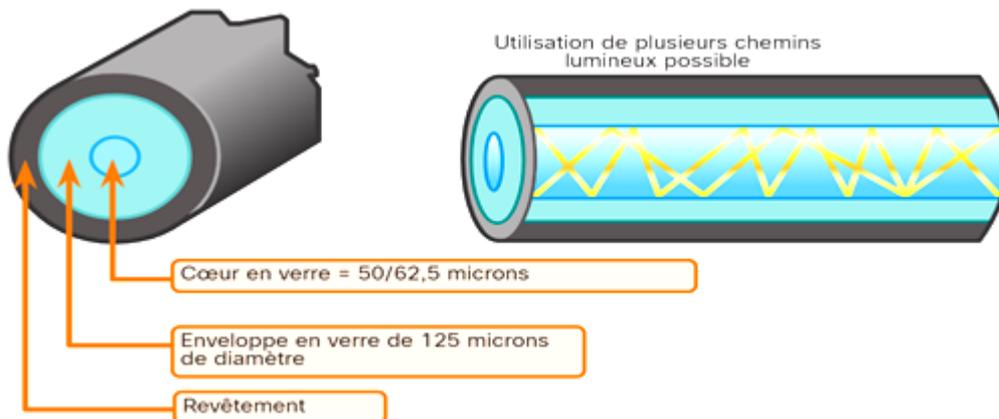


Figure I. 4: La fibre optique Multimodes

### I.3.2. Différence entre fibre monomode et fibre Multimodes

La principale distinction entre la fibre monomode et la fibre multimode réside dans leur capacité à transporter différents modes de lumière. La fibre monomode est conçue pour transporter un seul mode de lumière, tandis que la fibre multimode est capable de transporter plusieurs modes simultanément. En conséquence, la fibre monomode offre une meilleure qualité de transmission et une bande passante plus élevée par rapport à la fibre multimode. Cependant, il convient de noter

que la fibre monomode est généralement plus coûteuse que la fibre multimode et peut ne pas être aussi adaptée pour les distances courtes où la fibre multimode peut être plus appropriée.

<b>Fibre</b>	<b>Monomode</b>	<b>Multimodes</b>
<b>Dispersion</b>	Faible	Forte
<b>Connexion</b>	Délicate	Facile
<b>Atténuation</b>	Très faible 0.2 dB/km	Faible 0.4 dB/km
<b>Utilisation</b>	Haut débit/ longue distance	Réseau Local
<b>Distance</b>	Très longues	Courte
<b>Débit</b>	Très haut débit	Haut débit
<b>Coût</b>	Cher	Moins cher

**Tableau I. 1:** Comparaison entre fibre monomode et multimode

Dans notre travail, nous avons choisi de nous limiter à l'étude la fibre optique monomode, car elle est considérée comme la meilleure option pour les transmissions à longue distance et les réseaux à haute bande passante. Nous excluons donc d'autres types de fibres optiques de notre analyse, car ils ne sont pas pertinents pour notre objectif de recherche.

## **I.4. Caractéristiques de la fibre monomodale**

Les principales caractéristiques sont sa dimension, sa bande passante, sa perte d'atténuation, ses effets linéaires et non linéaire. [3]

### **I.4.1. Dimension**

La fibre optique monomode présente un diamètre de cœur plus petit, typiquement de l'ordre de quelques micromètres ( $\mu\text{m}$ ), ce qui lui permet de guider un seul mode de propagation de la lumière. Le diamètre de la gaine qui entoure le cœur peut varier, mais il est généralement d'environ 125  $\mu\text{m}$ . Cependant, les dimensions exactes peuvent varier en fonction des spécifications et des normes de fabrication spécifiques à chaque fournisseur de fibre optique.

### **I.4.2. Bande passante**

La bande passante mesure la capacité d'un système à transmettre des signaux sur une gamme de fréquences spécifique, elle est exprimée en hertz (Hz) et représente la différence entre la

fréquence la plus élevée et la fréquence la plus basse qui peuvent être transmises sans perte significative de qualité ou d'efficacité. Une bande passante plus large permet de transmettre plus de données ou d'informations dans un laps de temps donné, elle peut être approximée par la formule suivante :

$$BW = \frac{1}{2 \times D_{tot}} \quad (I.1)$$

Avec :

- **BW** : Bande passante de la fibre optique en hertz (Hz).
- **D<sub>tot</sub>** : Coefficient de dispersion totale de la fibre

### I.4.3. Effets linéaires

Les effets linéaires se réfèrent aux perturbations qui se produisent de manière linéaire sur le signal optique lors de sa transmission à travers la fibre optique. Ces effets sont généralement causés par des phénomènes physiques qu'ils sont :

#### I.4.3.1 Pertes d'atténuation

Les pertes d'atténuation font référence à la diminution de l'intensité du signal optique lorsqu'il se propage à travers la fibre optique. Elle est mesurée en décibels par unité de distance (dB/km) et détermine la distance maximale sur laquelle le signal optique peut être transmis sans nécessiter de régénération ou d'amplification.

- a) **Perte intrinsèque** fait référence aux pertes inhérentes à la fibre optique elle-même, indépendamment de toute connexion ou composant externe. Elle est principalement causée par l'absorption et la diffusion de la lumière à l'intérieur de la fibre. On peut estimer la perte intrinsèque d'une fibre optique donnée en connaissant son coefficient d'atténuation et sa longueur par la formule suivante :

$$P = \alpha \times L \quad (I.2)$$

Avec :

- **P** : Perte intrinsèque en décibels (dB).
  - **$\alpha$**  : Coefficient d'atténuation de la fibre optique en décibels par unité de distance (dB/km).
  - **L** : Longueur de la fibre optique en kilomètres (km).
- b) **Perte extrinsèque** est causée par des éléments externes au matériau de la fibre lui-même. Elle est associée à des pertes induites par des composants utilisés dans le système optique,

ainsi que des techniques d'installation et des conditions environnementales. On peut estimer la perte extrinsèque par la formule suivante :

$$P = \sum P_i \quad (I.3)$$

Avec :

- **P** : Perte extrinsèque totale en décibels (dB).
- **P<sub>i</sub>** : Les différentes pertes extrinsèques individuelles en décibels (dB).

**c) Perte de courbure** est une forme de perte extrinsèque dans une fibre optique qui se produit lorsque la fibre est courbée avec un rayon de courbure trop petit, une partie de la lumière se propageant à travers la fibre peut s'échapper, entraînant une diminution du signal optique. La formule pour calculer la perte de courbure est donnée par :

$$P_c = \left( \frac{\alpha}{2} \right) \times \left( \frac{1}{R} \right) \quad (I.4)$$

Avec :

- **P<sub>c</sub>** : Perte de courbure en décibels (dB).
- **α** : Coefficient d'atténuation de la fibre optique en (dB/m).
- **R** : Rayon de courbure de la fibre en mètres (m).

**d) Perte de raccordement** est une forme de perte extrinsèque qui se produit lorsqu'une fibre optique est connectée à une autre fibre, à un composant optique ou à un connecteur. Lors de la connexion, une partie de la lumière se propageant à travers la fibre peut être perdue en raison de différents facteurs tels que l'alignement imparfait des fibres, les imperfections de surface, les défauts de fabrication ou les défaillances du connecteur. Pour calculer la perte de raccordement (LR), on a la formule suivante :

$$LR = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad (I.5)$$

Avec :

- **LR** : Perte de raccordement en décibels (dB).
- **P<sub>1</sub>** : Puissance optique avant le raccordement en watts (W).
- **P<sub>2</sub>** : Puissance optique après le raccordement en watts (W).

### I.4.3.2 Dispersion chromatique

#### A. Définition

La dispersion chromatique est la variation de la vitesse de propagation des différentes longueurs d'onde de la lumière dans une fibre optique, elle peut provoquer un élargissement des

impulsions lumineuses, ce qui limite la capacité de transmission de données à haut débit sur de longues distances. [4]

## B. Compensation de la dispersion chromatique

Différentes techniques ont été développées pour compenser la dispersion chromatique dans les systèmes de transmission optique. Parmi celles-ci, les plus utilisées sont les fibres à compensation de dispersion (DCF - Dispersion Compensating Fiber). [5]

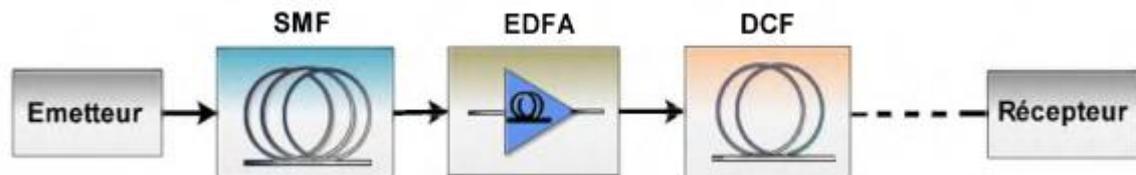


Figure I. 5: Schéma d'une liaison optique avec compensation

Les fibres à compensation de dispersion sont des types de fibres optiques conçues pour compenser la dispersion accumulée dans une liaison optique. Elles sont insérées dans la liaison afin de compenser la dispersion accumulée par d'autres composants. Un module de compensation de dispersion est composé d'une fibre d'une longueur spécifique et d'une dispersion égale mais de signe opposé à celle de la fibre de transmission, permettant ainsi de compenser la dispersion et d'améliorer la qualité du signal optique.

La longueur de la fibre à compensation de dispersion (DCF) nécessaire pour compenser complètement la dispersion chromatique engendrée par une fibre optique monomode (SMF) de longueur  $L_{SMF}$  et de coefficient de dispersion  $D_{SMF}$  est donnée par la relation suivante :

$$L_{DCF} = -L_{SMF} \times \frac{D_{SMF}}{D_{DCF}} \quad (I.6)$$

Avec :

- $L_{SMF}$  : Longueur de la fibre monomode (SMF).
- $L_{DCF}$  : Longueur de la fibre compensatrice (DCF).
- $D_{SMF}$  : Coefficient de dispersion de la fibre (SMF).
- $D_{DCF}$  : Coefficient de dispersion de la fibre (DCF).

### I.4.3.3 Dispersion modale de polarisation

La dispersion modale de polarisation (PMD - Polarization Mode Dispersion) est un phénomène qui provoque une variation de la polarisation de la lumière due à des imperfections dans la fibre optique. En raison de ces imperfections, les modes de polarisation de la lumière se

propagent à des vitesses légèrement différentes, ce qui peut entraîner un étalement temporel des impulsions lumineuses, une variation de la polarisation du signal optique, une distorsion du signal optique et limiter la capacité de transmission de données à haut débit sur de longues distances. PMD est souvent caractérisée par le paramètre de dispersion différentielle de groupe (DGD – Differential Group Delay), qui représente la différence de temps entre les modes de polarisation orthogonaux qui se propagent dans la fibre optique. La formule générale pour calculer la PMD d'une fibre est la suivante : [6]

$$PMD = \sqrt{(DGD^2/L)} \quad (I.7)$$

Avec :

- **L** : Longueur de la fibre optique.
- **DGD** : Paramètre de dispersion différentielle de groupe en picosecondes (ps) sachant que :

$$DGD = \frac{\Delta t}{T} \quad (I.8)$$

Où :

- **$\Delta t$**  : la différence de temps mesurée de propagation entre les modes de polarisation.
- **T** : la période de modulation utilisée lors de la mesure.

#### **I.4.4. Effets non-linéaires**

Les effets non linéaires se réfèrent à des phénomènes qui se produisent dans les fibres optiques lorsque les signaux optiques se propagent à des niveaux de puissance élevés. Ces effets sont dus à des interactions optiques non linéaires entre les photons et les matériaux constituant la fibre optique. Les effets les plus courants dans la fibre optique comprennent :

##### **I.4.4.1 Effet Kerr**

L'effet Kerr est dû Lorsque la puissance optique est élevée, la densité d'énergie élevée du signal peut modifier les propriétés optiques du matériau, provoquant des effets tels que la modulation de phase, la modulation d'amplitude et la génération d'harmoniques.

##### **I.4.4.2 Effet Raman**

L'effet Raman se produit lorsque la lumière dans la fibre interagit avec les vibrations moléculaires du matériau de la fibre. Cette interaction conduit à un transfert d'énergie entre le signal optique et les vibrations moléculaires, ce qui peut entraîner une conversion de fréquence, des décalages spectraux et des pertes de puissance.

### **I.4.4.3 Effet Brillouin**

L'effet Brillouin se produit lorsque le signal optique génère des ondes acoustiques dans la fibre. Ces ondes acoustiques peuvent interagir avec le signal optique, provoquant un décalage de fréquence du signal et des réflexions rétrodiffusées qui peuvent perturber la transmission.

### **I.4.4.4 Effet de mélange de fréquences**

Lorsque deux ou plusieurs signaux optiques de fréquences différentes se propagent dans la fibre, ils peuvent interagir non linéairement et générer de nouvelles fréquences, appelées fréquences harmoniques. Cela peut conduire à des interférences et à une distorsion du signal.

## **I.5. Bloc d'émission optique**

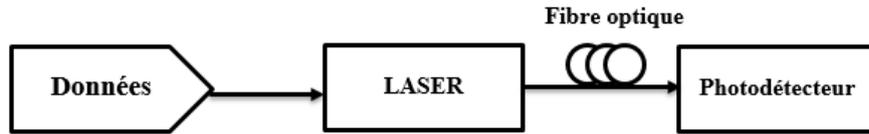
Les sources optiques sont des éléments actifs essentiels dans les systèmes de communication par fibre optique. Il est responsable de la conversion des signaux électriques en signaux optiques pour les transmettre à travers le câble de fibre optique (conversion électro-optique). Dans les communications optiques, l'augmentation des débits de transmission impose l'utilisation de sources à spectre restreint.

### **I.5.1. Modulation optique**

Pour transmettre des informations dans les systèmes optiques numériques, il est nécessaire de les moduler sur le signal optique qui sera transmis dans la fibre. Pour cela, les données électriques doivent être converties en données optiques. Il existe deux principales techniques de modulation : la modulation directe et la modulation externe.

#### **I.5.1.1 Modulation directe**

Dans la modulation directe (Figure I. 6), le signal optique est modulé en ajustant directement les caractéristiques de la source lumineuse elle-même. Cela signifie que la source lumineuse elle-même est activement modulée en fonction du signal d'information. Les sources de lumière couramment utilisées pour la modulation directe sont les diodes laser à semi-conducteurs. Dans ce cas, l'amplitude, la fréquence ou la phase de la lumière émise peut être modulée pour représenter les données à transmettre. La modulation directe est souvent utilisée dans des applications de faible coût ou de courte portée, où des taux de transmission plus bas sont acceptables. [2] La modulation directe s'agit d'un LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).



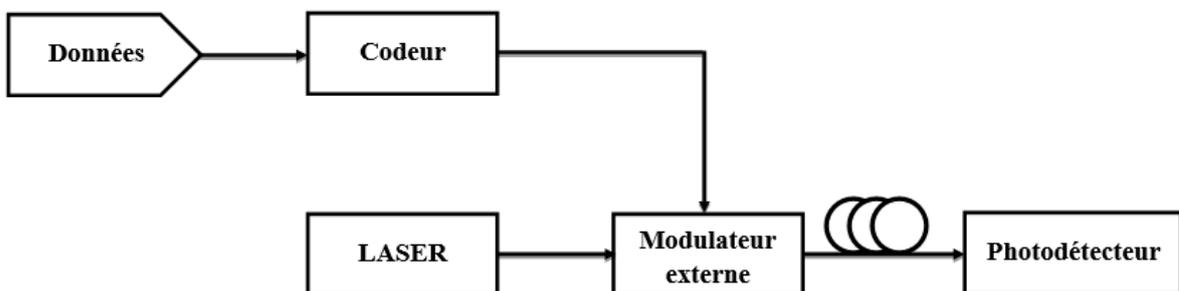
**Figure I. 6:** Schéma synoptique de la modulation directe

Une diode laser (DL) est un type de diode électroluminescente qui produit un faisceau lumineux cohérent et intense en utilisant le phénomène d'émission stimulée. Dans une diode laser, un courant électrique est injecté dans une jonction p-n, provoquant la recombinaison de trous et d'électrons dans cette région. Cette recombinaison stimule les atomes excités à émettre des photons supplémentaires qui sont cohérents en termes de fréquence, de phase et de direction.

### I.5.1.2 Modulation externe

Dans la modulation externe (Figure I. 7), le signal optique est modulé en utilisant un dispositif externe, généralement un modulateur électro-optique. Ce dispositif est généralement basé sur des cristaux non linéaires ou des guides d'ondes optiques. Le signal électrique portant l'information est appliqué au modulateur, qui modifie les propriétés optiques du signal optique porteur en réponse au signal électrique. La modulation externe offre une plus grande flexibilité en termes de taux de transmission et de types de modulation possibles, tels que l'amplitude, la fréquence et la phase. Elle est souvent utilisée dans les systèmes de transmission optique à longue distance ou à haut débit. Elle permet d'obtenir une bande passante plus large et un indice de modulation plus élevé. [2]

Il existe deux types de modulateur externe : le modulateur Mach-Zehnder et le modulateur électro-absorbant.



**Figure I. 7:** schéma synoptique de la modulation externe

### I.5.1.3 Comparaison entre les deux modulations

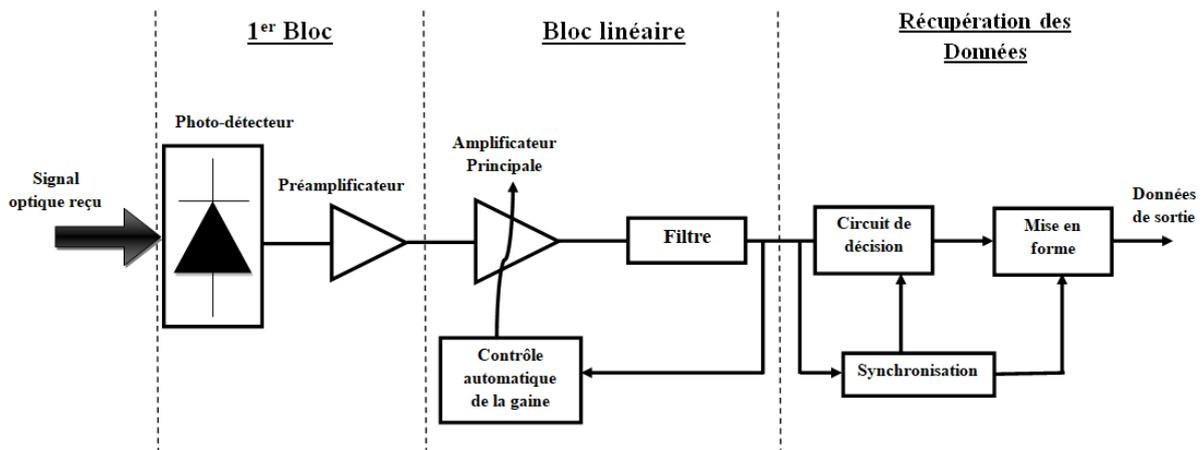
La modulation directe, plus simple et moins coûteuse est très utilisée mais peut être limitée en termes de performance à haut débit, tandis que la modulation externe offre une meilleure stabilité et précision de modulation, mais peut être plus coûteuse. La modulation externe est

indispensable pour maintenir une qualité correcte, elle garantit une plus grande vitesse de transmission, une réduction significative du bruit et une capacité de transmission accrue à des fréquences plus élevées. Bien que le bruit ne soit pas complètement éliminé dans les modulateurs externes, il est beaucoup moins important que dans les lasers. donc le choix entre les deux dépendent des exigences spécifiques de la transmission optique, telles que le débit, la distance, la qualité du signal et le budget disponible. [7]

Dans nos travaux de simulation, nous étudions uniquement la modulation externe.

## I.6. Bloc de réception optique

La photodéteceuse est responsable de la conversion des signaux optiques en signaux électriques, qui peut ensuite être traité par des dispositifs électroniques. La photodiode PIN est la photo-déteceuse la plus couramment utilisée dans les systèmes de transmission à fibre optique (Figure I. 8). [8]



**Figure I. 8:** schéma synoptique d'un bloc de réception optique

Le premier bloc comprend un photodétecteur qui transforme la lumière optique en un courant électrique. Éventuellement accompagné d'un préamplificateur. Le rôle de ce dernier est d'amplifier le photo-courant, afin de compenser la faible sensibilité du composant ou du signal optique reçu.

Le deuxième bloc est appelé bloc linéaire, il est composé d'un amplificateur électrique à gain élevé qui amplifie le courant électrique généré par la photodiode pour produire un signal électrique fort et fiable et d'un filtre est utilisé pour éliminer les signaux indésirables et les interférences qui peuvent affecter la qualité de la transmission optique.

Le troisième bloc est appelé bloc de récupération des données, correspond au dernier étage du récepteur. Il est constitué d'un circuit de décision qu'échantillonne la tension électrique puis compare l'échantillon au seuil de décision pour décider que la donnée émise était un 0 (échantillon

inférieur au seuil) ou un 1 (échantillon supérieur au seuil) et un circuit de récupération de rythme connu sous le nom de circuit de synchronisation.

Le bloc de réception optique doit fournir un signal électrique fort et précis en réponse aux signaux optiques reçus. Il est important de noter que la qualité de la réception optique dépend également de la qualité du câble de fibre optique, des connecteurs et de l'ensemble de la liaison optique.

## **I.7. Amplificateurs optiques**

Dans les liaisons de communication optique, les pertes par épissures et les pertes d'insertion causées par les différents composants de la liaison entraînent une atténuation du signal émis par le transmetteur. Afin d'éviter que l'information transmise ne soit noyée dans le bruit, il est important d'avoir une puissance suffisamment élevée au récepteur. L'amplification optique est une solution idéale pour remédier à ce problème. Grâce aux amplificateurs optiques, il est maintenant possible de transmettre le signal optique sur de longues distances sans nécessiter de régénération électronique.

Le principe de base des amplificateurs optiques repose sur l'émission stimulée. Lorsqu'un signal passe à travers un amplificateur, il est amplifié grâce à un apport externe d'énergie appelé pompage, qui crée une inversion de population. Cette inversion de population, réalisée à l'aide de photons ou d'électrons, conduit à l'émission stimulée, amplifiant ainsi le signal. Il existe plusieurs types d'amplificateurs optiques utilisés dans les liens de communication optique, tels que les amplificateurs à semi-conducteurs, les amplificateurs Raman et les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA). [9]

### I.7.1. Amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (EDFA)

Dans un amplificateur à fibre dopée à l'Erbium, sont des dispositifs optiques qui utilisent une fibre optique spécialement dopée avec de l'erbium pour amplifier les signaux optiques, le milieu amplificateur est constitué du cœur d'une fibre optique monomode dopée avec des ions de terre rare. [10]

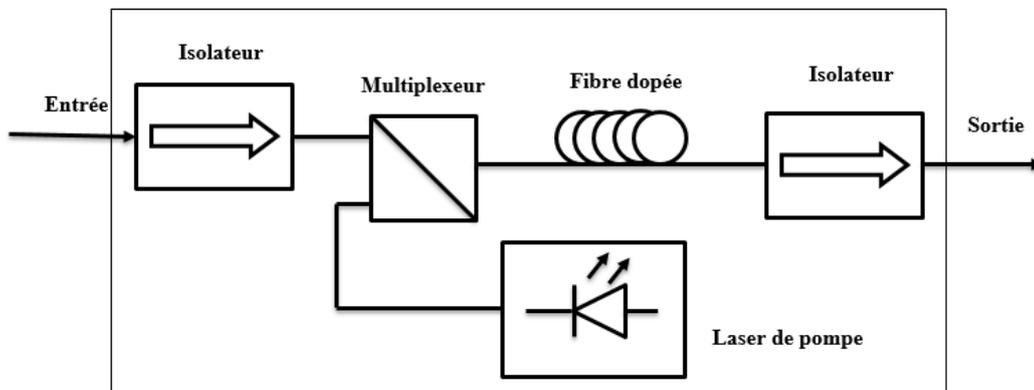


Figure I. 9: Schéma d'un amplificateur à fibre dopée à l'Erbium

Pour rendre la fibre apte à l'amplification, un processus de dopage est réalisé en introduisant de l'erbium dans la fibre optique. Lorsque le signal optique à amplifier et le flux de pompe se propagent à travers la fibre dopée à l'erbium, les atomes d'erbium excités par l'énergie du signal absorbent les photons ayant la même longueur d'onde que le signal, cette absorption permet aux atomes d'erbium de passer à un état d'énergie plus élevé. Les atomes d'erbium excités peuvent ensuite être stimulés par l'émission stimulée à émettre des photons identiques à ceux du signal optique d'entrée.

Le processus d'amplification dans les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium est un processus optique sans conversion électro-optique, ce qui permet une amplification directe des signaux optiques sans conversion en signaux électriques intermédiaires, offrant ainsi une amplification plus efficace et rapide.

Afin de minimiser les réflexions et d'empêcher la contre-propagation du bruit généré à l'intérieur de l'amplificateur par émission spontanée, des isolateurs sont installés à l'entrée et à la sortie de l'amplificateur (Figure I.9). Ces isolateurs permettent de garantir une propagation unidirectionnelle du signal et d'améliorer la performance globale de l'amplificateur.

### I.7.2. Amplificateurs à semi-conducteurs

Un amplificateur à semi-conducteurs optique (SOA – Semi-conductor Optical Amplifier) est spécifiquement conçu pour amplifier les signaux optiques. Il utilise des semi-conducteurs dopés pour obtenir une amplification optique. Lorsqu'un signal optique est injecté dans le SOA, il est

amplifié par le processus d'émission stimulée, où les photons incidents stimulent la libération de photons supplémentaires, augmentant ainsi l'intensité du signal optique. Ils sont couramment utilisés dans les réseaux de communication optique pour compenser les pertes de signal sur de longues distances, augmenter la portée des signaux optiques et améliorer la qualité du signal.

### **I.7.3. Amplificateurs à Raman**

Les amplificateurs à Raman sont des dispositifs optiques utilisés pour amplifier les signaux optiques dans les systèmes de communication optique. Ils tirent leur nom de l'effet Raman, un phénomène de diffusion inélastique de la lumière. Son principe de fonctionnement repose sur la diffusion Raman stimulée, où les photons incidents interagissent avec les molécules du matériau amplificateur, provoquant une redistribution de l'énergie optique et amplifiant ainsi le signal. Cette amplification se produit dans la bande de fréquence Raman spécifique du matériau utilisé, généralement de l'ordre de quelques Téra hertz. Cependant, les amplificateurs à Raman nécessitent une puissance optique suffisante pour assurer une amplification efficace, ce qui peut nécessiter l'utilisation de sources laser puissantes. De plus, ils peuvent présenter une sensibilité aux fluctuations de puissance et de température, nécessitant des techniques de contrôle et de stabilisation appropriées.

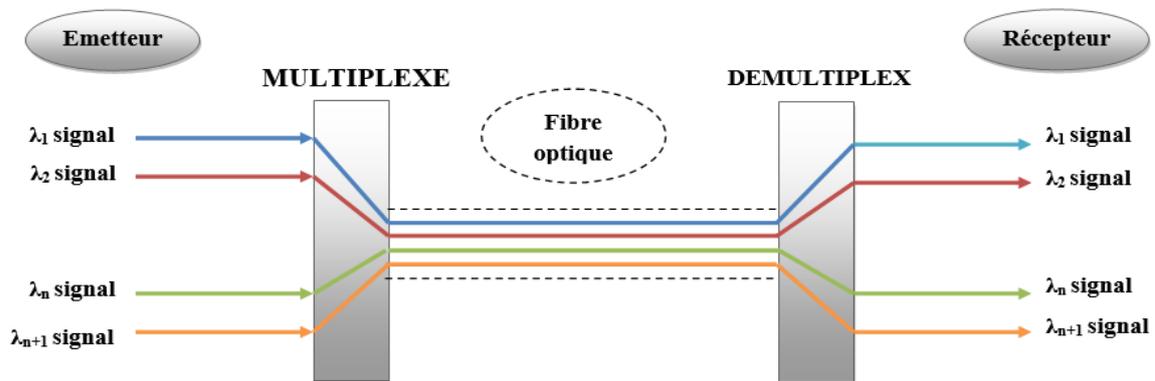
## **I.8. Accès Multiple optiques**

L'accès multiple dans les liaisons optiques est une technique qui permet de transmettre plusieurs signaux sur une seule fibre optique en les combinant et en les séparant à l'aide de différentes méthodes de multiplexage. Ces techniques permettent d'augmenter la capacité de transmission des réseaux de communication optiques, en permettant la transmission de plusieurs signaux simultanément. Il existe différentes techniques d'accès multiple optique, notamment l'Accès Multiple en longueur d'onde (WDM - Wavelength Division Multiplexing), l'Accès Multiple en temps (OTDMA – Optical Time Division Multiple Access) et l'Accès Multiple en code (OCDMA – Optical Code Division Multiple Access), chacune de ces techniques utilise des principes différents pour multiplexer les signaux optiques.

### **I.8.1. Accès multiples par répartition en longueur d'onde (WDM)**

L'accès multiples par répartition en longueur d'onde, appelé aussi Wavelength Division Multiple (WDM) constitue l'équivalent des systèmes de multiplexage par répartition de fréquence FDMA dans le domaine radiofréquence. Cette technique permet de transmettre plusieurs signaux sur une seule fibre optique en utilisant des longueurs d'onde de lumière différentes pour chaque

canal de données, en utilisant un multiplexeur à l'entrée pour mélanger les signaux et un démultiplexeur à la sortie pour les séparer (Figure I.10). [11]

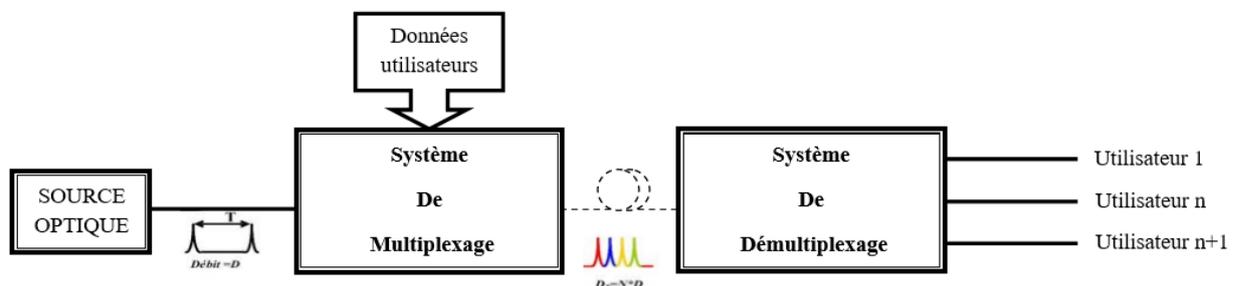


**Figure I. 10:** Schéma d'un accès multiple en longueur d'onde WDM

Les dispositifs MUX/DEMUX sont passifs et fonctionnent comme des filtres de longueur d'onde lumineuse qui permettent uniquement à des longueurs d'onde spécifiques de lumière de passer à travers le filtre vers un port de fibre et le reste des longueurs d'onde d'être réfléchi vers un autre port de fibre.

### I.8.2. Accès multiple par répartition temporelle en optique (OTDMA)

L'Accès multiple par répartition temporelle en optique (OTDMA) appelé aussi Optical Time Division Multiple Access (OTDMA) consiste à diviser le temps disponible sur une fibre optique en intervalles courts. Chaque intervalle est alloué à un signal différent, permettant ainsi de transmettre plusieurs signaux sur une même fibre optique. Lorsqu'un utilisateur a des données à envoyer, il utilise son intervalle de temps alloué pour transmettre les données. Les autres utilisateurs doivent attendre que leur intervalle de temps alloué soit disponible pour envoyer leurs données. [12]



**Figure I. 11:** Chaîne de Transmission en OTDMA

Un multiplexeur (MUX) est de combiner plusieurs flux binaires à débit supérieur en un seul flux en bande de base, tandis que le démultiplexeur (DEMUX) accomplit le travail inverse en

séparant les bits du flux en bande de base pour reconstruire plusieurs répliques de flux binaires à débit binaire inférieur.

### I.8.3. Accès multiple par répartition de code optique (OCDMA)

L'Accès Multiple par Répartition de Codes optiques, aussi connu sous le nom d'Optical Code Division Multiple Access (OCDMA) est une technique d'accès multiple utilisée dans les réseaux optiques pour permettre à plusieurs utilisateurs de partager une même fibre optique. Elle repose sur l'utilisation de codes d'étalement de spectre uniques pour chaque utilisateur, générés à partir d'une famille de données. En utilisant ces codes, le signal est réparti sur une bande passante très large, ce qui le rend invisible pour les autres utilisateurs partageant la même bande passante. Cette technique offre un accès multiple, un partage de ressources flexible et reconfigurable, ainsi qu'une sécurité accrue (Figure I.12).

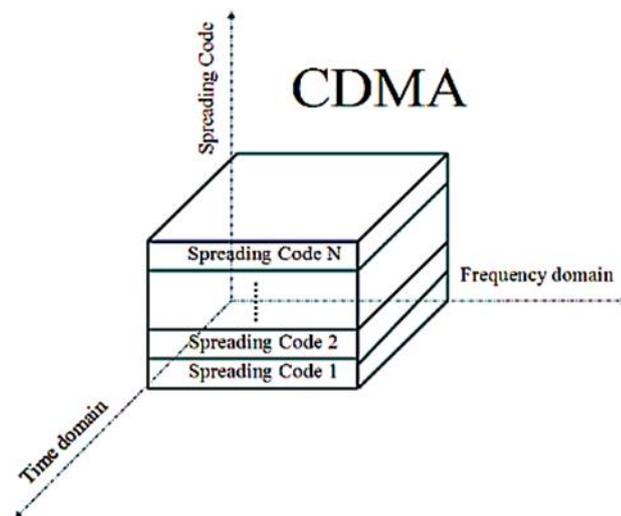


Figure I. 12: Technique d'Accès Multiple CDMA

### I.9. Comparaison entre les trois techniques d'accès multiple optique

La technique	WDM	OTDMA	OCDMA
<b>Bande passante</b>	Très importante	Importante	Importante
<b>Sécurité</b>	Données protégés	Données non protégé	Données protégés
<b>Mise en œuvre</b>	Très ouvreaux	Non ouvreaux	Peu ouvreaux
<b>Synchronisation</b>	Ne présente pas d'interférences	Présente des interférences	Ne présente pas d'interférences

Tableau I. 2: Comparaison entre les différentes techniques d'accès multiple

Le WDM s'avère la technique la plus performante en termes de bande passante, de sécurité et de synchronisation. Or, il présente un coût de déploiement très élevé, ce qui en fait une option moins accessible pour les réseaux d'accès. Cependant, l'OCDMA présente également des avantages intéressants pour ces réseaux, notamment une sécurité assurée et un coût de mise en œuvre moins élevé, il peut être une option plus économique à long terme en raison de sa capacité à fournir une communication sécurisée.

Dans le deuxième chapitre, nous allons détailler la technique d'accès multiple optique OCDMA.

## **I.10. Avantage d'une liaison optique**

Les liaisons optiques présentent de nombreux avantages par rapport aux autres moyens de transmission de données :

- Les signaux optiques peuvent transporter une quantité considérable d'informations en raison de leur large bande passante. Cela permet des débits de données élevés et une transmission rapide des informations.
- Les fibres optiques présentent une atténuation beaucoup plus faible que les câbles en cuivre, ce qui signifie que les signaux optiques peuvent être transmis sur de plus longues distances sans perte significative de puissance ou de qualité du signal.
- Immunité aux interférences électromagnétiques, contrairement aux signaux électriques, les signaux optiques ne sont pas sensibles aux interférences électromagnétiques. Cela permet une transmission plus fiable et stable, même dans des environnements électromagnétiquement bruyants.
- Les signaux optiques ne se propagent pas facilement à travers les matériaux non transparents, ce qui rend les liaisons optiques plus sécurisées contre les tentatives d'interception et de piratage.
- Les fibres optiques sont beaucoup plus légères et plus fines que les câbles en cuivre, ce qui facilite leur installation et leur gestion. De plus, elles peuvent transporter un grand nombre de signaux sur une seule fibre, ce qui réduit considérablement le nombre de câbles nécessaires dans une infrastructure de communication.
- Les fibres optiques sont moins sujettes à la dégradation due aux facteurs environnementaux tels que l'humidité, les températures extrêmes et les perturbations électromagnétiques. Elles offrent donc une durée de vie plus longue et une fiabilité accrue.

- Les émetteurs et récepteurs optiques consomment très peu d'énergie par rapport aux alternatives électriques, ce qui en fait une option plus respectueuse de l'environnement et plus économique à long terme.
- Les fibres optiques peuvent être installées sans risque dans les atmosphères inflammables parce qu'il est fabriqué à partir de la silice qu'est un matériau diélectrique parfait, lui confère une grande isolation électrique. Le contact accidentel entre deux fibres ne provoque pas de court-circuit contrairement à ce qui se produit avec des câbles électriques donc il n'y a pas de risque d'étincelle.

Ces avantages en font un choix privilégié pour les systèmes de communication nécessitant une transmission rapide, fiable et sécurisée des données.

### **I.11. Inconvénients d'une liaison optique**

Bien que les liaisons optiques présentent de nombreux avantages, elles présentent également quelques inconvénients :

- Les composants optiques et les câbles de fibre optique sont plus coûteux que les composants électriques équivalents.
- Les câbles de fibre optique sont plus fragiles qui peut se briser ou se plier si on les manipule mal par rapport les câbles électriques.
- Les systèmes optiques sont souvent plus complexes que les systèmes électriques équivalents, ce qui peut nécessiter une expertise spécialisée pour la conception, l'installation et la maintenance.

### **I.12. Application des liaisons optiques**

Les liaisons optiques offrent une large gamme d'application, notamment :

- Les liaisons optiques sont largement utilisées dans les réseaux de télécommunications pour transmettre des signaux vocaux, des données et des vidéos à haut débit sur de longues distances. Les câbles à fibres optiques permettent des communications rapides, fiables et à large bande passante entre les centres de données, les fournisseurs de services Internet, les entreprises et les foyers.
- Les liaisons optiques sont utilisées dans les réseaux informatiques pour relier les commutateurs, les routeurs et les serveurs. Les câbles à fibres optiques offrent une transmission à haut débit et à faible latence, ce qui permet un transfert rapide et fiable des données, en particulier dans les environnements exigeant une bande passante élevée, tels que les centres de données et les infrastructures cloud.

- Les liaisons optiques sont utilisées dans les systèmes de surveillance et de sécurité, il est possible de bénéficier d'une transmission rapide, fiable et sécurisée des données, d'une immunité aux interférences électromagnétiques et d'une protection contre les tentatives d'interception ou de piratage.
- Les liaisons optiques sont utilisées en médecine et en chirurgie pour la transmission d'images vidéo haute résolution lors d'examens médicaux, de procédures chirurgicales et de télémédecine. Les fibres optiques flexibles et minces permettent une visualisation précise et une transmission en temps réel des images médicales, ce qui facilite les diagnostics et les interventions médicales.
- Les liaisons optiques sont utilisées dans les systèmes de capteurs pour mesurer et détecter différents paramètres physiques tels que la température, la pression, la déformation, la vibration...

### **I.13. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes parties du réseau de télécommunication optique, une description d'une liaison par fibre optique, et nous avons présenté les différents blocs qu'ils sont canal de transmission, émission et réception.

Le bloc d'émission est responsable de la transmission du signal sur la fibre optique en utilisant une source lumineuse qui peut être modulée directement ou de manière externe. La fibre optique agit comme le canal de transmission, permettant au signal de se propager sur de longues distances. De l'autre côté, le bloc de réception joue un rôle essentiel en convertissant le signal lumineux reçu en un signal électrique utilisable à l'aide d'un photodétecteur.

Ensuite, nous avons présenté les composants optiques et optoélectroniques jouent un rôle crucial pour garantir la conversion précise des signaux optiques en signaux électriques, ainsi que pour assurer une transmission stable et fiable des données. Leur utilisation adéquate permet d'atteindre des débits élevés tout en maintenant la qualité du signal sur de longues distances.

Enfin, nous avons vu aussi les différentes techniques d'accès multiple optique (WDM, OTDMA, OCDMA) et nous avons expliqué aussi les avantages d'une liaison optique ainsi que ses domaines d'application. Cette présentation permet de poser les briques de base de ce travail de mémoire et qui va faciliter la lecture du prochain chapitre où nous allons détailler technique d'Accès multiple en code (OCDMA).

# **CHAPITRE II**

## **Techniques d'Accès Multiple**

### **Optique OCDMA**

---

## II.1. Introduction

L'histoire du CDMA optique remonte aux années 1980, lorsque des chercheurs ont commencé à étudier les avantages de cette technologie pour les communications optiques. Les premières démonstrations de CDMA optique ont été réalisées en laboratoire au milieu des années 1990, et depuis lors, cette technologie a continué à être étudiée et développée pour une utilisation pratique. En 1995, Bell Labs a présenté une démonstration réussie d'un système de communication optique à code de division multiple d'accès (CDMA) à grande vitesse. Les chercheurs ont utilisé des impulsions courtes de lumière pour coder et transmettre des données, avec des codes différents attribués à chaque utilisateur pour permettre une communication simultanée.

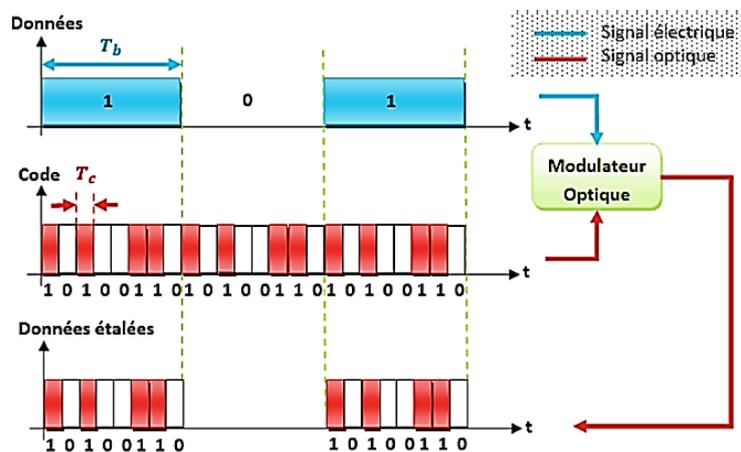
Au fil des ans, des avancées ont été réalisées dans les technologies de fabrication de composants optiques, telles que les réseaux de Bragg, les fibres optiques à dispersion compensée et les amplificateurs optiques à semi-conducteurs, qui ont permis des performances plus élevées et une meilleure fiabilité pour les systèmes de CDMA optiques. Aujourd'hui, le CDMA optique est largement considéré comme une technologie clé pour les réseaux de communication optique à haut débit et à haute capacité mais sa mise en œuvre nécessite encore des recherches et des développements supplémentaires pour surmonter certains des défis actuels et améliorer encore les performances du système.

## II.2. Accès Multiple par répartition de code optique (OCDMA)

Dans l'OCDMA, chaque utilisateur est attribué un code optique spécifique, appelé séquence de codes, qui est utilisé pour moduler ses données sur le signal optique. Les séquences de codes sont conçues de manière à être orthogonales entre elles, ce qui signifie qu'elles présentent une corrélation croisée minimale. Cela permet à plusieurs utilisateurs d'envoyer leurs signaux simultanément sur la même fibre sans interférences mutuelles significatives.

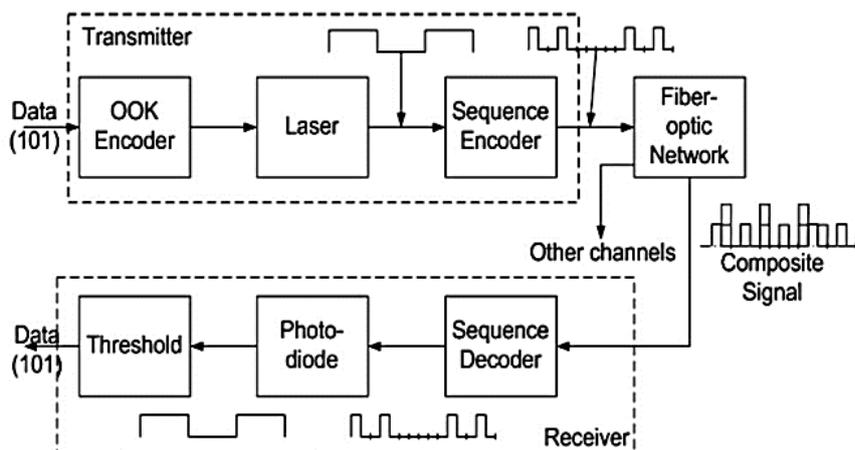
### II.2.1 Principe d'OCDMA

Le concept de la technique d'accès multiple par code en répartition optique (OCDMA) consiste à utiliser un code unique pour chaque utilisateur appelé signature optique. Ce code est constitué d'une séquence binaire de «  $L$  » éléments appelés des chips, ayant une durée «  $T_c$  » très inférieure que celle des données «  $T_b$  » (la figure II.1) . La longueur du code «  $L$  » est déterminée par le nombre total de chips tandis que le poids du code est déterminé par le nombre de chips ayant une amplitude « 1 ».



**Figure II. 1:** Codage des données en OCDMA

Les codes spécifiques attribués à chaque utilisateur en OCDMA sont générés par des sources optiques. Chaque utilisateur dispose d'un codeur qui génère un flux de données codé correspondant, qui est ensuite combiné avec les autres flux de données codées pour former un signal composite transmis dans le support de transmission partagé.



**Figure II. 2:** Architecture d'un émetteur-récepteur

Du côté récepteur, chaque utilisateur dispose d'un décodeur qui tente de régénérer les bits de données de l'utilisateur correspondant parmi tous les bits issus de tous les utilisateurs. Les autres bits reçus, qui ne correspondent pas à l'utilisateur souhaité, sont considérés comme une source d'interférences (MAI). Le signal optique décodé est ensuite converti en un signal électrique à l'aide d'une photodiode. Enfin, un élément de traitement appelé seuil de décision est utilisé pour prendre une décision quant à la valeur du bit reçu, à savoir si c'est un bit de données « 1 » ou « 0 », en fonction de l'intensité du signal optique reçu. Cette décision est prise dans le but de reconstituer une suite de données qui soit aussi proche que possible de celle émise par l'émetteur. [13]

## II.3. Étalement de spectre au CDMA

Les techniques d'étalement de spectre consistent à augmenter la largeur de la bande spectrale d'un signal en utilisant un gain de codage. Cette transformation permet une meilleure détection du signal en réception et autorise la transmission simultanée de signaux d'autres utilisateurs sur la même bande, sous certaines conditions. Cependant, ces signaux d'autres utilisateurs sont considérés comme du bruit et leur présence est désignée par le terme d'interférence multiutilisateur (MAI), le partage de la bande ne se fait pas par la fréquence ni par le temps, mais par un processus de codage. [14]

### II.3.1. Principes d'étalement de spectre

L'étalement de spectre consistant à émettre un signal dont la bande passante est beaucoup plus large que celle du signal utile. Cela est déterminé par la relation de C.E. Shannon, qui exprime la capacité maximale « C » du canal perturbé par un bruit additif gaussien.

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- **C** : Capacité maximale du canal en bit/s, représente le taux de transfert maximum pour un taux d'erreur binaire nul.
- **B** : Bande passante occupée par le signal émis.
- **S** : Puissance du signal émis.
- **N** : Puissance du bruit

Pour assurer une transmission sans erreur d'information, deux options sont possibles : Utiliser une bande passante étroite B avec un rapport signal sur bruit (S/N) élevé, ou bien une bande passante large B avec un faible rapport signal sur bruit (S/N). [15]

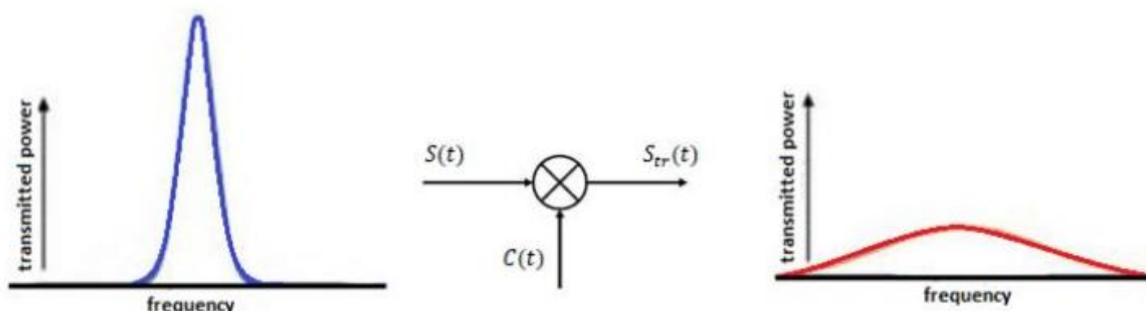


Figure II. 3: Principe d'étalement de spectre

## **II.3.2. Techniques d'étalement de spectre**

Trois techniques d'étalement de spectre sont utilisées pour CDMA :

### **II.3.2.1 Etalement de spectre à séquence direct (DS-SS)**

Une technique repose sur l'utilisation d'une séquence de code (ou chipping) par l'utilisateur pour encoder et décoder les informations transmises. Le signal d'origine est étendu en le multipliant par une séquence binaire pseudo-aléatoire appelée séquence d'étalement de spectre qui a une bande passante plus large que celle du signal d'origine. Cette multiplication permet de répartir l'énergie du signal sur une plus grande bande passante. Le signal élargi est ensuite reçu par le récepteur qui utilise la même séquence d'étalement de spectre que l'émetteur pour extraire le signal d'origine. En multipliant le signal reçu par la séquence d'étalement de spectre, les composantes étalées sont démêlées, ramenant ainsi le signal à sa bande passante d'origine. Après la multiplication, une intégration temporelle est souvent réalisée pour accumuler l'énergie du signal souhaité et réduire les effets du bruit. Ensuite, le signal est filtré pour extraire le signal d'origine, en éliminant les autres composantes indésirables.

### **II.3.2.2 Etalement de spectre à saut de fréquence (FH-SS)**

Une technique consiste à changer la fréquence de transmission du signal de manière aléatoire et périodique selon une séquence connue par l'émetteur et le récepteur. Cela permet de réduire les effets des interférences et de la multipathie, ainsi que de rendre la transmission plus résistante aux attaques de brouillage. FHSS est souvent utilisé dans les réseaux WLAN (Wireless Local Area Network) et dans les communications militaires pour assurer la sécurité des échanges, elle présente des avantages tels que la résistance aux interférences, la sécurité, la fiabilité et la flexibilité mais il peut aussi entraîner une réduction de la bande passante effective disponible pour la transmission de données.

### **II.3.2.3 Etalement avec saut de temps (TH-SS)**

Une technique dans laquelle les données sont transmises sous forme de séquences de courtes impulsions (ou sauts) de durée fixe. Les impulsions sont réparties aléatoirement dans le temps avec un délai entre chaque saut correspondant à un code pseudo-aléatoire.

Cette technique permet de réduire les interférences entre les signaux en utilisant des codes différents pour chaque saut et donc d'améliorer la qualité de la transmission. TH-SS est utilisé dans les réseaux de communications sans fil tels que les réseaux WLAN ou les réseaux Bluetooth.

### II.3.3. Avantages de l'étalement de spectre

- Réduire les interférences entre les signaux en les étalant sur une large bande de fréquence, ce qui diminue la probabilité qu'un signal soit perturbé ou bloqué par d'autres signaux.
- Sécuriser les communications en rendant le signal plus difficile à intercepter ou à décoder par une personne non autorisée. En effet, la connaissance de la séquence de codage est nécessaire pour pouvoir extraire l'information véhiculée par le signal.
- Obtenir une haute résolution temporelle, c'est-à-dire la capacité à discerner des événements rapprochés dans le temps, car le signal est étalé sur une large bande de fréquence et transmis sur plusieurs canaux en même temps.
- Permettre à plusieurs systèmes de coexister sur la même bande de fréquence sans se brouiller mutuellement, grâce à l'utilisation de séquences de codage différentes.
- Réduire la puissance émise pour transmettre une information à une distance donnée, car l'énergie du signal est étalée sur une large bande de fréquence. Cela peut contribuer à réduire la consommation d'énergie et augmenter la durée de vie des batteries dans les dispositifs mobiles.

### II.4. Architecture d'OCDMA

L'OCDMA repose sur deux domaines de transmission des données : temporel et spectral. Dans le domaine temporel, les données sont étalées électriquement (réseau partiellement optique), tandis que dans le domaine optique, la conception de l'encodeur optique qui détermine le code utilisé (réseau tout optique).

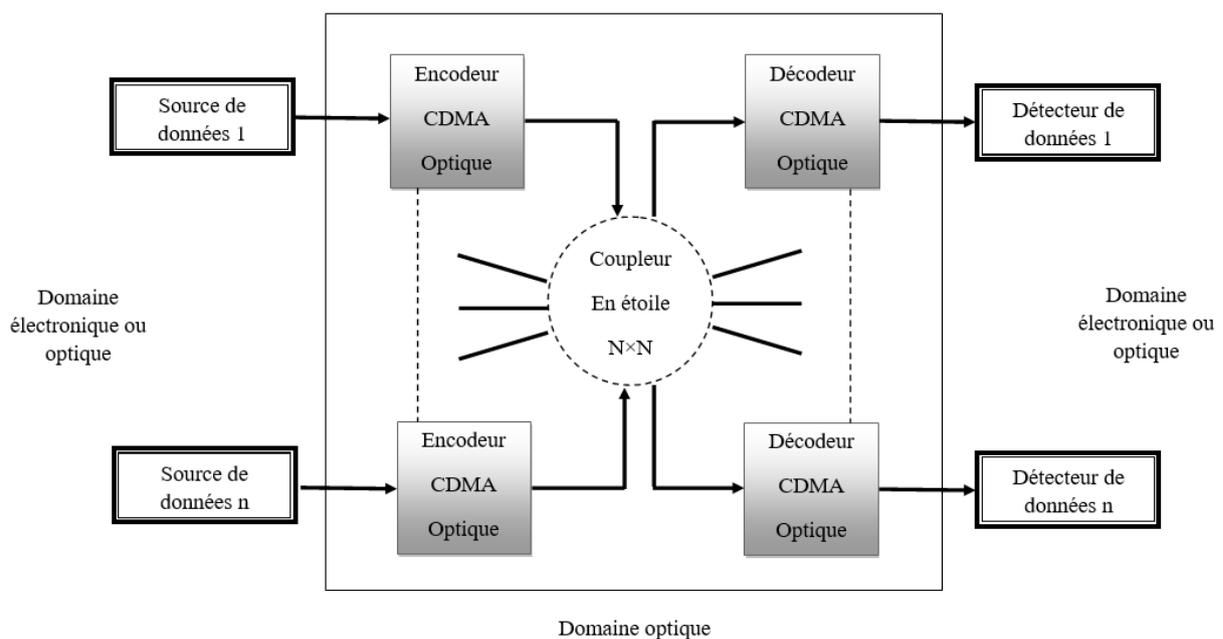


Figure II. 4: OCDMA avec émetteurs et récepteurs optiques en configuration en étoile

La figure (II.4) illustre un système CDMA tout optique de type réseau en étoile. Le signal provenant de la source de données, qu'elle soit optique ou électronique, active une source optique qui étale le signal à l'aide du code utilisateur. La séquence résultante est couplée avec les données des autres utilisateurs du système et le signal est transmis via une fibre optique. À la réception, le signal reçu est comparé avec les codes de tous les utilisateurs pour estimer la donnée émise. [12]

## **II.5. Différentes approches de l'OCDMA**

Il existe deux manières pour envisager la manipulation des signaux : manière cohérente ou incohérente. [14]

### **II.5.1 OCDMA cohérent**

Lorsqu'un système utilise une source cohérente pour transmettre des informations codées, l'amplitude et la phase du signal transmis sont utilisées, cette méthode permet l'utilisation de codes bipolaires composés de « -1 » et « +1 », rendant ainsi possible l'orthogonalité stricte des différents codes, de la même manière que pour le CDMA hertzien.

### **II.5.2 OCDMA incohérent**

Les données à transmettre dans les systèmes incohérents sont codées en utilisant la puissance du signal émis. Dans ce cas, seule la puissance (une quantité positive) est détectée. Le canal de transmission est donc unipolaire et les codes utilisés sont constitués de « 0 » et « 1 ». La mise en œuvre des systèmes incohérents est moins coûteuse.

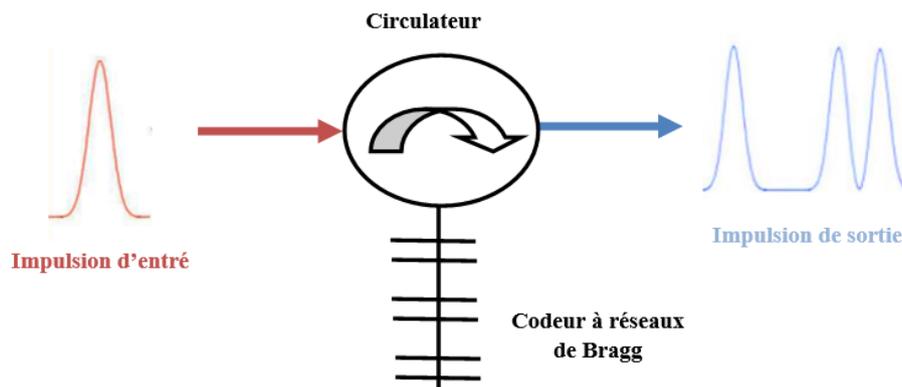
## **II.6. Codeurs et décodeurs optiques OCDMA**

Les éléments clés pour la mise en œuvre des systèmes OCDMA sont les encodeurs et décodeurs qui permettent la génération et la récupération des signaux codés. L'intégration de composants optiques dans les réseaux d'accès optiques a permis de réduire le coût et la complexité des systèmes de transmission. Les dispositifs les plus utilisés en OCDMA sont les lignes à retard (Fibre Optical Delay Line ou FODL), les réseaux de Bragg (Fiber Bragg Grating ou FBG) et les réseaux de guides d'ondes matriciels (Arrayed Waveguide Gratings ou AWG).

### **II.6.1. Réseaux de Bragg**

Les réseaux de Bragg font référence à une structure périodique dans un matériau qui est utilisée pour réfléchir sélectivement la lumière dans une certaine plage de longueurs d'onde. Ces réseaux tirent leur nom du physicien anglais William Henry Bragg, qui a développé la théorie des réseaux cristallins et de la diffraction des rayons X au début du XXe siècle.

Le réseau de Bragg est un filtre passif induit par photosensibilité qui intégré dans le cœur d'une fibre optique, son rôle principal est de permettre la réflexion sélective des longueurs d'onde spécifiques. Sa structure périodique de l'indice de réfraction agit comme un miroir pour les longueurs d'onde qui satisfont la condition de Bragg, tandis que les autres longueurs d'onde sont transmises à travers le réseau. Cela permet une utilisation efficace des longueurs d'onde dans les systèmes optiques et de créer des signaux codés optiques où différentes longueurs d'onde représentent différentes informations ou symboles.



**Figure II. 5:** Génération d'une séquence en utilisant des réseaux de Bragg photo inscrits dans une même fibre

Ainsi, le réseau de Bragg peut servir de codeur et de décodeur dans les systèmes de communication optique en modulant les propriétés de réflexion de la fibre optique. Il peut coder un signal optique en réfléchissant sélectivement certaines longueurs d'onde, puis décoder le signal en détectant les longueurs d'onde réfléchies. [16]

## II.7. Différentes méthodes d'encodage OCDMA

Les codes en OCDMA peuvent être réalisés de diverses manières, en utilisant des dimensions telles que la fréquence, le temps, l'espace et la polarisation ou la phase. De plus, le choix de la source optique à utiliser est un facteur important à considérer. Dans cette section, nous présentons brièvement les méthodes les plus intéressantes de la littérature en termes d'efficacité et de possibilité d'implémentation.

### II.7.1. OCDMA par encodage temporel

La méthode d'encodage temporel (DS Direct Sequence) consiste à subdiviser un bit en plusieurs impulsions optiques courtes dont les intervalles de temps entre les impulsions représentent le code. Pour réaliser cette méthode tout optique, l'étalement des données consiste à remplacer chaque bit d'information par des chips pour les distinguer des bits de données. La séquence de code utilisée détermine la clé de codage. Lorsque la valeur d'un bit est « 1 », une série

de N chips est utilisée pour le représenter, tandis que la valeur "0" est représentée par la séquence complémentaire. Ce principe de codage direct est illustré dans la figure (II.6). Dans ce cas, aucune autre variable telle que la fréquence ou le temps n'intervient dans le processus. [17]

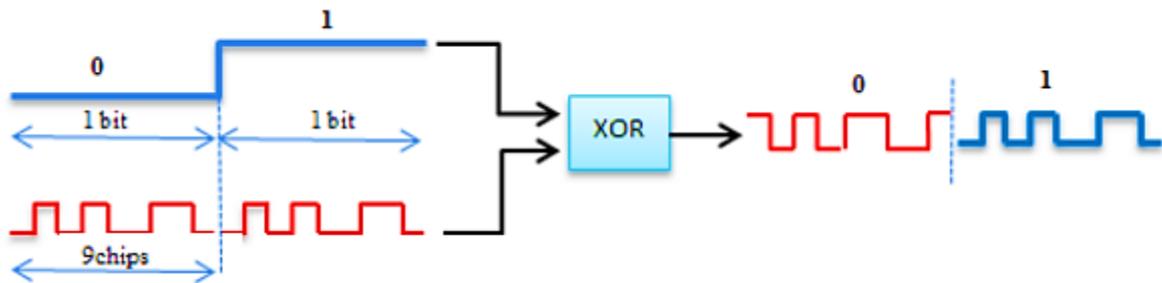


Figure II. 6: Représentation schématique du DS-OCDMA

### II.7.2. OCDMA par encodage spectral

Dans l'encodage spectral, un utilisateur utilise plusieurs longueurs d'ondes émises par le biais d'une série de filtres connectés à une source optique. Ces filtres jouent un rôle crucial à la fois lors de l'émission et de la réception des signaux. Chaque utilisateur est associé à un code qui lui est propre, défini par une combinaison spécifique de composantes spectrales. Il est important que ce code soit orthogonal aux codes utilisés par les autres abonnés afin d'éviter toute interférence indésirable. Le codage spectral est réalisé en utilisant des fibres à réseaux de Bragg, qui permettent la réflexion de différentes longueurs d'onde, offrant ainsi une flexibilité dans le codage. [14]

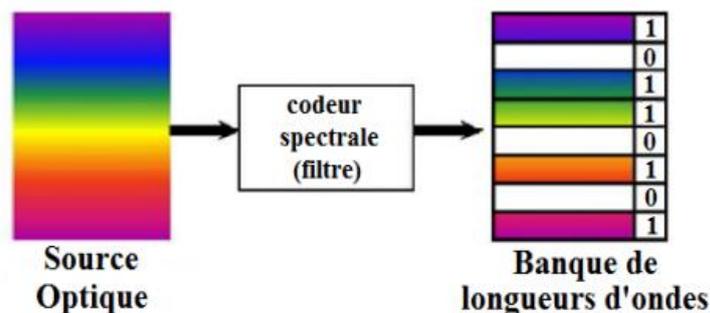


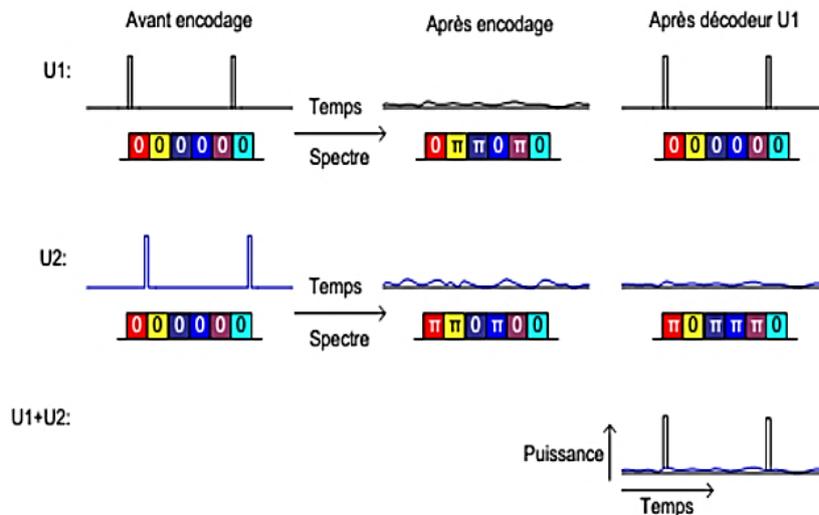
Figure II. 7: Codage spectral OCDMA

Il existe deux types d'encodage dans le domaine spectral :

#### II.7.2.1 OCDMA par encodage spectral de phase (SPE-OCDMA Spectral Phase Encoding OCDMA)

Dans cette approche, les utilisateurs sont distingués en utilisant des codes basés sur la phase des signaux optiques qui sont généralement obtenus en modulant la phase des porteuses optiques à des valeurs spécifiques pour chaque utilisateur. Ces codes de phase sont ensuite utilisés pour

moduler les signaux optiques émis par les utilisateurs, permettant ainsi leur multiplexage et leur transmission simultanée sur une seule fibre optique. [18]

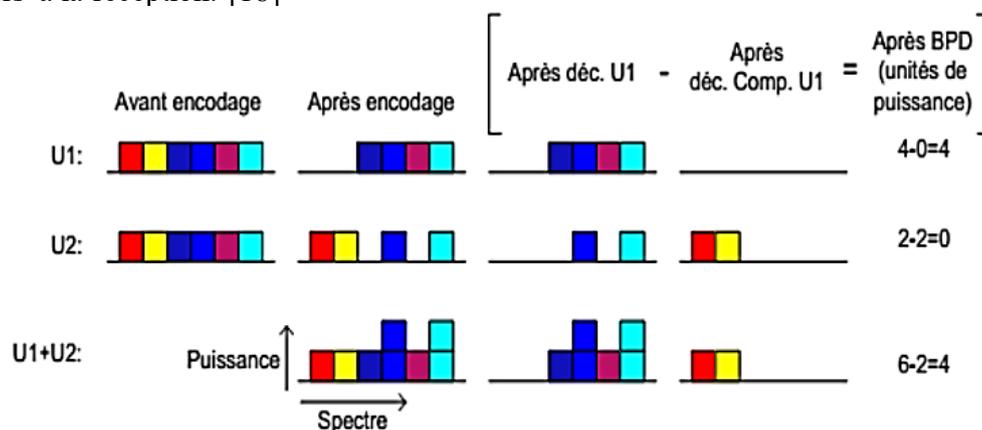


**Figure II. 8:** Représentation schématique du SPE-OCDMA

Cette technique offre une bonne résistance aux interférences et permet une utilisation efficace de la bande passante optique.

### II.7.2.2 OCDMA par encodage spectral d'amplitude (SAC-OCDMA Spectral Amplitude Coding OCDMA)

Dans cette approche, les utilisateurs sont distingués en utilisant des codes basés sur l'amplitude des signaux optiques. Chaque utilisateur dispose d'un code d'amplitude unique qui est appliqué à son signal optique avec un nombre fixe de longueurs d'onde partagées entre les utilisateurs. Les codes d'amplitude sont conçus de manière à être orthogonaux les uns aux autres peuvent être obtenus en utilisant une détection équilibrée combinant un décodeur identique à l'encodeur et un décodeur complémentaire, ce qui permet de séparer les signaux des différents utilisateurs à la réception. [18]



**Figure II. 9:** Représentation schématique du SAC-OCDMA

Cette technique permet un partage efficace des ressources et une utilisation simultanée de la bande passante optique par plusieurs utilisateurs, elle offre également une résistance accrue aux interférences et une meilleure confidentialité des données.

## II.8. Techniques de détection en SAC-OCDMA

Dans les systèmes OCDMA, le choix des codes utilisés et le type de détection sont des paramètres essentiels qui ont un impact direct sur les performances du système. Les techniques de détection peuvent être classées en deux grandes catégories : la détection directe et la détection balancée. [19]

### II.8.1 Détection directe

Une technique de détection utilisée dans les systèmes OCDMA où la corrélation croisée entre les codes des utilisateurs est nulle. Elle est basée sur la multiplication du signal reçu par les codes des utilisateurs individuels, suivie de l'intégration et du filtrage pour extraire le signal souhaité.

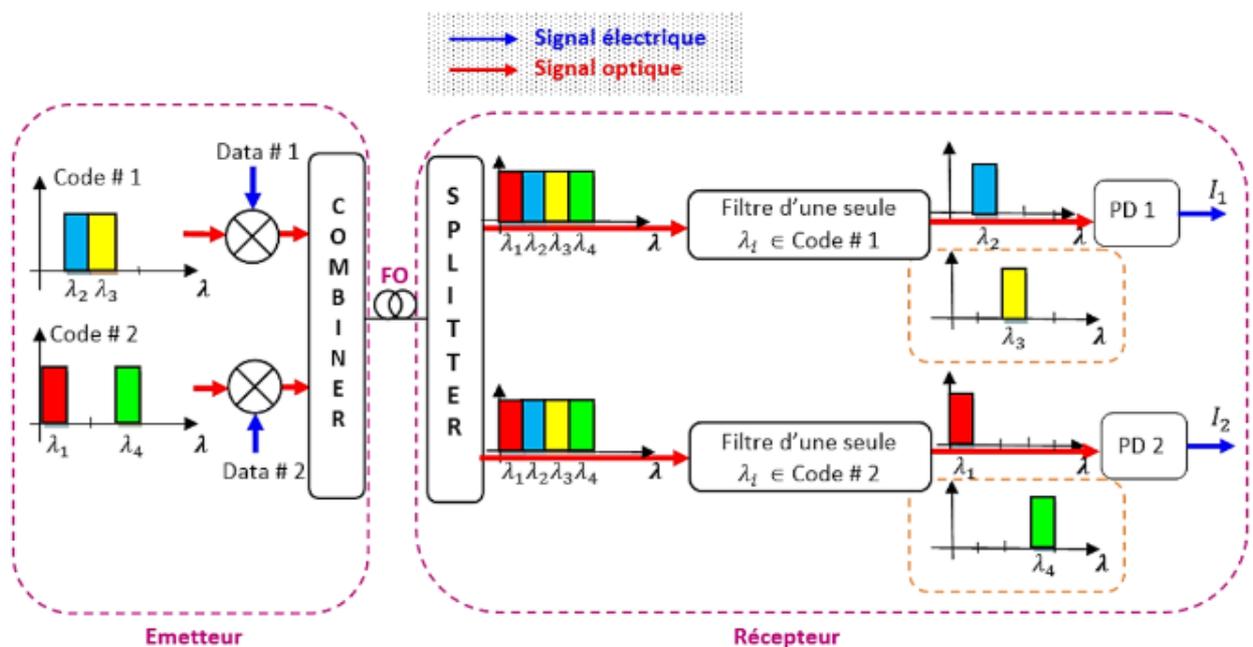


Figure II. 10: Architecture d'un système SAC – OCDMA à détection directe

Le signal optique transmis à travers la fibre optique est reçu par le récepteur. Ce signal est ensuite multiplié par le code correspondant à l'utilisateur spécifique auquel le récepteur souhaite accéder. La multiplication est effectuée point par point, où chaque point du signal est multiplié par le correspondant du code utilisateur. Les produits résultants de la multiplication sont ensuite intégrés sur une durée spécifique. Cette intégration permet d'accumuler l'énergie du signal souhaité et de réduire les effets du bruit et des interférences présentes dans le système. Après l'intégration,

un filtre est utilisé pour extraire le signal souhaité et éliminer les autres composantes indésirables du spectre. Enfin, la sortie du filtre est comparée à un seuil de décision préétabli. Si la valeur de la sortie dépasse le seuil, cela indique la présence du signal de l'utilisateur spécifique auquel le récepteur accède. En revanche, si la valeur de la sortie est inférieure au seuil, le signal est considéré comme absent ou non détecté.

La détection directe permet une séparation efficace des signaux des différents utilisateurs en utilisant des codes présentant une corrélation croisée nulle. Cela réduit les interférences multi-utilisateurs et permet d'extraire les signaux individuels. Cependant, la détection directe peut être plus sensible aux effets du bruit et des techniques supplémentaires, telles que le codage de canal ou le traitement du signal, peuvent être utilisées pour améliorer les performances du système.

## II.8.2 Détection balancée

La détection balancée est une technique de détection utilisée dans les systèmes OCDMA où la corrélation croisée entre les codes des utilisateurs est fixe, mais non nulle. Elle vise à équilibrer la corrélation croisée entre les utilisateurs.

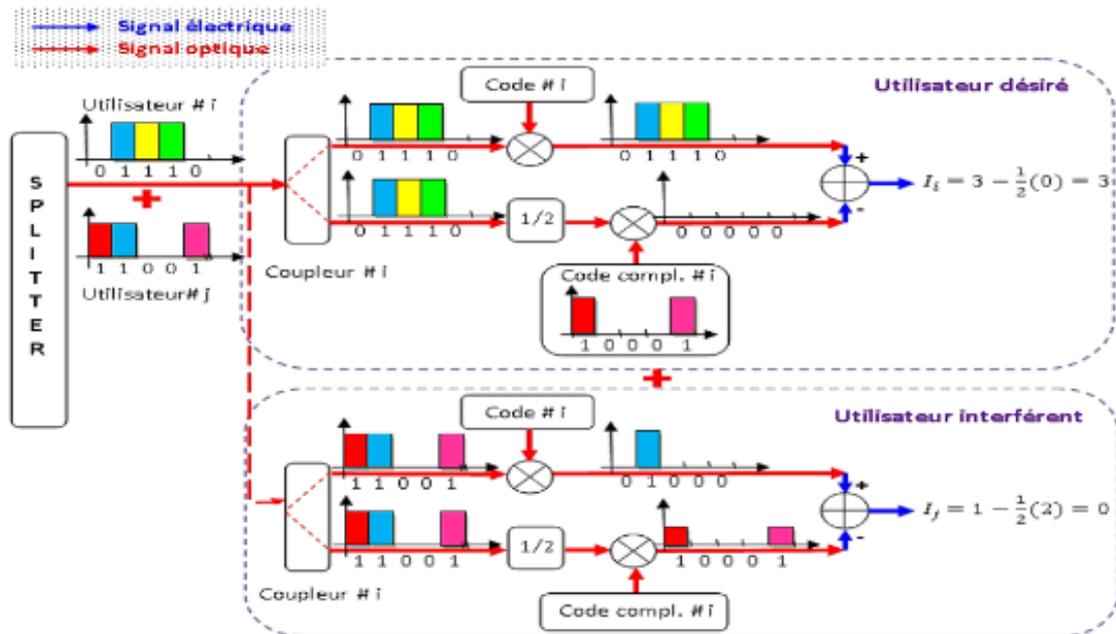


Figure II. 11: Architecture d'un système SAC-OCDMA à détection balancée

Le récepteur reçoit le signal optique transmis à travers la fibre optique. Pour chaque utilisateur, le récepteur utilise une paire de photodiodes balancées, où chaque photodiode correspond à une composante du code de l'utilisateur. Une des photodiodes reçoit la composante du code, tandis que l'autre reçoit la composante complémentaire du code. Les photocourants produits par les deux photodiodes correspondantes à l'utilisateur sont soustraits l'un de l'autre, ce qui génère une différence de photocourants qui représente la distinction entre les composantes du

signal qui correspondent au code de l'utilisateur et les composantes complémentaires, cette différence est ensuite amplifiée pour augmenter le niveau du signal différentiel, renforçant ainsi les caractéristiques du signal souhaité. Après l'amplification, un filtre est utilisé pour extraire le signal souhaité en éliminant les composantes indésirables. La sortie du filtre est ensuite comparée à un seuil de décision prédéfini. Si la valeur de la sortie dépasse le seuil, cela indique la présence du signal de l'utilisateur spécifique. En revanche, si la valeur de la sortie est inférieure au seuil, le signal est considéré comme absent.

La détection balancée offre une utilisation efficace de la puissance du signal et une meilleure résistance au bruit par rapport à la détection directe. Cependant, elle peut nécessiter des techniques de synchronisation plus complexes et une conception soignée des codes pour obtenir de bonnes performances.

### **II.8.3. Comparaison entre détection directe et détection balancée**

La détection directe est simple et économique, mais peut être limitée en termes de sensibilité et de rapport signal sur bruit. La détection balancée permet d'améliorer la sensibilité et le rapport signal sur bruit, mais elle est plus complexe et coûteuse.

## **II.9. Avantages de la technique d'accès multiple en code OCDMA**

- La sécurité accrue des communications grâce au cryptage des signaux, les rendant difficiles à intercepter et à comprendre.
- La bande passante optique peut être partagée efficacement, permettant à chaque utilisateur de partager la même fréquence porteuse sans interférer avec les autres utilisateurs, grâce à l'encodage des signaux.
- La capacité à gérer simultanément plusieurs utilisateurs sans perturbation, grâce à l'encodage et au décodage des signaux.
- Réduire les collisions et les interférences entre les utilisateurs partageant la même bande passante optique.

## **II.10. Conclusion**

L'augmentation des besoins de transmission des données introduit des techniques d'étalement de spectre telles que CDMA optique qui représente une des solutions possibles pour le partage des ressources dans les réseaux optiques. Dans ce chapitre nous avons présenté la technique d'accès multiple en code OCDMA. On a vu son principe, les différentes approches (cohérent et incohérent), les différentes méthodes d'encodage (encodage temporel, encodage

spectral de phase et l'encodage d'amplitude spectral) et les différentes techniques de détection (directe et balancée). Enfin, nous avons mis en évidence les avantages de cette technique.

# **CHAPITRE III**

## **Simulation et Interprétation des Résultats**

---

---

### **III.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des simulations réalisées à l'aide du logiciel OptiSystem, dans le but d'analyser, évaluer et optimiser les performances d'une chaîne optique pour le transport de capacités d'information élevées. Les simulations se concentrent sur différents paramètres afin d'étudier leur impact sur les performances du système. Voici les parties de la simulation :

Impact de la bande passante des réseaux de Bragg : Nous analysons comment la variation de la bande passante des réseaux de Bragg affecte les performances de la chaîne optique. Cela nous permet de déterminer la bande passante optimale pour obtenir des performances maximales.

Impact du débit binaire : Nous examinons les taux d'erreurs binaires pour déterminer la relation entre le débit binaire et la qualité de transmission.

Impact de la puissance optique : Cela nous permet de déterminer la puissance optimale qui garantit une transmission fiable et de haute qualité en minimisant la consommation d'énergie.

Impact du nombre d'utilisateurs : Nous examinons la capacité du système à gérer efficacement plusieurs utilisateurs simultanément sans compromettre les performances globales.

Impact de la longueur de la fibre : Cela nous permet de déterminer la longueur de fibre optimale pour obtenir les meilleures performances en termes de taux d'erreurs binaires et de stabilité de la connexion.

Avant d'entrer dans les détails des simulations, nous présentons le logiciel OptiSystem ainsi que les critères d'évaluation que nous utilisons pour nos simulations. Ces travaux de simulation revêtent une importance particulière car ils permettent de comprendre et optimiser les performances du système SAC-OCDMA.

### **III.2. Présentation du logiciel de simulation OptiSystem**

OptiSystem est un logiciel de simulation optique développé par la société OPTIWAVE. Il permet d'analyser et de concevoir différents modules de systèmes optiques. Il offre un environnement interactif où des outils numériques sont combinés à des fonctionnalités graphiques et une interface utilisateur conviviale. On peut ainsi représenter le système optique sous forme de schéma de blocs, ce qui facilite la visualisation et la modélisation des différents composants et interactions. Cette approche permet une analyse approfondie des performances du système, ainsi que la simulation de différents scénarios et configurations. OPTISYSTEM offre donc une

plateforme complète pour la conception, la simulation et l'optimisation de systèmes optiques complexes.

Nous avons choisi OptiSystem pour notre simulation en raison de sa facilité de manipulation et de sa bibliothèque de composants optiques de base qui permet de simuler facilement l'ensemble de la chaîne de communication optique. Ce logiciel offre une large gamme de fonctionnalités graphiques qui permettent de visualiser les signaux optiques, les diagrammes de blocs et les résultats de simulation de manière claire et intuitive. Il permet également d'ajuster les paramètres des composants et de les optimiser pour obtenir les performances souhaitées.

### **III.3. Caractéristiques du logiciel OptiSystem**

- OptiSystem offre une bibliothèque complète de composants optiques prédéfinis.
- Le logiciel dispose d'une interface graphique intuitive et conviviale qui permet aux utilisateurs de construire des modèles de systèmes optiques en utilisant une approche glisser-déposer. Les composants peuvent être connectés et configurés en utilisant des boîtes de dialogue faciles à utiliser.
- OptiSystem prend en charge la simulation à la fois dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel.
- Le logiciel permet de modéliser divers phénomènes optiques tels que la dispersion chromatique, l'atténuation, la non-linéarité, les effets de bruit, les interférences, etc.
- OptiSystem offre des outils avancés pour analyser et visualiser les résultats de simulation. Les utilisateurs peuvent examiner les caractéristiques de transmission, les diagrammes de l'œil, les spectres optiques, les taux d'erreur, les délais de propagation, etc.
- Le logiciel propose des outils intégrés pour l'optimisation paramétrique, l'analyse de sensibilité et la conception de systèmes optiques.

### **III.4. Application du logiciel OptiSystem**

Parmi les diverses applications d'OptiSystem, nous allons citer les plus utilisées :

- La conception du système de communication optique du composant au niveau de la couche physique.
- Le calcul du taux d'erreur binaire (BER ou TEB) et le calcul du bilan de liaison.
- La conception des réseaux TDM/WDM et les réseaux optiques passifs (PON).
- Conception des systèmes optiques en espace libre (FSO).
- Analyser et compenser la dispersion chromatique, qui est l'un des principaux facteurs limitant les performances des systèmes de communication optique à haut débit.

- La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur et du récepteur.

### III.5. Avantages du logiciel OptiSystem

OptiSystem présente plusieurs avantages pour la simulation et la conception de systèmes de communication optique :

- Obtenir un aperçu de performances du système de fibre optique.
- Fournir un accès direct aux données de caractérisation du système.
- Présentation virtuelle des options de conception

La démarche à suivre pour simuler un système optique se décompose en deux étapes :

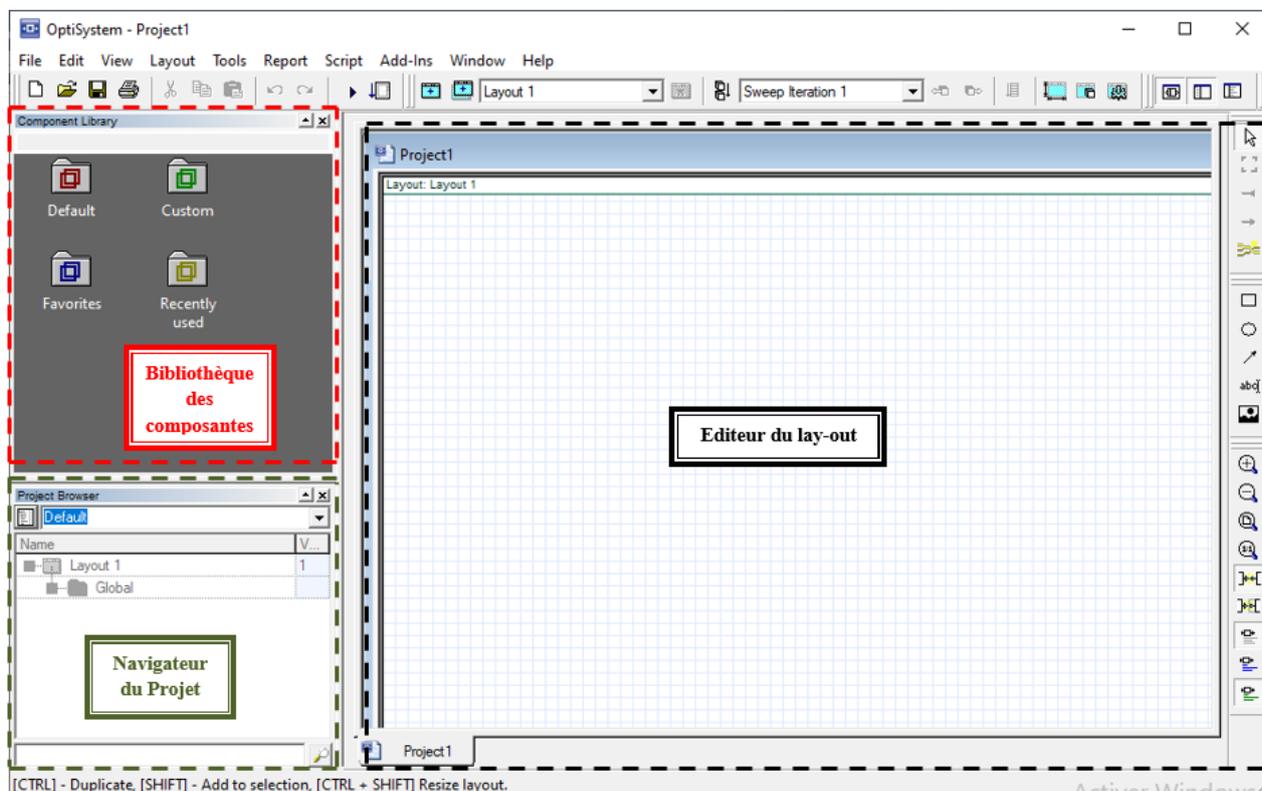
- a) **Construire le schéma bloc** : La première étape de la simulation consiste à construire le schéma bloc du système optique en utilisant les composants disponibles dans la bibliothèque. Les utilisateurs peuvent faire glisser-déposer les composants sur la fenêtre de conception, les configurer avec les paramètres appropriés et les interconnecter pour former le schéma du système.
- b) **Analyser le schéma** : Une fois le schéma bloc construit, OptiSystem permet d'analyser le système optique en simulant son comportement. Les utilisateurs peuvent spécifier les paramètres de simulation, tels que la puissance d'entrée, la longueur d'onde, etc., et lancer la simulation pour obtenir des résultats. Ces résultats peuvent inclure des mesures de puissance, de taux d'erreur, de qualité de transmission, etc., qui permettent d'évaluer les performances du système.

### III.6. Interface du logiciel OptiSystem

L'interface OptiSystem contient une fenêtre principale répartit en plusieurs parties (figure III.1).

- **Bibliothèque des composants** : offre une large gamme de composants optiques prédéfinis, faciles et prêts à être utilisés dans la conception de systèmes optiques.
- **Editeur du lay-out** : est une interface graphique conviviale qui permet de créer, personnaliser et organiser visuellement leur système optique simulé. Il offre des fonctionnalités de personnalisation visuelle, de gestion des couches, d'annotations et de symboles, ainsi que des fonctionnalités de zoom et de navigation pour faciliter la manipulation et la représentation visuelle du système.

- **Projet en cours** : représente un ensemble de fichiers et de dossiers associés à une simulation optique en cours. Il vous permet de travailler sur le système optique, d'ajuster les paramètres, d'analyser les résultats et de collaborer avec d'autres membres de l'équipe si nécessaire.



**Figure III. 1:** Interface graphique du logiciel OptiSystem

- **Barre d'état** : une barre située généralement en bas de la fenêtre de l'application fournit des indications utiles à l'utilisateur. Elle affiche des informations sur l'état actuel du logiciel et les tâches en cours et d'autres détails pertinents pour votre travail de simulation optique.

[CTRL] - Duplicate, [SHIFT] - Add to selection, [CTRL + SHIFT] Resize layout.

**Figure III. 2:** Barre d'état du logiciel OptiSystem

- **Barre de menu** : une barre située généralement en haut de la fenêtre de l'application offre une navigation intuitive et structurée pour accéder aux différentes fonctionnalités et options d'OptiSystem. Elle permet d'explorer et d'exploiter les capacités du logiciel pour la conception et l'analyse de systèmes optiques complexes.



**Figure III. 3:** Barre de menu du logiciel OptiSystem

- **Lancer une simulation** : Dans la barre de menu, cliquez sur "Simulation" ou bien en tapant simultanément Ctrl+F5 ou bien accédez par le menu "File" puis cliquez sur "Calculates".

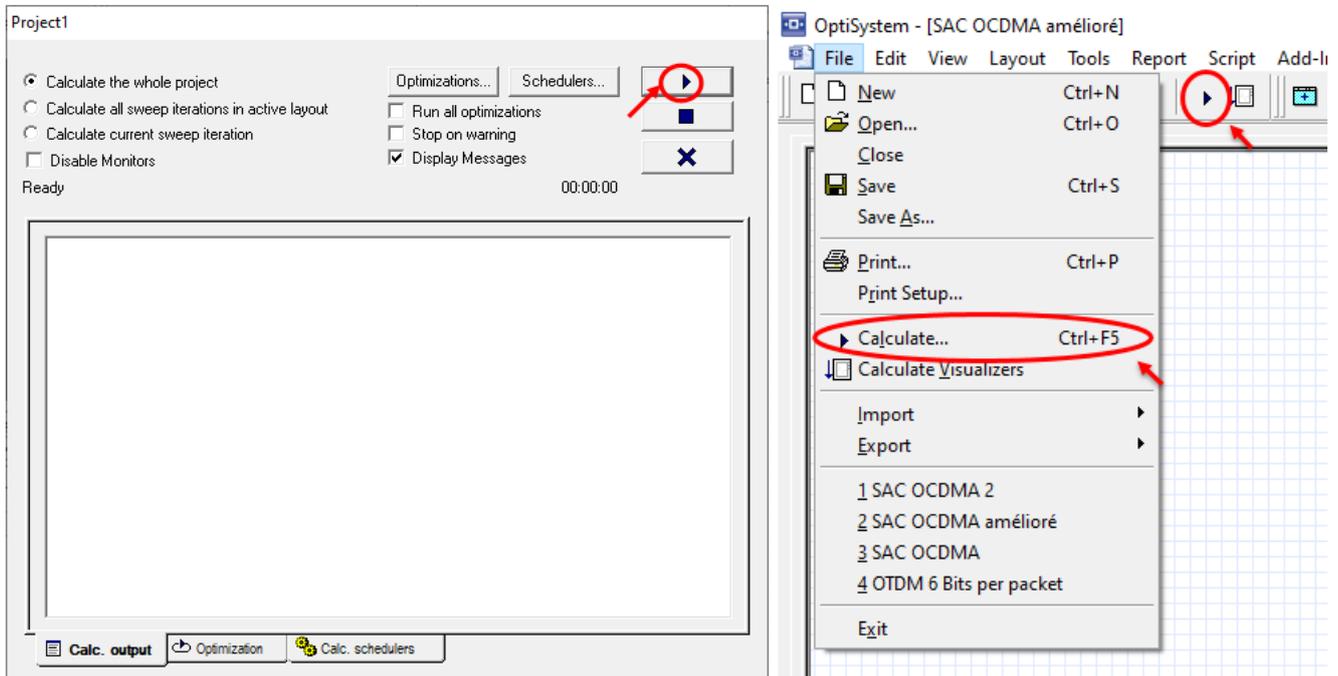


Figure III. 4: Fenêtre de lancement de simulation

### III.7. Affichage des résultats à partir d'un appareil

Pour afficher les résultats et les graphiques générés par la simulation, il faut faire doubles cliques sur le visualiseur dans la structure du projet.

- Analyseur de spectre optique affiche le signal optique modulé dans le domaine fréquentiel.
- Visualiseur optique en domaine temporel affiche le signal optique modulé dans le domaine temporel.
- Oscilloscope affiche le signal électrique après le code PIN dans le domaine temporel.
- Analyseur BER mesure les performances du système en fonction du signal avant et après la propagation.

### III.8. Critère de qualité de la transmission optique

Il y'a deux critères principaux pour définir la qualité d'une transmission optique qui sont :

- **Le taux d'erreurs binaires (BER)** est une mesure qui évalue la performance d'un système de communication numérique en quantifiant le nombre d'erreurs binaires par rapport au nombre total de bits transmis. Il est utilisé pour évaluer la qualité de transmission, déterminer la sensibilité du système et comparer différentes configurations ou normes de communication.

$$BER = \frac{\text{Nombre d'erreurs binaires}}{\text{Nombre total de bits transmis}}$$

En télécom optique, un système est généralement considéré de bonne qualité lorsque le taux d'erreurs binaires (BER) est inférieur à une valeur de  $10^{-9}$ . Cela signifie qu'il y a moins d'une erreur binaire détectée pour chaque milliard de bits transmis pour assurer une transmission fiable des données sur de longues distances et à des débits élevés. [20]

- **Diagramme de l'œil (eye diagram)** est un outil graphique qui permet de visualiser la qualité et la stabilité d'un signal numérique dans les systèmes de communication. Il est utilisé pour évaluer la qualité du signal, détecter les distorsions et les perturbations, et optimiser les performances du système. L'ouverture de l'œil est une mesure importante pour évaluer la marge de tolérance du système.

### III.9. Topologie du système SAC-OCDMA

La configuration présentée met en œuvre la technique OCDMA avec encodage spectral d'amplitude pour permettre la communication simultanée de trois utilisateurs distincts. Cette technique utilise les réseaux de Bragg comme dispositifs d'encodage et de décodage pour les signaux optiques. Une source incohérente à large bande est choisie pour garantir une large couverture spectrale, permettant ainsi une communication simultanée et indépendante des utilisateurs. Nous allons présenter la topologie du système OCDMA par encodage spectral d'amplitude (SAC-OCDMA) dans la figure (III.5) :

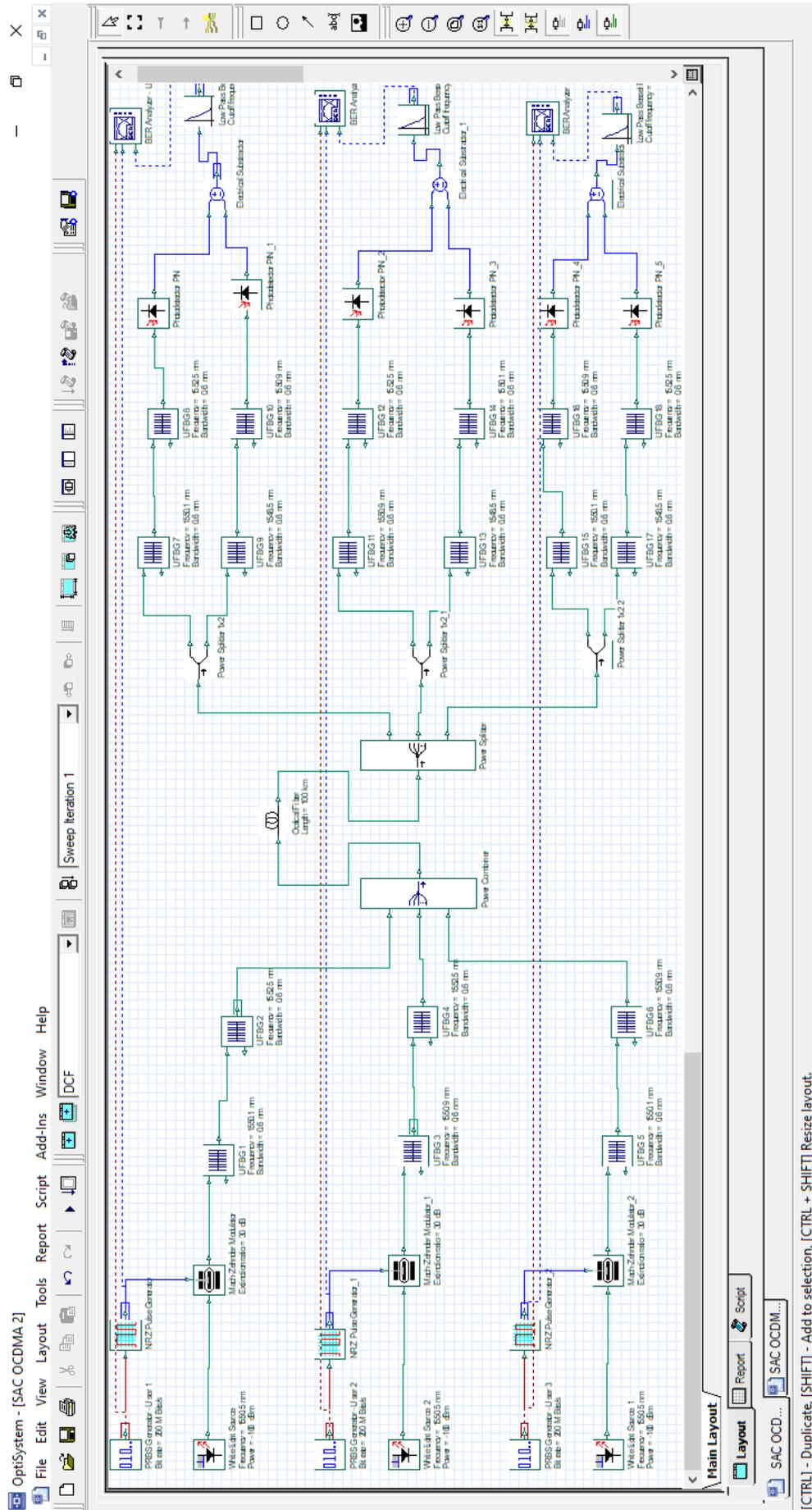


Figure III. 5: : schéma du système SAC-OCDMA (Nombre d'utilisateur N=3)

### III.9.1. Partie émission

Le rôle de l'émetteur dans un système de communication optique consiste à générer et à transmettre un signal optique sur une fibre optique. Pour ce faire, l'émetteur doit moduler le signal électrique binaire (composé de 0 et de 1) portant les données à transmettre et le convertir en un signal optique correspondant pour être transmis via la fibre.

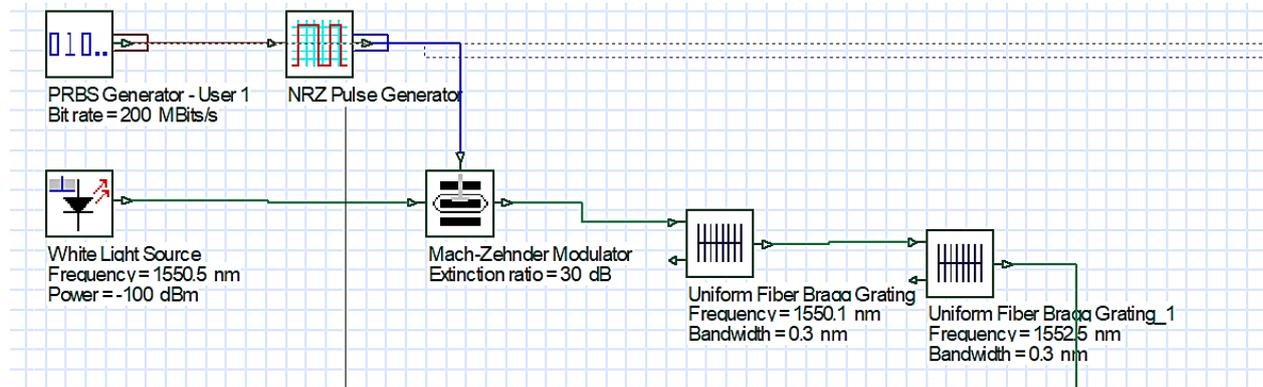


Figure III. 6: Bloc d'émission pour chaque utilisateur

White Light Source est une source de la lumière d'émission incohérente qu'est une combinaison de différentes longueurs d'ondes.

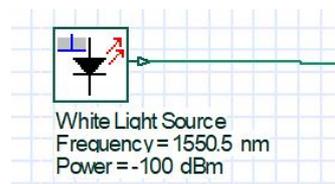


Figure III. 7 : White Light Source

Pseudo-Random Bit Sequence Generator (PRBS) est utilisé pour générer une séquence de bits aléatoire ou bien définie par l'utilisateur.

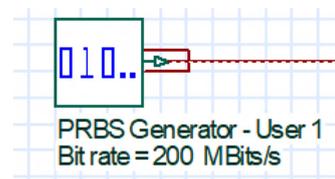
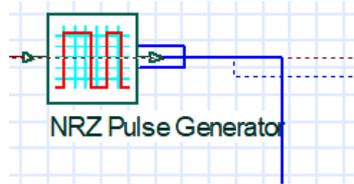


Figure III. 8: Pseudo-Random Bit Sequence Generator

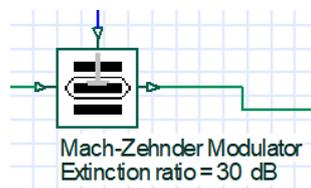
NRZ (Non-Return-to-Zero) Pulse Generator est un générateur d'impulsion binaire pseudo aléatoire à partir de signaux numériques, lorsqu'un le bit « 1 » est à transmettre, le signal modulé présente une amplitude positive par rapport à un niveau de référence (tension positive) et lorsqu'un

bit « 0 » est à transmettre, le signal modulé présente une amplitude négative par rapport au niveau de référence (tension négative).



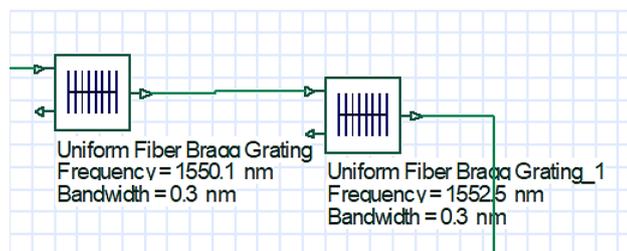
**Figure III. 9:** Non-Return à Zero Pulse Generator

Mach-Zehnder Modulator est largement utilisé pour moduler des signaux optiques à haute débit, offrant une modulation précise et fiable du signal optique.



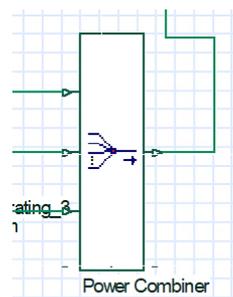
**Figure III. 10:** Modulateur Mach-Zehnder

Uniform Fiber Bragg Grating (UFBG) est utilisée pour attribuer des codes uniques aux utilisateurs dans le système, ce qui facilite la distinction et la séparation des signaux à la sortie du système.



**Figure III. 11 :** Uniform Fiber Bragg Grating

Power Combiner est un coupleur qui permet de combiner plusieurs signaux optiques de puissance élevée en un seul signal optique.



**Figure III. 12 :** Power Combiner

### III.9.2. Partie de transmission

La transmission de données à très haut débit et sur de grandes distances est réalisée via un canal de transmission qui est la fibre optique monomode (SMF).

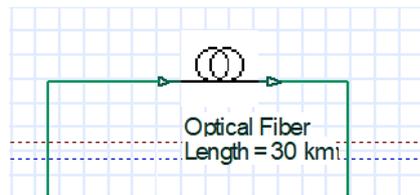


Figure III. 13: Canal de transmission la fibre optique

### III.9.3. Partie réception

Le rôle du récepteur dans un système de communication optique est de recevoir le signal optique transmis à travers la fibre optique et de le convertir en données électriques binaires compréhensibles.

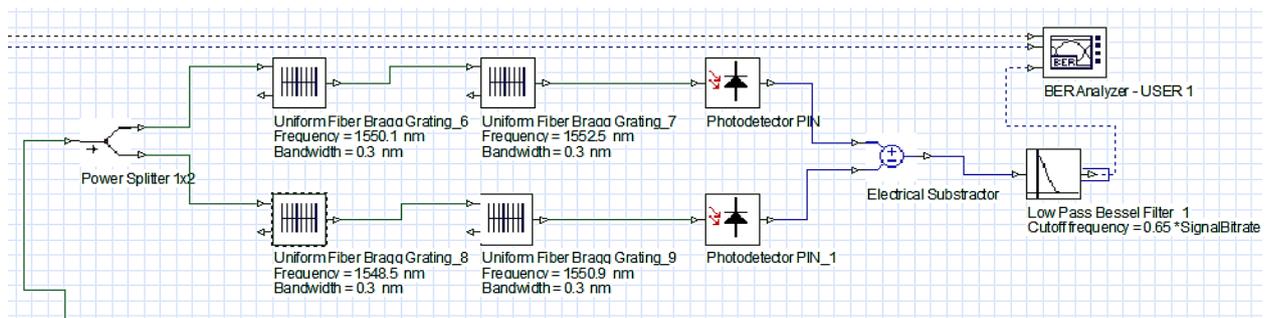


Figure III. 14: Bloc de réception pour chaque utilisateur

Power Splitter est un découpleur qui permet distribution de la puissance du signal optique vers différentes destinations.

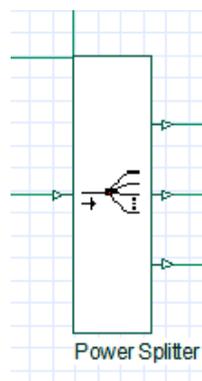
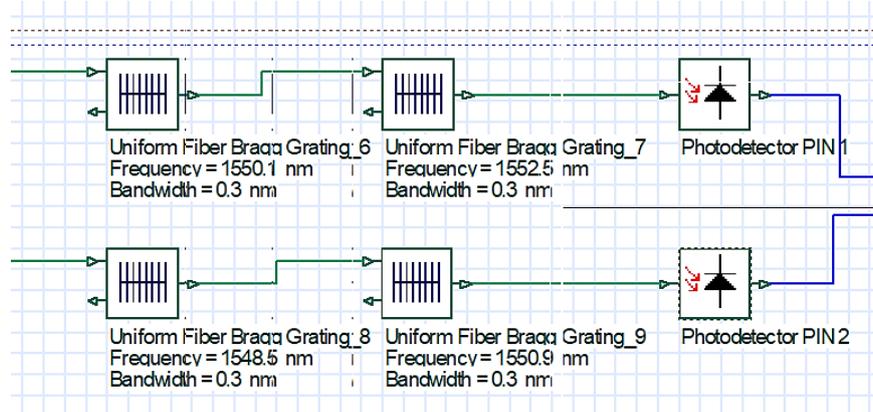


Figure III. 15 : Power Splitter

L'utilisation des UFBGs et des photodétecteurs dans la réception d'un système de communication optique permet de concentrer le spectre du signal décodé, réduire les interférences

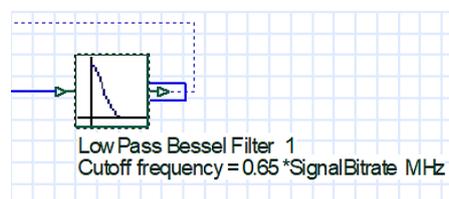
indésirables et éliminer les interférences d'accès multiple. Cela contribue à améliorer la qualité de la réception, la sélectivité des canaux et la performance globale du système.

Photodétecteur est un dispositif qui transforme la lumière qu'il absorbe à une grandeur mesurable. Il est de type photodiode PIN utilisé pour convertir les signaux optiques en signaux électriques.



**Figure III. 16 :** Uniform Fiber Bragg Grating et photodétecteurs en bloc de la réception

Low Pass Bessel Filter est un type de filtre électronique qui permet aux signaux de basse fréquence de passer tout en atténuant les signaux de fréquence plus élevée. Sa fréquence de coupure est de  $0,65 \times \text{signal bit rate MHz}$ .



**Figure III. 17 :** Filtre Passe-Bas de type Bessel

### III.10. Paramètre de simulation

Les paramètres et les valeurs utilisés dans notre simulation sont répertoriés dans les tableaux suivants :

#### Partie émission

Composant		Utilisateur	Valeur	
<b>PRBS Generator</b>	Débit binaire	User1/User2/User3	200 Mbit/s	
<b>NRZ Pulse Generator</b>	Format du signal	User1/User2/User3	Non-Return-to-Zero	
<b>Mach-Zehnder Modulator</b>	Extinction	User1/User2/User3	30dB	
<b>Uniform Fiber Bragg Grating</b>	Longueur d'onde	User1	UFBG 1	1550,1 nm
			UFBG 2	1552,5 nm
		User2	UFBG 3	1550,9 nm
			UFBG 4	1552,5 nm
		User3	UFBG 5	1550,1 nm
			UFBG 6	1550,9 nm
	Bande passante	User1/User2/User3	0,3 nm	
Réflexivité	0,9998			

Tableau III. 1: Paramètre de simulation des composants d'émission

#### Canal de transmission

Composant	Paramètre	Valeur
<b>Fibre Optique Monomode</b>	Longueur d'onde	1550 nm
	Dispersion	16,75ps/nm/km
	Atténuation	0,2 dB/Km

Tableau III. 2: Paramètre du canal de transmission

## Partie réception

Composant		Utilisateur	Valeur	
<b>Uniform Fiber Bragg Grating</b>	Longueur d'onde	User1	UFBG 7	1550,1 nm
			UFBG 8	1552,5 nm
			UFBG 9	1548,5 nm
			UFBG 10	1550,9 nm
		User2	UFBG 11	1550,9 nm
			UFBG 12	1552,5 nm
			UFBG 13	1548,5 nm
			UFBG 14	1550,1 nm
		User3	UFBG 15	1550,1 nm
			UFBG 16	1550,9 nm
UFBG 17			1548,5 nm	
UFBG 18			1552,5 nm	
Bande passante	User1/User2/User3	0,3 nm		
Réflexivité		0,9998		
<b>Photodétecteur PIN</b>	Responsivité	User1/User2/User3	1 A/W	
	Sensibilité		1550,5 nm	
<b>Low Pass Bessel Filter</b>	Fréquence de coupure	User1/User2/User3	0,65×débit binaire	

**Tableau III. 3:** Paramètre de simulation des composants de réception

### III.11. Présentation de la simulation

La topologie SAC-OCDMA à simuler comporte trois utilisateurs et un débit de 200 Mbits/s sont attribué à chaque utilisateur. Les données numériques sont générées grâce au générateur de données PRBS (Pseudo-Random Bit Sequence) et converties en un signal électrique par un générateur NRZ (Non-Return à Zéro), puis modulé en optique à l'aide d'un modulateur externe Mach-Zehnder. Pour affecter à chaque signal un code, deux UFBGs (Uniform Fiber Bragg Grating) connectés en série sont utilisés.

Ensuite, les trois signaux codés, seront multiplexés, grâce à un combiner (coupleur) sur une fibre monomodale SMF (Single Mode Fiber). A la sortie de la fibre, un splitter (découpleur) est utilisé pour récupérer le signal de chaque utilisateur. Le signal récupéré est décodé par un UFBGs et photodétecteur par une PIN, le filtre passe bas Bessel permet de filtrer les bruits engendrés par la liaison.

### III.12. Résultats de simulation

Les résultats de simulation d'un système SAC-OCDMA de trois utilisateurs avec une puissance optique d'émission -100 dBm et un débit binaire de 200 Mbit/s pour chaque utilisateur avec une distance de 10 km sont illustrés dans les figures suivantes qui montrent les mesures du taux d'erreur binaire (BER) pour chaque utilisateur sont présentés dans le tableau suivant :

Utilisateur	User 1	User 2	User 3
Taux d'Erreur Binaire « BER »	$3,661 \cdot 10^{-18}$	$1,575 \cdot 10^{-16}$	$3,029 \cdot 10^{-13}$

**Tableau III. 4:** Les mesures du taux d'erreur binaire BER

Les figures suivantes représentent les diagrammes de l'œil reçu et le taux d'erreurs binaires (BER) de chaque utilisateur :

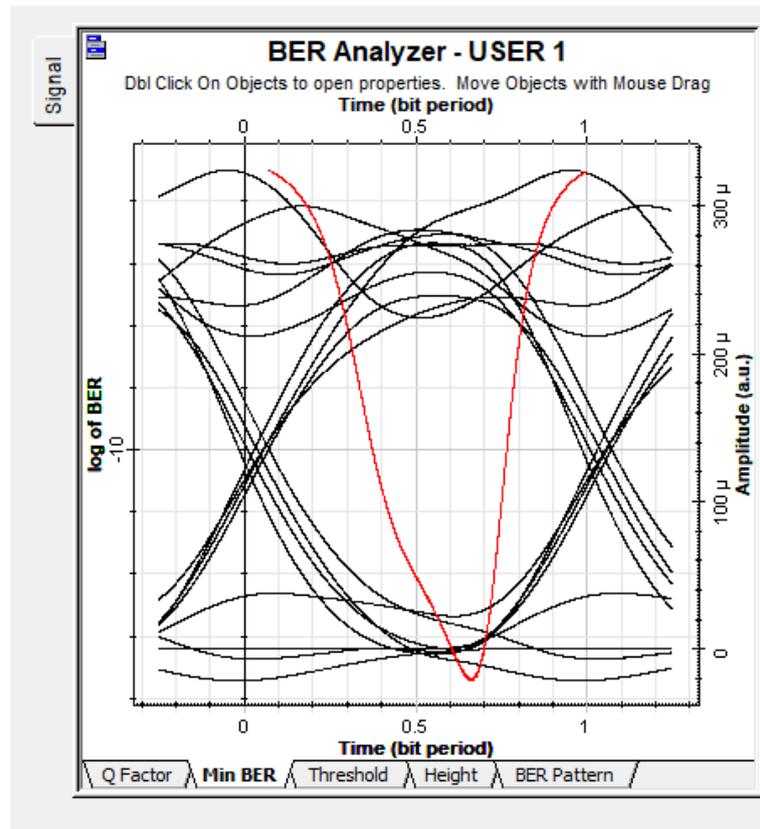


Figure III. 18: Diagramme d'œil et BER de premier utilisateur (L=10 km)

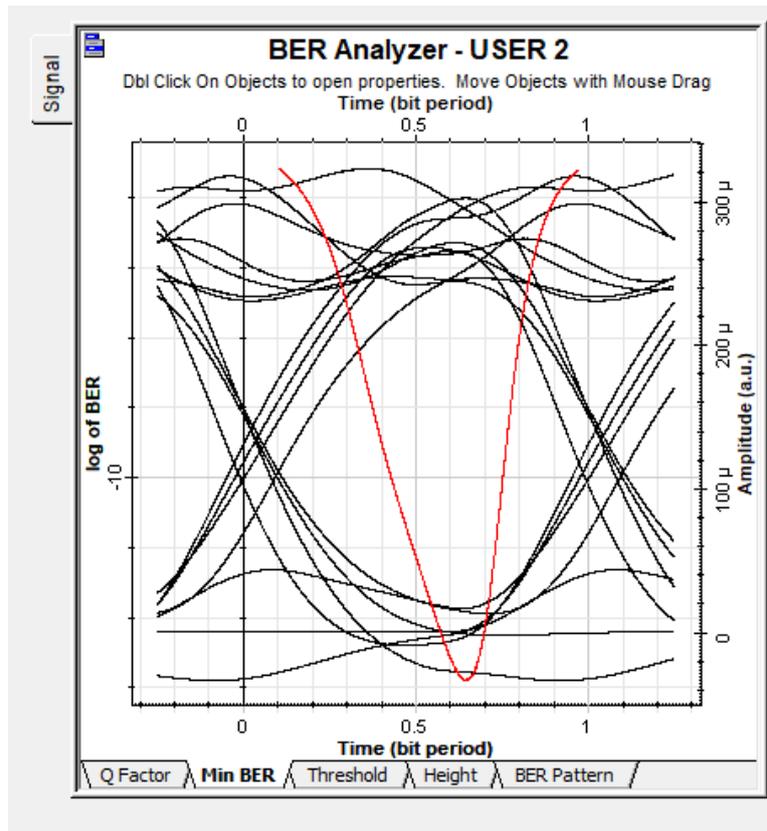


Figure III. 19 : Diagramme d'œil et BER de deuxième utilisateur (L=10 km)

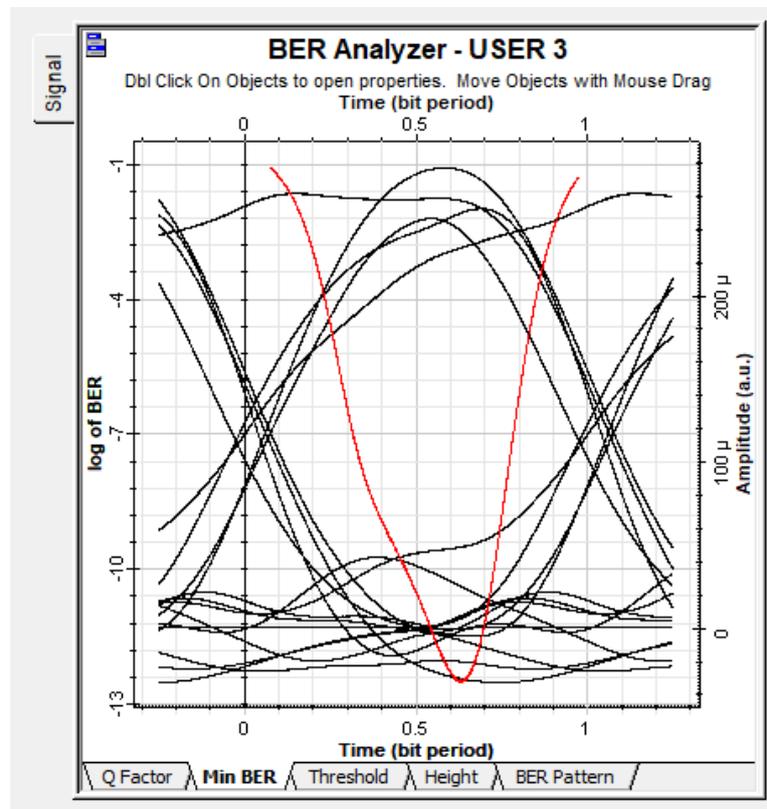


Figure III. 20 : Diagramme d'œil et BER de troisième utilisateur (L=10 km)

D'après les résultats obtenus, nous constatons une transmission de bonne qualité. Les diagrammes de l'œil montrent une ouverture satisfaisante pour tous les utilisateurs. Les valeurs du taux d'erreur binaire sont acceptables, avec un taux d'erreur binaire inférieur à «  $10^{-9}$  ». Ces valeurs peuvent légèrement varier d'un utilisateur à l'autre en raison de l'influence des bits « 1 » lorsqu'ils sont successifs, qui est liée aux codes qui leur sont assignés.

### III.13. Impact de la bande passante des réseaux de Bragg sur les performances du système

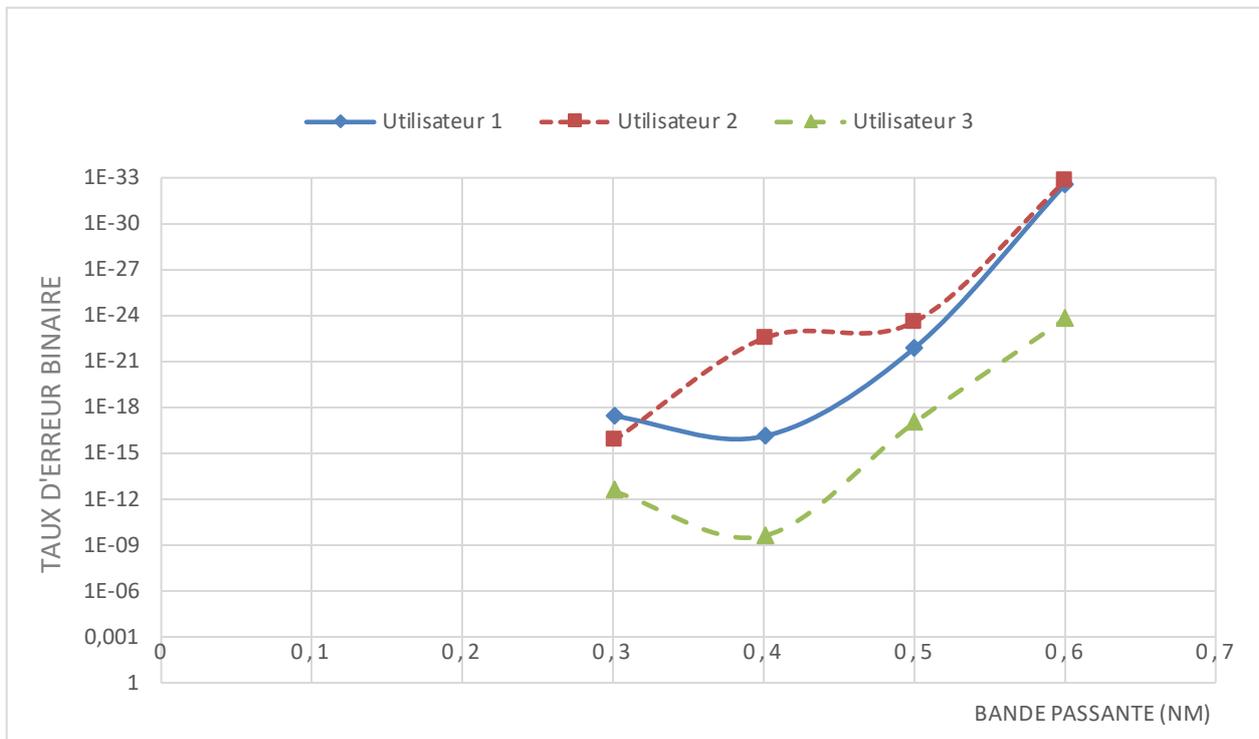
Nous examinons d'abord l'influence de la variation de la bande passante des réseaux de Bragg sur le taux d'erreurs binaires (BER). L'étude de cette influence est importante pour comprendre l'impact des réseaux de Bragg sur les performances du système SAC-OCDMA et pour déterminer les paramètres optimaux de la bande passante des réseaux de Bragg afin d'obtenir des performances optimales du système.

Les résultats obtenus des mesures du taux d'erreurs binaires (BER) pour chaque utilisateur sont présentés dans le tableau suivant :

La Bande passante (K $\mu$ m)		0,3	0,4	0,5	0,6
Taux d'Erreur Binaire « BER »	User 1	$3,661 \cdot 10^{-18}$	$7,801 \cdot 10^{-17}$	$1,339 \cdot 10^{-22}$	$2,74 \cdot 10^{-33}$
	User 2	$1,575 \cdot 10^{-16}$	$3,074 \cdot 10^{-23}$	$2,560 \cdot 10^{-14}$	$1,694 \cdot 10^{-33}$
	User 3	$3,029 \cdot 10^{-13}$	$2,505 \cdot 10^{-10}$	$9,98 \cdot 10^{-18}$	$1,676 \cdot 10^{-24}$

**Tableau III. 5:** Évolution du BER par rapport la bande passante

Les données du tableau III.5 peuvent être représentées graphiquement sous forme des courbes, comme illustré dans la figure suivante :



**Figure III. 21:** Courbe d'évolution de BER en fonction de variation de bande passante

### III.13.1 Interprétation des résultats

Les courbes présentées illustrent l'influence de la bande passante des réseaux de Bragg à fibre (UFBGs) sur les performances d'un système utilisant une fibre monomode de 10 km et un débit binaire de 200 Mbits/s. parmi les différentes largeurs de bande passante des FBGs testées, une valeur de 0,6 nm offre les meilleures performances en termes de taux d'erreurs binaires pour les trois utilisateurs. À cette valeur, les taux d'erreurs binaires sont réduits au minimum, ce qui signifie que la transmission des données est plus fiable. Par conséquent, la configuration du système avec une bande passante de 0,6 nm des UFBGs est particulièrement adaptée pour garantir une transmission efficace et fiable des données dans le contexte spécifique de ce système SAC-OCDMA.

### III.14. Impact du débit binaire sur les performances du système

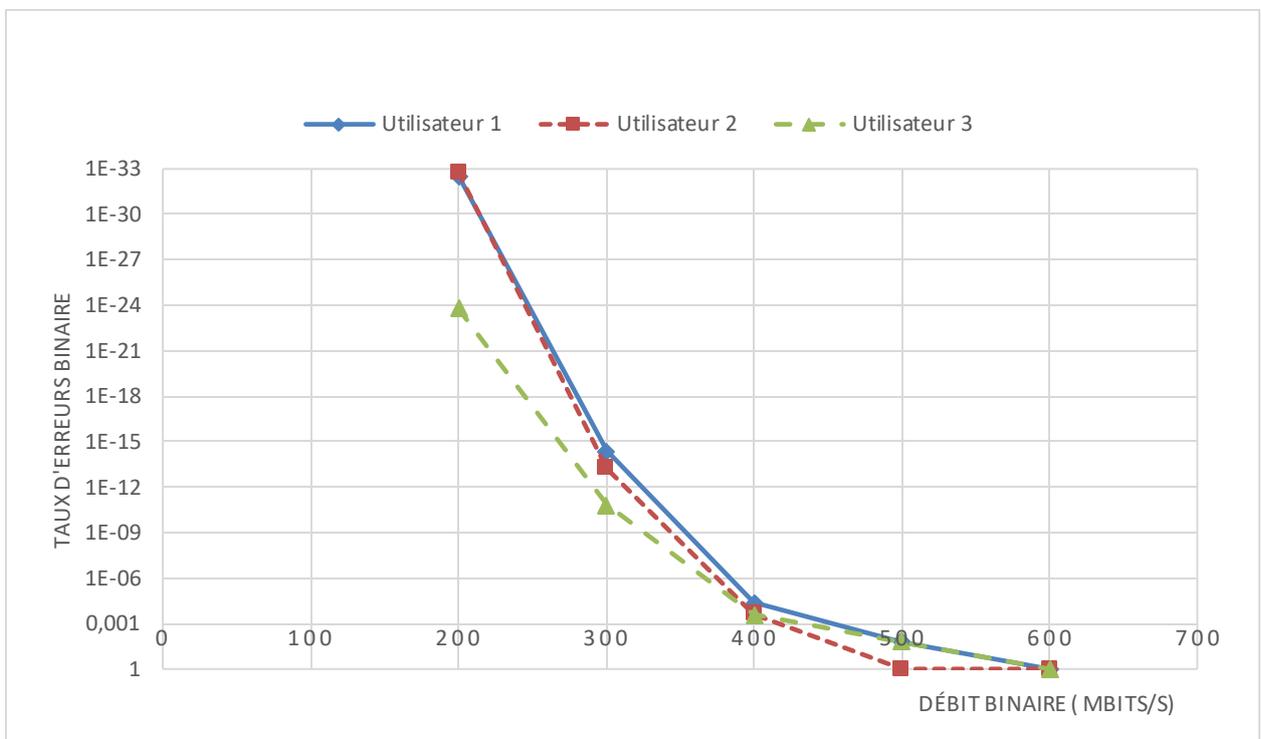
En pratique, il est nécessaire de sélectionner un débit suffisamment élevé pour transmettre un maximum d'informations, tout en évitant une saturation excessive de la fibre optique. Il s'agit donc de trouver un équilibre entre un débit élevé et la capacité de la fibre optique.

Nous étudions l'impact du débit binaire en fixant la puissance d'émission -100 dBm, la bande passante 0,6 nm et la longueur de la fibre 10 km. Les résultats obtenus des mesures du taux d'erreurs binaires (BER) et du facteur de qualité pour chaque utilisateur sont présentés dans le tableau suivant :

Débit Binaire « Mbits/s »		200	300	400	500	600
Taux d'erreur binaire « BER »	User 1	$2,74 \cdot 10^{-33}$	$4,31 \cdot 10^{-15}$	$4,375 \cdot 10^{-5}$	$1,602 \cdot 10^{-2}$	1
	User 2	$1,694 \cdot 10^{-33}$	$5,418 \cdot 10^{-14}$	$2,386 \cdot 10^{-4}$	1	1
	User 3	$1,676 \cdot 10^{-24}$	$1,586 \cdot 10^{-11}$	$2,85 \cdot 10^{-4}$	$1,614 \cdot 10^{-2}$	1

**Tableau III. 6:** Évolution du BER par rapport le débit binaire

Les données du tableau III.6 peuvent être représentées graphiquement sous forme des courbes, comme illustré dans la figure suivante :



**Figure III. 22:** Courbe d'évolution de BER en fonction de variation de débit binaire

### III.14.1 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus révèlent que le taux d'erreur binaire du système SAC-OCDMA se dégradent à mesure que le débit binaire augmente. Dans notre étude, il a été constaté qu'il est possible d'atteindre un débit de 300 Mbits/s par canal, ce qui donne un débit total de  $3 \times 300$  Mbits/s. Au-delà de cette valeur (300 Mbits/s), le taux d'erreur binaire (BER) dépasse «  $10^{-9}$  ». L'augmentation du débit binaire rend le système SAC-OCDMA plus sensible aux effets non linéaires lors de la propagation des impulsions dans la fibre optique. Cela est dû à la réduction de

la durée temporelle entre les impulsions et à l'interaction de la dispersion chromatique de la fibre avec les effets de diaphonie, ce qui entraîne une diminution de l'efficacité spectrale.

### III.15. Impact de la puissance optique sur les performances du système

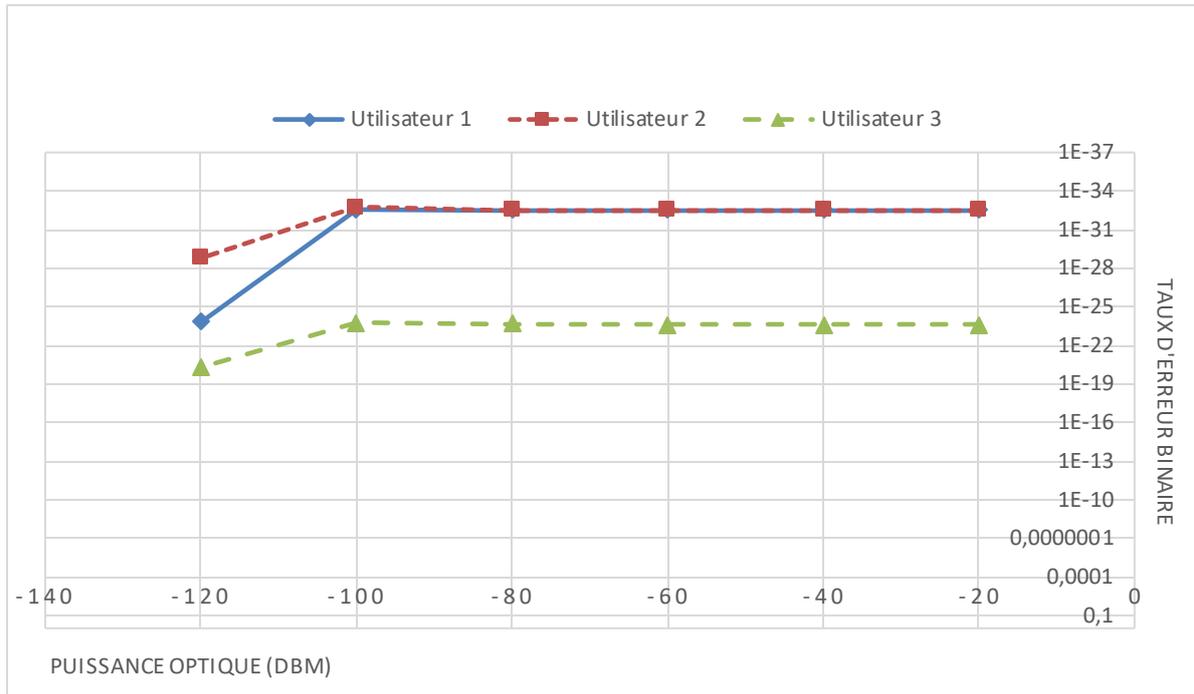
La sélection de la puissance de la source optique (White Light Source) est un choix stratégique en raison de ses implications sur des facteurs tels que la complexité de la fabrication et les coûts associés. Dans notre cas, nous utilisons une source optique large bande avec différentes puissances pour déterminer celle qui convient le mieux à notre système SAC-OCDMA avec un débit de 200 Mbits/s pour une distance de 10 km et une bande passante de 0.6 nm.

Les résultats obtenus des mesures du taux d'erreurs binaires (BER) pour chaque utilisateur sont présentés dans le tableau suivant :

La puissance optique « dBm »		-120	-100	-80	-60	-40	-20
Taux d'erreur binaire « BER »	User 1	$1,604 \cdot 10^{-24}$	$2,74 \cdot 10^{-33}$	$3,07 \cdot 10^{-33}$	$3,179 \cdot 10^{-33}$	$3,191 \cdot 10^{-33}$	$3,192 \cdot 10^{-33}$
	User 2	$1,67 \cdot 10^{-29}$	$1,694 \cdot 10^{-33}$	$2,848 \cdot 10^{-33}$	$3,021 \cdot 10^{-33}$	$3,039 \cdot 10^{-33}$	$3,041 \cdot 10^{-33}$
	User 3	$5,101 \cdot 10^{-21}$	$1,676 \cdot 10^{-24}$	$2,29 \cdot 10^{-24}$	$2,383 \cdot 10^{-24}$	$2,392 \cdot 10^{-24}$	$2,393 \cdot 10^{-24}$

Tableau III. 7: Évolution du BER par rapport la puissance optique

Les données du tableau III.7 peuvent être représentées graphiquement sous forme des courbes, comme illustré dans la figure suivante :



**Figure III. 23:** Courbe d'évolution de taux de BER en fonction de variation de la puissance optique

### III.15.1 Interprétation des résultats

Selon les résultats obtenus, nous constatons que le taux d'erreur binaire (BER) reste constant à partir d'une puissance optique égale à -100 dBm. Cependant, lorsque la puissance optique est inférieure à -100 dBm peut entraîner une augmentation du niveau de bruit et des interférences, ce qui se traduit par une augmentation du taux d'erreur binaire (BER). Les détecteurs de réception peuvent avoir des difficultés à différencier les niveaux de signal corrects des niveaux de bruit, ce qui conduit à des erreurs de détection. Par conséquent, Afin d'assurer une bonne qualité de transmission tout en minimisant la consommation d'énergie, nous avons opté pour une puissance optique de -100 dBm. À cette puissance, nous obtenons une transmission fiable avec un taux d'erreur binaire (BER) optimal. De plus, cette puissance est suffisante pour permettre une détection précise du signal par le récepteur optique, tout en évitant une consommation excessive d'énergie.

### III.16. Impact de nombre d'utilisateur sur les performances du système

Nous configurons le système SAC-OCDMA avec deux utilisateurs actifs et le troisième utilisateur désactivé avec un débit 200 Mbits/s, la puissance d'émission -100 dBm, bande passante 0.6 nm et la longueur de la fibre 10 km, cela nous permettra de déterminer l'effet du nombre

d'utilisateurs sur les performances globales du système. Les résultats obtenus des mesures du taux d'erreur binaire (BER) pour chaque utilisateur sont présentés dans le tableau suivant :

Utilisateur	User 1	User 2	User 3
Taux d'Erreur Binaire « BER »	9,614 10 <sup>-37</sup>	3,03 10 <sup>-67</sup>	Éteint
	Éteint	1,097 10 <sup>-84</sup>	3,465 10 <sup>-45</sup>
	4,456 10 <sup>-72</sup>	Éteint	3,418 10 <sup>-37</sup>

**Tableau III. 8:** Evaluation de BER des trois utilisateurs

### III.16.1 Interprétation des résultats

D'après les résultats représentés dans le tableau précédant, nous observons que lorsque l'un des utilisateurs est éteint, les valeurs du taux d'erreurs binaires (BER) diminuent. Cela indique qu'en réduisant le nombre d'utilisateurs actifs dans le système SAC-OCDMA, la qualité de la transmission s'améliore, ce qui se traduit par une probabilité plus faible d'erreurs de bits. Par contre, lorsque le nombre d'utilisateurs augmente, la demande de ressources partagées telles que la bande passante et la puissance optique augmente également. Cela dû une augmentation du niveau de diaphonie entre les signaux des différents utilisateurs, ce qui peut rendre plus difficile la détection et la récupération des données.

### III.17. Impact de la longueur de la fibre optique sur les performances du système

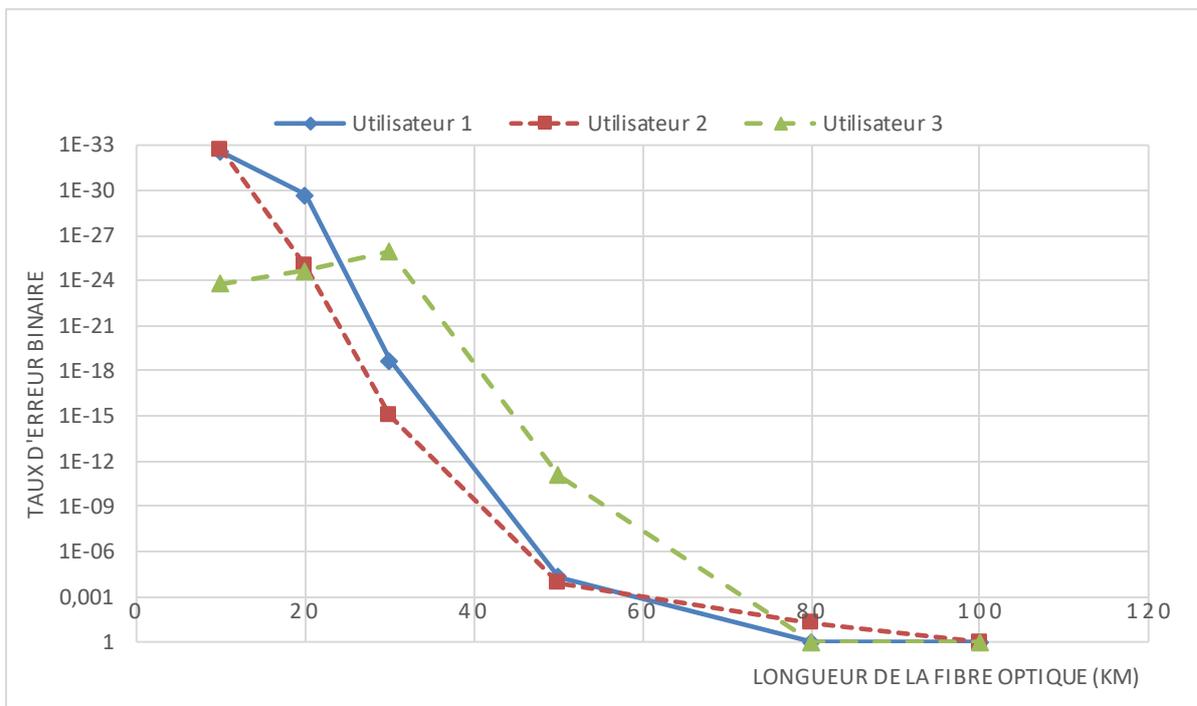
Nous étudions l'impact de la longueur de la fibre optique sur les performances du système, en particulier sur le taux d'erreur binaire (BER) en fixant la puissance d'émission -100 dBm, bande passante 0.6 nm et le débit 200 Mbits/s.

Les résultats obtenus des mesures du taux d'erreur binaire (BER) pour chaque utilisateur sont présentés dans le tableau suivant :

Longueur de la fibre (Km)		10	20	30	50	80	100
Taux d'Erreur Binaire « BER »	User 1	$2,74 \cdot 10^{-33}$	$1,94 \cdot 10^{-30}$	$2,011 \cdot 10^{-19}$	$4,655 \cdot 10^{-5}$	1	1
	User 2	$1,694 \cdot 10^{-33}$	$10,545 \cdot 10^{-26}$	$8,275 \cdot 10^{-16}$	$1,234 \cdot 10^{-4}$	$5,468 \cdot 10^{-2}$	1
	User 3	$1,676 \cdot 10^{-24}$	$2,295 \cdot 10^{-25}$	$1,155 \cdot 10^{-26}$	$8,219 \cdot 10^{-12}$	1	1

**Tableau III. 9:** Évolution du BER par rapport la longueur de la fibre optique

Les données du tableau III.9 peuvent être représentées graphiquement sous forme des courbes, comme illustré dans la figure suivante :



**Figure III. 24 :** Courbe d'évolution de BER en fonction de la longueur de la fibre des trois utilisateurs

Les figures suivantes illustrent les diagrammes de l'œil et le Taux d'erreurs binaire (BER) des trois utilisateurs pour une distance de transmission de 100 km :

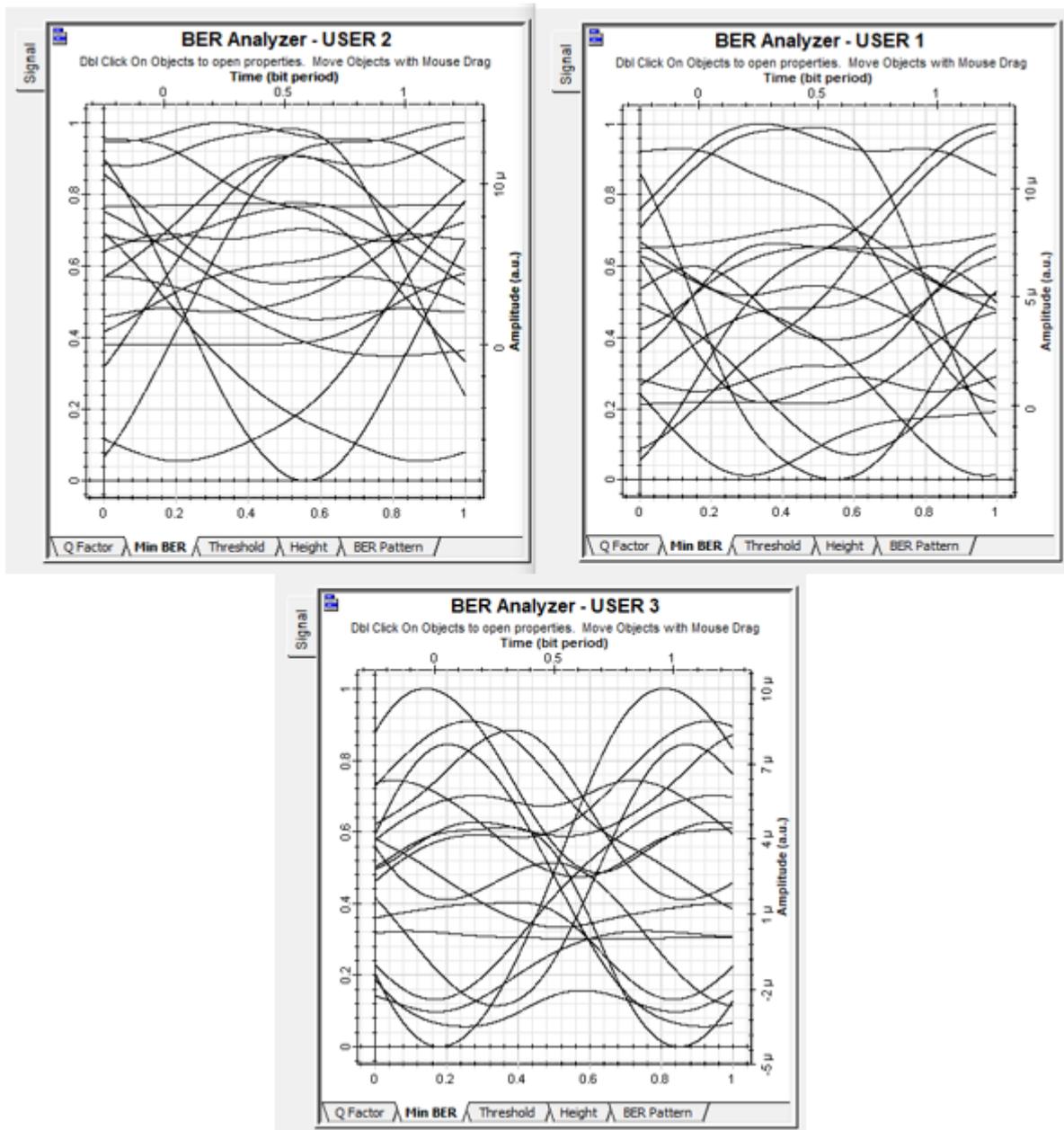


Figure III. 25: Diagramme d'œil des trois utilisateurs ( $L=100$  km)

### III.17.1 Interprétation des résultats

L'augmentation de la longueur de la fibre peut entraîner une atténuation du signal et une dispersion chromatique, ce qui peut dégrader la qualité de la transmission, cela se traduit par une augmentation du BER. Par conséquent, il est possible d'atteindre une distance maximale de 30 km tout en maintenant une qualité de transmission acceptable. L'analyse des diagrammes de l'œil révèle une différence significative dans l'ouverture de l'œil entre une distance de 100 km par rapport la distance de 10km. Cela confirme l'impact considérable de la longueur de la fibre sur les performances du système SAC OCDMA.

### III.17.2 Amélioration de la Topologie

La compensation de l'atténuation et de la dispersion dans les systèmes de transmission optique peut être réalisée en utilisant une fibre optique compensatrice (DCF) avec un coefficient de compensation de  $-72$  ps/nm/km et un amplificateur optique de type EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier).

La fibre optique compensatrice est utilisée pour compenser la dispersion chromatique qui correspond à la disparité des vitesses de propagation des différentes longueurs d'onde, ce qui peut entraîner un élargissement temporel du signal optique et une distorsion du signal. La fibre optique compensatrice est conçue pour avoir une dispersion chromatique opposée à celle de la fibre principale, ce qui permet de compenser la dispersion et de maintenir la qualité du signal.

L'amplificateur optique EDFA est utilisé pour compenser l'atténuation du signal optique qui se produit lors de la transmission sur de longues distances. Son principe repose sur l'amplification par pompage à l'aide d'une fibre dopée à l'erbium. L'EDFA amplifie le signal optique directement, sans avoir besoin de le convertir en signal électrique, ce qui permet de maintenir la qualité et la bande passante du signal.

En combinant l'utilisation d'une fibre optique compensatrice pour compenser la dispersion chromatique et d'un amplificateur optique EDFA pour compenser l'atténuation, il est possible d'améliorer les performances du système de transmission optique sur de longues distances. Cela permet de maintenir la qualité du signal et de maximiser la distance de transmission, tout en garantissant la fiabilité et la bande passante du système.

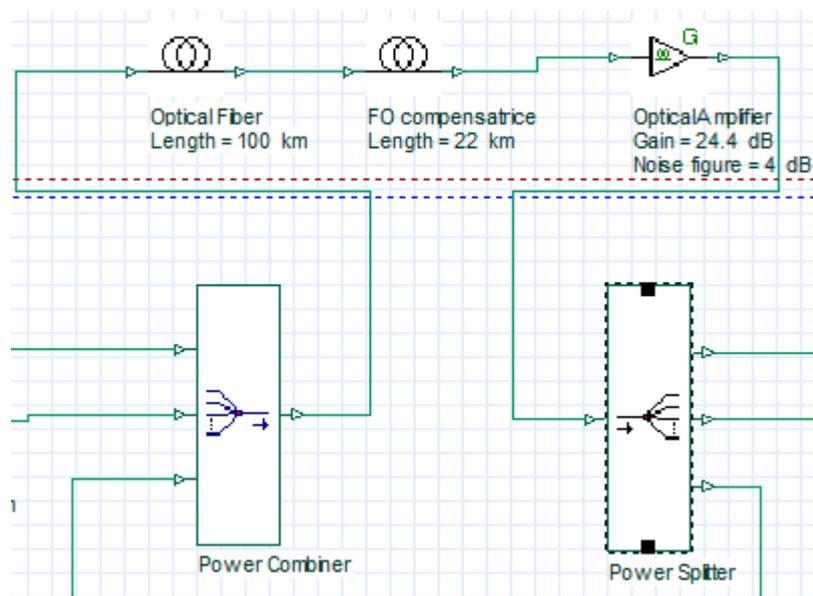


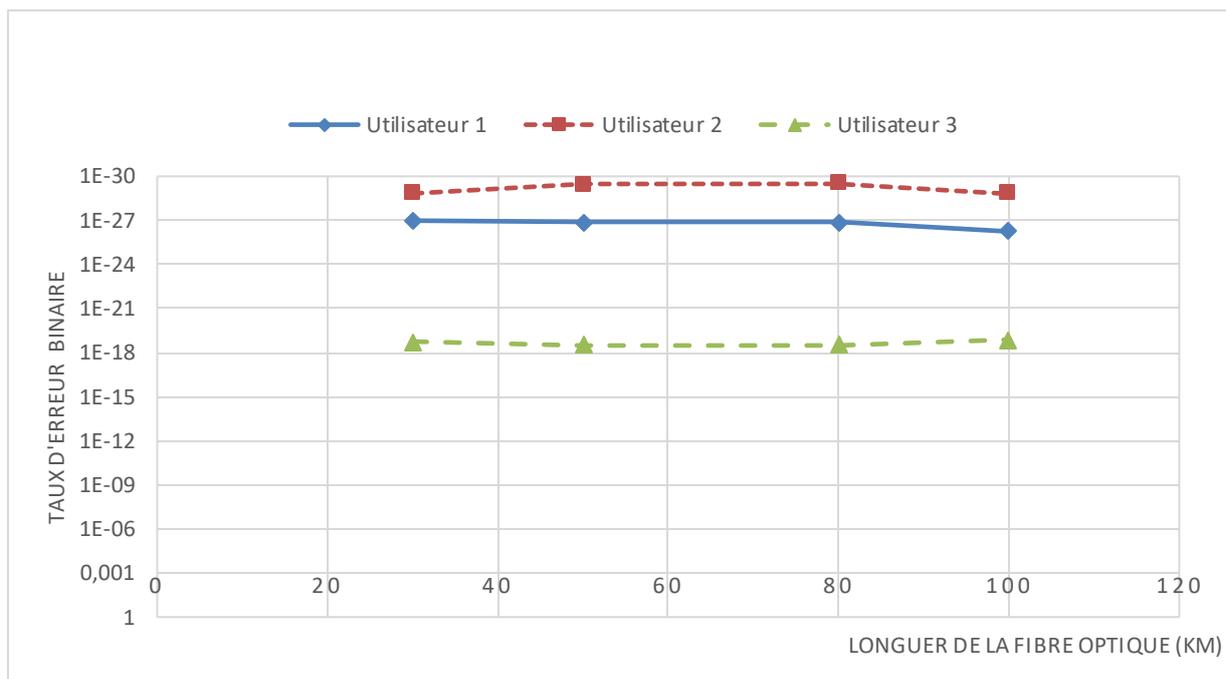
Figure III. 26 : Amélioration à l'aide d'un amplificateur EDFA et d'une fibre compensatrice

Les résultats obtenus des mesures du taux d'erreur binaire (BER) pour chaque utilisateur sont présentés dans le tableau suivant :

Longueur de la fibre (km)		30	50	80	100
Taux d'Erreur Binaire « BER »	User 1	$1,034 \cdot 10^{-27}$	$1,45 \cdot 10^{-27}$	$1,274 \cdot 10^{-27}$	$5,68 \cdot 10^{-27}$
	User 2	$1,47 \cdot 10^{-29}$	$3,467 \cdot 10^{-30}$	$3,265 \cdot 10^{-30}$	$1,419 \cdot 10^{-29}$
	User 3	$1,991 \cdot 10^{-19}$	$3,135 \cdot 10^{-19}$	$3,252 \cdot 10^{-19}$	$1,303 \cdot 10^{-19}$

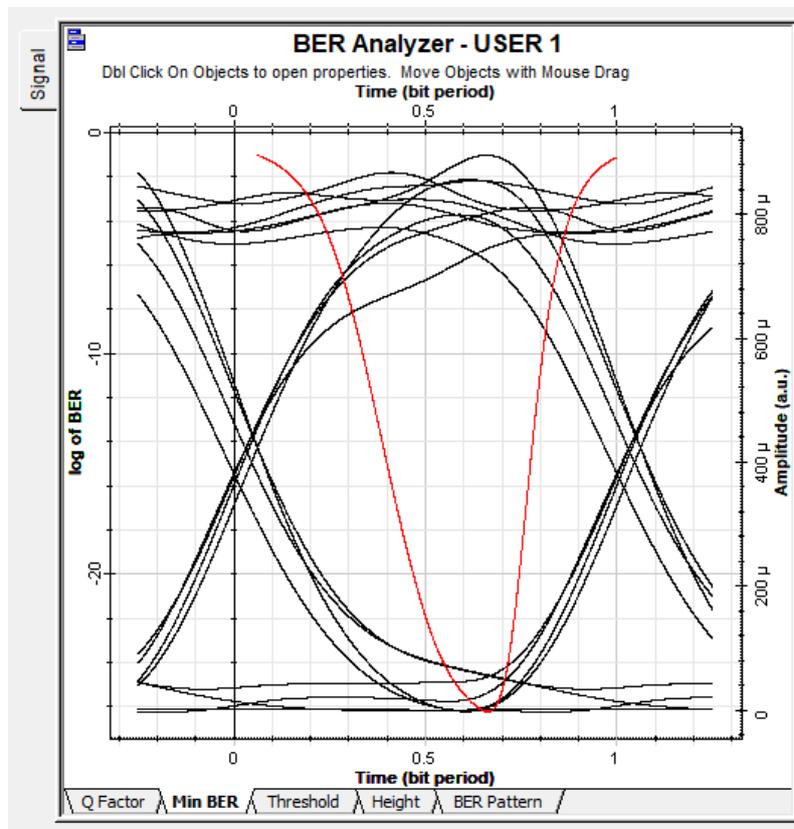
**Tableau III. 10:** Évolution du BER de la chaine améliorée

Les données du tableau III.10 peuvent être représentées graphiquement sous forme des courbes, comme illustré dans la figure suivante :



**Figure III. 27 :** Courbe de BER en fonction de variation de la longueur de la fibre pour la chaine améliorée

La figure ci-dessous montre les diagrammes de l'œil et les taux d'erreur binaire (BER) pour les trois utilisateurs après la compensation et l'amélioration du canal de transmission, sur une distance de 100 km.



**Figure III. 28:** Diagramme d'œil de premier utilisateurs ( $L=100$  km) après amélioration

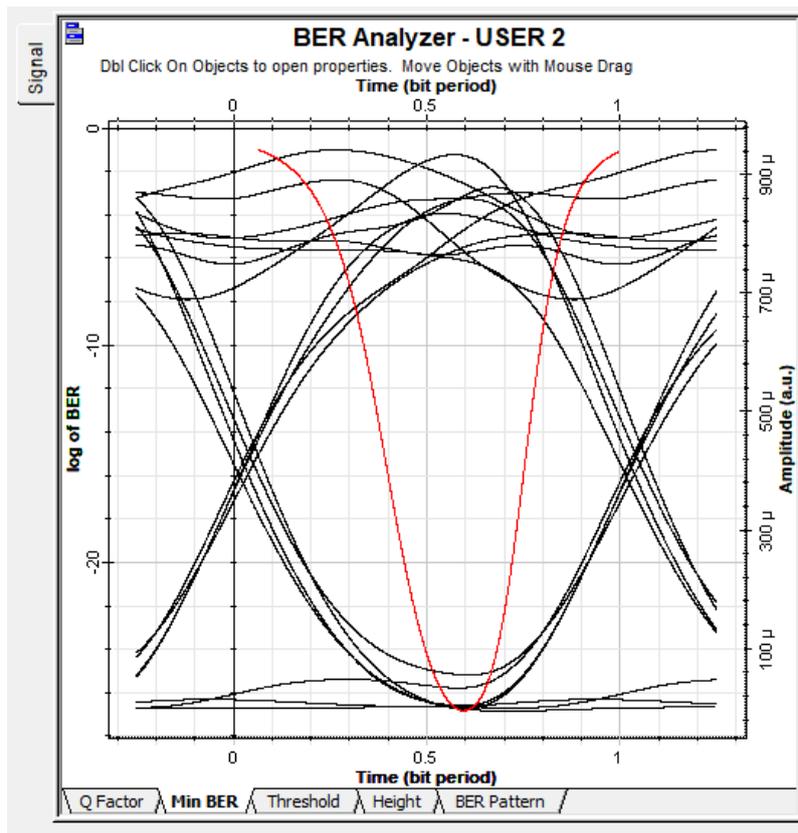


Figure III. 29 : Diagramme d'œil du deuxième utilisateur (L=100 km) après amélioration

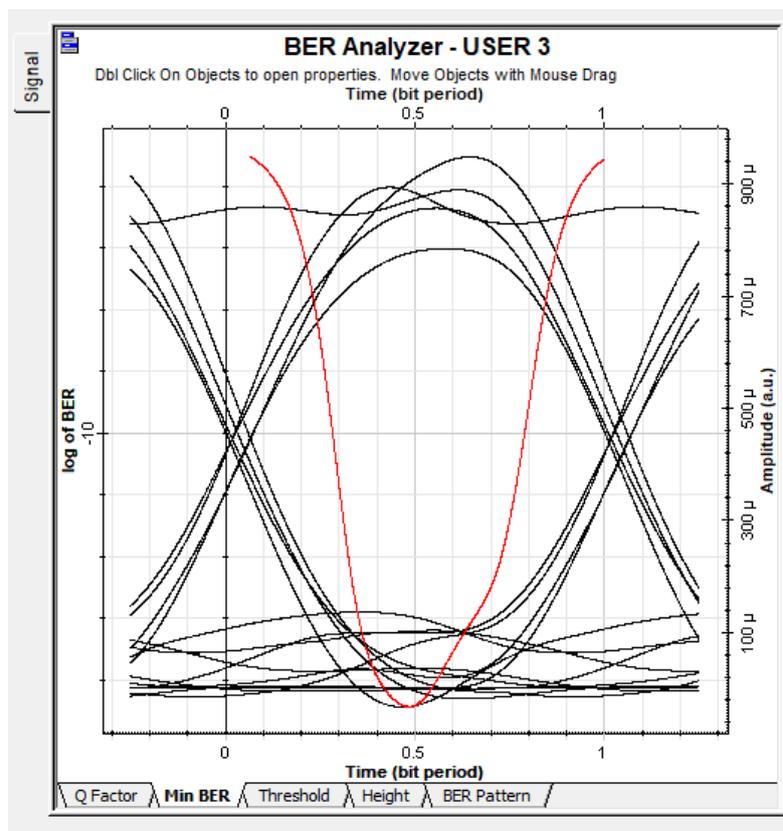


Figure III. 30 : Diagramme d'œil du troisième utilisateur (L=100 km) après amélioration

### **III.17.3 Interprétation des résultats**

Les résultats illustrent les améliorations apportées à la chaîne avec des composants optiques ont permis d'obtenir une transmission de haute qualité sur les longues distances. Cela était envisageable avec les courbes et les diagrammes de l'œil qui présentent une ouverture satisfaisante pour tous les utilisateurs, ce qui est un indicateur d'une bonne qualité de signal. Les valeurs de taux d'erreur binaire sont acceptables pour chaque utilisateur, ce qui confirme la fiabilité de la transmission. Par conséquent, une telle topologie peut être efficacement utilisée dans un réseau de transport.

### **III.18. Conclusion**

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté en détail la topologie du système SAC-OCDMA, en mettant en évidence les différents composants utilisés. Nous avons ensuite réalisé une simulation approfondie afin d'évaluer les performances de ce système, en utilisant des fibres à réseaux Bragg. Nous avons étudié l'effet des paramètres, tels que la bande passante des réseaux de Bragg, le débit binaire, la puissance optique, le nombre d'utilisateurs et la longueur de la fibre optique.

Ces résultats de simulation nous ont permis de mieux comprendre les performances du système SAC-OCDMA et d'identifier les mesures d'amélioration nécessaires pour une transmission efficace sur de longues distances. Cela nous offre des perspectives pour optimiser la chaîne optique et garantir des performances optimales dans diverses applications de communication optique.

## Conclusion générale

---

Ce travail de mémoire s'inscrit dans le domaine des réseaux optiques où la bande passante de la fibre optique est partagée entre plusieurs utilisateurs. L'objectif de ce mémoire est la conception et la simulation d'une technique CDMA sur une liaison optique en utilisant le logiciel OptiSystem, nous nous sommes intéressés à la technique d'accès multiple par répartition de code CDMA, le support essentiel de transmission considéré étant la fibre optique, cette technique représente une des solutions possibles pour le partage des ressources dans les réseaux optiques.

Notre système d'encodage spectral SAC-OCDMA s'appuyait sur l'utilisation de fibres à réseau de Bragg et comprenait trois utilisateurs. Les résultats obtenus ont mis en évidence des limitations concernant la bande passante, l'augmentation du débit binaire, la puissance optique et la longueur de la fibre.

Nous avons constaté que la technique CDMA représente une solution prometteuse pour maximiser l'utilisation de la bande passante de la fibre optique. Elle permet de partager efficacement les ressources entre plusieurs utilisateurs, ce qui peut contribuer à une utilisation plus efficace de l'infrastructure existante.

Pour accroître la distance de transmission tout en préservant une bonne qualité de signal, nous avons souligné l'importance du déploiement d'amplificateurs et de compensateurs de dispersion chromatique. Ces composants jouent un rôle crucial dans l'amélioration des performances des systèmes optiques.

Cette étude ouvre la voie à de futures recherches visant à résoudre les limitations identifiées et à affiner la conception des systèmes CDMA sur des liaisons optiques. Il serait judicieux d'explorer des stratégies visant à optimiser davantage la bande passante, à améliorer le débit binaire et à résoudre les limitations identifiées. De plus, l'exploration de nouvelles technologies et l'adaptation aux évolutions futures du domaine des réseaux optiques sont des pistes de recherche prometteuses.

Notre recherche offre une base solide pour des études ultérieures visant à améliorer l'efficacité et la performance des systèmes optiques exploitant la répartition de code CDMA. Elle met en lumière l'importance continue de l'innovation dans le domaine des réseaux optiques pour répondre aux besoins croissants de la communication à haute vitesse.

## Bibliographie

---

- [1] «[http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission\\_sur\\_fibre\\_optique/fibre.html](http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/fibre.html),» [En ligne].
- [2] J. L. Verneuil, «Simulation de Système De Télécommunications Par Fibre Optique A 40Gbit/s,» Université De Limoges, 2003.
- [3] G. Keiser, « G 2000 Optical fiber communication,» 3rd edition, New york, 2000.
- [4] en, «<http://html.rincondelvago.com/modelisation-des-transmissions-optiques-wdm.html>,» [En ligne].
- [5] G. F. R. a. F. Gnanagumthan, «Comparing FBG and DCF as dispersion in the long haul narrowband WDM systems,» s.l. : In Wireless and Optical Communications Networks, 2006.
- [6] B. Nassima, «Etude et optimisation d'une chaine de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD,» Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine-Metz, 2007.
- [7] «[https://www.researchgate.net/figure/Modulation-externe-Comparaison-entre-les-deuxmodulation-La-modulation-directe\\_fig8\\_305181019](https://www.researchgate.net/figure/Modulation-externe-Comparaison-entre-les-deuxmodulation-La-modulation-directe_fig8_305181019),» [En ligne].
- [8] N. Boudrioua, «etude et optimisation d'une chaine de transmission numérique sur fibre optique,» thèse doctorat, université Paul Verlaine-Metz, 2007.
- [9] B. Fongo Ouambo, «Optimisation d'un banc de test amplifier à 10Gbits/s pour l'étude des technologies avancées de transmission par fibre optique,» Université du QUEBEC, l'école supérieure, 15 janvier 2008.
- [10] A. A. P. Boyogueno Bende, «Etude sur l'amplification en ligne des systèmes de communication optique,» Montréal (Que) : IEEE Canadian Conférence on Electrical and Computer Engineering, Enligne,1995.
- [11] I. FSAIFES, «Encodage et decodage temporels "tout-optique" à réseaux de Bragg pour l'accès multiple,» thèse, TELECOM PARIS, 2007.
- [12] N. M. SAAD, «Contribution a l'étude de l'application de la technique CDMA aux systèmes de transmission optique,» université de Limoges, thèse, 2005.
- [13] S. ARNON, «Advanced optical wireless communication systems,» Cambridge university press, Phd thesis, 2012.

- [14] M. MORELLE, «CODAGE EN 2 DIMENSIONS POUR LES SYSTEMS DE COMMUNICATION OPTIQUE CDMA (OCDMA) APPLICATION AUX TRANSMISSION MULTIMEDIA,» THESE, UNIVERSITE DE LIMOGES, 2008.
- [15] K. m. Khater yasser, «Technique OCDMA : Applications dans les réseaux de communications optiques,» Université abou-bakr belkaid, telemcen, 2020.
- [16] L. MOUNIA, «CDMA à séquence directe appliqué aux systèmes de communications optiques,» Telecom ParisTech, 2005.
- [17] Y. ZOUINE, «Contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant la technique CDMA,» Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2005.
- [18] d. h. e. b. zohra, «etude et simulation du système OCDMA optique ainsi que l'influence des réseaux de Bragg,» université dr. tahar moulay, saida, 2020.
- [19] N. M. S. A. N. A. M. ALHASSAN, «An Enhanced Detection Technique for Spectral Amplitude Coding Optical CDMA Systems,» Vol 23, no. 13, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2011.
- [20] «<https://www.viavisolutions.com/fr-fr/produits/test-de-taux-derreur-de-bits-bert>,» [En ligne].