

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLAB Blida-1



Institut d'aéronautique et des études Spatiales



Département des études spatiales

MASTER PFE

SPÉCIALITÉ : Télécommunication Spatiale.

Intitulé

**Etude comparatif de la technique WDM dans la
telecommunication optique aux modulation RZ/NRZ**

Présent par :

BOUMAIZA Ahmed

BENDOU Chifa Ikram

Encadrant :

Mr. KRIM Mohamed

Promotion 2023-2024

Résumé

Les systèmes de télécommunication optique avancée jouent un rôle essentiel dans les télécommunications modernes, permettant la transmission rapide des données à haut débit à travers le monde. Le choix de la modulation, notamment entre NRZ (Non-Return-to-Zero) et RZ (Return-to-Zero), est crucial pour les réseaux WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network), car un bon choix peut optimiser les performances du réseau, améliorer la qualité de transmission et minimiser les erreurs. Ces systèmes évoluent pour répondre aux demandes croissantes de connectivité et de vitesse, exploitant des techniques avancées comme le multiplexage optique WDM-PON à haut débit. Cette tendance en plein essor ouvre de nouvelles opportunités, permettant aux réseaux de télécommunication d'améliorer considérablement les performances globales.

L'objectif de cette mémoire est d'étudier l'impact de la longueur de la fibre et des techniques de modulation NRZ et RZ sur les performances des réseaux WDM-PON en utilisant le logiciel OptiSystem

Les mots clés : Télécommunication ; optique ; modulation ; NRZ ; RZ ; multiplexage ;
WDM-PON.

Abstract

Advanced optical telecommunication systems play a crucial role in modern telecommunications, enabling the rapid transmission of high-speed data worldwide. The choice of modulation, particularly between NRZ (Non-Return-to-Zero) and RZ (Return-to-Zero), is critical for WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network) networks, as a good choice can optimize network performance, improve transmission quality, and minimize errors. These systems evolve to meet the growing demands for connectivity and speed, leveraging advanced techniques such as high-speed WDM-PON optical multiplexing. This burgeoning trend opens new opportunities, allowing telecommunication networks to significantly enhance overall performance.

The objective of this dissertation is to study the impact of fiber length and NRZ and RZ modulation techniques on the performance of WDM-PON networks using OptiSystem software.

Key words: Telecommunication; optical; modulation; NRZ; RZ; multiplexing;
WDM-PON.

الملخص

تلعب أنظمة الاتصالات البصرية المتقدمة دورًا أساسيًا في مجال الاتصالات، حيث تُعدّ مهمة تلعب أنظمة الاتصالات البصرية المتقدمة دورًا حاسمًا في الاتصالات الحديثة، حيث تمكن من نقل البيانات بسرعة عالية في جميع أنحاء العالم. يعد اختيار التشكيل، لا سيما بين NRZ (غير العودة إلى الصفر) و RZ (العودة إلى الصفر)، أمرًا حاسمًا لشبكات WDM-PON (التقسيم المتعدد للأطوال الموجية - الشبكة البصرية السلبية)، حيث يمكن للاختيار الجيد تحسين أداء الشبكة، وتحسين جودة النقل، وتقليل الأخطاء. تتطور هذه الأنظمة لتلبية الطلبات المتزايدة على الاتصال والسرعة، مستفيدة من التقنيات المتقدمة مثل التعدد البصري عالي السرعة WDM-PON. يفتح هذا الاتجاه المتزايد فرصًا جديدة، مما يسمح لشبكات الاتصالات بتحسين الأداء العام بشكل كبير.

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة تأثير طول الألياف وتقنيات تعديل NRZ و RZ على أداء شبكات WDM-PON باستخدام برنامج OptiSystem .

الكلمات المفتاحية: الاتصالات؛ البصرية؛ التشكيل؛ NRZ؛ RZ؛ التعدد البصري؛

.WDM-PON

Remercîment

J'offre ma grande gratitude à ALLAH qui m'a aidé à faire ce travail.

Je remercie mon promoteur **Mr.KRIM Mohamed** pour les efforts qu'il a déployés, pour m'aider, conseiller, encourager et corriger.

Je voudrais remercier les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je remercie aussi tout le corps enseignant dans le département des études spatiale qui contribué à ma formation universitaire.

En fin, Je remercie tous ceux de près ou de loin qu'ont contribué à la réalisation de ce travail. Trouvent ici ma sincère reconnaissance.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail, à mes parents, à ma source de générosité

Et de patience tout au long de ma carrière scolaire.

Que Dieu vous protèges, vous prêtez bonne santé et longue vie.

A mes sœurs et toute ma famille.

Aux personnes qui m'ont accompagné durant mon cursus universitaire,

À mes amies pour ses encouragements permanents.

Boumaiza Ahmed

*Je dédie ce modeste travail, à mes parents, ma mère, à ma source de
générosité*

*Et de patience tout au long de ma carrière scolaire. Que Dieu vous
protèges, vous prêtez bonne santé et longue vie.*

*A mes frères et mes sœurs (radja et wissal) à sa petite famille, qui
m'ont toujours indiqué*

La bonne voie et qui ont su m'aider.

Aux personnes qui m'ont accompagné durant mon cursus universitaire,

À mes amies pour ses encouragements permanents.

Bendou Chifa Ikram

Table Des Matières

Résumé	1
Abstract.....	2
المخلص	3
Remercîment.....	4
Dédicace.....	5
Table Des Figures	10
Liste Des Tableaux	12
Liste Des Acronymes	13
Introduction Générale.....	15
Chapitre I : La fibre optique	16
I.1.Introduction	17
I.2.Historique.....	18
I.3.Définition.....	19
I.4.La fabrication de la fibre optique	19
I.4.1.La préforme.....	20
I.4.2.Le fibrage.....	20
I.4.3.Le polissage	20
I.5.Fonctionnement de la fibre optique.....	21
I.6.Avantages des fibres optiques	23
I.7.Inconvénients des fibres optiques	23
I.8.Types de câbles à fibre optique	24
I.8.1.Monomode	24
I.8.2.Multimode.....	25
I.9.Les applications de la fibre optique.....	25
I.10. Conclusion	27

Chapitre II : La technologie WDM /PON	28
II.1. Introduction.....	29
II.2. Le multiplexage WDM	29
II.3. Principe de la WDM	30
II.4. Fonctionnement de WDM	32
II.5. Types de systèmes WDM	32
II.5.1. DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).....	32
II.5.2. CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing).....	35
II.5.3. U-DWDM (Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing).....	37
II.5.4. WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing).....	37
II.6. La différence entre CWDM et DWDM	38
II.7. Différents composants d'un système WDM	39
II.8. Augmentation en capacité d'un système WDM	40
II.9. L'utilisation de la WDM dans les réseaux à fibre optique	41
II.10. Les réseaux PON et les techniques de multiplexage hybrides	41
II.11. Les réseaux optiques passifs (PON)	42
II.11.1. L'architecture point à point (P2P)	42
II.11.2. Architecture point à multipoint active (P2M).....	43
II.11.3. Architecture point à multipoint passive (P2M-PON).....	43
II.12. Différentes topologies du réseau PON.....	44
II.13. Multiplexage WDM/PON.....	45
II.14. Les techniques du multiplexage hybride	47
II.14.1. Le système hybride OTDM/WDM-PON	48
II.14.2. Le système hybride OCDMA/WDM-PON	49
II.14.3. Le système hybride OFDMA/WDM-PON.....	50
II.15. Conclusion	51

Chapitre III : WDM avec modulation RZ/NRZ.....	52
III.1. Introduction.....	53
III.2. Les différents codes en ligne	54
III.3. Code NRZ (non-retour à zéro)	55
III.3.1. NRZ unipolaire.....	56
III.3.2. NRZ (bi)polaire.....	57
III.3.3 NRZ-I.....	58
III.3.4 Facteur de qualité Q de format NRZ.....	58
III.3.5 Taux d'erreur binaire de format NRZ.....	59
III.3.6 OSNR de format NRZ.....	59
III.3.7 La puissance du Laser de format NRZ.....	59
III.4. Domaine d'utilisation et caractéristique de format NRZ.....	60
III.5. Avantage du code NRZ.....	60
III.6. Inconvénient du code NRZ.....	61
III.7. Code RZ (retourne à zéro).....	61
III.7.1 RZ (unipolaire).....	61
III.7.2 RZ (Bipolaire)	62
III.8. Domaine d'utilisation et caractéristique de format RZ	62
III.9. Avantage du code RZ.....	62
III.10. Inconvénient du code RZ Erreur ! Signet non défini	63
III.11. Comparaison entre les différents schémas de codage de ligne.....	63
III.12. Conclusion	64
 Chapitre IV : Simulation et interprétations Des résultats	 57
IV.1. Introduction.....	66
IV.2. Etude du système WDM-PON.....	66

IV.2.1.Description du système simulé	66
IV.2.2.Paramètres de simulation :	68
IV.2.3.Etude de l'impact de la longueur de la liaison et de la puissance sur le système...69	
IV.2.4.Etude de l'impact du format de modulation sur le système WDM-PON	73
IV.3. Programme	75
Conclusion générale	80
Bibliographie.....	81

Table Des Figures

Figure I. 1 : Couverture mondiale de la fibre optique.....	17
Figure I. 2 : La forme physique du fil de fibre optique	18
Figure I. 3 : Fonctionnement de la fibre optique	21
Figure I. 4 : Type de fibre monomode.....	24
Figure I. 5 : Type de fibre optique multimode	25
Figure II. 1 : Le système de base de la WDM.....	29
Figure II. 2 : Le principe du multiplexage WDM	30
Figure II. 3 : Principe du multiplexage et démultiplexage par réseau de diffraction.	31
Figure II. 4 : Principe de multiplexage en longueur d'onde.....	31
Figure II. 5 : Schéma de principe du multiplexage en longueur d'onde	32
Figure II. 6 : Longueurs d'ondes DWDM (bande C et L).....	33
Figure II. 7 : Principe du Multiplexage CWDM	35
Figure II. 8 : Espacement des canaux.....	39
Figure II. 9 : Les différents composants d'un système WDM.....	40
Figure II. 10 : Architecture point à point d'un réseau d'accès optique	42
Figure II. 11 : Architecture point à multipoint actif d'un réseau d'accès optique.	43
Figure II. 12 : Architecture point à multipoint passif d'un réseau d'accès optique	44
Figure II. 13 : Les topologies d'un réseau PON.....	45
Figure II. 14 : Architecture typique du WDM PON	47
Figure II. 15 : Architecture typique en aval du système hybride OTDM/WDM-PON.....	48
Figure II. 16 : Architecture typique en aval du système hybride OCDMA/WDM-PON.....	49
Figure II. 17 : Architecture typique en aval du système hybride OFDMA/WDM-PON.	50
Figure III. 1 : rincipe de codage en ligne	54
Figure III. 2 : Schéma de principe d'une modulation externe ici.....	55
Figure III. 3 : Impulsion du code NRZ $g(t)$	56
Figure III. 4 : Chronogramme du code NRZ unipolaire	56
Figure III. 5 : Chronogramme du code NRZ bipolaire	57
Figure III. 6 : Chronogramme du code NRZ I	57
Figure III. 7 : Schéma du code RZ.....	61

Figure III. 8 : Impulsion de code RZ $g(t)$	61
Figure III. 9 : Chronogramme du code RZ unipolaire	62
Figure III. 10 : Chronogramme du code RZ bipolaire	62
Figure III. 11 : Comparaison des schémas de code	64
Figure IV. 1 : Schéma du système WDM-PON pour quatre utilisateurs (OLT).....	67
Figure IV. 2 : Schéma du système WDM-PON pour quatre utilisateurs (ONU).....	67
Figure IV. 3 : Diagramme de l'œil pour $L = 20$ km (WDM-PON Downstream).....	69
Figure IV. 4 : Diagramme de l'œil pour $L = 20$ km (WDM-PON Upstream).....	70
Figure IV. 5 : Diagramme de l'œil pour $L = 60$ km (WDM-PON Downstream).....	70
Figure IV. 6 : Diagramme de l'œil pour $L = 60$ km (WDM-PON Upstream).....	71
Figure IV. 7 : Facteur de qualité Q en fonction de la longueur L	71
Figure IV. 8 : TEB en fonction de la longueur L	72
Figure IV. 9 : OSNR en fonction de la longueur L	72
Figure IV. 10 : Facteur de qualité Q en fonction de la puissance du Laser.....	73
Figure IV. 11 : Diagramme de l'œil pour $L = 20$ km (RZ-WDM-PON Downstream).....	74
Figure IV. 12 : Diagramme de l'œil pour $L = 20$ km (RZ-WDM-PON Upstream).....	74
Figure IV. 13 : Comparaison entre WDM-PON (NRZ) et WDM-PON (RZ).....	75
Figure IV. 14 : Fenêtre de commande.....	76
Figure IV. 15 : Comparaison des résultats avec l'image de base.....	77
Figure IV. 16 : L'image la plus similaire.....	77

Liste Des Tableaux

Tableau II. 1 : La grille du DWDM. [15].....	34
Tableau II. 2 : La grille du CWDM. [15]	36
Tableau II. 3 : Les types des multiplexages.	38
Tableau III. 1 : Comparaison entre les différents schémas de codage de ligne (NRZ/RZ).....	63
Tableau IV. 1 : Paramètres du système WDM-PON.....	68
Tableau IV. 2 : L'impact du type de format de modulation sur le système WDM-PON.....	73

Liste Des Acronymes

- **LD** : Diode laser
- **LED** : Diode électroluminescente
- **ON** : Ouverture numérique
- **APD** : Photodiode avalanche
- **TDM** : Multiplexage à répartition temporelle
- **OTDM** : Multiplexage optique à répartition temporelle
- **FDM** : Multiplexage à répartition fréquentielle à répartition temporelle
- **ETDM** : Multiplexage électronique
- **CDM** : Multiplexage à répartition de code
- **OCDM** : Multiplexage optique à répartition de code
- **WDM** : Multiplexage à répartition en longueur d'onde
- **DWDM** : Multiplexage dense à répartition en longueur d'onde
- **U.DWDM** : Ultra-dense multiplexage à répartition en longueur d'onde
- **CWDM** : Multiplexage étroit en longueur d'onde
- **WWDM** : Large multiplexage en longueur d'onde
- **SOA** : Amplificateur optique à semi-conducteur
- **EDFA** : Amplificateur optique à fibre dopée à l'Erbium
- **OADM** : Multiplexeur d'insertion/extraction optique
- **SDH** : Hiérarchie numérique **synchrone**
- **WAN** : Réseaux étendus
- **MAN** : Réseaux **métropolitains**
- **LAN** : Réseaux locaux
- **NRZ** : No retour à zéro
- **RZ** : Retour à Zéro
- **FTTH/FTTO** : Fibre à la maison / fibre au bureau
- **FTTB** : Fibre au bâtiment
- **FTTC/FTTCab** : Fibre jusqu'au trottoir / fibre jusqu'à la borne
- **UIT-T** : Union Internationale des Télécommunications
- **OptiSystem** : Optical Communication System Design Software
- **Laser** : Lumière amplifiée par émission stimulée des radiations

- **DSP** : Digital Signal Processing (Traitement numérique des signaux)
- **OPM** : Optical Performance Monitoring (Surveillance des performances optiques)
- **OFDM** : Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence)
- **MIMO** : Multiple-Input-Multiple-Output (Entrée multiple-sortie multiple)
- **BER** : Bit Error Rate (Taux d'erreur binaire)
- **GMM** : Gaussian Mixture Model (Modèle de Mélange Gaussien)
- **SVR** : Support Vector Regression (Régression par Vecteurs de Support)
- **DTR** : Decision Tree Regression (Régression par arbre de décision)
- **RFR** : Random Forest Regression (Régression par forêt aléatoire)
- **GBR** : Gradient Boosting Regression (Régression par renforcement de gradient)
- **DTC** : Decision Tree Classification (Classification par arbre de décision)
- **GBC** : Gradient Boosting Classification (Classification par renforcement de gradient)
- **OAM** : Optical Access Network Management (Gestion du réseau d'accès optique)
- **AAH** : Automatic Anomaly Handling (Gestion automatique des anomalies)
- **ADTP** : Anomaly Detection and Treatment Process (Processus de détection et de traitement des anomalies)
- **DSP** : Digital Signal Processing (Traitement numérique des signaux)
- **LSTM** : Long Short-Term Memory (Mémoire à long court terme)
- **PON**: passive optical network
- **ONU**: optical network unit
- **OLT**: optical line termination
- **OSNR** : rapport signal/ bruit

Introduction Générale

Les systèmes de télécommunication optique avancée jouent un rôle essentiel dans les télécommunications modernes, permettant la transmission rapide des données à haut débit à travers le monde. Ces systèmes sont devenus incontournables pour répondre aux exigences croissantes de connectivité et de vitesse dans divers secteurs, y compris les réseaux d'entreprise, les services Internet grand public et les infrastructures de communication critiques.

Le choix de la modulation, notamment entre NRZ (Non-Return-to-Zero) et RZ (Return-to-Zero), est crucial pour les réseaux WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network). Un choix judicieux de la modulation peut optimiser les performances du réseau, améliorer la qualité de transmission et minimiser les erreurs, ce qui est vital pour maintenir des communications fiables et efficaces sur de longues distances.

Ces systèmes de télécommunication évoluent constamment pour intégrer des technologies avancées comme le multiplexage optique WDM-PON à haut débit, offrant ainsi des capacités de transmission de plus en plus élevées. Cette évolution ouvre de nouvelles opportunités, permettant aux réseaux de télécommunication d'améliorer considérablement les performances globales et de répondre aux besoins de connectivité du futur.

L'objectif de cette mémoire est d'étudier l'impact de la longueur de la fibre et des techniques de modulation NRZ et RZ sur les performances des réseaux WDM-PON en utilisant le logiciel OptiSystem. Cette étude permettra de comparer les performances des deux types de modulation en fonction de différentes longueurs de fibre optique, afin de déterminer les configurations optimales pour améliorer la qualité de transmission et minimiser les erreurs dans les réseaux WDM-PON.

En conclusion, nous avons conclu notre parcours par une conclusion générale, et nous avons présenté toutes les perspectives de ce parcours.

Chapitre I :

La fibre optique

I.1. Introduction

La fibre optique est une technologie de transmission de données qui utilise des signaux de lumière pour transférer les informations d'un expéditeur à un récepteur à grande vitesse. Elle est constituée d'un fil très fin, fait de verre ou de plastique, qui a la propriété de conduire la lumière. [2] [3]

Dans notre monde nécessitant le transfert rapide des données, nous comptons sur les communications par fibre optique pour transmettre des informations denses de façon rapide et sur de longues distances. Les possibilités exceptionnelles de la lumière en font un choix supérieur aux autres technologies de transmission. [1]



Figure I. 1 : Couverture mondiale de la fibre optique

Les composants de base d'un système de transmission optique sont l'émetteur optique, la fibre et le récepteur optique.

L'émetteur optique convertit le signal électrique en un signal optique. La lumière circule dans la fibre en transportant les informations entre l'émetteur et le récepteur. Le récepteur optique reconvertit le signal optique en un signal électrique. [1]

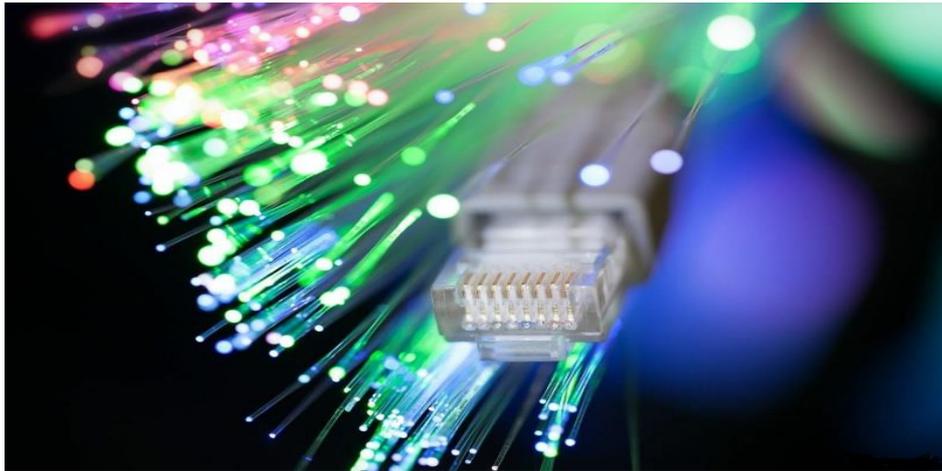


Figure I. 2 : La forme physique du fil de fibre optique

La fibre optique offre un débit d'information nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et peut servir de support à un réseau « large bande » par lequel transitent aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques. En permettant les communications à très longue distance et à des débits jusqu'alors impossibles, les fibres optiques ont constitué l'un des éléments clés de la révolution des télécommunications. Ses propriétés sont également exploitées dans le domaine des capteurs (température, pression, etc.), dans l'imagerie et dans l'éclairage. [4]

I.2. Historique

L'histoire de la fibre optique remonte à l'époque romaine, mais c'est l'invention du premier "télégraphe optique" par Claude Chappe dans les années 1790 qui marque le véritable début de son développement. Au 19^{ème} siècle, des physiciens comme Daniel Collondo et Jacques Badinet ont découvert la possibilité de guider la lumière dans des matériaux réfléchissants. En 1880, Alexander Graham Bell a breveté le "photophone", contribuant à l'avancement des fibres optiques. Des avancées telles que les tubes de verre pour transporter la lumière et l'utilisation de fibres en verre ou en plastique pour transmettre des images ont jalonné le progrès de la fibre optique.

Au cours des années 1900, des inventeurs comme Hansell ont développé des dispositifs pour transmettre des images via des fibres en verre ou en plastique. En 1961, Elias Snitzer a théorisé la fibre optique monomode, et en 1970, la première fibre optique monomode utilisable dans les réseaux de communication a été développée.

Les années suivantes ont vu des avancées majeures, comme le processus de déposition en phase vapeur pour fabriquer les fibres optiques et le premier système de communication téléphonique optique testé en 1975.

Dans les années 1990, l'amplification optique a été démontrée, ouvrant la voie à l'internet haut débit. Les câbles en fibre optique sous-marins ont été développés et installés, marquant des avancées significatives dans les communications mondiales. Aujourd'hui, la fibre optique est largement utilisée dans divers secteurs tels que la médecine, l'informatique, les télécommunications, et l'industrie pour une multitude d'applications. Le marché de la fibre optique est en constante expansion, soutenu par des investissements massifs et le développement continu des technologies de communication. [5] [6]

I.3. Définition

Une fibre optique est un dispositif de transmission de lumière qui se compose de deux types de verres transparents disposés de manière coaxiale. Le premier est le verre central, ou le cœur, qui a un indice de réfraction plus élevé qui peut être constant ou décroissant de l'axe vers la périphérie, selon qu'il s'agit d'une fibre à saut d'indice ou à gradient d'indice. Le second est le verre d'enveloppe, ou la gaine, qui a un indice de réfraction inférieur.

Lorsqu'un rayon lumineux entre dans le cœur de la fibre à une extrémité, il se propage longitudinalement jusqu'à l'autre extrémité. Ce phénomène est rendu possible grâce aux réflexions totales que le rayon subit à l'interface entre le cœur et la gaine. [7]

La fabrication de fibres optiques nécessite l'utilisation de verres de très haute pureté. Les fibres utilisées pour les télécommunications sont généralement fabriquées par des procédés de réactions en phase vapeur, à partir de silice pure. Des dopants tels que le bore, le fluor, le phosphore et le germanium sont incorporés pour obtenir l'indice de réfraction désiré. [8]

I.4. La fabrication de la fibre optique

Les fibres optiques en verre sont généralement fabriquées à partir de silice. Toutefois, d'autres matériaux comme le fluorozirconate, le fluoroaluminat et les verres de chalcogénures sont utilisés pour les longueurs d'onde infrarouges. Des matériaux cristallins tels que le saphir sont également utilisés pour des applications spécialisées.

La silice et les verres fluorés ont habituellement des indices de réfraction d'environ 1,5.

En revanche, certains matériaux comme les chalcogénures peuvent avoir des indices de réfraction allant jusqu'à 3.

Les fibres optiques en plastique (POF) ont souvent un diamètre de base de 0,5 millimètres ou plus, mais elles présentent généralement des coefficients d'atténuation plus élevés que les fibres en verre, soit 1 dB/m ou plus, ce qui limite la portée des systèmes utilisant les POF.

I.4.1.La préforme

La fabrication d'une fibre optique débute par la création d'une préforme cylindrique en silice, un composé oxygéné du silicium (SiO_2) que l'on trouve dans de nombreux minéraux comme le quartz, la calcédoine et l'opale.

La fibre est ensuite étirée à partir de ce barreau, dont le centre forme le cœur de la fibre. Alcatel a proposé de remplacer l'opération de manchonnage par le procédé d'Advanced Plasma and Vapour Déposition (APVD), qui consiste à faire fondre des grains de quartz très purs sur la préforme primaire à l'aide d'un chalumeau plasma inductif.

I.4.2.Le fibrage

Cette étape consiste à transformer la préforme en fibre optique. Le cœur est entouré d'une silice de moindre qualité formant la gaine optique. Un écart d'indice entre le cœur et la gaine est créé en incorporant des dopants tels que le germanium et le phosphore pour augmenter l'indice dans le cœur, ou le bore et le fluor pour le diminuer dans la gaine. Par exemple, une préforme de verre de 1 mètre de longueur et de 10 cm de diamètre permet, après étirement, d'obtenir une fibre monomode d'environ 150 km de longueur.

I.4.3.Le polissage

Pour obtenir des surfaces d'entrée et de sortie parfaitement planes, certains procédés de fabrication des fibres optiques nécessitent une phase de polissage. Cette étape vise à éviter toute réflexion indésirable qui pourrait nuire à la qualité optique de la fibre.

Une fois la fabrication terminée, plusieurs tests sont effectués pour vérifier le débit, la résistance à la traction, la température de fonctionnement, la géométrie, l'atténuation, la dispersion chromatique, l'indice de réfraction, etc. Pour les fibres sous-marines, des tests de conductivité sont également réalisés. [7] [8]

I.5. Fonctionnement de la fibre optique

Il s'agit d'une technologie filaire permettant de faire circuler des informations notamment entre des ordinateurs.

Il n'y a pas d'électricité qui circule dans les fibres optiques, seulement de la lumière (contrairement au réseau téléphonique/ADSL dont les câbles sont constitués de cuivre dans lequel circulent des signaux électriques).

L'électricité n'est présente qu'aux extrémités de la fibre pour alimenter le laser qui envoie les signaux lumineux et le récepteur qui les décode à l'autre bout.

Cette technologie de fibre optique est par exemple utilisée depuis longtemps pour les réseaux de collecte d'Internet (les "autoroutes d'Internet"), notamment les câbles sous-marins.

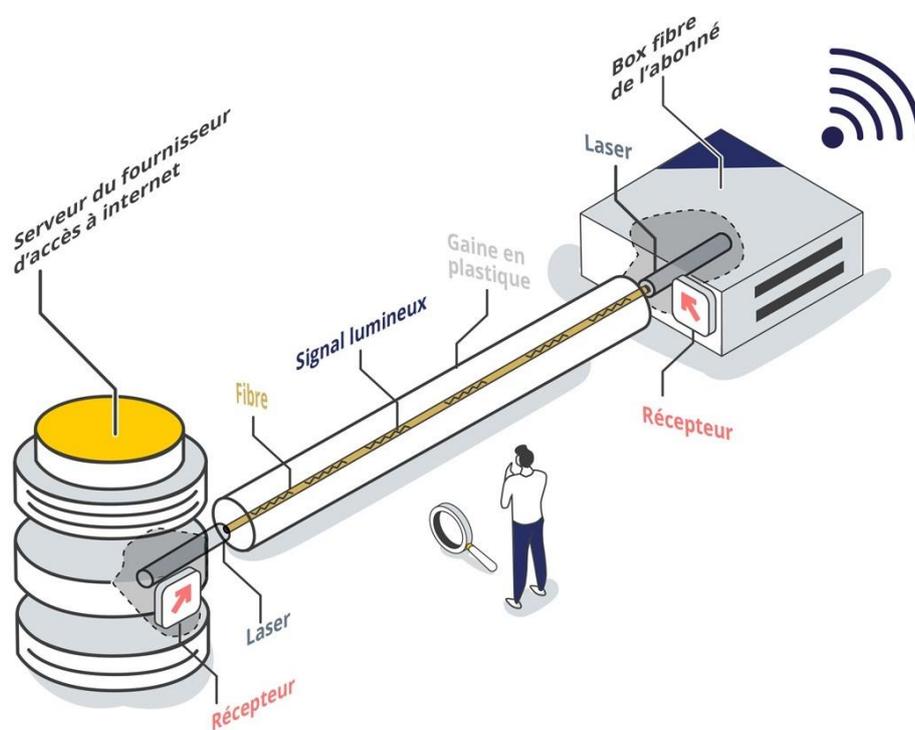


Figure I. 3 : Fonctionnement de la fibre optique

Les fibres optiques sont généralement groupées en faisceaux (optiques de fibres) en contenant de quelques unités à plusieurs millions, selon les applications. Ces faisceaux peuvent être souples ou rigides et transmettre soit de la lumière, soit des images ou encore des informations.

La longueur des fibres est de l'ordre de grandeur du centimètre dans les faisceaux rigides, de l'ordre de grandeur du mètre pour les faisceaux souples et de plusieurs kilomètres dans le cas des guides d'ondes optiques.

Les conducteurs de lumière, généralement souples, sont protégés à l'extérieur par une gaine en plastique. On les utilise pour l'endoscopie, médicale ou industrielle, et, liés à des systèmes optoélectroniques, pour la détection de flammes ou la lecture de cartes perforées. Si l'on dispose les fibres de telle façon que la position de chacune d'elles par rapport aux autres soit la même à chacune des extrémités du faisceau, on obtient alors un conducteur d'images. Une image formée sur l'une des extrémités du faisceau est transportée point par point à l'autre extrémité. Les faisceaux de fibres courtes (jusqu'à quelques centimètres) sont rigidifiés par compactage à chaud ou par emploi d'une résine durcissable. Ils sont utilisés comme anamorphoseurs de lumière ou d'image. Les plaques de fibres optiques sont constituées d'un très grand nombre de fibres disposées parallèlement à l'axe d'un cylindre. De telles plaques, présentant deux faces planes et polies, permettent de transporter des images d'un plan à un autre. On fabrique ainsi des fonds de tubes cathodiques et des amplificateurs d'images. [9]

Les fibres optiques peuvent être utilisées comme conducteurs d'information. Une liaison optique comprend : un émetteur qui transforme un signal électrique multiplex, le plus souvent numérique, en signal lumineux ; une fibre optique protégée et séparée d'autres fibres dans un câble optique ; un récepteur qui restitue à l'arrivée le signal électrique ; éventuellement, des répéteurs intermédiaires. Les convertisseurs électro-optiques utilisés sont des semi-conducteurs dopés ou complexes (diodes électroluminescentes ou laser à l'émission, photodiodes à la réception).

Pour des liaisons urbaines ou interurbaines courtes ou la télévision communautaire avec distribution par câbles, on emploie des fibres « multimodales » (ou multimodes) permettant la propagation d'ondes ayant un grand nombre de modes électromagnétiques différents, avec une longueur d'onde porteuse de 0,85 μm .

Pour des liaisons à plus longue portée, on emploie des fibres à saut d'indice n'admettant en principe qu'un seul mode électromagnétique (fibres unimodales ou monomodes), avec une longueur d'onde porteuse de 1,2 μm .

Les fibres optiques peuvent aussi servir de capteurs. La grandeur à mesurer agit par effet physique (déformation) ou par effet électromagnétique sur une caractéristique de la lumière cohérente issue d'une source (laser) et se propageant dans une ou deux fibres. [9]

I.6. Avantages des fibres optiques

- ✓ Performances de transmission : très faible atténuation, très large bande passante, multiplexage
- ✓ possible de plusieurs signaux et de plusieurs utilisateurs. Elles permettent de concevoir des systèmes de transmission de portée et capacité très supérieures à celles des câbles conducteurs.
- ✓ Avantages de mise en œuvre : faible poids, très petite taille, grande souplesse.
- ✓ Sécurité électrique : la fibre optique a une force de tension plus grande que les fibres de cuivre ou
- ✓ d'acier du même diamètre. Elle est plus flexible, et peut être tordue plus facilement résistant à la plupart des éléments corrosifs que le câble de cuivre ne peut pas y résister.
- ✓ Sécurité électromagnétique : la fibre optique n'est pas sensible aux parasites.
- ✓ Avantage économique : le coût global d'un système sur fibres optiques est de plus en plus souvent inférieur à celui d'un système cuivre, c.à.d. que les matières premières qui servent à fabriquer du verre sont nombreux contrairement au cuivre. Cela veut dire que le système à fibre est plus facile et moins cher à fabriquer.
- ✓ La rentabilité de la fibre: le réseau à fibre optique a un cycle de vie de 20 ans. [10]

I.7. Inconvénients des fibres optiques

- ✓ Coût : les câbles de fibre optique sont plus coûteux à installer, mais durent plus longtemps que les câbles de cuivre.
- ✓ Transmission : la transmission du signal dans les câbles de fibres optiques doit se répéter au long
- ✓ d'une certaine distance grâce à des appareils amplificateurs mais demande beaucoup moins de répétitions que les câbles de cuivre.
- ✓ Fragilité : Quand le câble est rayé ou fissuré, les fibres peuvent être cassées ou perdent-la.
- ✓ transmission. Cependant en enveloppant des fibres dans une gaine en plastique, il est difficile de plier le câble sans casser la fibre.
- ✓ Protection : Les fibres exigent plus de protection autour du câble comparé au cuivre. [10]

I.8. Types de câbles à fibre optique

Une fibre optique existe en 2 types (monomode et multimode). Ce dernier se distingue du type monomode pour sa capacité à transférer de nombreux modes. Il assure que les rayons lumineux transportés disposent de plusieurs trajets tout en suivant l'angle de réfraction. Une grande quantité d'ondes lumineuses peut donc circuler dans le tuyau de la fibre. Conçu pour les courtes distances, ce type présente quelques atouts, ce qui explique sa grande réussite depuis sa conception. La performance d'une fibre optique multimode est assurée grâce à son diamètre de grande taille. Surtout, ce type est spécialement conçu pour assurer le transfert des applications voix et de différentes données

I.8.1. Monomode

Le type monomode est un type de fibre optique qui se trouve être le meilleur actuellement. En matière de communication à fibre optique, la fibre monomode a été établie pour transporter un seul mode de lumière appelée aussi mode transversal.

Les rayons lumineux suivent donc un seul chemin. Ce type de fibre a un cœur très fin, de la taille d'un cheveu, provoquant un chemin de propagation des différents modes directe. Contrairement à la fibre multimode, elle ne dispose pas de dispersion intermodale mais plutôt d'une dispersion intramodale, ce qui permet de profiter d'une connexion haut débit et à longue distance.

L'atténuation de ce type de fibre est quasi nulle, ce qui est un de ses plus grands avantages. Pour différentes raisons, la fibre optique monomode est la plus populaire et la plus utilisée. Elle est notamment utilisée dans le cœur des réseaux mondiaux.

Ce type de fibre optique possède donc des caractéristiques qui lui sont propres. Grâce aux différents avantages qu'il propose, la plupart des gens optent donc pour le type de fibre optique monomode dans leur quotidien. [11]

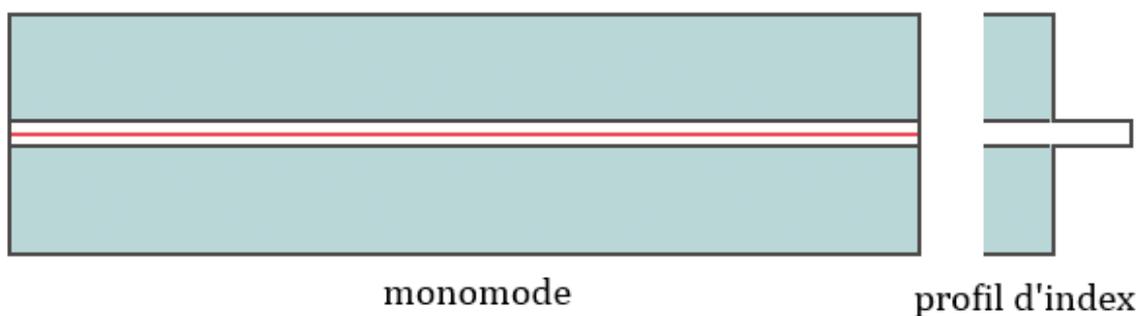


Figure I. 4 : Type de fibre monomode

I.8.2.Multimode

La fibre optique multimode a été la première à arriver sur le marché. Comme son nom le laisse clairement entendre, elle a la capacité d'envoyer plusieurs modes.

Caractéristiquement cette technologie dispose d'un cœur ayant un diamètre beaucoup plus grand que le type monomode. Celui-ci peut atteindre le 50 à 62,5 nanomètres. Cette taille a pratiquement été conçue pour lui permettre d'emmagasiner une grande quantité de lumière, ce qui offre la capacité de rendre simples toutes les connexions. Malgré cela, le type multimode dispose d'une longueur d'onde beaucoup plus petite. Aussi, la largeur de sa bande passante est particulièrement limitée.

Pour ce qui est de la distance de transmission, sachez que ce type a spécialement été créé pour les courtes distances. Pour finir, le type multimode se distingue par son coloris qui est en règle générale en jaune. [11]

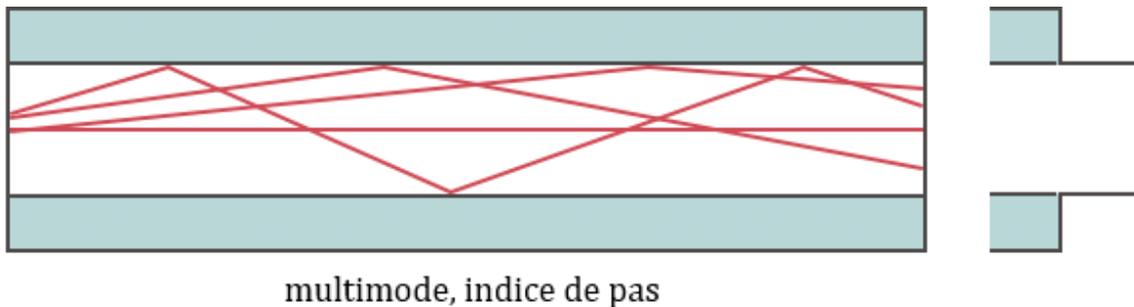


Figure I. 5 : Type de fibre optique multimode

I.9. Les applications de la fibre optique

La fibre optique a de nombreuses applications dans divers domaines :

I.9.1.Télécommunications :

Les fibres optiques sont largement utilisées pour la transmission de données longue distance dans les réseaux de télécommunications. Elles permettent des services Internet, téléphoniques et de télévision à haut débit.

I.9.2.Imagerie médicale :

Les fibres optiques sont utilisées dans les endoscopes et les appareils d'imagerie médicale pour transmettre la lumière et capturer des images haute résolution à l'intérieur du corps.

I.9.3.Détection industrielle :

Les fibres optiques sont utilisées dans diverses applications industrielles pour détecter des paramètres tels que la température, la pression et la contrainte.

Elles sont utilisées dans la surveillance de l'état des structures, l'exploration pétrolière et gazière et la surveillance environnementale.

I.9.4.Centres de données :

Les fibres optiques constituent l'épine dorsale des centres de données, permettant une transmission de données rapide et fiable entre les serveurs et les systèmes de stockage.

I.9.5.Militaire et Défense :

Les fibres optiques sont utilisées dans les applications militaires pour la communication sécurisée, la télédétection et la surveillance. Elles offrent une haute sécurité de transmission des données et résistent aux interférences électromagnétiques.

I.9.6.Radiodiffusion :

Les fibres optiques sont utilisées dans les systèmes de diffusion pour transmettre des signaux audio et vidéo sur de longues distances avec une perte de signal minimale.

I.9.7.Industrie aérospatiale :

Les fibres optiques sont utilisées dans les applications aérospatiales pour la transmission de données, la détection et l'instrumentation. Elles sont légères, insensibles aux interférences électromagnétiques et peuvent résister aux environnements difficiles.

I.9.8.Recherche et Développement :

Les fibres optiques sont largement utilisées dans les laboratoires de recherche pour diverses applications, notamment la spectroscopie, la délivrance laser et la détection optique. [12]

I.9.9.Autres utilisations de la fibre optique.

La fibre optique, grâce à ses nombreux avantages, trouve son utilité dans une multitude de domaines, en particulier dans les télécommunications.

Voici quelques-unes de ses applications :

- ✓ Elle sert de colonne vertébrale pour les réseaux de communication (Backbone).
- ✓ Elle est utilisée dans les téléphones longue distance.
- ✓ Elle est employée dans le déploiement de la technologie FTTH (Fiber To The Home).
- ✓ Elle est utilisée dans les réseaux MAN et WAN.
- ✓ Elle est intégrée dans les câbles sous-marins.

Des fibres spéciales peuvent aussi servir pour des applications de sondes dans des secteurs nécessitant des surveillances particulières (puits de pétrole, feu, fuites...).

Le haut débit qu'offre la fibre optique est extrêmement utile pour les sociétés de câblage, les opérateurs (télévision, téléphonie), les instituts de recherche, les lycées, les universités, l'aérospatial et les industries chimiques.

Par ailleurs, la fibre optique est nécessaire au fonctionnement de la télévision HD ainsi que du 3D pour les contenus en reliefs. [13]

I.10. Conclusion

La génération actuelle vit dans un monde de plus en plus interconnecter, grâce à l'expansion rapide des réseaux de fibre optique. Ces réseaux, qui s'étendent sur plus de 5 milliards de kilomètres à travers le monde, ont créé une toile mondiale de communication, reliant les individus, les entreprises, les communautés, les pays et les continents comme jamais auparavant.

La technologie a rendu possible le partage instantané et global de la voix, des données, de la vidéo et des applications diverses, allant du partage de fichiers aux jeux en ligne, en passant par la vidéo à la demande et la télévision haute définition. Cette capacité à partager et à communiquer presque instantanément a non seulement transformé la façon dont nous interagissons les uns avec les autres, mais a également poussé les réseaux de communication à s'étendre et à évoluer constamment, alimentant ainsi l'expansion mondiale de la connectivité à large bande.

La fibre optique, en raison de sa compatibilité avec d'autres technologies et de sa capacité presque illimitée, est bien placée pour répondre aux besoins de communication futurs. Elle peut croître et s'adapter pour répondre aux demandes toujours croissantes de vitesse, de capacité et de fiabilité.

En conclusion, nous vivons dans une ère de connectivité sans précédent, rendue possible par l'expansion rapide et continue des réseaux de fibre optique. Alors que nous continuons à innover et à développer de nouvelles technologies, il est clair que la fibre optique jouera un rôle clé dans la formation de notre avenir numérique. Elle est non seulement essentielle pour répondre aux demandes actuelles, mais elle est également flexible et adaptable pour répondre aux besoins de communication de demain. C'est une époque passionnante pour être connecté.

Chapitre II :

La technologie

WDM /PON

II.1. Introduction

La technique de multiplexage c'est la technique ou l'opération de grouper les informations de plusieurs sources afin de les transmettre sur le même support physique sans qu'elles se mélangent mutuellement. À la réception, une opération inverse, un démultiplexage doit nous permettre de reproduire chacune des sources et de l'acheminer à sa destination. On distingue 4 techniques principales de multiplexage de l'information :

- ✓ Multiplexage temporel TDM (Time Division Multiplexing)
- ✓ Multiplexage fréquentiel FDM (Frequency Division Multiplexing)
- ✓ Multiplexage à répartition par code CDM (Code Division Multiplexing)
- ✓ Multiplexage en longueur d'onde (WDM : Wavelength Division Multiplexing)

II.2. Le multiplexage WDM

Le multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing) est une technologie essentielle dans les réseaux de télécommunications modernes. Elle permet de transmettre plusieurs signaux optiques distincts simultanément sur une seule fibre optique en utilisant différentes longueurs d'onde (ou couleurs) de la lumière. Cette technique révolutionnaire exploite la capacité énorme des fibres optiques, augmentant ainsi la bande passante disponible sans nécessiter de nouvelles infrastructures physiques.

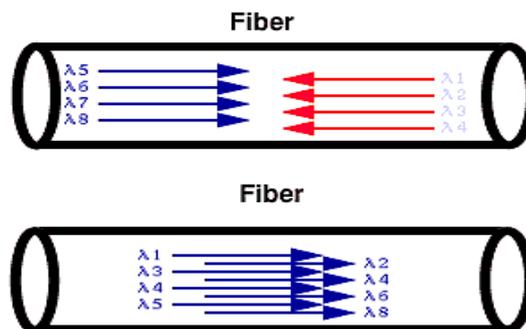


Figure II. 1 : Le système de base de la WDM

L'idée de base du WDM repose sur la division du spectre optique disponible en canaux multiples, chacun étant assigné à une longueur d'onde spécifique.

Ces canaux sont ensuite combinés pour voyager ensemble sur une seule fibre optique et sont séparés à la réception grâce à des dispositifs optiques spécialisés. Cette approche permet non seulement de maximiser l'utilisation de la fibre optique existante mais aussi de réduire les coûts et de simplifier l'expansion des réseaux. [14]

II.3. Principe de la WDM

Le multiplexage en longueur d'onde, souvent appelé WDM (Wavelength Division Multiplexing en anglais), est une technique utilisée en communication optique qui permet d'augmenter le débit sur une fibre optique.

Le principe de fonctionnement de la technologie WDM est basé sur les propriétés du spectre optique. Dans un système WDM, plusieurs sources lumineuses génèrent des signaux optiques à différentes longueurs d'onde et mélangent ces signaux ensemble. Ces signaux sont ensuite transmis à travers une fibre optique.

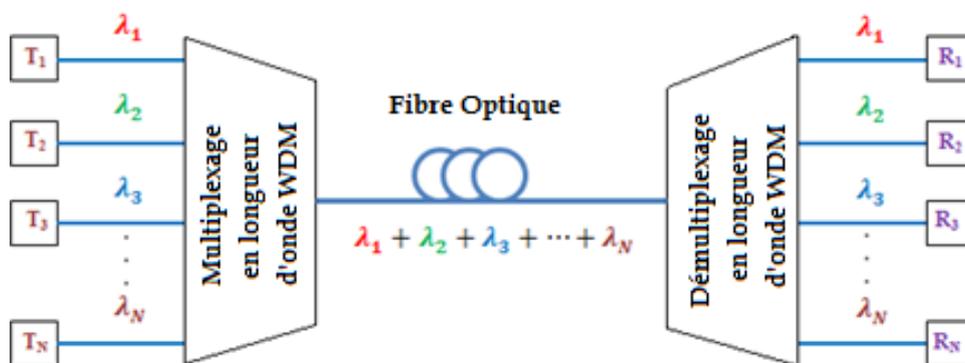


Figure II. 2 : Le principe du multiplexage WDM

Le multiplexage ou démultiplexage est basé sur deux mécanismes, il s'agit de la diffraction et de l'interférence. Les réseaux (Grating) de diffraction sont utilisés comme démultiplexeurs pour séparer les longueurs d'onde ou comme multiplexeurs pour les combiner (voir figure II.3). L'interférence est une technique de filtrage des longueurs d'ondes soit par interférence constructive ou destructive. [15]

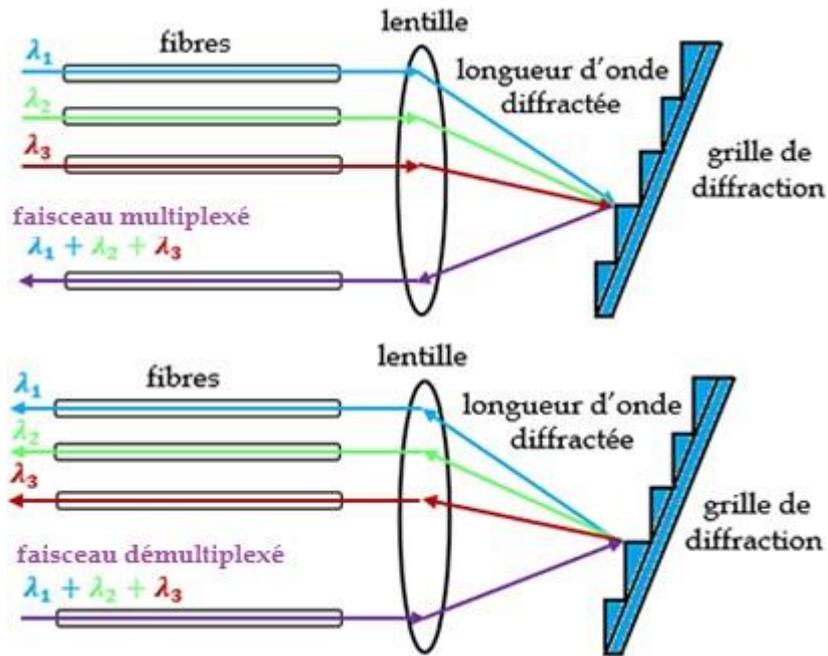


Figure II. 3 : Principe du multiplexage et démultiplexage par réseau de diffraction. [15]

Pour pouvoir multiplexer plusieurs sources optiques, il faut préalablement modifier leur longueur d'onde en utilisant des matériels spécifiques : transceivers ou transpondeurs. Chaque flux d'information est codé sur une porteuse par modulation d'amplitude ou de phase, comme pour une transmission sur fibre optique standard. [16]

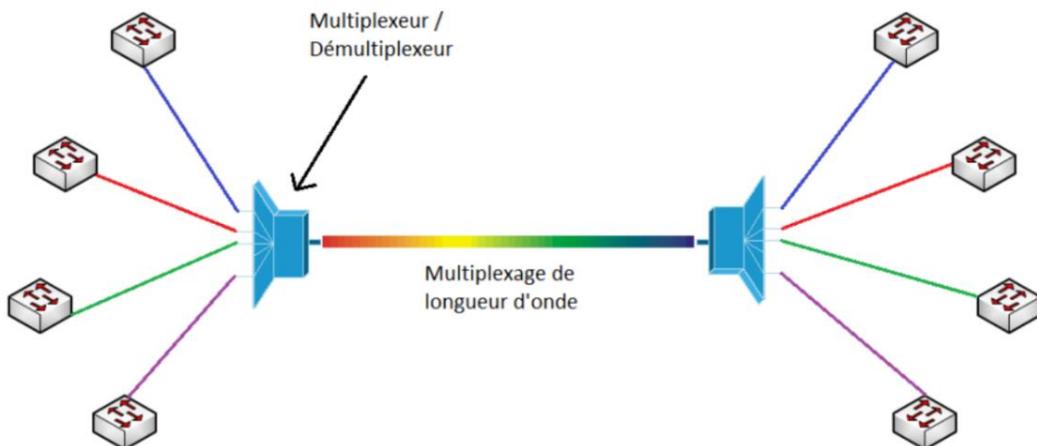


Figure II. 4 : Principe de multiplexage en longueur d'onde

II.4. Fonctionnement de WDM

Pour multiplexer plusieurs sources optiques, il faut préalablement modifier leur longueur d'onde en utilisant des matériels spécifiques tels que des transceivers ou transpondeurs.

Chaque flux d'information est codé sur une porteuse par modulation d'amplitude ou de phase, comme pour une transmission sur fibre optique standard.

Les équipements de démultiplexage sont généralement des équipements passifs, tels que des réseaux de diffraction, qui sélectionnent le signal dans une zone de longueur d'onde donnée.

[17]

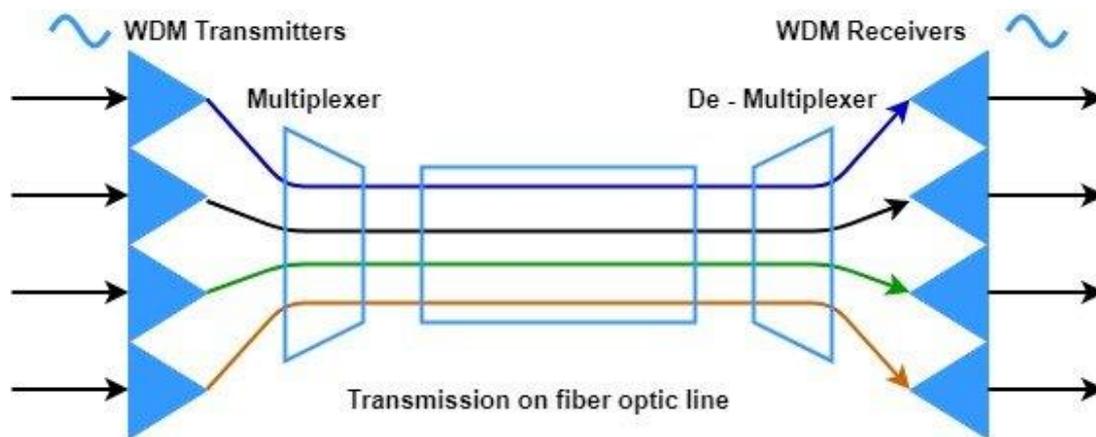


Figure II. 5 : Schéma de principe du multiplexage en longueur d'onde

II.5. Types de systèmes WDM

II.5.1. DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

Le DWDM correspond à l'évolution du WDM. Il augmente la densité des signaux optiques transmis en associant jusqu'à 160 longueurs d'onde dans la même fibre. On atteint ainsi des débits de 300 à 400 Gbps. Des systèmes utilisant des pas de 50 GHz (0,4 nm) et de 25 GHz (0,2 nm) permettent d'obtenir respectivement 80 et 160 canaux optiques.

La technologie WDM est dite dense lorsque l'espacement utilisé entre deux longueurs d'onde est égal ou inférieur à 100 GHz. La technologie DWDM présente cependant des coûts assez élevés, On l'emploi désormais pour les transmissions longues distance.

Dans la pratique, cela signifie que l'on fait passer dans une même fibre beaucoup de signaux portés par des fréquences très rapprochées les unes des autres .

Il fonctionne en combinant plusieurs longueurs d'ondes simultanément sur une seule fibre. L'espacement entre deux canaux (c.à.d. entre deux longueurs d'ondes) est d'environ 0,8nm (100 GHz), 0,4 nm (50 GHz), 0,2nm (25 GHz) et 0,1 nm (12,5 GHz).

Les systèmes à 50 GHz (0,4 nm) et à 25 GHz (0,2 nm) permettent d'obtenir respectivement 80 et 160 canaux optiques. Autrefois, on utilisait des canaux espacés de 0,8 nm (100 GHz), ce qui permet de compter environ 40 longueurs d'onde dans la bande C.

Cette technologie reste la seule déployée dans les réseaux télécoms longue distance

Le tableau II-1 et la figure II.6 ci-dessous, illustrent la grille et la bande (C et L) du DWDM, dont la grille représente les fréquences et les longueurs d'ondes centrales nominales. [15]

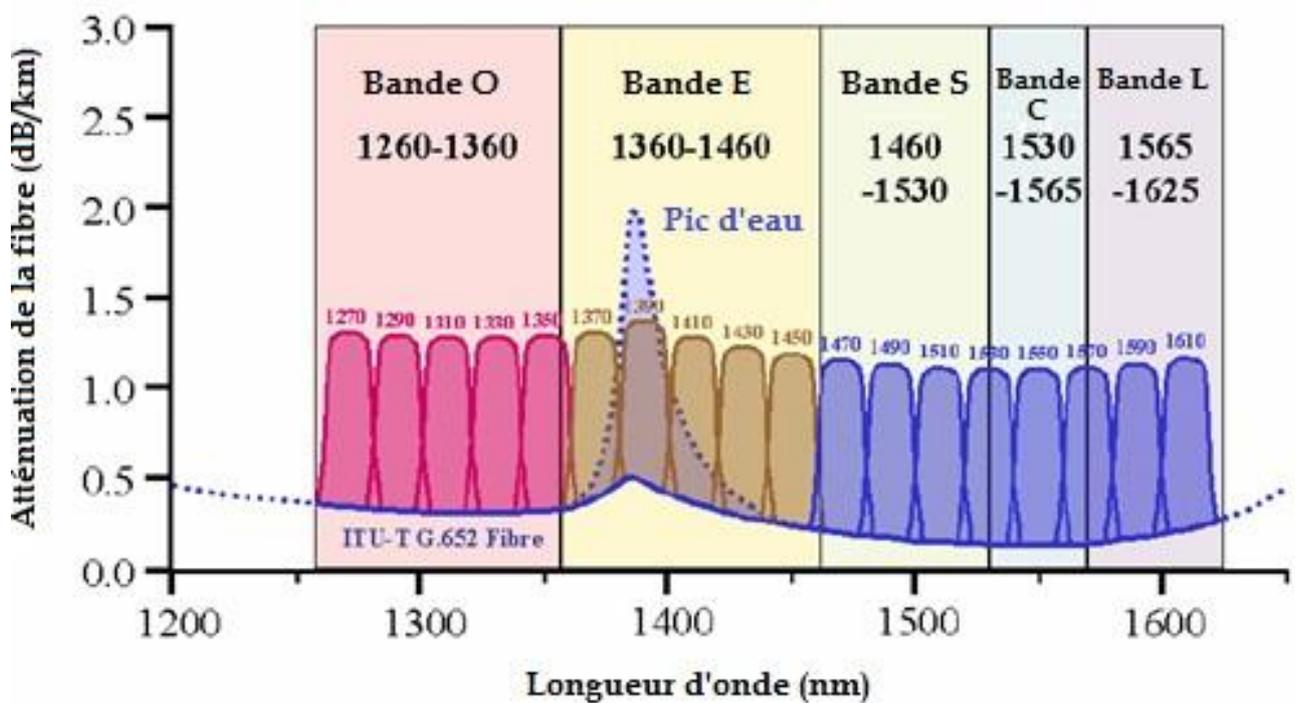


Figure II. 6 : Longueurs d'ondes DWDM (bande C et L). [15]

Tableau II. 1 : La grille du DWDM. [15]

Fréquences centrales nominales (GHz) pour espacements de :				Longueurs d'ondes centrales nominales approximatives (nm)
12,5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz	
195.9000	195.900	195.90	195.9	1530.33
195.8875	-	-	-	1530.43
195.8750	195.875	-	-	1530.53
195.8625	-	-	-	1530.63
195.8500	195.850	195.85	-	1530.72
195.8375	-	-	-	1530.82
195.8250	195.825	-	-	1530.92
195.8125	-	-	-	1531.02
195.8000	195.800	195.80	195.8	1531.12
195.7875	-	-	-	1531.21
195.7750	195.775	-	-	1531.31
195.7625	-	-	-	1531.41
195.7500	195.750	195.75	-	1531.51
195.7375	-	-	-	1531.60
195.7250	195.725	-	-	1531.70
195.7125	-	-	-	1531.80
195.7000	195.700	195.70	195.7	1531.90
195.6875	-	-	-	1532.00
195.6750	195.675	-	-	1532.09
195.6625	-	-	-	1532.19

- Avantages et inconvénients du DWDM

Le DWDM présente le même avantage que le système WDM. Il répond aux besoins de débits et exploite largement la totalité de la bande passante à cause du petit espacement entre les canaux (0.4, 0.2, 0.1 nm), il permet donc la circulation de plusieurs longueurs d'ondes jusqu'à atteindre 160 canaux.

Le DWDM minimise l'implantation des dispositifs ou des composants plus encombrants comme les répéteurs et les régénérateurs. On trouve plusieurs applications de ce type de multiplexage

Cette technologie présente des inconvénients, entre autres :

- ✓ La diaphonie entre les canaux à cause des petits espacements.
- ✓ Les effets non-linéaires comme le FWM et le XPM.
- ✓ Les longues distances qui exigent plusieurs amplificateurs optiques en ligne tel que l'EDFA qui coûte cher.
- ✓ La gestion de la dispersion, ...etc.

II.5.2. CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)

Le multiplexage par répartition en longueur d'onde grossière (Coarse Wavelength Division Multiplexing : CWDM) est un schéma de multiplexage dont les longueurs d'onde sont combinées en un seul câble à fibre optique sans interférence (voir la figure II.6).

C'est une bonne solution pour ajouter plus de services sur une seule sortie sans interrompre d'autres services aux clients.

Le CWDM fonctionne à une largeur de bande plus élevée que le WDM, où la longueur d'onde de fonctionnement s'étend de 1270 nm à 1610 nm (bandes O, E, S, C, L) et couvre 18 canaux CWDM avec un espacement entre les canaux de 20 nm.

Ce système est utilisé dans les réseaux locaux (LAN) et métropolitains (MAN). [18]

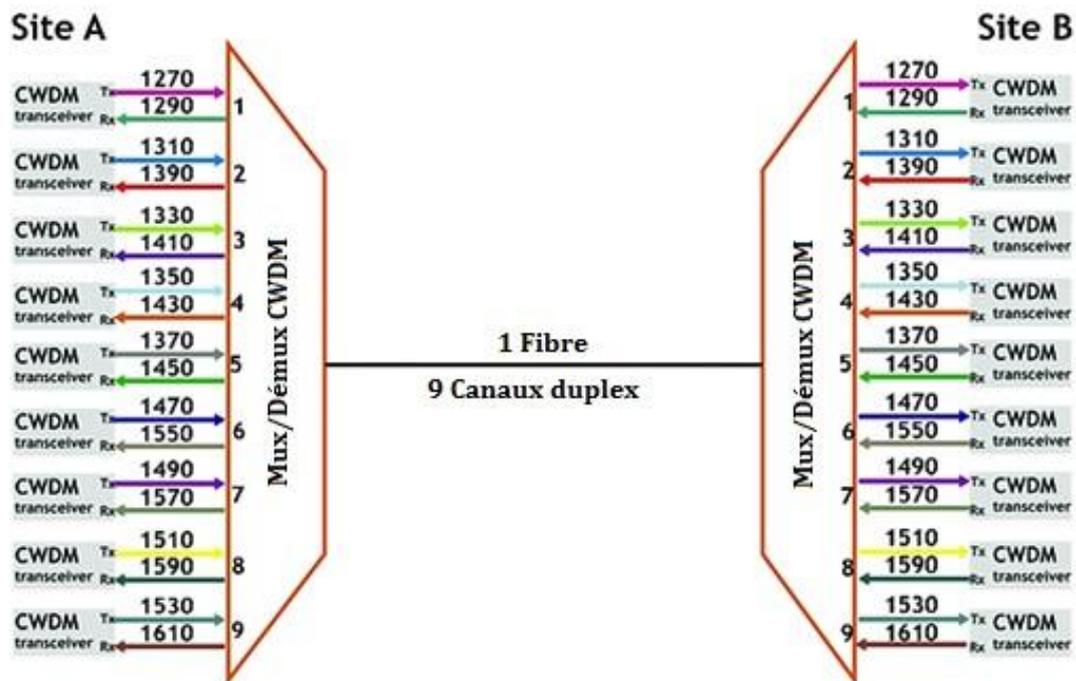


Figure II. 7 : Principe du Multiplexage CWDM

L'idée de base du CWDM est l'utilisation des composants optiques à faible coût pour une transmission sans amplificateur. Le tableau I-2 montre la grille spécifiée par l'UIT-T G.692 sur toute la région spectrale.

Tableau II. 2 : La grille du CWDM. [15]

Longueurs d'ondes centrales nominales (nm) Pour un espacement de 20 nm.
1270
1290
1310
1330
1350
1370
1390
1410
1430
1450
1470
1490
1510
1530
1550
1570
1590
1610

- Avantages et inconvénients du CWDM

Comparé au DWDM, le CWDM offre moins de canaux que les systèmes DWDM cela permet d'économiser et de réduire le coût des composants notamment les amplificateurs, les lasers, ...etc.

Ce système offre un grand avantage lors de la mise en œuvre dans le réseau d'accès optique.

Il est moins coûteux et consomme moins d'énergie qu'un système DWDM parce qu'il utilise des lasers non refroidis à faible coût c.à.d. les émissions laser se produisent sur huit canaux à huit longueurs d'onde définies (en pratique, on utilise seulement 8 longueurs d'ondes). La tolérance (l'imprécision ou la variabilité de la longueur d'onde) dans un laser CWDM va jusqu'à ± 3 nm, tandis que dans un laser DWDM, la tolérance est beaucoup plus serrée.

Dans le système CWDM, l'amplification n'est pas indispensable car les longueurs d'onde utilisées dans ce système ne sont pas affectées par le pic d'eau (Water peak) qui provoque Une forte atténuation des longueurs d'onde proche de 1383 nm (selon la recommandation de l'IUT Février 2006). [19]

En termes de performances, il est à noter que le CWDM n'est pas à comparer avec la technologie DWDM basée sur la fibre optique de longue distance, mais plutôt avec certaines applications spécifiques (capacité, flexibilité et faible coût).

Ce système présente aussi plusieurs inconvénients, et parmi eux, on trouve :

- ✓ Le nombre de canaux limité.
- ✓ L'utilisation pour les courtes distances.
- ✓ Le domaine d'application de ce système n'est pas aussi vaste.

Il est largement utilisé dans les télécommunications (réseaux FTTx, PON, EPON, GPON), la radiodiffusion et la télévision (Cable Television : CATV), les réseaux d'entreprise, les réseaux de campus et d'autres domaines.

II.5.3. U-DWDM (Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing)

Le multiplexage ultra DWDM (U-DWDM) est utilisé principalement dans les communications optiques sans fil, c'est une meilleure solution pour fournir des très hauts débits avec un faible taux d'erreurs binaire TEB. Il s'agit d'une technologie qui peut transmettre plusieurs signaux simultanément sur une seule fibre avec un espacement entre les canaux très étroit (0.4 nm soit 50 GHz, 0,1 nm soit 12,5 GHz). Le système à 12,5 GHz (0,1 nm) permet d'obtenir jusqu'à 400 canaux optiques dans la bande U (1625–1675 nm).

Donc ce système est très puissant, il demande des circuits programmables comme le FPGA (Field Programmable Gate Array : FPGA) et la DSP (Digital Signal Processing : DSP) pour des longues distances (Long Haul) par rapport au système DWDM.

Il est utilisé beaucoup plus dans les réseaux PON (Passive Optical Network), les réseaux sans fil et les réseaux sous-marins. [18]

II.5.4. WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing)

Le multiplexage WWDM est un autre dérivé du WDM. Il est encore plus restrictif que le CWDM puisqu'il n'autorise l'utilisation que de quatre canaux au maximum. Les canaux ont une longueur d'onde comprise entre 1275,7 nm et 1349,2 nm. Les canaux sont espacés de 24,5 nm entre eux et travaillent sur une longueur d'onde de 1310 nm. Ce multiplexage peut être utilisé sur des fibres multimode et monomode.

Tableau II. 3 : Les types des multiplexages.

Type de multiplexage	Espacement entre Les canaux (nm)	Nombre de canaux	Longueur d'onde (nm)
WWDM	24.5	4	1275.7-1349.2
CWDM	20	18	1270-1610
DWDM	0.8	160	1530-1625
UDWDM	0.4 et 0.1	400	1625-1675

II.6. La différence entre CWDM et DWDM

Le CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) et le DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) sont deux méthodes efficaces pour résoudre la capacité croissante en bande passante des transmissions d'information. Voici les principales différences entre ces deux technologies⁴:

- Espacement des canaux

Le CWDM a un espacement plus large entre les longueurs d'onde, généralement de 20 nm. Il peut transporter jusqu'à 18 longueurs d'onde CWDM avec un espacement des canaux de 20 nm dans la grille spectrale de 1271 nm à 1611 nm.

Le DWDM, quant à lui, utilise un espacement plus étroit entre les longueurs d'onde, généralement de 0,8 nm ou 0,4 nm (grille 100 GHz/50 GHz). Il peut transporter 40, 80, voire jusqu'à 160 longueurs d'onde. Ses longueurs d'onde se situent entre 1525 nm et 1565 nm (bande C) ou 1570 nm et 1610 nm (bande L).

- Applications

Le CWDM est flexible et peut être déployé sur la plupart des réseaux à fibres optiques. Il est généralement utilisé dans les topologies point à point des réseaux d'entreprise et les réseaux d'accès de services de télécommunications.

Le DWDM est considéré comme une option pour les réseaux métropolitains. Actuellement, il est également utilisé pour les interconnexions des centres de données et pour les réseaux de services financiers. Il est souvent déployé dans les topologies en anneau. [20]

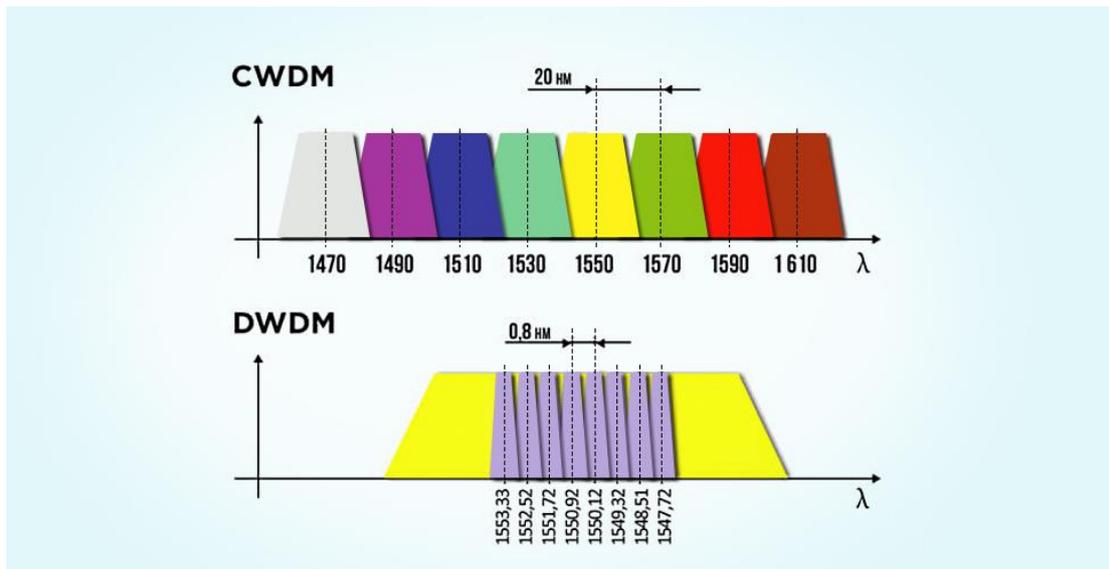


Figure II. 8 : Espacement des canaux

II.7. Différents composants d'un système WDM

Un système WDM (Wavelength Division Multiplexing) se compose généralement des composants suivants:

- Émetteurs/Récepteurs Optiques

Ces dispositifs génèrent les signaux optiques qui seront transmis sur la fibre. Chaque émetteur/récepteur est associé à une longueur d'onde spécifique.

- Filtres Mux/DeMux DWDM

Le multiplexeur (Mux) combine les signaux de plusieurs émetteurs optiques pour la transmission sur une seule fibre optique. À l'autre bout, un démultiplexeur (Demux) sépare les signaux optiques combinés et transmet chaque canal à un récepteur optique.

- Multiplexeurs Optiques d'Ajout/Extraction (OADM)

Ces dispositifs permettent d'ajouter ou d'extraire un ou plusieurs canaux optiques à une longueur d'onde spécifique sans perturber les autres canaux.

- Amplificateurs Optiques

Ils sont utilisés pour amplifier le signal optique lorsqu'il se propage sur de longues distances.

- Transpondeurs (Convertisseurs de Longueur d'Onde)

Ces dispositifs convertissent le signal optique d'une longueur d'onde à une autre. Ils sont souvent utilisés pour convertir les signaux optiques entrants en une longueur d'onde qui peut être utilisée dans le système WDM.

Ces composants travaillent ensemble pour permettre la transmission de multiples signaux optiques sur une seule fibre, augmentant ainsi la capacité de transmission de la fibre optique.

[21]

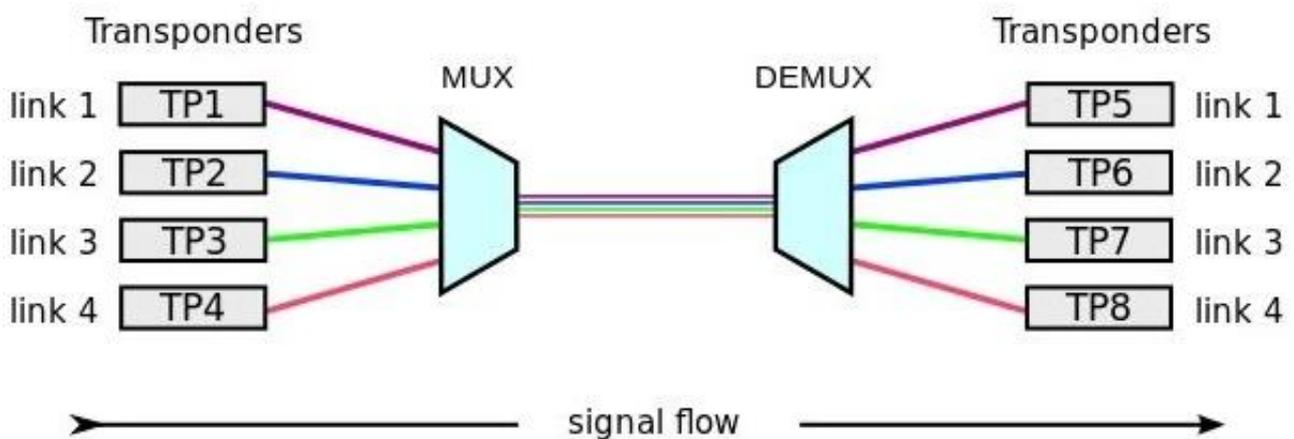


Figure II. 9 : Les différents composants d'un système WDM

II.8. Augmentation en capacité d'un système WDM

Depuis quelques années, la capacité des systèmes WDM a augmenté d'une manière considérable. Toutes fois pour atteindre des capacités encore plus grandes, il faudra augmenter le débit binaire par canal ou augmenter le nombre de canaux ou les deux à la fois. Le choix pour obtenir une capacité donnée dépend de considérations à la fois techniques et économiques et des caractéristiques des équipements en interface. [22]

II.9. L'utilisation de la WDM dans les réseaux à fibre optique

CWDM et DWDM sont utilisés pour augmenter la capacité des réseaux et répondre à la demande de transmission de données à haut débit. Le choix entre les deux dépend de la capacité du réseau, de la distance, du budget et de la disponibilité de la fibre.

CWDM, couvrant de 1270 nm à 1610 nm avec des canaux espacés de 20 nm, est moins coûteux et efficace sur des distances plus courtes (40-50 km), idéal pour des besoins limités à 8 nouveaux liens. DWDM, avec plus de 40 canaux dans un spectre de 24 nm, est préférable pour des besoins futurs d'expansion et des distances plus longues (jusqu'à des centaines de kilomètres avec amplification). [23]

L'utilisation de la technologie WDM dans les réseaux à fibre optique permet d'augmenter la capacité, d'optimiser les ressources et de répondre à la demande croissante de transmission de données à haut débit². La manière dont vous utilisez le WDM dans un réseau dépend de plusieurs facteurs, notamment la capacité du réseau, la distance, le budget et le type/la disponibilité de la fibre. [24]

En résumé, la technologie WDM est largement utilisée dans les réseaux de communication à fibre optique pour augmenter la capacité de bande passante d'une seule fibre optique en transmettant plusieurs signaux simultanément à différentes longueurs d'onde⁴. Cela permet de répondre à la demande croissante de transmission de données à haut débit. [25]

II.10. Les réseaux PON et les techniques de multiplexage hybrides

Un réseau optique passif, ou PON (Passive Optical Network), utilise une technologie de fibre optique pour transmettre des données d'un point unique à plusieurs points de terminaison. Le terme « passif » se rapporte à l'utilisation de câbles à fibre optique connectés à un répartiteur non alimenté, qui transmet à son tour les données d'un réseau de fournisseur de services à plusieurs clients.

Techniquement, seul le répartiteur est passif, car le réseau a toujours besoin d'énergie électrique à la source et à la destination pour fonctionner.

La demande croissante de services intégrant la voix, les données et la vidéo a ouvert le chemin au développement de nouvelles techniques de transmission dans le but ultime de réaliser un réseau d'accès à large bande.

Les réseaux optiques passifs (PON) constituent l'une des alternatives offertes aux opérateurs de télécommunications, ils permettent de délivrer des services interactifs à haut débit jusqu'au domicile. Ils ont été considérés comme étant la solution la plus économique avec l'introduction de la fibre optique dans les réseaux d'accès. [18]

II.11. Les réseaux optiques passifs (PON)

Le réseau optique passif (PON) est apparu depuis 25 ans. C'est un réseau qui transporte des données dans le domaine optique entre l'OLT et l'ONU où le chemin de transport du signal optique est passif. Afin de permettre une bonne compréhension du réseau d'accès, nous décrirons dans cette section, les différentes architectures et standards du réseau PON. [15]

On distingue trois architectures fréquemment utilisées dans le réseau d'accès, il s'agit de :

- ✓ L'architecture point à point (P2P).
- ✓ L'architecture point à multipoint active (P2M).
- ✓ L'architecture point à multipoint passive (P2M-PON).

II.11.1. L'architecture point à point (P2P)

L'architecture point-à-point (P2P) est une configuration de réseau dans laquelle chaque nœud du réseau (ordinateur, serveur, etc.) a des privilèges égaux et partage la charge de travail. Cette architecture diffère de l'architecture client-serveur où plusieurs clients se connectent à un serveur centralisé pour utiliser des services. [26]

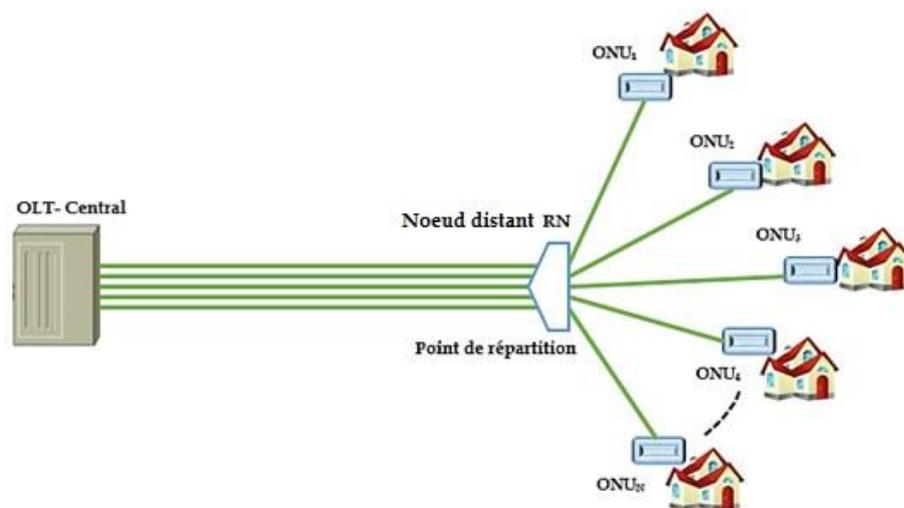


Figure II. 10 : Architecture point à point d'un réseau d'accès optique

L'inconvénient de cette architecture est qu'elle demande un très grand nombre de fibres optiques et d'émetteurs-récepteurs optiques au niveau de l'OLT, ce qui engendre un coût très important.

II.11.2. Architecture point à multipoint active (P2M)

L'architecture point à multipoint active (P2M), également connue sous le nom de FTTH P2P (Fiber To The Home Point to Point), est une configuration de réseau dans laquelle un point central (comme un serveur ou un routeur) est connecté à plusieurs points de terminaison (comme des ordinateurs ou des appareils) via des connexions directes. [26]

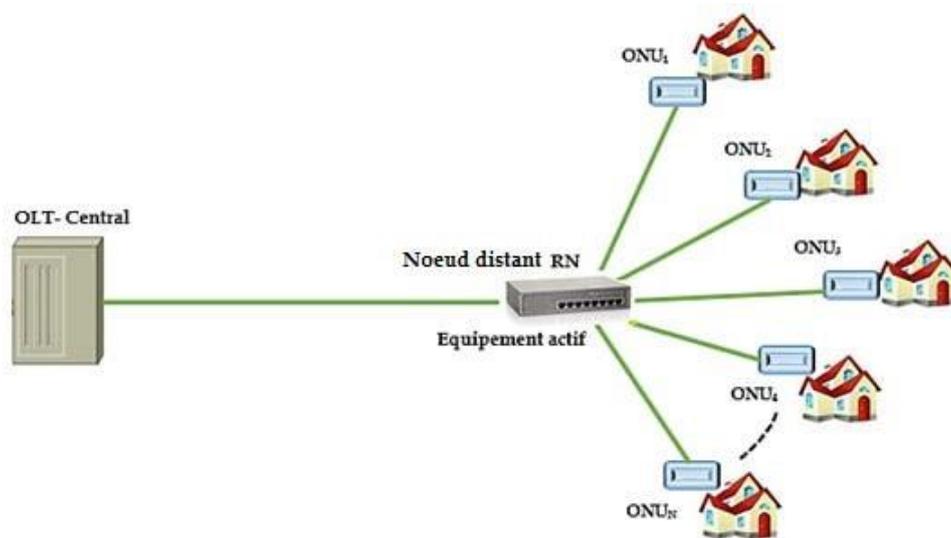


Figure II. 11 : Architecture point à multipoint actif d'un réseau d'accès optique.

L'inconvénient majeur de cette architecture, par contre, c'est la complexité d'opération c.à.d. l'alimentation électrique, l'installation, la maintenance et le coût élevé des équipements actifs.

II.11.3. Architecture point à multipoint passive (P2M-PON)

L'architecture point à multipoint passive (P2M-PON), également connue sous le nom de Réseau Optique Passif (PON), est une configuration de réseau dans laquelle un point central (comme un serveur ou un routeur) est connecté à plusieurs points de terminaison (comme des ordinateurs ou des appareils) via un système de couplage passif. [26]

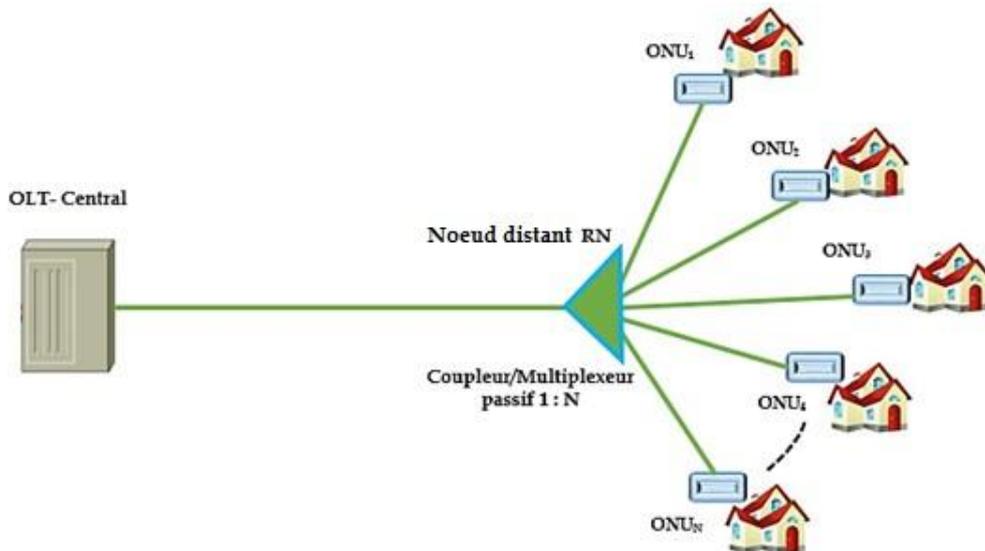


Figure II. 12 : Architecture point à multipoint passif (P2M-PON) d'un réseau d'accès optique

Parmi les avantages de cette architecture, cette dernière est moins coûteuse du point de vue matériels par rapport à l'architecture active. Elle évite toutes les complexités liées au fonctionnement d'un équipement actif dans le réseau d'accès.

L'inconvénient de l'architecture PON est la complexité des techniques de multiplexage, ainsi que l'atténuation et la perte qui sont produites par des composants optiques passifs, et qui limitent donc la portée du réseau.

II.12. Différentes topologies du réseau PON

Le réseau PON possède trois topologies, il s'agit de trois configurations de base (anneau, arbre et bus). La topologie la plus utilisée dans le réseau PON, c'est celle en arbre parce qu'elle possède un grand avantage en termes de la petite variation de la puissance du signal provenant de différentes stations. Cette topologie est considérée comme une fibre point à multipoint.

Dans la topologie en anneau, les stations sont enchaînées les unes aux autres pour former un anneau unidirectionnel. L'inconvénient de cette dernière est que si une station ONU tombe en panne, le réseau est complètement coupé (voir la figure II.10). Donc la solution est de mettre un réseau à double anneau.

Dans la topologie en bus, toutes les stations sont reliées à un support commun. L'inconvénient majeur de cette topologie c'est le problème de partage du support physique (fibre optique).

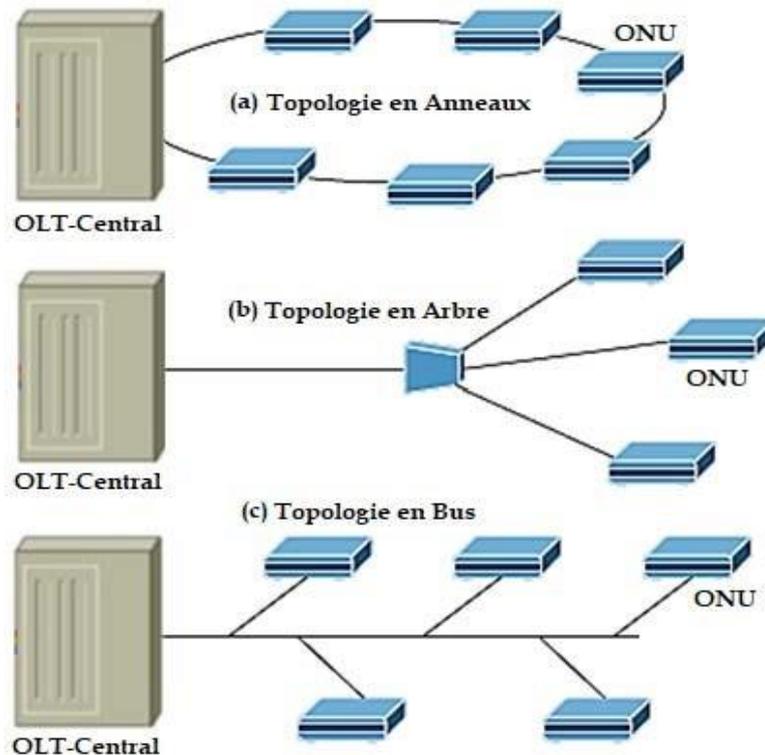


Figure II. 13 : Les topologies d'un réseau PON.

Il est à noter dans un réseau PON, qu'une telle configuration doit réduire la quantité de fibres et d'équipements au niveau de l'OLT-Central.

II.13. Multiplexage WDM/PON

Le WDM PON (Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network) est un type de multiplexage optique utilisé dans les réseaux d'accès optiques. Il offre une bande passante plus élevée, il s'agit d'une solution prétendant pour les systèmes PON de prochaine génération en concurrence avec les systèmes 10 G-EPON et XG-PON. L'architecture WDM PON présente divers avantages par rapport aux systèmes traditionnels TDM PON.

Tout d'abord, le WDM PON permet à chaque utilisateur d'être dédié avec une ou plusieurs longueurs d'onde, permettant à chaque abonné d'accéder à toute la bande passante adaptée aux longueurs d'ondes. [18]

Cette architecture offre généralement une sécurité et une évolutivité accrues car chaque abonné ne reçoit que sa propre longueur d'onde. Le WDM PON permet des connexions point à point (P2P) entre l'OLT et l'ONU et ne nécessite pas de contrôleurs d'accès point à multipoint (P2MP) dans d'autres réseaux PON.

La figure II.11, montre que pour l'aval (downstream) du WDM PON, les longueurs d'onde sont acheminées de l'OLT vers l'ONU par un routeur à réseau de guides d'ondes (AWG), en réseau déployé sur un nœud distant (Remote Node). L'AWG est un élément optique passif avec la particularité et la périodicité. Pour le sens amont (upstream), l'OLT utilise un démultiplexeur WDM ainsi qu'un dispositif de réception pour recevoir les signaux en amont.

Chaque ONU est équipée d'un émetteur et d'un récepteur pour recevoir et émettre sur ses longueurs d'onde respectives.

Dans ce contexte, les transmissions en aval et en amont se produisent dans des fenêtres de longueurs d'onde différentes ; malgré ces caractéristiques attrayantes, le WDM PON a un coût inhibiteur en raison de la caractéristique de longueur d'onde des ONUs. Étant donné que chaque abonné est dédié à certaines longueurs d'onde, l'OLT dans le WDM PON prenant en charge 32 ONU doit transmettre sur au moins 32 longueurs d'onde différentes et chaque ONU doit fonctionner à ses propres longueurs d'onde. Cela impose des exigences plus élevées aux lasers par rapport aux réseaux TDM PON.

Il est optimisé pour des applications jusqu'à 20 km, et pour atteindre des distances supérieures à 100 km, des amplificateurs optiques et des fibres de compensation de la dispersion chromatique sont nécessaires.

Le WDM-PON est utilisé pour les réseaux FTTC, FTTB et les FTTH afin de fournir différents services de type vidéo, voix ou données. Il répond aux besoins en bande passante pour les réseaux mobiles 3G et 4G LTE. [27]

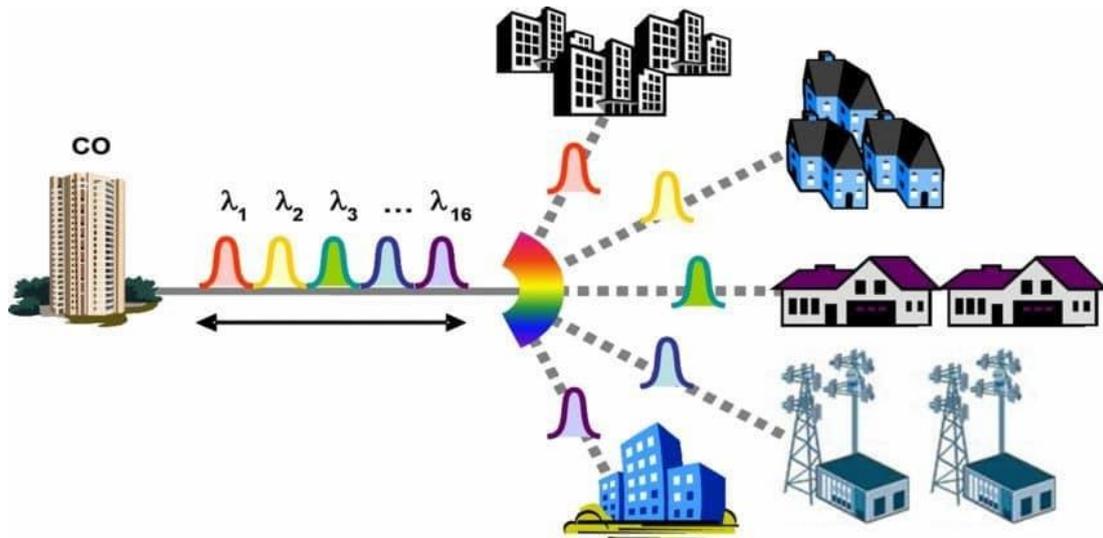


Figure II. 14 : Architecture typique du WDM PON

Ce type de multiplexage est capable de prendre en charge l'extension de la portée pour les réseaux EPON existants.

Il est également adapté pour créer un système hybride (TWDM) qui combine les deux avantages du TDM-PON et du WDM-PON.

II.14. Les techniques du multiplexage hybride

Malgré le développement remarquable dans l'heure actuelle, il est toujours nécessaire de disposer des réseaux rapides très efficaces capables d'exploiter les liaisons à fibres optiques actuelles.

A cet effet, le multiplexage optique hybride a pour but de contribuer à un nouveau système plus compétitif en termes du débit, de capacité, de sécurité, du coût, ainsi que la possibilité d'intégration dans les réseaux PON afin d'optimiser les performances en termes de (TEB, OSNR, facteur de qualité Q et le diagramme de l'œil), et son utilisation dans différentes applications notamment les FTTx, les GPON, les NG-PON2, les réseaux métropolitains MAN, les réseaux étendus WAN, ...etc.

Dans ce contexte, on distingue plusieurs types de multiplexage hybride notamment l'OTDM/WDM-PON, l'OCDMA/OTDM-PON, l'OCDMA/WDM-PON, l'OFDMA/WDM-PON, l'OFDMA/OTDM-PON ainsi que l'OFDMA/OCDMA-PON. Dans ce mémoire nous allons nous restreindre au système hybride OTDM/WDM-PON et l'OCDMA/WDM-PON.

II.14.1. Le système hybride OTDM/WDM-PON

Le système hybride OTDM/WDM est une technique qui combine deux types de multiplexage optique tels que l'OTDM (Optical Time Division Multiplexing) et le WDM (Wavelength Division Multiplexing). L'OTDM a pour but d'augmenter la capacité du système (nombre d'utilisateurs) et la mise à niveau du débit binaire vers un seul canal afin de créer des signaux à grande vitesse avec des sources optiques à faible vitesse. Ce système peut être exécuté sur un certain nombre de canaux WDM existants (4, 8, 16 canaux, ...etc.), ce qui améliore la capacité globale des données. Il s'agit d'une technologie complémentaire dont une seule partie de la fibre peut transmettre plusieurs signaux WDM. Les données OTDM multiplexées peuvent être contenues dans chaque longueur d'onde WDM.

Elle fonctionne sur une longue portée. Cependant pour cette dernière solution, le partage de la bande passante totale n'est pas flexible et efficace entre plusieurs abonnés. Cela permet de contribuer à la technologie hybride OTDM/WDM dans les réseaux PON afin d'obtenir un compromis entre les deux systèmes. [28]

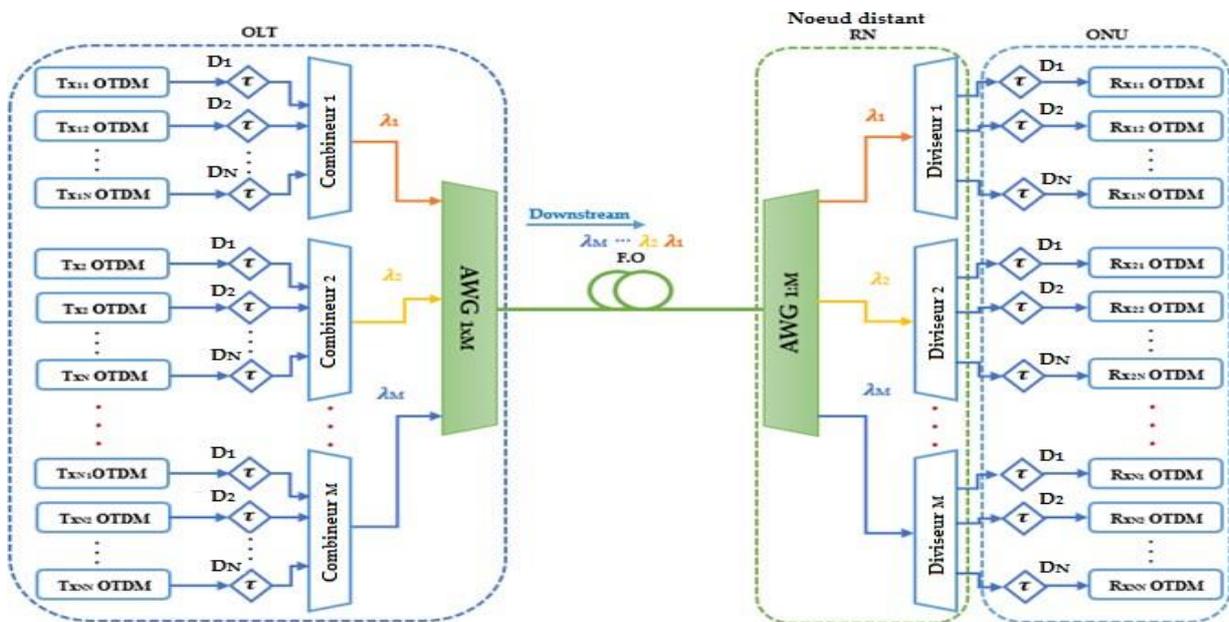


Figure II. 15 : Architecture typique en aval du système hybride OTDM/WDM-PON

Parmi les avantages du système hybride, la bande passante totale disponible est très élevée grâce à la technologie WDM. Le taux de partage et le débit sont plus élevés grâce à la technologie OTDM, cela implique que l'assemblage de ces deux technologies augmente le nombre d'abonnés servis par un réseau PON.

En revanche, ce système hybride présente aussi des inconvénients liés à la complexité de la mise en œuvre et le coût. Il y a aussi le problème de la stabilisation du fonctionnement de l'AWG en température

II.14.2. Le système hybride OCDMA/WDM-PON

Le système hybride OCDMA/WDM est une combinaison de deux techniques différentes du multiplexage, il s'agit du système OCDMA et le système WDM. Le rôle principal de l'OCDMA c'est beaucoup plus la confidentialité des données et l'augmentation du nombre d'utilisateurs. Cependant le système WDM a pour but d'augmenter la capacité du système ainsi que son efficacité spectrale.

La figure II-13 ci-dessous, montre le principe de fonctionnement du système hybride dont la technique d'accès consiste à associer à l'OCDMA une dimension supplémentaire en longueur d'onde. Chaque séquence de code OCDMA est réutilisable et émise simultanément à différentes longueurs d'onde. [28]

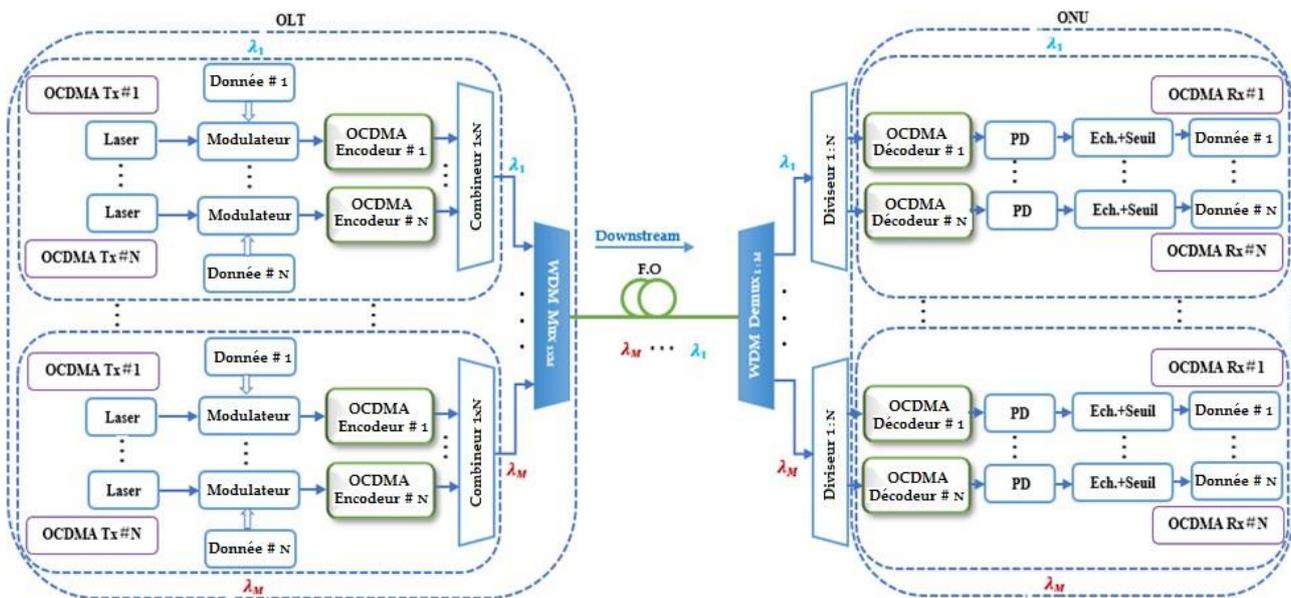


Figure II. 16 : Architecture typique en aval du système hybride OCDMA/WDM-PON.

L'avantage de ce système hybride est qu'il permet de réaliser un codage à deux dimensions dont le but de ce dernier est d'augmenter la capacité de multiplexage et d'éliminer les contraintes d'orthogonalité des codes avec un accès flexible et sécurisé.

Remarque : dans le système hybride OCDMA/WDM, l'amplification est indispensable pour remédier aux effets non-linéaires causés par le système WDM.

II.14.3. Le système hybride OFDMA/WDM-PON

Ce système hybride intègre deux techniques de multiplexage. La première repose sur la modulation OFDM du signal numérique sur un grand nombre de sous-porteuses, permettant une utilisation efficace de la bande passante et une transmission maximale d'information. L'OFDMA dans ce système hybride vise également à atténuer les effets non linéaires causés par l'espacement étroit du système WDM, la dispersion chromatique et l'atténuation.

Le second système est le WDM, qui vise à répondre à la demande d'un débit très élevé, soit environ Gbps par abonné, et fonctionne sur une longue portée. Cependant, pour cette dernière solution, le partage de la bande passante totale entre plusieurs abonnés n'est pas flexible ni efficace. Cela conduit à l'adoption d'une technologie hybride appelée OFDMA/WDM utilisée dans les réseaux PON, qui assure un équilibre entre les deux systèmes. L'orthogonalité entre les sous-porteuses pour l'OFDM élimine les interférences entre les symboles dont l'espacement est égal à l'inverse de la période du symbole. [28]

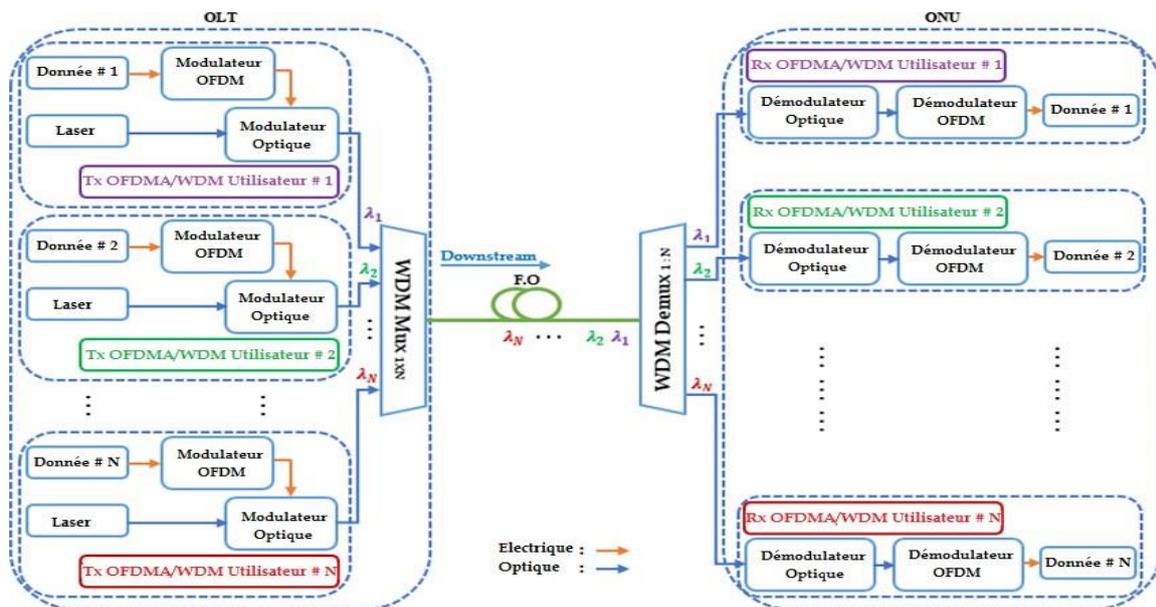


Figure II. 17 : Architecture typique en aval du système hybride OFDMA/WDM-PON.

En résumé, le système hybride OFDMA/WDM est une technologie prometteuse pour les réseaux de communication optique de haute capacité, mais elle nécessite une amplification pour compenser l'atténuation provoquée par le système WDM.

II.15. Conclusion

La technologie du WDM est sans concurrence du point de vue de la capacité car le coût de la fibre et des matériaux ne cesse de baisser avec des portées toujours plus longues.

L'accroissement de la capacité se fait de deux façons : en augmentant le nombre de canaux dans une fibre et en augmentant le débit par canal lors de l'émission. L'évolution du WDM a permis de battre de nouveaux records en matière de débit. Les innovations constantes dans les technologies de transmissions offrent de nouvelles possibilités d'économies. L'objectif des systèmes WDM est d'atteindre des capacités encore plus grandes, pour ça la recherche aujourd'hui est concentrée sur le rapprochement des canaux et l'élargissement dans la bande passante optique exploitée tout en augmentant le débit binaire par canal.

Les réseaux PON, en particulier, constituent une pierre angulaire des infrastructures de communication modernes. Ils permettent une transmission efficace et rentable des données sur de longues distances. Cependant, avec la croissance de ces réseaux, la question de la cybersécurité devient prépondérante.

La technologie WDM-PON est une technologie de réseau d'accès qui peut transformer considérablement les infrastructures des opérateurs. Elle permet de créer une architecture point à point logique basée sur la longueur d'onde sur une topologie de fibre physique point à multipoint. Cette technologie de multiplexage/démultiplexage WDM divise les signaux de données en signaux de sortie individuels connectés à des bâtiments ou à des habitations. Cette séparation du trafic basée sur le matériel offre aux clients les avantages d'une liaison de longueur d'onde point à point sécurisée et évolutive, et permet à l'opérateur de conserver un nombre de fibres très bas, ce qui réduit considérablement les coûts d'exploitation.

Les réseaux PON et les techniques de multiplexage hybride jouent un rôle crucial dans le domaine des télécommunications. Ils permettent d'augmenter de manière significative la capacité des réseaux de fibres optiques et offrent une plus grande flexibilité pour répondre aux besoins changeants des utilisateurs. Cependant, il est essentiel de se tenir informé des dernières évolutions en matière de cybersécurité pour garantir la sécurité et l'intégrité des données transmises.

Chapitre III :

WDM avec modulation

RZ/ NRZ

III.1. Introduction

Pour transmettre des données numériques, on passe par une adaptation électrique d'un symbole numérique sur un canal de transmission.

Cette opération est appelée modulation en bande de base. Les signaux bande de base subissent une atténuation qui dépend du support employé et doivent donc être régénérés périodiquement sur de longues distances.

Les données stockées dans un ordinateur sont sous forme de 0 et de 1. Lorsqu'on les transporte d'un endroit à un autre, c'est ce qu'on appelle la conversion numérique-numérique. Dans ce type de codage, les 1 et 0 binaires générés par l'ordinateur sont traduits en une séquence d'impulsions de tension pouvant se propager sur un fil.

Dans certains cas, il est nécessaire de convertir un signal analogique en un signal numérique, processus également appelé numérisation d'un signal analogique. Inversement, il peut être nécessaire de convertir un signal numérique en signal analogique, opération appelée modulation d'un signal numérique. Souvent, un signal analogique est envoyé sur de longues distances à l'aide de supports analogiques.

Il s'agit alors d'une conversion analogique-analogique ou d'une modulation d'un signal analogique.

La modulation RZ (Return-to-Zero) et la modulation NRZ (Non-Return-to-Zero) sont deux méthodes couramment utilisées pour représenter des données numériques dans des systèmes de transmission optique, tels que le WDM (Wavelength Division Multiplexing).

Dans ce chapitre, nous explorerons les principes, les avantages et les inconvénients de ces deux types de modulation.

III.2. Les différents codes en ligne

Un code de ligne est une affectation d'un symbole ou d'une impulsion à chaque bit d'une séquence de zéros ou des uns à transmettre sous forme d'un signal électrique.

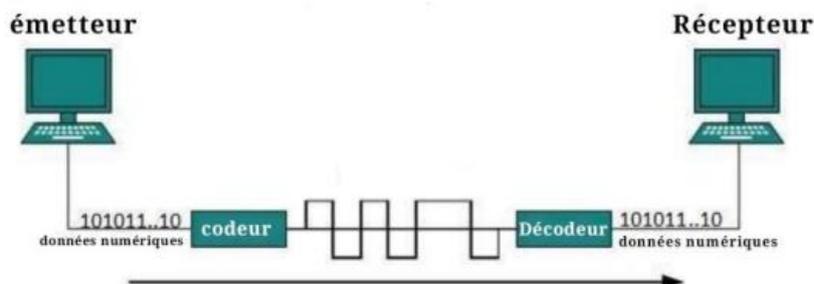


Figure III. 1 : rincipe de codage en ligne

- ✓ Les données numériques sont représentées par des formats de données en bande de base appelés code de ligne.
- ✓ Le signal électrique est modulé en amplitude par un format de modulation OOk (on/off keying)
- ✓ La vitesse des données est généralement exprimée en bits / seconde ou octets / seconde
- ✓ Le débit de données R_b lié à la période de bit T_b (durée d'un bit).

$$R_b = \frac{1}{T_b}$$

- ✓ Le débit binaire est généralement appelé la capacité du canal.
- ✓ Les systèmes de communication utilisent des symboles pour transmettre des informations.
- ✓ Un symbole peut être un bit par symbole (appelé binaire), ou un groupe de bits, ou une collection de niveaux de tension définis (symboles à plusieurs niveaux)
- ✓ La forme d'un signal électrique à transmettre :

$G(t)$ Fonction utilisé pour la transmission , a_k poids associe au codage

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} a_k g(t - kT)$$

- ✓ Le taux de symbole R_{sym} est lié à la période (ou la durée) T_s du symbole par

$$R_{sym} = \frac{1}{T_s}$$

- ✓ Le débit de symboles est également appelé débit en bauds. Le débit binaire R_b peut être écrit comme :

$$R_b = R_{sym} \times \log_2(\eta) = R_{sym} \times n \quad (I.4)$$

Où $\eta = 2^n$ est le nombre de niveaux (pour n bits par symbole).

- ✓ Efficacité d'un code en ligne : un code en ligne est dit efficace si il présente une largeur de bande minimale et un maximum de puissance d'émission, ainsi que la présence d'une raie spectrale de synchronisation sur $f = R$. Il est efficace aussi si il ne représente pas de composante continue à $f = 0$ Hz [1].
- ✓ Modulation externe : La modulation externe consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu. Sa réalisation nécessite l'utilisation d'un modulateur externe de type Mach-Zehnder (MZM, Mach-Zehnder Modulator), à la source, qui module le faisceau lumineux à sa sortie du laser. Le signal est beaucoup moins dégradé à la sortie de ce type de modulateur que celui issu de la modulation directe. [2]

La figure III.2 représente le schéma de principe d'une modulation externe

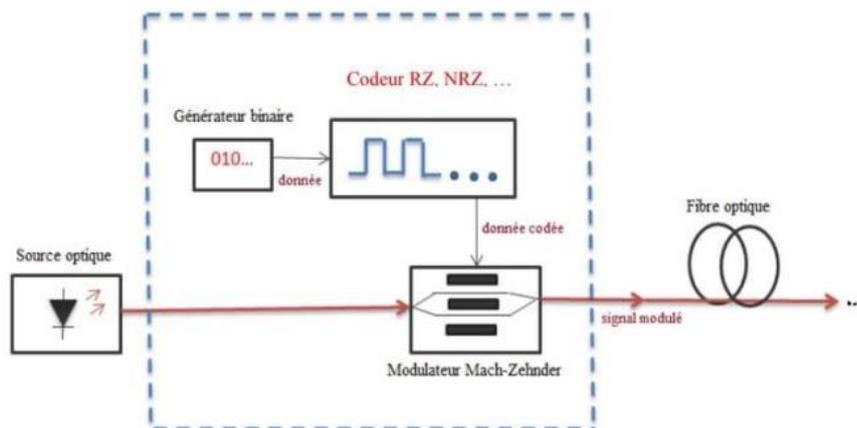


Figure III. 2 : Schéma de principe d'une modulation externe ici

III.3.Code NRZ (non-retour à zéro)

C'est un format de codage le plus simple et intuitif qui existe , le signal modulé en NRZ est une forme du signal binaire électrique, c'est a dire il transforme tout simplement les zéros et les uns binaire en tension continue (+v ou -v).[3]

Un « 0 » est codé par un signal à faible tension (idéalement nulle)

Un « 1 » est codé un signal a forte tension. Impulsion du code NRZ

$$g(t) = A(t) \in [0, T] \text{ Et } [0 \text{ ailleurs}]$$

La figure suivante représente la forme d'onde $g(t)$ du code NRZ .

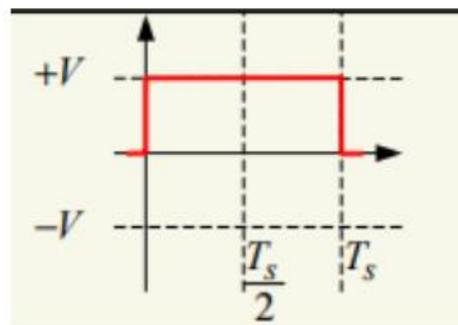


Figure III. 3 : Impulsion du code NRZ $g(t)$

Il existe deux types de formes d'onde NRZ, à savoir. Unipolaire et bipolaire (NRZ-LEVEL) et la forme inversée du format NRZ (NRZ-I).On explique c'est format par des chronogrammes de ces code en ligne.

III.3.1. NRZ unipolaire

La figure III.4 représente le chronogramme du code NRZ unipolaire d'une suite binaire (1011010) avec :

$V_0 \rightarrow$ Tension maximale

$T_b \rightarrow$ Durée d'un bit

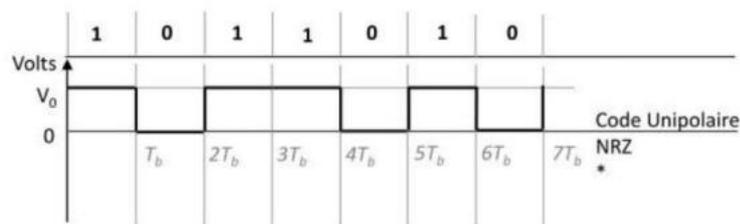


Figure III. 4 : Chronogramme du code NRZ unipolaire

III.3.2. NRZ (bi)polaire

La figure III.5 représente le chronogramme du code NRZ bipolaire d'une suite binaire (1011010) avec :

$V_0 \rightarrow$ Tension maximale

$T_b \rightarrow$ Durée d'un bit

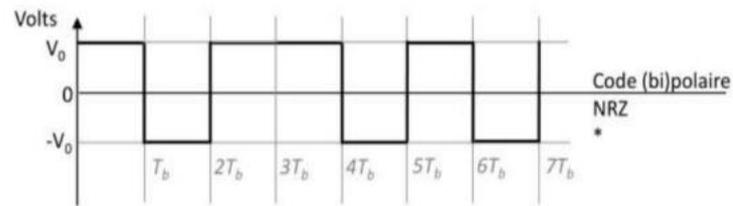


Figure III. 5 : Chronogramme du code NRZ bipolaire

III.3.3. NRZ-I

Ce code symétrise par rapport au zéro, c'est une variante inversée du code NRZ

- ✓ Une transition du signal pour chaque bit « 1 »
- ✓ Pas de transition pour les bits « 0 »
- ✓ Pour une suite continue des bits de « 0 » il n'y a pas de transition et une variante NRZ L pour le bit « 1 ».[3]

La figure II.3 représente le chronogramme du code NRZ-I bipolaire d'une suite binaire (10000101111).

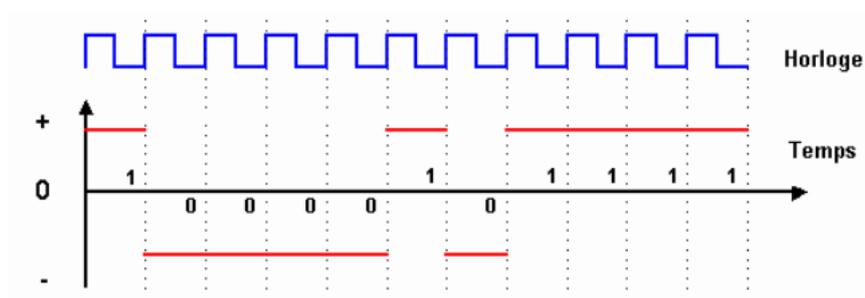


Figure III. 6 : Chronogramme du code NRZ I

III.3.4. Facteur de qualité Q de format NRZ

Le facteur de qualité Q est une mesure utilisée pour évaluer la performance des systèmes de communication optique. Pour le format de modulation NRZ (Non-Return-to-Zero), le facteur de qualité Q peut être calculé en fonction du rapport signal-bruit et des niveaux de puissance du signal.

Le facteur de qualité Q est défini par la formule suivante : $Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$

- ✓ I_{11} est le niveau moyen du signal pour le bit '1'
- ✓ I_{00} est le niveau moyen du signal pour le bit '0'
- ✓ σ_1 est l'écart type du bruit pour le niveau du bit '1'
- ✓ σ_0 est l'écart type du bruit pour le niveau du bit '0'

III.3.5. Taux d'erreur binaire de format NRZ

Le Taux d'Erreur Binaire (TEB) est une mesure clé de la performance des systèmes de communication numérique. Pour un format de modulation NRZ (Non-Return-to-Zero), le TEB peut être calculé à partir du facteur de qualité Q en utilisant des approximations bien connues pour des systèmes optiques.

Le TEB est défini comme le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre total de bits transmis sur une période de temps donnée.

Pour un système de communication optique, le TEB peut être approximé en fonction du facteur de qualité Q par la formule suivante :

$$\text{TEB} \approx \frac{1}{2} \cdot \text{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right)$$

Le TEB est une mesure essentielle de la performance des systèmes de communication utilisant la modulation NRZ. En utilisant le facteur de qualité Q et les formules appropriées, nous pouvons estimer le TEB et ainsi évaluer la fiabilité et l'efficacité du système de transmission.

III.3.6. OSNR de format NRZ

Le rapport signal sur bruit optique (OSNR, Optical Signal-to-Noise Ratio) est une mesure clé pour évaluer la performance des systèmes de communication optique, y compris ceux utilisant le format de modulation NRZ (Non-Return-to-Zero). L'OSNR indique la qualité du signal en comparant la puissance du signal optique à la puissance du bruit optique

L'OSNR est défini comme le rapport entre la puissance du signal optique (P_{signal}) et la puissance du bruit optique (P_{bruit}) dans une bande passante de référence, généralement de 0,1 nm :

$$\text{OSNR (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{bruit}}} \right)$$

L'OSNR est crucial pour les systèmes de modulation NRZ car il influence directement la qualité du signal reçu et la probabilité d'erreur de bit (BER). Un OSNR élevé signifie que la puissance du signal est beaucoup plus grande que la puissance du bruit, ce qui conduit à une transmission plus fiable et moins d'erreurs de bits.

III.3.7. La puissance du Laser de format NRZ

La puissance du laser est une caractéristique essentielle dans les systèmes de communication optique, y compris ceux utilisant le format de modulation NRZ (Non-Return-to-Zero). La puissance du laser affecte directement la qualité du signal transmis, l'OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio), et finalement la performance globale du système de communication.

En modulation NRZ, les niveaux de puissance du laser pour les bits '1' et '0' sont maintenus constants pendant toute la durée du bit. Cela signifie que la puissance optique émise par le laser ne revient pas à zéro entre les bits '1' et '0', contrairement à la modulation RZ (Return-to-Zero) où le signal retourne à zéro entre chaque bit.

$$P_{\text{moy}} = P_1 \cdot R_1 + P_0 \cdot R_0$$

III.4. Domaine d'utilisation et caractéristique de format NRZ

Le code NRZ exige un modulateur externe simple aux débits à grande vitesse et fonctionne efficacement jusqu'à 10 Gbits/s.

- ✓ Le code NRZ est généralement utilisé pour des débits inférieurs à 10 Gbits/s, aussi il est beaucoup utilisé dans les systèmes WDM (Multiplexage par répartition en longueur d'onde à 2.5 Gbit)
- ✓ Il a été utilisé en raison de son immunité au bruit de phase laser et de ses exigences de faible bande passante par rapport à d'autres formats de modulation.
- ✓ Le code NRZ est combiné uniquement dans les systèmes de transmission linéaire. Il a une amplitude variable et une phase constante. [5]

III.5. Avantage du code NRZ

- ✓ La simplicité à mettre en œuvre et une bonne efficacité spectrale car il peut atteindre de 2 bits / Hz
- ✓ Une bande passante moindre est requise.
- ✓ Aucun problème de chute de signal (pour le NRZ bipolaire)
- ✓ Aucun composant DC (NRZ bipolaire). [5] [6]

III.6. Inconvénient du code NRZ

- ✓ La possibilité d'un affaiblissement de signal en présence d'un composant de basse fréquence.
- ✓ Aucune correction d'erreur n'est effectuée
- ✓ La possibilité de perte de synchronisation pour les longues chaînes de « 0 » et « 1 ».
Présence de niveau DC (pour le format NRZ unipolaire)
- ✓ Aucun composant d'horloge à synchroniser sur le récepteur
- ✓ Capacité de correction d'erreur limitée (pour NRZ bipolaire). [5] [6]

III.7.Code RZ (retourne à zéro)

Le code RZ est le dérivé du format NRZ. Comme son nom l'indique, à chaque temps-bit, un retour à zéro systématique est opéré [2]. Sa réalisation nécessite une opération logique NON ET entre le signal électrique de donnée NRZ et le signal d'horloge comme le montre la figure II.5 [5]

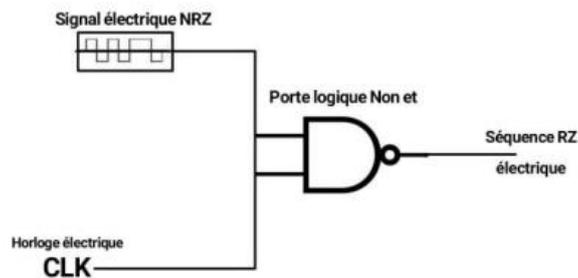


Figure III. 7 : Schéma du code RZ

Ce code associe un niveau de tension $V(0)$ pour chaque état logique « 1 » sur une période $T/2$ et un niveau 0 à chaque état logique « 0 » sur une période $T/2$.

Impulsion RZ :

$$g(t) = A \quad t \in [0, T/2], 0 \text{ ailleurs}$$

La figure représente la forme d'onde $g(t)$ du code RZ.

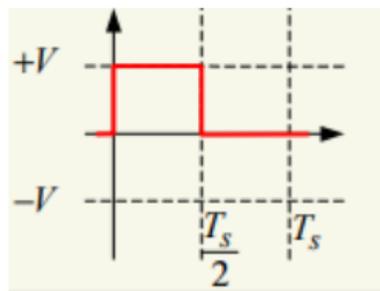


Figure III. 8 : Impulsion de code RZ $g(t)$

Il existe deux types de formes d'onde RZ, à savoir. Unipolaire et bipolaire

III.7.1. RZ unipolaire

La figure III.9 montre un chronogramme d'un codage RZ unipolaire d'une suite binaire(1011010) [1].

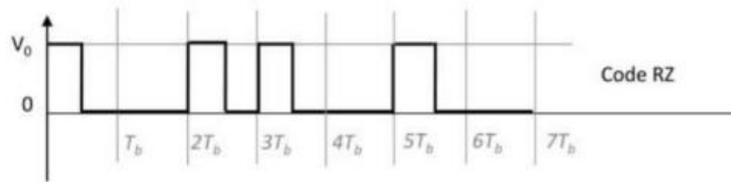


Figure III. 9 : Chronogramme du code RZ unipolaire

III.7.2. RZ bipolaire

La figure II.10 montre un chronogramme d'un codage RZ unipolaire d'une suite binaire (1011010) [1].

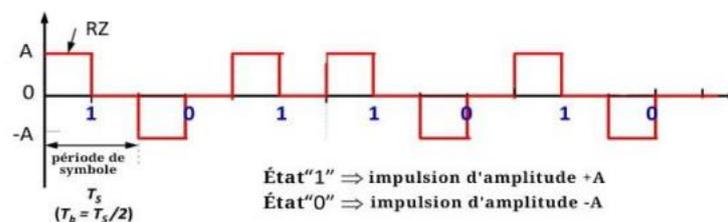


Figure III. 10 : Chronogramme du code RZ bipolaire

III.8.Domaine d'utilisation et caractéristique de format RZ

- ✓ Utilisé pour des débits plus élevés (au-delà 10 Gbit/s) car il a une puissance maximal plus élevée
- ✓ La bande passante dans un format RZ est égale au débit.
- ✓ Le code RZ est combiné aux systèmes de transmission linéaire et non linéaire. [5]

III.9.Les avantages de code RZ

- ✓ La présence d'une raie de synchronisation de $1 T$ (pour le RZ bipolaire)
- ✓ Simplicité et ne nécessite pas beaucoup de bande passante
- ✓ Aucun composant DC (RZ bipolaire) Pas de problème d'affaiblissement du signal.

III.10. Les inconvénients de code RZ

- ✓ Capacité de correction d'erreur limitée (RZ bipolaire)
- ✓ Présence de niveau DC (RZ unipolaire)
- ✓ Une longue chaîne de zéros provoque une perte de synchronisation (RZ unipolaire)
- ✓ Aucun composant d'horloge à synchroniser sur le récepteur (RZ bipolaire). [6]

III.11. Comparaison entre les différents schémas de (NRZ/RZ)

La comparaison entre les différents schémas de codage de ligne, en particulier NRZ (Non-Return-to-Zero) et RZ (Return-to-Zero), est essentielle pour comprendre leurs avantages et inconvénients dans divers systèmes de communication. Voici une comparaison détaillée entre ces deux schémas de codage.

Tableau III. 2 : Comparaison entre les différents schémas de codage de ligne (NRZ/RZ)

Critère	NRZ	RZ
Signal	Constant sur la durée du bit	Retour à zéro pendant le bit
Largeur de Bande	Plus étroite	Plus large
Synchronisation	Plus difficile	Plus facile
Composante DC	Oui	Non
Complexité	Plus simple	Plus complexe
Puissance Moyenne	Plus basse	Plus élevée
Sensibilité au Jitter	Plus sensible	Moins sensible

Le choix entre NRZ et RZ dépend largement des exigences spécifiques du système de communication, telles que la largeur de bande disponible, la complexité du matériel, la consommation d'énergie et la nécessité de synchronisation précise. Chaque schéma a ses avantages et inconvénients, et le choix optimal doit être basé sur une évaluation équilibrée de ces facteurs

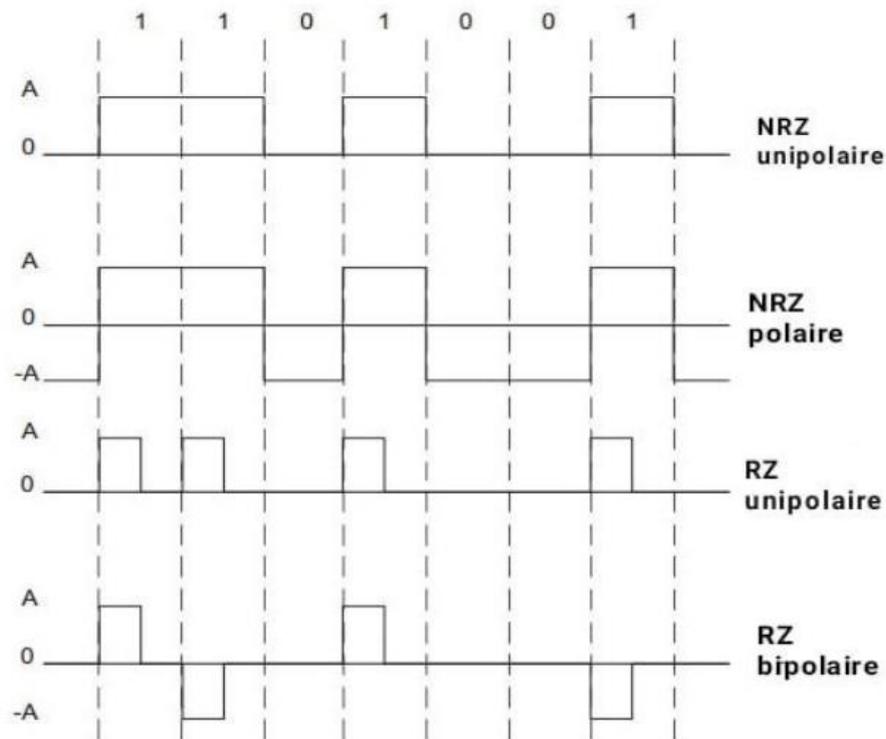


Figure III. 11 : Comparaison des schémas de code

III.12. Conclusion

Les signaux numériques sont généralement des informations binaires séquentielles sous la forme de zéros et des uns. Chacun de ces chiffres binaires est représenté par une certaine largeur d'impulsion. Cette largeur d'impulsion varie en fonction des exigences de débit de données de transmission. Dans deux types de signaux utilisés dans la transmission numérique d'informations binaires. Ce sont les codes NRZ et RZ.

Chapitre IV :

Simulation et interprétations

Des résultats

IV.1. Introduction

L'objectif de cette simulation est d'étudier le système WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing-Passive Optical Network) en utilisant le logiciel de simulation optique OptiSystem.

Le WDM-PON est une technologie de réseau optique qui utilise le multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) pour fournir plusieurs longueurs d'onde sur une seule fibre optique, permettant ainsi une utilisation plus efficace de la bande passante et une capacité accrue du réseau.

OptiSystem est un logiciel de simulation optique innovant qui permet aux ingénieurs et chercheurs de simuler avec précision et d'optimiser les systèmes de communication optique au niveau du système.

Dans cette simulation, nous allons configurer et analyser un système WDM-PON en utilisant OptiSystem, en se concentrant sur des paramètres clés tels que la puissance du signal, le rapport signal sur bruit, la dispersion, et d'autres facteurs qui peuvent affecter la performance du système

IV.2. Etude du système WDM-PON

IV.2.1. Description du système simulé

Dans ce système, on trouve trois étages à savoir l'étage de l'émetteur, le support de transmission et l'étage de la réception.

Ce système est un réseau PON, il dispose de deux sens de communications, il s'agit du sens descendant (downstream) et du sens montant (upstream). Nous allons évaluer les performances dans les deux sens en étudiant l'impact de la longueur de la liaison, de la puissance d'émission et du type du format de modulation sur le système WDM- PON.

Les figures IV.1 et IV.2 ci-après, montrent la configuration d'un émetteur WDM-PON et d'un récepteur WDM-PON c'est ce que l'on appelle l'ONU (Optical Network Unit).

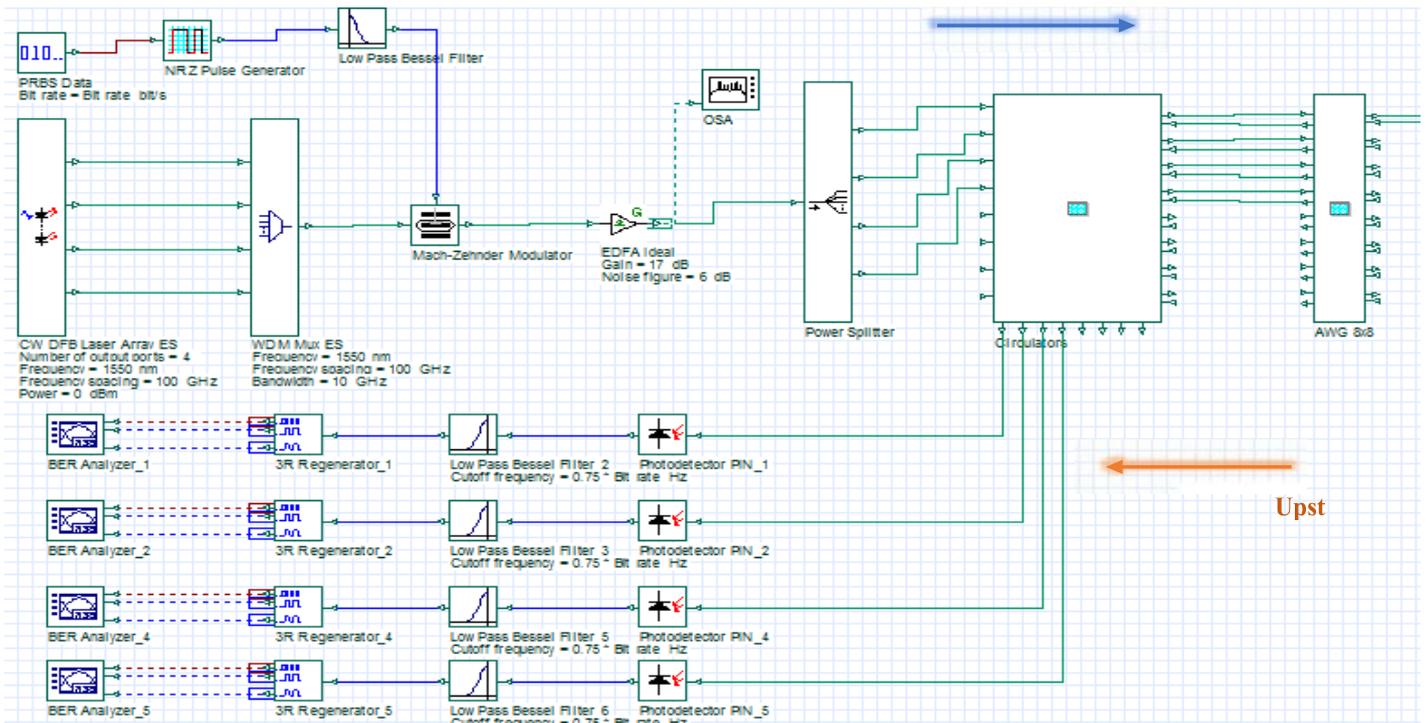


Figure IV. 1 : Schéma du système WDM-PON pour quatre utilisateurs (OLT).

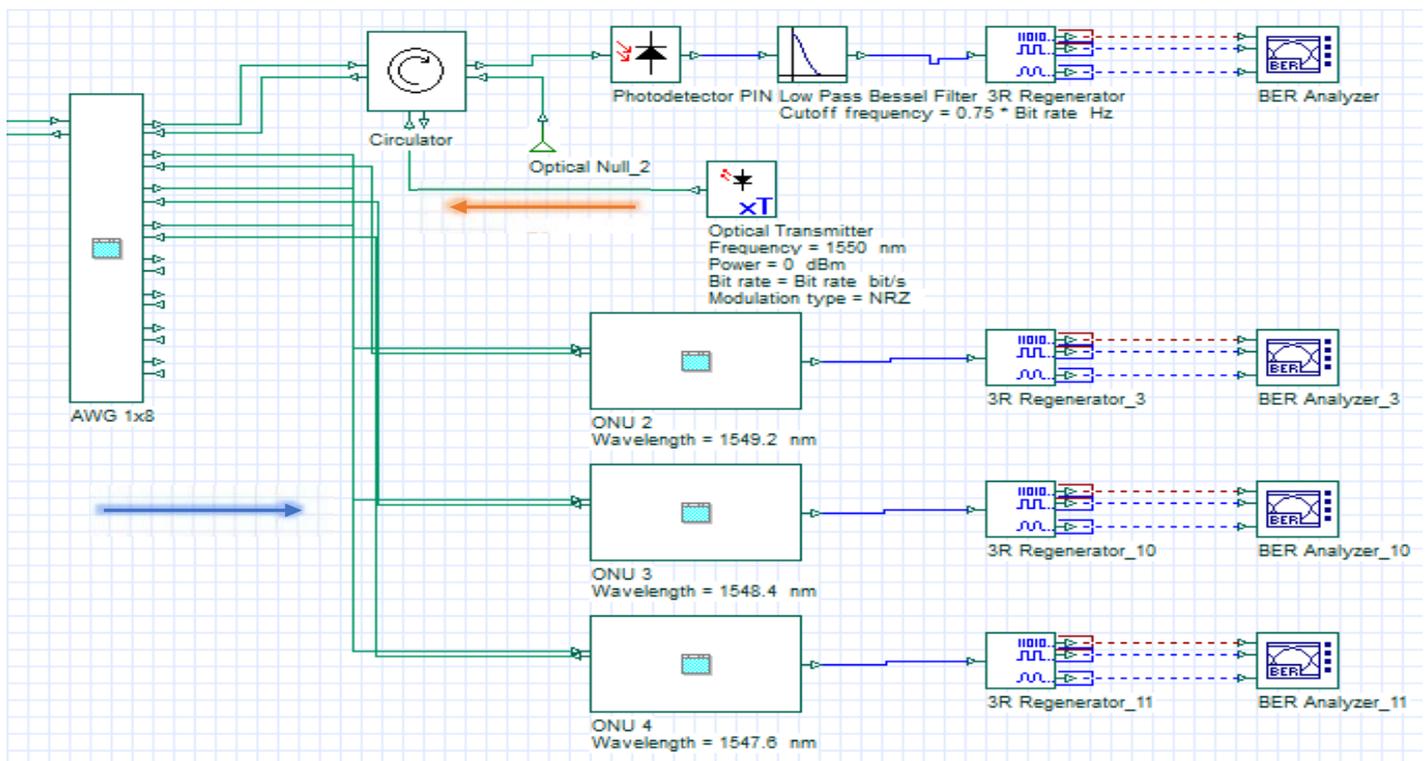


Figure IV. 2 : Schéma du système WDM-PON pour quatre utilisateurs (ONU).

Le système WDM PON que nous allons simuler comprend quatre canaux descendant et quatre canaux montant. L'OLT envoie toutes les longueurs d'onde via une seule fibre, avec des longueurs de liaison variant de 20 km à 60 km, des puissances d'émission allant de -10 dBm à 10 dBm, et un débit de données de $4 \times 2,5$ Gbps (comme mentionné dans le tableau IV.1).

Il utilise un coupleur de longueur d'onde AWG (Arrayed Waveguide Grating) connecté à une fibre pour séparer ou combiner les signaux de différentes longueurs d'onde, avec un format de modulation NRZ. À la réception, chaque ONU effectue une sélection pour ne recevoir que la longueur d'onde qui lui est attribuée. Ce système permet des connexions point à point (P2P) entre l'OLT et l'ONU.

IV.2.2. Paramètres de simulation :

Des séquences binaires pseudo-aléatoires (PRBS : Pseudo-Random Binary Sequences) sont générées et ensuite modulées optiquement grâce à un modulateur externe (Mach-Zehnder Modulator : MZM). Cela produit des signaux NRZ avec un débit de 2.5 Gbps par canal, dans les directions aval et amont.

Ces données modulées sont ensuite amplifiées par un amplificateur EDFA avec un gain de 17 dB. Elles sont ensuite combinées dans un dispositif AWG de 4x1 et transmises sur une fibre optique monomode (SMF : Single Mode Fiber).

Tableau IV. 1 : Paramètres du système WDM-PON.

Paramètres	Valeurs
Débit binaire	2.5 Gbps/canal (downstream), 2.5 Gbps/canal (upstream).
Puissance de Laser	-10 dBm, -8 dBm, -5 dBm, 0 dBm, 5 dBm, 8 dBm, 10 dBm.
Générateur d'impulsions	NRZ.
Longueur de la fibre SMF	20 km, 30 km, 40 km, 50 km, 60 km.
Dispersion chromatique CD	17 ps/nm/km.
Dispersion de mode depolarisation PMD	0.5 ps/km ^{1/2}
Atténuation	0.24 dB/km.
Gain EDFA	17 dB.
Nombre d'utilisateurs	4.
Longueur d'onde (downstream)	1550 nm/canal.
Longueur d'onde (upstream)	1550, 1549.2, 1548.4, 1547.6 nm.
La vidéo (broadcast)	1550 nm.
Espacement entre les canaux	0.8 nm.

IV.2.3. Etude de l'impact de la longueur de la liaison et de la puissance sur le système

Dans la direction aval (downstream) du système WDM-PON, pour une longueur de 20 km et une puissance de 0 dBm (comme illustré dans les figures IV.3 et IV.4), nous observons que l'œil est entièrement ouvert, c'est-à-dire que $TEB_{Downstream}$ et $TEB_{Upstream}$ sont approximativement égaux à 0.

Cependant, pour une longueur $L = 60$ km (voir figures IV.5 et IV.6), le $TEB_{Downstream}$ est égal à $8,991 \times 10^{-12}$ et le $TEB_{Upstream}$ est égal à $4,417 \times 10^{-5}$, ce qui indique que les performances du système WDM PON commencent à se dégrader au-delà de 60 km.

De plus, nous constatons que si la longueur de la liaison augmente, le facteur de qualité Q diminue ($Q_{Downstream} = 6,721$ et $Q_{Upstream} = 3,108$). Pour une puissance de -10 dBm et une longueur de 20 km, nous obtenons des résultats inférieurs ($Q_{Downstream} = 7,851$ et $Q_{Upstream} = 3,212$), ce qui suggère que la puissance du laser pour le système WDM PON est un facteur crucial.

Dans notre système, le rapport signal/bruit ou OSNR est un indicateur qui suit la performance du réseau optique et identifie toute dégradation qui peut affecter la qualité du service.

Les résultats sont satisfaisants pour $L < 60$ km (voir figure VI.9)

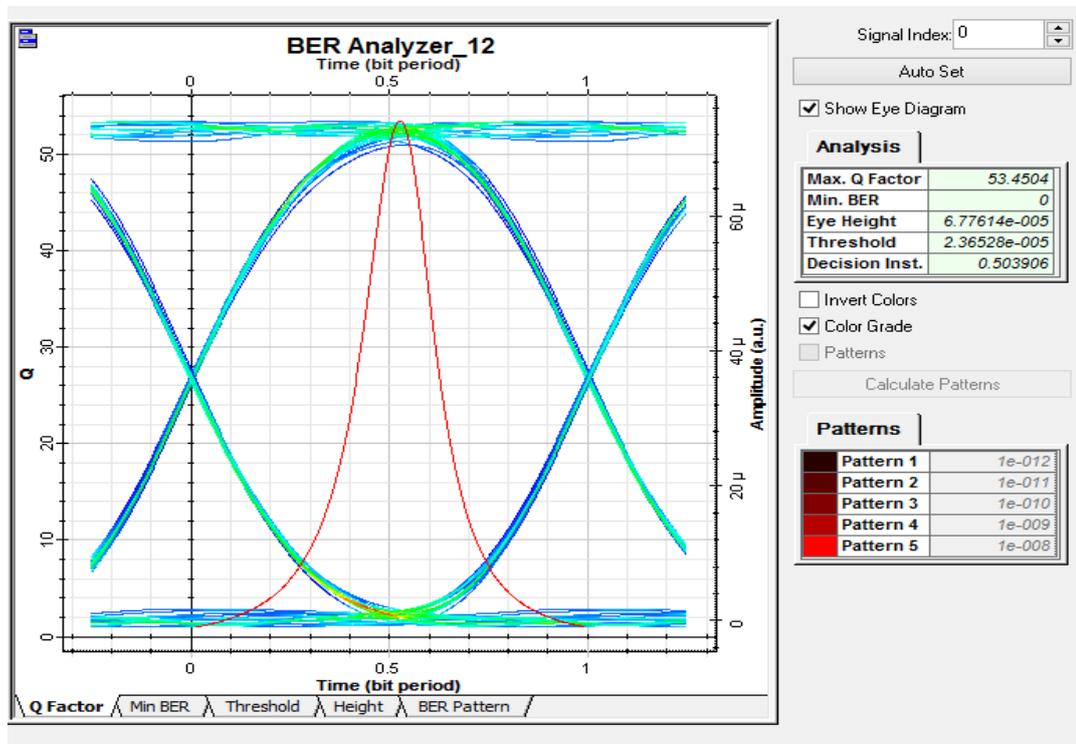


Figure IV. 3 : Diagramme de l'œil pour $L = 20$ km (WDM-PON Downstream).

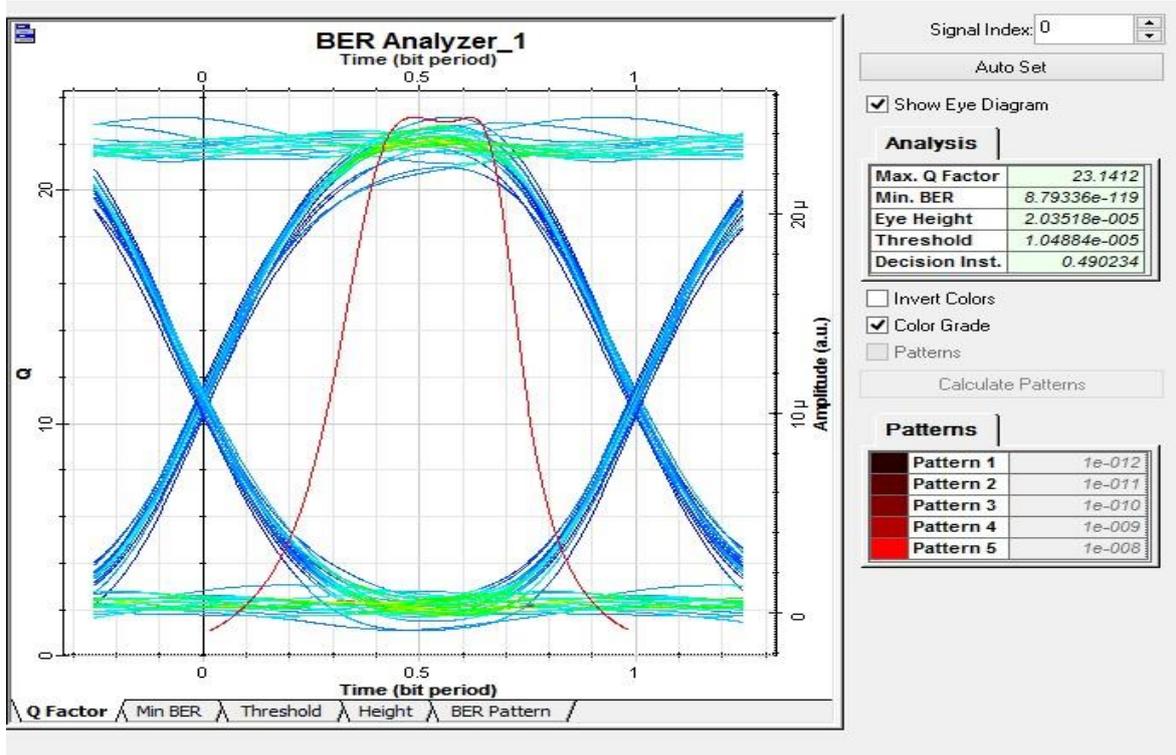


Figure IV. 4 : Diagramme de l'œil pour L = 20 km (WDM-PON Upstream).

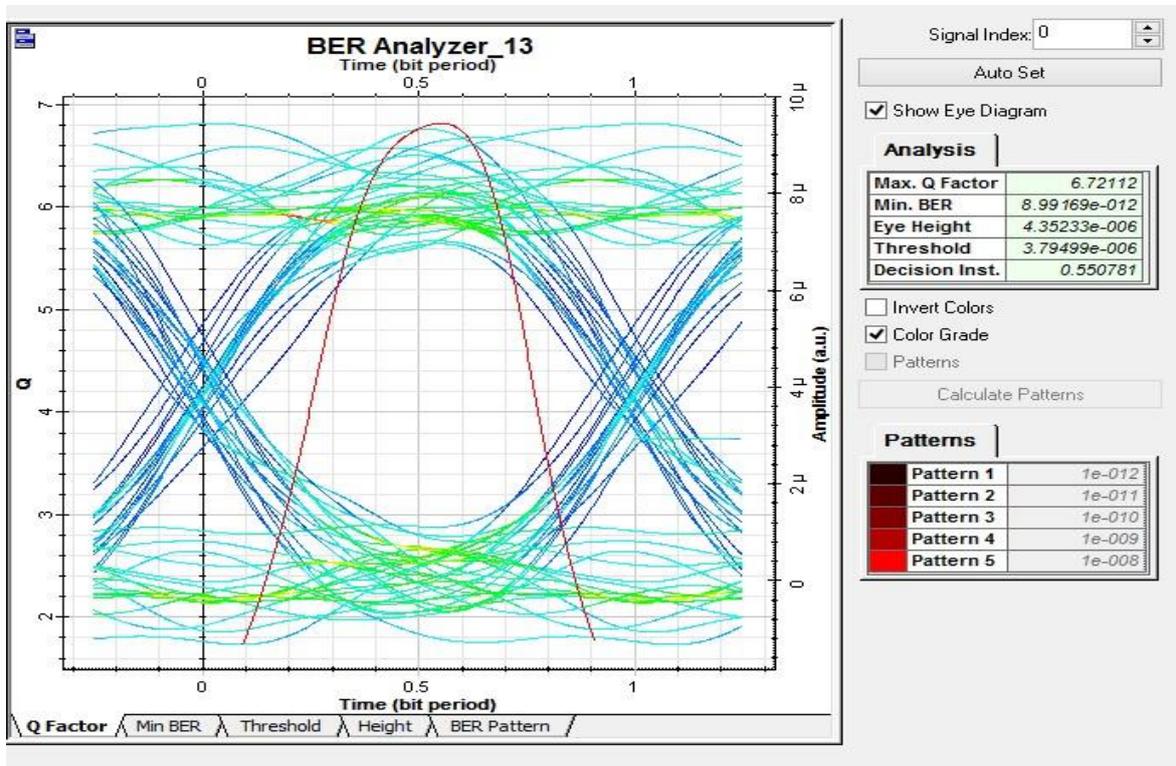


Figure IV. 5 : Diagramme de l'œil pour L = 60 km (WDM-PON Downstream).

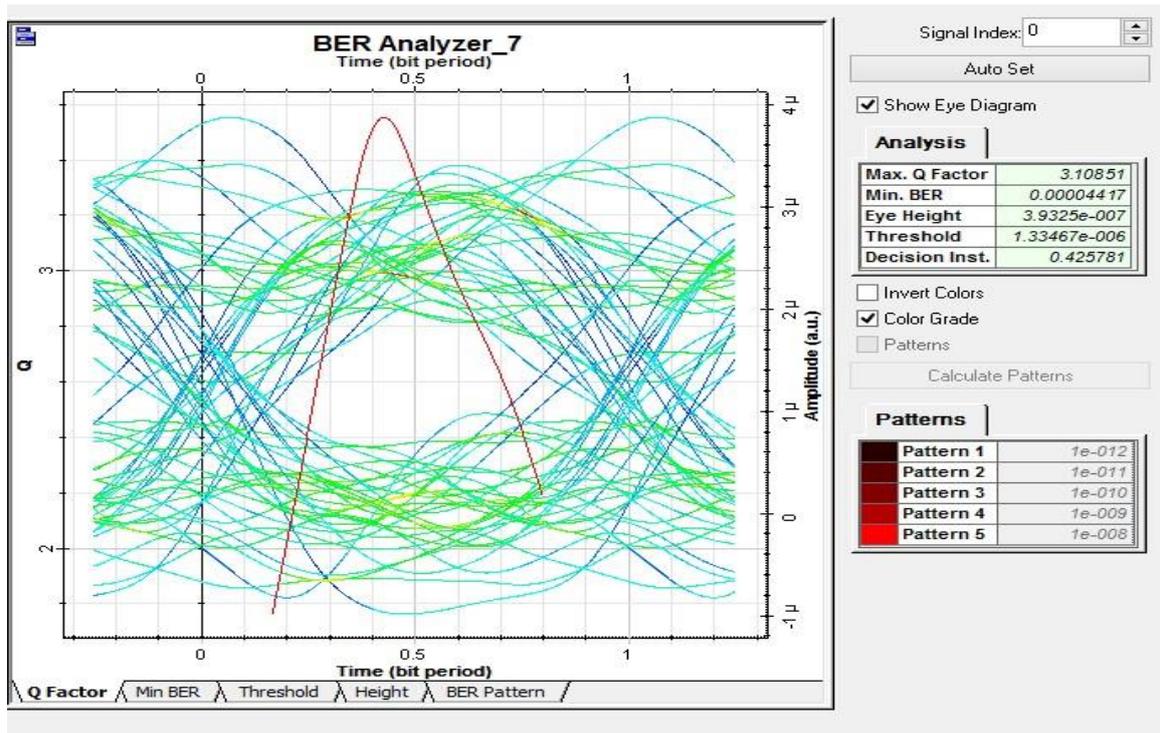


Figure IV. 6 : Diagramme de l'œil pour $L = 60$ km (WDM-PON Upstream).

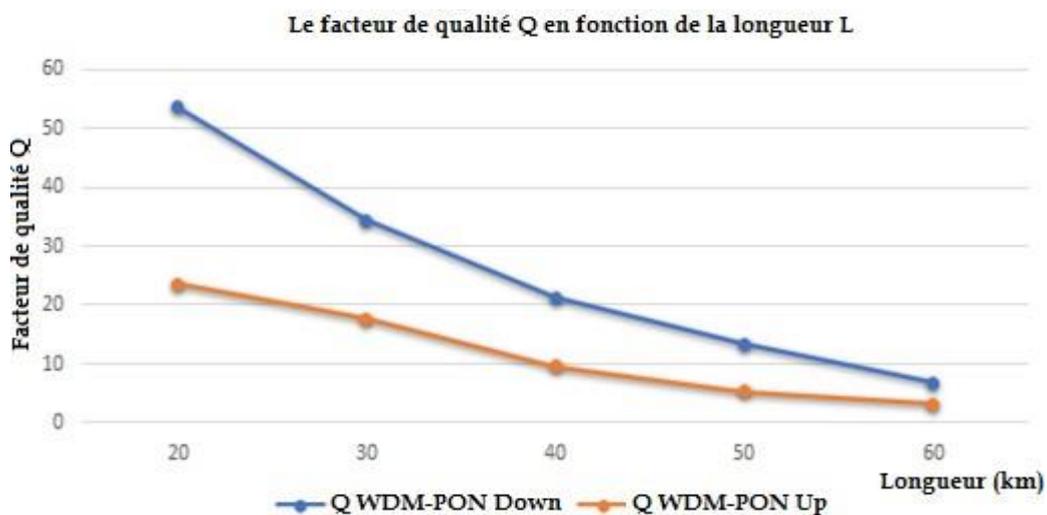


Figure IV. 7 : Facteur de qualité Q en fonction de la longueur L.

Le graphique illustre la diminution du facteur de qualité Q en fonction de la longueur de la fibre optique pour les transmissions descendante et montante dans un système WDM-PON. Il montre que, pour les deux types de transmission, le facteur de qualité diminue avec l'augmentation de la distance, ce qui est attendu en raison des effets d'atténuation et de dispersion dans les fibres optiques.

Cette tendance indique que la qualité du signal se dégrade sur de plus longues distances, soulignant l'importance de la gestion des pertes et de la dispersion dans les systèmes WDM-PON pour maintenir une performance de transmission adéquate sur des distances prolongées.

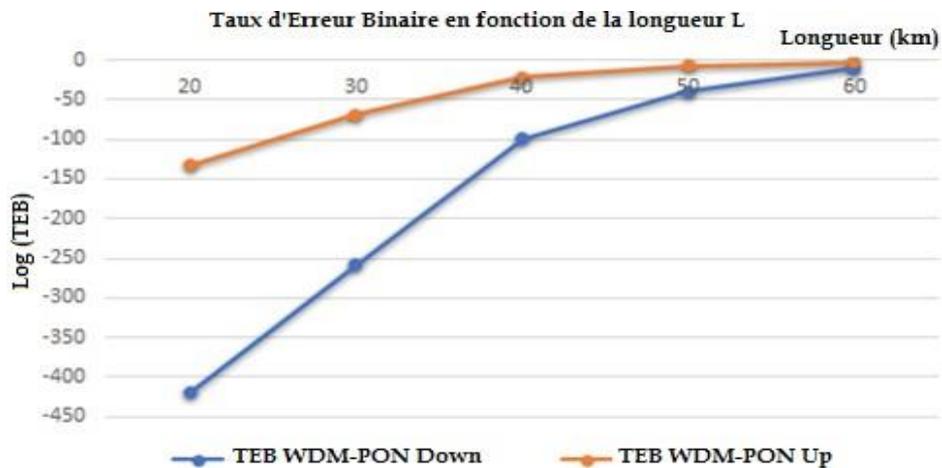


Figure IV. 8 : TEB en fonction de la longueur L.

Le graphique montre l'évolution du taux d'erreur binaire (TEB) en fonction de la longueur de la fibre optique pour les transmissions descendante et montante dans un système WDM-PON, représentée sur une échelle logarithmique. Le TEB mesure la proportion d'erreurs dans les bits reçus par rapport au nombre total de bits envoyés, et une valeur plus faible du TEB (plus négative sur l'échelle logarithmique) indique une meilleure performance. Le graphique indique que pour les deux types de transmission, le TEB augmente avec l'augmentation de la distance, ce qui suggère une dégradation de la qualité de la transmission sur de plus longues distances. Cette tendance est attendue en raison des effets d'atténuation et de dispersion dans les fibres optiques, qui entraînent une augmentation des erreurs de bits.

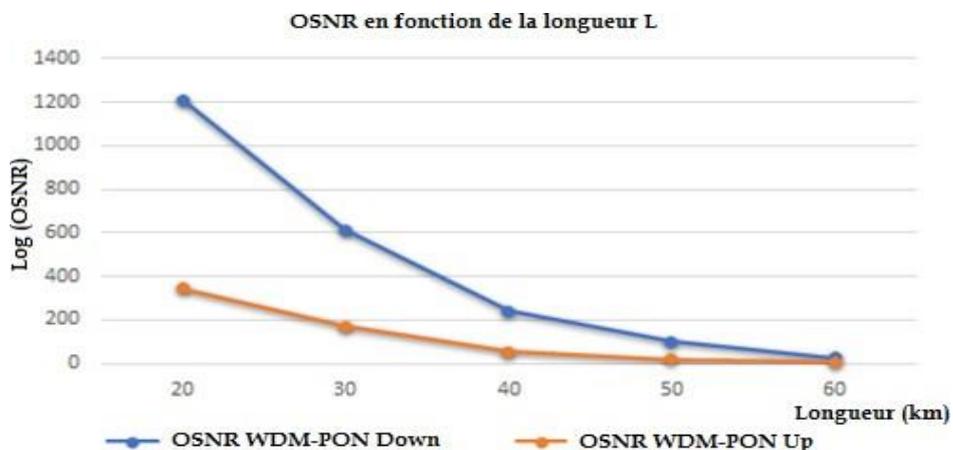


Figure IV. 9 : OSNR en fonction de la longueur L.

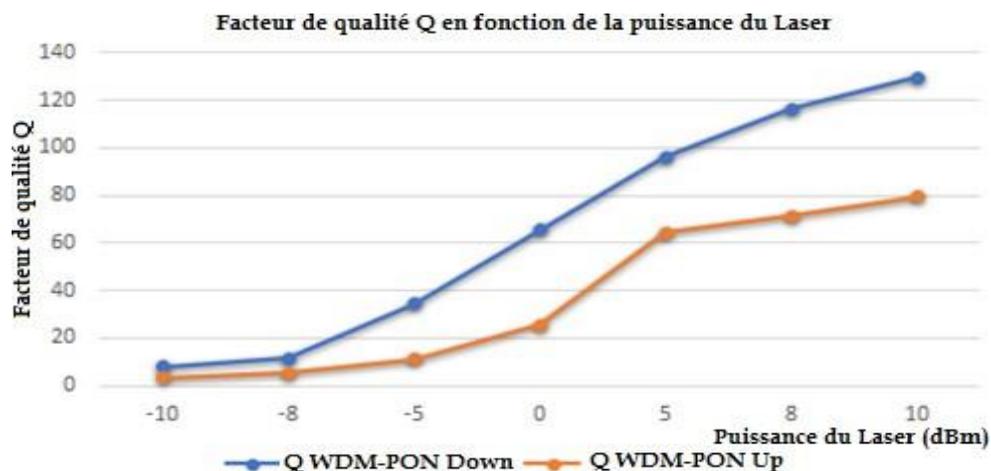


Figure IV. 10 : Facteur de qualité Q en fonction de la puissance du Laser.

Selon la figure IV.10, il est clair que le système offre une performance supérieure pour des puissances supérieures à -10 dBm par rapport à celles inférieures, ce qui nous aide à optimiser l'efficacité énergétique du système. Il convient de souligner que le système est plus efficace dans la direction aval (downstream) que dans la direction amont (upstream).

IV.2.4. Etude de l'impact du format de modulation sur le système WDM-PON :

Dans notre système, nous examinons l'effet de deux formats de modulation sur le réseau WDM-PON, à savoir le format non-retour à zéro (NRZ) et le format retour à zéro (RZ). Le tableau IV.2, présenté ci-dessous, indique la valeur du facteur de qualité Q pour chaque longueur de liaison avec une puissance constante de 0 dBm.

Tableau IV. 2 : L'impact du type de format de modulation sur le système WDM-PON.

L (km)	20	30	40	50	60
QDownstream/QUppstream (RZ)	37.30/19.26	28.77/13.53	15.52/7.31	8.97/4.10	4.91/2.32
QDownstream/QUppstream (NRZ)	53.45/23.14	34.33/17.67	21.2/9.58	13.31/5.27	6.72/3.10

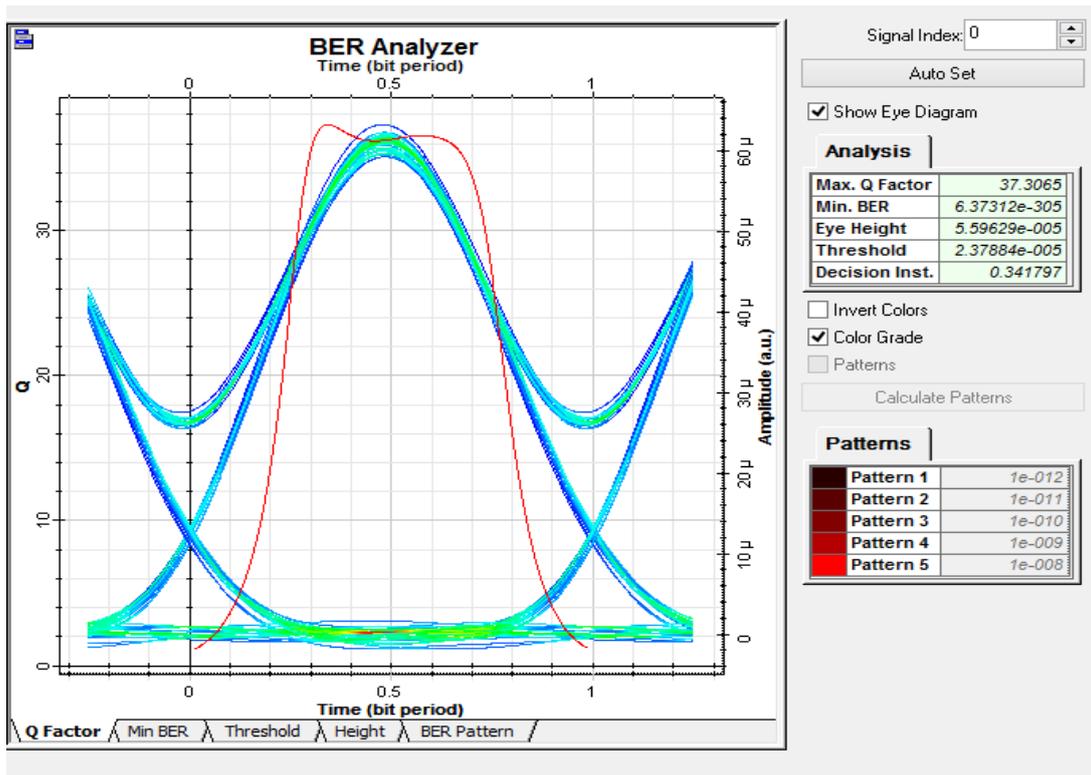


Figure IV. 11 : Diagramme de l'œil pour L = 20 km (RZ-WDM-PON Downstream).

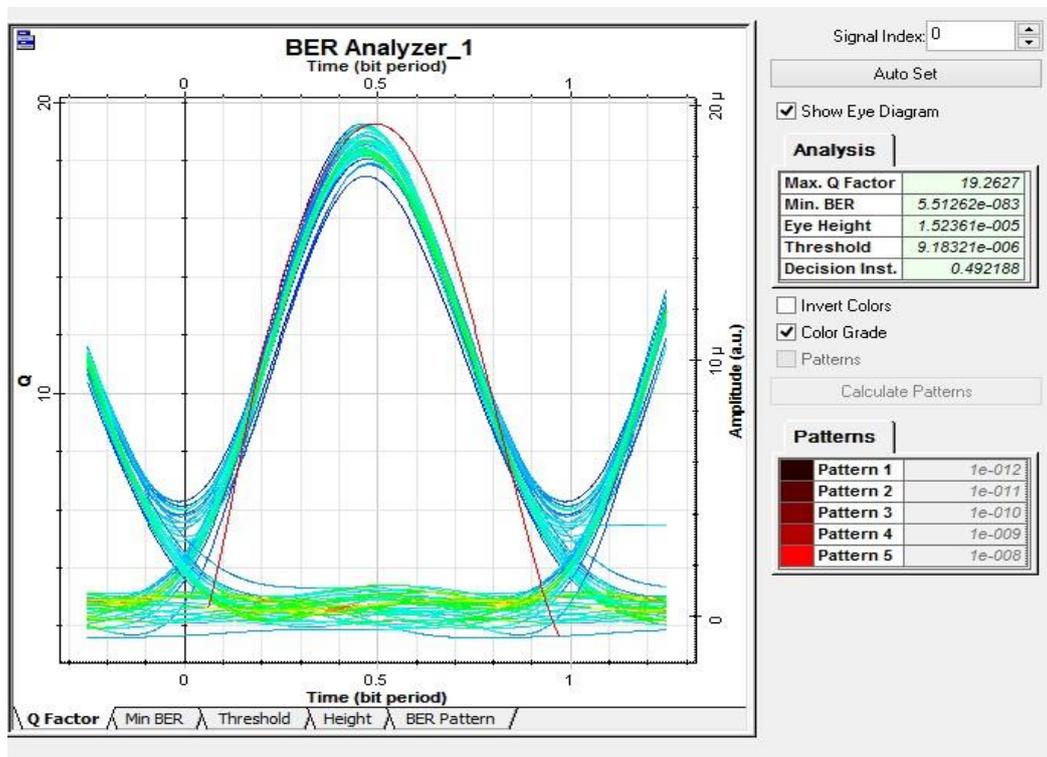


Figure IV. 12 : Diagramme de l'œil pour L = 20 km (RZ-WDM-PON Upstream).

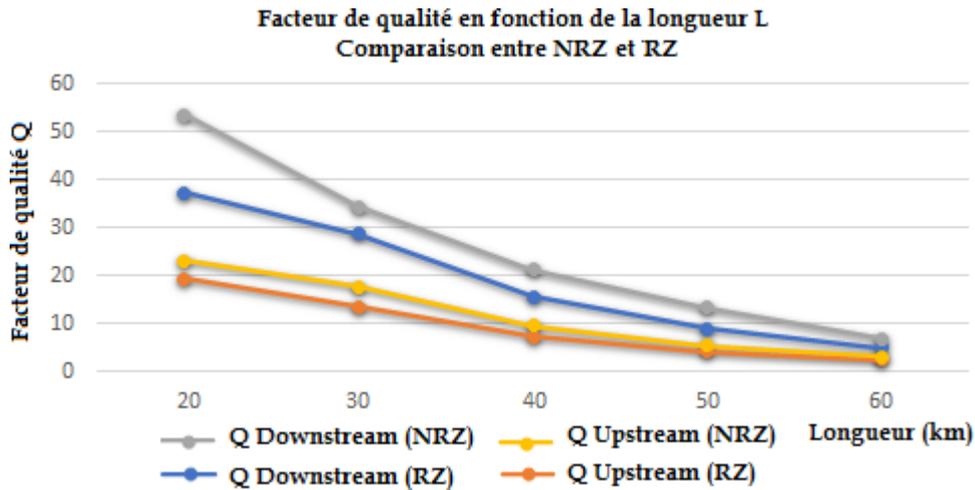


Figure IV. 13 : Comparaison entre WDM-PON (NRZ) et WDM-PON (RZ).

Selon le tableau IV.2 et la figure IV.13, il est évident que le système WDM-PON avec le format de modulation NRZ surpasse le format de modulation RZ en termes de performances, dans les deux directions de transmission (Downstream et Upstream). Cela nous conduit à la conclusion que le format de modulation RZ requiert un spectre de fréquence plus large comparé à un format de modulation NRZ.

IV.3. Programme

```

% Chargez l'image de base
imageUnique = imread('image_base.jpg');
% Chargez les images de resultats
image1 = imread('image1.jpg');
image2 = imread('image2.jpg');
image3 = imread('image3.jpg');
% Convertissez les images en niveaux de gris
imageUniqueGray = rgb2gray(imageUnique);
image1Gray = rgb2gray(image1);
image2Gray = rgb2gray(image2);
image3Gray = rgb2gray(image3);
% Calculez la corrélation croisée entre l'image de base et chaque image
correlation1 = normxcorr2(imageUniqueGray, image1Gray);
correlation2 = normxcorr2(imageUniqueGray, image2Gray);
correlation3 = normxcorr2(imageUniqueGray, image3Gray);
% Trouvez le pic de corrélation (indice du maximum)
[~, indMax1] = max(correlation1(:));
Max1 = max(correlation1(:))*100;
[~, indMax2] = max(correlation2(:));
Max2 = max(correlation2(:))*100;
[~, indMax3] = max(correlation3(:));

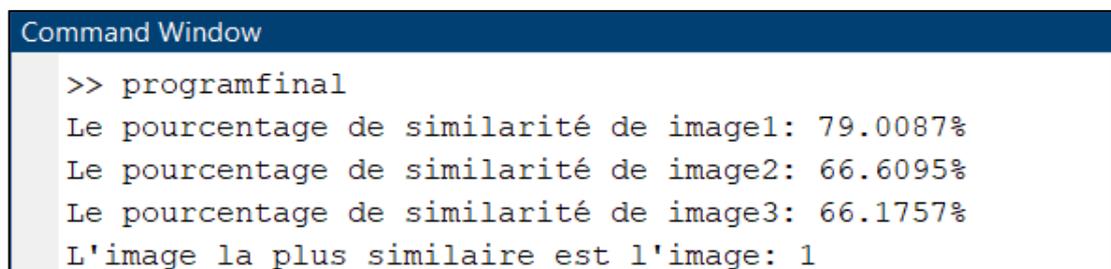
```

```

Max3 = max(correlation3(:))*100;
% Affichez les pourcentage de similarité
disp(['Le pourcentage de similarité de image1: ', num2str(Max1), '%']);
disp(['Le pourcentage de similarité de image2: ', num2str(Max2), '%']);
disp(['Le pourcentage de similarité de image3: ', num2str(Max3), '%']);
% Affichez les images et les pics de corrélation
figure;
subplot(2, 2, 1);
imshow(imageUnique);
title('Image unique');
subplot(2, 2, 2);
imshow(image1);
title(['Image1 (', num2str(Max1), '%)']);
subplot(2, 2, 3);
imshow(image2);
title(['Image2 (', num2str(Max2), '%)']);
subplot(2, 2, 4);
imshow(image3);
title(['Image3 (', num2str(Max3), '%)']);
% Affichez l'image la plus similaire
[~, indiceImageSimilaire] = max([correlation1(indMax1),
correlation2(indMax2), correlation3(indMax3)]);
disp(['L'image la plus similaire est l'image: ',
num2str(indiceImageSimilaire)]);
figure;
imshow(eval(['image', num2str(indiceImageSimilaire)]));
title(['Image la plus similaire (indice ', num2str(indiceImageSimilaire),
')']);

```

➤ Les résultats de ce programme



```

Command Window
>> programfinal
Le pourcentage de similarité de image1: 79.0087%
Le pourcentage de similarité de image2: 66.6095%
Le pourcentage de similarité de image3: 66.1757%
L'image la plus similaire est l'image: 1

```

Figure IV. 14 : Fenêtre de commande

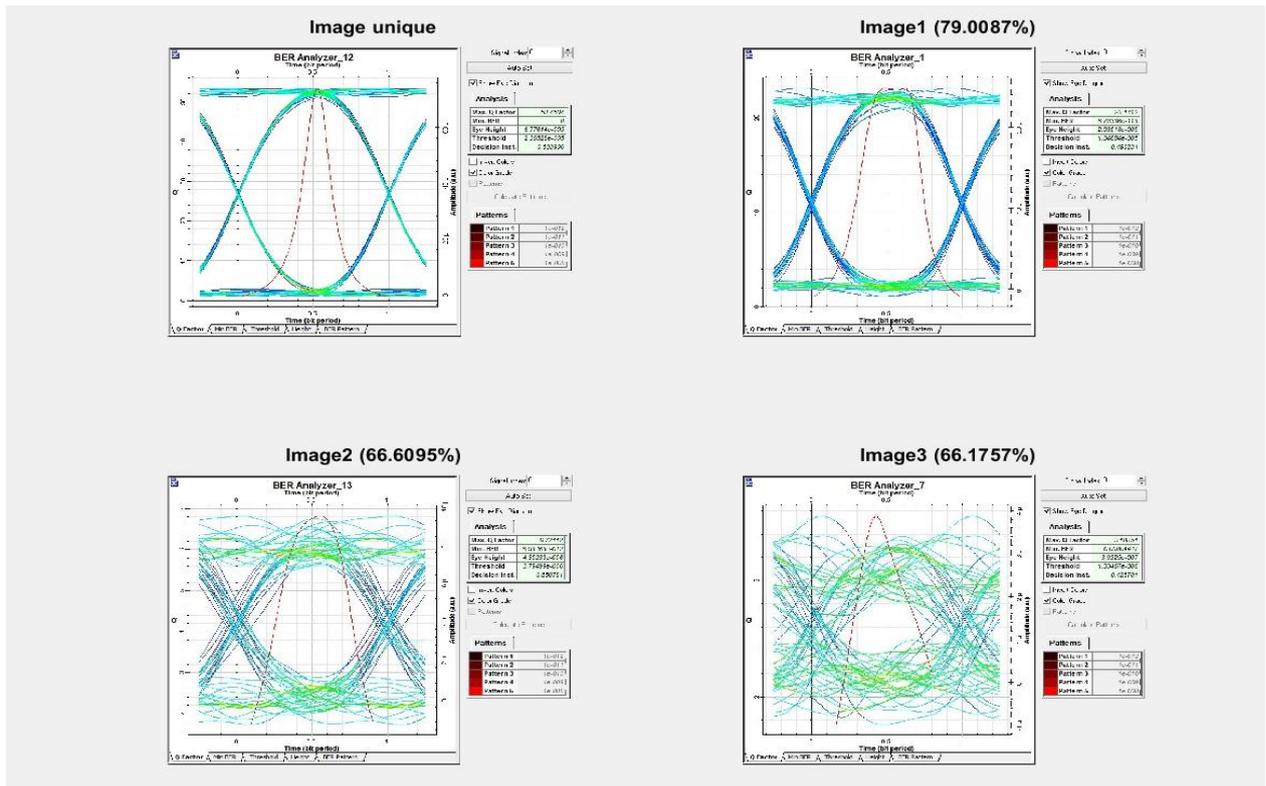


Figure IV. 15 : Comparaison des résultats avec l'image de base

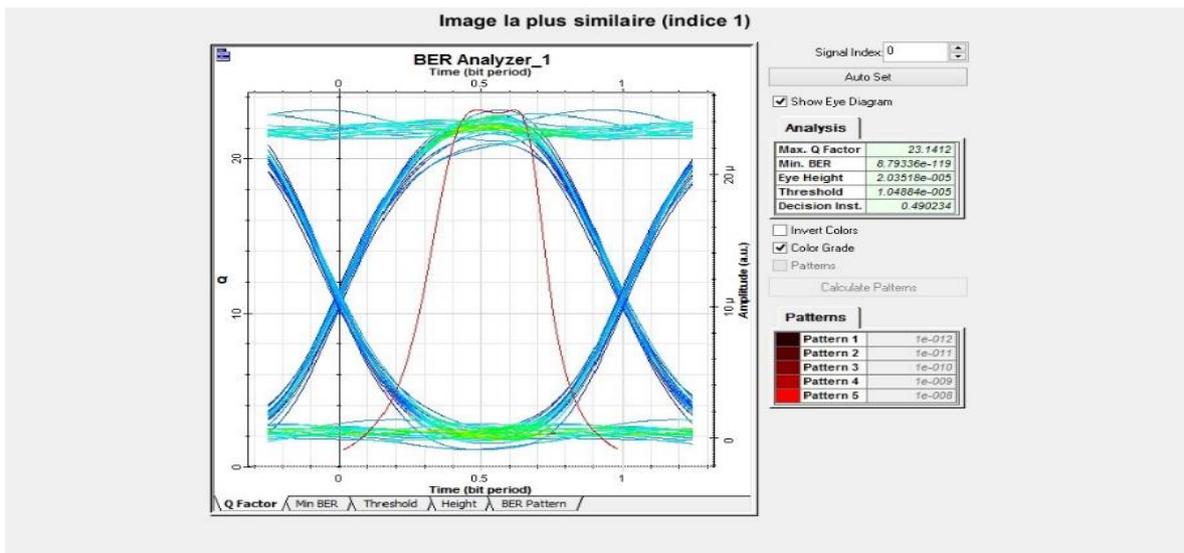
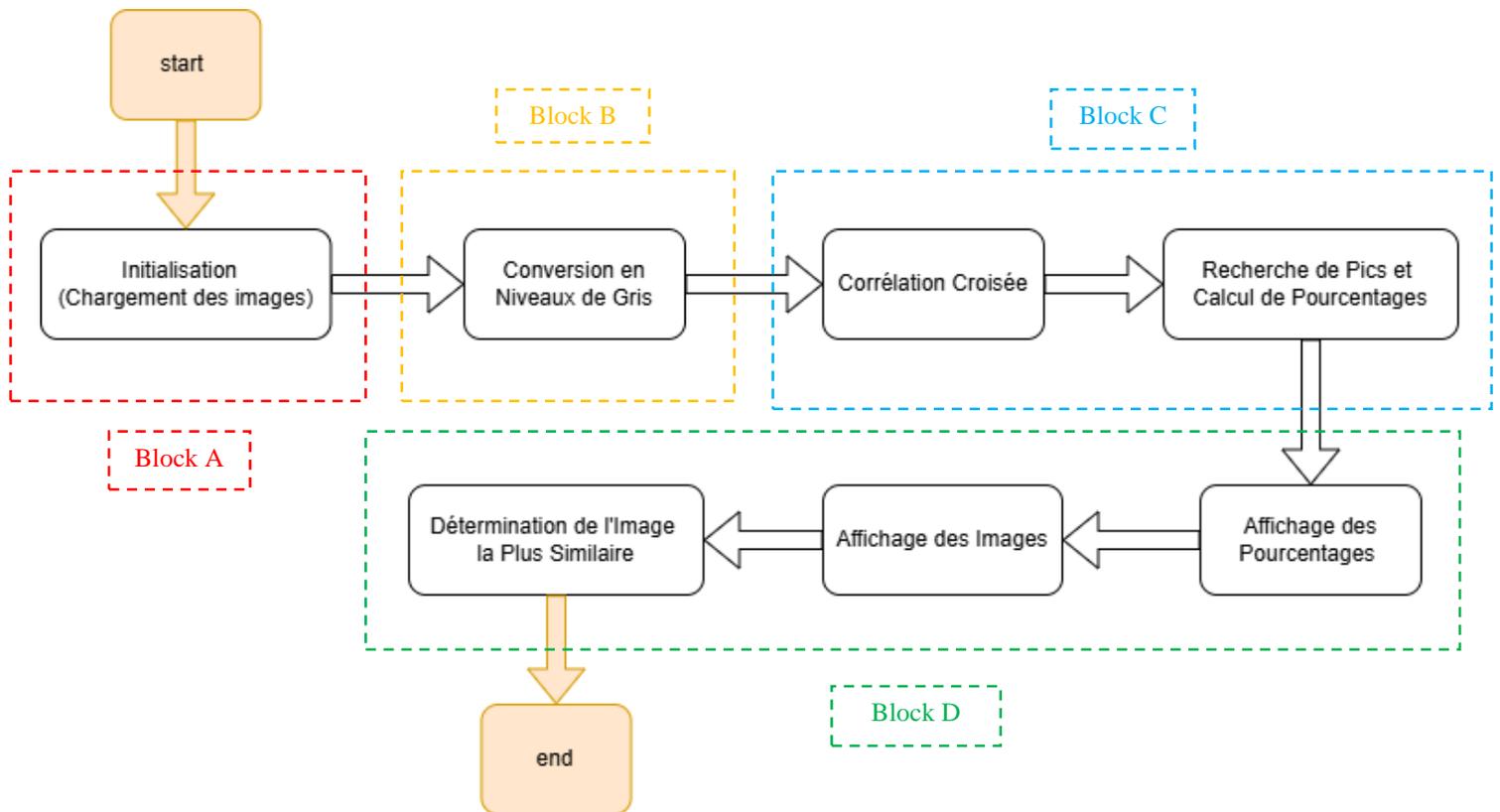


Figure IV. 16 : L'image la plus similaire

➤ Comment fonctionne le programme (organigramme)



Block A : Initialisation et Chargement des Images

Étape 1: Initialisation (Chargez l'image de base)

- L'image de base est stockée dans la variable "imageUnique".

Étape 2: Chargez les images de résultats

- Les images sont stockées dans les variables "image1", "image2" et "image3", respectivement.

Block B : Convertit les images chargées en niveaux de gris (Prétraitement des Images)

Étape 3: Conversion en Niveaux de Gris

- Les images couleur sont converties en niveaux de gris pour faciliter la comparaison.
- Les images en niveaux de gris sont stockées dans les variables "imageUniqueGray", "image1Gray", "image2Gray" et "image3Gray", respectivement.

Block C : Calcule la corrélation croisée entre l'image de base et les images de résultats, puis trouve les pics de corrélation et calcule les pourcentages de similarité.

Étape 4: Corrélation Croisée

- La fonction "normxcorr2" calcule la corrélation croisée normalisée entre deux images.
- Les résultats sont stockés dans les variables "correlation1", "correlation2" et "correlation3", respectivement.

Étape 5: Recherche de Pics et Calcul des Pourcentages

- Les variables "Max1", "Max2" et "Max3" stockent le pourcentage de similarité correspondant à chaque image, obtenu en multipliant le pic de corrélation par 100.

Block D : Affiche les pourcentages de similarité et les images, puis détermine laquelle des images est la plus similaire à l'image de base

Étape 6: Affichage des Pourcentages

- Les pourcentages de similarité sont affichés dans la fenêtre de commande.
- L'image de base et les trois images comparées sont affichées dans une seule figure à l'aide de la fonction "subplot".
- Les pourcentages de similarité sont affichés dans les titres de chaque sous-figure.

Étape 7: Affichage des Images

- La fonction "max" est utilisée pour trouver l'indice de l'image avec le pic de corrélation le plus élevé.
- L'indice de l'image la plus similaire est stocké dans la variable "indiceImageSimilaire".

Étape 8: Détermination de l'Image la Plus Similaire

- La fonction "eval" est utilisée pour accéder à l'image correspondante à l'aide de l'indice obtenu dans le bloc 8.
- L'image la plus similaire est affichée dans une nouvelle figure.

Conclusion générale

Cette étude met en lumière le rôle crucial des systèmes de télécommunication optique avancés dans l'échange rapide et efficace de l'information à l'échelle mondiale. Ces systèmes sont essentiels pour répondre aux exigences actuelles de connectivité globale en soutenant les communications haut débit. L'évolution constante de ces technologies, notamment grâce aux techniques de multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM-PON) à haut débit, ouvre de nouvelles possibilités pour une transmission de données plus performante et plus fiable.

Le choix de la modulation optimale est un élément crucial dans la conception de ces systèmes. Une modulation adaptée permet d'exploiter efficacement la bande passante disponible, de minimiser les distorsions du signal et de garantir une transmission robuste au bruit. En sélectionnant la modulation la plus appropriée en fonction des caractéristiques du canal et des exigences du système, il est possible d'optimiser les performances globales des systèmes de télécommunication optique.

Les recherches futures devraient se concentrer sur le développement de techniques de modulation encore plus performantes et adaptables, permettant de répondre aux défis croissants de la communication à haut débit. L'exploration de nouvelles approches de modulation RZ / NRZ pourrait conduire à des gains d'efficacité et de flexibilité encore plus importants.

En conclusion, les systèmes de télécommunication optique, grâce à des choix de modulation judicieux, jouent un rôle essentiel dans l'infrastructure de communication moderne. L'optimisation continue de ces systèmes est nécessaire pour répondre aux demandes croissantes en matière de bande passante, de vitesse et de fiabilité, afin de façonner l'avenir de la communication à l'échelle mondiale.

Bibliographie

- [1] Introduction à la fibre optique. (2019, août 28). LambdaGain.
<https://www.lambdagain.com/fr/learning-center/chapitre-1-introduction-a-la-optique/>
- [2] TARLUZ.COM. (2017, 21 mai). Introduction à la fibre optique - TARLUZ - FIBER OPTIC SUPPLIERS. TARLUZ - FIBER OPTIC SUPPLIERS.
<http://www.tarluz.com/fr/optical-fiber/introduction-la-fibre-optique/>
- [3] Moris. (s. d.). Bandwidth of Optical Fiber and Window of Optical Fiber Basis | FS Community. Knowledge. <https://community.fs.com/article/the-bandwidth-and-window-of-fiber-optic-cable.html>
- [4] Techniques et systèmes de transmission en réseaux et télécoms. (s. d.). Techniques de L'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/technologies-de-l-information-th9/techniques-et-systemes-de-transmission-en-reseaux-et-telecoms-42293210/>
- [5] Environnement réseau Déploiement de la Fibre Optique - éducol STI. (s. d.). https://eduscol.education.fr/sti/ressources_pedagogiques/environnement-reseau-deploiement-de-la-fibre-optique
- [6] "Optical Fiber Communications" par Gerd Keiser - Ce livre est une référence complète sur les principes et les applications des communications par fibre optique.
- [7] Fibre optique : définition, couverture et déploiement. (2023, 8 décembre). Selectra.
- [8] Guides et fiches pratiques sur la fibre pour les particuliers, copropriétaires et promoteurs | Arcep. (s. d.). Arcep.
- [9] La fibre optique | Arcep. (s. d.). Arcep.
- [10] La technique WDM en télécoms optiques avancées Mme. ARRIBI Meriem. Melle. ELMAHI Aicha. 2016
- [11] Sfm. (2022, août 3). Câble en fibre optique multimode versus monomode : débats et différences. SFM.
- [12] Sme, T. C. (2024, 29 mars). Optical Fibers Applications : Exploring the Versatility of Light Transmission - TechieScience. Techie Science.
- [13] Guide fibre optique. (s. d.). Applications - Guide fibre optique. Guide Fibre Optique
- [14] Contributeurs aux projets Wikimedia. (2023, 23 novembre). Multiplexage en longueur d'onde

- [15] F. RAHARIMANITRA, “Contribution à l’étude des architectures basses sur le multiplexage en temps et en longueur d’onde dans le réseau d’accès, permettant la migration vers la Nouvelle Génération de Pon (NG-PON) à 10 Gbit/s”, Thèse de Doctorat de l’Université européenne de Bretagne, janvier 2012.
- [16] Principe de fonctionnement et application de la technologie de multiplexage par répartition en longueur d’onde-fiberwdm.com. (s. d.).
- [17] Jason. (s. d.-b). Quelle est la différence entre CWDM et DWDM ? | Communauté FS. Knowledge.
- [18] S. J. Park, C. H. Lee, K. T. Jeong, H. J. Park, J. G. Ahn, and K. H. Song, “Fiber-to the-home services based on wavelength division multiplexing passive optical network”. *Journal of Light-wave Technology*, vol. 22, no. 11, pp. 2582 _ 2591, Nov. 2004
- [19] P2P - Glossaire MDN : définitions des termes du Web | MDN. (2023, 16 octobre). MDN Web Docs. Contributeurs aux projets Wikimedia. (2021, 28 mai). FTTH P2P.
- [20] Chloe. (2023, 19 mai). Quatre types de technologie de multiplexage par répartition en longueur d’onde (WDM). fibermall.com.
- [21] Application de la technologie WDM dans le système de réseau de transmission optique-fiberwdm.com. (s. d.).
- [22] De Précision, O. (2023, 11 septembre). WDM : tout ce que vous devez savoir. OT de précision.
- [23] Nazir M, Arshad F, Asif R. “Design and evaluation of power budget for a bidirectional CWDM-Passive Optical Network”. In: *International Conference on Communication, Computing and Digital Systems (C-CODE)*, Islamabad, Pakistan, 04 May 2017.
- [24] Gorshe DS, Raghavan A, Starr T, Galli S. “Broadband access: Wire line and Wireless-alternatives for internet services”, 1st ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [25] Contributeurs aux projets Wikimedia. (2023, 23 novembre). Multiplexage en longueur d’onde.
- [26] Oh JM, Koo SG, Lee D, Park S-J. “Enhancement of the performance of a reflective SOA-based hybrid WDM/TDM PON system with a remotely pumped erbium-doped fiber amplifier”. *J Lightw Technol.*; 26:144–9. 2008.
- [27] Hongxi Yin, David J. Richardson. “Optical Code Division Multiple Access Communication Networks Theory and Applications”. Tsinghua University Press, Beijing and Springer, © 2007.

- [28] Cevik T. “A hybrid OFDM-TDM architecture with decentralized dynamic bandwidth allocation for PONs”. Sci. World J. 2013.
- [29] Eric Voure'h, communications numérique ,
<https://www.coursehero.com/file/43165944/Communications-numeriques-Master2-2015pdf/> , (consulté 15 Mars 2020) [2] J.L.VERNEUIL, « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbit/s » Thèse de Doctorat de l'université de Limoges, novembre 2003.
- [30] Nicolas Fourty, Télécommunication numérique , https://www.slideserve.com/loe/t-1-communications-numeriques?fbclid=IwAR0OrbnqkPdFFUZWY0A_Mkiw9qPczSaQAU2X4x7jZYyvoNpH5xiK7J S46Y , (consulté 15 Mars 2020).
- [31] Gilles Burel, Transmissions Numérique ,
http://pagesperso.univ-brest.fr/~gburel/enseignement/cmtc13_2015.pdf , (consulté 15 Mars 2020).
- [32] M. LEFRANÇOIS, « Etude de technologies avancées pour l'optimisation des systèmes de transmission optique multiplexés en longueur d'onde au débit de 40 Gbit/s », Thèse de Doctorat de l'université Paris-Sud, décembre 2007.
- [33] MEUNIER, J.-P. ;– Télécoms Optique : Composants à fibres systèmesde transmission. Ed. Hermes. Paris. pp.134, 208, 2003.
- [34] codifie Manchester, <https://www.elettroamici.org/fr/codifica-manchester-che-cose-e-perche-usarla/>, (15 avril 2020).
- [35]]MarcVan Droogenbroeck,
http://www.telecom.ulg.ac.be/teaching/notes/total1/elen008/node126_mn.html, Mars 2015 (consulté 15 avril 2020).