

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière : Télécommunications
Spécialité : Systèmes de télécommunications

Présenté par
HAMMOUDI ABDALLAH

&
OUATAS AHLEM

Étude et simulation d'un réseau d'accès optique TWDM-PON

Proposé et encadré par : SAADI Hadjer
Co-encadré par : BOUTALEB Nassima

Année universitaire 2023-2024

Remerciement

En tout premier lieu, je remercie le bon dieu, tout puissant, de m'avoir donné la volonté et le courage pour la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier notre promotrice, Mme Boutaleb de NOUS fait confiance en me proposant ce sujet. Nous tenons à vous exprimer notre plus profonde gratitude pour votre précieux soutien tout au long de notre parcours de recherche et de rédaction de notre mémoire de Master. Votre expertise, vos conseils avisés et votre disponibilité ont été des atouts essentiels qui ont grandement contribué à la réussite de notre projet.

Nous exprimons notre sincère gratitude envers les membres du jury, en les remerciant individuellement pour l'honneur et l'intérêt qu'ils nous ont témoigné en acceptant de consacrer leur temps à l'examen et à l'évaluation de notre mémoire.

Nous tenons à remercier nos parents, nos frères et sœur et nos amis trouvent à travers ces quelques lignes l'expression de notre profonde gratitude pour leur soutien et leurs encouragements de tous les instants.

Nous profitons de cette opportunité pour exprimer notre gratitude à tous nos enseignants qui ont contribué, par leur collaboration, leur disponibilité et leur sympathie, à notre formation.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidées de près ou de loin durant notre travail. Merci beaucoup.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents, Fayçal et Farida. Votre soutien inconditionnel, votre amour et vos sacrifices ont été le socle de ma réussite. Vous avez toujours cru en moi, même dans les moments de doute, et votre foi en mes capacités m'a donné la force de persévérer. Sans votre guidance et votre encouragement constant, ce projet n'aurait jamais vu le jour. Je vous suis infiniment reconnaissant pour tout ce que vous avez fait pour moi.

À ma sœur Nesrine, pour ta compréhension, ta patience et tes encouragements constants. Tu as été une lumière dans les moments les plus difficiles, et je suis profondément reconnaissant pour ta présence dans ma vie.

À mon petit frère Abderrahmane, ta joie de vivre et ton enthousiasme ont été une véritable source de force. Tu m'as rappelé l'importance de poursuivre mes rêves avec passion et détermination.

À mes amis proches Oussama et Sebkhaoûi, merci pour votre soutien indéfectible et votre amitié précieuse. Vos encouragements, vos conseils et vos moments de convivialité ont rendu cette période beaucoup plus agréable et m'ont aidé à rester motivé. Je suis reconnaissant d'avoir des amis comme vous à mes côtés.

Merci à vous tous pour votre amour et votre soutien indéfectible.

ABDALLAH

Dédicaces

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma plus profonde gratitude à Allah, pour m'avoir accordé cette opportunité exceptionnelle et pour m'avoir béni avec la force et la guidance tout au long de ce voyage.

À mes chers parents ABDENNOUR et KARIMA, votre amour inconditionnel, votre soutien constant et vos innombrables sacrifices ont été le socle de toutes mes réalisations. Je vous en serai éternellement reconnaissant.

À ma sœur IKRAM et mon petit frère YUCEF, merci pour votre compréhension et votre patience.

À mon ami, SOFIANE, merci d'avoir été une source de force et de motivation.

À mes amies précieuses, ILHAM et CHAHRA, merci pour votre amitié inestimable et pour avoir toujours été présentes pour moi.

À mes amies, ANFEL, TITA, KHAOULA, MADINA, HADILE, LAMIA , AYA, ANIS et ABDOU merci pour votre amitié et pour avoir toujours été présentes pour moi.

Je remercie également les professeurs et les étudiants en ingénierie des systèmes de télécommunications, en particulier YASMINE et HOUTA. Vos connaissances précieuses et notre camaraderie ont été essentielles à ma croissance et à mon développement.

Enfin, en ce qui concerne le parcours universitaire, je suis humble et reconnaissant pour les expériences transformatrices et les leçons apprises. Elles ont façonné la personne que je suis aujourd'hui.

Avec une immense reconnaissance, j'exprime ma gratitude profonde à toutes les personnes qui ont joué un rôle clé dans mon parcours. Merci pour votre soutien et votre confiance en moi.

AHLEM

ملخص

الهدف من هذا المشروع هو جزء من دراسة شبكة TWDM. ويصف استغلال تقنيات تعدد الإرسال البصري، وهي تعدد إرسال TDM وتعدد إرسال TWDM. يتكون هذا العمل من تقييم أداء هذا النظام من خلال تحليل تأثير المسافة والتدفق على عامل الجودة.

الكلمات الرئيسية: TDM, TWDM, تقنيات تعدد الإرسال البصري, المسافة, التدفق, عامل الجودة .

Résumé

L'objectif de ce projet s'inscrit dans le cadre de l'étude d'un réseau TWDM. Il décrit l'exploitation des techniques de multiplexage optique, à savoir le multiplexage TDM et le multiplexage TWDM. Ce travail consiste à évaluer les performances de ce système en analysant l'impact de la distance et du débit sur le facteur de qualité.

Mots clés : TWDM, TDM, le multiplexage optique, la distance, débit, le facteur de qualité.

Abstract

The objective of project is part of the study of a TWDM network. It describes the exploitation of optical multiplexing techniques, namely TDM multiplexing and TWDM multiplexing. This work consists of evaluating the performance of this system by analyzing the impact of distance and data rate on the quality factor.

Keywords: TWDM, TDM, optical multiplexing, distance, data, rate, quality factor.

Listes des acronymes et abréviations

A

ATM : Asynchronous Transfert Mode.

APON: ATM PON Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network.

APD: Avalanche Photo Diode.

AON: Active Optical Network

AWG: Arrayed Waveguide Grating.

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line.

B

BPON: Broadband Passive Optical Network.

BER: Bit Error Rate.

C

CA: Centre d'Amplification.

CDMA: Code Division Multiple Access.

CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplexing.

D

D: la DGD (Differential Group Delay).

DEL: Light-Emitting Diode.

DL: Diode Laser.

DEMUX: démultiplexeurs.

DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing.

DVB: Digital video broadcasting.

E

EPON: Ethernet Passive Optical Network.

F

FTTX: Fiber To the ...

FTTH: Fiber to the Home.

FTTB: Fiber to the Building.

FTTC: Fiber to the Curb.

FSAN: Full Service Access Network.

FO: Fibre optique.

G

GPON : Gigabit Capable Passive Optical Network.

I

ITU-T : Union International des Télécommunications secteur Télécommunication.

ITU: International Télécommunication Union.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

L

LASER: Light Amplification by Simulated Emission of Radiation.

LED: Light Emitting Diode.

LAN: Local Area Network.

M

MAN: Metropolitan Area Network.

MMF: Multi Mode Fiber

MUX: Multiplexing / multiplexeur.

N

NA : Noeud d'Accès.

NF : Nœud de flexibilité.

NRO : Noeud de Raccordement Optique.

NRZ: Non-Return to Zero.

O

OFDM: orthogonal frequency-division multiplexing.

ODN: Optical Distribution Network.

OLT: Optical Line Termination.

ONT: Optical Network Termination.

ONU: Optical Network Unit.

OptiSystem: Optical Communication System Design.

P

PON: Passive Optical Network.

PIN: Positive Intrinsic Negative photodiode.

P2P: Point To Point.

P2M: Point To MultiPoint.

P2MP: Point To MultiPoint.

PMD: Dispersion Modale de Polarisation.

PTO : Prise Terminal Optique.

PBO : Point du Branchement Optique.

PC : pointe de concentration.

PLC : Planar Lightwave Circuit.

PSK : Phase-Shift Keying.

Q

Q : facteur de qualité.

QAM : modulation d'amplitude en quadrature.

S

S : le facteur de couplage de la PMD.

SDH : Synchronous Digital Hierarchy.

SMF : Single Mode Fiber.

SRO : Sous Répartiteur Optique.

SR : Sous-Répartiteur.

T

TEB : Taux D'erreur Binaire.

TDM: Time Division Multiplexing.

TDMA: Time Division Multiple Access.

V

VDSL: Very high Digital Subscriber Line

W

WDM: Wavelength Division Multiplexing.

WAN: Wide Area Network.

WDMA: Wavelength Division Multiplexing Access.

WDM PON: Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre1 : Généralités sur la fibre optique.....	3
1.1 Introduction	4
1.2 Historique.....	4
1.3 Définition de fibre optique	5
1.3.1 Structure de la fibre optique	5
1.4 Principe de la fibre optique.....	6
1.5 Types de la fibre optique	7
1.5.1 Fibre multimode	7
1.5.2 Fibre monomode	9
1.5.3 Différence entre fibre multimode et mono mode :.....	9
1.6 Caractéristiques de la fibre optique monomodale.....	10
1.6.1 Effets linéaires	10
1.6.2 Effets non linéaires	12
1.7 Fenêtres de transmission.....	13
1.8 Applications de La fibre optique	13
1.9 Avantages et les inconvénients.....	14
1.10 Conclusion.....	14
2 Chapitre2 :Réseaux d'accès optiques	15
2.1 Introduction	16
2.2 Présentation.....	16
2.3 Technologie FTTX.....	17
2.3.1 FTTC (Fiber to the curb)	17
2.3.2 FTTB (Fiber To The Building).....	18
2.3.3 FTTH (Fiber To The Home).....	19
2.4 Composants principale d'un réseaux PON.....	19
2.4.1 OLT (Optical Line Terminal)	19
2.4.2 ONU (Optical Network Unit).....	20
2.4.3 Coupleur optique	22
2.5 Principe de fonctionnement d'un réseau PON	23
2.5.1 Sens montant.....	23
2.5.2 Sens descendant	23
2.6 Architecture des réseaux d'accès optique.....	24
2.6.1 Architecture point à point	24

2.6.2	Architecture point à multipoint.....	25
2.6.3	Comparaison entre les deux architecture P2P - P2M	26
2.7	Technologies de PON.....	27
2.7.1	ATM-PON.....	27
2.7.2	B-PON.....	29
2.7.3	Ethernet-PON	31
2.7.4	GPON.....	32
2.7.5	Comparaison entre les différentes technologies.....	35
2.8	Conclusion.....	36
3	Chapitre 3 : Réseaux TWDM-PON	38
3.1	Introduction	39
3.2	Organismes de normalisation	39
3.2.1	L'ITU-T	39
3.2.2	LE FSAN.....	40
3.3	Normes de NG-PON1.....	40
3.3.1	LA VARIANTE XGPON1 DU NG-PON1.....	40
3.3.2	LA VARIANTE XG-PON2 DU NG-PON 1.....	41
3.3.3	Comparaison entre les deux.....	42
3.4	Système WDM-PON.....	44
3.4.1	MULTIPLEXAGE EN LONGUEUR D'ONDE (WDM-PON)	44
3.4.2	PRINCIPE DU WDM	44
3.4.3	Contributions du WDM	46
3.4.4	3 TYPES D'ARCHITECTURES WDM POSSIBLES	47
3.4.5	ARCHITECTURE HYBRIDE OU WDM-TDM PON.....	51
3.5	coexistence et planification.....	51
3.6	Avantages de NG-PON	52
3.7	Limitations.....	52
3.8	Evolutions vers les réseaux d'accès de nouvelle génération avancées	52
3.9	Conclusion.....	53
4	Chapitre 4: Simulation et Résultats.....	54
4.1	Introduction	55
4.2	Présentations de logiciel optisystem.....	55
4.3	applications du logiciel optisystem.....	56
4.4	Caractéristiques du logiciel Optisystem.....	57
4.5	Évaluation de la qualité de transmission.....	57
4.6	Travaux de simulation	59

4.6.1	Présentation de la topologie.....	59
4.6.2	Simulation et résultats.....	65
4.7	Conclusion	73
	Conclusion générale.....	74
	Références	75

Liste des figures

FIGURE 1. 1: STRUCTURE D'UNE FIBRE OPTIQUE.....	6
FIGURE 1. 2: FIBRE A SAUT D'INDICE.....	7
FIGURE 1. 3: FIBRE A GRADIENT D'INDICE	8
FIGURE 1. 4: FIBRE MONOMODE	9
FIGURE 1. 5: LES ATTENUATIONS AFFECTENT LA FIBRE OPTIQUE.....	10
FIGURE 1. 6: DISPERSION CHROMATIQUE	11
FIGURE 2. 1: PRESENTATION D'UN SYSTEME DE RESEAU D'ACCES	17
FIGURE 2. 2: ARCHITECTURE D'UN RESEAU D'ACCES OPTIQUE	17
FIGURE 2. 3: STRUCTURE D'UN RESEAU FTTC.....	18
FIGURE 2. 4: STRUCTURE D'UN RESEAU FTTB.....	18
FIGURE 2. 5: STRUCTURE D'UN RESEAU FTTH	19
FIGURE 2. 6: OLT (OPTICAL LINE TERMINAL)	20
FIGURE 2. 7: ONU (OPTICAL NETWORK UNIT).....	20
FIGURE 2. 8: SCHEMA DE PRINCIPE DE LA MODULATION DIRECTE	21
FIGURE 2. 9: SCHEMA DE PRINCIPE DE LA MODULATION EXTERNE	22
FIGURE 2. 11: PON EN SENS MONTANT.....	23
FIGURE 2. 12: PON EN SENS DESCENDANT	24
FIGURE 2. 13: ARCHITECTURE POINT A POINT	24
FIGURE 2. 14: ARCHITECTURE POINT A MULTIPOINT	25
FIGURE 2. 15: PON – PASSIVE OPTICAL NETWORK	27
FIGURE 2. 16: ARCHITECTURE DU ATM-PON.....	28
FIGURE 2. 17: ARCHITECTURE DU BPON	29
FIGURE 2. 18: ARCHITECTURE DU EPON	31
FIGURE 2. 19: ARCHITECTURE DU GPON.....	33
FIGURE 3. 1: ARCHITECTURE DE WDM PON	45
FIGURE 3. 2: LONGUEURS D'ONDE COARSE WDM.....	45
FIGURE 3. 3: LONGUEURS D'ONDE DENSE WDM	46
FIGURE 3. 4: ARCHITECTURE WDM PON BIDIRECTIONNELLE	47
FIGURE 3. 5: SCHEMA D'UN PON UTILISANT UN REPARTITEUR EN LONGUEURS D'ONDE DANS SON ODN"	49
FIGURE 3. 6: ILLUSTRATION D'UN NG-PON AVEC AWG	49
FIGURE 3. 7: ARCHITECTURE DE BASE DU TWDM	51
FIGURE 3. 8: EVOLUTION DU PON ET SES STANDARDS	53
FIGURE4. 1: INTERFACE D'UTILISATEUR GRAPHIQUE (GUI).....	55
FIGURE4. 2: BIBLIOTHEQUE DES COMPOSANTS.....	56
FIGURE4. 3: MODIFICATION DU PARAMETRE.....	57
FIGURE4. 4: LE DIAGRAMME DE L'ŒIL	58
FIGURE4. 5: TOPOLOGIE DU RESEAU A SIMULER	60
FIGURE4. 6: SENS DESCENDANT DU RESEAU	61
FIGURE4. 7: SOUS SYSTEME DE L'OLT	63
FIGURE4. 8: SOUS SYSTEME DE L'ONU.....	64
FIGURE4. 9: FACTEUR DE LA QUALITE Q EN FONCTION DE LA VARIATION DE DEBITS	67

FIGURE4. 10: FACTEUR DE LA QUALITE Q EN FONCTION DE LA VARIATION DE DEBITS	67
FIGURE4. 11: FACTEUR DE LA QUALITE Q EN FONCTION DE LA VARIATION DE DEBITS	68

Liste des tableaux

TABLEAU 1. 1:COMPARAISON ENTRE FIBRE A GRADIENT D'INDICE ET FIBRE A SAUT D'INDICE	8
TABLEAU 1. 2:DIFFERENCE ENTRE UNE FIBRE MULTIMODE (MMF) ET UNE FIBRE MONOMODE (SMF).....	9
TABLEAU 1. 3:LES FENETRES DE TRANSMISSION	13
TABLEAU 1. 4:LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS.....	14
TABLEAU 2. 1:AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE RESEAU P2P	25
TABLEAU 2. 2:LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DE POINT A MULTIPOINT	26
TABLEAU 2. 3:COMPARAISON ENTRE LES DEUX ARCHITECTURE P2P - P2M	26
TABLEAU 2. 4:LES CARACTERISTIQUES DE LA TECHNOLOGIE ATM PON	28
TABLEAU 2. 5:LES CARACTERISTIQUES DE LA TECHNOLOGIE BPON	30
TABLEAU 2. 6: CARACTERISTIQUES DE LA TECHNOLOGIE EPON	32
TABLEAU 2. 7:LES CARACTERISTIQUES DE LA TECHNOLOGIE GPON	34
TABLEAU 2. 8:COMPARAISON ENTRE LES CARACTERISTIQUES DES TECHNOLOGIES PON.....	36
TABLEAU3. 1:CLASSES DE PERTES OPTIQUES DEFINIES DANS LA RECOMMANDATION G.987.2	41
TABLEAU3. 2COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTES NORMES NGPON 1	43
TABLEAU4. 1: PARAMETRES DES COMPOSANTS.....	66
TABLEAU4. 2:DIAGRAMMES DE L'ŒIL POUR D= 2.5 GBIT/S.....	69
TABLEAU4. 3:DIAGRAMMES DE L'ŒIL POUR D= 5 GBIT/S.....	70
TABLEAU4. 4:DIAGRAMMES DE L'ŒIL POUR D= 7.5 GBIT/S.....	71
TABLEAU4. 5:DIAGRAMMES DE L'ŒIL POUR D= 10 GBIT/S.....	72

Introduction générale

Aujourd'hui, les systèmes de télécommunications représentent un ensemble d'information dont l'évolution est très rapide grâce à l'apparition des nouveaux systèmes de communication.

Ces informations peuvent être sous forme analogique ou numérique (voix, caméra vidéo, fichier électronique) et être transmises par divers supports de transmission (fibre optique, câbles de cuivres)

La fibre optique est une technologie de transmission de données à haute vitesse qui utilise la lumière pour transporter des informations sur de longues distances. Les réseaux de fibres optiques sont largement utilisés dans les domaines des télécommunications, de la téléphonie, de la télévision et des réseaux informatiques.

Les réseaux d'accès optique sont à l'avant-garde des technologies de communication, offrant des solutions haut débit efficaces pour répondre aux besoins croissants des utilisateurs. Parmi ces réseaux, les réseaux PON (Passive Optical Network) traditionnels ont longtemps dominé, utilisant le multiplexage temporel (TDM : Time Division Multiplexing) pour partager la bande passante entre les abonnés. Cependant, malgré leur popularité, les réseaux PON TDM présentent des défis majeurs. La synchronisation des signaux et la gestion des modules de réception à l'OLT (Optical Line Transmission) sont des problèmes complexes, limitant le nombre d'abonnés pouvant être desservis et compromettant la sécurité des données. De plus, la bande passante du TDM-PON est intrinsèquement limitée, ce qui peut entraîner des goulets d'étranglement dans les réseaux à forte demande.

Face à ces défis, les réseaux WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing PON) ont émergé comme une alternative prometteuse. En utilisant le multiplexage en longueur d'onde pour distribuer les signaux, le WDM-PON offre une bande passante plus élevée et une meilleure sécurité des données. Cependant, cette solution n'est pas sans inconvénients, principalement en termes de coût élevé.

Dans ce contexte, notre projet de fin d'étude vise à trouver un compromis entre ces deux approches. En combinant les avantages du TDM-PON et du WDM-PON, nous cherchons à optimiser la bande passante et la sécurité tout en minimisant les coûts. Notre objectif est de proposer une solution innovante qui répond aux besoins croissants en connectivité haut débit

tout en restant économiquement viable.

Notre travail est organisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous effectuerons une étude générale sur la fibre optique

Le deuxième chapitre portera sur les réseaux d'accès optique et les technologies de PON. Ensuite, dans le troisième chapitre nous avons parlé sur la nouvelle technologie de PON et les réseaux TWDM-PON

Le dernier chapitre est consacré pour simulations et résultats.

En fin nous avons terminé notre mémoire par une conclusion générale.

Chapitre 1 : Généralités sur la fibre optique

1.1 Introduction

Dans le domaine des télécommunications, les moyens de transport traditionnels comme les câbles en cuivre atteignent leurs limites en termes de vitesse et de capacité. Les fibres optiques, elles, sont les meilleurs moyens de transport actuels pour créer des réseaux ultra-rapides et supporter la demande croissante en données de leurs utilisateurs. En prévision de cette demande croissante, nous choisissons les fibres optiques car elles sont les seules à pouvoir offrir une performance à long terme et à supporter de multiples utilisateurs et équipements connectés en même temps.

Dans ce chapitre, nous allons explorer de manière détaillée leur structure, les types de fibres existants, les principes fondamentaux de leur fonctionnement, ainsi que leurs caractéristiques. Nous aborderons également les systèmes de transmission optique, les applications pratiques, ainsi que les avantages et inconvénients associés à l'utilisation de fibres optiques.

1.2 Historique

La fibre optique, un élément essentiel des systèmes de communication exploitant les ondes lumineuses, a une histoire riche et complexe. Les premières tentatives de transmission de lumière à travers des fibres de verre ont été faites au début du XXe siècle, mais ce n'est qu'à partir des années 1950 que la fibre optique a commencé à être utilisée de manière significative.

En 1952, le physicien Narinder Singh Kapany a inventé le terme "fibre optique" et a publié un article décrivant la transmission de lumière à travers des fibres de verre. En 1953, le chercheur britannique Harold Hopkins a inventé le fibroscope, un appareil qui permettait de transmettre des images à travers des fibres de verre. Cependant, ces premières fibres optiques étaient peu performantes et ne pouvaient pas être utilisées pour la communication à longue distance.

En 1960, l'invention du laser a ouvert la voie à une communication à longue distance à faible perte. En 1964, le physicien Charles Kao a publié un article décrivant les avantages de la fibre optique pour la communication à longue distance. En 1966, il a démontré expérimentalement qu'il était possible de transporter de l'information sur de longues distances à travers la fibre optique.

Cependant, les premières fibres optiques étaient sujettes à des pertes de phase, ce qui

limitait leur utilisation pour la communication à longue distance. En 1970, des scientifiques de la compagnie Corning Glass Works ont produit la première fibre optique avec des pertes de phase suffisamment faibles pour être utilisée dans les réseaux de télécommunications. Cette fibre optique pouvait transporter 65 000 fois plus d'informations qu'un simple câble de cuivre.

En 1977, le premier système de communication téléphonique optique a été installé au centre-ville de Chicago. Aujourd'hui, les fibres optiques sont utilisées dans plus de 80 % des communications à longue distance dans le monde entier [5].

1.3 Définition de fibre optique

Les fibres optiques constituent les éléments essentiels des systèmes de communication exploitant les ondes lumineuses. D'ordinaire, elles contiennent et guident les ondes lumineuses en les condensant en cylindres, avec un noyau central entouré d'un revêtement isolant. On utilise fréquemment cette structure dans les communications, même si des variations existent en fonction des matériaux et des dimensions [6].

Ces différences influencent la propagation des signaux lumineux ainsi que la résistance aux perturbations environnementales telles que la pression, la flexion et la température.

1.3.1 Structure de la fibre optique

Une fibre optique est une structure composée de trois cylindres principaux :

- **Cœur** : un cylindre central qui est le guide d'onde optique où se propage la lumière.
- **Gaine optique** : une couche fine qui entoure le cœur et protège la lumière de l'atténuation et des perturbations extérieures.
- **Revêtement extérieur (protection)**: une gaine de protection qui protège la fibre optique contre les dommages mécaniques et environnementaux

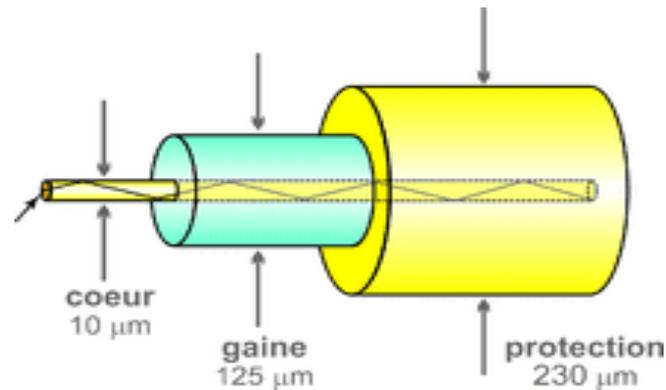


Figure 1. 1: Structure d'une fibre optique [2]

1.4 Principe de la fibre optique

La fibre optique exploite les propriétés réfractrices de la lumière pour transmettre des informations. Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique par l'une de ses extrémités avec un angle approprié, il est réfléchi de manière totale à l'intérieur de la fibre, se propageant ainsi jusqu'à l'autre extrémité. Même lorsque la fibre est courbée, il est possible de maintenir une propagation de la lumière avec très peu de pertes. Une fibre optique est souvent caractérisée par deux paramètres [5] :

- **Différence d'indice normalisé** : qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine :

$$\Delta = (n_c - n_g) / n_c \quad (1.1)$$

- n_c est l'indice de réfraction du cœur de la fibre.
- n_g est l'indice de réfraction de la gaine.

- **L'ouverture numérique** : elle est mesurée par rapport à l'axe de la fibre. Elle nous renseigne sur la capacité qu'a une fibre pour propager les rayons optiques

$$ON = \sin \theta = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad (1.2)$$

- n_c est l'indice de réfraction du cœur de la fibre.
- n_g est l'indice de réfraction de la gaine.

1.5 Types de la fibre optique

Dans le domaine des télécommunications, il existe deux principaux types de fibres optiques, les fibres monomodes et les fibres multimodes.

La différence principale entre ces deux types réside dans la dimension du cœur, qui est le guide d'onde de la fibre.

1.5.1 Fibre multimode

Seuls certains angles conduisent à des modes. Il est évident que la vitesse d'un mode dépend de l'angle. Le terme « multimode » signifie que plusieurs modes peuvent être guidés. Un nombre typique pour une fibre à saut d'indice est de 1000 modes (un mode correspond à un faisceau) [9].

a. Fibre optique a saut d'indice.

C'est le type de fibre le plus simple, directement issue des applications optiques traditionnelles.



Figure 1. 2:Fibre à saut d'indice [36]

La fibre à saut d'indice, peu utilisée aujourd'hui, a un débit limité à 50 Mb/s et disperse le signal. Son cœur homogène a un indice de réfraction n_1 , entouré d'une gaine optique d'indice n_2 inférieur à n_1 . La gaine, distincte du revêtement de protection, guide la lumière par réflexion totale à l'interface cœur-gaine. Les faisceaux lumineux réfractés peuvent être récupérés par la gaine, mais la capacité de transmission est limitée à environ 100 Mbits/s, avec une bande passante de 22 Mhz*km, car chaque faisceau doit parcourir une distance différente [9].

b. Fibre optique a gradient d'indice

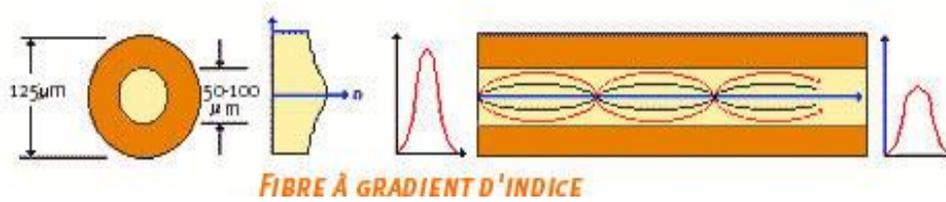


Figure 1. 3: fibre à gradient d'indice

Les fibres à gradient d'indice ont un cœur non homogène composé de couches de verre de différents indices de réfraction, décroissant de l'axe jusqu'à la gaine. Le guidage se fait grâce à l'effet du gradient d'indice, et les rayons suivent une trajectoire sinusoïdale. La gaine élimine les rayons trop inclinés, minimisant ainsi la dispersion du temps de propagation entre les rayons.

La bande passante de ce type de fibre est de 500 Mbits/s ou de 1 Ghz*km, supérieure à celle des fibres à saut d'indice, car la distance à parcourir par les rayons est plus courte, permettant ainsi une augmentation de la fréquence [9].

Le tableau suivant présente une comparaison entre ces deux types :

	MMF à SI	MMF à GI
Diamètre du cœur	50 à 62,5 μm	2 à 10 μm
Fenêtre spectrale d'utilisation	850nm 1330 nm	1300nm 1550nm
Effet de la dispersion	Plus important	Optimal

Tableau 1. 1: Comparaison entre fibre à gradient d'indice et fibre à saut d'indice

1.5.2 Fibre monomode

Dans cette fibre, l'objectif est de minimiser la distance parcourue par le faisceau lumineux. Pour y parvenir, le diamètre du cœur est réduit à moins de $10\mu\text{m}$, ce qui entraîne une quasi-absence de dispersion modale. En ne divisant pas le faisceau, la bande passante est augmentée, atteignant environ $100\text{ GHz}\cdot\text{km}$ ou 1000 Mbits/s . Cette fibre monomode classique est à saut d'indice, ce qui signifie qu'elle permet la propagation d'un seul mode, le fondamental. Cela évite les différences de vitesse rencontrées dans les fibres multimodes. Grâce à ces avantages, elle est largement utilisée pour les transmissions sur de longues distances [9].

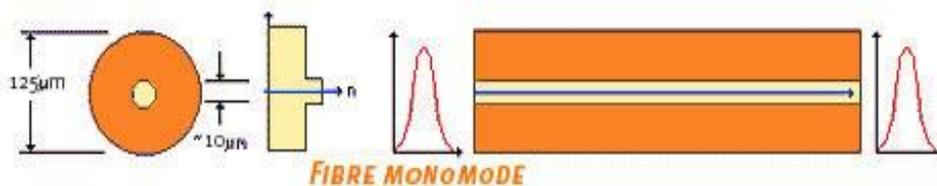


Figure 1. 4: fibre monomode [36]

1.5.3 Différence entre fibre multimode et mono mode :

Dans le tableau suivant on voit la différence entre une fibre multimode (MMF) et une fibre monomode (SMF)

Monomode SMF	Multimode MMF
<ul style="list-style-type: none"> • Bande passante très grande • Très Faible atténuation • Faible dispersion • Distance très grande 1db/km 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible bande passante • Faible atténuation • Forte dispersion • Distance courte 4km (réseaux d'accès)

Tableau 1. 2:différence entre une fibre multimode (MMF) et une fibre monomode (SMF)

Contrairement aux fibres optiques multimodales, les fibres monomodales présentent l'avantage d'avoir un très faible affaiblissement, une bande passante très importante, une dispersion moins dégradante, et de permettre des transmissions sur de très longues distances. Dans nos travaux, nous nous limitons à l'étude de la fibre optique monomodale.

1.6 Caractéristiques de la fibre optique monomodale

L'atténuation, la dispersion et les effets non linéaires sont les caractéristiques distinctives de la fibre optique.

1.6.1 Effets linéaires

L'effet linéaire dans les fibres optiques est un phénomène qui se produit lorsque la lumière se propage à travers la fibre et interagit avec les atomes de son matériau. Cet effet se manifeste par une atténuation de la puissance optique du signal, ainsi que par des phénomènes de dispersion chromatique et de dispersion de polarisation modale.

L'effet linéaire porte ce nom parce qu'il se manifeste de manière proportionnelle à la puissance optique du signal, signifiant que les perturbations augmentent linéairement avec l'intensité du signal. Pour atténuer cet effet, on utilise des techniques de régénération optique et de compensation de dispersion dans les systèmes de transmission optique [5].

1.6.1.1 Atténuations

Il existe deux types d'atténuations intrinsèques et extrinsèques à la fibre :

A. Atténuations intrinsèques

Cette fibre optique permet de caractériser l'affaiblissement du signal lors de sa propagation, elle est moins forte dans les systèmes à fibre optique que dans les systèmes électriques, elle est donnée en dB ou dBm par kilomètre.

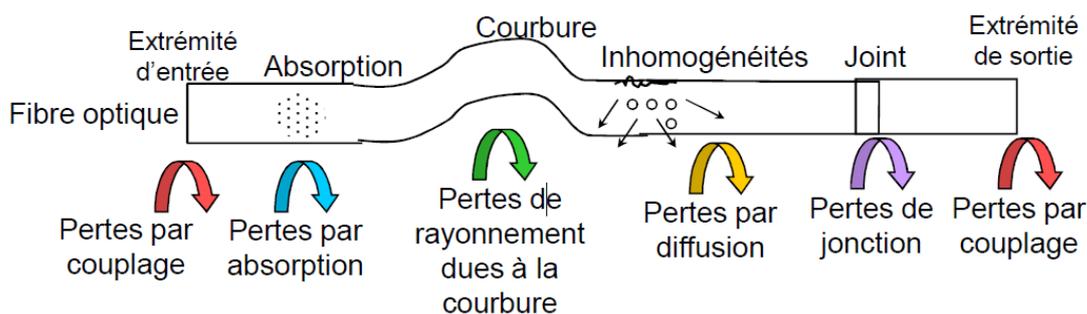


Figure 1. 5:Les atténuations affectent la fibre optique [37]

Elle est causée par :

- La diffusion de Rayleigh, due aux variations de l'indice au niveau microscopique.
- L'absorption moléculaire, due aux impuretés du cœur ; région infrarouge.

- L'affaiblissement par absorption atomique ou électronique, due aux impuretés ; région infrarouge.
- Une courbure trop prononcée qui augmente les pertes par réflexion [10].

B. Atténuations extrinsèques

- **Epissure raccordement**

Il s'agit cette fois de fuite de la lumière hors du guide provoqué par des déformations ou des discontinuités de celui-ci.

- **Les pertes aux raccordements** : Dues lorsque les fibres de mêmes dimensions ne sont pas parfaitement alignées ou lorsque des fibres ayant des dimensions et ouvertures numériques différentes.
- **Les pertes par courbure** : L'atténuation provoquée par une courbure dépend de la dimension du cœur et aussi du rayon de la courbure.

1.6.1.2 Dispersion

La dispersion se traduit par l'élargissement des impulsions à la sortie de la fibre optique. Si l'élargissement est trop important, les informations reçues sont erronées. On distingue deux types de dispersion : chromatique et modale de polarisation [4].

A. Dispersion chromatique

À l'heure actuelle, c'est la dispersion, et non pas l'atténuation, le facteur limitant de la transmission des signaux à haut débit sur de longues distances. La dispersion chromatique se manifeste par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation, comme le montre la figure, Ce type de dispersion apparaît dans le cas des fibres monomode et multimode. Elle est de l'ordre de Ps/km.

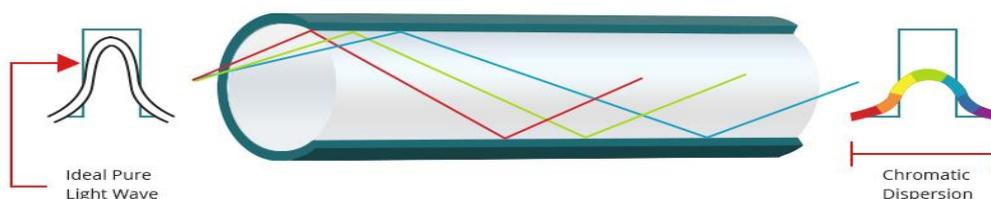


Figure 1. 6:dispersion chromatique [38]

B. Dispersion modale de polarisation

La dispersion modale de polarisation (PMD), un effet indésirable, se manifeste dans le domaine des télécommunications optiques à très haut débit [1]. Ce phénomène se produit dans les fibres optiques lorsque la lumière se propage avec une polarisation qui se divise en deux modes orthogonaux, voyageant à des vitesses légèrement différentes. Cela peut entraîner une déformation de la forme d'onde du signal et une détérioration de sa qualité. Il est causé par des fluctuations de la biréfringence de la fibre optique, qui représente la différence entre les indices de réfraction des deux modes de polarisation orthogonaux. Ces variations de biréfringence peuvent résulter de contraintes mécaniques ou thermiques sur la fibre optique, ou de défauts dans sa structure [3].

La PMD est généralement quantifiée en picosecondes par racine carrée de kilomètre. (ps/ $\sqrt{\text{km}}$) et sa formule pour calculer est :

$$\mathbf{PMD} = \sqrt{\mathbf{D}^2 + \mathbf{S}^2} \quad (1.3)$$

Avec :

D: la DGD (Differential Group Delay)

S : le facteur de couplage de la PMD (PMD coupling factor)

1.6.2 Effets non linéaires

Les effets non linéaires (variation de la vitesse de propagation liée à la longueur d'onde d'une part, liée à l'intensité d'autre part) sont généralement présents dans les fibres monomodes et se traduisent par :

- Une atténuation du signal en fonction de l'augmentation de la puissance transmise
- Une création de nouvelles longueurs d'onde à partir du signal

A. Effet Raman : C'est le plus connu des effets non linéaires. Il s'agit d'échange d'énergie entre l'onde optique et les vibrations du matériau.

B. Effet Kerr : est dû à la variation de l'indice de réfraction de la silice en fonction de l'intensité optique. [10]

1.7 Fenêtres de transmission

Dans le tableau suivant, on va voir les différentes fenêtres de transmission ensemble [11].

Fenêtre	Première	Deuxième	Troisième
Longueur d'onde	850nm	1300nm	1550nm
Type de fibre Optique	Multimode	Multimode et Monomode	Monomode
Atténuation	Forte 2 à 4 dB/km	Faible (0,4 à 1 dB/km)	Très faible (0,2 dB/km)
Dispersion chromatique	Forte	Quasi nulle	Faible, non nulle, très faible dans les fibres a dispersion décalée
Emetteurs	DEL, Lasers (très hauts débits)	DEL	Diodes laser DFB (monochromatique)
Récepteurs (Matériaux)	Silicium	GaInAS/InGe, HgCdte (très peu employés)	
Applications	Transmissions courtes distances, réseaux locaux, gigabit à très courtes distance	Transmissions moyennes et longues distances MAN et LAN haut débit	Transmissions très longues distances (WAN) et amplification optique

Tableau 1. 3:Les fenêtres de transmission

1.8 Applications de La fibre optique

La fibre optique est super importante et elle est utilisée dans plein de domaines différents, tels que :

-Industrie médicale : En médecine, elle aide les médecins à voir à l'intérieur du corps avec des appareils comme les endoscopes. C'est grâce à ses fils minces et flexibles qu'on peut explorer l'intérieur du corps et faire des opérations précises avec des lasers.

-Communication : Pour nos communications, les câbles à fibre optique sont essentiels. Ils permettent de transmettre et de recevoir des données super rapidement et avec une grande

précision. C'est super utile pour les réseaux Internet et tout ça.

-Défense : Même dans le domaine de la défense, la fibre optique est utilisée pour transférer des données ultrasecrètes. C'est utilisé dans les trucs comme les sous-marins pour détecter des sons sous-marins ou pour les avions pour avoir des connexions ultra-sécurisées.

-Radiodiffusion : À la télévision, la fibre optique permet d'avoir des images super nettes et des sons super clairs. Les radiodiffuseurs l'utilisent pour nous apporter des émissions de télé ultra-haute définition et d'autres services sympas [8].

1.9 Avantages et les inconvénients

Ce tableau nous montre simplement les avantages et les inconvénients de la fibre optique, pour qu'on puisse comparer facilement [7].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• Faible atténuation	<ul style="list-style-type: none">• Coût initial élevé
<ul style="list-style-type: none">• Large bande passante	<ul style="list-style-type: none">• Fragilité
<ul style="list-style-type: none">• Insensibilité aux perturbations électromagnétiques	<ul style="list-style-type: none">• Compétences spécialisées requises
<ul style="list-style-type: none">• Légèreté	<ul style="list-style-type: none">• Disponibilité géographique limitée

Tableau 1. 4:les avantages et les inconvénients

1.10 Conclusion

La fibre optique émerge comme une technologie révolutionnaire dans le monde des télécommunications, offrant des performances inégalées en termes de vitesse, de fiabilité et de capacité de transmission des données. À travers ce chapitre, nous avons exploré les fondamentaux de la fibre optique, comprenant sa structure et son fonctionnement, avec une comparaison entre la technologie classique utilisant le cuivre comme support de transmission et la technologie actuel utilisant le support du siècle nommée la fibre optique.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons les réseaux d'accès optique.

Chapitre2 :Réseaux d'accès optiques

2.1 Introduction

Les réseaux d'accès optique représentent une composante cruciale de l'infrastructure des télécommunications modernes, permettant de répondre à la demande croissante en services de communication à haut débit. En utilisant la technologie de la fibre optique, ces réseaux offrent des performances supérieures en termes de vitesse, de capacité et de fiabilité par rapport aux technologies traditionnelles de cuivre. L'évolution des réseaux d'accès optique a conduit au développement de diverses architectures et standards, visant à optimiser l'efficacité et la couverture des services.

Dans ce chapitre, nous explorerons les différents types de réseaux d'accès optique, avec un focus particulier sur les réseaux optiques passifs (PON). Nous commencerons par une présentation générale des principes de fonctionnement de ces réseaux, suivie par une analyse des deux principales architectures de réseaux FTTH (Fiber to the Home) : le point à point (P2P) et le point à multipoint (PON). Nous examinerons ensuite les différents standards X-PON, en mettant en lumière les spécificités et les avantages du réseau GPON (Gigabit Passive Optical Network), qui est devenu un standard de référence pour le déploiement de services FTTH. Par cette exploration, nous viserons à fournir une compréhension complète des réseaux d'accès optique et de leur rôle essentiel dans l'extension des capacités de nos infrastructures de télécommunications.

2.2 Présentation

Un réseau d'accès est défini comme l'ensemble des infrastructures utilisées pour connecter les terminaux de télécommunications entre un utilisateur final et un nœud du réseau métropolitain. La distance entre ces terminaux est généralement d'environ vingt kilomètres (20 km). Le réseau d'accès permet aux utilisateurs de se connecter au cœur du réseau afin de profiter des services fournis par celui-ci [18].

Ces réseaux se composent de deux parties distinctes : une partie utilisant la fibre optique et une autre utilisant un conducteur métallique qui s'étend jusqu'au terminal de l'abonné. Les techniques du réseaux d'accès optique sont employées pour raccorder la fibre optique aussi près que possible de l'utilisateur final, ce qui améliore la qualité de service, notamment en termes de débit [13].



Figure 2. 1:Présentation d'un système de réseau d'accès

De nos jours, pour le déploiement de la fibre jusqu'au domicile dans les réseaux d'accès optique, le PON se distingue comme la solution la plus économique.

2.3 Technologie FTTX

Les fibres optiques peuvent être déployées selon différentes topologies FTTX, où la variable < X > désigne le point final de la fibre optique. Les techniques les plus couramment employées dans le FTTX sont FTTH, FTTB et FTTC.

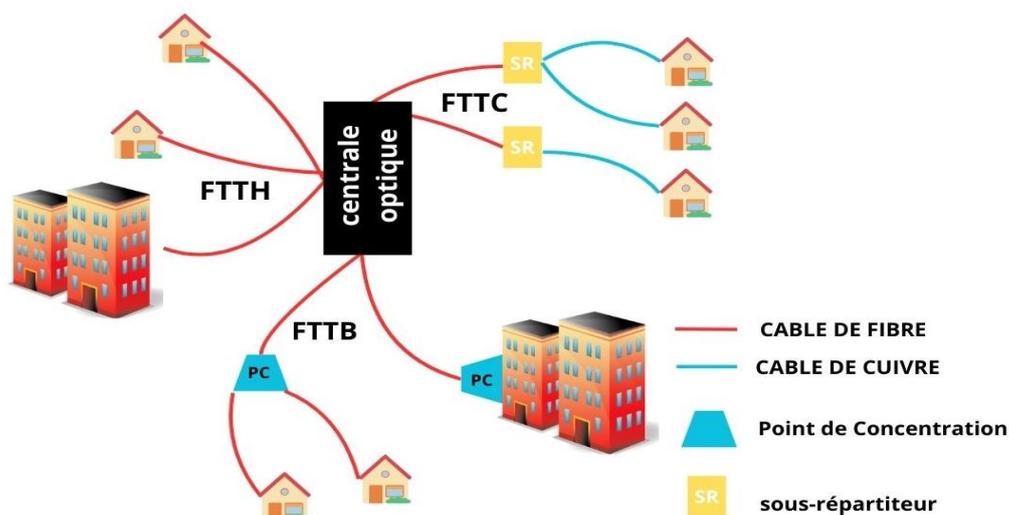


Figure 2. 2: Architecture d'un réseau d'accès optique

2.3.1 FTTC (Fiber to the curb)

La terminaison du réseau optique peut être localisée dans une chambre souterraine, une armoire sur la voie publique (sous-répartiteur), un centre de télécommunication ou sur un poteau. Lorsque la fibre optique atteint le trottoir, cette configuration est appelée Fiber to the

Curb (FTTC). Si elle atteint le sous-répartiteur, elle est alors désignée sous le nom de Fiber to the Cabinet (FTTCab). Selon la situation, il est envisageable de réutiliser le réseau terminal en cuivre existant ou de mettre en place une distribution terminale par voie radioélectrique. La figure ci-dessous illustre les différents composants d'un réseau FTTC/FTTCab [19].

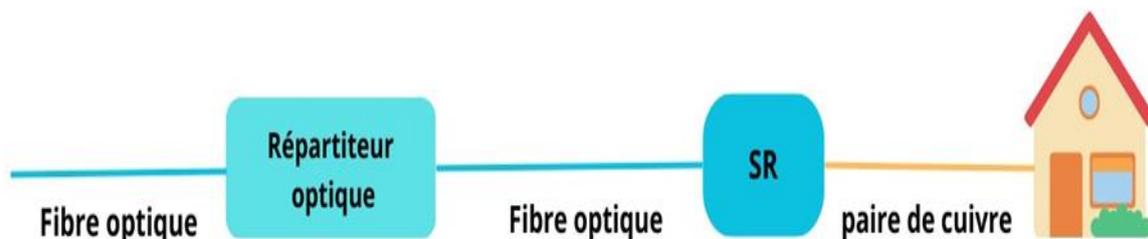


Figure 2. 3: Structure d'un réseau FTTC

2.3.2 FTTB (Fiber To The Building)

Le point de distribution pour le FTTB est habituellement situé au pied de l'immeuble, dans une armoire ou un conduit sur le palier, voire dans un local technique dédié. Cet emplacement est partagé entre plusieurs abonnés, qui y sont connectés via des liaisons en fil de cuivre. Pour améliorer la bande passante et la portée, les câbles de cuivre reliant le répartiteur au Point de Concentration (PC) seront progressivement remplacés par des câbles à fibre optique [20].

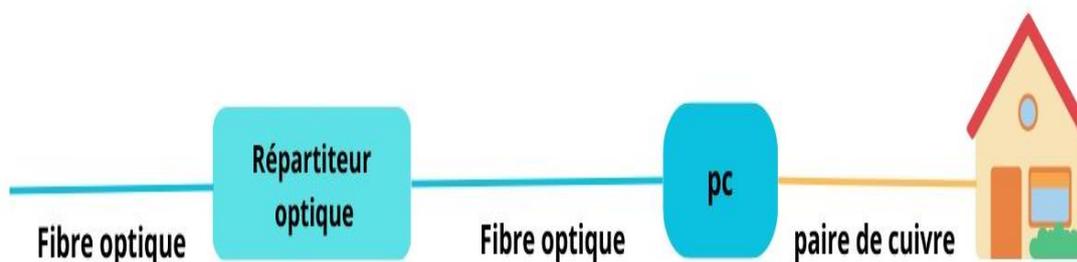


Figure 2. 4: Structure d'un réseau FTTB

2.3.3 FTTH (Fiber To The Home)

La technologie de la fibre jusqu'à l'abonné (FTTH) établit une connexion optique directe jusqu'au point de raccordement du particulier, offrant ainsi une bande passante maximale à ce type d'abonnés. Cette solution, bien que fournissant des performances exceptionnelles, peut s'avérer coûteuse à installer, ce qui explique sa prédominance dans les zones de construction récente. Cependant, l'un des défis potentiels du FTTH réside dans l'emplacement de l'alimentation électrique. Étant donné que l'alimentation électrique ne peut pas être acheminée par des câbles de fibre optique, ces déploiements peuvent nécessiter l'installation de lignes électriques distinctes. Malgré ces obstacles, le FTTH est devenu l'une des solutions les plus populaires à l'échelle mondiale [21].

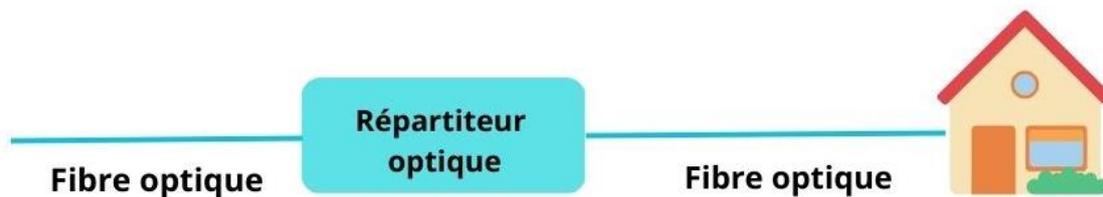


Figure 2. 5: Structure d'un réseau FTTH

2.4 Composants principale d'un réseaux PON

Réseau optique passif PON est basé sur trois éléments essentiels :

- OLT (Optical Line Terminal, ou Terminaison de Ligne Optique)
- ONU (Optical Network Unit ou Unité de réseau optique)
- Le coupleur
- La fibre optique

2.4.1 OLT (Optical Line Terminal)

L'OLT (Optical Line Terminal) constitue l'équipement principal dans les réseaux d'accès optique. Il est positionné au niveau du central et joue un rôle actif dans l'envoi et la réception de signaux lumineux porteurs de données. Il assure la distribution de services tels que l'internet, la téléphonie et la vidéo via un lien de collecte. Son transmetteur optique comprend

un module comportant généralement une diode laser comme émetteur, tandis qu'un récepteur permet d'ajuster le seuil de décision de la photodiode en fonction des paquets de données reçus. Pour être opérationnel, l'OLT doit être conforme aux normes établies par l'ITU (Union internationale des télécommunications) [12].



Figure 2. 6: OLT (Optical Line Terminal)

2.4.2 ONU (Optical Network Unit)

L'ONU peut être considéré comme un modem optique auquel le client vient connecter sa passerelle d'accès au haut débit. C'est un élément terminal du réseau optique. L'ONU se compose d'un module, d'un émetteur optique à base d'une diode LASER et un photorécepteur [12].

L'ONU (Optical Network Unit) est directement en communication avec l'OLT. Pour des considérations économiques et de gestion des équipements, les ONU émettent sur une seule longueur d'onde.



Figure 2. 7: ONU (Optical Network Unit)

L'ONT Comprend un module optique qui fonctionne de manière similaire au module OLT. Ce module comprend un laser opérant ou un modulateur externe, un filtre WDM et un

photodétecteur [25].

- **Photodiode :**

La photodiode est un dispositif de détection qui transforme un signal lumineux en courant électrique. On distingue principalement deux types de photodiodes : la photodiode PIN et la photodiode avalanche APD. La photodiode APD, privilégiée pour les longues distances comme les réseaux de transport, offre une sensibilité supérieure. En effet, cette sensibilité est équivalente à celle d'une photodiode PIN multipliée par un facteur d'avalanche M [26].

2.4.2.1 Modulateur directe (interne)

Le modulateur direct, également connu sous le nom de LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), fonctionne en modulant directement l'intensité du signal électrique en optique (voir la figure 2.8). Bien que la modulation directe soit économique à mettre en œuvre, elle est limitée en termes de bande passante. En effet, sa vitesse de transmission ne dépasse généralement pas les 10 Gbit/s.

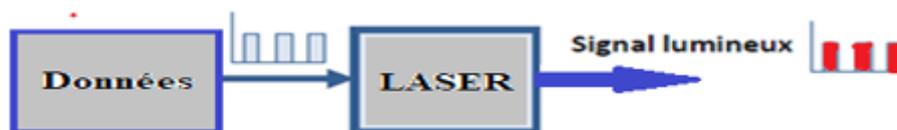


Figure 2. 8:Schéma de principe de la modulation directe

2.4.2.2 Modulation indirecte (externe)

Un modulateur externe est un dispositif qui permet de moduler l'intensité ou la phase de la source lumineuse (le LASER) de manière externe (voir la figure 2.5). Dans ce cas, le LASER reste constamment allumé tandis que le modulateur externe agit comme un "obturateur" contrôlé par les informations à transmettre.

Contrairement à la modulation interne, la modulation externe permet d'atteindre des débits plus élevés, mais elle nécessite généralement un investissement plus important pour son déploiement.

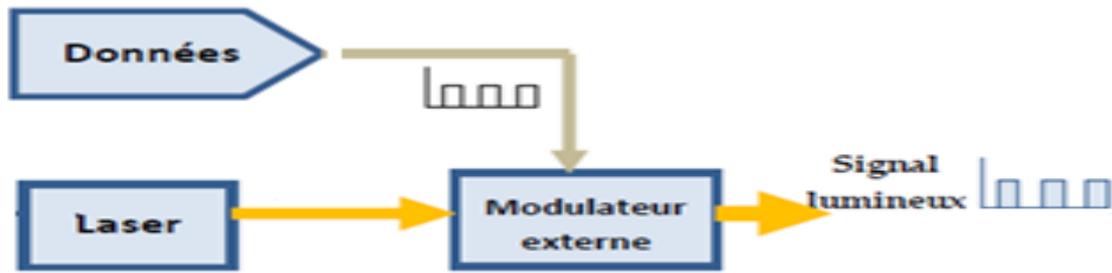


Figure 2. 9:Schéma de Principe de la modulation externe

2.4.2.3 Comparaison des deux modulations

La modulation directe reste une méthode largement utilisée pour transmettre des données à des débits de quelques Gbit/s, selon la qualité du laser. Cependant, au-delà de 5 Gbit/s, la modulation externe devient indispensable pour garantir une qualité de transmission adéquate. Malgré les défauts potentiels des modulateurs, leur impact reste généralement limité.

2.4.3 Coupleur optique

Le coupleur optique, également appelé "splitter", est un dispositif passif positionné le long du trajet de la fibre optique entre l'OLT et les ONT. Il joue le rôle de diviseur ou de concentrateur de la transmission. Cet équipement passif fonctionne uniquement grâce à la propagation de la lumière à l'intérieur de la fibre [24].

Les coupleurs optiques compacts et de très faibles dimensions sont très accessibles et se déclinent en différentes proportions allant de 1x2 à 1x32 jusqu'à 1x64 au plus, pour répondre à la croissance du nombre d'utilisateurs et à l'augmentation de la consommation de services, donc de bande passante sur une zone [23].

La couplure optique et le multiplexage par répartition dans le temps (TDM, Time Division Multiplexing) sont deux technologies complémentaires utilisées pour améliorer l'efficacité et la capacité des réseaux de communication. La couplure optique, qui concerne la transmission de signaux lumineux à travers des fibres optiques, joue un rôle crucial dans les infrastructures de communication modernes en offrant une transmission de données à haut débit avec une faible perte de signal. Le TDM, de son côté, permet de maximiser l'utilisation de la bande passante d'un canal de communication en attribuant des intervalles de temps distincts à différents signaux. Lorsque ces deux technologies sont combinées, elles permettent de transmettre plusieurs flux de données à haute vitesse sur une seule fibre optique, optimisant

ainsi la capacité du réseau. Par exemple, dans un réseau de télécommunications optique, le TDM peut être utilisé pour diviser la capacité de la fibre en multiples canaux temporels, chacun transportant des données différentes, tandis que la couplure optique assure une transmission efficace et fiable de ces données sur de longues distances. Cette synergie permet non seulement d'améliorer la performance du réseau mais aussi de réduire les coûts en maximisant l'utilisation des infrastructures existantes [28].

2.5 Principe de fonctionnement d'un réseau PON

Les réseaux PON (Passive Optical Network) font appel à des coupleurs optiques pour séparer le signal descendant émis par un seul OLT (Optical Line Terminal) en plusieurs voies descendantes vers les utilisateurs finaux. De manière similaire, ces coupleurs regroupent plusieurs voies ascendantes de signaux provenant des utilisateurs finaux vers le même OLT.

2.5.1 Sens montant

Comme le coupleur est passif et que toutes les ONT émettent à la même longueur d'onde, si les signaux de deux ONT arrivaient simultanément au coupleur, ils en ressortiraient mélangés sous forme d'un seul signal pour l'OLT.

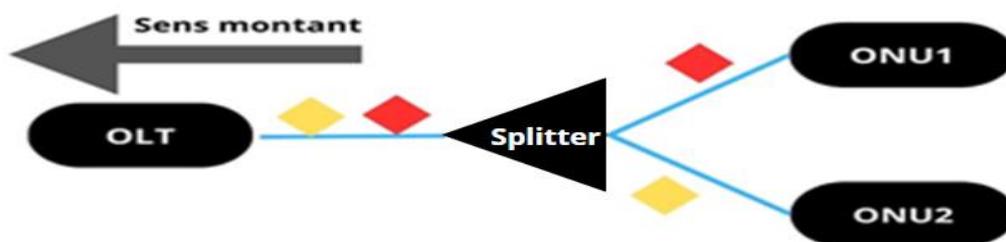


Figure 2. 10: PON en sens montant

2.5.2 Sens descendant

Dans le sens descendant, chaque abonné ne reçoit que les données qui lui sont destinées. Toutes les ONT reçoivent l'ensemble des données, mais seule celle concernée les transmet dans le réseau interne de l'abonné, comme illustré dans la figure suivante [23].



Figure 2. 11: PON en sens descendant

2.6 Architecture des réseaux d'accès optique

Il existe deux types d'architectures physiques de réseaux d'accès optique pour acheminer la fibre jusqu'au client final :

- Architecture point à point (P2P).
- L'Architecture point à multipoint (PON).

2.6.1 Architecture point à point

Dans cette configuration, appelée "point à point", chaque abonné est relié directement au répartiteur optique le plus proche par une fibre dédiée. Ce schéma rappelle celui de la boucle locale téléphonique traditionnelle. Ce modèle assure une séparation complète entre les lignes des différents abonnés, offrant ainsi une sécurité maximale et une disponibilité totale de la ligne sans partage de débit [20].

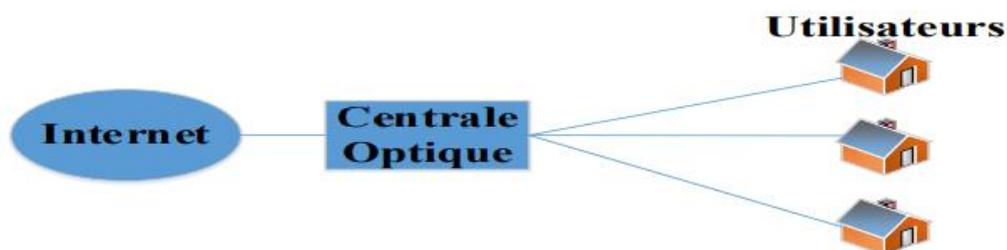


Figure 2. 12: Architecture point à point

Cette configuration est la plus simple à déployer. Elle se caractérise par un lien direct en fibre optique entre le commutateur et l'utilisateur, formant ainsi la topologie physique d'un réseau d'accès optique. Elle est principalement associée aux technologies de hiérarchie

numérique synchrone (SDH/SONET) et aux technologies xDSL (ADSL, HDSL, VDSL, etc.) [23].

Le tableau suivant représente les avantages et les inconvénients de P2P :

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none">-La gestion du réseau est très simple- Bande passante illimitée-Une plus grande flexibilité de service.-Meilleur budget optique car il n'y a pas d'optique entre OLT et ONT.	<ul style="list-style-type: none">-Ne partagez pas les ports OLT ou optiques, déployez de nombreuses fibres (pas très économique).-Pas de mutualisation de fibre.-Prix d'installation très élevé.-Beaucoup de fibres à déployer.

Tableau 2. 1:Avantages et inconvénients de réseau P2P

2.6.2 Architecture point à multipoint

Dans ce système, une seule ligne de fibre part du centre optique et dessert plusieurs abonnés. Pour cela, chaque abonné est connecté à cette fibre à l'aide d'un dispositif passif, comme un coupleur ou un splitter, installé près de la zone desservie. Chaque abonné reçoit toutes les données envoyées par le centre optique via un équipement appelé OLT (Optical Link Terminal), puis ces données sont distribuées à chaque abonné par un équipement récepteur nommé ONT (Optical Network Termination) situé dans chaque foyer. De plus, ce système assure que chaque ONT et OLT ne traitent que les données concernant l'abonné qui lui est associé (figure 2.10) . Ce type de réseau est généralement désigné sous le terme de PON (Passive Optical Network ou Réseau Optique Passif). Le qualificatif "passif" fait référence au splitter, qui ne comporte aucun élément électronique.



Figure 2. 13:Architecture point à multipoint

Le tableau II 2 ci-dessous expose les avantages et les inconvénients de point à multipoint :

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Architecture favorable à la diffusion. -Aucun élément électronique actif dans le réseau d'accès - Réduit des dépenses capitales et des couts d'exploitation associés. 	<ul style="list-style-type: none"> -Bande passante partagée et limitée. -Zone de couverture limitée : au maximum 20 Km en fonction du nombre de divisions -Sécurisation des données requises.

Tableau 2. 2:les avantages et les inconvénients de point à multipoint

2.6.3 Comparaison entre les deux architecture P2P - P2M

Le tableau suivant compare les caractéristiques de ces trois architectures [2]

Paramètre	P2P	P2MP
Distance (Km)	15	20
Fibre	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
Energie	2 watt / abonné Dissipé au NA	0,6 watt / abonné Dissipé au NA
Débit maximal	100Mbit/s ou 1Gbit/s symétriques selon connexion*	Jusqu'à 2,5Gbit/s en descendant et 1Gbit/s en montant*
Débit garanti	100Mbit/s ou 1Gbit/s symétriques selon connexion*	Jusqu'à 78Mbit/s descendants en split de 32*
Equipement Actif dans le réseau de desserte	Non	Non
Dégroupage	Actif et passif au NA	Actif et passif au NF
Place occupée	1U pour 24 à 48 Abonnés	4U pour 512 à 2304 abonnés

Tableau 2. 3:Comparaison entre les deux architecture P2P - P2M

2.7 Technologies de PON

Un Réseau Optique Passif (PON) est une technologie de transmission et d'accès par fibre optique point à multipoint. Elle utilise la diffusion en aval et l'accès multiple par division temporelle en amont. Les topologies courantes incluent l'arbre, l'étoile et le bus, nécessitant uniquement l'installation d'un séparateur optique au point de dérivation. Les variantes de PON comprennent l'APON, l'EPON, le BPON et le GPON.

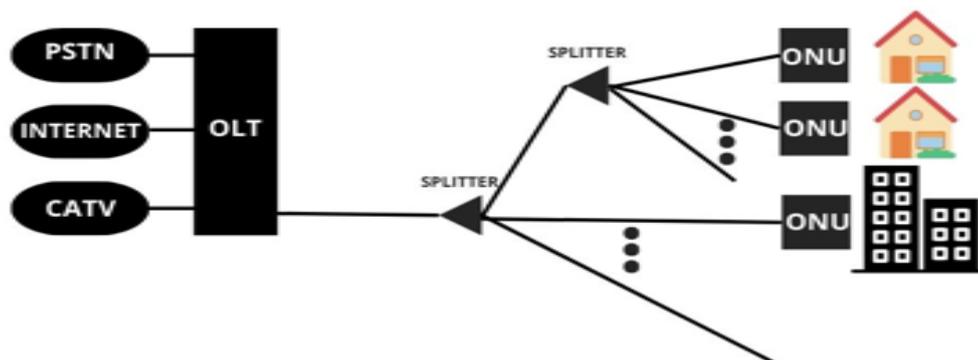


Figure 2. 14: PON – Passive Optical Network

Il existe plusieurs variantes de technologies PON telles que l'APON, le BPON, le GPON, l'EPON, etc.

2.7.1 ATM-PON

APON, ou ATM-PON, est une abréviation pour Asynchronous Transfer Mode-based Passive Optical Network. Il s'agit de la première norme PON développée. Cette technologie repose sur l'utilisation de technologies de multiplexage multimédia à différentes vitesses ainsi que sur la technologie ATM. APON est conforme à la norme UIT-T G.983.1

La norme UIT-T G.983 définit :

- Vitesse en aval et en amont,
- Les fonctions de contrôle des données, de la voix et de la vidéo,
- Dispositifs de sécurité,
- DBA (Dynamics Bandwidth Allocation), etc [27].

Ci-dessous, la structure du PON ATM est représentée dans la figure suivante :



Figure 2. 15:architecture du ATM-PON [27]

APON est constitué de trois composants principaux : l'OLT (Optical Line Terminal), l'ODN (Optical Distribution Network) et l'ONU (Optical Network Unit). La distance maximale entre l'OLT et l'ONU est de 20 km, et le nombre maximum de subdivisions PON est de 32.

APON a pris en charge une gamme de services comprenant les données, la voix et la vidéo, avec l'utilisation de cellules ATM pour tous ces services. Dans un système en aval, une seule fibre était utilisée à 1550 nm pour tous les services, tandis qu'en amont, 1310 nm était utilisé pour les données et la voix. Si le système utilisait deux fibres, une était dédiée à l'aval et l'autre à l'amont. Dans cette situation la longueur d'onde était de 1310 nm pour tous les services.

La vitesse maximale en aval était de 155 Mbps ou 622 Mbps, tandis que la vitesse maximale en amont était de 155 Mbps. Les paquets de données étaient de taille fixe, avec une taille de cellule de 53 octets [27].

Ci-dessous, vous trouverez un tableau présentant les principales caractéristiques de la technologie ATM PON :

La norme	ITU-T G.983.1
Taille des cellules de paquets de données	53 bits
Vitesse maximale	155 Mbps ou 622 Mbps pour l'aval 155 Mbps pour l'amont
Données	ATM
Voix	ATM
Vidéo	ATM
rapport de division	16 ou 32
Portée maximale	20 Km
Type de fibre	G.652
Transmission	Mono fibres (US 1310nm et DS 1550nm) ou fibres doubles (US 1310nm et DS 1310nm)
Budget d'électricité	Classe B : 10 – 25 dB Classe C : 15 – 30 dB

Tableau 2. 4:les caractéristiques de la technologie ATM PON

La technologie ATM PON offrait trois services ainsi qu'un faible coût pour les équipements et l'entretien du réseau. Cependant, APON n'était pas largement adopté. Son principal inconvénient résidait dans sa bande passante limitée pour les utilisateurs [27].

2.7.2 B-PON

BPON est l'acronyme de Broadband Passive Optical Network, soit Réseau Optique Passif à Large Bande. Il s'agit de la deuxième norme PON, qui utilise l'ATM comme protocole de signalisation et de transfert. La technologie BPON est conforme à la norme UIT-T G.983.

La norme UIT-T G.983 définit :

- Vitesse en aval et en amont,
- Les fonctions de contrôle des données, de la voix et de la vidéo,
- Ajouter la longueur d'onde pour la vidéo,
- Caractéristiques de sécurité, et
- DBA (Dynamic Bandwidth Allocation).

Dans la figure suivante, nous pouvons voir l'architecture du BPON.

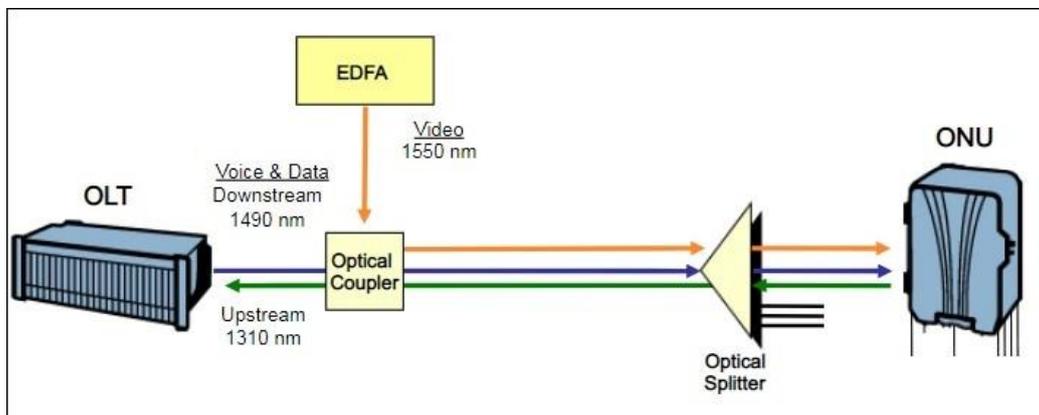


Figure 2. 16:architecture du BPON [27]

BPON est constitué de trois composants principaux : l'OLT (Optical Line Terminal), l'ODN (Optical Distribution Network) et l'ONU (Optical Network Unit). La distance maximale entre l'OLT et l'ONU est de 20 km, avec un nombre maximal de divisions PON de 32.

Les signaux ATM de BPON sont opérationnels à des vitesses de 155, 622 et 1244 Mbps. Les signaux destinés aux données et à la voix utilisent une longueur d'onde de 1490 nm pour l'aval et de 1310 nm pour l'amont. La taille des cellules de paquets de données est de 53

octets. La vitesse maximale en aval atteint 1,2 Gbps, tandis que la vitesse maximale en amont est de 622 Mbps.

Le signal vidéo est un signal modulé analogique, nécessitant des équipements distincts pour cette partie du système. Ces dispositifs incluent l'émetteur optique à 1550 nm et l'amplificateur optique - EDFA (pour plus d'informations détaillées, vous pouvez consulter mon article sur l'EDFA). Pour la modulation vidéo, diverses technologies peuvent être utilisées telles que QPSK, 64QAM, 256 QAM [27].

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques de la technologie BPON.

La norme	ITU-T G.983
Taille des cellules de paquets de données	53
Vitesse maximale	1,2 Gbps pour l'aval 622 Mbps pour l'amont
Données	ATM
Voix	ATM
Vidéo	1550 nm
rapport de division	16 ou 32
Portée maximale	10-20 km
Type de fibre	G.652
Transmission	Mono fibre
Budget d'électricité	Classe A: 5 – 20 dB Classe B: 10 – 25 dB Classe C: 15 – 30 dB

Tableau 2. 5:les caractéristiques de la technologie BPON

BPON offrait des services à haute vitesse et triples comprenant les données, la voix et la vidéo. Malgré cela, BPON n'était pas largement adopté. Cependant, l'un de ses principaux avantages résidait dans son faible coût d'entretien du réseau. De plus, BPON offrait une gestion du trafic flexible et évolutive [16].

2.7.3 Ethernet-PON

EPON, ou 1G-EPON, est une abréviation pour Ethernet Passive Optical Network, soit Réseau Optique Passif Ethernet. Cette technologie est conforme à la norme IEEE 802.3ah. Tous les paquets de données sont encapsulés dans des trames Ethernet, ce qui différencie EPON des technologies utilisant des cellules ATM. De plus, EPON utilise le protocole IP pour transporter les données vidéo, la voix et les données. Ce système peut également prendre en charge un service CATV selon la norme DVB, avec une longueur d'onde dédiée de 1550 nm [27].

Dans la figure suivante, nous pouvons voir l'architecture du EPON.

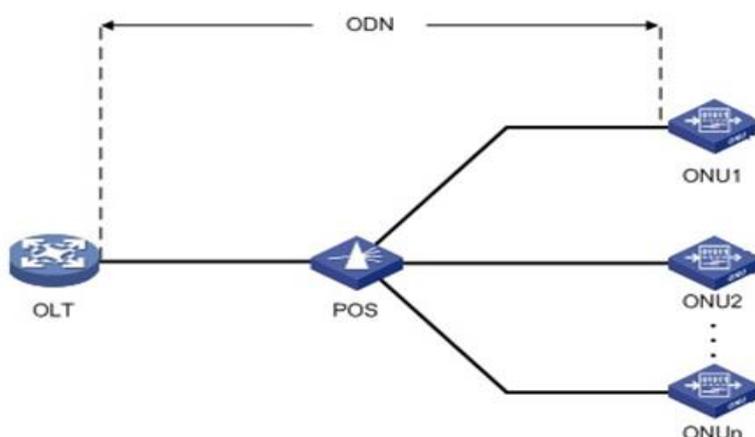


Figure 2. 17:architecture du EPON [27]

EPON est constitué de trois éléments principaux : l'OLT (Optical Line Terminal), l'ODN (Optical Distribution Network) et l'ONU (Optical Network Unit). Cette technologie utilise une seule fibre pour les deux directions, en utilisant la fibre SM IEC 60793-2-50 B1.1 ou B1.3 (conforme à la norme ITU-T G.652). La distance maximale entre l'OLT et l'ONU est de 20 km, et le nombre maximum de divisions PON est de 64, bien que le ratio de division typique soit de 16 ou 32

EPON prend en charge trois services : données, voix et vidéo. Cette technologie utilise un plan de longueur d'onde similaire à celui de BPON. Pour la transmission en aval, le système utilise une longueur d'onde de 1490 nm pour tous les services (sauf CATV), tandis que pour la transmission en amont, la longueur d'onde de 1310 nm est utilisée pour tous les services

La vitesse en aval et en amont est symétrique, avec une vitesse maximale de 1 Gbps (1 Gbps avant le codage 8B / 10B).

Voici les principales caractéristiques de la technologie EPON présentées dans le tableau suivant :

Standard	IEEE 802.3ah
Protocole	Ethernet
Longueur d'onde en aval	1490 nm pour les données, la voix et iptv, 1550 nm pour CATV
Longueur d'onde en amont	1310 nm
Vitesse maximale	1 Gbps pour l'aval
Prise en charge vocale	TDM sur paquet
Support vidéo	Vidéo IP + CATV
Nombre de fibres	1
rapport de division	Typique 16 ou 32, max 64
Portée maximale	20 Km
Type de fibre	G.652

Tableau 2. 6: caractéristiques de la technologie EPON

EPON propose trois services ainsi qu'un faible coût pour les équipements et la maintenance du réseau. Cette technologie offre des vitesses élevées en aval et en amont pour les clients. La principale force d'EPON réside dans sa compatibilité native avec toutes les applications Ethernet, ce qui en fait une solution très adaptée. Les applications IP incluent Internet, la téléphonie IP ou VoIP, l'IPTV, la vidéo à la demande (VoD), etc [27].

2.7.4 GPON

GPON, abréviation de Gigabit Passive Optical Network, est la troisième norme PON développée par l'UIT-T. Conçue après BPON, la technologie GPON a été élaborée pour

résoudre les limitations rencontrées dans la norme précédente.

La technologie GPON repose sur la norme UIT-T G.984, qui se divise en plusieurs parties. ITU-T G.984.1 spécifie les paramètres du réseau et les exigences pour la commutation de protection. ITU-T G.984.2 détaille les paramètres de l'ODN, les caractéristiques des ports optiques de liaison descendante/liaison montante à 2,5 Gbps/1,25 Gbps, ainsi que l'allocation de la couche physique supérieure. ITU-T G.984.3 couvre les spécifications de la couche GTC, l'architecture de multiplexage, la pile de protocoles, la structure de la trame de couche, les flux d'enregistrement et d'activation ONU, les spécifications DBA, les alarmes et les performances. Enfin, ITU-T G.984.4 traite de la structure des messages OMCI, de l'architecture de gestion des périphériques et des principes associés [27].

Dans la figure suivante, nous pouvons voir l'architecture du GPON

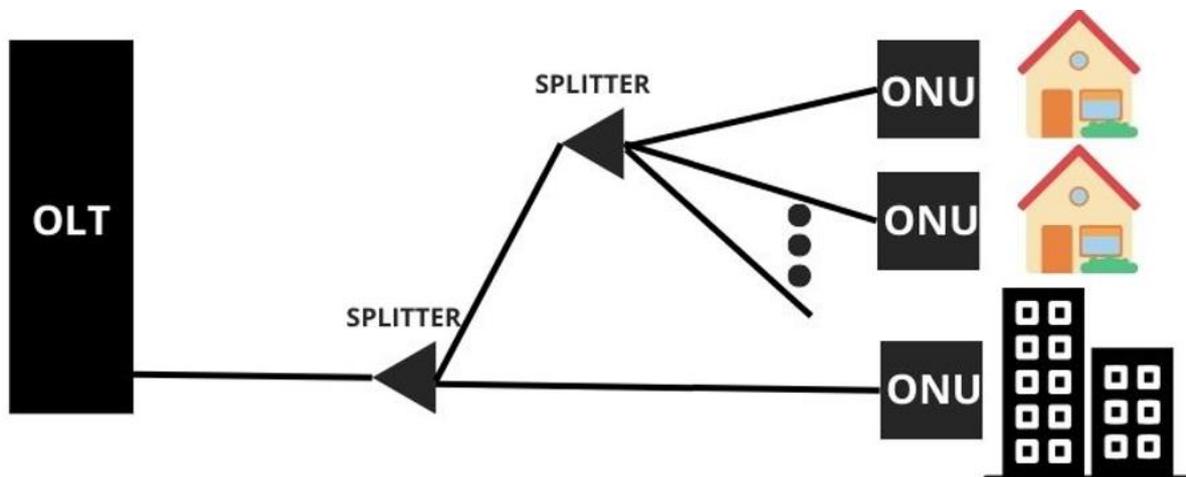


Figure 2. 18:architecture du GPON

Le système GPON se compose de trois éléments principaux : l'OLT (Optical Line Terminal), l'ODN (Optical Distribution Network) et l'ONU (Optical Network Unit). Bien que la portée logique maximale soit de 60 km, la portée physique maximale est de 20 km. Le ratio de partage varie de 32 à 128, avec un ratio de partage typique de 32 ou 64.

Cette technologie utilise la longueur d'onde de 1490 nm pour la transmission en aval et de 1310 nm pour la transmission en amont. Ces longueurs d'onde sont utilisées pour la vidéo (IPTV) et les données (HSI et VOIP). En mode de diffusion en aval, l'OLT envoie des données à toutes les unités d'intervention d'urgence, qui les reçoivent en fonction de leur ID de port GEM. En amont, chaque ONU dispose d'un créneau horaire dédié à la transmission. L'OLT

alloue ces créneaux horaires aux ONU, qui peuvent transmettre uniquement pendant ces périodes. Cela fonctionne selon le principe des modes TDMA (Time Division Multiple Access).

La vitesse maximale pour la transmission en aval est de 2,5 Gbps, tandis que pour la transmission en amont, elle est de 2,5 Gbps / 1,25 Gbps. Typiquement, la vitesse est de 2,5 / 1,25 Gbps par port PON.

Le GPON prend en charge la protection du réseau à la fois en aval et en amont. Pour le réseau en aval, il existe plusieurs méthodes de protection, notamment la protection à tête unique de type B, la protection à tête double de type B, la protection à tête unique de type C, et la protection à tête double de type C.

Les technologies clés de GPON comprennent DBA (Dynamic Bandwidth Allocation), la télémétrie, la technologie optique et électrique en rafale, FEC (Forward Error Correction) et AES (Advanced Encryption System).

La technologie GPON peut être déployée dans divers scénarios, notamment FTTH (Fiber to the Home), FTTB (Fiber to the Building), FTTC (Fiber to the Curb), FTTD (Fiber to the Desk), FTTO (Fiber to the Office), FTTW (Fiber to the Wireless), etc.

Ci-dessous, vous trouverez un tableau présentant les principales caractéristiques de la technologie GPON [27] :

Standard	G.984
Trame	GEM
Longueur d'onde en aval	1490 nm
Longueur d'onde en amont	1310 nm
Vitesse	Max 2.5/2.5 Gbps ou typique 2.5/1.25 Gbps
Nombre de fibres	1
rapport de division	Max 128 ou typique 32 ou 64
Distance	Max 60 km ou typique 20 km
Type de fibre	G.652, G.657

Tableau 2. 7:les caractéristiques de la technologie GPON

La prochaine génération de PON est le 10G-PON ou NG-PON. La norme pour cette technologie est la G.987. Le 10G-PON peut être asymétrique - NG-PON - avec des vitesses de 10/2,5 Gbps, et symétrique - NG-PON - avec des vitesses de 10/10 Gbps. L'architecture de NG-PON est similaire à celle de GPON.

La nouvelle technologie fonctionne à d'autres longueurs d'onde (1578 nm pour l'aval et 1270 nm pour l'amont) et prend en compte un rapport de division plus élevé (254+). Avec l'utilisation de longueurs d'onde différentes, il est possible que les réseaux GPON et NG-PON coexistent dans le même réseau ODN. Les caractéristiques les plus importantes de cette nouvelle technologie PON sont présentées dans le tableau suivant :

Standard	G.987
trame	XGEM
Longueur d'onde en aval	1578 nm
Longueur d'onde en amont	1270 nm
Vitesse	Symétrique 10/10 Gbps ou asymétrique 10/2.5 Gbps
Nombre de fibres	1
Ratio de partage	Max 254+ ou typique 64
Distance	Max 60 km ou typique 20 km
Type de fibre	G.652, G.657

Tableau 2.7. Les caractéristiques de la technologie XGPON

2.7.5 Comparaison entre les différentes technologies

Toute cette technologie utilise une seule fibre pour la communication, avec des

longueurs d'onde différentes pour l'amont et l'aval. Vous trouverez ci-dessous les principales caractéristiques des technologies PON actuelles et anciennes dans le tableau suivant :

PON	APON	BPON	GPON	EPON	NG PON
Standard	G.983	G.983	G.983	802.3 ah	G.987
Trame	ATM	ATM	GEM	Ethernet	XGEM
Longueur d'onde en aval	1550 nm ou 1310 nm	1490 nm	1490 nm	1490 nm	1587 nm
Longueur d'onde en amont	1310 nm	1310 nm	1310 nm	1310 nm	1270 nm
Vitesse maximale	622/155 Mbps	1.2Gbps/622 Mbps	2.5/1.25 Gbps	1/1 Gbps	10/1.25 Gbps or 10/10 Gbps
Nombre de fibres	1 ou 2	1	1	1	1
rapport de division	32	32	128	64	128/254
Distance maximale	20 Km	20 Km	20Km	20 Km	20 Km/40 Km
Type de fibre	G.652	G.652, G.657	G.652	G.652	G.652, G.657

Tableau 2. 8: Comparaison entre les caractéristiques des technologies PON

2.8 Conclusion

Ce chapitre a fourni une vue d'ensemble complète des réseaux d'accès PON, en détaillant leurs composants principaux, leur principe de fonctionnement, leurs diverses architectures, ainsi que les technologies xPON et FTTx. Nous avons vu comment les composants tels que l'OLT, l'ONU et les splitters optiques jouent un rôle crucial dans le fonctionnement des réseaux PON. Nous avons également exploré les différentes architectures, comme GPON et EPON, et les technologies FTTx qui étendent la portée de la fibre optique jusqu'aux utilisateurs finaux. Ces éléments combinés illustrent l'importance et la polyvalence des réseaux PON dans la fourniture de services de communication modernes et haut débit.

Dans le prochain chapitre, nous entreprendrons une étude approfondie des réseaux PON de prochaine génération, en mettant l'accent sur le TWDM-PON.

Chapitre 3 : Réseaux TWDM-PON

3.1 Introduction

Ce chapitre aborde les évolutions des réseaux optiques passifs de nouvelle génération (NG-PON), en mettant l'accent sur le rôle crucial des organismes de normalisation dans le développement de ces technologies. Nous analyserons les spécificités de NG-PON1 et NG-PON2, en soulignant les avancées qu'elles apportent par rapport aux générations précédentes. Une attention particulière sera portée au système WDM-PON, qui permet de transmettre plusieurs signaux sur une seule fibre optique grâce à des longueurs d'onde distinctes, tout en discutant de ses avantages, tels que l'augmentation de la capacité de transmission, et de ses inconvénients, incluant la complexité et le coût élevés. De plus, nous explorerons l'hybridation TWDM-PON, qui combine le multiplexage temporel et le multiplexage en longueur d'onde pour optimiser les performances des réseaux. Enfin, nous examinerons les limitations actuelles de ces technologies et leurs implications pour le futur des réseaux de télécommunications.

3.2 Organismes de normalisation

Les standards ou recommandations pour la prochaine génération de réseaux d'accès optique sont discutés et normalisés par des organismes comme l'IEEE ou l'ITU-T. Ces normes visent principalement à créer un marché initial (le plus grand possible) pour les composants de base des systèmes, comme les circuits de traitement des trames en temps réel (couche MAC). Cela donne ensuite aux fabricants de systèmes une grande liberté pour différencier leurs produits, permettant ainsi aux opérateurs et clients de choisir leur propre stratégie de marketing.

3.2.1 L'ITU-T

Dans le domaine de l'accès optique partagé, l'ITU-T a joué un rôle crucial en finalisant et en officialisant les options prises par le groupe de travail FSAN. À partir de 2009, l'ITU-T a entrepris de développer des systèmes PON à 10 Gbit/s, en détaillant les directives établies par les opérateurs et les fournisseurs dans les études préliminaires menées au FSAN. En plus des discussions sur les systèmes NG-PON (Next-Generation Passive Optical Network), des travaux sur la possibilité de superposition du NG-PON avec le G-PON ont également été examinés. De plus, les solutions d'extension du budget optique par le biais de "Reach Extenders" (RE) ont été normalisées [14].

3.2.2 LE FSAN

FSAN (Full Service Access Network) est un organisme de normalisation dirigé par des opérateurs et des fabricants d'équipements, comptant 76 membres. Ce groupe de travail informel constitue une phase de pré-normalisation dont les résultats sont ensuite partagés avec différents organismes de normalisation (principalement l'UIT-T). Dans le cadre des préparatifs pour la succession du G-PON, les opérateurs FSAN ont identifié deux cadres techniques et calendriers, soulignant un point clé : le remplacement inévitable du G-PON à l'avenir [15].

L'UIT-T FSAN définit deux phases de migration principales pour remplacer G-PON :

- ✓ La première phase, appelée « NG-PON1 », nécessite une compatibilité avec l'infrastructure de classe B+ existante.
- ✓ La deuxième phase, baptisée « NG-PON2 », permet aux opérateurs d'apporter des modifications significatives à leur infrastructure

3.3 Normes de NG-PON1

NG-PON1 offre la possibilité de réutiliser l'infrastructure déployée pour G-PON. Il peut également être superposé sur des systèmes G-PON actifs sur la même infrastructure, permettant aux clients de migrer progressivement vers NG-PON1 sans perturber les clients restant sur G-PON. Il existe deux variantes de NG-PON1 : XG-PON1 et XG-PON2. Ces nouvelles normes PON formeront la série de recommandations G.987.x [22].

3.3.1 LA VARIANTE XGPON1 DU NG-PON1

La norme XG-PON1 fait partie intégrante de la nouvelle génération NGPON1. Elle permet d'atteindre des vitesses de transmission nettement supérieures au GPON, avec un débit descendant de 10 Gbit/s et un débit montant de 2,5 Gbit/s. Les longueurs d'onde utilisées sont distinctes de celles du GPON : 1575 et 1580 nm pour le trafic descendant, et 1260 à 1280 nm pour le trafic montant.

Cependant, afin de faciliter la transition depuis les réseaux GPON existants, l'infrastructure passive du XG-PON1 (fibres, coupleurs, etc.) a été conçue pour être similaire.

Cela permet de réutiliser une grande partie des composants déjà déployés. Néanmoins, cette homogénéisation nécessite l'introduction d'éléments de multiplexage WDM (coupleurs ou multiplexeurs), ce qui a un impact sur le budget optique disponible.

Pour garantir la rétrocompatibilité avec les réseaux GPON de classe B+ (budget optique de 13 à 28 dB), les pertes induites par ces composants WDM1 doivent être prises en compte, conformément à la norme G.984.5. Les spécifications détaillées de la couche physique du XG-PON1, incluant la définition des différentes classes de budget optique, ont été établies fin 2009 dans la recommandation G.987.2 [22].

Cela veut dire que les différentes catégories de budget optique sont définies dans le tableau qui suit.

	Nominal1 class (N1 class)	Nominal2 class (N2 class)	Extended1 class (E1 class)	Extended2 class (E2 class)
Minimum loss	14 dB	16 dB	18 dB	20 dB
Maximum loss	29 dB	31 dB	33 dB	35 dB

Tableau3. 1:Classes de pertes optiques définies dans la recommandation G.987.2

Ce standard spécifie également une portée similaire à celle du G-PON : 60 km avec une différence maximale de 20 km entre le client le plus proche et celui le plus éloigné du central.

Cependant, le XG-PON se distingue significativement du G-PON. Pour atteindre ses performances élevées, un code correcteur d'erreurs (FEC) doit être implémenté dans chaque sens de transmission, bien que son utilisation ne soit qu'optionnelle pour la transmission montante à 10 Gbit/s.

De nouvelles spécifications concernant l'Extension de Portée (ER) du XG-PON sont prévues pour 2012, détaillées dans la recommandation G.987.4 [22].

3.3.2 LA VARIANTE XG-PON2 DU NG-PON 1

Au sein de l'ITU-T FSAN, une variante du NG-PON1 appelée XG-PON2 a été étudiée. Cette variante se distingue du XG-PON1 par un débit descendant et montant de 10 Gbit/s.

La portée maximale du XG-PON2 est définie comme étant la même que celle du XG-PON1 et du G-PON, soit 60 km avec un écart maximal de 20 km entre l'abonné le plus proche et le plus éloigné du central. Cependant, les autres spécifications de la couche physique (budget optique, longueurs d'onde) n'ont pas encore été spécifiées pour plusieurs raisons:

- Le degré de compatibilité souhaité par les opérateurs entre le XG-PON1 et le XG-PON2 n'est pas clairement établi.
- Le niveau de convergence entre le XG-PON2 et la norme IEEE 802.3av, affichant tous deux des débits équivalents, doit être débattu selon les logiques et marchés respectifs.

Pour la superposition XG-PON1 - XG-PON2, deux options sont possibles : la technologie WDM ou la technologie TDMA multi-vitesse. Cette dernière permet la cohabitation d'ONU XG-PON1 et XG-PON2 sur une même fibre.

Si le XG-PON1 est considéré comme la technologie de remplacement du G-PON, alors aucune coexistence XG-PON2 avec G-PON n'est nécessaire et le XG-PON2 pourrait réutiliser les longueurs d'onde du G-PON.

Finalement, en 2010, le groupe a abandonné la piste du XG-PON2 au profit de la migration vers le NG-PON2. Notez que dans sa normalisation, la première génération NG-PON1 intègre une coexistence avec le réseau G-PON actuel sur la même infrastructure optique [22].

3.3.3 Comparaison entre les deux

Le Tableau montre les caractéristiques principales des normes NG-PON1 et NG-PON2.

	XG-PON1	XG-PON2
Standards	FSAN	FSAN
Protocoles	Accès : Ethernet Transport : GEM	Accès : Ethernet Transport : GEM
Bande passante Maximale	10 Gb/s (↓) 2,5 Gb/s (↑)	10 Gb/s (↑↓)
Nombre d'abonnés par PON	≥ 64	≥ 64
Bande passante par Abonné	≥ 100 Mb/s	≥ 100 Mb/s
Vidéo	RF/IP	RF/IP
Portée maximum	20 – 60 km	20 – 60 km
Coût	Elevé	Elevé

Tableau3. 2 comparaison entre les différentes normes NGPON 1[4]

Afin d'augmenter les débits pour l'utilisateur final, le NG-PON2 propose des solutions à long terme pour succéder au NG-PON1, sans contrainte de coexistence avec les infrastructures actuelles. Cela permet de redéfinir les architectures réseau, qu'elles réutilisent ou non les infrastructures existantes. Le NG-PON2 cible des technologies économiques et évolutives comme les PON TDM (Time Division Multiplexing) à très haut débit (40 Gbit/s), les PON WDM (Wavelength Division Multiplexing), les solutions hybrides WDM-TDM, ou encore le multiplexage OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Il doit offrir nettement plus de capacité par client que les systèmes précédents, avec un débit agrégé minimal de 40 Gbit/s en descendant et 10 Gbit/s en montant par fibre, et un service d'au moins 1 Gbit/s par ONU (Optical Network Unit). La portée minimale visée est de 40 km, tant en distance totale qu'en distance différenciée, pouvant atteindre 60 km.

Le NG-PON2 fait l'objet d'études pour définir une future norme succédant au NG-PON1. Cependant, il pourrait directement remplacer le G-PON si le déploiement du NG-PON1 est retardé. La standardisation du NG-PON2 est prévue d'ici fin 2015 [22].

3.4 Système WDM-PON

3.4.1 MULTIPLEXAGE EN LONGUEUR D'ONDE (WDM-PON)

Le multiplexage en longueurs d'onde (WDM - Wavelength Division Multiplexing) sur réseau optique passif est potentiellement la prochaine génération de solution pour les réseaux d'accès. Les paragraphes suivants s'intéresseront à cette architecture WDM. Nous débuterons par une présentation générale de cette solution, avant d'étudier les différents types d'architectures possibles de réseaux de distribution optique (ODN - Optical Distribution Network) pour réaliser la fonction de multiplexage en longueurs d'onde, en examinant leurs avantages et leurs inconvénients respectifs [22].

3.4.2 PRINCIPE DU WDM

Le multiplexage en longueurs d'onde WDM permet le partage du réseau en utilisant la longueur d'onde comme moyen de multiplexage. Autrement dit, une longueur d'onde spécifique est attribuée à chaque client (voir Figure). Dans l'architecture WDM PON, les ONT (Optical Network Terminations) peuvent fonctionner sur différentes longueurs d'onde, ce qui permet d'atteindre des débits de transmission élevés.

La capacité totale de bande passante du système d'accès est multipliée par le nombre de longueurs d'onde multiplexées sur la fibre. Ces différents signaux optiques sont ensuite séparés (ou démultiplexés) dans des fibres distinctes [22].

A) Sens descendant

L'OLT (Optical Line Terminal) émet toutes les longueurs d'onde sur la même fibre partagée. Dans le cas de l'utilisation d'un coupleur au niveau du nœud de répartition (Remote Node), ce composant divise la puissance et distribue l'ensemble des longueurs d'onde vers chaque foyer connecté. Un filtre en longueur d'onde au niveau de l'ONU (Optical Network Unit) permet alors de sélectionner la longueur d'onde dédiée à chaque client. Si on utilise un démultiplexeur de type AWG (Arrayed Waveguide Grating) ou un répartiteur en longueurs d'onde dans le nœud de répartition, chaque ONU reçoit directement une longueur d'onde qui lui est dédiée [22].

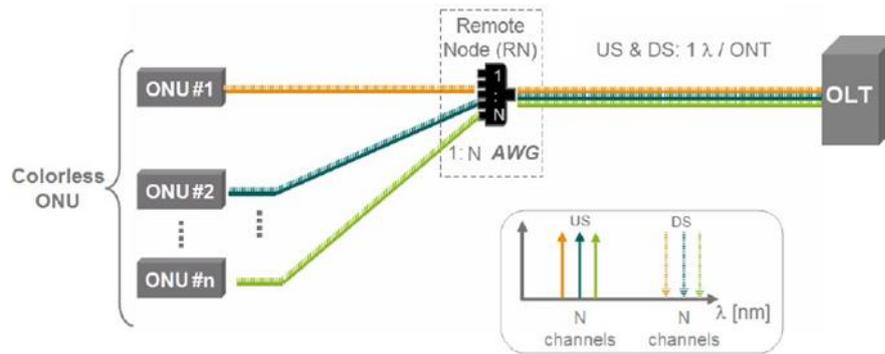


Figure 3. 1: Architecture de WDM PON [22]

B) Sens montant

Dans le sens montant, les ONUs renvoient des longueurs d'onde différentes vers l'OLT. Cette technique d'accès multiple par longueurs d'onde montantes est désignée par l'acronyme WDMA (Wavelength Division Multiple Access) [22].

3.1.1 Types de WDM

Il existe deux techniques principales de multiplexage en longueur d'onde (WDM) : le multiplexage dense en longueur d'onde (DWDM) et le multiplexage grossier en longueur d'onde (CWDM). Le CWDM utilise plusieurs longueurs d'onde espacées de 20 nanomètres, comme illustré par la Figure suivante

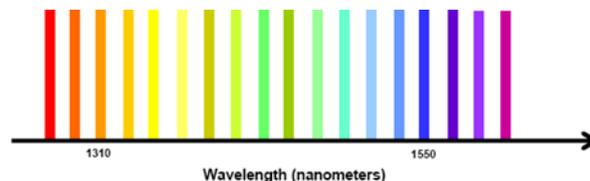


Figure 3. 2: Longueurs d'onde Coarse WDM [22]

L'ITU, dans la Référence [16], spécifie 18 longueurs d'onde CWDM allant de 1271 nm à 1611 nm. Les émetteurs, multiplexeurs optiques et démultiplexeurs sont définis pour ces longueurs d'onde. Ils ne nécessitent pas un contrôle strict de la longueur d'onde, ce qui explique leur coût inférieur par rapport aux équipements DWDM.

✓ Le Dense WDM (DWDM) utilise des longueurs d'onde plus étroitement espacées que le CWDM et se situe généralement dans la bande C, couvrant la plage de longueurs d'onde de 1530 nm à 1565 nm, comme illustré par la Figure suivante

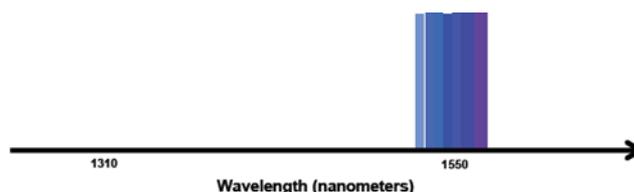


Figure 3. 3: Longueurs d'onde Dense WDM [22]

L'Union internationale des télécommunications (ITU) [17] spécifie les longueurs d'onde centrales à utiliser pour le DWDM. Dans les déploiements DWDM actuels, les fréquences sont typiquement espacées de 100 GHz (soit approximativement 0,8 nm), ce qui permet d'avoir jusqu'à 40 longueurs d'onde dans la bande C. Le DWDM nécessite des émetteurs optiques, des multiplexeurs et des démultiplexeurs capables d'un contrôle précis de la température et donc de la longueur d'onde. Cependant, un des avantages du DWDM réside dans le gain apporté par les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA) qui opèrent dans la bande C. Ces amplificateurs permettent de compenser les pertes sur les grandes distances de transmission ou les pertes passives élevées (coupleurs, multiplexeurs, etc.). Dans le cas du DWDM, le terminal optique réseau (ONT) requiert des lasers onéreux, à fréquence stable, avec un contrôle précis de la température.

3.4.3 Contributions du WDM

Le WDM répond aux besoins croissants en débits et en partage de capacité dans les réseaux d'accès. En introduisant le WDM et en assignant une longueur d'onde par utilisateur, on dépasse la limite de débit imposée par le TDM, ce qui équivaut à établir des connexions point à point par longueur d'onde. Cela offre les avantages du point à point, tels qu'une amélioration du débit (passant de 100 Mbit/s à 2,5 Gbit/s), une simplification de la couche MAC, l'élimination des problèmes de synchronisation et la possibilité de partager la fibre.

La flexibilité du multiplexage permet de superposer différents types d'adresses en fonction des besoins des clients (FTTx), des services (voix, données, vidéo, etc.) et des technologies finales (xDSL, sans fil, Ethernet, etc.). Le WDM assure une indépendance vis-à-vis des protocoles et entre les canaux. De plus, il permet une concentration accrue des clients sur un même lien principal (augmentant ainsi la portée et le nombre de clients), tout en facilitant la localisation des pannes par rapport aux systèmes de partage de longueur d'onde [3].

3.4.4 3 TYPES D'ARCHITECTURES WDM POSSIBLES

Concernant le WDM, il existe différentes nuances et variantes, notamment au niveau du composant de répartition qui peut être un coupleur ou un démultiplexeur en longueurs d'onde. De ces deux techniques découlent trois principales architectures :

3.4.4.1 ARCHITECTURE « BROADCAST AND SELECT »

L'évolution du PON pourrait continuer à s'appuyer sur un réseau de distribution optique (ODN) utilisant un coupleur, comme dans les architectures G-PON et XG-PON). Cette approche 'broadcast and select' est avantageuse car elle facilite l'évolution depuis l'architecture PON actuelle. Le coupleur passif 1:N et achromatique, élément clé du G-PON, est conservé. Ce coupleur diffuse (broadcast) toutes les longueurs d'onde vers tous les ONUs. Chaque abonné reçoit toutes les longueurs d'onde, mais un filtre optique spécifique chez chaque client sélectionne (select) la longueur d'onde qui lui est attribuée. Ainsi, l'architecture 'broadcast and select' est mise en œuvre [22].

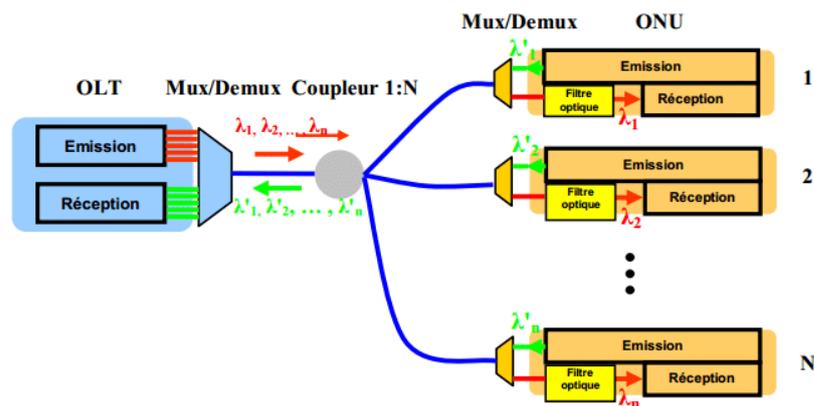


Figure 3. 4: Architecture WDM PON bidirectionnelle [22]

L'architecture "broadcast and select" reposant sur un réseau de distribution optique (ODN) à base de coupleur présente des avantages mais aussi certains inconvénients.

➤ **Les AVANTAGES WDM PON AVEC ARCHITECTURE “BROADCAST AND SELECT” :**

Les avantages majeurs de cette architecture "broadcast and select" avec coupleur sont :

- ✓ L'utilisation d'un coupleur, composant passif relativement peu cher comparé à un démultiplexeur, et déjà présent dans les autres architectures PON existantes, facilitant ainsi son adoption pour les réseaux WDM.

- ✓ Le bénéfice de la diffusion en longueurs d'onde est conservé.
- ✓ Une grande flexibilité et facilité de reconfiguration du réseau.
- ✓ La réutilisation d'une infrastructure commune pour les flux montants et descendants permet des économies substantielles en termes de composants et de fibres déployées [3].

➤ **INCONVENIENTS WDM PON AVEC ARCHITECTURE "BROADCAST AND SELECT"**

- ✓ Le passage par le coupleur dans l'architecture "broadcast and select" entraîne des pertes importantes de puissance pour chaque canal.
- ✓ Ces pertes sont proportionnelles au nombre de ports utilisés et peuvent atteindre jusqu'à 15 dB pour un partage entre 32 utilisateurs, affectant ainsi le budget de liaison.
- ✓ La confidentialité des données n'est pas garantie car toutes les informations sont reçues par chaque client.
- ✓ Un autre inconvénient est la nécessité d'avoir autant de filtres en longueur d'onde que d'abonnés raccordés au coupleur.
- ✓ Une solution plus flexible consiste à utiliser des filtres optiques accordables chez chaque abonné, appelés ONUs achromatiques, ce qui permet de réduire les coûts grâce à la production de masse de ces filtres.

3.4.4.2 ARCHITECTURE A BASE DE REPARTITEUR EN LONGUEURS D'ONDE

A. DEMULTIPLEXAGE SPATIAL

Cette méthode implique initialement le multiplexage des longueurs d'onde descendantes à l'OLT, puis leur transmission à travers la fibre de distribution jusqu'au sous-répartiteur. À ce niveau, un démultiplexeur sépare les longueurs d'onde et les dirige vers les clients respectifs, qui ne reçoivent que leurs propres données. Cette configuration adopte une structure en arbre, comme illustré dans la Figure suivante :

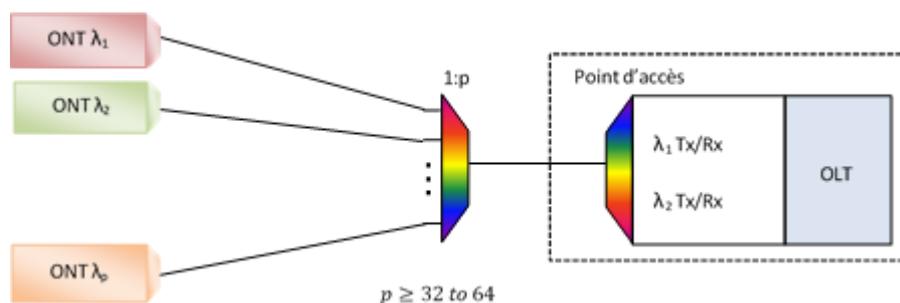


Figure 3. 5:Schéma d'un PON utilisant un répartiteur en longueurs d'onde dans son ODN" [3]

Le multiplexeur optique, étant un dispositif passif, doit comporter un ou plusieurs étages de multiplexage. Les paramètres clés de l'ODN incluent l'athermicité passive, le nombre de ports optiques et l'espacement entre les longueurs d'onde. Dans le sens montant, chaque client est associé à un laser de longueur d'onde spécifique correspondant au port du multiplexeur auquel il est connecté. Les signaux montants de tous les clients sont multiplexés, transmis sur la fibre principale, puis démultiplexés à l'OLT [22].

B. Utilisation de l'AWG périodique comme répartiteur de longueurs d'onde

Une technique intéressante de multiplexage dans le WDM PON est l'AWG (Arrayed Waveguide Grating). C'est un composant plat (PLC : Planar Lightwave Circuit) qui permet de faire passer plusieurs longueurs d'onde par le même port de sortie grâce à sa périodicité. La Figure suivante montre un exemple de WDM PON utilisant un AWG. [22]

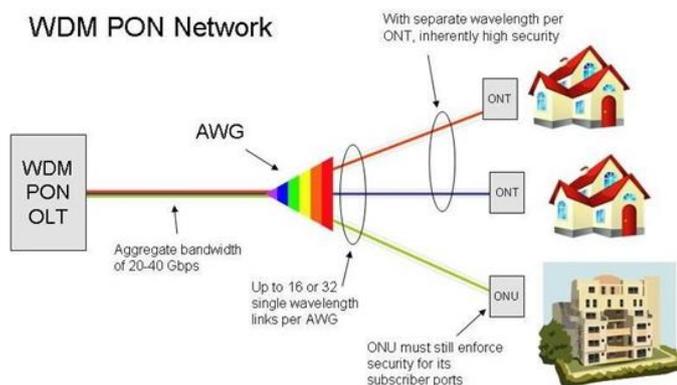


Figure 3. 6:Illustration d'un NG-PON avec AWG [3]

La périodicité, ou Intervalle Spectral Libre (ISL), détermine la capacité d'acheminement des longueurs d'onde par un composant tel que l'AWG. Si l'écart entre les longueurs d'onde est un multiple entier de l'ISL, ces longueurs d'onde peuvent être dirigées de la même manière.

Ainsi, il est possible de faire transiter différentes longueurs d'onde, telles que celles autour de 1,3 μm et 1,5 μm , par le même port, tant qu'elles sont espacées d'un multiple de la valeur de l'ISL.

Le démultiplexage spatial présente des avantages mais aussi des limites [22].

➤ **AVANTAGES WDM PON AVEC DEMULTIPLEXAGE SPATIAL**

- ✓ Chaque abonné utilise le même récepteur, ce qui nécessite uniquement un filtre large bande.

- ✓ La confidentialité des données est élevée car chaque abonné ne reçoit que les informations qui lui sont destinées. Cependant, il convient de noter qu'il peut exister une diaphonie entre les canaux WDM, bien que la puissance reçue des longueurs d'onde voisines soit généralement inférieure (de 25 à 30 dB) à celle du canal principal, rendant la récupération non autorisée de ces données difficiles.

- ✓ Cette configuration permet d'optimiser l'utilisation de la bande passante par client. De plus, les pertes optiques du multiplexeur sont constantes indépendamment du nombre de ports de sortie. Pour un AWG, ces pertes sont généralement comprises entre 3,5 et 5 dB [22].

➤ **INCONVENIENTS WDM AVEC DEMULTIPLEXAGE SPATIAL**

- ✓ Dans un système multiplexeur, l'attribution d'une longueur d'onde à un client est fixe une fois qu'il est connecté à un port, ce qui limite la flexibilité de changement d'attribution.

- ✓ La solution WDM ne permet pas un partage efficace et flexible de la bande passante entre les abonnés, ce qui peut entraîner un gaspillage de ressources disponibles.

- ✓ Le nombre de clients pouvant être desservis par une architecture PON WDM est limité par le nombre de longueurs d'onde disponibles. En comparaison, dans l'architecture "broadcast and select", la principale limitation réside dans l'atténuation du coupleur.

✓ En utilisant une seule longueur d'onde par abonné et en suivant les spécifications de la grille DWDM selon la norme G694.1, on peut atteindre jusqu'à 150 canaux en utilisant les bandes C et L avec un espacement spécifié entre les canaux.

Il est important de prendre en considération que l'introduction du WDM dans le réseau d'accès ne peut se faire de manière soudaine. Les opérateurs et fournisseurs d'accès qui sont en train de déployer des réseaux TDM PON doivent maximiser l'utilisation des équipements déjà en place afin de rentabiliser leurs investissements lors de la transition vers la nouvelle génération de technologies [22].

3.4.5 ARCHITECTURE HYBRIDE OU WDM-TDM PON

La topologie NG-PON est une proposition hybride entre le multiplexage temporel TDM et le multiplexage en longueur d'onde WDM, appelée TWDM-PON (Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network). Le multiplexage en longueurs d'onde (WDM) permet d'augmenter le débit en multiplexant plusieurs systèmes PON sur différentes longueurs d'onde. Des amplificateurs optiques sont utilisés côté OLT pour amplifier les signaux descendants, et une pré-amplification est effectuée à l'ONU pour les signaux montants afin d'obtenir des budgets optiques élevés. Le réseau de distribution optique (ODN) reste cependant passif puisque les composants actifs sont situés du côté de l'OLT. Le répartiteur de l'ODN distribue le signal vers toutes les ONU de sorte que chacune reçoive toutes les longueurs d'onde. Grâce à des sources et récepteurs accordables en longueur d'onde au niveau des ONU, la démodulation des différents canaux est facilitée [7].

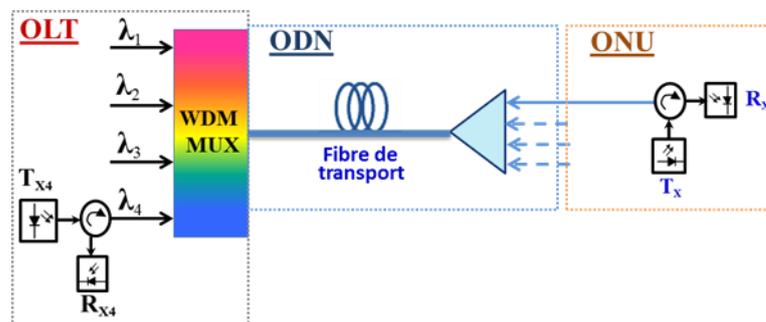


Figure 3. 7: Architecture de base du TWDM [7]

3.5 coexistence et planification

Toutes ces exigences pour le NG-PON sont établies pour que le réseau PON puisse offrir de très hautes performances. L'objectif est que le réseau PON s'étende jusqu'aux réseaux

métropolitains et principaux. Il doit aussi pouvoir se connecter aux réseaux sans fil. Cela renforcera les réseaux hybrides (filaire et sans fil) de l'avenir.

Les opérateurs de télécommunications envisagent des solutions permettant la coexistence du réseau NG-PON (nouvelle génération de réseaux optiques passifs) avec l'infrastructure fibrée actuelle. Ces solutions visent une bonne flexibilité du réseau, une mise à niveau progressive simplifiée et un faible coût total d'exploitation, tout en minimisant les temps d'installation.

La migration du G-PON (réseau optique passif gigabit) vers la première étape du NG-PON, le XG-PON1 (10 Gigabit PON), implique le déploiement initial des équipements G-PON (OLT et ONU) avant l'implémentation du XG-PON1. Le réseau optique de distribution (ODN) du G-PON, comprenant la fibre optique et le répartiteur, doit rester inchangé pour assurer la compatibilité avec le XG-PON1.

L'objectif est de ne pas interrompre les services des abonnés qui choisissent de rester sur le G-PON, tout en intégrant de nouveaux composants en aval pour ceux souhaitant migrer vers le XG-PON1. Un filtre WDM (multiplexage en longueur d'onde) est utilisé pour combiner ou séparer les signaux G-PON et XG-PON1 de part et d'autre de l'ODN, évitant ainsi toute interruption de service pour les abonnés [32].

3.6 Avantages de NG-PON

Les arguments en faveur de ce choix sont son grand taux de mutualisation (entraînant une faible consommation électrique et des coûts réduits par utilisateur), ainsi que sa flexibilité dans l'allocation des ressources en fonction de la demande de trafic [30].

3.7 Limitations

- ✓ Problèmes d'interopérabilité avec les systèmes GPON.
- ✓ Coût d'implémentation accru en raison de l'utilisation du WDM et des amplificateurs optiques.

3.8 Evolutions vers les réseaux d'accès de nouvelle génération avancées

Les réseaux d'accès de nouvelles générations avancées, appelés notamment Eng-pon pour l'anglais enhanced next generation passive optical network, visent à déployer d'autres technologies afin d'améliorer la performance des réseaux NGPON2 à savoir OFDM

- ✓ Ces technologies incluent plusieurs types de codage tels que NRZ, PSK, QAM, afin d'optimiser la transmission des données.
- ✓ De plus, différents types de WDM tels que CWDM, WDM et DWDM sont également envisagés pour permettre une gestion efficace de la bande passante et une augmentation de la capacité du réseau.

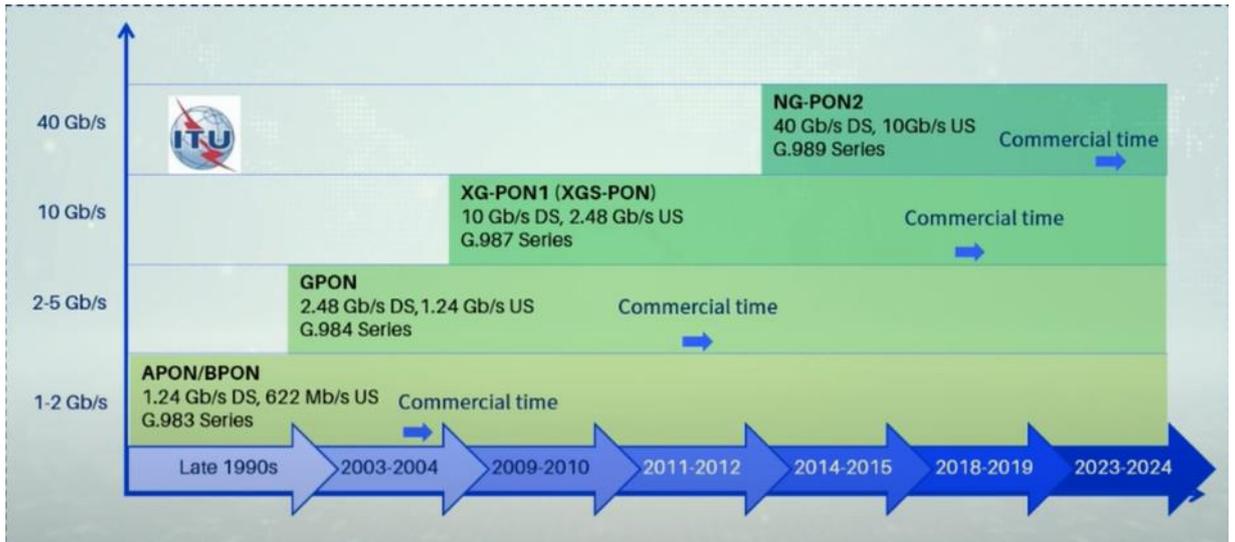


Figure 3. 8: Evolution du PON et ses standards [17]

3.9 Conclusion

Ce chapitre a fourni une analyse approfondie des normes NG-PON1 et de ses variantes, XG-PON1 et XG-PON2, en soulignant leurs contributions significatives à l'amélioration des réseaux optiques. Nous avons également exploré le système WDM-PON et les avantages du multiplexage en longueur d'onde, qui permettent de maximiser l'utilisation de la fibre optique. Les trois types d'architectures WDM — "broadcast and select", à base de répartiteurs en longueurs d'onde, et l'architecture hybride WDM-TDM PON — offrent des solutions flexibles pour diverses configurations de réseaux. Ensemble, ces technologies avancées augmentent la capacité, l'efficacité et la flexibilité des réseaux, positionnant les NG-PON comme des éléments clés pour répondre aux exigences futures en matière de bande passante et de qualité de service dans les télécommunications.

Chapitre 4: Simulation et Résultats

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'ensemble des travaux de simulation que nous avons effectués dans le but d'évaluer les performances d'un système TWDM-PON à l'aide du logiciel Optisystem. Dans un premier temps, nous donnons une brève description des différentes applications du logiciel Optisystem. Par la suite, nous décrivons le modèle de liaison optique proposé, puis nous présentons les résultats obtenus.

4.2 Présentations de logiciel optisystem

Optisystem, un logiciel de conception de systèmes de communication optique créé par une entreprise canadienne, est un outil innovant pour les chercheurs et les ingénieurs. Il permet de modéliser, simuler et optimiser divers types de liaisons optiques dans les réseaux de télécommunication. Grâce à sa vaste bibliothèque de composants actifs et passifs aux paramètres réalistes, Optisystem offre une interface utilisateur graphique complète (GUI) pour contrôler la disposition optique des composants et visualiser les modèles. Son environnement de simulation puissant et sa structure hiérarchique facilitent l'organisation et l'amélioration des systèmes. De plus, ses capacités peuvent être étendues par l'ajout de composants d'utilisateur et l'interfaçage avec une variété d'outils, offrant ainsi une grande flexibilité et adaptabilité. [32]

Les figures 4.1 et 4.2 offrent une présentation de ce logiciel.

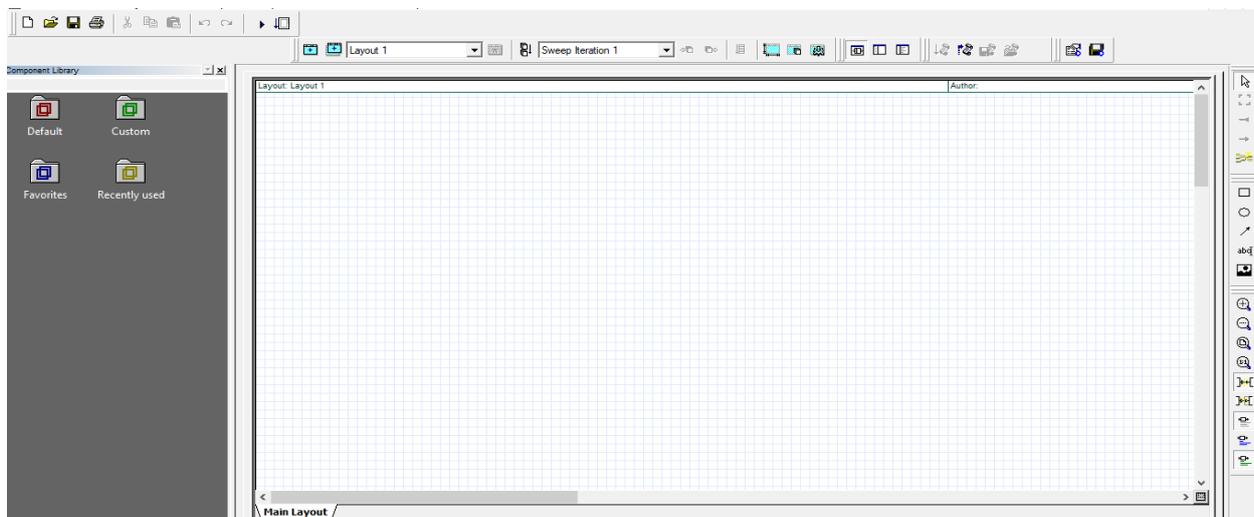


Figure4. 1:Interface d'utilisateur graphique (GUI)

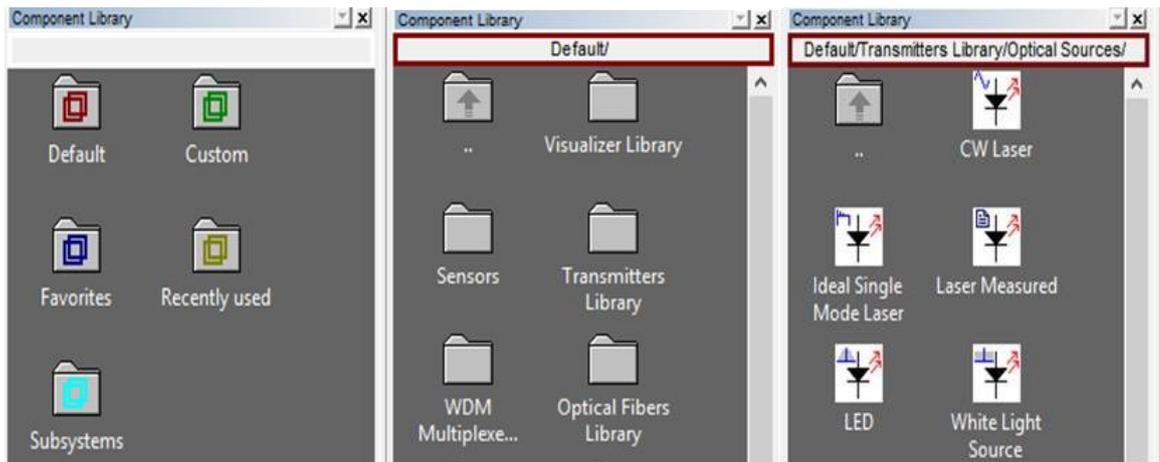


Figure4. 2: Bibliothèque des composants

4.3 applications du logiciel optisystem

Parmi les nombreuses utilisations d'Optisystem, voici quelques-unes des plus communes :

- Conception de systèmes de communication optique, des composants à la couche physique.
- Création de réseaux CATV ou TDM/WDM.
- Développement de réseaux FTTx avec des infrastructures PON.
- Mise en place de systèmes FSO (optique en espace libre).
- Utilisation de la technologie ROF (Radio sur Fibre).
- Conception d'anneaux SONET/SDH.
- Conception d'émetteurs, canaux, amplificateurs et récepteurs.
- Transmission en mode monomode/multimode.
- Utilisation d'amplificateurs et de lasers (EDFA, SOA, Raman, hybride, optimisation GFF, lasers à fibre).
- Traitement du signal (électrique, numérique, tout optique).
- Utilisation de formats de modulation (RZ, NRZ, etc.).
- Analyse des performances du système, incluant le diagramme de l'œil, le facteur Q, le BER, la puissance du signal, l'OSNR, les états de polarisation, les diagrammes de constellation, et les pénalités linéaires et non linéaires. [33]

4.4 Caractéristiques du logiciel Optisystem

Les caractéristiques principales du logiciel Optisystem sont les suivantes :

- La bibliothèque propose des composants virtuels précis reproduisant fidèlement le comportement des composants réels (Figure 4.3).
- Intégration des paramètres mesurables des périphériques réels assurant une simulation réaliste.
- Outils de visualisation variés comme le SAOS Spectral, les diagrammes de l'œil, etc.
- Possibilité d'attacher plusieurs visualises facilitant l'analyse des résultats.
- Calculateur de flux de données et planificateur de calcul optimisant l'exécution des modules. [34]

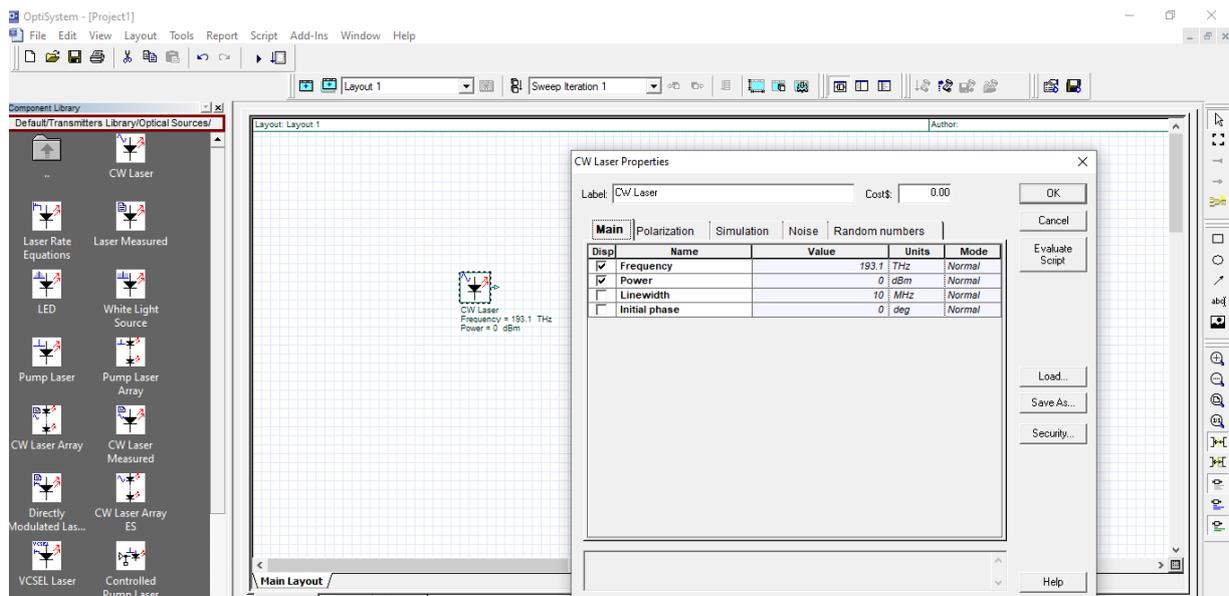
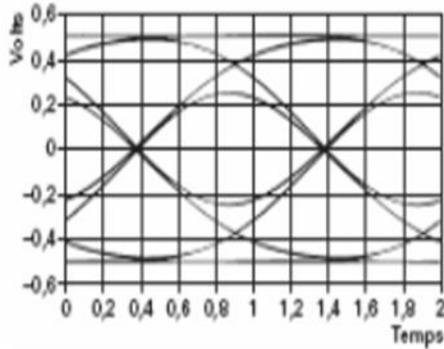


Figure4. 3: Modification du paramètre

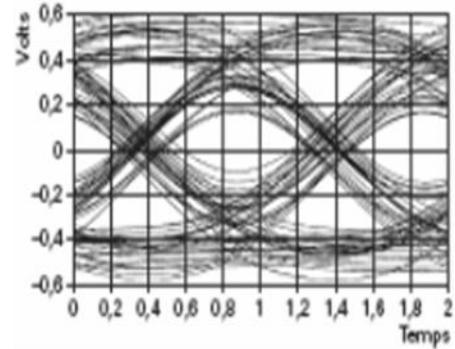
4.5 Évaluation de la qualité de transmission

Pour évaluer le bon fonctionnement d'un système, on compare la séquence envoyée avec celle reçue. La qualité de la transmission est mesurée en utilisant trois critères principaux : le facteur de qualité et le diagramme de l'œil.

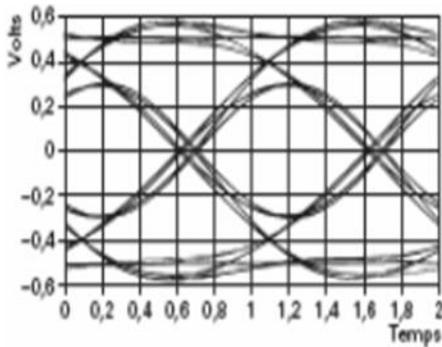
- a) **Diagramme de l'œil** : Le diagramme de l'œil présente la superposition synchrone de tous les symboles binaires de la séquence transmise, fournissant ainsi une évaluation visuelle de la qualité du signal (Figure4.4).



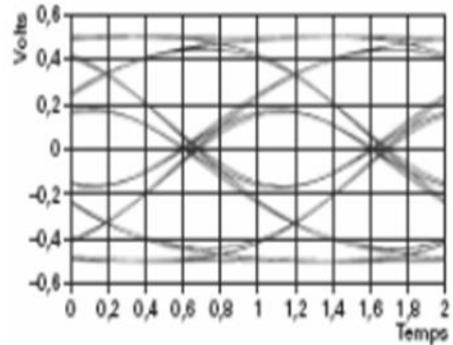
(a) Diagramme de l'œil est bon.



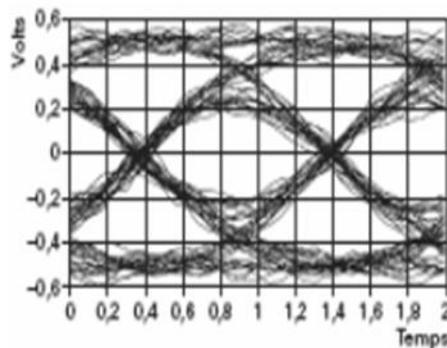
(b) Effet d'un couplage capacitif



(c) distorsion de la phase et d'amplitude
Dans le canal de transmission.



(d) Effet du filtrage très restrictif



(d) Effet du bruit sur le diagramme de l'œil

Figure4. 4: Le diagramme de l'œil

Ce diagramme met en évidence :

- ✓ L'élargissement temporel des impulsions à cause de la dispersion chromatique, et la gigue temporelle résultant de la dispersion et du bruit d'émission amplifiée, ainsi que le bruit d'amplitude accumulé le long de la liaison [35].

b) Facteur de la qualité

C'est le facteur qui définit la qualité de n'importe quel signal qui a des moyennes et un bruit de variance même si ce dernier ne suit par une loi gaussienne donné par la relation suivante :

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\alpha_1 - \alpha_0} \quad (4.1)$$

I_1 et I_0 sont respectivement les valeurs moyennes du niveau « 1 » et « 0 ».

α_1 et α_0 les écart-type du bruit sur le signal des symboles « 1 » et « 0 » [33].

4.6 Travaux de simulation

Nos travaux de simulation consistent à étudier l'impact du débit et de la distance sur la qualité de la transmission d'un réseau d'accès TWDM-PON pour différents espacement inter canaux.

La qualité de la transmission est évaluée par l'analyse du facteur de la qualité et le diagramme de l'œil.

4.6.1 Présentation de la topologie

La figure 4.5 montre le schéma du réseau bidirectionnel TWDM-PON que nous proposons. Il est constitué d'un bloc d'OLT, d'un bloc de transmission et d'un bloc d'ONT.

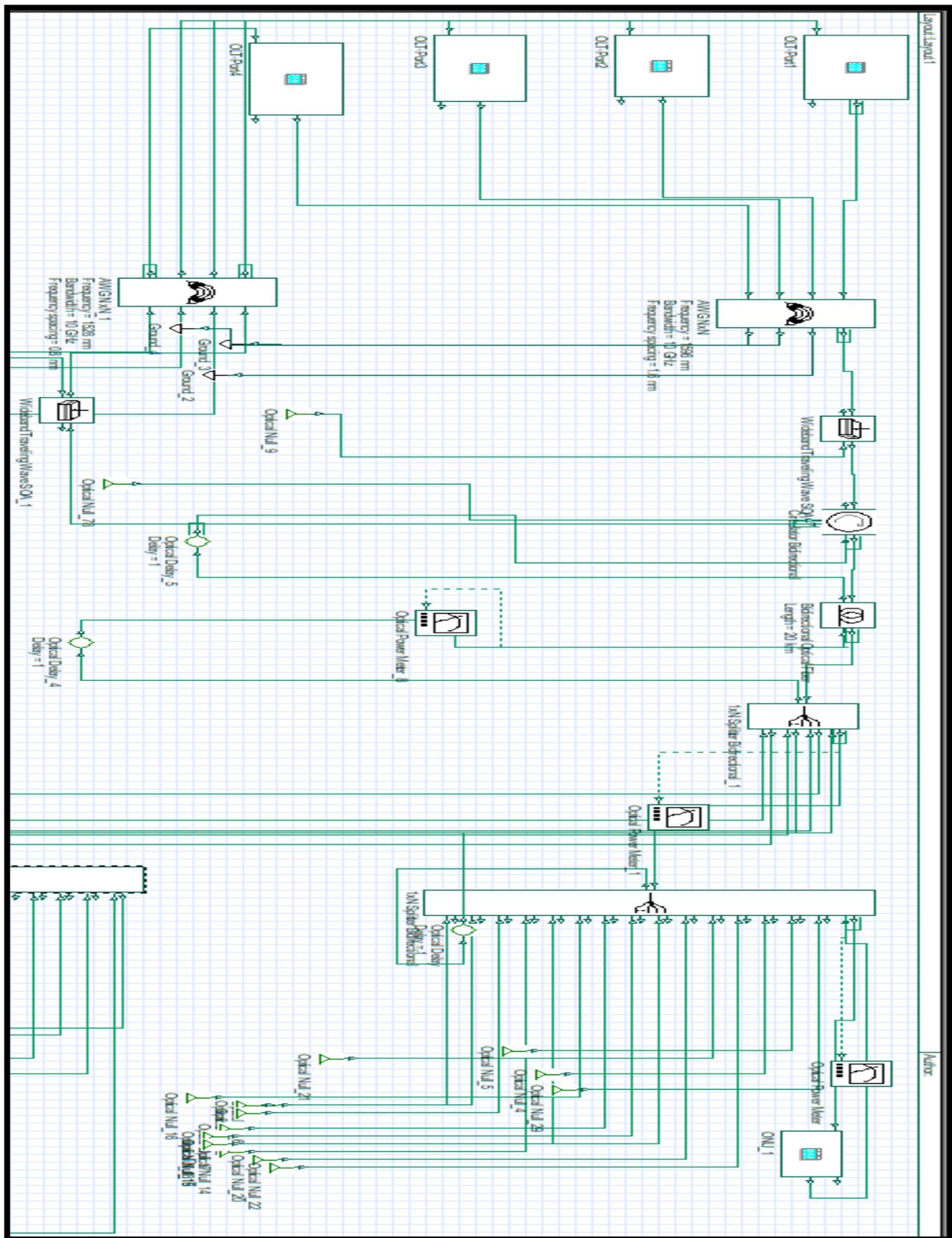


Figure4. 5: topologie du réseau à simuler

Bloc de transmission

Dans la topologie suivant on a presque les mêmes composants et parmi ces derniers on se trouve :

- **Splitter bidirectionnel** : Ce composant est un répartiteur et combineur de puissance avec un nombre arbitraire de ports d'entrée et dans cette simulation on a mis $1 \times N$ portes.
- **Un régénérateur du signal** : type 3R.
- **Un analyseur du Taux d'Erreur Binaire** : c'est la méthode utilisée pour évaluer les performances d'un système, et comparer les bits envoyés avec les bits reçus, grâce à cet outil, on visualise le diagramme de l'œil.

a) Le sens descendant du réseau :

Dans la figure ci-dessous, nous présentons le sens descendant du réseau TWDM-PON

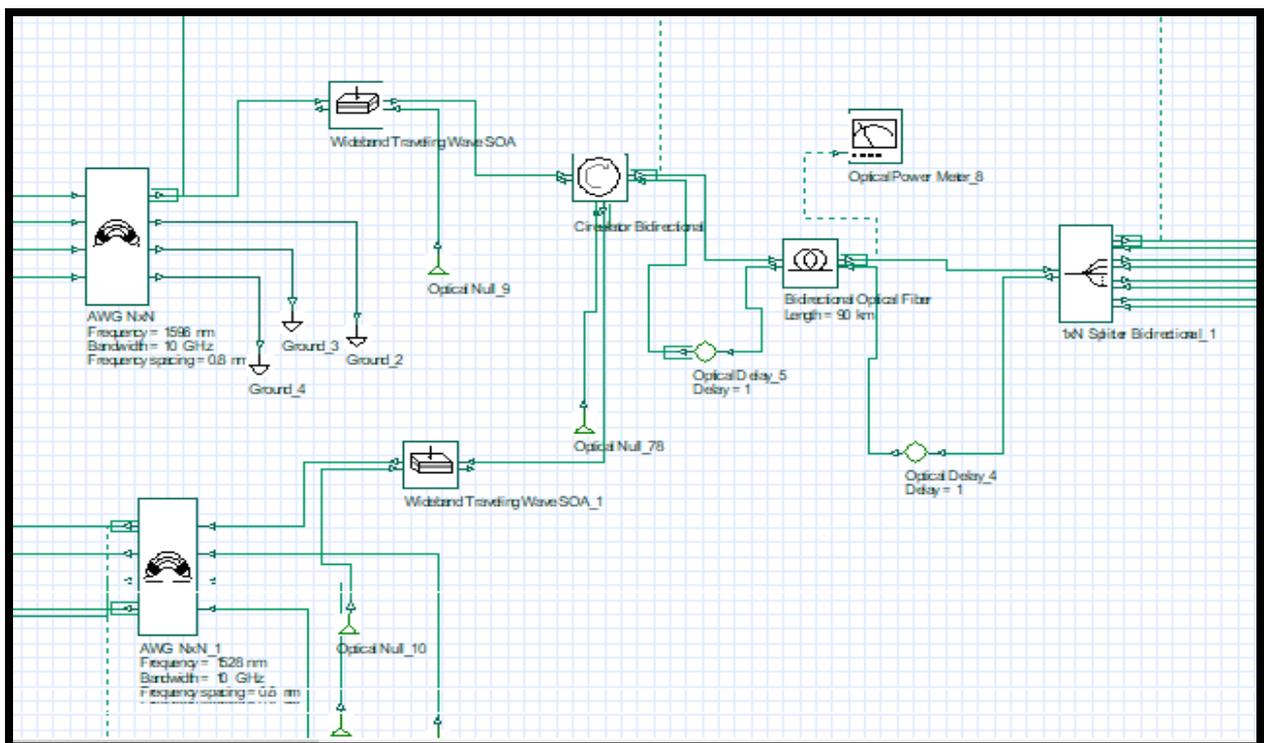


Figure4. 6: Sens descendant du réseau

Comme la figure ci-dessus montre le réseau est composé par :

- ❖ **Wideband Traveling Wave SOA** : L'amplificateur à onde continue (SOA) est un composant optique qui amplifie le signal optique. Il utilise un courant électrique pour pomper un matériau semi-conducteur, qui émet ensuite de la lumière.
- ❖ **AWG NxN** : Un composant optique crucial pour les systèmes de communication par fibre optique, l'AWG permet de manipuler des signaux lumineux de différentes longueurs d'onde.
- ❖ **Circulateur bidirectionnel** : un composant à trois ports conçu de telle manière à ce que chaque faisceau entrant ressorte par le port suivant.
- ❖ **Optical Null** : son rôle est de générer un signal optique de valeur nulle.
- ❖ **Optical Delay (retard optique)** : Génère des retards de signal optique. Le retard est ajouté en envoyant des signaux nuls au port de sortie. Ainsi, il retarde les étapes de transfert des données au port d'entrée du composant vers le port de sortie en fonction du nombre d'étapes choisi dans les propriétés du composant
- ❖ **La fibre optique (ligne de transmission)** : Une fibre bidirectionnelle de longueur 1 km avec une atténuation de 0.2dB/km en terme de puis.

b) OLT :

La figure 4.7 représente le bloc de l'OLT :

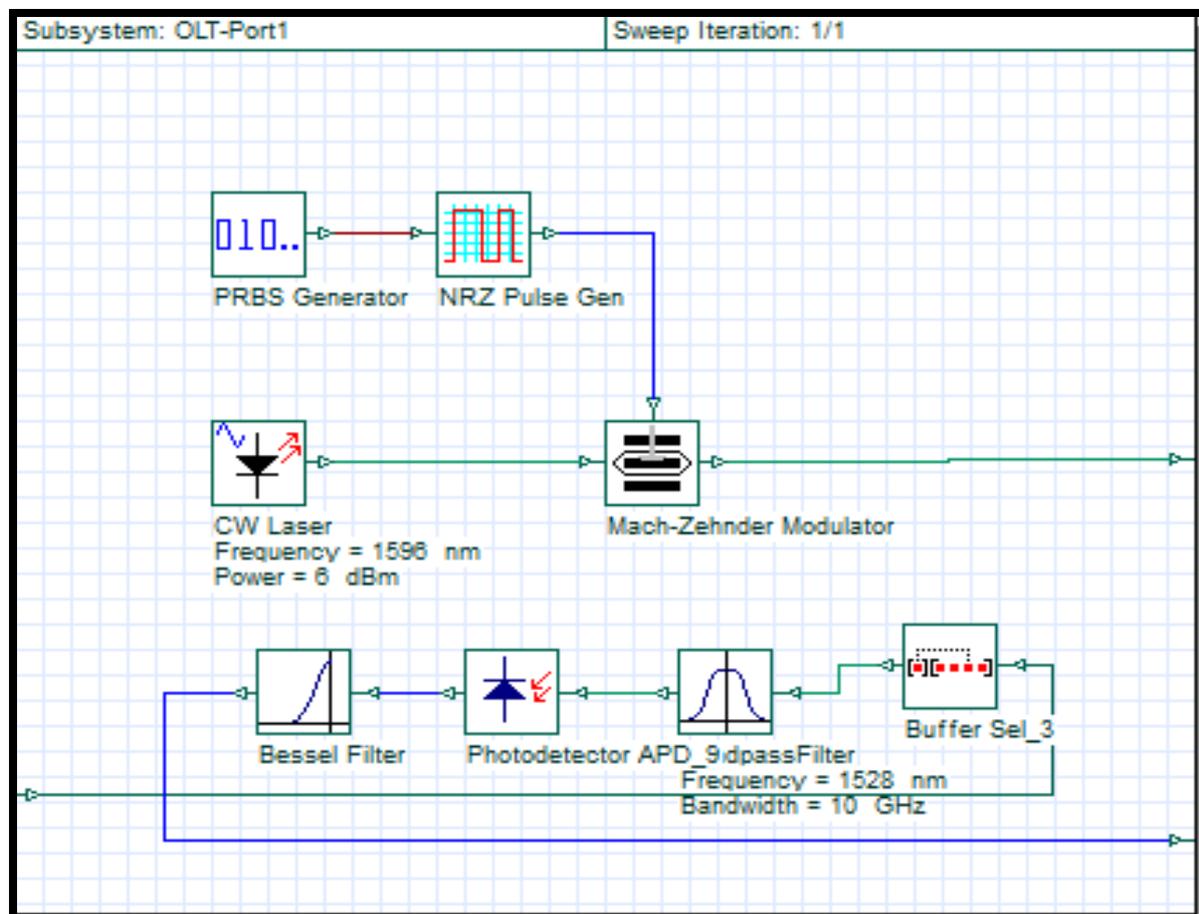


Figure4. 7: sous système de l'OLT

Voici les principaux composants de ce sous-système :

- ❖ **PRBS Generator (Pseudo-Random Binary Sequence Generator):** Génère une séquence binaire pseudo-aléatoire utilisée pour simuler le signal de données d'entrée.
- ❖ **NRZ Pulse Generator (Non-Return-to-Zero Pulse Generator):** Code la séquence binaire en un format de signal NRZ.
- ❖ **CW Laser (Continuous Wave Laser):** génère le signal optique. Utilise avec .la modulation externe,

- ❖ **Mach-Zehnder Modulator** : modulateur externe.
- ❖ **Bessel Filter** : filtre le bruit
- ❖ **Photodetector APD** : Convertit le signal optique en signal électrique
- ❖ **Buffer Sel_3** : un sélecteur de mémoire tampon, sert à créer des intervalles de temps pour le multiplexage temporel

c) ONU :

La figure 4.8 illustre le bloc ONU

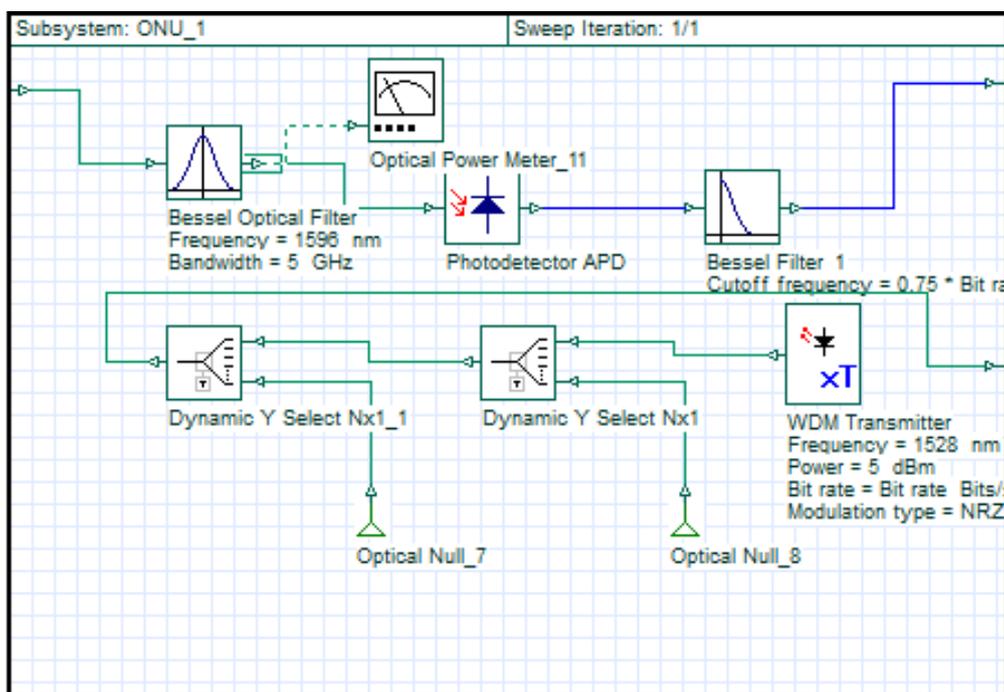


Figure 4. 8: sous système de l'ONU

Dans la partie de réception on trouve :

- ❖ **WDM Transmitter** : Un transmetteur WDM (Multiplexage en longueur d'onde) utilisé pour générer et envoyer un signal optique à une longueur d'onde de 1528 nm avec une puissance de 5 dBm. Le débit de transmission et le type de modulation (NRZ) sont également spécifiés.

- ❖ **Un filtre passe bas** : Filtre optique Bessel utilisé pour sélectionner une bande spécifique de fréquences autour de 1596 nm avec une bande passante de 5 GHz.

- ❖ **Dynamics Y select** : il permet de contrôler les différentes valeurs d'atténuation et les valeurs de phases

- ❖ **Photodiode APD** : La photodiode avalanche est un détecteur très sensible utilisé pour détecter les signaux optiques faibles.

- ❖ **Filtre de Bessel** : Filtre analogique utilisé pour limiter la bande passante du signal reçu, réduisant le bruit et les interférences.

4.6.2 Simulation et résultats

Dans cette partie, nous allons simuler le projet et on va visualiser les résultats obtenus, tel que le Q facteur ainsi que le diagramme de l'œil tout en variant la distance de la fibre pour mieux voir la différence.

4.6.2.1 Etapes à suivre

Paramètre des composantes :

Nous donnons les paramètres des composants optiques dans le tableau 4.1 :

Composants	Paramètres
Photo-émetteur	Longueur d'onde= 1550 nm
Fibre optique	Atténuation=0.2 dB/km
	Dispersion= 16.75 Ps/nm km
	Longueur L
APD	Sensibilité= 1A/W

Tableau4. 1: Paramètres des composants.

4.6.2.2 Présentation des résultats

Dans cette section nous présentons les résultats obtenus pour les inters canaux de 0.8 nm ,0.4 nm et 1.6 nm :

- **Impact de débit sur le facteur de qualité Q pour le canal de 0.8 nm :**

La figure 4.9 présente respectivement le facteur Q en fonction de débits (2.5 Gbit/s, 5 Gbit/s, 7.5 Gbit/s, 10 Gbit/s)

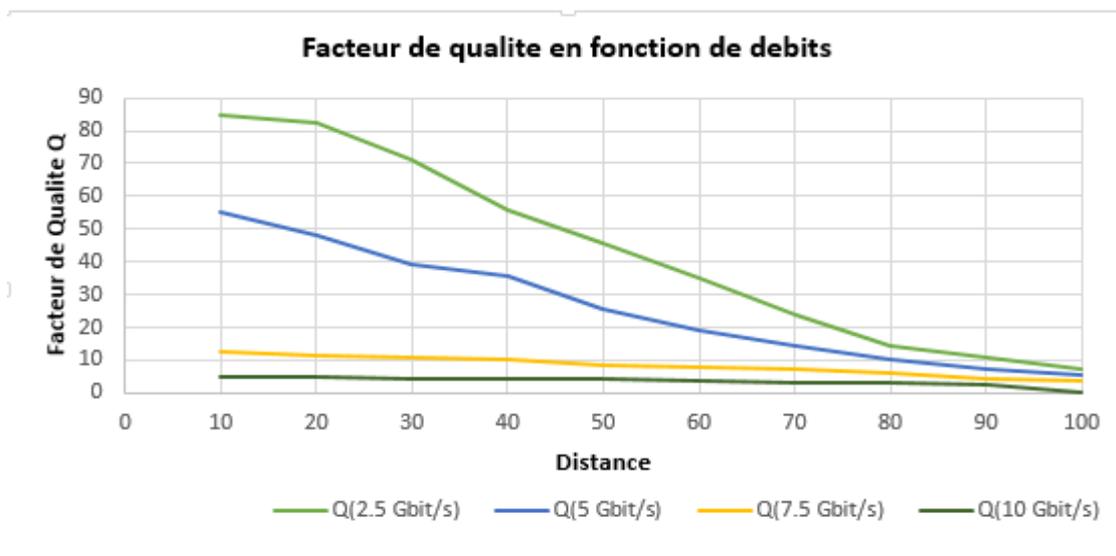


Figure4. 9: Facteur de la qualité Q en fonction de la variation de débits

- **Impact de débit sur le facteur de qualité pour le canal de 0.4 nm :**

La figure 4.10 présente respectivement le facteur Q en fonction de débits (2.5 Gbit/s, 5 Gbit/s, 7.5 Gbit/s, 10 Gbit/s)

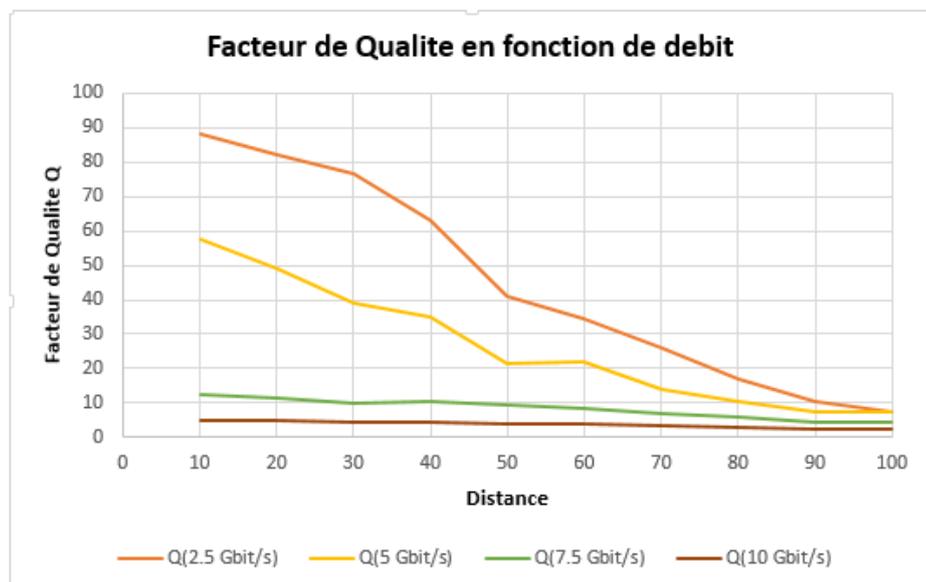


Figure4. 10: Facteur de la qualité Q en fonction de la variation de débits

- **Impact de débit sur le facteur de qualité pour le canal de 1.6 nm :**

La figure 4.11 présente respectivement le facteur Q en fonction de débits (2.5 Gbit/s, 5 Gbit/s, 7.5 Gbit/s, 10 Gbit/s)

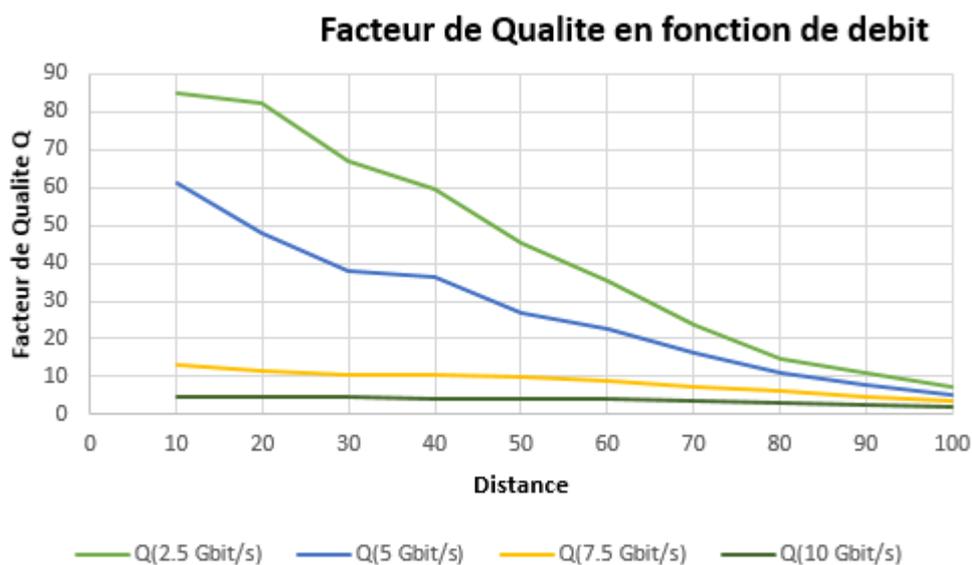


Figure4. 11:Facteur de la qualité Q en fonction de la variation de débits

4.6.2.3 Analyse les résultats

Les figures 4.9, 4.10 et 4.11 illustrent la variation du facteur de qualité (Q) en fonction de la distance pour différentes valeurs de débit (2,5 Gbit/s, 5 Gbit/s, 7,5 Gbit/s et 10 Gbit/s) à des espacements inter-canaux de 0,8 nm, 0,4 nm et 1,6 nm. Nous observons que la qualité de transmission se dégrade à mesure que la longueur de la fibre et le débit augmentent. Cette détérioration du facteur de qualité peut être attribuée à plusieurs facteurs, notamment les bruits et les distorsions inhérents aux composants optoélectroniques et optiques, ainsi que l'affaiblissement et la dispersion chromatique de la fibre optique.

4.6.2.4 Analyse des diagrammes de l'œil

Les tableaux suivants présentent les diagrammes de l'œil, relevés à des distances de 20 km et 80 km, pour les trois espacements inter-canaux précédemment étudiés à chaque débit. Les distorsions remarquées sont expliquées par les mêmes causes cités précédemment

- Pour $D= 2.5 \text{ Gbit/s}$

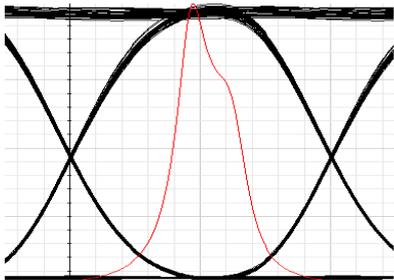
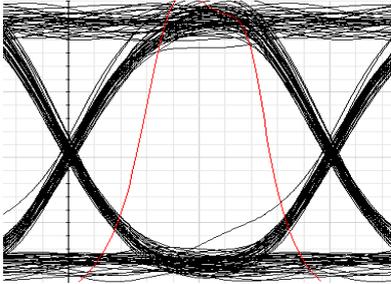
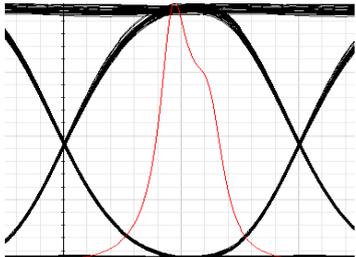
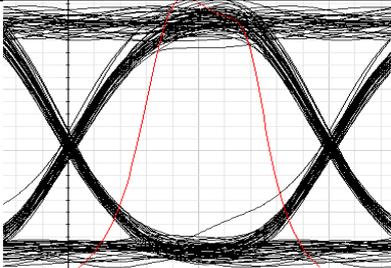
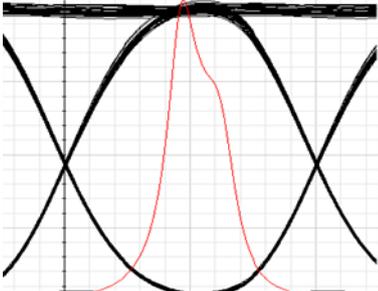
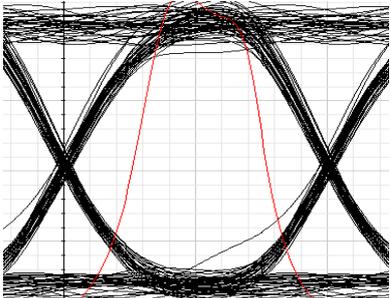
L n	20 km	80 km
0.4 nm	 Bon	 Bon, présente des distorsions
0.8 nm	 Bon	 Bon, présente des distorsions
1.6 nm	 Bon	 Bon, présente des distorsions

Tableau4. 2:Diagrammes de l'œil pour $D= 2.5 \text{ Gbit/s}$

- Pour $D= 5 \text{ Gbit/s}$

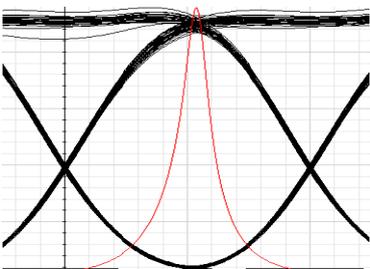
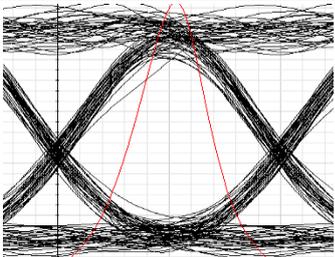
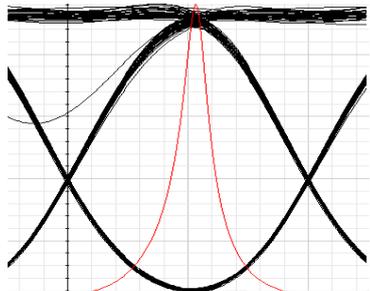
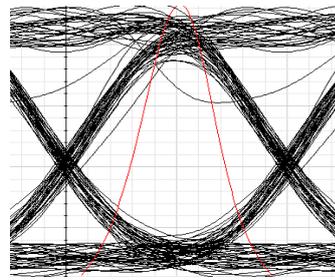
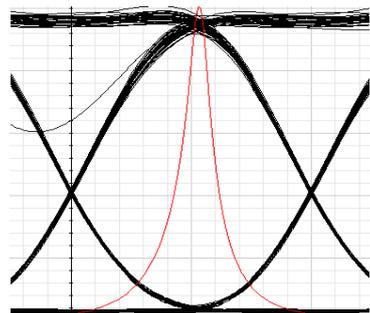
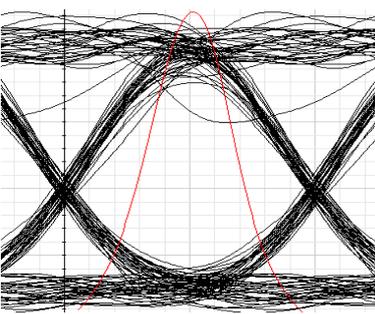
L n	20 km	80 km
0.4 nm	 <p style="text-align: center;">Bon</p>	 <p style="text-align: center;">Bon, présente des distorsions</p>
0.8 nm	 <p style="text-align: center;">Bon</p>	 <p style="text-align: center;">Bon, présente des distorsions</p>
1.6 nm	 <p style="text-align: center;">Bon</p>	 <p style="text-align: center;">Bon, présente des distorsions</p>

Tableau4. 3:Diagrammes de l'œil pour $D= 5 \text{ Gbit/s}$

- Pour $D= 7.5$ Gbit/s

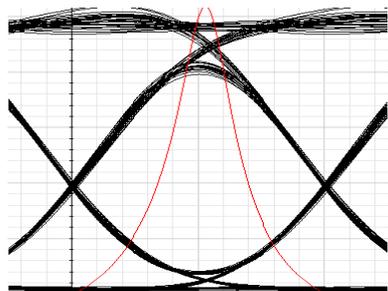
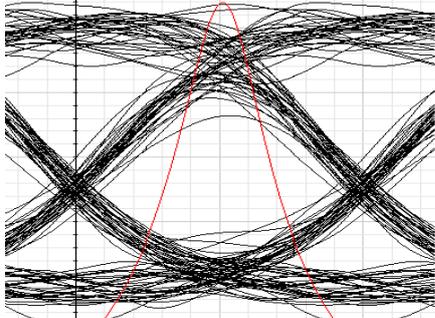
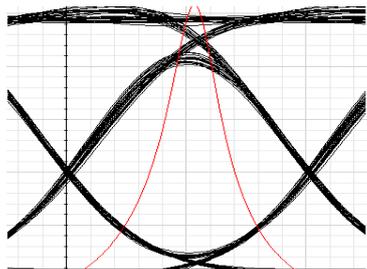
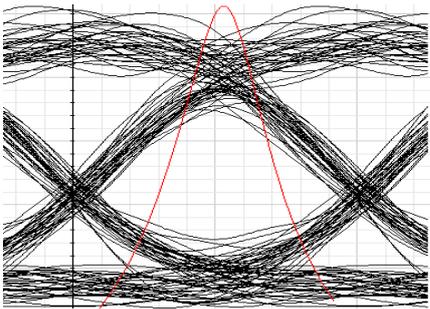
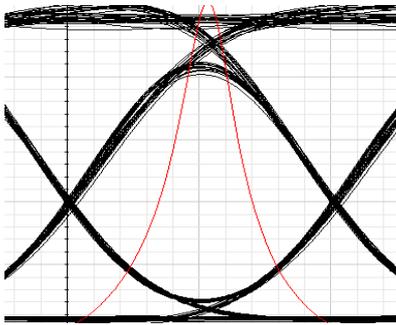
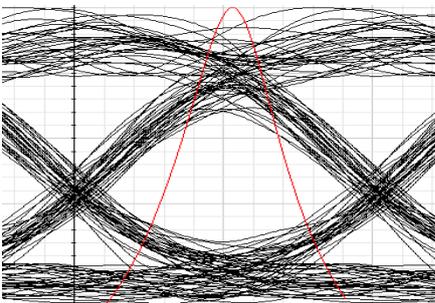
L N	20 km	80 km
0.4 nm	 Bon	 Bon, présente des distorsions
0.8 nm	 Bon	 Bon, présente des distorsions
1.6 nm	 Bon	 Bon, présente des distorsion

Tableau4. 4:Diagrammes de l'œil pour $D= 7.5$ Gbit/s

- Pour $D= 10 \text{ Gbit/s}$

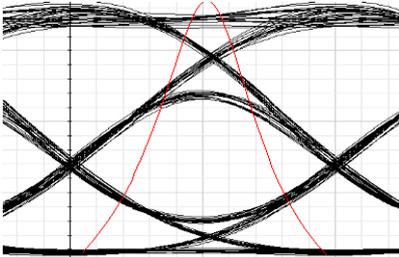
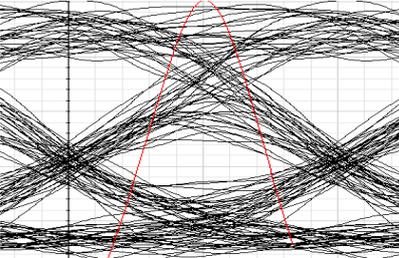
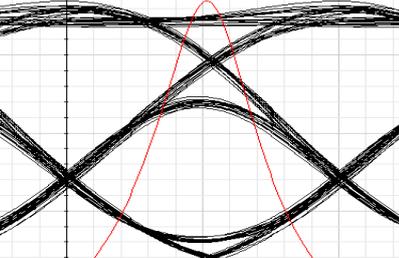
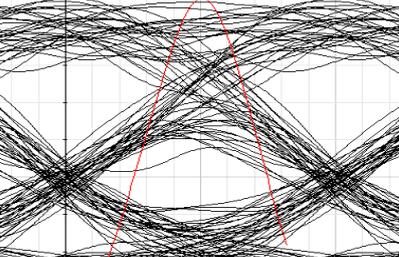
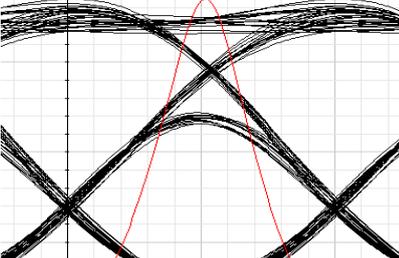
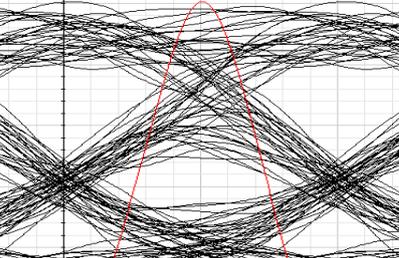
L n	20 km	80 km
0.4 nm	 Bon, présente des distorsions	 Mauvaise
0.8 nm	 Bon, présente des distorsions	 Mauvaise
1.6 nm	 Bon, présente des distorsions	 Mauvaise

Tableau 4. 5: Diagrammes de l'œil pour $D= 10 \text{ Gbit/s}$

4.7 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons proposé une topologie TWDM intégrant un amplificateur à semi-conducteur SOA, des filtres à bande passante et un photo-détecteur APD. Notre étude a principalement porté sur l'impact du débit et de la distance au sein de ce système. Nous avons observé que la qualité de transmission optimale est fortement influencée par les paramètres examinés. Notamment, nos résultats montrent que différents espacements inter-canaux (0.4 nm, 0.8 nm et 1.6 nm) présentent des performances variées.

Parmi ces espacements, nous avons identifié que l'espacement inter-canal de 0.8 nm, à une vitesse de transmission de 2.5 Gbit/s, offre le meilleur compromis pour minimiser les interférences et maximiser la qualité du signal sur de longues distances et à des débits élevés. Cela souligne l'importance des ajustements spécifiques selon les exigences particulières en termes de distance et de débit, afin d'assurer une transmission optimale dans des environnements réels.

Conclusion générale

Le travail que nous avons réalisé dans ce projet de fin d'étude concerne l'étude et la simulation d'un réseau d'accès TWDM-PON. Nous avons commencé par examiner la fibre optique, qui est très importante car elle offre une grande bande passante et une faible atténuation. La fibre optique reste le meilleur support développé à ce jour et constitue la base essentielle pour les réseaux modernes.

Ensuite, nous avons étudié les réseaux d'accès, en mettant en évidence l'importance de maximiser l'utilisation des infrastructures optiques existantes pour faciliter la convergence entre différents types de services. Le développement rapide des réseaux FTTx en Europe et dans le monde est idéal pour la mise en place de TWDM-PON, permettant d'utiliser un même support physique pour plusieurs services.

Nous avons ensuite exploré en détail la technologie TWDM (Multiplexage par répartition dans le temps et par longueur d'onde), qui est prometteuse pour répondre aux besoins des réseaux d'accès en offrant des débits élevés et une grande flexibilité.

Nous avons proposé une topologie intégrant un amplificateur à semi-conducteur (SOA), des filtres à bande passante et un photo-détecteur APD, avec une analyse détaillée de l'impact du débit et de la distance sur la qualité de la transmission. Cette étude fournit une base solide pour les futures recherches et développements dans le domaine des réseaux optiques passifs de nouvelle génération. Elle combine une analyse technique détaillée avec une perspective pratique, démontrant le potentiel du TWDM-PON pour répondre aux besoins croissants en bande passante de manière efficace et évolutive. Les simulations du système TWDM-PON ont montré que cette technologie permettrait aux utilisateurs d'avoir un haut débit avec une grande flexibilité.

Ce sujet est une introduction à d'autres études, et des améliorations seront faites dans les travaux futurs pour améliorer les performances du système et explorer de nouvelles applications, comme l'intégration de nouveaux réseaux radio.

Références

- [1] M.Aichi et W.Aichi, « les solutions WDM /DWDM pour les télécoms haut débit », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master en télécommunication, Université Abou-Bakr BelkaidTlemcen, Promotion 2011
- [2] Muona, Les utilisations de la fibre optique, 07 octobre 2018 [https : //www.lafibrelyonnaise.fr/utilisations-de-la-fibre-optique/](https://www.lafibrelyonnaise.fr/utilisations-de-la-fibre-optique/) , mai 2023
- [3] Revue d'école nationale des postes et télécommunication « Technologie de la fibre optique » Département Télécommunication - laboratoire de transmission Mars 2004
- [4] Revue d'école nationale des postes et télécommunication « Technologie de la fibre optique » Département Télécommunication - laboratoire de transmission Mars 2004.
- [5] HECHT, J; 1999_City of light. The story of fiber optic. Oxford university press.newyork.en ligne:[<http://www.techno science.net/? onglet=glossaire and definition=2937>] (historique)/principe)
- [6] Gred, Keiser. (2003). Optical communications Essentials, 358p, USA (définition)
- [7] <https://www.chatpfe.com/generalites-sur-la-fibres-optiques/>.(les avantages et les inconvénient).consulter le 14/02/2023.
- [8] [https://stl.tech/blog/types_of_optical_fiber/\(les_applications_de_la_fibre_optique\)_consulter_le_14.02.2023](https://stl.tech/blog/types_of_optical_fiber/(les_applications_de_la_fibre_optique)_consulter_le_14.02.2023)
- [9] [http://physique.unice.FR/sem6/2006-2007/pageweb/telecom/modes.html.\(les_types_de_la_fibre_optique\).consulter_le_15.02.2023](http://physique.unice.FR/sem6/2006-2007/pageweb/telecom/modes.html.(les_types_de_la_fibre_optique).consulter_le_15.02.2023)
- [10] LAURENT, J;2004_Communication optique a très haut débits .département STIC centre de paris p 64 (caractéristique de la fibre optique)
- [11]https://www.memoireonline.com/03/17/9708/m_etude_d_une_liaison_de_transmission_p_ar_fibre_optique_en_année_14.html. (Les fenêtres de transmission).consulter le 15.02.2023.
- [12] FABIENNE Saliou ; Thème « Etudes des solutions d'accès optique exploitant une extension de portée »-14/06/2010.
- [13] BENABDERRAHMANE Benamar et CHELDA Belhadj «ETUDE DES PERFORMANCES DES RESEAUX OPTIQUES GPON», Mémoire de Master, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID , 2019-2020.
- [14] Recommendation G.984.5 ITU, Mid-span Reach Extension (organisme iut)
- [15] Recommendation G.984.6 ITU New recommendation of Mid-span Reach Extender

(organisme fsan)

[16] ITU-T Recommendation G.694.2, spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid

[17] ITU-T Recommendation G.694.1, spectral grids for WDM applications: DWDM wavelength grid

[18] ADOMAYA Cédric. "IMPLEMENTATION DU FLEXIGRID WDM DANS UN RESEAU D'ACCES OPTIQUE". UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI, 2019.

[19] R et M France ; 09/2006 << Déploiement FTTH >>.

[20] Septembre 2009-43, rue de Meuniers, 94300 Vincennes < Etude de chiffrage pour le développement du très haut débit en aquitaine >.

[21] <https://www.viavisolutions.com/fr-fr/reseau-optique-passif-pon> visité le 07/04/2024

[22] Fabia Nirina Raharimanitra. Contribution à l'étude des architectures basées sur le multiplexage en temps et en longueur d'onde dans le réseau d'accès, permettant la migration vers la nouvelle génération de PON (NG-PON) à 10 Gbits/s. Optique / photonique. Télécom Bretagne, thèse de doctorat, Université de Bretagne- Sud. 231 p.

[23] M.LOUAZANI et S.MEDDANE «Etude des réseaux d'accès optique exploitant le multiplexage en longueur d'onde», Mémoire de master, université Abou bakr Belkaid, 2017.

[24] « Mémoire SUR LES RESEAUX FTTH » - Juillet 2009 ; COGISYS ; Architecture des systèmes de communication

[25] Etude de cas : Bureau d'étude FTTH Présenté par : KABRE Mohamadi, Ingénieur conception réseau Télécom, Expert en réseau fibre optique,

[26] Taha, T. R., Ablowitz, M. J. Analytical and numerical aspects of certain nonlinear Evolution equations. II. Numerical, nonlinear Schrödinger equation. Journal of Computational Physics. 55(2), 203-230. 1984. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(84\)90003-2](https://doi.org/10.1016/0021-9991(84)90003-2).

[27] <https://forum.huawei.com/enterprise/en/search?keyword=pon&tab=all> ,technologie de PON consulter le 7/03/2024.

[28] Stallings, W. (2004). *Data and Computer Communications*. Prentice Hall.

[29] [https://forum.huawei.com/enterprise/en/search?keyword=tdm+wdm+pon&tab=all\(hybridation\)](https://forum.huawei.com/enterprise/en/search?keyword=tdm+wdm+pon&tab=all(hybridation)) .consulter le 20.02.2024

[30] L. G. Kazovsky, et al., "Next-Generation Optical Access Networks" Journal of Lightwave Technology, vol.25, no.11, pp.3428-3442, Nov. 2007.(tableau)

[31] Max Fréjus O. SANYA. (2015), Déploiement de réseaux optiques d'accès NGPON dans les métropoles de pays en développement : proposition de nouvelles techniques d'implémentation de l'OFDM.these de doctorat, université de limoges -France.212p (planification)

[32] [Management, I. C. F. W. S. A. S., & Unesco. (2020). Water Reuse within a Circular Economy Context. UNESCO Publishing.

[33] LITIM Salsabil BELAID Chourouk , « Simulation d'une chaine optique multiplexée » , mémoire de master, UNIVERSITÉBADJI MOKHTAR-ANNABA , 2019/2020.

[34] Jean-Louis VERNEUIL « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s», thèse doctorat UNIVERSITE DE LIMOGES 2003.

[35] Committee, I. R. C. (1983). Broadcasting-satellite System.

[36] <http://physique.unice.fr/sem6/2006-2007/PagesWeb/Telecom/modes.html> . (La fibre optique et le guidage de la lumière) consulter le 18.03.2024.

[37] http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/pertes.html . (Pertes et atténuations) consulter le 12.02.2024.

[38] http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/pertes.html . (Comprendre la dispersion des fibres optiques et ses méthodes de compensation) consulter le 19.02.2024.