

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



**Faculté De Génie Electrique et d'Informatique**  
**Département de Télécommunications**



**Mémoire de Fin d'Etudes de**  
**MASTER ACADEMIQUE**  
Spécialité :  
**Réseaux & Télécommunications**

Filière :  
**Télécommunications**

Par  
Sylia ZIRI  
Lynda MANSOURI

Thème

---

**Etude Des Réseaux Optiques Passifs (PON)**

---

Soutenu le : 25/06/2024

**Devant le membre du jury :**

<b>Président :</b>	Mr. Salem TITOUNI	MCB	UMMTO
<b>Promotrice :</b>	Mme. Nora ZIANI	MAB	UMMTO
<b>Examinatrice :</b>	Mme. Samira BOUALLEG	MCB	UMMTO

# Remerciements

Tout d'abord nous remercions notre Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention consciente d'un grand nombre de personnes.

En second lieu, nous tenons à remercier notre promotrice Madame : ZIANI Nora pour sa patience, et ses précieux conseils qui ont constitué un rapport considérable sans lesquels ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'ils trouvent dans ce travail un hommage vivant à haute personnalité.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leur proposition.

A nos familles et nos amis qui par leur prière et leur encouragement on a pu surmonter tous les obstacles

# Dédicace 1

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents, pour leur soutien indéfectible et les innombrables sacrifices qu'ils ont consentis. Sans leur amour et leurs encouragements, ce parcours n'aurait pas été possible.

À mes frères Abdelmalek, Jugurta, et Abdelfodil, ainsi qu'à mes sœurs Lamia, Kahina, et Amel et ma belle sœur Nacera. Votre présence et votre soutien constants ont été une source inestimable de force et de motivation.

À mon grand-père adoré, Essaïd ZIRI, et à mon oncle bien-aimé, Amar ZIRI, qui nous ont quittés au début de l'année 2024. Paix à leurs âmes. Votre sagesse et votre bienveillance resteront gravées dans nos cœurs à jamais.

À ma copine Kamelia, Lynda pour son amour et sa compréhension sans faille, qui m'ont permis de surmonter les moments difficiles.

À mes neveux Sami, Aylan, et Aksel, qui apportent tant de joie et d'inspiration dans ma vie.

À toute ma famille, de près ou de loin, pour leur amour et leur soutien indéfectibles.

À la promotion Master Réseaux et Télécommunications 2023-2024, pour les moments partagés et le soutien mutuel tout au long de cette aventure académique. À mes chers amis, pour leur présence et leur amitié précieuse.

ZIRI Sylia

# Dédicace 2

Je dédie ce modeste travail au meilleur des pères et ma très chère maman qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté qui ne cessent de leur donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui,

Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation.

Que dieu les protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

- A mes chères sœurs IBTISSAM et AMEL et mon petit frère DAHMANE, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement l'amour et l'affection que je porte pour vous.

-A mes deux amies NADJET et NOUR EL HOUDA qui étaient et sont toujours à mes cotées et surtout m'ont toujours encouragé pour avancer je vous aime,

A ma chère binôme SYLIA

A la promotion Master Réseaux et Télécommunications 2023-2024

A tout ceux qui sont chers, aux personnes qui m'ont aidé et encouragé de près ou de loin.

MANSOURI LYNDA

# Sommaire

Remerciements

Dédicace

Dédicace

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

LISTE DES ACRONYMES

Résumé

Abstract

Introduction Générale .....	1
Chapitre I : Fibre Optique .....	15
1 Introduction .....	4
2 Définition de la fibre optique .....	4
3 Historique .....	4
4 Les composants de la fibre optique .....	5
5 Les types de fibre optique .....	6
5.1 Fibre optique multimode.....	6
5.1.1 Fibre à saut d'indice .....	6
5.1.2 Fibre à gradient d'indice .....	7
5.2 Fibre monomode .....	8
6 Comparaison entre la fibre monomode et multimode .....	9
7 Caractéristiques d'une fibre optique.....	9
7.1 Ouverture numérique :.....	9
7.2 Atténuation.....	10
7.2.1 Pertes intrinsèques.....	10

7.2.2	Dispersion chromatique (intermodale) .....	12
7.2.3	Dispersion modale (intermodale) .....	12
7.3	Bande passante .....	13
8	Raccordement des fibres optiques .....	14
8.1	Épissures par fusion.....	14
8.2	Epissure mécanique .....	15
9	Connecteurs de fibre optique :.....	15
9.1	Les types de connecteurs .....	15
10	Description d'une chaine de transmission optique .....	17
10.1	Bloc d'émission .....	18
10.1.1	Source optique.....	18
10.1.2	Modulation.....	20
10.2	Bloc de réception .....	23
10.2.1	Le bloc de premier étage .....	23
10.2.2	Le bloc linéaire.....	24
10.2.3	Le bloc de récupération des données.....	25
10.3	Le bloc de transmission.....	25
10.3.1	Le câble de transmission.....	25
10.3.2	Les coupleurs et les connecteurs .....	25
10.3.3	Les amplificateurs et les répéteurs optiques .....	25
11	Techniques de compensation.....	25
11.1	Amplification optique .....	26
11.1.1	Le régénérateur optique .....	26
11.1.2	Amplificateurs optiques.....	26
11.2	Le multiplexage .....	28
11.2.1	Type de multiplexage .....	29
12	Comparaison entre Wavelength Division Multiplexing et Time Division Multiple Access).....	30
13	Les avantages de la transmission optique .....	31
14	Inconvénients de la transmission à fibre optique .....	32
15	Conclusion.....	32
	Chapitre II : Réseaux Optiques Passifs (PON). .....	4

1	Introduction .....	34
2	Les réseaux optiques passifs PON (Passive Optical Network) .....	34
3	Architecture d'un réseau optique passif (PON) .....	34
3.1	Principaux éléments constitutifs du PON .....	35
3.2	Principe de fonctionnement d'un réseau PON .....	35
3.2.1	La voie descendante .....	35
3.2.2	La voie montante .....	36
3.3	Architecture PON unidirectionnelle .....	37
3.4	Architecture PON bidirectionnelle .....	37
4	Les types de réseaux optiques passifs .....	38
4.1	Broadband PON (BPON) .....	38
4.2	Ethernet PON (EPON) .....	38
4.3	Gigabit PON (GPON) .....	38
4.3.1	Les principales caractéristiques de la norme GPON : .....	38
4.3.2	Transmission GPON .....	40
4.3.3	Sécurité de GPON .....	42
4.3.4	Protection de GPON .....	42
4.3.5	Avantages et inconvénients d'un réseau GPON .....	43
5	Comparatif des différents standards d'un réseau PON .....	43
6	La sécurité et la fiabilité d'un réseau passif .....	44
6.1	La fiabilité du PON .....	44
6.2	La sécurité du PON .....	44
7	Avantages et Limites du Réseau Optique Passif .....	45
7.1	Avantages du PON .....	45
7.2	Limitations du PON .....	45
8	Les différentes architectures FTTX .....	45
8.1	Fiber To The Building (FTTB) .....	47
8.2	Fiber To The Cabinet (FTTCab) / Fiber To The Curb (FTTC) .....	47
8.3	Fiber To The Office (FTTH) .....	47
8.4	Architecture des réseaux FTTH .....	47
8.4.1	Architecture Ethernet point-à-point .....	47
8.4.2	Architecture point-multipoint (P2M) ou PON (Passive Optical Network) .....	49

8.4.3	Les inconvénients de point-multipoint .....	49
9	Applications PON .....	51
10	Conclusion.....	52
Chapitre III : Etude des performances des réseaux FTTH-GPON.....		30
1	Introduction .....	54
2	Description du logiciel OptiSystem.....	54
3	Les applications de l'OptiSystem .....	55
4	Avantages du logiciel OptiSystem .....	55
5	Paramètres de qualité d'une liaison optique.....	56
5.1	Le diagramme de l'œil.....	56
5.2	Le facteur de qualité en amplitude ou facteur Q.....	56
5.2.1	Le taux d'erreur binaire BER.....	57
6	Descriptif des composants utilisés dans la simulation.....	57
7	Système FTTH-GPON en TDMA .....	60
7.1	Impact de distance .....	62
7.2	Impact de la puissance .....	64
7.3	Impact du débit binaire .....	66
7.4	Impact de nombre d'utilisateurs.....	68
8	Système FTTH-GPON en WDM .....	70
8.1	Impact de la distance .....	70
8.2	Impact de la puissance .....	72
8.3	Impact de débit binaire .....	74
8.4	Impact de nombre d'utilisateurs.....	76
9	Conclusion :.....	78
Conclusion Générale .....		54
Références.....		82

# Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison entre la fibre monomode et multimode.....	9
Tableau 2 : Comparaison entre WDM et TDMA.. .....	30
Tableau 3 : Comparatif des différents standards d'un réseau PON.....	43
Tableau 4 : Comparaison entre P2P et P2M. ....	50
Tableau 5 : Descriptif des composants utilisés dans la simulation. ....	57
Tableau 6 : Q, BER en fonction de distance (Km) dans le réseau FTTH-GPON en TDMA. ...	63
Tableau 7 : Q, BER en fonction de puissance (dBm) dans le réseau FTTH-GPON en TDMA. .....	65
Tableau 8 : Q, BER en fonction de débit binaire dans le réseau FTTH-GPON en TDMA. ....	67
Tableau 9 : Q, BER en fonction de nombre d'utilisateurs dans le réseau FTTH-GPON en TDMA.....	69
Tableau 10 : Q, BER en fonction de distance (Km) dans le réseau FTTH-GPON en WDM. ...	72
Tableau 11 : Q, BER en fonction de puissance (dBm) dans le réseau FTTH-GPON en WDM. .....	74
Tableau 12 : Q, BER en fonction de débit binaire (Gbit/s) dans le réseau FTTH-GPON en WDM. ....	75
Tableau 13 : Q, BER en fonction de nombre d'utilisateurs dans le réseau FTTH-GPON en WDM. ....	78

# Liste des figures

Figure 1 : Fibre optique .....	5
Figure 2 : Fibre à saut d'indice.....	7
Figure 3 : Fibre à gradient d'indice.....	7
Figure 4 : Fibre monomode.....	8
Figure 5 : Définition de l'ouverture numérique.....	10
Figure 6 : Atténuation dans la fibre optique en fonction de la longueur d'onde.....	11
Figure 7 : La dispersion chromatique (intermodale) .....	12
Figure 8 : La dispersion modale (intermodale).....	12
Figure 9 : Les bandes passantes de quelques types de lignes de transmission en fonction de la fréquence sur une échelle logarithmique .....	13
Figure 10 : La soudeuse.....	14
Figure 11 : Clivage des deux fibres avant de les placer sur le support .....	14
Figure 12 : Mise en contact des deux fibres .....	14
Figure 13 : La fusion réalisée avec l'aide d'un arc électrique .....	14
Figure 14 : Epissure mécanique .....	15
Figure 15 : Différents connecteurs.....	15
Figure 16 : Connecteur fibre duplex et simplex.....	17
Figure 17 : Schéma représentatif d'une chaîne de transmission.....	18
Figure 18 : Schéma représentatif d'un émetteur optique .....	18
Figure 19 : La diode LED.....	19
Figure 20 : La diode Laser .....	19
Figure 21 : Modulation directe.....	21
Figure 22 : Schéma représentatif d'un module d'émission en modulation directe.....	21
Figure 23 : Schéma représentatif d'un module d'émission en modulation directe .....	21
Figure 24 : Modulation externe .....	22
Figure 25 : Le bloc de réception.....	23
Figure 26 : Photo diode P .....	24

Figure 27 : Photo diode PIN .....	24
Figure 28 : Un connecteur Optique .....	25
Figure 29 : Amplificateur optique à fibre dopée d'erbium .....	27
Figure 30 : Amplificateur optique à semi-conducteurs .....	28
Figure 31 : Technique de multiplexage .....	28
Figure 32 : Répartition des périodes dans le cas de multiplexage TDM .....	29
Figure 33 : Répartition des périodes dans le cas de multiplexage WDM.....	29
Figure 34 : Architecture d'un réseau optique passif .....	35
Figure 35 : Architecture de la voie descendante .....	36
Figure 36 : Architecture de la voie montante.....	36
Figure 37 : Architecture unidirectionnelle .....	37
Figure 38 : Architecture PON bidirectionnelle .....	37
Figure 39 : Architecture GPON. ....	39
Figure 40: Transmission data de l'OLT vers l'ONT en mode broadcast. ....	40
Figure 41 : Transmission data de l'ONT vers l'OLT en mode TDMA.....	40
Figure 42 : Le format de trame GPON dans le sens descendant.....	41
Figure 43 : La structure de trame dans le sens descendant.....	42
Figure 44 : Architectures des différentes technologies FTTx.....	46
Figure 45 : Architecture P2P.....	48
Figure 46 : Architecture P2M .....	49
Figure 47 : Interface logiciel OptiSystem.....	54
Figure 48 : Une fenêtre de logiciel OptiSystem pour les paramètres de l'éditeur du projet .....	55
Figure 49 : Diagramme de l'œil.....	56
Figure 50 : Chaîne de transmission FTTH-GPON en TDMA .....	60
Figure 51: Bloc d'émission .....	60
Figure 52 : Canal de transmission .....	61
Figure 53: Bloc de réception. ....	61
Figure 54 : Diagramme de l'œil à 40 km .....	62
Figure 55 : Diagramme de l'œil à 200 km .....	62
Figure 56 : Q, BER en fonction de distance (km) dans le réseau FTTH-GPON en TDMA ....	63
Figure 57 : Diagramme de l'œil à 2dBm.....	64
Figure 58 : Diagramme de l'œil à 8 dBm.....	64

Figure 59 : Q, BER en fonction de puissance (dBm) dans le réseau FTTH-GPON en TDMA. ....	65
Figure 60 : Diagramme de l'œil à 3,5 Gbit/s. ....	66
Figure 61 : Diagramme de l'œil à 5,5 Gbit/s. ....	66
Figure 62 : Q, BER en fonction de débit binaire dans le réseau FTTH-GPON en TDMA. ....	67
Figure 63 : Diagramme de l'œil pour 4 utilisateurs. ....	68
Figure 64 : Diagramme de l'œil pour 64 utilisateurs. ....	68
Figure 65 : Q, BER en fonction de nombre d'utilisateurs dans le réseau FTTH-GPON en TDMA. ....	69
Figure 66 : Chaîne de transmission FTTH-GPON en WDM. ....	70
Figure 67 : Diagramme de l'œil à 40 km. ....	71
Figure 68 : Diagramme de l'œil à 100 km. ....	71
Figure 69 : Q, BER en fonction de distance (km) dans le réseau FTTH-GPON en WDM. ....	72
Figure 70 : Diagramme de l'œil à 2 dBm. ....	73
Figure 71 : Diagramme de l'œil à 8 dBm. ....	73
Figure 72 : Q, BER en fonction de puissance (dBm) dans le réseau FTTH-GPON en WDM. ....	74
Figure 73 : Diagramme de l'œil à 1 Gbit/s. ....	75
Figure 74 : Diagramme de l'œil à 5 Gbit/s. ....	75
Figure 75 : Q, BER en fonction de débit binaire (Gbit/s) dans le réseau FTTH-GPON en WDM. ....	76
Figure 76 : Diagramme de l'œil pour 4 utilisateurs. ....	77
Figure 77 : Diagramme de l'œil à 24 utilisateurs. ....	77
Figure 78 : Q, BER en fonction de nombre d'utilisateurs dans le réseau FTTH-GPON en WDM. ....	78

## LISTE DES ACRONYMES

<b>AES</b>	Advanced Encryption Standard
<b>ATM</b>	Asynchronous Transfer Mode
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BPON</b>	Broadband PON
<b>DBM</b>	Distributed Feedback Laser
<b>DEL/LED</b>	light-emitting diode
<b>EAM</b>	Modulateur Electro-Absorption
<b>EPON</b>	Ethernet PON
<b>FDM</b>	Frequency Division Multiplexing
<b>FSAN</b>	Full Service Access Network
<b>FTTB</b>	Fiber To The Building
<b>FTTC</b>	Fibre To The Cab
<b>FTTC</b>	Fiber To The Curb
<b>FTTH</b>	Fiber To The Home
<b>FTTLA</b>	Fiber To The Last Amplifie
<b>FTTN</b>	Fiber To The Neighbourhood
<b>FTTN</b>	Fiber To The Node

<b>FTTO</b>	Fiber To The Office
<b>FTTP</b>	Fiber To The Premises
<b>FTTx</b>	Fiber To The x
<b>GPON</b>	Gigabit PON
<b>HBA</b>	Hydrogen Bond Acceptor
<b>HE11</b>	Se réfère à la Mode Electromagnétique
<b>"HE"</b>	Hybrid Mode
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>ITU</b>	International Télécommunication Union
<b>LC</b>	Lucent Connector
<b>MMF</b>	Multi Mode Fiber
<b>MPO/MTP</b>	Multi-Fiber Push-On / Multi-Fiber Termination Push-On
<b>MRT</b>	Multiplexage à Répartition Temporelle
<b>MZM</b>	Modulateur Mach-Zehnder
<b>NA</b>	Nœud d'Accès
<b>NRO</b>	Nœud de Raccordement Optique
<b>NRZ</b>	Non-Return to Zero
<b>OLT</b>	Optical Line Termination
<b>ONT</b>	Optical Network Terminal
<b>ONU</b>	Optical Network Unit
<b>OOK</b>	On-Off-Keying

<b>P2M</b>	Point à Multipoint
<b>P2P</b>	Point à Point
<b>PAM4</b>	Pulse Amplitude Modulation 4
<b>PDA</b>	Photo Diode Array
<b>PON</b>	Passive Optical Network
<b>SAN</b>	Stockage Area Network
<b>SC</b>	Subscriber Connector
<b>SiO2</b>	Dioxyde de Silicium
<b>SMF</b>	Single Mode Fiber
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>ST</b>	Straight Tip
<b>TDM</b>	Time Division Multiplexing
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing

# Résumé

Ce mémoire approfondit les technologies clés des réseaux de communication optique, en mettant en lumière les fondements de la fibre optique ainsi que les techniques avancées de multiplexage telles que WDM (Wavelength Division Multiplexing) et TDMA (Time Division Multiple Access). Le chapitre sur WDM explore comment cette technique permet d'augmenter la capacité des réseaux en utilisant différentes longueurs d'onde sur une seule fibre optique, facilitant ainsi la transmission simultanée de multiples signaux de données. En parallèle, le chapitre sur TDMA examine comment cette méthode divise le temps en tranches pour permettre à plusieurs utilisateurs de partager efficacement une ressource commune, optimisant ainsi l'utilisation du spectre et la gestion du réseau.

Le mémoire explore également l'intégration de ces technologies dans les réseaux d'accès optique passifs (PON), soulignant leur rôle crucial dans la fourniture de services à large bande passante de manière économique. En examinant les normes telles que GPON et EPON, le mémoire offre une perspective sur l'évolution continue de ces technologies pour répondre aux exigences croissantes en matière de connectivité haut débit.

# Abstract

This thesis delves into key technologies of optical communication networks, highlighting the fundamentals of optical fiber as well as advanced multiplexing techniques such as WDM (Wavelength Division Multiplexing) and TDMA (Time Division Multiple Access). The chapter on WDM explores how this technique enhances network capacity by utilizing different wavelengths on a single optical fiber, thereby facilitating simultaneous transmission of multiple data signals. Concurrently, the TDMA chapter examines how this method divides time into slots to enable multiple users to efficiently share a common resource, optimizing spectrum utilization and network management.

The thesis also investigates the integration of these technologies into Passive Optical Networks (PONs), emphasizing their critical role in cost-effectively delivering high-bandwidth services. By examining standards like GPON and EPON, the thesis provides insight into the ongoing evolution of these technologies to meet increasing demands for high-speed connectivity.

# Introduction Générale

Le développement des moyens de télécommunication est devenu une préoccupation majeure pour l'humanité. Le transport de l'information par la lumière, qui se propage très rapidement dans une fibre optique, a conduit à l'émergence des systèmes de transmission par fibre optique. Les avantages de la fibre optique comme support de transmission (large bande passante, faibles pertes de propagation, immunité aux interférences électromagnétiques, etc.) justifient le développement important des réseaux optiques, notamment avec la technologie FTTH (Fibre To The Home) pour la connexion des particuliers.

Actuellement, les réseaux d'accès en cuivre à travers le monde sont largement remplacés par des réseaux d'accès optiques, notamment par l'adoption généralisée des réseaux optiques passifs PON (Passive Optical Network). Il s'agit d'un système de transmission de données optiques qui ne nécessite pas d'alimentation électrique pour fonctionner. Ce type de réseau permet de répondre au besoin croissant en capacité des réseaux de télécommunications à l'échelle mondiale. Les réseaux PON utilisent la fibre optique pour fournir des débits élevés et une bande passante considérable, surpassant les capacités des réseaux en cuivre traditionnels. Cette transition vers les PON reflète une réponse efficace aux exigences croissantes du très haut débit pour prendre en charge les nouveaux services multimédias et applications émergentes.

L'objectif principale de notre travail est de voir les améliorations apportées par la fibre optique en termes de qualité de service et de débit par rapport aux autres moyens de transmission, et plus exactement sur l'étude du réseau PON.

Ce manuscrit est réparti en trois chapitres, le premier chapitre est basé sur des généralités concernant la fibre optique, les différentes caractéristiques et composants de la chaîne de transmission optique.

Ensuite le deuxième chapitre, il est consacré pour une étude détaillée du réseau PON, ainsi les principaux types B-PON, A-PON, G-PON...etc., leurs caractéristiques et les services offerts par le réseau PON.

Dans le troisième chapitre de ce mémoire, nous nous concentrons sur l'étude des réseaux FTTH-GPON, en utilisant les techniques "Time Division Multiple Access" (TDMA) et "Wavelength Division Multiplexing" (WDM). À l'aide du logiciel OPTISYSTEM, nous avons réalisé une simulation approfondie pour évaluer l'impact de ces deux technologies sur plusieurs paramètres essentiels : la distance de transmission, les besoins en puissance, les débits obtenus, ainsi que la capacité à supporter un nombre d'utilisateurs donné. Cette analyse détaillée permettra de mieux comprendre les avantages et les limitations de chaque approche, facilitant ainsi les décisions stratégiques pour le déploiement efficace des réseaux FTTH-GPON dans le contexte des télécommunications modernes.

# **Chapitre I : Fibre Optique**

## 1 Introduction

Le concept de communication optique, ancien comme les signaux de feu ou de fumée, persiste à travers les âges, notamment dans notre ère de croissance des réseaux Internet. Avec l'avènement du multimédia et de nouveaux services, la demande de transmission à haut débit est forte. Ainsi, la communication optique vise principalement à transmettre rapidement des données et des informations. Elle repose sur l'étude de la propagation de la lumière plutôt que des ondes radio, nécessitant un support spécifique appelé "fibre optique" pour guider la lumière.

## 2 Définition de la fibre optique

La fibre optique est un moyen de transmission de données de haute performance, elle est caractérisée par l'utilisation de la lumière pour acheminer les informations sur de longues distances à des vitesses remarquables. Contrairement aux câbles conventionnels en cuivre qui dépendent de signaux électriques, la fibre optique offre une alternative plus avancée et efficace. Grâce à sa capacité à transporter d'énormes volumes de données et à sa résilience face aux interférences, elle occupe une place prépondérante dans les infrastructures de télécommunication modernes, jouant ainsi un rôle indispensable dans notre société hyper-connectée [1].

## 3 Historique

Au début des années 1950, les premières applications de la fibre optique ont vu le jour avec l'invention du fibroscope flexible par Van Heel et Hopkins. Cette avancée technologique permettait la transmission d'images le long de fibres de verre. Cependant, en raison de la qualité médiocre des fibres utilisées, la transmission sur de longues distances restait limitée [2].

L'avènement du laser en 1960 a ouvert la voie aux télécommunications par fibre optique. Le laser a offert la possibilité de transmettre des signaux sur de grandes distances. En 1964, Charles Kao, Standard Télécommunication Laboratories, a publié un article décrivant un système de communication à faible atténuation et à longue distance, exploitant la

combinaison du laser et de la fibre optique. Cette avancée est souvent considérée comme la première transmission de données réussie par fibre optique [3].

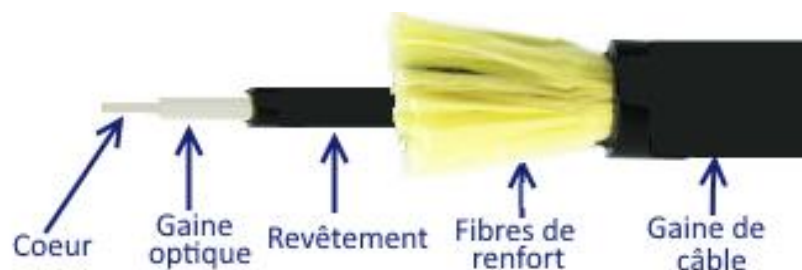
En 1977, le premier système de communication téléphonique optique a été installé au centre-ville de Chicago. Aujourd'hui, plus de 79% des communications à très longue distance sont transportées le long de plus de 25 millions de kilomètres de câbles à fibres optiques à travers le monde [2].

## 4 Les composants de la fibre optique

Le fil de verre est enveloppé de plusieurs couches pour le maintenir et le protéger. Au cœur de cette fibre se trouve ce qu'on appelle le "cœur" ou l'"âme". C'est là que le signal lumineux voyage entre la source et le récepteur. Le cœur peut être fait de verre ou de plastique et vient en différentes tailles pour transporter plus ou moins de lumière, avec un diamètre variant de 50 à 100 micromètres.

Autour du cœur se trouve la "gaine", qui aide à guider les ondes le long du cœur. L'âme et la gaine optique sont ensuite enveloppées dans un revêtement en plastique pour les protéger. Ce revêtement varie en épaisseur selon le type de fibre, allant de 250 à 900 micromètres. Pour renforcer le fil, des fibres de renfort sont intégrées, empêchant les écrasements, les tensions excessives et les dommages causés par les rongeurs. Ces renforts peuvent être faits de gel ou de fibres de Kevlar, offrant une protection supplémentaire.

Enfin, tous ces éléments sont enveloppés dans une dernière couche, imperméable à la lumière, permettant sa réfraction et garantissant une protection totale [4].



*Figure 1 : Fibre optique [4].*

## 5 Les types de fibre optique

En fonction des dimensions du cœur et des valeurs des indices de réfraction  $n_1$  et  $n_2$ , les fibres peuvent être classées en deux catégories en se basant sur la fréquence normalisée  $v$ , définie par la relation suivante :

$$v = \frac{2\pi \cdot a}{\lambda_0} \cdot n_2 \sqrt{2\Delta} \quad (\text{I.1})$$

Avec :  $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$ , est la différence d'indice relative, «  $\lambda_0$  » représente la longueur d'onde de la lumière utilisée et «  $a$  » c'est le diamètre du cœur.

- Pour  $v < 2.405$  : la fibre ne comporte qu'un mode de propagation, elle est appelée fibre monomode.
- Pour  $v > 2.405$  : la fibre est appelée multimode et se divise en deux sous-catégories :
  - o Fibre multimode à saut d'indice.
  - o Fibre multimode à gradient d'indice [5].

### 5.1 Fibre optique multimode

La fibre optique multimode, également connue sous le nom de MMF (Multi Mode Fiber), était la première à être utilisée. Elle permet le transport simultané de plusieurs rayons lumineux, nécessitant un diamètre de cœur important, d'environ 50 micromètres. Il existe deux principales catégories de fibres multimodes :

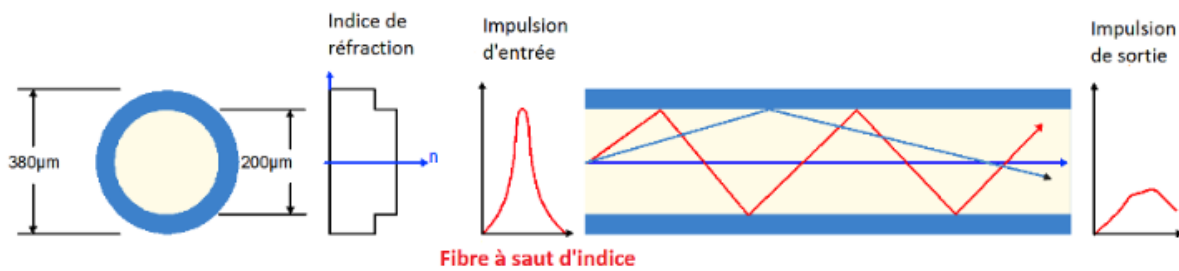
#### 5.1.1 Fibre à saut d'indice

Dans les fibres à saut d'indice, un grand nombre de rayons lumineux se propage par réflexion totale. Le nombre de rayons est fonction de l'angle d'incidence de la lumière. La réflexion totale est assurée par les valeurs des indices de réfraction  $n_1$  (cœur) et  $n_2$  (gaine) avec toujours  $n_1 > n_2$ .

La lumière est guidée par réflexion interne totale à l'interface cœur-gaine, il suit donc un chemin en zigzag.

L'inconvénient de ce type de fibre résulte de l'écart important du temps de propagation des différents rayons lumineux et donc un élargissement conséquent du signal d'entrée, la déformation et la dispersion du signal reçu, ce qui limite la bande passante.

La **Figure 2** montre la fibre à saut d'indice :

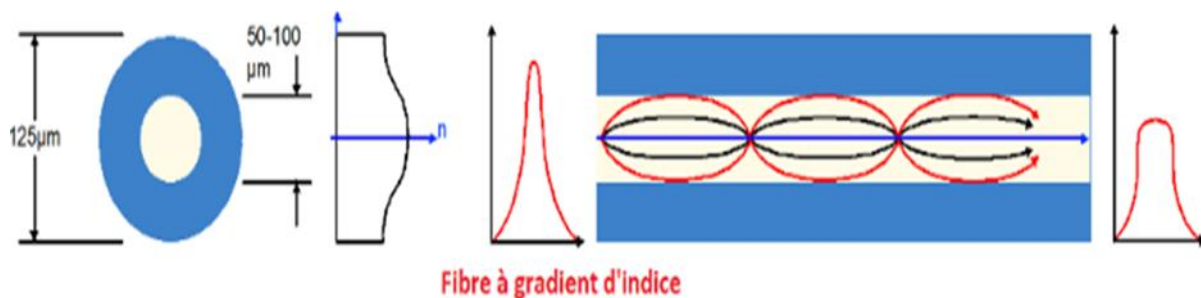


*Figure 2 : Fibre à saut d'indice [5].*

Les fibres multi modes à saut d'indice sont destinées pour des transmissions courtes distances, elles utilisent les longueurs d'onde  $850\text{nm}$  et  $1300\text{nm}$  [5].

### 5.1.2 Fibre à gradient d'indice

Dans les fibres à gradient d'indice, le cœur est composé de couches successives du matériau dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) dopé avec des indices de réfraction proches. Ainsi, l'indice de réfraction diminue de manière progressive du centre du cœur jusqu'à l'interface cœur/gaine suivant une courbe parabolique. Cela entraîne une égalisation des temps de propagation, réduisant ainsi la dispersion modale. Tous les rayons lumineux sont renvoyés vers le centre de la fibre, l'atténuation et l'élargissement du signal sont beaucoup plus faibles que dans la fibre à saut d'indice. Les fibres à gradient d'indice sont les plus utilisées pour les moyennes distances [5].



*Figure 3 : Fibre à gradient d'indice [5].*

## 5.2 Fibre monomode

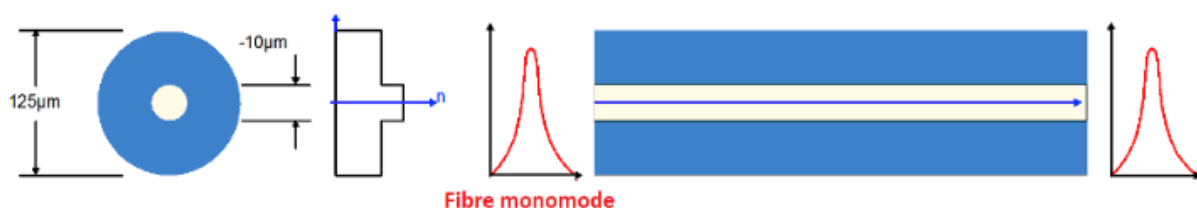
Les fibres monomodes également connue sous le nom de SMF (Single Mode Fibre) possèdent un cœur très fin, afin de ne laisser se propager qu'un seul mode unique, à savoir le mode HE<sub>11</sub> (Hybrid Mode), qui est le mode fondamental dans une fibre optique cylindrique, caractérisé par un cycle de champ électrique dans la direction radiale et un cycle de champ magnétique dans la direction axiale. Il est principalement utilisé dans les fibres monomodes pour transmettre un seul mode de lumière, garantissant une transmission cohérente et efficace des signaux optiques. Le nombre de modes se propageant dans une fibre optique est donné par la relation suivante :

$$N_m = \frac{2 \cdot v}{\pi} = \frac{4\alpha}{\lambda} ON \quad (I.2)$$

Avec :  $v$  : La fréquence normalisée.

ON : L'ouverture numérique.

En réduisant le diamètre du cœur de manière significative, il devient possible de limiter le nombre de modes de propagation à un seul ( $N_m = 1$ ), caractérisant ainsi la fibre comme monomode. Ce choix entraîne un chemin de propagation unique et parfaitement aligné avec l'axe de la fibre. Cependant, cette configuration exige une puissance d'émission élevée, nécessitant l'utilisation de diodes laser fonctionnant à des longueurs d'onde spécifiques, généralement à 1300 nm ou 1550 nm, ce qui les rend relativement coûteuses. Cette contrainte a pour effet de réduire considérablement le phénomène d'élargissement d'impulsion, entraînant ainsi une bande passante notablement étendue.



*Figure 4 : Fibre monomode [5].*

Les fibres monomodes sont destinées pour des transmissions à longue distances, elles sont utilisées à la longueur d'onde 1550 nm possèdent un diamètre de cœur extrêmement fin (8 à 10 μm en général), faible par rapport au diamètre de la gaine (125 μm) et proche de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière injectée [5].

## 6 Comparaison entre la fibre monomode et multimode

Le **Tableau 1** suivant compare les caractéristiques de ces deux familles de fibres optiques :

*Tableau 1 : Comparaison entre la fibre monomode et multimode [5].*

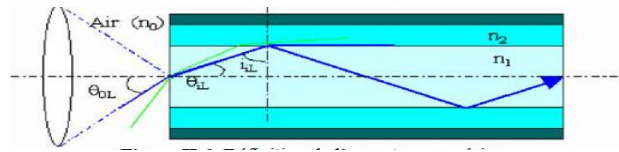
	Fibre monomode	Fibre Multimode	
	/	Fibre à saut d'indice	Fibre à gradient d'indice
<b>Diamètre du cœur (μm)</b>	5 à 10	50	50
<b>Diamètre de la gaine (μm)</b>	125	125	125
<b>Atténuation (dB/Km)</b>	0.1 à 0.5	3	1.5 à 3
<b>Bande passante</b>	De l'ordre de THz. KM	<60 MHz. Km	De l'ordre de GHz. Km

## 7 Caractéristiques d'une fibre optique

### 7.1 Ouverture numérique :

L'ouverture numérique caractérise l'angle maximum que doit faire le faisceau incident pour assurer sa propagation dans la fibre.

La **Figure 5** suivante le montre :



**Figure 5 : Définition de l'ouverture numérique [6].**

$$n_0 \cdot \sin(\theta_{OL}) = n_1 \cdot \sin(\theta_{iL}) \quad (\text{I.3})$$

$$n_1 \cdot \sin(i_{iL}) = n_2 \cdot \sin(i_2) \quad (\text{I.4})$$

Pour qu'il y ait réflexion totale, il faut que  $i_{iL}$  soit supérieure à l'angle critique donnée par :

$$\sin(i_{iLC}) = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{I.5})$$

Comme ( $i_{iL} = 90^\circ - \theta_{iL}$ ).

$$\sin(\theta_{OL}) = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(\theta_{iL}) = \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{n_0} \quad (\text{I.6})$$

On définit l'ouverture numérique (ON) par :

$$ON = \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{n_0} \quad (\text{I.7})$$

Plus l'ouverture numérique est grande plus la puissance lumineuse injectée dans la fibre est importante [6].

## 7.2 Atténuation

La puissance optimale « P » disponible après un parcours de « x » Km dans une fibre optique est pour une puissance injectée  $P_0$  égale à :

$$P = P_0 \cdot e^{-x\alpha} \quad (\text{I.8})$$

$\alpha$  : est le coefficient d'atténuation linéique, exprimé en dB/Km et représente la somme de l'ensemble des pertes dans la fibre ( $\alpha=0,16\text{dB/Km}$  pour  $\lambda=1,55\mu\text{m}$ ). Ces pertes sont de différentes natures dont :

### 7.2.1 Pertes intrinsèques

Elles dépendent de la nature physicochimique de la fibre (la nature et la structure de la matière constituant la fibre).

- **Pertes par absorption moléculaire** : elles sont causées par l'absorption des rayons optiques par la silice et les impuretés dans celle-ci.
- **Perte par diffusion** : elle est causée par les variations de concentrations et de densités des dopants utilisés et les défauts de structure (bulle, micro fracture, micro courbure, impuretés). En fonction de la taille de ces défauts, on parlera de diffusion de Rayleigh (petits défauts devant la longueur d'onde).
- **Perte par affaiblissement différentiel** : elle est causée soit par la variation du diamètre du cœur, soit par variation de l'ouverture numérique.
- **Perte par Couplage de mode** : c'est l'échange d'énergie entre les différents modes, elle est généralement due aux micro courbures présentes dans la fibre.
- **Pertes extrinsèques** : elles dépendent du couplage fibre-fibre ou fibre-composant.
- **Les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres** : toute courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement.
- **Les micro courbures** : elles sont des courbures très faibles, incontrôlables dues au conditionnement des fibres dans les câbles.
- **Les raccordements** : les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux. Chaque jonction peut provoquer des pertes de raccordement [6].

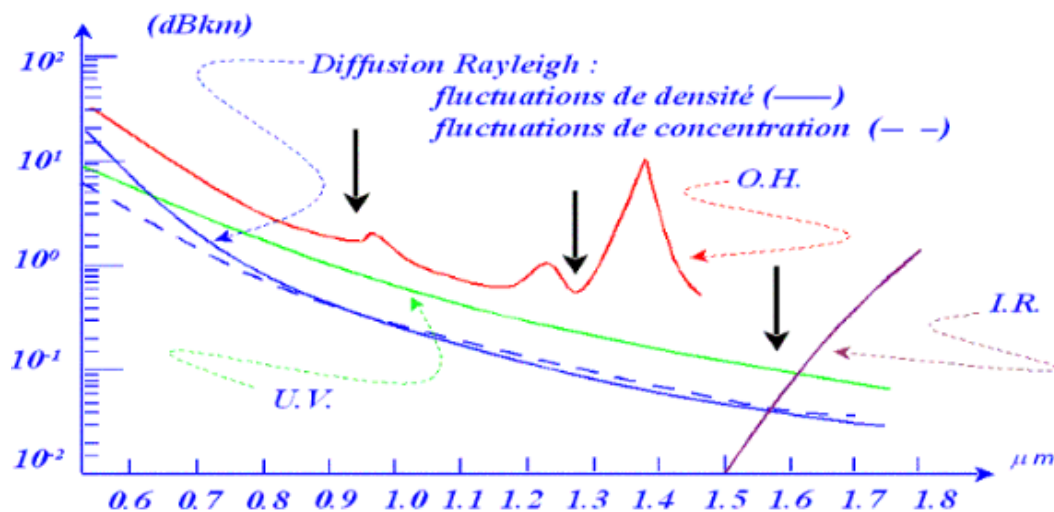


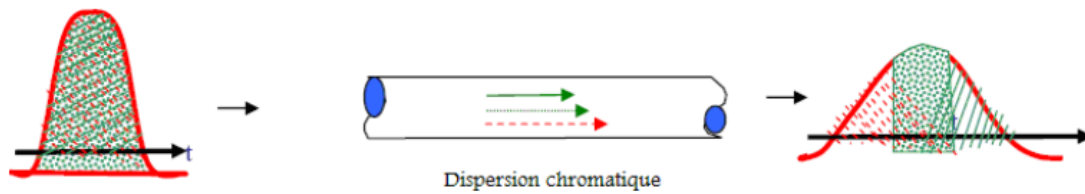
Figure 6 : Atténuation dans la fibre optique en fonction de la longueur d'onde [6].

La dispersion d'un signal optique se traduit par une altération du signal, entraînant un élargissement des impulsions au fur et à mesure de leur propagation dans la fibre optique.

Il existe deux types de dispersion [6] :

### 7.2.2 Dispersion chromatique (intermodale)

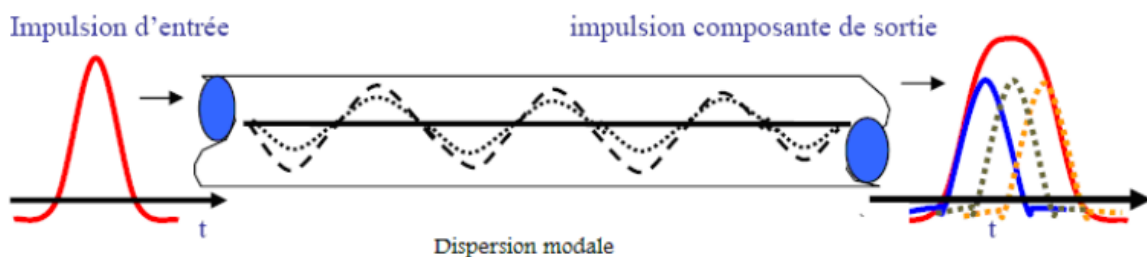
La dispersion chromatique se réfère à la manière dont le signal se propage en raison de sa largeur spectrale, ce qui signifie que des longueurs d'onde différentes ne voyagent pas à la même vitesse. Cette dispersion est influencée par la longueur d'onde et elle est le résultat de deux facteurs combinés : la dispersion intrinsèque du matériau et la dispersion du guide, qui est influencée par la forme du profil d'indice. Ainsi, en ajustant ce profil, il est possible de réduire cette dispersion. Pour une fibre en silice, le point où la dispersion est minimale se situe autour de 1300-1310 nm.



*Figure 7 : La dispersion chromatique (intermodale) [6].*

### 7.2.3 Dispersion modale (intermodale)

Dans une fibre optique, les trajets empruntés par les rayons lumineux varient (modes) en fonction de l'angle d'incidence à l'interface entre l'air et le verre. Le mode le plus court correspond à celui qui suit précisément l'axe optique de la fibre, tandis que le mode le plus long est celui dont l'angle d'incidence à l'interface entre le cœur et la gaine est le plus élevé autorisé.



*Figure 8 : La dispersion modale (intermodale) [6].*

L'impulsion en réception est la somme des impulsions composantes qui se propagent en temps différents (parcours différents).

### 7.3 Bande passante

La bande passante est l'un des paramètres les plus importants pour définir les propriétés de transmission d'une fibre optique.

La définition de la bande passante totale ( $B_{Totale}$ ) qui dépend de l'effet conjonctif des deux phénomènes de dispersion modale et chromatique, permettra de stabiliser la fréquence maximale transmissible sur ligne. La bande totale est définie par l'expression.

$$B_{Totale} = \sqrt{\frac{1}{\left[\frac{1}{B^{(chr)}}\right]^2 + \left[\frac{1}{B^{(mod)}}\right]^2}} \quad (I.9)$$

$B^{(chr)}$  : bande résultante de la dispersion chromatique.

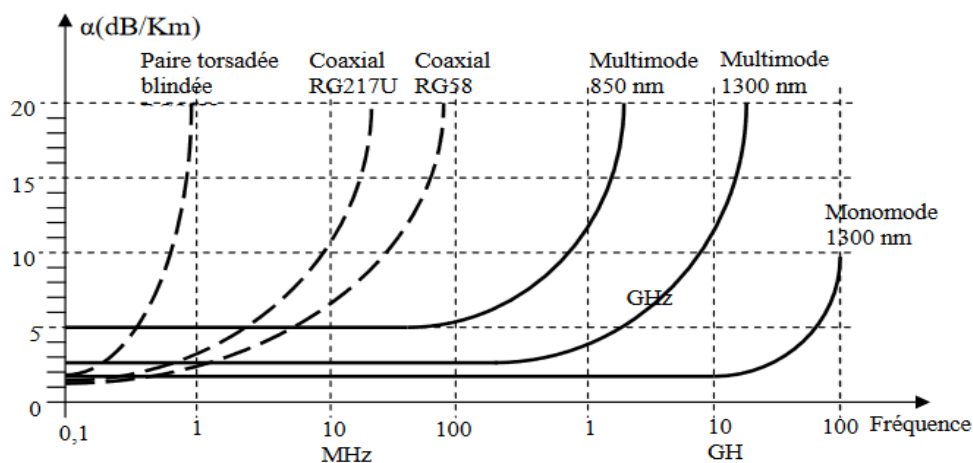
$B^{(mod)}$  : bande dérivante de la dispersion modale.

- Dans la fibre multimodes la bande totale dépend uniquement de la bande modale.

$$\text{Fibre multimode } B_{Totale} = B^{(mod)}$$

- Dans la fibre monomode la bande totale est déterminée uniquement par la bande chromatique.

$$\text{Fibre monomode } B_{Totale} = B^{(chr)} \text{ [6].}$$



*Figure 9 : Les bandes passantes de quelques types de lignes de transmission en fonction de la fréquence sur une échelle logarithmique [6].*

## 8 Raccordement des fibres optiques

Lors d'un déploiement d'un réseau optique, la distance limite la longueur de la fibre optique. Il est nécessaire alors de raccorder une autre fibre pour arriver jusqu'à la destination.

Pour raccorder entre deux fibres optiques, Il existe deux manières :

- Par la méthode de la soudure (fusion)
- Par l'épissure mécanique

### 8.1 Épissures par fusion

Cette opération consiste à raccorder directement les deux fibres par soudure au moyen d'un appareil appelé soudeuse [7].



*Figure 10 : La soudeuse [7].*

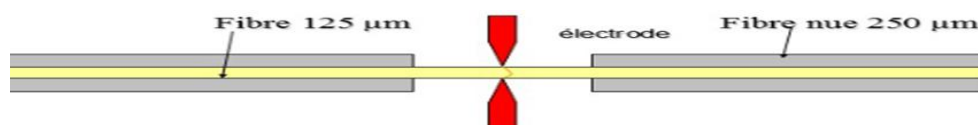
La procédure sera montrée par les **Figure 11** **Figure 12** **Figure 13** ci-dessous :



*Figure 11 : Clivage des deux fibres avant de les placer sur le support [7].*



*Figure 12 : Mise en contact des deux fibres. [7].*



*Figure 13 : La fusion réalisée avec l'aide d'un arc électrique [7].*

## 8.2 Epissure mécanique

- Le couplage mécanique de deux connecteurs par une pièce mécanique.
- Le couplage par "Splicing" mécanique qui est utilisé pour la connexion des câbles ou pour la réparation.

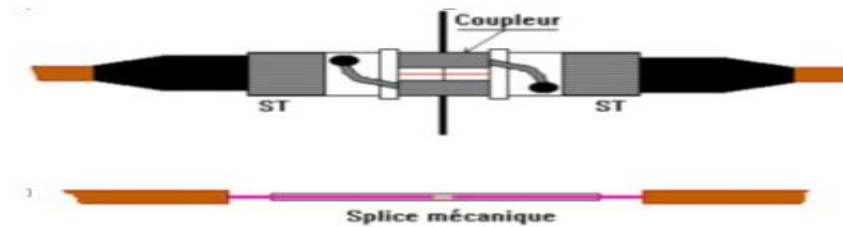


Figure 14 : Epissure mécanique [7].

## 9 Connecteurs de fibre optique :

Les **connecteurs fibre optique** sont des dispositifs normalisés terminant une fibre optique et permettant de la raccorder aux équipements terminaux comme les switches, les HBA, les contrôleurs disques ou les bibliothèques de sauvegarde dans un réseau de stockage SAN, ou divers équipements utilisant la fibre optique [8].

### 9.1 Les types de connecteurs

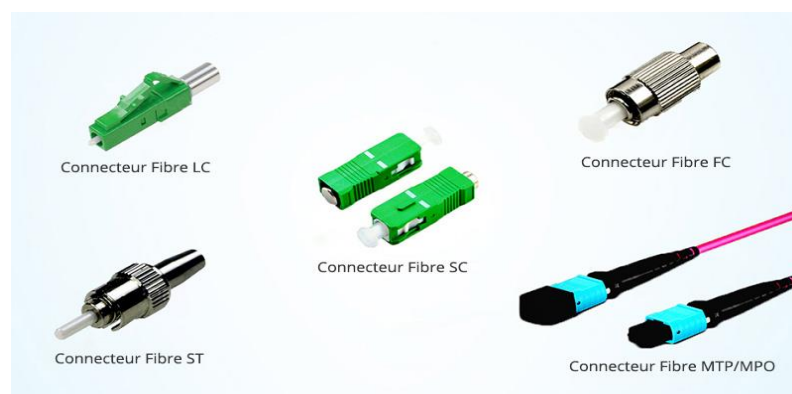


Figure 15 : Différents connecteurs [8].

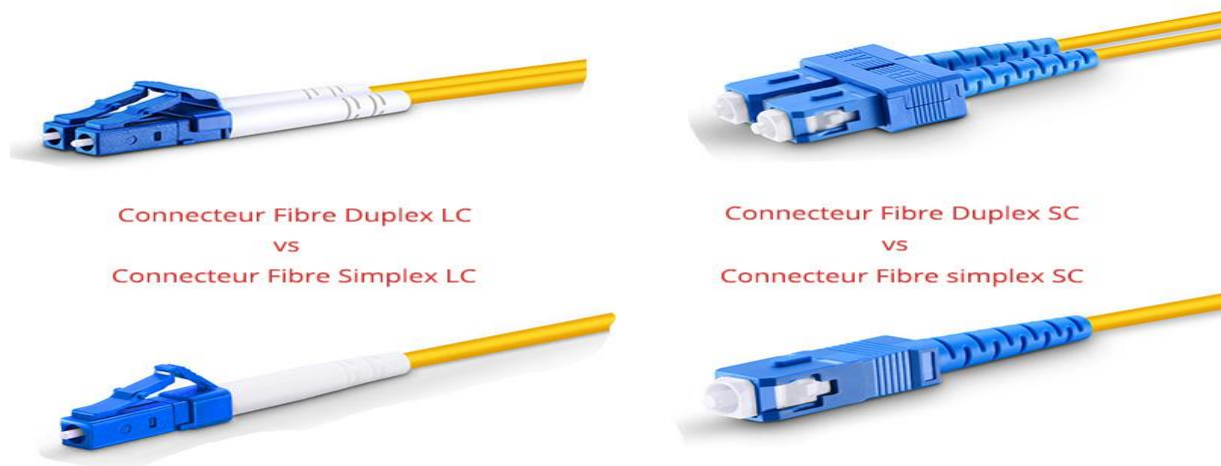
- **Connecteur LC** : (Lucent Connector) développé par Lucent Technologies, s'est imposé comme le connecteur de fibre le plus couramment utilisé dans les applications de télécommunications optiques contemporaines. Il est particulièrement privilégié pour les liaisons avec les émetteurs-récepteurs SFP et SFP+. Doté d'une virole de 1,25 mm, le

connecteur LC est idéalement adapté aux exigences de câblage à haute densité. Il existe deux types principaux de connecteurs LC : monomode et multimode. De plus, en fonction de leur construction, les connecteurs LC peuvent être catégorisés en duplex LC et en connecteurs simplex [8].

- **Connecteur SC** : (Subscriber Connector) Contrairement au connecteur LC, les connecteurs de fibre SC utilisent une fêrulle ronde de 2,5 mm pour loger une fibre monomode (SMF). Leur corps de connecteur présente une forme carrée, d'où leur appellation de "connecteur carré". Réputé pour ses performances de haute qualité, le connecteur SC à fibre optique demeure le deuxième connecteur le plus répandu pour les applications nécessitant le maintien de la polarisation. Adapté aux exigences des télécommunications et des réseaux optiques, y compris les configurations point à point et passives, le connecteur fibre optique SC reste largement utilisé dans ces domaines [8].
- **Connecteur MPO/MTP** : (Multi-Fiber Push-On) / (Multi-Fiber Termination Push-On) est un type de connecteur multi-fibres qui regroupe de 12 à 24 fibres dans une seule fêrulle rectangulaire. Il est fréquemment utilisé pour les connexions optiques parallèles à haut débit, telles que celles de 40G et 100G. Comparativement aux autres types de connecteurs de fibre mentionnés précédemment, les connecteurs MPO/MTP sont plus complexes en raison de la présence de clés-up et clés-down, ainsi que de connecteurs mâles et femelles. En ce qui concerne la distinction entre le connecteur fibre optique MPO et le connecteur fibre MTP, des informations détaillées peuvent être obtenues dans un guide spécifique sur les différences et les procédures de nettoyage recommandées pour les connecteurs MPO/MTP [8].
- **Connecteur FC** : Le connecteur de fibre FC (Fiber Connector) a été le premier connecteur à fibre optique à utiliser une fêrulle en céramique, mais contrairement au connecteur SC et LC à corps en plastique, il utilise un raccord à vis ronde en acier inoxydable. La face d'extrémité du connecteur FC repose sur une clé d'alignement pour une insertion correcte. Ensuite, elle est introduite dans l'adaptateur / prise à l'aide d'une pince filetée. Malgré la complexité supplémentaire de la fabrication et de l'installation, le connecteur FC reste le connecteur choisi pour les équipements de mesure précises tels que les OTDR, ainsi que le choix de la fibre monomode [8].
- **Connecteur ST** : Le connecteur de fibre ST (Straight Tip) a été créé et licencié par AT&T. Il est l'un des connecteurs les plus populaires dans le marché. Il présente une perte d'insertion d'environ 0,25 dB et maintient la fibre avec une fêrulle en céramique de 2,5 mm à ressort, qui reste en place avec une monture à baïonnette 'half-twist'. Le connecteur de fibre ST est généralement utilisé dans les applications de longue ou de courte distance, telles que les

campus, la création d'applications fibre multimode et les environnements de réseau d'entreprise [8].

- **Connecteur Fibre Optique Simplex vs Duplex** La connexion simplex signifie que les signaux sont envoyés dans une seule direction. Par exemple, un signal est transmis par deux connecteurs simplex et un câble fibre simplex du périphérique A au périphérique B. Il est impossible de revenir du périphérique B au périphérique A via le même chemin. Mais la transmission de révision peut être réalisée via des connecteurs duplex et un câble à fibre optique duplex, appelé connexion duplex. De plus, le connecteur fibre simplex est souvent connecté à une fibre de verre ou de plastique, tandis que le connecteur fibre double doit être connecté à deux fibres. L'illustration suivante montre la comparaison entre le connecteur duplex LC et le connecteur duplex SC [8].



*Figure 16 : Connecteur fibre duplex et simplex. [8]*

## 10 Description d'une chaîne de transmission optique

Un système de communication à fibre optique se compose de trois composants : l'émetteur optique, la jarretière optique et le récepteur optique.

L'émetteur optique convertit le signal électrique en signal optique ; la jarretière optique transmet le signal optique de l'émetteur optique au récepteur optique ; et le récepteur optique reconvertit le signal optique en signal électrique. La plupart des fibres optiques sont fabriquées de silice ou de sable, les matières premières sont abondantes par rapport au cuivre.

Pour les débits de données plus faibles, le signal optique est modulé en signal NRZ (Non-Retour à Zéro). Pour les débits de données plus élevés, typiquement supérieurs à 25 Gbit/s, la

modulation PAM4 est utilisée. Les performances de l'ensemble de la connexion et de ses différents composants sont évaluées à l'aide de différents paramètres tels que l'œil optique, le taux d'erreur binaire (BER) et les performances pour les petits et les grands signaux. Les pertes en puissance sont également un paramètre de performance important. Les composants de communication optique doivent d'autre part répondre à certaines normes [9].

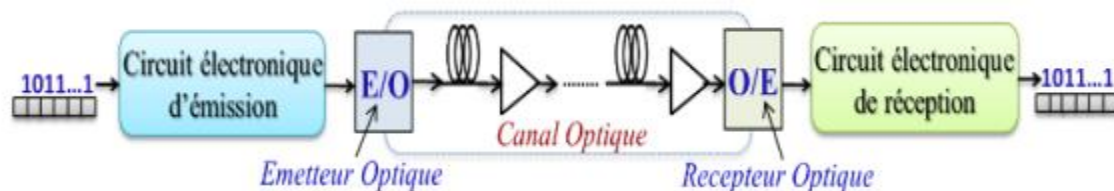


Figure 17 : Schéma représentatif d'une chaîne de transmission [9].

## 10.1 Bloc d'émission

Dans un système de transmission, le bloc d'émission joue un rôle crucial en assurant deux fonctions principales : générer un signal optique et moduler l'information à transmettre. La source optique employée se compose d'une diode laser, elle est la mieux adaptée pour les systèmes de télécommunications optiques.

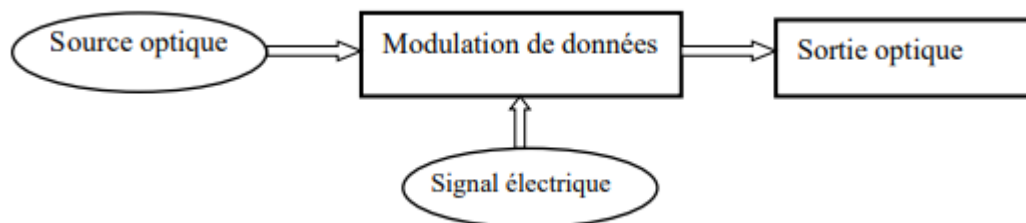


Figure 18 : Schéma représentatif d'un émetteur optique [10].

### 10.1.1 Source optique

Dans les systèmes de communication les sources optiques utilisées sont les diodes électroluminescentes et les diodes lasers. Leur fonction est de convertir une énergie électrique en énergie optique. Les diodes laser sont les plus utilisées pour la transmission de l'information par fibre optique.

- **Diode électroluminescente** : La diode électroluminescente, aussi appelée DEL ou LED (light-emitting diode), est une jonction PN polarisée en direct. C'est un composant optoélectronique simple, capable d'émettre un rayonnement monochromatique incohérent pour des applications bas débit. Le principe d'émission est basé par la recombinaison des

pairs électron-trou, lorsqu'elle est parcourue par un courant électrique. Elle émet dans des bandes de fréquences autour des longueurs d'onde de  $0.85\mu\text{m}$ ,  $1.3\mu\text{m}$  et  $1.55\mu\text{m}$ .

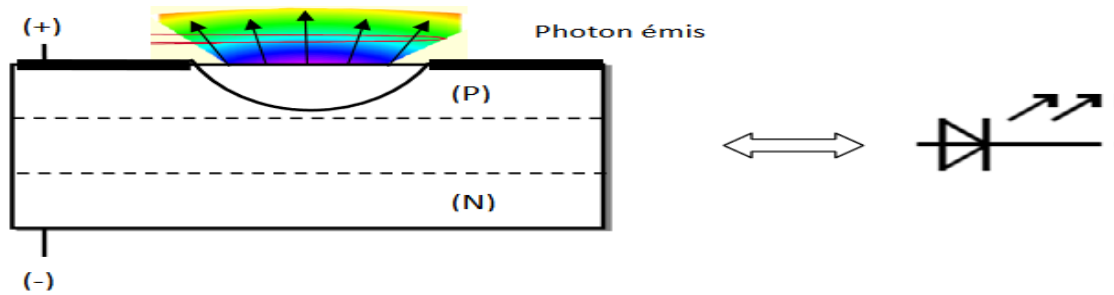


Figure 19 : La diode LED [11].

- **Diode laser :** La diode laser est une source lumineuse caractérisée par sa cohérence et sa monochromaticité, obtenues grâce à l'émission stimulée. Principalement utilisée dans les systèmes de transmission sur de très longues distances, elle se distingue par sa large bande spectrale, sa faible consommation d'énergie, son spectre relativement étroit et son efficacité accrue de couplage avec la fibre optique. Elles sont utilisées dans les systèmes WDM.

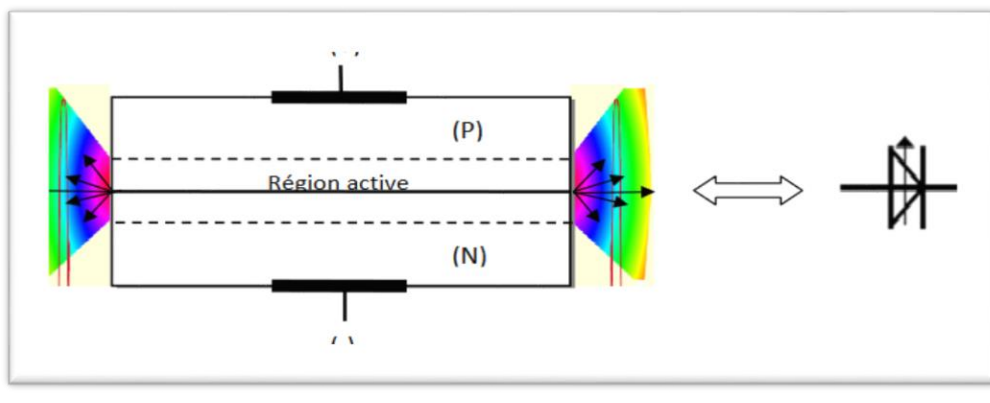


Figure 20 : La diode Laser [11].

- ❖ **Bruit des lasers :** À la sortie d'un laser à semi-conducteur, le signal optique est affecté à divers types de bruits. Les fluctuations en amplitude, phase et fréquence sont principalement attribuables à l'émission spontanée et à la recombinaison électron-trou, communément appelées bruit de grenaille. Le signal émis par l'émission stimulée est perturbé et altéré par l'addition d'une composante de champ aléatoire due aux photons émis lors de l'émission spontanée. Les fluctuations de phase entraînent un élargissement du spectre de la raie émise à la sortie du laser, tandis que celles de l'amplitude affectent le rapport signal sur bruit (SNR).

### 10.1.2 Modulation

**Un modulateur** est un dispositif capable de modifier les paramètres d'onde optique (Amplitude) en fonction du signal de commande. Deux méthodes sont utilisées pour moduler les ondes optiques ; Modulation par la technique du OOK (On-Off-Keying) est la modulation directe et la modulation cohérente (externe).

- **Modulation par la technique du OOK (On-Off-Keying)** : est une méthode de modulation utilisée en transmission optique pour encoder des données sur un signal lumineux. Dans cette technique, un obturateur (est un dispositif mécanique ou électronique qui contrôle le temps d'exposition de la lumière sur le capteur d'un appareil photo. Il permet de réguler la quantité de lumière qui atteint le capteur et donc de contrôler la luminosité de l'image finale) rapide est utilisé pour contrôler l'intensité lumineuse du faisceau laser. Lorsque l'obturateur est ouvert, il permet à la lumière de passer à travers la fibre optique, et lorsque l'obturateur est fermé, il bloque complètement le passage de la lumière.

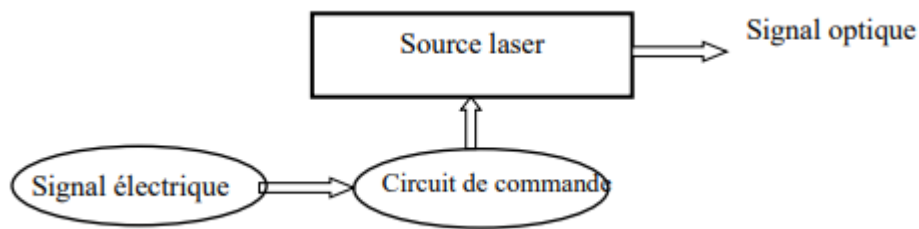
Cette modulation repose sur le principe de la variation de l'intensité lumineuse pour représenter des bits d'information. Lorsque le signal est "allumé" (on), la lumière est émise à pleine intensité, représentant un bit de données "1". Lorsque le signal est "éteint" (off), aucun signal lumineux n'est émis, représentant un bit de données "0". Ainsi, les variations d'intensité lumineuse correspondent à la séquence de bits à transmettre.

L'obturateur optique agissant sur le faisceau laser permet de moduler la puissance optique du signal, ce qui permet de transmettre des données numériques sur de longues distances à travers une fibre optique. Cette technique est largement utilisée dans les systèmes de communication optique tels que les réseaux informatiques, les télécommunications et les transmissions de données à haute vitesse.

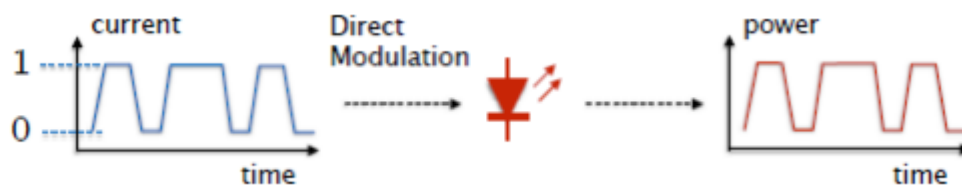
#### **1) Modulation directe :**

La modulation directe est la modulation la plus simple à mettre en œuvre. Le courant d'alimentation qui traverse la diode laser sera modulée directement en intensité émise par celle-ci. Cette solution requiert peu de composants et peu coûteuse. Mais son inconvénient est c'est lorsqu'on module en amplitude le courant d'alimentation d'un laser, il est accompagné d'une modulation de fréquence parasite appelée chirp. Ces effets, conjugués à la dispersion chromatique de la fibre, provoquent un élargissement de l'impulsion d'autant plus importante que la longueur de la fibre est grande.

La **Figure 21** ci-dessous montre la modulation directe :



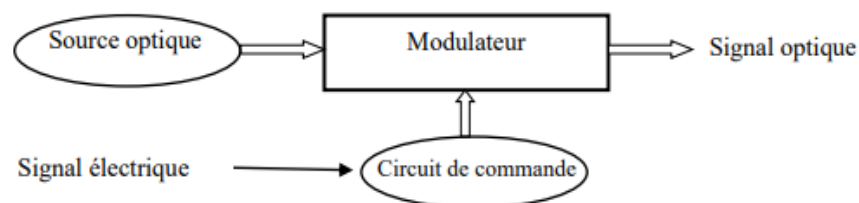
*Figure 21 : La modulation directe [10].*



*Figure 22 : Schéma représentatif d'un module d'émission en modulation directe [10].*

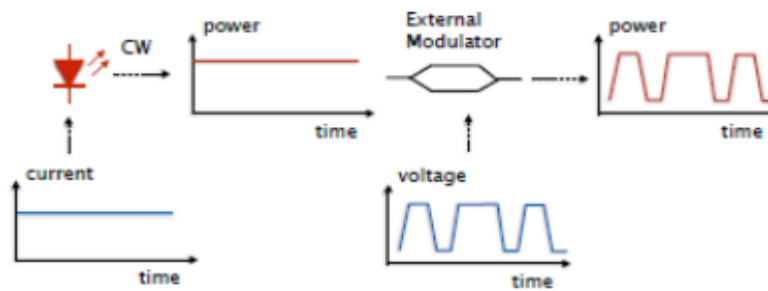
- **Modulation externe :**

Dans cette technique de modulation, l'émetteur transmet un signal optique pur suivi d'un modulateur externe. Contrairement à la modulation directe, le courant injecté dans le laser n'est pas modulé. Cette méthode de modulation est particulièrement adaptée aux télécommunications à longue distance et à haut débit, ainsi qu'aux fréquences très élevées, à partir de 5 à 10 GHz. Elle offre une vitesse de modulation supérieure à celle de la modulation directe. De plus, elle permet d'encoder les données électriques sur un signal optique continu tout en éliminant l'effet de chirp. Sa bande passante atteint jusqu'à 80 GHz, surpassant ainsi celle de la modulation directe qui est limitée à 5 GHz.



*Figure 23 : La modulation externe [10].*

La **Figure 24** schéma représentatif d'un module d'émission en modulation externe :



**Figure 24 : Schéma représentatif d'un module d'émission en modulation externe [10].**

Deux types de modulateurs sont les plus utilisés dans l'industrie des télécommunications optiques : le modulateur Mach-Zehnder (MZM) et le modulateur électro-absorption (EAM).

#### ❖ **Modulateur Mach-Zehnder (MZM) :**

Le modulateur Mach-Zehnder est basé sur le principe de l'interférence constructive et destructive de la lumière. Il se compose généralement de deux bras optiques parallèles qui divise et recombine le signal optique. Lorsque le signal optique est appliqué à l'un des bras, il subit un déphasage par rapport à l'autre bras, en fonction de la tension appliquée. Lorsque les deux signaux sont recombinaés, ils interfèrent soit de manière constructive, soit de manière destructive, modulant ainsi l'intensité de la lumière en sortie. Les MZMs sont couramment utilisés dans les systèmes de communication optique à haute vitesse en raison de leur large bande passante et de leur faible consommation d'énergie.

#### ❖ **Modulateur électro-absorption (EAM) :**

Le modulateur électro-absorption repose sur l'effet électro-optique de variation de l'absorption du matériau en fonction du champ électrique appliqué. Typiquement, un EAM est constitué d'une couche de matériau semi-conducteur à bande interdite large. Lorsqu'un champ électrique est appliqué à cette couche, la largeur de la bande interdite change, ce qui modifie l'absorption du matériau à la longueur d'onde de fonctionnement. Ainsi, en modulant le champ électrique appliqué, on peut moduler l'intensité de la lumière transmise à travers le modulateur. Les EAM sont utilisés dans les systèmes de communication optique pour leur haute vitesse de modulation et leur faible consommation d'énergie, en particulier dans les applications à courte distance et à haut débit, telles que les réseaux locaux et les centres de données.

En résumé, tant le MZM que l'EAM sont des dispositifs de modulation optique largement utilisés dans les systèmes de communication optique pour moduler l'intensité du signal

lumineux en fonction d'un signal électrique, mais ils utilisent des mécanismes différents pour réaliser cette modulation [10], [11], [12].

## 10.2 Bloc de réception

Le bloc récepteur : le récepteur est chargé de convertir au mieux le signal optique en signal électrique en lui apportant le minimum de dégradation. Ce module est composé de plusieurs blocs fonctionnels :

- Le bloc de "premier étage" composé du photo-détecteur. Il peut être accompagné d'un préamplificateur, qui a pour but de rendre le photo-courant généré suffisamment fort malgré le faible signal optique reçu ou la faible sensibilité du photo-détecteur.
- Le bloc "linéaire", composé d'un amplificateur électrique à gain élevé et d'un filtre, réducteur de bruit.
- Le bloc "récupération des données", correspondant au dernier étage du récepteur. On y trouve un circuit de décision et un circuit de récupération de rythme, encore appelé circuit de synchronisation [10], [13].

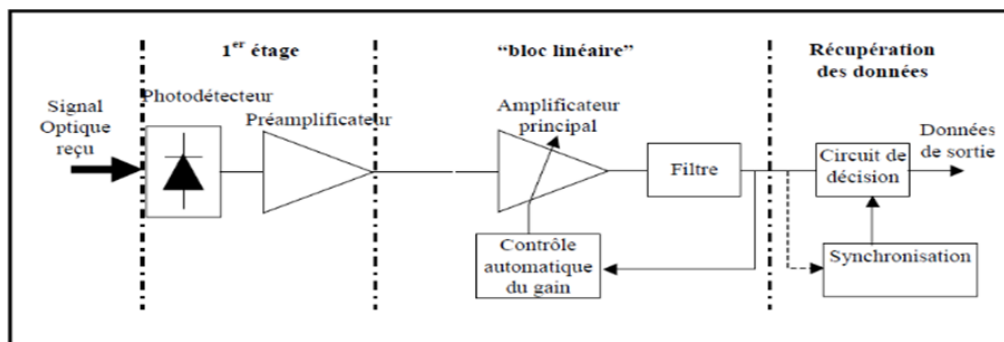
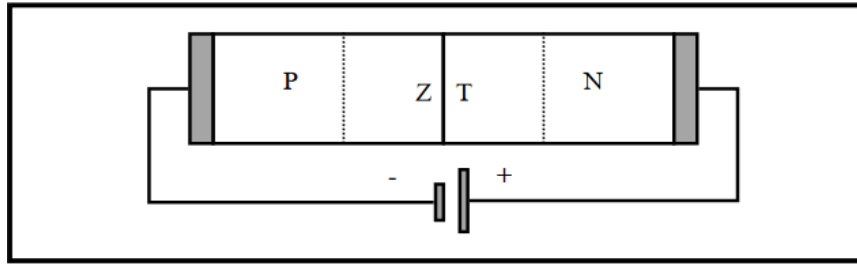


Figure 25 : Le bloc de réception [10].

### 10.2.1 Le bloc de premier étage

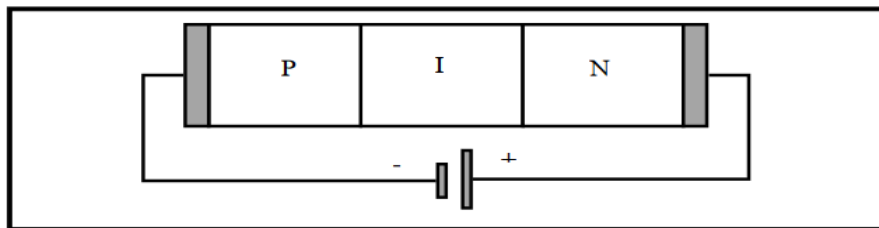
- **Photo-détecteur** : photo-détecteur son rôle est de convertir le signal lumineux en signal électrique, il se comporte comme un générateur de courant (photo diode PN, photo diode PIN, photo diode à effet d'avalanche PDA).
- **Photo diode PN** : photo diode PN est une jonction PN polarisée en inverse, lorsqu'elle est exposée à la lumière, les électrons minoritaires de P absorbent les photons

lumineux et vont passer vers N puis ils seront extraits à l'extérieur par le champ électrique de générateur, créant ainsi un faible courant électrique.



*Figure 26 : Photo diode PN [14].*

- **Photo diode PIN :** photo diode PIN est une jonction PN intercalée par une couche intrinsèque I, dans le but de diminuer le dopage de N pour augmenter d'avantage le courant électrique générer par la jonction.



*Figure 27 : Photo diode PIN [14].*

- **Photo diode à effet d'avalanche PDA :** photo diode à effet d'avalanche PDA est une jonction PN polarisée en inverse, d'une manière à ce que, la tension de polarisation soit proche à celle de claquage de la jonction, créant ainsi un champ électrique important à la zone de charge d'espace, qui y accélère les électrons passant par la zone de recombinaison, créant à leur tour d'autre électron dans la région N.

### 10.2.2 Le bloc linéaire

- **L'amplification électrique :** le courant émis par le Photo-détecteur, malgré la présence d'un préamplificateur, reste souvent assez faible. Il est donc nécessaire d'utiliser un amplificateur en sortie de photorécepteur.
- **Circuit de filtrage :** afin de minimiser le bruit à la sortie du récepteur, il faut filtrer le signal numérique dans une bande, qui soit le plus petit possible.

### 10.2.3 Le bloc de récupération des données

- **Le Circuit de décision** : on doit assurer au récepteur une qualité d'information parfaite. Pour cela, une remise en forme du signal détecté est réalisée grâce au bloc de décision [11], [14], [15], [16].

### 10.3 Le bloc de transmission

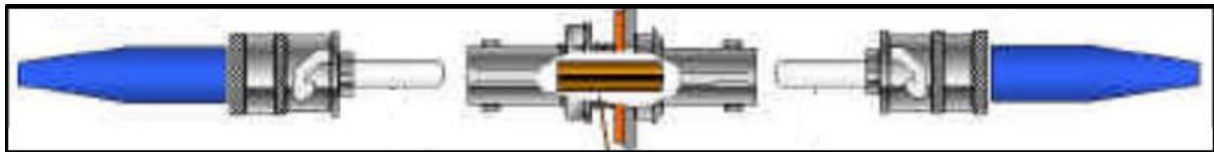
Assure la liaison entre le bloc de transmission et le bloc de réception, il comporte :

#### 10.3.1 Le câble de transmission

Qui est la fibre optique.

#### 10.3.2 Les coupleurs et les connecteurs

Leurs rôles sont de lie l'émetteur et le récepteur avec la fibre optique, comme ils assurent les connexions entre les fibres optiques.



*Figure 28 : Un connecteur Optique [16].*

#### 10.3.3 Les amplificateurs et les répéteurs optiques

Lors de la transmission d'un signal optique, il peut y arriver que le signal transmis se dégrade et pour le régénérer, il faut utiliser des amplificateurs et des répéteurs optiques [11], [14], [15].

## 11 Techniques de compensation

Les Techniques de compensation se contribuent à l'amélioration des performances d'un système de communication optique à longue distance.

## 11.1 Amplification optique

### 11.1.1 Le régénérateur optique

**Description :** Appelés aussi des répéteurs optoélectroniques sont insérés à des intervalles réguliers pour booster le signal optique qui tend à se dégrader. Un répéteur est constitué d'un récepteur, un support électronique et d'un émetteur.

**Fonctionnement :** Le signal optique arrive à l'entrée du répéteur ; il est converti en impulsion électronique qui est ensuite amplifiée dans un circuit de décision et réutilisée dans l'émetteur. Lorsqu'ils sont destinés à travailler à des débits très élevés, ils ont comme inconvénient un coût plus élevé.

### 11.1.2 Amplificateurs optiques

Les amplificateurs optiques sont des dispositifs qui assurent l'amplification du signal tout en restant dans le domaine optique.

#### *11.1.2.1 Type d'amplificateur optique*

- **Amplificateur optique à fibre dopée d'erbium**

**Description :** Il comporte un morceau de fibre optique monomode dopée d'erbium, de longueur d'environ 10-20 m, diode LASER (source d'excitation), multiplexeur et des isolateurs.

**Fonctionnement:** La diode LASER émet une lumière de longueur d'onde de 980 nm ou de 1480 nm (ces deux longueurs d'onde sont les mieux adaptées pour exciter les ions Er au niveau d'énergie supérieur, ce qui permet de réaliser l'inversion de population et de plus les diodes lasers à ces longueurs d'onde sont disponibles), qui sera couplé avec le signal à transmettre à l'aide du multiplexeur, celui-ci doit présenter une perte d'insertion faible aux deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système. Il est nécessaire de placer deux isolateurs. L'un à l'entrée et l'autre à la sortie afin que le dispositif n'engendre pas un effet LASER.

#### **Caractéristiques :**

- ✚ Un gain se situant dans la fourchette 25 à 45 dB.
- ✚ Puissances de saturation allant de 1 à 10 mW (0 à 10 dBm).
- ✚ Le gain diminue avec la puissance d'entrée du signal, alors qu'il augmente avec la puissance de pompe.

✚ Le rendement, défini comme le rapport du gain (dB) à la puissance de pompe injectée dans la fibre (en mW).

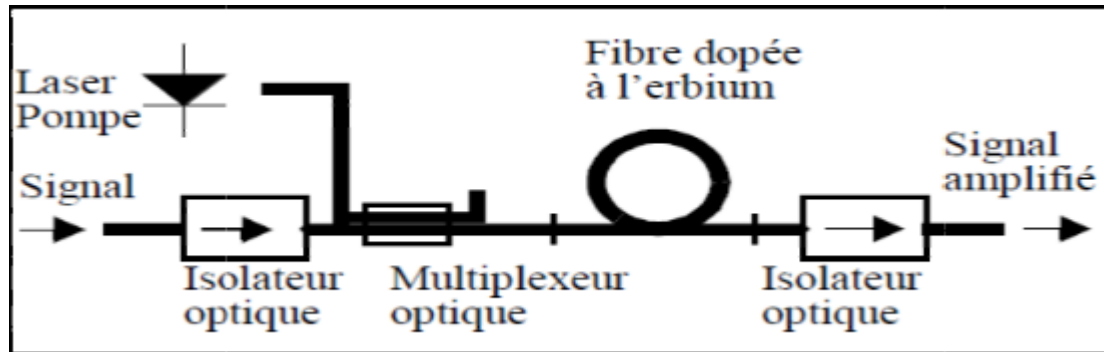


Figure 29 : Amplificateur optique à fibre dopée d'erbium [17].

- **Amplificateur optique à semi-conducteurs :**

**Description :** Ces amplificateurs sont à base des LASER à semi-conducteurs, qui n'ont pas de miroirs aux extrémités, mais ils ont un revêtement antireflet dans le but de diminuer les réflexions de la lumière vers l'intérieur du circuit. De plus ils sont traversés par une lumière fournie par une source externe.

**Fonctionnement :** La lumière incidente entre dans le circuit, elle est amplifiée, puis elle sort par l'autre bout pour être couplée dans la fibre. Idéalement, il n'y a pas de réflexion du signal vers l'amplificateur. Les pertes de couplage du faisceau incident dans l'amplificateur sont très élevées, car le diamètre du faisceau est supérieur à l'épaisseur de la couche active. En plus, le gain de l'amplificateur dépend de la polarisation de la lumière incidente.

**Caractéristiques :**

- ✚ Un gain élevé (jusqu'à 30 dB) selon le semi-conducteur, la longueur d'onde, le courant injecté et la puissance du signal incident.
- ✚ Une puissance de saturation en sortie autour de 5-10 mW.
- ✚ Une bande passante optique, de l'ordre de 5 THz (soit environ 40 nm autour de 1550 nm).
- ✚ Les pertes de couplage du faisceau incident dans l'amplificateur sont élevées, en raison de la supériorité du diamètre du faisceau sur l'épaisseur de la couche active du semi-conducteur.

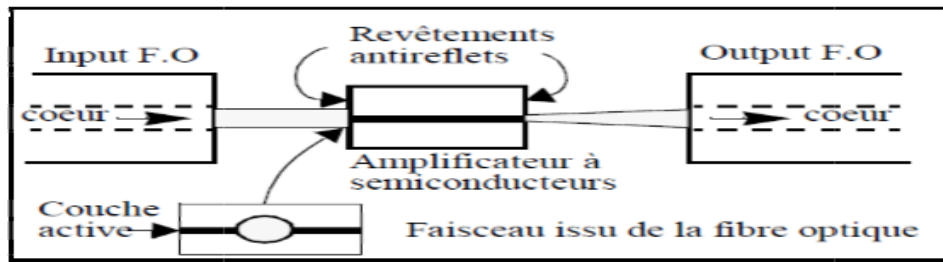


Figure 30 : Amplificateur optique à semi-conducteurs [15].

- **Amplificateur de Raman :**

**Fonctionnement :** Il est basé sur l'utilisation d'un laser émettant un signal de forte puissance dont la direction et la longueur d'onde sont choisies, qui permet de provoquer les transferts d'énergie et conduit à la réalisation d'amplificateurs

**Caractéristiques :**

- ✚ Le gain peut atteindre quelques dizaines de décibels.
- ✚ Une saturation qui s'accompagne d'une forte dégradation du rapport signal sur bruit (l'émission spontanée continuant à être amplifiée) peut apparaître.
- ✚ La limite en puissance est due à la génération d'une onde autre que l'onde signal lors de la diffusion Raman [11], [15], [17].

## 11.2 Le multiplexage

Les fibres optiques possèdent, dans la fenêtre spectrale généralement utilisée, une bande utilisable très importante (environ 15 THz autour de la longueur d'onde 1,55  $\mu\text{m}$ ). Aujourd'hui le nombre et la taille des informations échangées sont de plus en plus importants et pour les transmettre il faut utiliser des canaux à débits extrêmement élevés, qui n'existent pas réellement. C'est pourquoi diverses solutions ont été imaginées pour profiter des capacités de la fibre optique et donc augmenter le transfert d'informations sur le même canal. Dans la plupart des cas, le principe reste identique : utiliser N signaux au débit d'équivalent en termes de capacité.

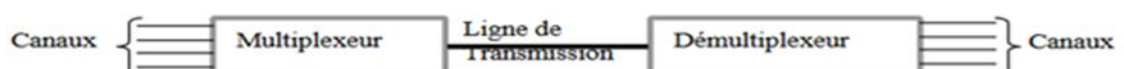


Figure 31 : Technique de multiplexage [15].

### 11.2.1 Type de multiplexage

#### 11.2.1.1 Le multiplexage temporel (TDM) :

Le multiplexage TDM (Time Division Multiplexing, multiplexage à répartition temporelle (MRT)) consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant, ceci à tour de rôle pour chaque utilisateur. L'allocation de cette bande passante se fait en divisant l'axe du temps en périodes de durée fixe, et chaque utilisateur ne va transmettre que pendant une de ces périodes déterminées. Un intervalle de temps fixe (IT) est successivement assigné à une source.



Figure 32 : Répartition des périodes dans le cas de multiplexage TDM [18].

#### 11.2.1.2 Le multiplexage en longueur d'onde (WDM)

**Principe :** Le multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing, WDM), consiste à envoyer dans une seule fibre N porteuses optiques à différentes longueurs d'onde transmettant chacune un débit. Ce n'est plus l'axe du temps qui est découpé en périodes pour chaque utilisateur mais la bande passante qui est découpée en sous-bandes et chaque sous-bande est affectée à une voie. Ainsi plusieurs transmissions peuvent être faites simultanément, chacune sur une bande de fréquences particulières. Ce procédé est encore appelé multiplexage en fréquence (Frequency Division Multiplexing, FDM). L'intérêt premier du WDM est de permettre le transport de débits d'informations très importants sur une même fibre, à destination de plusieurs utilisateurs.

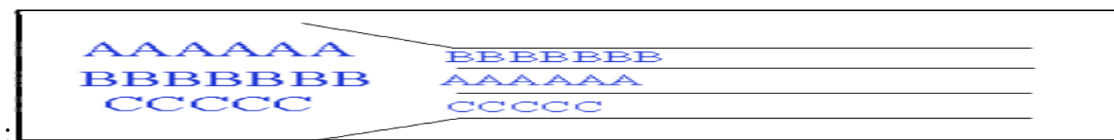


Figure 33 : Répartition des périodes dans le cas de multiplexage WDM [18].

- Le multiplexage en longueur d'onde combiné au multiplexage temporel :

Il est à noter que rien n'empêche à chaque signal de modulation d'une diode laser issu d'une étape de multiplexage temporel dans le domaine électronique, d'être ensuite multiplexé

avec d'autres signaux à d'autres longueurs d'onde. Associer TDM et WDM est d'ailleurs la situation la plus fréquente. Dans ce cas, après démultiplexage optique et photo-détection, une étape de démultiplexage temporel permet la restitution des signaux temporels (bas débit). [15], [18].

## 12 Comparaison entre Wavelength Division Multiplexing et Time Division Multiple Access)

*Tableau 2 : Comparaison entre WDM et TDMA. [19], [20].*

<b>Critère</b>	<b>WDM (Wavelength Division Multiplexing)</b>	<b>TDMA (Time Division Multiple Access)</b>
<b>Principe de fonctionnement</b>	Sépare les données en différentes longueurs d'onde (canaux optiques) transmises simultanément sur la même fibre optique.	Divise le temps en slots et attribue chaque slot à une connexion différente sur le même canal.
<b>Utilisation des ressources</b>	Utilise plusieurs longueurs d'onde pour transmettre plusieurs signaux sur une seule fibre.	Utilise des intervalles de temps pour permettre à plusieurs utilisateurs de partager un même canal de fréquence.
<b>Capacité</b>	Très élevée, car chaque longueur d'onde peut transporter un canal distinct de données.	Limité par le nombre de slots de temps disponibles dans une période donnée.
<b>Efficacité spectrale</b>	Très efficace, permet une grande densité de données par fibre optique.	Moins efficace que WDM, car chaque utilisateur ne peut utiliser qu'un slot de temps à la fois.
<b>Complexité</b>	Nécessite des équipements	Relativement moins complexe,

	optiques sophistiqués (multiplexeurs, démultiplexeurs, lasers).	nécessite une synchronisation précise des slots de temps.
<b>Interférences</b>	Moins sujet aux interférences, chaque canal étant séparé par sa propre longueur d'onde.	Sujet aux interférences inter-symboles si la synchronisation n'est pas précise.
<b>Applications typiques</b>	Réseaux de télécommunications à haute capacité, réseaux métropolitains, réseaux longue distance.	Réseaux cellulaires, satellites de communication, réseaux locaux sans fil.
<b>Coût</b>	Coûts plus élevés en raison des équipements optiques avancés.	Moins coûteux, utilise des équipements électroniques standards.

### 13 Les avantages de la transmission optique

- **Performances de transmission** : très faible atténuation, très grande bande passante, multiplexage possible de plusieurs signaux ; elles permettent aux systèmes d'avoir une portée et une capacité très grandes relativement à celles des câbles conducteurs.
- **Avantage de mise en oeuvre** : très petite taille, grande souplesse, faible poids, appréciables aussi bien en télécommunications que pour le câblage en informatique, aéronautiques, applications industrielles.
  - **Sécurité électrique** : isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive ou sous forte tension.
  - **Sécurité électromagnétique** : la fibre optique n'est pas sensible aux parasites et n'en crée pas elle-même.
  - **Longue durée de vie** : les fibres optiques ont généralement une durée de vie supérieure à 100 ans.

- **Avantage économique** : contrairement à l'idée encore répandue, le coût global d'un système sur fibre optique et de plus en plus souvent inférieur à celui d'un système sur cuivre [21], [22].

## 14 Inconvénients de la transmission à fibre optique

- La distance entre l'émetteur et le récepteur doit rester courte sinon des répéteurs sont nécessaires pour amplifier le signal.
- Les répéteurs doivent être alimentés séparément, soit localement, soit par second câble électrique, soit par un câble mixte optique et électrique.
- Les techniciens des installations doivent protéger leurs yeux. Il est indispensable de porter des verres de protection infrarouge pour travailler de près sur un dispositif en fonctionnement.
- Perte de raccordement entre différents composants optiques du système. Parmi les pertes de raccordement on trouve :
  - ❖ Pertes de couplage à la source : une partie seulement de la puissance émise par la source (laser) sera captée par la fibre à cause de la désadaptation entre eux.
  - ❖ Pertes d'épissure : elle est due à la discontinuité des rayons, une erreur d'espacement, une erreur d'excentricité, une erreur d'alignement angulaire.
- De l'opérateur à un hub situé dans une armoire de rue ou dans la cave de l'immeuble. Ainsi, cette comparaison met en évidence les différentes approches des réseaux à fibre optique [22].

## 15 Conclusion

Dans ce chapitre on a vu une description d'une liaison par fibre optique, les composants d'un émetteur, d'un récepteur et ses caractéristiques, avantages et inconvénients de la fibre optique ainsi que techniques de multiplexage et les amplificateurs optiques.

Pour conclure, on peut dire que la fibre optique représente assurément le meilleur moyen actuel pour transporter de très hauts débits d'informations numériques, et les besoins dans ce domaine vont probablement augmenter très fortement dans un avenir proche.

De nouvelles architectures sont mises en œuvre tel que l'architecture optique passive PON (Passive Optical Network) qu'on va l'étudier dans le chapitre suivant.

# **Chapitre II : Réseaux Optiques Passifs (PON).**

## 1 Introduction

Dans un monde où la demande en bande passante ne cesse de croître de manière exponentielle, les réseaux optiques passifs émergent comme des solutions cruciales pour répondre aux besoins croissants de connectivité. Ces réseaux, reposant sur la transmission de données à travers des fibres optiques sans nécessiter de composants actifs tels que des amplificateurs ou des commutateurs, offrent une efficacité et une fiabilité remarquables. Ce chapitre explore en profondeur le fonctionnement, les avantages et les applications des réseaux optiques passifs, mettant en lumière leur rôle essentiel dans l'infrastructure de communication moderne.

## 2 Les réseaux optiques passifs PON (Passive Optical Network)

PON, ou réseau optique passif (en anglais, Passive Optical Network), est une technologie de télécommunication qui utilise des fibres optiques pour fournir des services tels que l'internet à haut débit, la télévision et la téléphonie à des utilisateurs finaux. La caractéristique principale de PON est l'utilisation de composants passifs (sans alimentation électrique) dans le réseau de distribution, ce qui permet de réduire les coûts et d'améliorer la fiabilité [23].

Les réseaux PON ont fait l'objet de procédures de normalisation au niveau international par les principaux organismes de normalisation : l'ITU (International Télécommunication Union), le FSAN (Full Service Access Network) et l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

## 3 Architecture d'un réseau optique passif (PON)

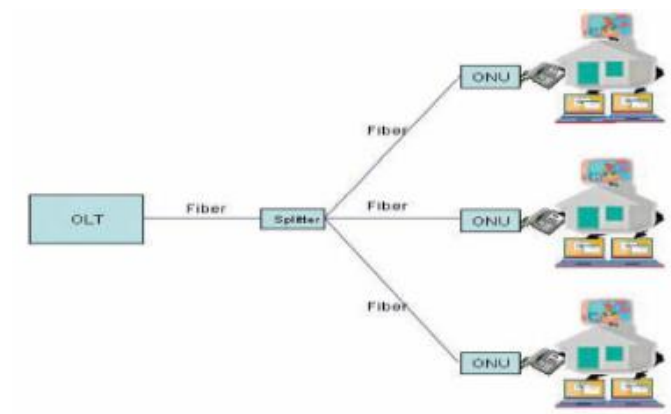
Un réseau PON comporte un nœud de distribution central, sur lequel sont connectées des sources multiples de services (vidéo, Internet et téléphonie classique). Ce nœud, localisé au NA (nœud d'accès), est lui-même interconnecté, via la fibre optique, aux utilisateurs.

### 3.1 Principaux éléments constitutifs du PON

**Au niveau du central**, un équipement actif, qui envoie et reçoit les signaux lumineux porteurs des données. Cet équipement est appelé communément OLT pour « Optical Line Termination » ou « Terminaison de Ligne Optique ».

**Au niveau d'abonné**, un équipement actif qui assure la connexion du réseau sur les interfaces spécifiques de ce dernier (RJ45 cuivre pour le PC sur Internet, connecteur coaxial pour la télévision, RJ11 cuivre pour le téléphone analogique, ...). Cet équipement est appelé communément ONU ou ONT pour « Optical Network Unit », « Optical Network Terminal » ou « Terminaison de Réseau Optique ».

**Des composants passifs**, installés sur le cheminement de la fibre optique entre l'OLT et les ONU. Ils ont pour rôle de partager le signal optique pour la voie dite descendante (de l'OLT vers les ONU) et de recomposer le signal à partir des multiples signaux remontants dans l'autre sens (des ONU vers l'OLT). Ces équipements sont appelés communément « splitter » [24].



*Figure 34 : Architecture d'un réseau optique passif [24].*

### 3.2 Principe de fonctionnement d'un réseau PON

#### 3.2.1 La voie descendante

Dans le sens descendant, une longueur d'onde porteuse de 1,49 ou 1,55  $\mu\text{m}$  est utilisée pour transmettre toutes les données aux différents utilisateurs. Le choix de cette longueur d'onde est motivé par sa capacité à offrir un débit plus élevé et à optimiser le budget en puissance.

Les données émises par l'OLT sont marquées en fonction de leur destinataire. Tous les ONU reçoivent l'ensemble des données, mais seul l'ONU concerné les transmet dans le réseau

interne de l'abonné. Le débit instantané du PON est réparti entre tous les abonnés qui reçoivent des données [25].

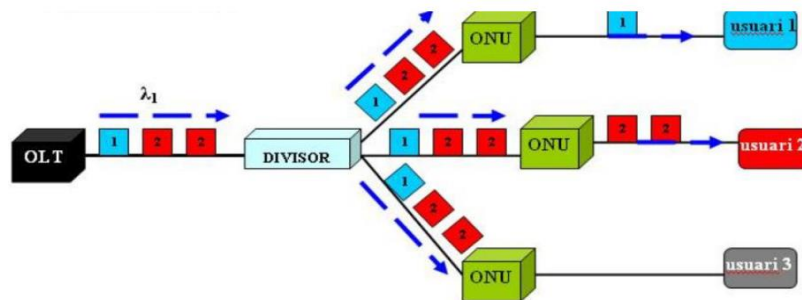


Figure 35 : Architecture de la voie descendante [25].

### 3.2.2 La voie montante

Dans le sens montant, la transmission des données est réalisée grâce à un multiplexage temporel au niveau d'un coupleur passif. Les ONU émettent tous à la même longueur d'onde (1,31  $\mu\text{m}$ ) en utilisant des débits moins élevés et des équipements moins onéreux tels que les lasers Fabry-Pérot.

Si les signaux émis par deux ONU parvenaient simultanément au coupleur, ils seraient combinés en un mélange indistinct, rendant la réception par l'OLT impossible.

Le multiplexeur attribue tour à tour à chaque ONU un intervalle de temps, généralement de quelques microsecondes, pendant lequel cet ONU est autorisé à émettre. Cette méthode est mise en place pour éviter les collisions entre les données provenant de ces différents secteurs. De plus, elle facilite la récupération et la synchronisation rapides de l'horloge avec les données provenant d'utilisateurs situés à différentes distances [25].

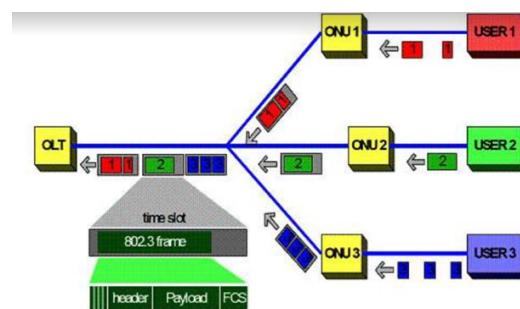


Figure 36 : Architecture de la voie montante [25].

### 3.3 Architecture PON unidirectionnelle

L'architecture PON unidirectionnelle est essentiellement composée d'un émetteur OLT (Optical Line Terminal), coupleurs optiques généralement passifs et ONT (Optical Network Terminaison), ONUs (Optical Network Unit) et chaque ONU reçoit seulement les données qui lui sont destinées autrement, chaque client a un intervalle de temps bien précis pour émettre afin de ne pas interférer avec un autre client. La Figure 37 illustre une liaison unidirectionnelle ou une fibre est dédiée dans le sens montant et une autre dans le sens descendant [24].

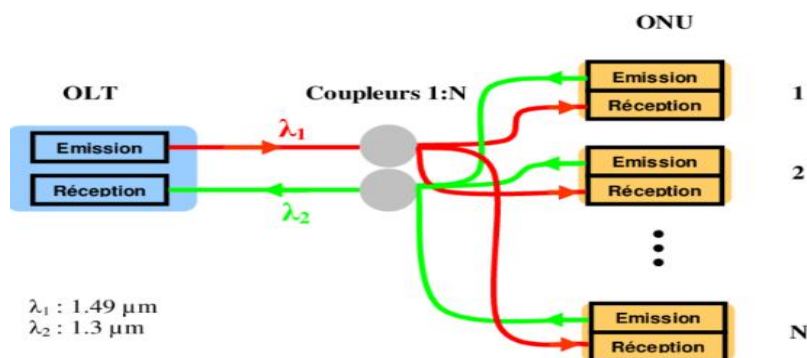


Figure 37 : Architecture unidirectionnelle [24].

### 3.4 Architecture PON bidirectionnelle

Elle est utilisée afin de simplifier le réseau, économiser la fibre et limiter les points de raccordement et qui nécessite donc un multiplexeur en longueur d'onde généralement intégré aux modules d'émission et de réception [24].

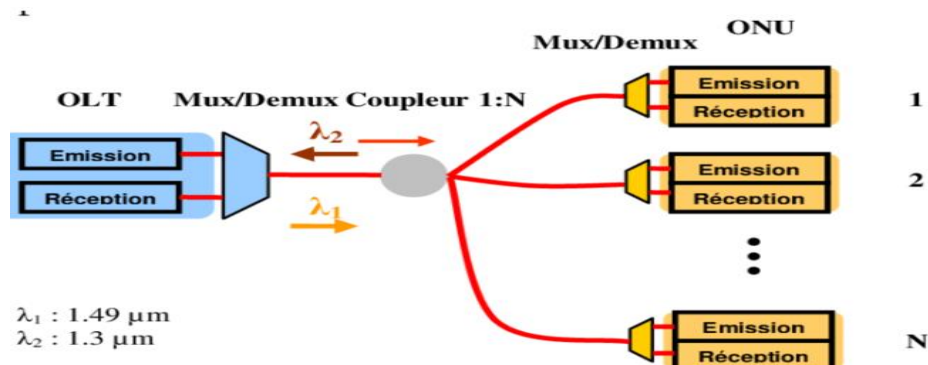


Figure 38 : Architecture PON bidirectionnelle [24].

## 4 Les types de réseaux optiques passifs

Les premiers réseaux 1G utilisaient principalement des connexions point à point, avec une utilisation de la fibre multimode par abonné dans une architecture en étoile. Bien que l'architecture P2P ait été utilisée dans certains projets, les opérateurs préféraient généralement le réseau optique passif. Les débits et protocoles des réseaux optiques passifs sont dérivés des réseaux existants, et actuellement, on trouve trois types de protocoles couramment utilisés :

### 4.1 Broadband PON (BPON)

C'est à dire PON à large bande, il utilise l'ATM (Asynchronous Transfer Mode) comme protocole de communication, largement employé dans les réseaux téléphoniques et les systèmes de transport de données. Les signaux numériques BPON ont des débits ATM de 155, 622 et 1244 Mb/s. Bien que largement déployée aux Etats-Unis, cette technologie est de moins en moins utilisée [17].

### 4.2 Ethernet PON (EPON)

S'inspirant de la norme IEEE pour Ethernet in the First Mile, l'EPON repose sur l'utilisation de trames, de protocoles d'accès et d'interfaces ETHERNET à 1 ou 10Gbit/s partagés de manière dynamique. Ce type de réseau est largement utilisé en Corée et au Japon. Bien que son architecture système soit similaire à celle du GPON, les protocoles de données utilisés sont différents [17], [15].

### 4.3 Gigabit PON (GPON)

Cette technologie repose sur les normes IEEE et elle est standardisée par l'UIT-T G.984. Elle permet d'atteindre des débits allant jusqu'à 2,5 Gbit/s en aval et en amont, avec une portée maximale théorique de 60 km et réelle de 20 km. Le GPON utilise un protocole IP et un codage ATM ou GEM (Gestionnaire d'Équipements Mobiles) pour encapsuler les données [9].

#### 4.3.1 Les principales caractéristiques de la norme GPON :

- Offre une couverture physique étendue de 20 km minimum, tout en prenant en charge une portée logique pouvant aller jusqu'à 60 km.
- GPON permet la fourniture de services triple play et propose plusieurs options de débit de données utilisant un protocole commun.

- Assure une gestion complète des services de bout en bout avec des capacités efficaces en exploitation, administration, maintenance et fourniture.

- GPON identifie 7 combinaisons de vitesses de transmission comme suit :

0.15552 Gbit/s up, 1.24416 Gbit/s down

0.62208 Gbit/s up, 1.24416 Gbit/s down

1.24416 Gbit/s up, 1.24416 Gbit/s down

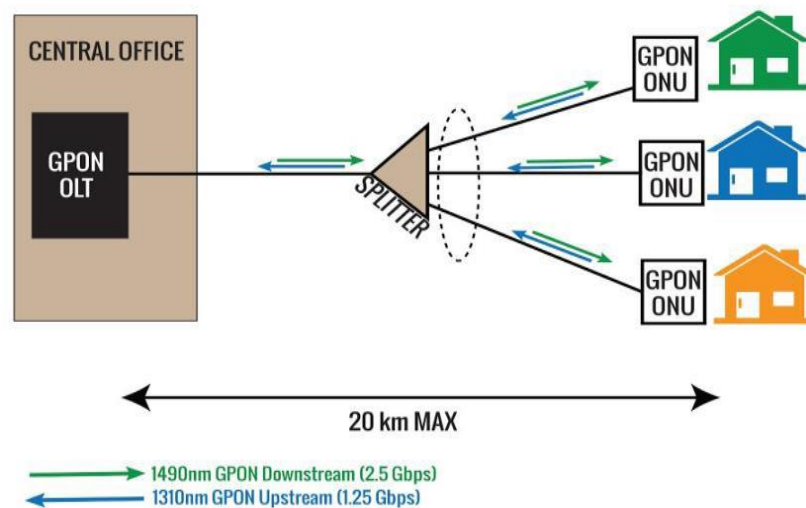
0.15552 Gbit/s up, 2.48832 Gbit/s down

0.62208 Gbit/s up, 2.48832 Gbit/s down

1.24416 Gbit/s up, 2.48832 Gbit/s down

2.48832 Gbit/s up, 2.48832 Gbit/s down

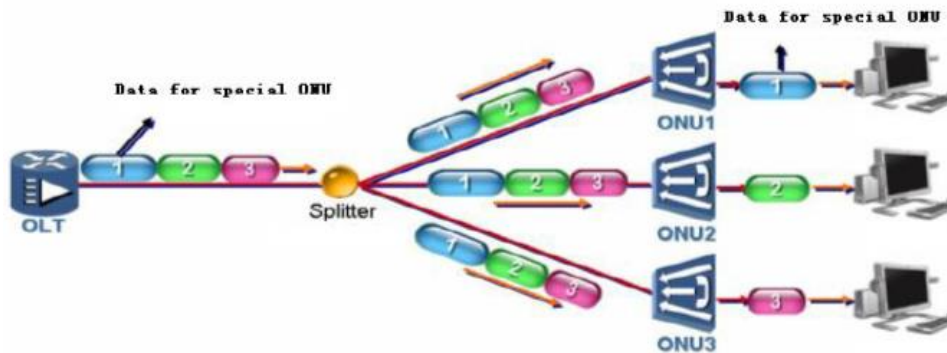
- Parmi eux, 1.24416 Gbit / s en up, 2.48832 Gbit / s en down est le courant dominant combinaison de vitesse prise en charge à l'heure actuelle.



**Figure 39 : Architecture GPON.**

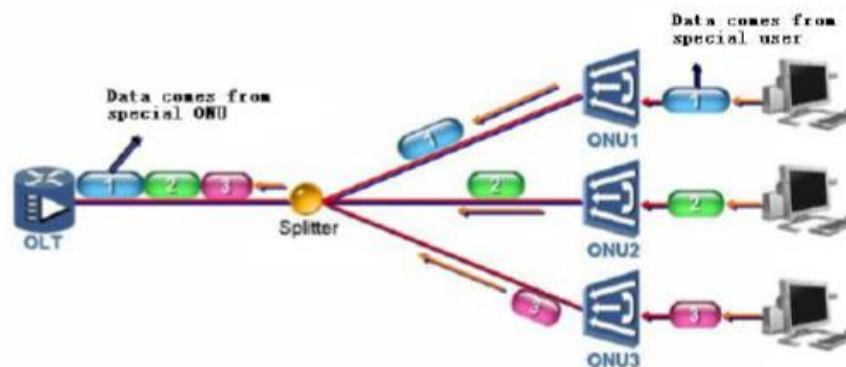
- Sens descendant (de l'OLT vers l'ONT) : Le partage des ressources dans le sens descendant en mode diffusion Chaque client reçoit toutes les informations mais n'est autorisé à recevoir que les données qui lui sont destinés. La bande passante attribuée à chaque utilisateur peut être statique ou variable les données sont au débit de 2,5 Gbits/s.

La **Figure 40** présente la transmission dans le sens descendant :



*Figure 40: Transmission data de l'OLT vers l'ONT en mode broadcast.*

- Sens montant (de l'ONT vers l'OLT) : Le partage des ressources dans le sens montant s'effectue par le TDMA (Time Division Multiple Access). Chaque client dispose d'un intervalle de temps bien précis pour émettre afin de ne pas interférer avec un autre client les données sont au débit de 1,25 Gbits/s.



*Figure 41 : Transmission data de l'ONT vers l'OLT en mode TDMA.*

### 4.3.2 Transmission GPON

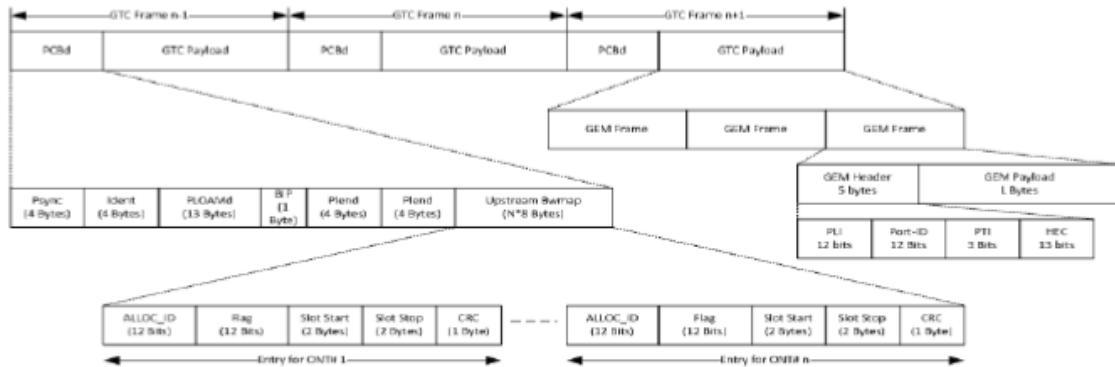
Le protocole de contrôle d'accès au support (MAC) de la couche de contrôle est indispensable pour orchestrer le flux de trafic, assurant ainsi l'évitement des collisions entre les données provenant de différentes ONU (Unités de Réseau Optique). GEM (Encapsulation des Multiplexages Généraux) est une méthode qui enveloppe les données sur les réseaux GPON, offrant une communication orientée connexion basée sur une version légèrement adaptée de la procédure de tramage générique recommandée par l'UIT-T G.7041.

**4.3.2.1 Transmission dans le sens descendant :**

En direction descendante, l'OLT combine les trames GEM sur le support de transmission en utilisant l'ID de port GEM comme référence pour distinguer les trames GEM associées à différentes connexions logiques en aval. Chaque ONU sélectionne les trames GEM en aval en se basant sur leurs ID de port GEM respectifs, ne traitant que celles qui lui sont attribuées.

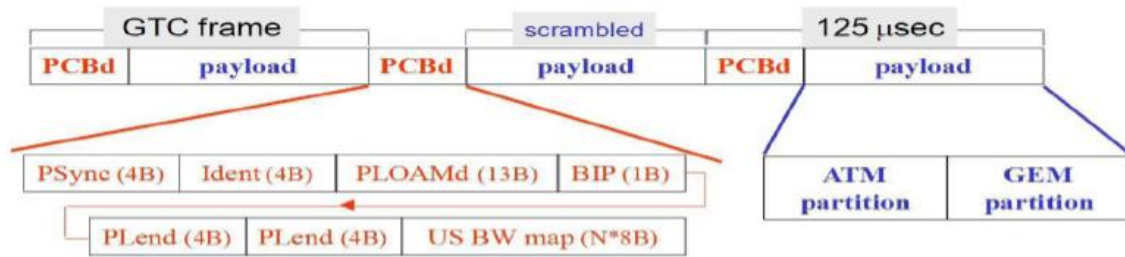
**4.3.2.2 Format de trame GPON dans le sens descendant :**

Les données en aval incorporent des données de cartographie à travers la convergence de transmission GPON (GTC). La Figure 42 illustre le format de la trame GTC en aval. Les trames GPON varient en taille en fonction de la quantité d'octets et du débit de transmission ; plus le débit est élevé, plus la trame est grande.



**Figure 42 : Le format de trame GPON dans le sens descendant.**

Le flux descendant est diffusé de l'OLT vers toutes les ONU selon une méthode TDM. Chaque ONU doit uniquement traiter les trames destinées au chiffrement. La trame descendante se compose d'une section d'en-tête appelée PCBd (bloc de commande physique en aval), dont la longueur est la même pour les deux vitesses et dépend du nombre de structures d'allocation par trame. La section de charge utile contient les données réelles à transférer et se divise en une partition ATM et une partition GEM. La trame descendante fournit une référence de temps commune pour le PON et une signalisation de commande commune pour l'amont. Même en l'absence de données à envoyer, la trame descendante est toujours transmise et utilisée pour la synchronisation horaire. La structure de la trame GPON descendante est illustrée dans la figure (10), mesurant 125 microsecondes de long pour un total de 38880 octets.



*Figure 43 : La structure de trame dans le sens descendant.*

### 4.3.3 Sécurité de GPON

Les données descendantes sont diffusées à toutes les ONU, chacune se voyant allouer un créneau temporel lors duquel les données lui sont destinées. Par conséquent, un individu malveillant pourrait reprogrammer son propre ONU et intercepter toutes les données descendantes appartenant à toutes les ONU connectées à cette OLT.

En amont, GPON utilise une connexion point à point pour sécuriser tout le trafic contre l'interception. Ainsi, les informations confidentielles en amont, telles que la clé de sécurité, peuvent être envoyées en texte clair.

La recommandation GPON G.984.3 décrit l'utilisation d'un mécanisme de sécurité des informations pour garantir que seuls les utilisateurs autorisés puissent accéder aux données qui leur sont destinées. L'algorithme de chiffrement utilisé est le standard de chiffrement avancé (AES), qui accepte des clés de 128, 192 et 256 bits, rendant le chiffrement extrêmement difficile à compromettre. Les clés peuvent être modifiées périodiquement sans perturber le flux d'informations pour renforcer la sécurité [26].

### 4.3.4 Protection de GPON

L'architecture de protection de GPON est reconnue pour améliorer la fiabilité des réseaux d'accès. Cependant, sa mise en œuvre est souvent considérée comme facultative, car elle dépend de la faisabilité économique des systèmes. Deux types de commutation de protection sont disponibles : la commutation automatique, qui est déclenchée par la détection de défauts tels que la perte de signal, la perte de trame ou la dégradation du signal ; et la commutation forcée, activée par des événements administratifs tels que le réacheminement ou le remplacement des fibres [26].

### 4.3.5 Avantages et inconvénients d'un réseau GPON

#### Avantages :

- Un OLT a la capacité de servir au moins 64 clients.
- L'architecture est favorable à la diffusion, notamment pour la diffusion TV.
- Le réseau GPON utilise peu de fibres.
- Des améliorations ont été apportées au génie civil, ce qui se traduit par des coûts réduits.

#### Inconvénients :

- La portée est réduite en raison des limitations de coût optique imposées par le coupleur.
- Le débit est partagé et limité par la capacité de la fibre commune.
- La synchronisation est un défi, en particulier dans la direction ascendante.

## 5 Comparatif des différents standards d'un réseau PON

Tableau 3 : Comparatif des différents standards d'un réseau PON [27].

	<b>BPON</b>	<b>GPON</b>	<b>EPON</b>
<b>Standard</b>	ITU G983	ITU G984	IEEE 802.3 ah
<b>Débit des données (Mb/s)</b>	Descendant : 1244, 622, 155 Montant : 622, 155	Descendant : 2488, 1244, Montant : 2488, 1244, 622, 155	Descendant : 1250 Montant : 1250
<b>Modes de trafic</b>	ATM	GEM (ATM, Ethernet, TDM,)	Ethernet
<b>Nombre de clients</b>	64 max	128 max	32 max
<b>Distance « logique »</b>	20 km	60 km max, 20 km différentiel	10 km, 20 km

<b>Longueur d'onde</b>	Descendant : Voix et données 1490 nm	Descendant : Voix et données 1490 nm	Descendant : Voix et données 1490 nm
	Vidéo Numérique 1550 nm	Vidéo Numérique 1550 nm	Vidéo Numérique 1550 nm
	Montant : 1310 nm	Montant : 1310 nm	Montant : 1310 nm
<b>Budget optique</b>	15/20/25 dB	15/20/25/28 dB	15/20 dB

## 6 La sécurité et la fiabilité d'un réseau passif

### 6.1 La fiabilité du PON

L'ITU a utilisé le principe de la redondance des réseaux pour assurer la fiabilité du PON, en cas de panne d'un lien il bascule sur le lien secondaire. Pour les raccordements sensibles l'accès est dupliqué.

Le dysfonctionnement du réseau PON peut être repéré au niveau des ONU qui, pour une raison quelconque commence à émettre de la lumière en continu et perturbe les OLT, empêchant ainsi de localiser l'ONU défaillant [23].

### 6.2 La sécurité du PON

Le réseau PON met en place des mécanismes afin que l'abonné ne puisse lire les données qui lui sont adressées, Le réseau PON offre un mode de fonctionnement sécurisé en ce qui concerne la confidentialité des données. Le mécanisme de sécurisation utilisé est le suivant [23]:

- Le trafic remontant est émis en utilisant une couleur optique de 1310 nm. Les modems client n'ont aucun moyen de détecter ce signal optique et par conséquent de lire le trafic remontant des autres clients. La sécurité et la fiabilité d'un réseau passif.
- Le trafic descendant est crypté. Il utilise l'algorithme standardisé AES à 128 bits où chaque équipement client a sa propre clé de cryptage/décryptage privée. Ces clés sont automatiquement échangées par l'OLT et l'ONU à des intervalles réguliers.
- Les mécanismes d'authentification des ONT permettent de refuser la connexion pirate d'un nouvel ONT sur le réseau.

## 7 Avantages et Limites du Réseau Optique Passif

De toute évidence, l'avantage le plus important du réseau PON est l'élimination des dispositifs actifs extérieurs toutes les fonctions de traitement des signaux sont réalisées dans les commutateurs et l'équipement des locaux de l'utilisateur. Toutefois, l'adoption d'un réseau optique passif présente encore quelques inconvénients.

### 7.1 Avantages du PON

- Utilisation efficace de l'énergie : le réseau d'accès n'a pas besoin d'être alimenté. L'alimentation n'est nécessaire qu'à la source et à la réception.
- Mise en œuvre simple : pas besoin d'armoires de câblage, d'infrastructure de refroidissement ou d'électronique d'espace intermédiaire.
- Maintenance pratique : il est assez facile d'identifier les défaillances causées par les composants passifs et actifs du PON, ce qui facilite la maintenance et le dépannage.
- Plus facile pour les mises à niveau : en cas de besoin de mise à niveau, seuls les dispositifs d'extrémité (OLT, ONT/ONU) doivent être mis à niveau ou remplacés, tandis que la fibre optique et le répartiteur restent inchangés.
- Des budgets moins élevés : d'une part, le coût des éléments passifs eux-mêmes est bien inférieur à celui des éléments actifs. D'autre part, le réseau PON a largement réduit le coût d'installation des éléments actifs [28].

### 7.2 Limitations du PON

- Distance de transmission limitée : la portée du PON est limitée à 20 à 40 km, alors qu'un réseau optique actif peut atteindre jusqu'à 100 km.
- Risques potentiels de panne : la ligne d'alimentation et l'OLT desservent plusieurs utilisateurs finaux, qui peuvent être jusqu'à 128 dans l'architecture P2MP. Avec peu de redondance, une coupure accidentelle de la fibre ou un OLT défectueux sont possibles [28].

## 8 Les différentes architectures FTTX

On distingue les techniques FTTx (Fiber To The x) qui consistent à amener la fibre optique au plus près de l'utilisateur afin d'augmenter la qualité de service en particulier de débit.



## 8.1 Fiber To The Building (FTTB)

La transmission optique est localisée soit au pied de l'immeuble ou soit dans une armoire. Elle est généralement partagée entre plusieurs abonnés qui lui sont raccordés par des liaisons en fil de cuivre.

## 8.2 Fiber To The Cabinet (FTTCab) / Fiber To The Curb (FTTC)

Fibre au niveau du trottoir, ou de la rue, la fibre va au plusieurs maisons. Dans le cas où la fibre arrive jusqu'au trottoir, on appelle cette configuration Fiber to the Curb (FTTC). D'autre part, si elle arrive jusqu'au sous répartiteur, on appelle cette configuration Fiber to the Cabinet (FTTCab). FTTC à presque la même signification technique que FTTN, cependant la zone desservie en FTTN est généralement plus large que celle desservie en FTTC.

## 8.3 Fiber To The Office (FTTH)

Fiber to the home, ce qui signifie littéralement en français « Fiber jusqu'au foyer ». Il s'agit d'une technologie qui apporte de la fibre optique jusque chez l'abonnée permettent l'accès à internet et aux services associés à des débits de 10 Mbit/s à 1 G bit /s symétrique, soit des débits très supérieurs à ceux accessibles via la paire de cuivre téléphonique.

## 8.4 Architecture des réseaux FTTH

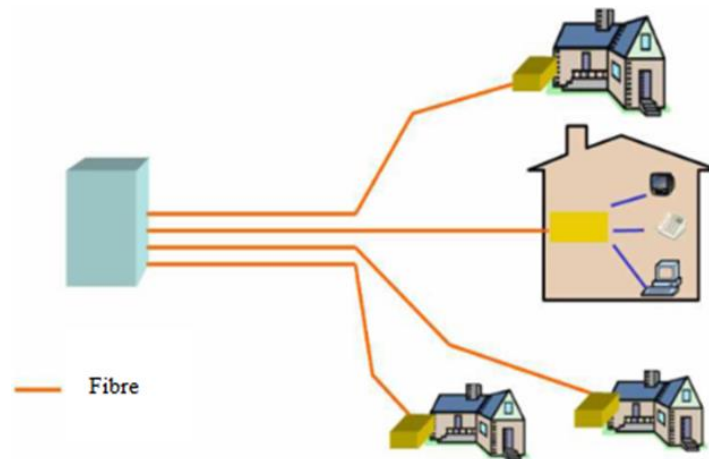
On distingue deux principaux types d'architecture de communications FTTH :

- L'architecture Ethernet point-à-point (P2P).
- L'architecture Point à Multipoint PON (Passive Optical Network).

### 8.4.1 Architecture Ethernet point-à-point

Le standard Ethernet, également connu sous le nom de norme IEEE 802.3, est une technologie de réseau local où tous les utilisateurs sont connectés à une même ligne de transmission. Dans le déploiement de la fibre optique, celle-ci est étendue de manière intégrale, depuis les locaux de l'opérateur (OLT - Optical Line Termination) ou depuis un nœud de son réseau (NRO - nœud de raccordement optique), jusqu'aux domiciles des abonnés. Cependant, pour les opérateurs, un inconvénient majeur réside dans le fait que chaque fibre est dédiée à un abonné, ce qui signifie qu'il faut autant de fibres que d'abonnés, posant un problème lorsque l'espace dans les fourreaux ou les NRO existants est limité. Un NRO peut en effet supporter plus

de 10 000 lignes. Bien qu'il existe différents protocoles pour le transport des données, Ethernet est souvent privilégié, offrant des débits allant jusqu'à 10 Gb/s selon le standard IEEE 802.3ah. Toutefois, sur le plan commercial, les débits sont généralement limités à des valeurs inférieures, telles que 100 Mb/s symétriques [30] [31].



*Figure 45 : Architecture P2P [30].*

#### **8.4.1.1 Les avantages point à point**

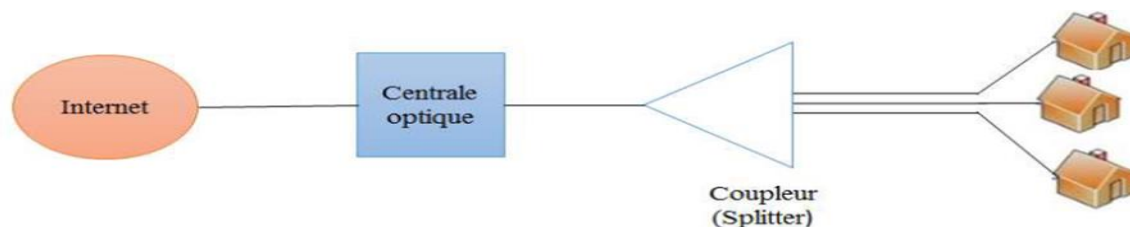
- Solution universelle adaptée aux clients résidentiels et aux entreprises
- Budget optique optimal puisque pas de composants optiques entre l'OLT et l'ONT.
- La sécurité des données est garantie puisqu'une ou deux fibres sont dédiées à chaque client.
- La gestion du réseau est très simplifiée.
- Bande passante illimitée.
- Plus économique dans des secteurs d'abonné de faible densité.
- Une plus grande flexibilité de service.

#### **8.4.1.2 Les inconvénients point à point**

- Gestion de la fibre au niveau de la centrale (la gestion TxRx).
- Pas de mutualisation de la fibre.
- Encombrement à l'intérieur du central dû au grand nombre de transcrives.
- Pas de partage de l'OLT ou de port optique, beaucoup de fibres à déployer (pas très économique).

### 8.4.2 Architecture point-multipoint (P2M) ou PON (Passive Optical Network)

Un réseau point-à-multipoint (P2M), également connu sous le nom de PON (Passive Optical Network ou Réseau Optique Passif), tire son appellation du terme "passif" attribué au splitter, dépourvu de tout élément électronique. Dans cette architecture, une seule fibre part du central optique et dessert plusieurs habitations, grâce à un équipement passif tel qu'un coupleur ou un splitter, placé à proximité de la zone à desservir. Chaque site reçoit l'ensemble des informations transmises par l'équipement central OLT (Optical Line Terminal) via cette fibre, lesquelles sont ensuite reçues par l'équipement récepteur ONT (Optical Network Termination) de chaque abonné. Ces équipements assurent la fonction de filtrage, permettant à chaque ONT et OLT de n'exploiter que les données concernant l'abonné qui y est raccordé [24].



*Figure 46 : Architecture P2M [24].*

#### 8.4.2.1 Les avantages de point-multipoint

- Aucun élément électronique actif dans le réseau d'accès, c'est la structure passive.
- Réduit des dépenses capitales et des coûts d'exploitation associés.
- Les frais bas d'entretien de ces composants optiques passifs réduiront de manière significative du coût de mises à niveau et de dépenses de fonctionnement.
- Permet des économies sur la quantité de fibres à poser, et donc sur le dimensionnement des infrastructures d'accueil.
- Architecture favorable à la diffusion.
- Flexibilité dans l'allocation de la bande passante.

#### 8.4.3 Les inconvénients de point-multipoint

- Pas d'interopérabilité avec d'autres réseaux.
- Bande passante partagée et limitée.
- Sécurité des données nécessaire

**Tableau 4: Comparaison entre P2P et P2M [24].**

<b>Paramètre</b>	<b>Point à Point</b>	<b>Point à multipoint</b>
<b>Gestion de chiffrement</b>	Pas nécessaire	Requise
<b>Gestion de la bande Passante</b>	Bande passante non partagée sur le réseau d'accès	Allocation dynamique de la bande en fonction des besoins des Utilisateurs
<b>Zone de desserte</b>	L'habitat dispersé et pour les lignes spécialisées	Le résidentiels et pour les zones forte densité
<b>Distance (kms)</b>	15	20
<b>Fibre</b>	1 fibre par abonné de bout en bout	1 fibre par abonné en partie distribution et raccordement, 1 fibre pour n abonnés dans la partie transport
<b>Energie</b>	2 watt / abonné Dissipé au NA	0,6 watt / abonné Dissipé au NA
<b>Débit garanti</b>	100Mbit/s ou 1Gbit/s symétriques selon connexion	Jusqu'à 78Mbit/s descendants en split de 32
<b>Débit maximum</b>	100Mbit/s ou 1Gbit/s symétriques selon connexion	Jusqu'à 2,5Gbit/s en descendant et 1Gbit/s en montant
<b>Dégroupage</b>	Actif et passif au NF	Actif et passif au NF
<b>Equipement Actif dans le réseau de desserte</b>	Non	Non
<b>Place occupée</b>	1U pour 24 à 48abonnées	4U pour 512 à 2304 abonnés

## 9 Applications PON

Le PON, abréviation de Réseau Optique Passif, est souvent décrit comme le lien final entre le fournisseur de services et l'utilisateur, ou entre la fibre optique et divers points d'extrémité comme le domicile (FTTH), le bâtiment (FTTB), les locaux d'entreprise (FTTP), ou d'autres emplacements, selon la destination finale de la fibre optique. Initialement conçu principalement pour les réseaux de fibre jusqu'à l'abonné (FTTH), le PON a trouvé une large application dans les environnements domestiques pour Internet, la téléphonie et la télévision grâce à son infrastructure de câblage simple sans équipements actifs. Avec les avancées technologiques, le champ d'application du PON s'est élargi.

L'évolution vers la 5G a ouvert de nouvelles perspectives pour les réseaux PON, notamment dans le domaine du fronthaul 5G, qui connecte le processeur de bande passante à la tête radio distante des antennes-relais. En raison des exigences élevées en bande passante et en faible latence imposées par la 5G, l'utilisation des réseaux PON pour le fronthaul permet de réduire le nombre de fibres optiques nécessaires tout en améliorant l'efficacité sans compromettre les performances.

Dans le cadre de l'Accord multi-sources 25GS-PON, les principaux opérateurs et fournisseurs de services 5G collaborent pour fournir un service symétrique de 25 Gbit/s répondant aux exigences de haut débit des réseaux 5G, en distribuant les signaux des unités de bande de base vers plusieurs têtes radio distantes.

Outre les applications traditionnelles comme les réseaux résidentiels et commerciaux, les réseaux optiques passifs trouvent également des applications dans des environnements tels que les campus universitaires et les complexes d'entreprises. Les réseaux PON offrent des avantages significatifs en termes de débit, de consommation énergétique, de fiabilité et de distance d'accès pour ces environnements. En réduisant les coûts d'installation, de déploiement et de maintenance le PON permet d'intégrer des fonctionnalités telles que la gestion des bâtiments, la sécurité et les services de stationnement pour les campus universitaires, ainsi que pour les complexes d'entreprises de taille moyenne à grande, ce qui a un impact positif direct sur leurs résultats financiers [28].

## 10 Conclusion

Ce chapitre met en évidence l'intérêt des réseaux optiques passifs (PON). Nous avons présenté des techniques qui consistent à amener la fibre optique jusque chez l'abonné telle que FTTH.

On suite nous avons cité les différentes topologies utilisées pour ce déploiement : point à point et point à multipoint passif, on a vu aussi les différents standards de réseau PON : APON, BPON, EPON, GPON auquel nous sommes intéressés.

**Chapitre III : Etude des  
performances des réseaux  
FTTH-GPON**

## 1 Introduction

Notre travail consiste à étudier et simuler le réseau GPON-FTTH à l'aide du logiciel OptiSystem. Ce logiciel est un outil de simulation pour les systèmes de communication optique. Dans un premier temps, nous présenterons le logiciel OptiSystem, suivi d'une analyse des performances des réseaux GPON-FTTH en utilisant les techniques de TDMA et de WDM.

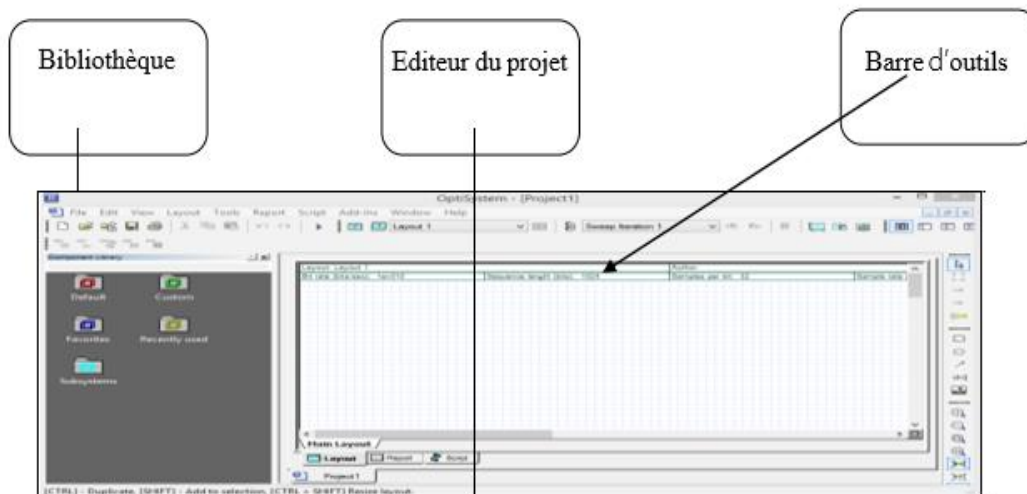
## 2 Description du logiciel OptiSystem

L'OptiSystem est une application complète pour établir des simulations et des tests de montages optiques. En effet, il contient une bibliothèque très riche de composants, tels que les fibres, des appareillages de mesures paramétrables, étude interface d'utilisateur graphique complète. Il contient aussi une fenêtre principale répartit en plusieurs parties :

**Bibliothèque** : une base de données de divers composants.

**Editeur du Layout** : elle permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception.

**Projet en cours** : il permet la visualisation des divers fichiers et composants correspondant au projet en cours [32].



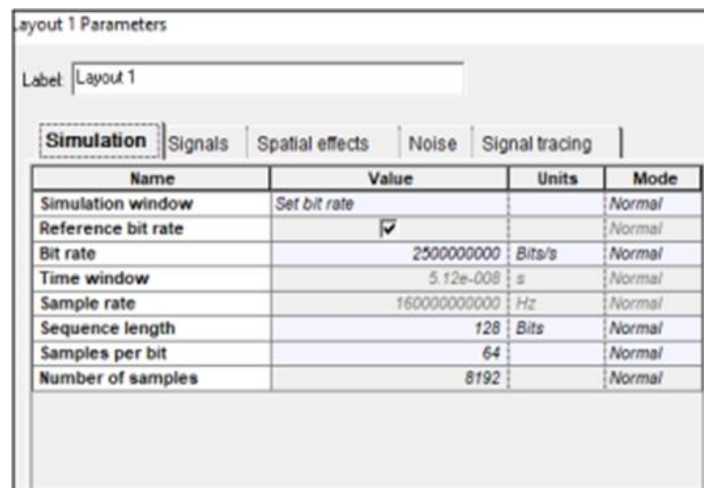
*Figure 47 : Interface logiciel OptiSystem.*

### 3 Les applications de l'OptiSystem

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

- La conception du système de communication optique du composant au niveau de la couche physique.
- La conception des réseaux TDM/WDM et optiques passifs (PON).
- La conception d'anneau SONET/SDH.
- La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur [32].

Les différents paramètres utilisés pour la simulation d'un réseau FTTH-GPON sont présentés à la **Figure 48** :



Name	Value	Units	Mode
Simulation window	Set bit rate		Normal
Reference bit rate	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
Bit rate	2500000000	Bits/s	Normal
Time window	5.12e-008	s	Normal
Sample rate	160000000000	Hz	Normal
Sequence length	128	Bits	Normal
Samples per bit	64		Normal
Number of samples	8192		Normal

*Figure 48 : Une fenêtre de logiciel OptiSystem pour les paramètres de l'éditeur du projet.*

### 4 Avantages du logiciel OptiSystem

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

## 5 Paramètres de qualité d'une liaison optique

Pour mesurer la qualité de transmission optique et évaluer le bon fonctionnement d'un système, il existe plusieurs éléments tel que : le diagramme de l'œil, le facteur de qualité (Q), et le taux d'erreur binaire (BER).

### 5.1 Le diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil représente la superposition synchrone de tous les symboles binaires de la séquence transmise pour estimer la qualité d'une manière visuelle [33].

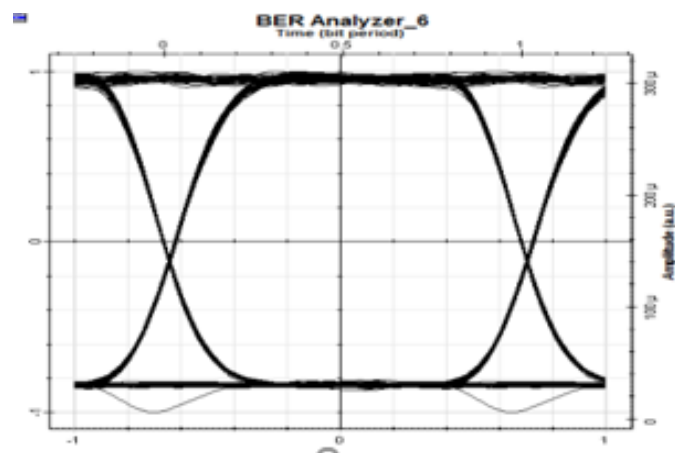


Figure 49 : Diagramme de l'œil.

Ce diagramme est caractérisé par :

L'élargissement temporel des impulsions du signal dû à la dispersion chromatique par les interfaces entre les symboles.

### 5.2 Le facteur de qualité en amplitude ou facteur Q

Le facteur de qualité d'un système est une mesure sans unité qui représente la perte d'énergie du signal en prenant les valeurs maximales pour avoir une perte d'énergie petite, la relation entre le facteur de qualité et la bande passante est une relation proportionnelle plus le facteur est élevé plus la bande passante est petite, dans notre domaine le facteur de qualité réel est limité à la valeur 6.

Il est défini par la relation suivante

$$\text{Où : } Q = \frac{I_1 - I_2}{\delta_0 - \delta_2} \quad (\text{III.1})$$

$I_1$  et  $I_2$  sont les tensions moyennes des symboles « « 1 » » et « « 0 » »

$\delta_1$  et  $\delta_2$  sont les variances des probabilités des symboles « « 1 » » et « « 0 » » [34].

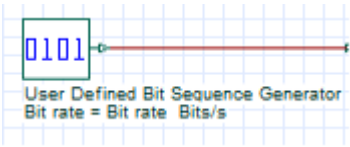
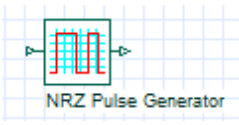
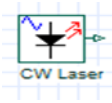
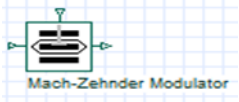
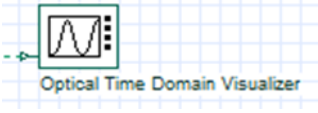
### 5.2.1 Le taux d'erreur binaire BER

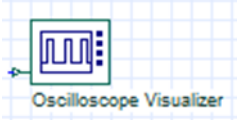
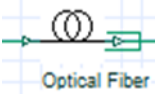
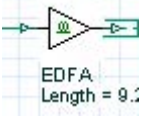
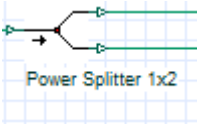
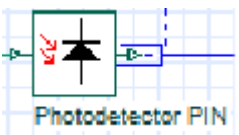
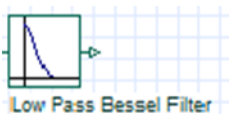
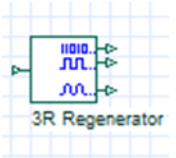
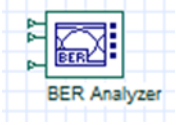
C'est le pourcentage du rapport du nombre de bits reçus en erreur sur nombre de bits total.

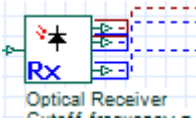
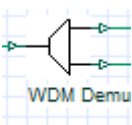
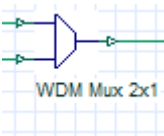
$$BER = \frac{\text{nombre de bits érronés}}{\text{Nombre de bits transmis}} \quad (\text{III.2})$$

## 6 Descriptif des composants utilisés dans la simulation

Tableau 5 : Descriptif des composants utilisés dans la simulation.

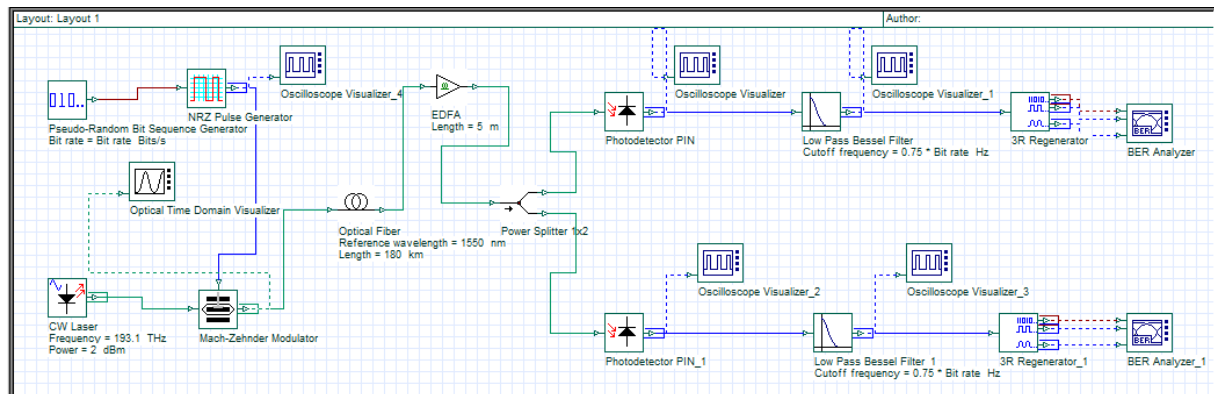
Eléments	Symbol	Description
Générateur de séquence de bits définie par l'utilisateur		Peut être utilisé pour générer une séquence de bits définie par l'utilisateur.
Générateur d'impulsions NRZ		Permet aux utilisateurs de créer une séquence des impulsions non retournées à zéro codées par une entrée de signal numérique
CW Laser		Génère un signal optique d'onde continue
Modulateur de Mach-Zehnder		Convertit le signal électrique en signal optique
Visualiseur de domaine temporel optique		Affiche le signal optique modulé dans le domaine temporel

Visualiseur d'oscilloscope		Affiche le signal électrique après le PIN dans le domaine temporel
Fibre optique		C'est un moyen de transport de signal lumineux
Amplificateur à fibre dopée erbium (EDFA)		Amplifie le signal optique dans les systèmes de communication optique sur fibre, compensant ainsi les pertes de signal sur de longues distances
Diviseur de puissance		Est un composant qui divise également la puissance du signal d'entrée entre ses sorties
Photodétecteur PIN		Photodiode détecte le signal optique et le convertit en signal électrique.
Filtre passe-bas de Bessel		Filtre le signal et minimise le bruit en sortie du récepteur PIN.
Régénérateur 3R		Ce composant permet d'analyser et de calculer le BER.
Analyseur de taux d'erreur binaire		Mesure les performances du système et affiche les deux valeurs de facteurs de qualité Q et BER et le diagramme de

		l'œil.
Récepteur optique		Convertit le signal optique en signal électrique pour l'analyse et le traitement des données.
Démultiplexeur Optique		Sépare les différentes longueurs d'onde d'un signal multiplexé en plusieurs canaux individuels pour leur traitement distinct.
Multiplexeur		Multiplexeur utilisé pour combiner plusieurs signaux optiques de différentes longueurs d'onde sur une seule fibre optique.

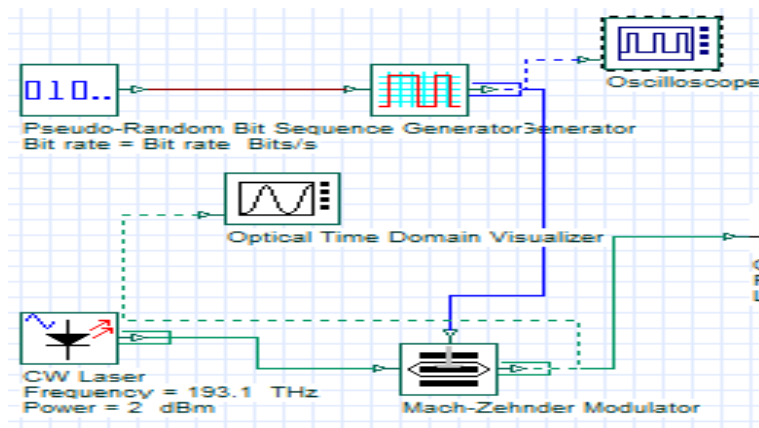
## 7 Système FTTH-GPON en TDMA

La **Figure 50** présente la structure d'un réseau GPON-FTTH en TDMA que nous avons étudié. Elle contient :



**Figure 50 : Chaîne de transmission FTTH-GPON en TDMA.**

### - Bloc d'émission

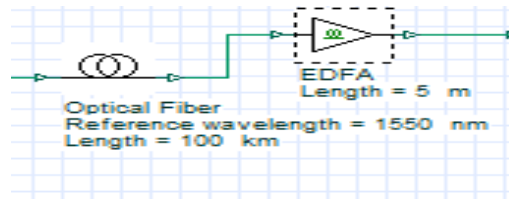


**Figure 51: Bloc d'émission.**

La fonction de ce bloc est de générer un signal optique continu et de le moduler en fonction des données binaires et du format sélectionné. Dans les systèmes que nous allons étudier, l'émetteur se compose des éléments suivants :

- Générateur de séquence de bits définie par l'utilisateur
- Générateur d'impulsions NRZ
- Modulateur de Mach-Zehnder
- CW Laser
- Visualiseur de domaine tempore optique

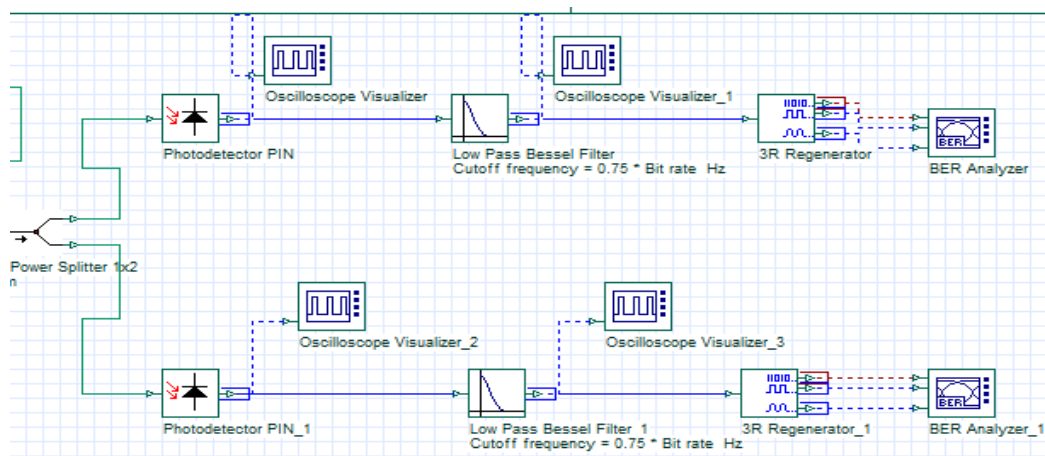
- Visualiseur d'oscilloscope
- **Bloc canal de transmission**



*Figure 52 : Canal de transmission.*

Le canal de transmission utilisée dans notre travail est la fibre optique pour véhiculer les données à très haut débit sur de longues distances entre l'OLT et l'ONT. Pour compenser l'affaiblissement du signal sur ces distances, un amplificateur optique est employé.

- **Bloc de réception**



*Figure 53: Bloc de réception.*

Le rôle du récepteur est de recevoir le signal efficace souhaité avec le minimum de distorsions, et ceci afin de répondre aux besoins des clients. Il se constitue des éléments suivants :

- Diviseur de puissance
- Photodétecteur PIN
- Filtre passe-bas de Bessel
- Régénérateur 3R
- Analyseur de taux d'erreur binaire

## 7.1 Impact de distance

Pour comprendre comment la distance affecte les performances d'un réseau FTTH-GPON en TDMA, nous avons examiné deux aspects clés : la qualité de transmission (Q) et le taux d'erreurs binaires (BER). Une transmission de qualité nécessite un Q supérieur à 6 et un BER inférieur à  $10^{-9}$ . En maintenant un débit de 5 Gbit/s, deux utilisateurs simultanés et une puissance optique de 2 dBm, nous avons varié la longueur de la fibre optique de 40 km à 200 km. Les résultats, affichés sur un analyseur de BER, incluent les mesures de Q, de BER et le diagramme de l'œil, nous permettant ainsi d'évaluer l'effet de la distance sur la performance du réseau.

Résultats et interprétations :

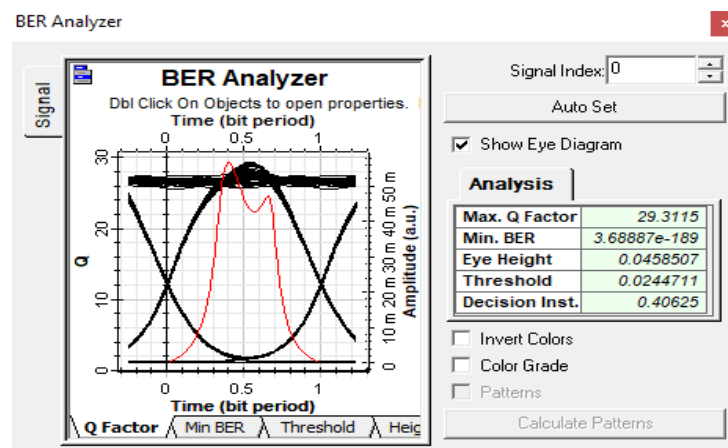


Figure 54 : Diagramme de l'œil à 40 km.

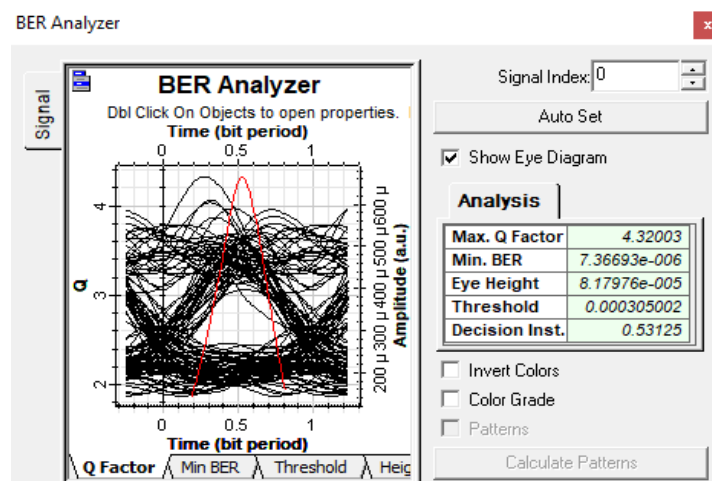
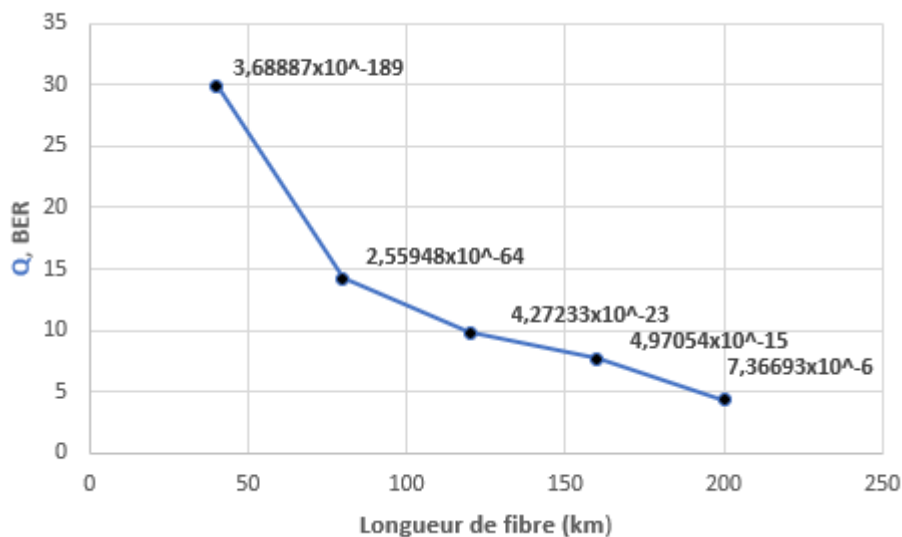


Figure 55 : Diagramme de l'œil à 200 km.

Le diagramme de l'œil de la **Figure 54** montre une bonne ouverture de l'œil avec un facteur de qualité  $Q=29,3115$  pour une longueur de fibre  $L=40$  km, ce qui indique une transmission efficace. Cependant, le diagramme de l'œil de la **Figure 55** montre une dégradation de la qualité du signal, avec une possible fermeture de l'œil et une diminution du facteur de qualité due aux pertes et à la dispersion accrues sur une plus longue distance.

**Tableau 6 :  $Q$ , BER en fonction de distance (Km) dans le réseau FTTH-GPON en TDMA.**

Longueur de fibre (km)	40	80	120	160	200
Facteur de qualité (Q)	29,93115	14,2395	9,81528	7,72633	4,32003
Taux d'erreur binaire BER	$3,68887 \times 10^{-189}$	$2,55948 \times 10^{-64}$	$4,27233 \times 10^{-23}$	$4,97054 \times 10^{-15}$	$7,36693 \times 10^{-6}$



**Figure 56 :  $Q$ , BER en fonction de distance (km) dans le réseau FTTH-GPON en TDMA.**

On remarque sur la **Figure 56** que plus la distance augmente plus le facteur de qualité  $Q$  diminue, ce qui montre qu'il est important de tenir en compte la distance qu'on utilise au cours de la transmission pour avoir un signal transmis sans erreur.

## 7.2 Impact de la puissance

Examinons maintenant l'impact de la puissance sur les performances du réseau GPON-FTTH en TDMA. Pour cela, nous fixons le débit binaire à 5 Gbit/s, avec un nombre d'utilisateurs  $N=2$  et une distance de 40 km, tout en faisant varier la puissance de 2 dBm à 8 dBm.

Résultats et interprétations :

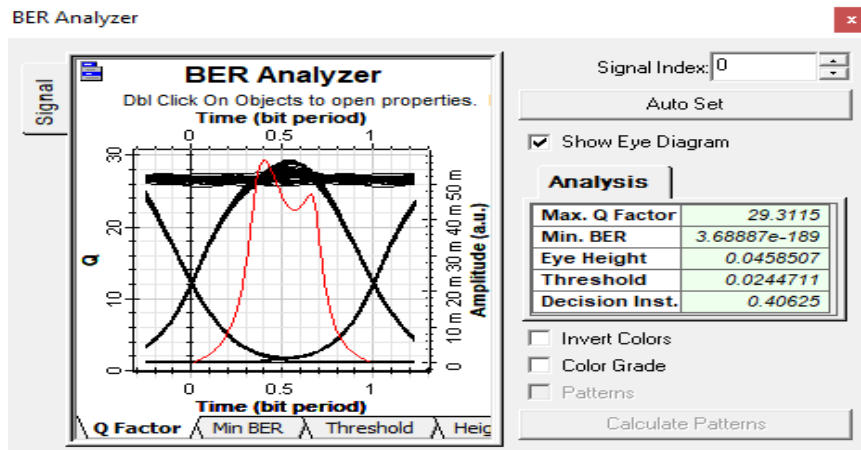


Figure 57 : Diagramme de l'œil à 2dBm.

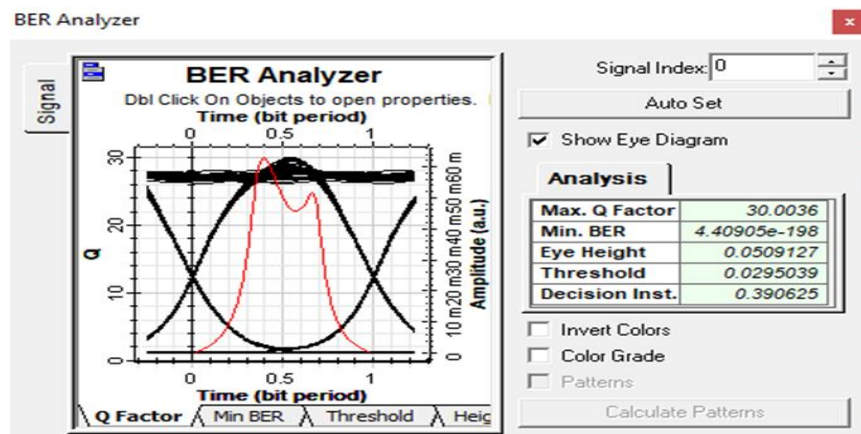
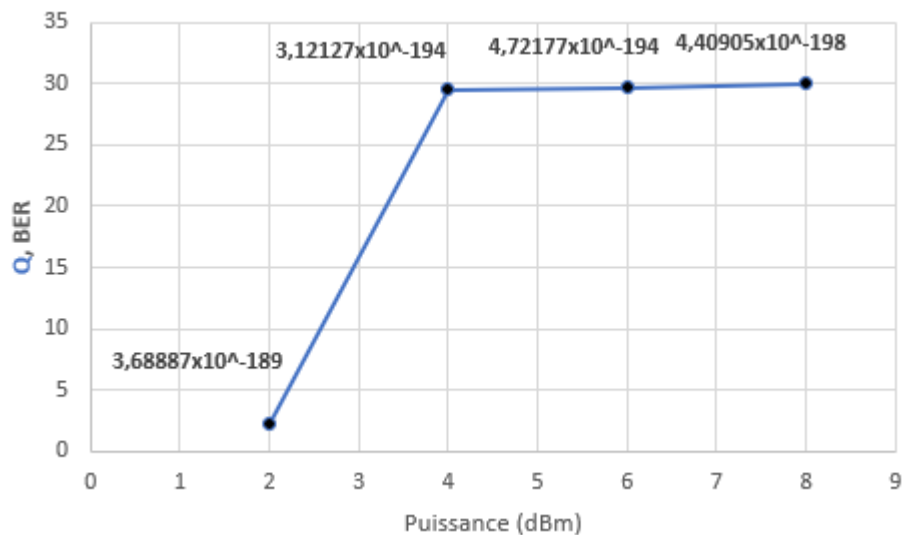


Figure 58 : Diagramme de l'œil à 8 dBm.

Le diagramme de l'œil de la **Figure 57** avec une puissance de 2 dBm présente un BER de  $3,68887 \times 10^{-189}$  et un Q de 29,3115, indiquant un signal de qualité excellente pour une transmission fiable. Cependant, le diagramme de l'œil de **Figure 58** avec une puissance de 8 dBm montre un BER de  $4,40905 \times 10^{-198}$  et un Q de 30,0036, ce qui indique une transmission encore plus efficace à cette puissance plus élevée.

**Tableau 7 : Q, BER en fonction de puissance (dBm) dans le réseau FTTH-GPON en TDMA.**

Puissance (dBm)	2	4	6	8
Facteur de qualité (Q)	29,3115	29,4738	29,693	30,0036
Taux d'erreur binaire (BER)	$3,68887 \times 10^{-189}$	$3,12127 \times 10^{-191}$	$4,72177 \times 10^{-194}$	$4,40905 \times 10^{-198}$



**Figure 59 : Q, BER en fonction de puissance (dBm) dans le réseau FTTH-GPON en TDMA.**

D'après la **Figure 59** nous remarquons Plus la puissance augmente, plus les performances du système de communication FTTH augmentent car cela permet d'améliorer la qualité et la vitesse de transmission des données. Cependant, il n'est pas possible d'augmenter la puissance à l'infini, car cela pourrait endommager les composants du système. Il est donc important de trouver un équilibre optimal en fonction des besoins du système.

### 7.3 Impact du débit binaire

Pour étudier l'effet du débit sur la qualité de transmission, nous avons effectué une simulation avec les paramètres suivants : le nombre d'utilisateurs est  $N=2$  sur une distance de 70 km, et une puissance de  $P=1$  dBm. Nous faisons varier le débit binaire de 3,5 jusqu'à 5 Gbit/s.

Résultats et interprétations :

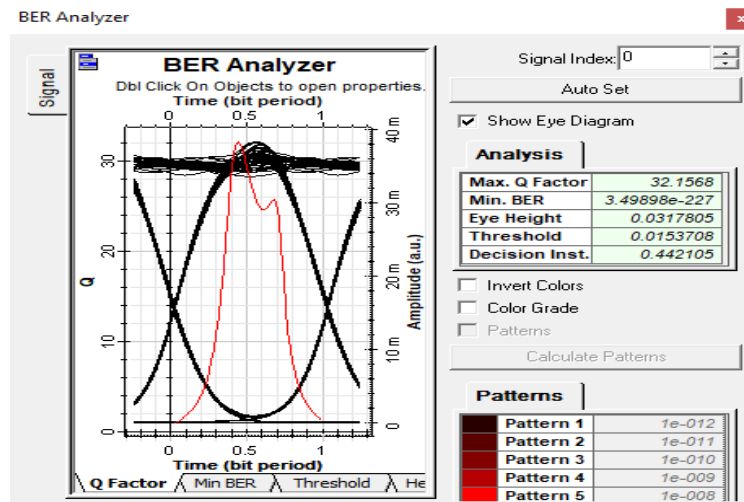


Figure 60 : Diagramme de l'œil à 3,5 Gbit/s.

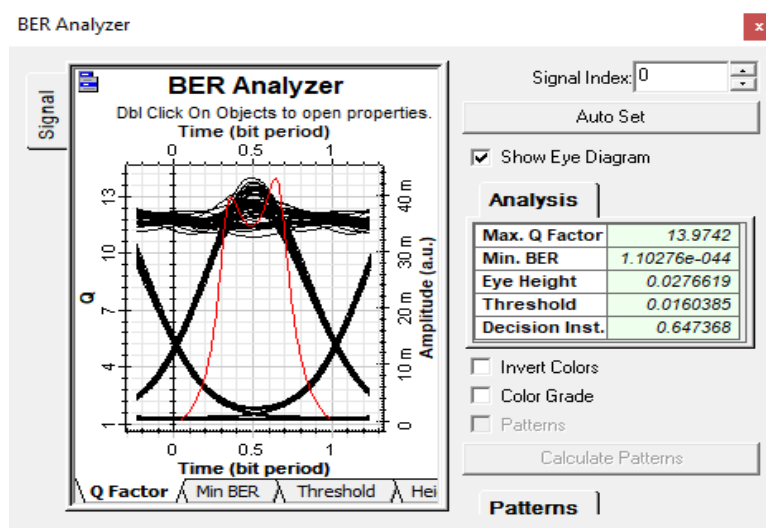
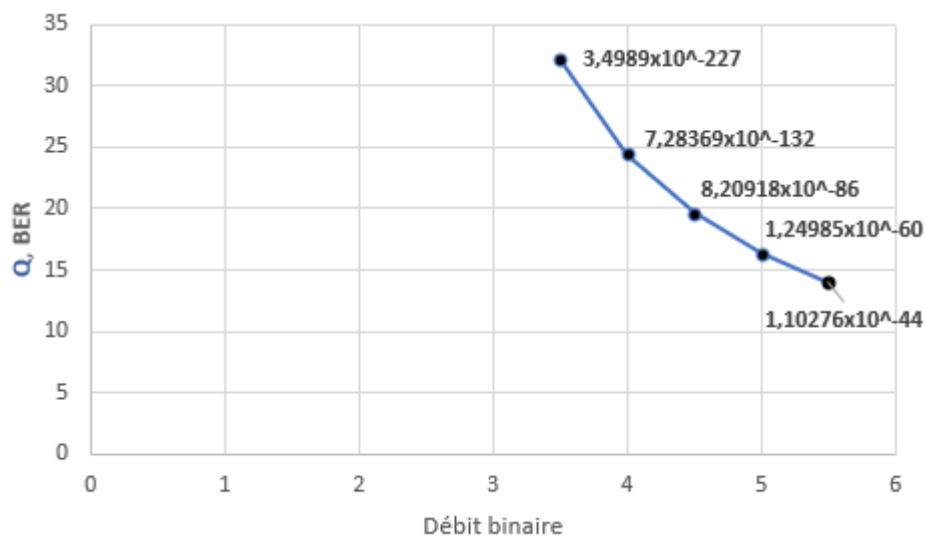


Figure 61 : Diagramme de l'œil à 5,5 Gbit/s.

Avec un débit binaire de 3,5 Gbit/s, la qualité de transmission du signal est bonne, caractérisée par un facteur de qualité élevé. En revanche, à 5,5 Gbit/s, la qualité de transmission est légèrement inférieure à celle observée à 3,5 Gbit/s, mais reste tout de même acceptable.

**Tableau 8 : Q, BER en fonction de débit binaire dans le réseau FTTH-GPON en TDMA.**

<b>Débit binaire (Gbit/s)</b>	3,5	4	4,5	5	5,5
<b>Facteur de qualité (Q)</b>	32,1568	24,4066	19.5968	16,383	13,9742
<b>Taux d'erreur binaire (BER)</b>	$3.49898 \times 10^{-227}$	$7,28369 \times 10^{-132}$	$8,20918 \times 10^{-86}$	$1,24985 \times 10^{-60}$	$1,10276 \times 10^{-44}$



**Figure 62 : Q, BER en fonction de débit binaire dans le réseau FTTH-GPON en TDMA.**

La **Figure 62** nous montre que les performances du système de transmission se dégradent (c'est-à-dire Q déminue et BER augmente) lorsque la valeur du débit augmente. Cette dégradation de qualité service s'explique par l'augmentation des interférences entre des

bits de données envoyés (IES) pendant la transmission optique. Par conséquent, plus le débit du système FTTH augmente, plus les interférences entre symbole (IES) augmentent et donc plus les performances du système de communication FTTH se dégradent.

## 7.4 Impact de nombre d'utilisateurs

Pour évaluer l'influence du nombre d'utilisateurs sur les performances d'un réseau GPON FTTH, nous avons analysé la qualité de service en termes de deux paramètres : Q et BER.

Nous avons fixé le débit binaire à 5 Gbit/s, une distance de 40 km et une puissance de 2 dBm, tout en faisant varier le nombre d'utilisateurs de 4 à 30.

Résultats de interprétations :

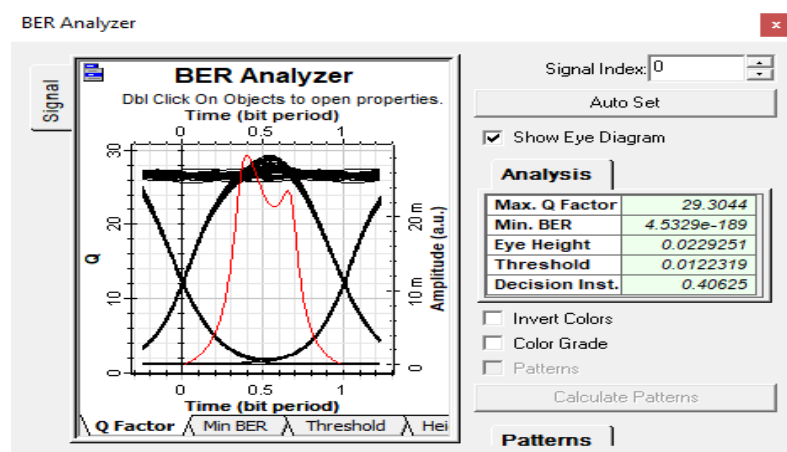


Figure 63 : Diagramme de l'œil pour 4 utilisateurs.

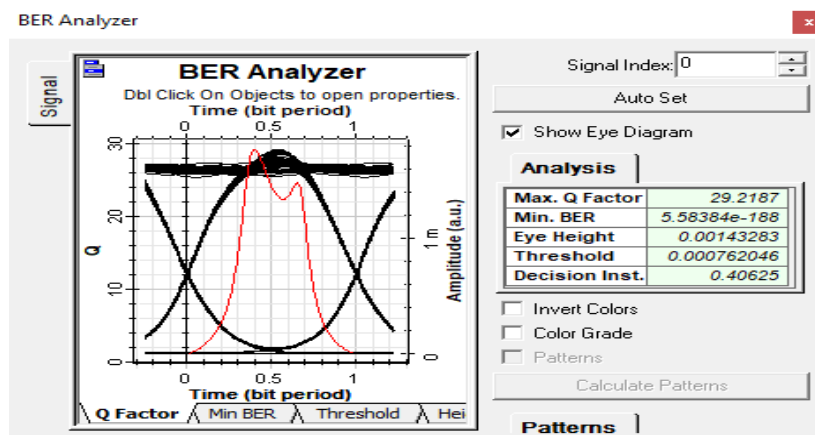
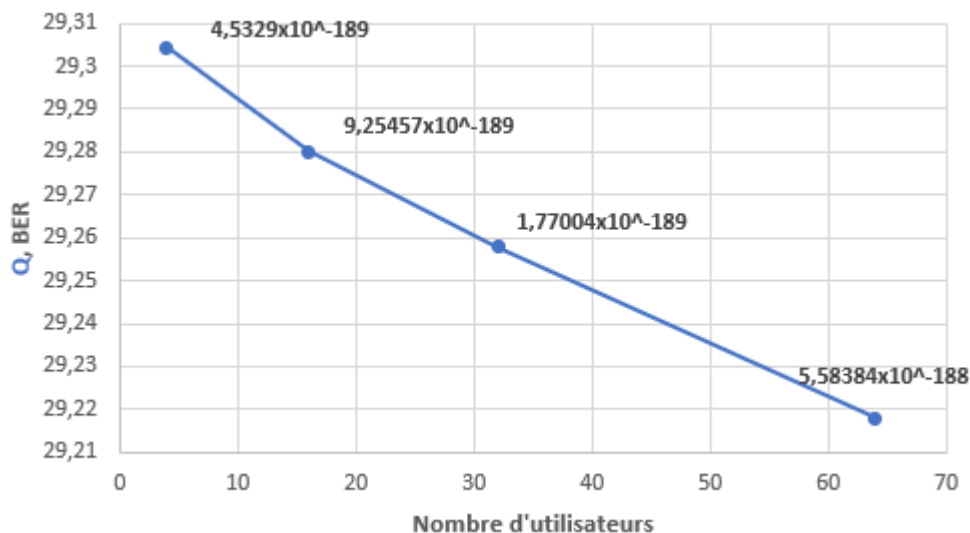


Figure 64 : Diagramme de l'œil pour 64 utilisateurs.

Nous avons observé dans la **Figure 63** que la qualité de transmission du signal est bonne pour 4 utilisateurs, avec un facteur de qualité élevé. Cependant, dans le diagramme de l'œil de la **Figure 64** avec 64 utilisateurs, la qualité de transmission est inférieure à celle observée pour 4 utilisateurs.

**Tableau 9 : Q, BER en fonction de nombre d'utilisateurs dans le réseau FTTH-GPON en TDMA.**

Nombre d'utilisateurs	4	16	32	64
Facteur de qualité (Q)	29,3044	29,2801	29,258	29,2187
Taux d'erreur binaire (BER)	$4,5329 \times 10^{-189}$	$9,25457 \times 10^{-189}$	$1,77004 \times 10^{-189}$	$5,58384 \times 10^{-188}$



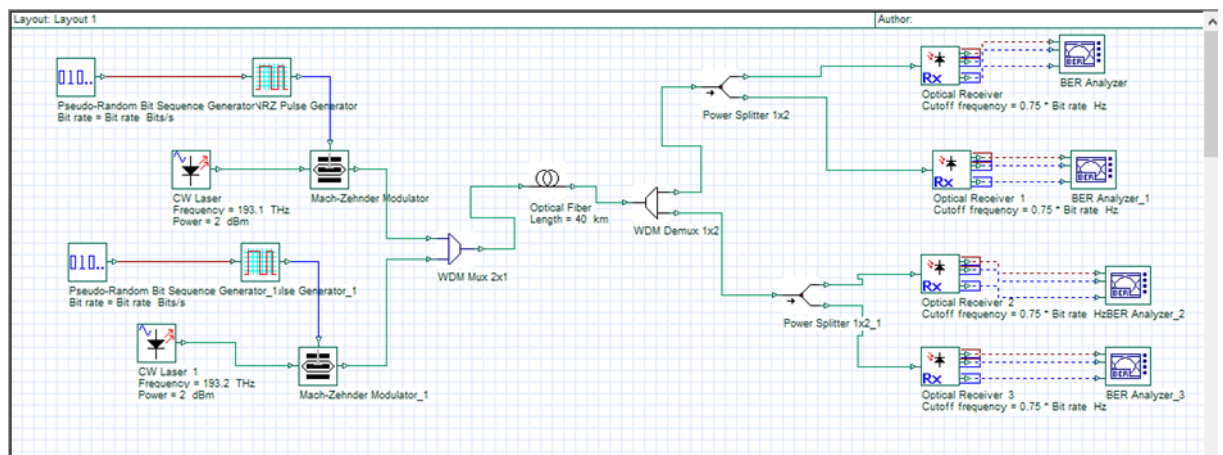
**Figure 65 : Q, BER en fonction de nombre d'utilisateurs dans le réseau FTTH-GPON en TDMA.**

Nous remarquons dans la **Figure 65** que plus le nombre d'utilisateurs qui communiquent de manière simultanée augmente, plus les performances du système se dégradent. Cette dégradation de qualité service s'explique par l'augmentation des interférences entre les données de différents utilisateurs qui communiquent simultanément dans le canal de

transmission (fibre optique). Cette limitation fait que chaque utilisateur communiquant en même temps que l'utilisateur désiré peut interférer sur la variable décisionnelle de ce dernier.

## 8 Système FTTH-GPON en WDM

La **Figure 66** présente la structure de réseau FTTH-GPON en WDM que nous avons étudié :

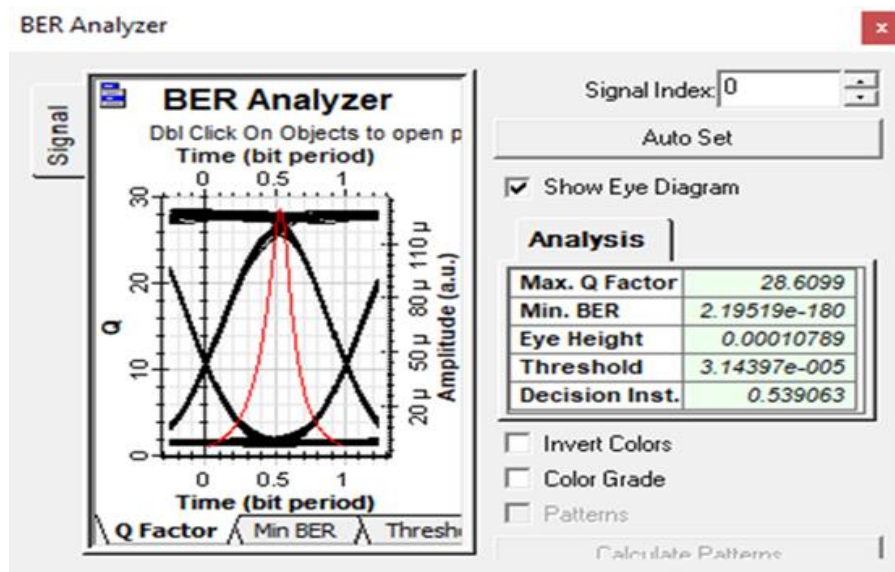


**Figure 66 : Chaîne de transmission FTTH-GPON en WDM.**

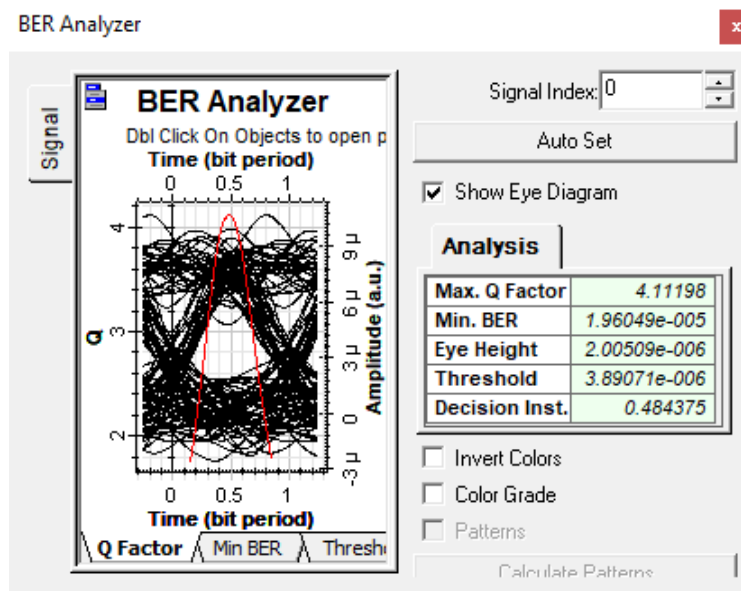
### 8.1 Impact de la distance

Pour étudier l'impact de la distance de la liaison optique sur les performances d'un réseau GPON FTTH en WDM, nous avons évalué la qualité de service en termes de deux facteurs : Q et BER.

Les paramètres internes du système utilisés lors de la simulation sont les suivants : débit binaire de 5 Gbps, puissance du laser CW de 2 dBm, la longueur d'onde=1550 nm. Le nombre d'utilisateurs est fixé à  $N=4$ , et la longueur de la fibre est variée de 40 km à 100 km. Les résultats sont visualisés à l'aide d'un analyseur de BER.



*Figure 67 : Diagramme de l'œil à 40 km.*

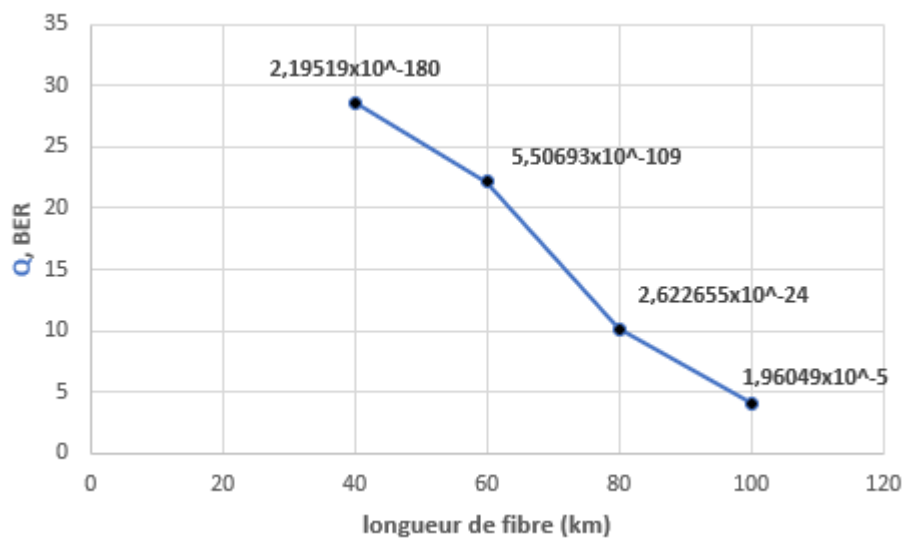


*Figure 68 : Diagramme de l'œil à 100 km.*

Le diagramme d'œil de GPON en WDM révèle des différences significatives selon la distance. À 40 km, la transmission est excellente, pratiquement sans erreur. Cependant, à 100 km la transmission est de qualité insuffisante, présentant du bruit et des erreurs notables.

**Tableau 10 : Q, BER en fonction de distance (Km) dans le réseau FTTH-GPON en WDM.**

<b>Longueur de fibre (km)</b>	40	60	80	100
<b>Facteur de qualité (Q)</b>	28,6099	22,1457	10,1047	4,11198
<b>Taux d'erreur binaire (BER)</b>	$2,19519 \times 10^{-180}$	$5,50693 \times 10^{-109}$	$2,62265 \times 10^{-24}$	$1,96049 \times 10^{-5}$

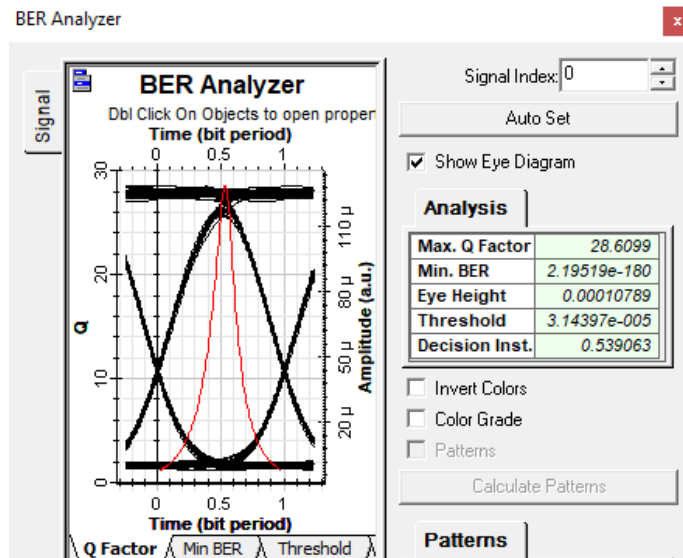
**Figure 69 : Q, BER en fonction de distance (km) dans le réseau FTTH-GPON en WDM.**

D'après la **Figure 69**, on remarque que les performances du système de communication FTTH se dégradent avec l'augmentation de la distance. Ceci est dû principalement au phénomène d'atténuation.

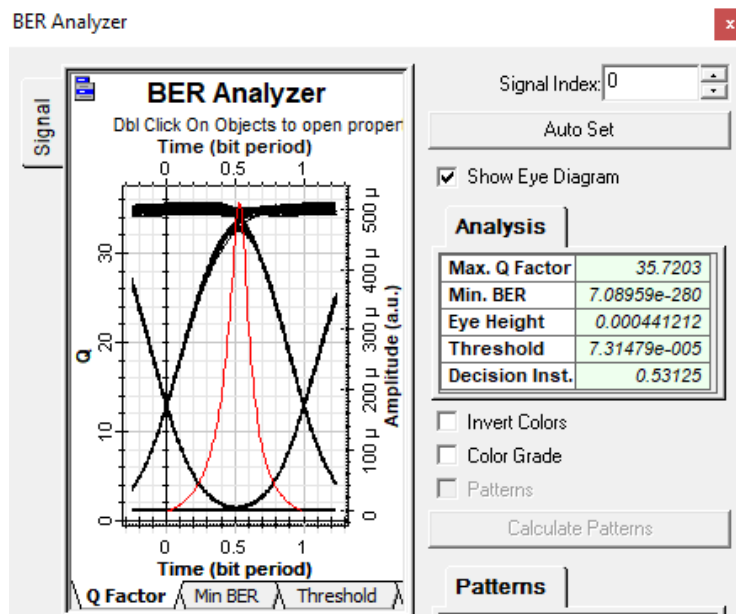
## 8.2 Impact de la puissance

Etudions maintenant l'impact de la puissance sur les performances du réseau GPON FTTH en WDM. Pour cela, on fixe le débit binaire en  $D=5$  Gbit/s avec un nombre d'utilisateurs  $N=4$  et une distance de 40 km en faisant varier la puissance de 2 dBm jusqu'à 8 dBm. La longueur d'onde 1550 nm.

Résultats et interprétations :



*Figure 70 : Diagramme de l'œil à 2 dBm.*

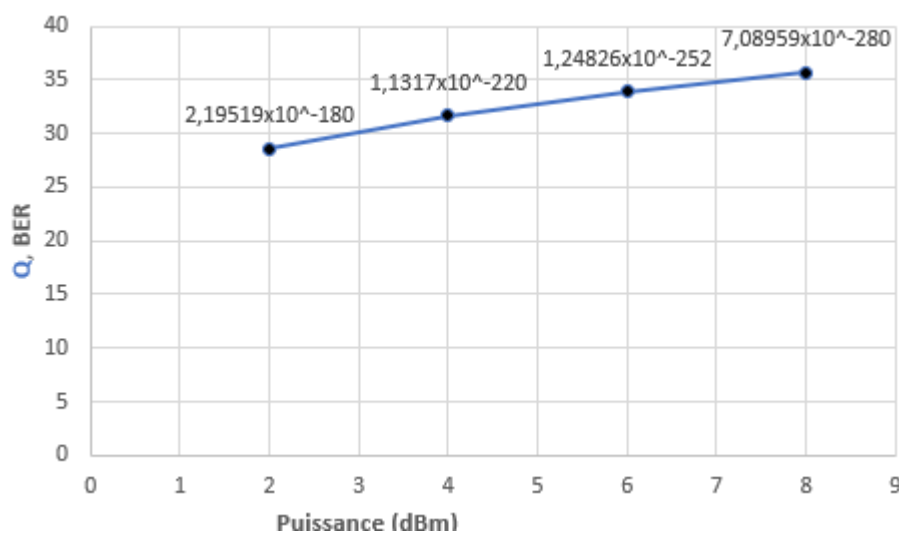


*Figure 71 : Diagramme de l'œil à 8 dBm.*

Le diagramme de l'œil de la **Figure 70** avec une puissance de 2 dBm présente un signal de qualité excellente pour une transmission fiable. Cependant, le diagramme de l'œil de **Figure 71** avec une puissance de 8 dBm indique une transmission encore plus efficace à cette puissance plus élevée

**Tableau 11 : Q, BER en fonction de puissance (dBm) dans le réseau FTTH-GPON en WDM.**

Puissance (dBm)	2	4	6	8
Facteur de qualité (Q)	28,6099	31,6813	33,921	35,7203
Taux d'erreur binaire (BER)	$2,19519 \times 10^{-180}$	$1,1317 \times 10^{-220}$	$1,24826 \times 10^{-252}$	$7,08959 \times 10^{-280}$



**Figure 72 : Q, BER en fonction de puissance (dBm) dans le réseau FTTH-GPON en WDM.**

Nous remarquons sur la **Figure 72** que les performances du système de communication FTTH augmentent avec l'augmentation de la puissance optique.

### 8.3 Impact de débit binaire

Pour évaluer l'impact du débit binaire de la liaison optique sur les performances d'un réseau GPON-FTTH, le nombre d'utilisateurs est fixé à  $N=4$  sur une distance de 80 km avec une puissance optique injectée de 2 dBm. Le débit binaire est varié de 1 à 5 Gbit/s.

Résultats et interprétations :

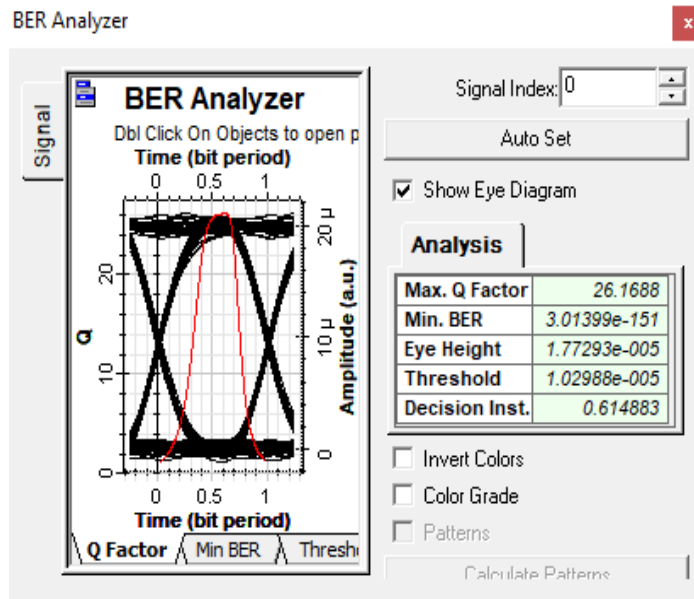


Figure 73 : Diagramme de l'œil à 1 Gbit/s.

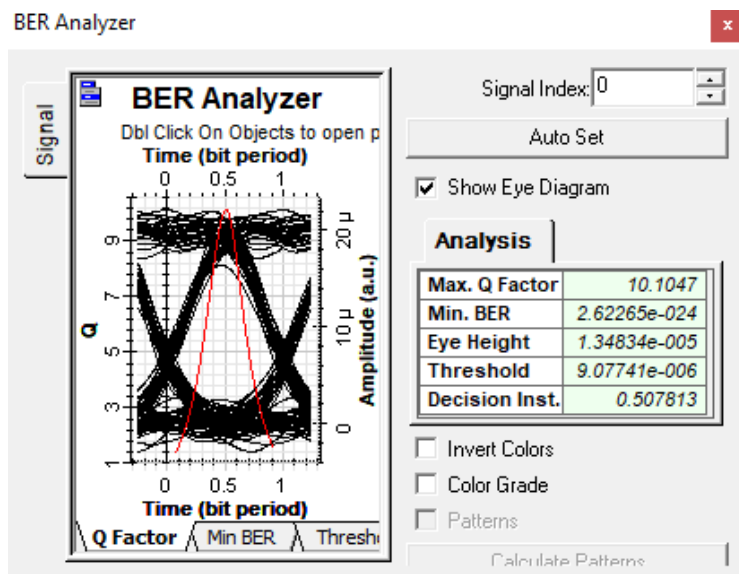


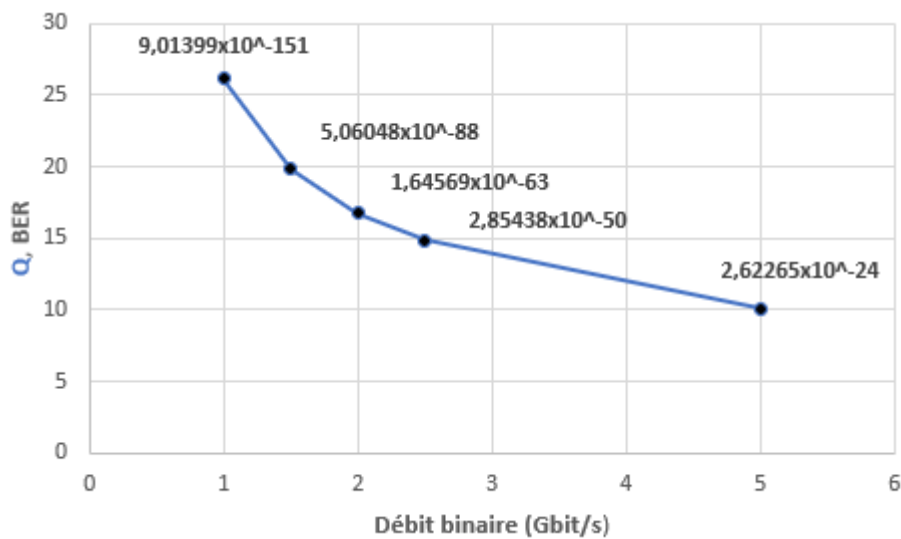
Figure 74 : Diagramme de l'œil à 5 Gbit/s.

La **Figure 73** montre une transmission très fiable à 1 Gbit/s, avec un signal de grande qualité et presque aucune erreur. En revanche, la **Figure 74**, à 5 Gbit/s, présente une transmission plus rapide mais avec un signal légèrement moins bon et quelques erreurs possibles.

**Tableau 12 : Q, BER en fonction de débit binaire (Gbit/s) dans le réseau FTTH-GPON en WDM.**

Bit rate	1	1,5	2	2,5	5
----------	---	-----	---	-----	---

(Gbit/s)					
Facteur de qualité (Q)	26,1688	19,8543	16,7822	14,8632	10,1047
Taux d'erreur binaire (BER)	$9,01399 \times 10^{-151}$	$5,06048 \times 10^{-88}$	$1,64569 \times 10^{-63}$	$2,85438 \times 10^{-50}$	$2,62265 \times 10^{-24}$



**Figure 75 : Q, BER en fonction de débit binaire (Gbit/s) dans le réseau FTTH-GPON en WDM.**

Nous remarquons à travers la **Figure 75** que les performances du système de transmission se dégradent (c'est-à-dire Q déminue et BER augmente) avec l'augmentation du débit. Cette dégradation de qualité service s'explique également par les interférences entre des bits de données envoyés (IES) au cours de ces propagations dans le canal de transmission (fibre optique).

#### 8.4 Impact de nombre d'utilisateurs

Pour étudier l'impact du nombre d'utilisateurs sur les performances d'un réseau GPON-FTTH, nous avons évalué la qualité de service en utilisant deux paramètres : Q et BER. Le débit binaire est fixé à 5 Gbit/s pour une distance de 40 km et une puissance optique de 2

dBm. Le nombre d'utilisateurs est varié de 4 à 24. Les résultats de la simulation sont visualisés à l'aide d'un analyseur de BER.

Résultats et interprétations :

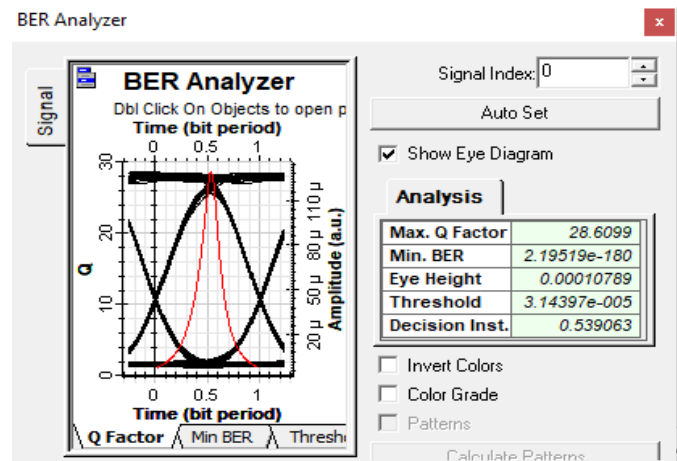


Figure 76 : Diagramme de l'œil pour 4 utilisateurs.

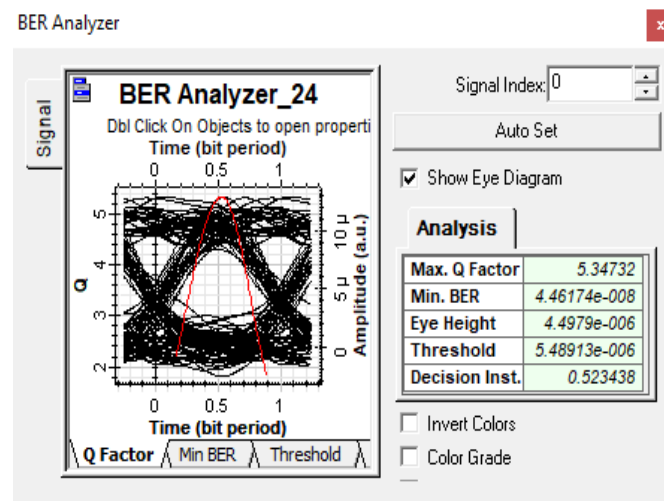
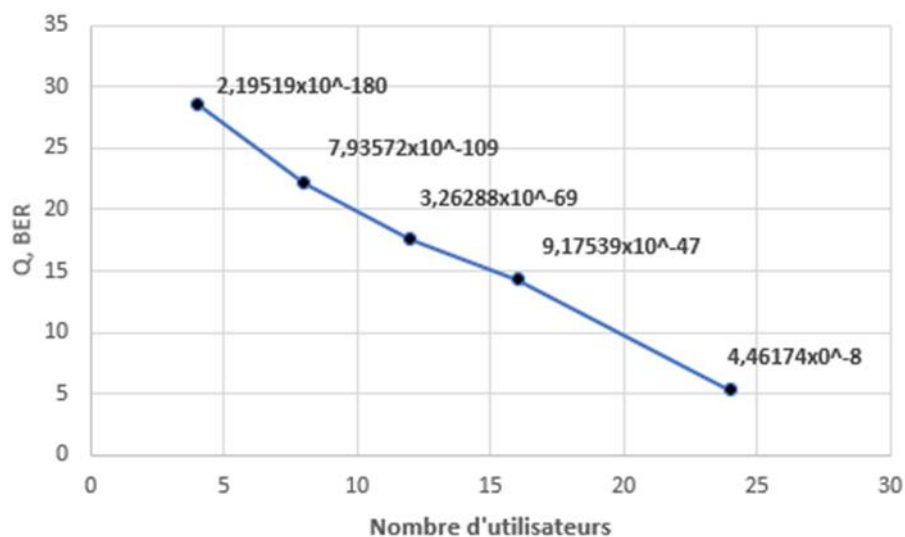


Figure 77 : Diagramme de l'œil à 24 utilisateurs.

Pour 4 utilisateurs, le diagramme de l'œil montre une qualité de signal excellente avec un BER de  $2,19519 \times 10^{-180}$  et un facteur de qualité de 28,6099. Cependant, pour 24 utilisateurs, le diagramme de l'œil, illustré à la **Figure 77**, montre une qualité de signal dégradée avec un BER de  $4,46174 \times 10^{-008}$  et un facteur de qualité de 5,34732, indiquant une performance inférieure et une probabilité accrue d'erreurs.

**Tableau 13 : Q, BER en fonction de nombre d'utilisateurs dans le réseau FTTH-GPON en WDM.**

Nombre d'utilisateurs	4	8	12	16	24
Facteur de qualité (Q)	28,6099	22,129	17,5438	14,3118	5,34732
Taux d'erreur binaire (BER)	$2,19519 \times 10^{-180}$	$7,93572 \times 10^{-109}$	$3,26288 \times 10^{-69}$	$9,17539 \times 10^{-47}$	$4,46174 \times 10^{-8}$



**Figure 78 : Q, BER en fonction de nombre d'utilisateurs dans le réseau FTTH-GPON en WDM.**

**Commentaire :** D'après la **Figure 78**, on observe que les performances du système diminuent avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs. Cette baisse de qualité de service est dû à l'augmentation des interférences inter-symboles entre les différents utilisateurs.

## 9 Conclusion :

Dans notre étude des réseaux optiques passifs de type FTTH-GPON utilisant les technologies TDMA et WDM, et à l'aide des simulations réalisées avec le logiciel

OptiSystem, nous avons pu évaluer l'effet des différents paramètres tels que la distance, la puissance, le nombre d'utilisateurs et le débit sur les performances de ces réseaux. Les résultats montrent que plus la puissance augmente, meilleures sont les performances du système FTTH, mais il est crucial de maintenir un équilibre optimal pour éviter d'endommager les composants. L'augmentation de la distance de transmission réduit le facteur de qualité Q, indiquant la nécessité de contrôler la distance pour assurer un signal sans erreur.

De plus, une augmentation du débit entraîne une dégradation des performances en raison des interférences entre symboles, tandis qu'un nombre élevé d'utilisateurs simultanés engendre des interférences entre leurs données, dégradant ainsi la qualité du service. Nous avons également constaté que la transmission est considérée comme bonne lorsque le taux d'erreur binaire (BER) est inférieur à  $10^{-9}$  et que le facteur de qualité est supérieur à 6.

En comparant les technologies, FTTH-GPON WDM permet une meilleure utilisation de la bande passante et offre une capacité utilisateur plus élevée, répondant ainsi mieux à la demande croissante. En revanche, FTTH-GPON TDMA, bien que plus simple à déployer, présente des limitations de capacité totale.

Le choix entre ces technologies doit donc être guidé par les besoins spécifiques du réseau, la croissance prévue, ainsi que les considérations de coût et de complexité.

# Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons exploré en profondeur l'évolution et les aspects fondamentaux des réseaux FTTH-GPON, nous nous sommes concentrés plus particulièrement sur les technologies d'Accès Multiple par Répartition dans le Temps (TDMA) et de Multiplexage en Longueur d'Onde (WDM). Nous avons utilisé le logiciel OPTISYSTEM pour simuler et évaluer les performances des réseaux FTTH-GPON TDMA et FTTH-GPON WDM. Cette étude nous a permis d'analyser l'impact sur des paramètres essentiels tels que la distance de transmission, les besoins en puissance, les débits obtenus, et la capacité à accueillir un nombre croissant d'utilisateurs. Les graphiques, les diagrammes d'œil, les BER (Bit Error Rate), et les facteurs de qualité ont été utilisés pour comparer et évaluer objectivement les deux technologies.

Nos résultats ont démontré que chaque technologie présente des avantages distincts selon les contextes d'application spécifiques. Le TDMA se distingue par sa gestion efficace du temps d'accès partagé, tandis que le WDM excelle dans l'exploitation optimale de la bande passante spectrale. Nous avons constaté que plus la puissance augmente, plus les performances du système de communication FTTH s'améliorent, mais il est crucial de trouver un équilibre optimal pour éviter d'endommager les composants du système. De plus, la distance de transmission affecte significativement la qualité du signal, et les performances se dégradent lorsque la distance augmente. La qualité de service diminue également avec l'augmentation du débit, en raison des interférences entre les bits de données envoyés. Enfin, un nombre croissant d'utilisateurs simultanés dégrade les performances du système, à cause des interférences entre les données de différents utilisateurs.

Nous avons déterminé que pour garantir une bonne transmission, le BER doit être inférieur à  $10^{-9}$  et le facteur de qualité supérieur à 6. Ces conclusions fournissent un aperçu précieux pour les décideurs et les praticiens du secteur des télécommunications, en orientant les choix stratégiques pour le déploiement et l'optimisation des réseaux FTTH-GPON. Ce mémoire représente une contribution significative à la recherche dans le domaine des réseaux optiques, en explorant et en comparant les technologies émergentes dans un cadre simulé. Il

ouvre la voie à de futures études visant à perfectionner ces technologies et à répondre aux défis croissants posés par la demande croissante en haut débit et en services multimédias.

# Références

- [1] Tout savoir sur la fibre optique n.d. <https://www.compufirst.com/compufirst-lab/reseau-et-telecom/qu-est-ce-qu-une-fibre-optique/main.do?appTreeId=45685> .
- [2] GERARD Barué. "Télécommunications et infrastructure : liaisons hertziennes, spatiales, optiques", livre. Ellipses, Paris. 2003.
- [3] SERGE Ungar. "Fibres optiques théorie et applications", livre. Paris. 1989.
- [4] Fibre optique n.d. <https://www.azenn.com/content/127-fibre-optique-tout-savoir-sur-la-fibre-optique-et-ses-composants>.
- [5] COLOMBIER Franois. PAUGNOUD Christoph. "Réseaux et routage optiques", présentation de thèse de doctorat. 29/11/2004.
- [6] BOUBRIK Nacer, CHAMEK Said, FERHANI Samia. "Etude et application de la transmission SDH via fibre optique", thèse de doctorat. Université de Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou. 2009.
- [7] GIRARD André, MILLORIT Bernard. "La fibre optique", livre. 14/01/2021.
- [8] Tuto sur les connecteurs à fibre optique communauté FS. Knowledge 2018. <https://community.fs.com/fr/article/understanding-fiber-optic-connector-types.html>
- [9] LECOY Pierre." Communications sur fibres optiques", livre. Librairie Lavoisier ,Paris. 2015.
- [10] LAURENT Jérôme. "Communications optiques à très haut débité", thèse de doctorat. Conservatoire national des arts et métiers Département STIC, Paris. 2003.
- [11] VERNRUIL Jean-Louis. "Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbit/s", thèse de doctorat. Université de Limoges. 2003.
- [12] BOUDRIOUA Nassima." Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD", thèse de doctorat. Université de Paul Verlaine, Metz. 2007.
- [13] BERROUANE Wassila." Etude de conception d'une chaine de transmission optique à très haut débit à base de semi-conducteur du type III-Nitrures", thèse de doctorat. Université de Djilali Liabes, Sidi Bel Abbes. 2018.
- [14] PIERRE André-Bélangier. "Les fibres optiques : Supplément d'électromagnétisme appliqué", mémoire de fin d'étude. Université de Laval. 2008.

- [15] FOGNO OUAMBO Baudlaire. "Optimisation d'un banc de test amplifié à 10Gb/s pour l'étude des technologies avancées de transmission de fibre optique", thèse de doctorat. Université de Montréal. 2008.
- [16] COZANNET Alain, MAITR Henri, FLEURET Jacques, ROUSSEAU Michel. "Optique et télécommunication", livre optique et télécommunications : transmission et traitement optiques de l'information. Paris: Eyrolles. 1981.
- [17] LE FLOC'H Sébastien. "Etude de la diffusion de Brillouin stimulée dans la fibre monomode standard application aux capteurs de température et de pression", thèse de doctorat. Université de Bretagne Occidentale, Brest. 2001.
- [18] BOULIANNE Louis-Patrick. "Système de communication optique à accès multiple par répartition de code à saut rapide de fréquence", thèse de doctorat. Université de Laval, 2001.
- [19] ROSE B. "Broadband wireless access and local networks: mobile "WiMAX and WiFi"", Wiley. 2015.
- [20] SCHWARTZ Matthew. "Mobile wireless communications", livre. Université de Cambridge, 2005.
- [21] KOURAT Mohamed, MOULAY Saliha. "Etude et simulation d'un réseau PON", Mémoire de fin d'études. Université de Saida, 2019.
- [22] Fibre optique: avantages & inconvénients n.d. <https://forum.huawei.com/enterprise/fr/fibre>.
- [23] "Les réseaux passifs optical network". Livre Blanc. 27/11/2006.
- [24] SALIOU Fabienne. "Etudes des solutions d'accès optique exploitant une extension de 7 portées", thèse de doctorat. Université de TELECOM PARIS TECH. 14/06/2010.
- [25] ABDELKADER Temmar, CHENIKA Abdelfettah, BOUTALEB Abdelmadjid. "Etude et analyse d'un réseau d'accès optique Passif", thèse de doctorat. Institut National des Télécommunications et TIC. Algérie. 2014.
- [26] ALTAHIR Alameen, ALTAHIR Hiba. "Gigabit passive optical network", performance et évaluation. Université de Khartoum. 2007.
- [27] CHENIKA Abdelfettah. "Etude et conception de nouveaux formats de modulations dédiés aux réseaux d'accès optiques haut débit", thèse de doctorat. Université d'Aboubakr Belkaïd, 14/04/2016.
- [28] "Réseau optique passif (PON)". <https://www.viavisolutions.com/fr-fr/quest-ce-que-un-reseau-optique-passif-passive-optical-network-pon>. 2003.
- [29] MRABET Hichem. "Réseau d'accès optique", cours. Institut Supérieur des Etudes Technologiques en Communications de Tunis. 2010 - 2011.
- [30] "Développement des réseaux à très haut débit". pdf. <https://www.cercle-credo.com/wp-content/uploads/2022/01/2007>.

- [31] "Etude de chiffrage pour le développement du très haut débit en aquitaine". Rue de Meuniers, 94300 Vincenne : 2009.
- [32] Optisystem overview. Optiwave n.d. <https://optiwave.com/optisystem-overview>.
- [33] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme\\_de\\_1%27%C5%93il](https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_1%27%C5%93il)
- [34] Facteurde  
qualité[https://fr.wikipedia.org/wiki/Facteur\\_de\\_qualit%C3%A9#:~:text=Le%20facteur%20de%20qualit%C3%A9%20permet,la%20mettant%20sous%20forme%20canonique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Facteur_de_qualit%C3%A9#:~:text=Le%20facteur%20de%20qualit%C3%A9%20permet,la%20mettant%20sous%20forme%20canonique).