

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA-BEJAIA



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa

FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

FILIÈRE DE TÉLÉCOMMUNICATION

SPÉCIALITÉ RÉSEAUX ET TÉLÉCOMMUNICATION

PROJET DE FIN D'ÉTUDE

POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER EN RÉSEAUX ET
TÉLÉCOMMUNICATION

THÈME

***ÉTUDE ET SIMULATION D'UN RÉSEAU FTTH BASÉ SUR LA NORME
G-PON***

PRÉSENTÉ PAR :

DEVANT LE JURY : MR. TOUNSI

MME. BENDJELLOUL

HILEM JUBA

HAMADOU FOUAD

ENCADRÉ PAR : MR.BERRAH

BRAHMI HADDA

PROMOTION 2019-2020

Remerciement

Nous tenons à remercier tout d'abord, Allah le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et le courage pour terminer nos études et à élaborer ce modeste travail.

Nous tenons à remercier nos chers parents pour les efforts et sacrifices qu'ils ont entrepris afin de nous voir réussir.

Nous remercions tout particulièrement notre encadreur Monsieur Berrah Smail, pour ses conseils pendant la réalisation de ce mémoire, son aide appréciable et ses encouragements tout au long de notre travail.

Nos remerciement s'adressent également aux examinateurs Monsieur Tounsi et Madame Bendjelloul pour avoir accepté de lire et d'évaluer notre mémoire.

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenue de près ou de loin.



Je dédie ce mémoire ...

A la femme qui m'a mis au monde, celle qui a sacrifié tout pour moi

Son temps, son bonheur, sa santé : ma mère, le noyau de mon esprit

A mon père, source d'énergie de ma réussite,

Ecole de mon éducation et principe de la vie,

Que DIEU les préserve pour moi.

A mes chers frères : Nafaa, Yahia, Kouceila.

A toutes ma famille.

A mes chers amis.

Et à tous ceux qui me sont chères.

Je dédie ce travail ...

Fouad



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui

s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, ma Mère ...

A mon Père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant tous mon cursus,

Que Dieu le tout puissant les gardes et les protège.

A mon cher Frères Koussaila et à ma Sœur Siham,

Et à toute ma famille,

A mes amis qui ont toujours étaient là quand j'ai eu besoin d'eux,

A mon trinôme Hamadou Fouad et Brahmi Hadda pour leur efforts fournis et leur collaboration,

A mes professeurs à qui je suis très reconnaissant, pour tout le savoir et les valeurs qu'ils m'ont appris

A toute la promotion Télécom de l'année 2019 – 2020,

A moi-même, pour avoir enduré et surpassé les obstacles durant mon parcours scolaire.

JUBA

Dédicaces

J'ai l'immense honneur de dédier ce modeste travail:

A mes chers parents qui m'ont toujours soutenue et encouragé durant toute ma vie et mes études, Que dieu les protèges et les gardes pour moi.

Une spéciale dédicace pour mon frère Youba, mes chères sœurs Sarah et Hadjer et notre petit de la famille mon petit frère Saber ,

A mon trinôme Hamadou Fouad et Juba Hilem pour leur efforts fournis et leur collaboration,

A mes professeurs qui m'ont enseigné et qui par leurs compétences m'ont soutenu dans la poursuite de mes études.

A moi-même, pour avoir enduré et surpassé les obstacles durant mon parcours scolaire.

Hadda...



Résumé

Un réseau FTTH (Fiber To The Home) permet notamment l'accès à internet très haut débit et dans lequel la fibre optique se termine au domicile de l'abonné. Développés dans divers pays au cours des années 2000 jusqu'au 2017, ces réseaux terrestres remplacent progressivement ceux ayant historiquement servi à la distribution du téléphone ou encore de la télévision par câble. Les réseaux FTTH commerciaux peuvent atteindre jusqu'à 1 Gbit/s symétriques, contre un maximum de 20 Mbps en ADSL. Ils permettent également une meilleur latence, l'absence de sensibilité aux perturbations électromagnétiques, et un débit stable pour des lignes jusqu'à environ 30 km de longueur.

La technologie FTTH est néanmoins nettement plus couteuse que des solutions alternatives comme la fibre jusqu'au sous-répartiteur ou jusqu'à l'immeuble, avec une terminaison VDSL sur le câblage cuivre existant.

Notre travail se base sur la planification du réseau FTTH. La simulation de ce réseau est faite sous le logiciel OptiSystem Optiwave afin d'évaluer les performances de ce réseau en terme de BER et diagramme de l'œil et qui permettant de discuter la qualité du système de transmission optique.

Mots clés :

Réseaux optique, FTTH, OptiSystem

Abstract

An FTTH network (Fiber To The Home) allows in particular very high speed internet access and in which the optical fiber ends at the home of the subscriber. Developed in various countries in the years 2000 to 2017, these terrestrial networks gradually replace those that have historically been used for telephone distribution or cable television. Commercial FTTH networks can reach up to 1 Gbit/s symmetric, against a maximum of 20 Mbps in ADSL. They also allow for better latency, lack of sensitivity to electromagnetic disturbances, and stable flow for lines up to about 30 km in length.

FTTH technology is nevertheless significantly more expensive than alternative solutions such as fiber to the sub-distributor or to the building, with a VDSL termination on the existing copper cabling.

Our work is based on the planning of the FTTH network. The simulation of this network is done under the OptiSystem software in order to evaluate the performances of this network in terms of BER and eye diagram and which makes it possible to discuss the quality of the optical transmission system.

Key words:

Optical networks, FTTH, OptiSystem

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Résumé

Abstract

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des acronymes

Introduction générale.....1

Chapitre I : Généralités sur la fibre optique

I.1 Introduction..... 2

I.2 La fibre optique 2

 I.2.1 Définition 2

 I.2.2 Différents composants d'une liaison optique : 3

 I.2.2.1 Dispositif d'émission..... 3

 I.2.2.2 Canal de transmission : Fibre optique..... 4

 A. Les différents types de la fibre optique: 4

 B. Comparaison des performances des trois types de fibres 8

 C. Notions sur l'optique géométrique 8

 D. Raccordement de la fibre optique 12

 E. Compensation des pertes..... 13

 I.2.2.3 Partie réception 14

 A. Photodiode..... 14

 B. Photodiode PIN 14

 I.2.3 Les applications de la fibre optique..... 15

 I.2.4 Avantages et inconvénients de la fibre optique..... 16

A. Avantages	16
B. Inconvénients	16
I.3 Les Réseaux optiques	17
I.3.1 Réseau tout optique (ou réseau transparent).....	17
I.3.2 Réseau non tout optique (ou réseau opaque)	17
I.3.3 Caractéristiques des différentes parties d'un réseau de télécom	17
I.3.3.1 Réseau d'accès	18
I.3.3.2 Réseau métropolitain	18
I.3.3.3-Réseau cœur	18
I.4 Classification géographique des réseaux	19
I.4.1 Le réseau étendu ou longue distance (WAN, Wide Area Network).....	19
I.4.1.1 Les réseaux terrestres :	19
I.4.1.2 Les réseaux sous-marins.....	19
I.4.2 Le réseau métropolitain (MAN, Metropolitan Area Network).....	20
I.4.3 Le réseau local (LAN, Local Area Network).....	20
I.4.4 Comparaison entre les trois types de réseau fixe	21
I.5 Conclusion:	21
 Chapitre II : <i>Etude détaillée du réseau FTTH</i>	
II.1Introduction.....	22
II.1.1 Historique	22
II.2 Les technologies FTTX.....	24
II.3 Les Catégories de technologie FTTx :.....	24
II.3.1 Les réseaux de desserte optique jusqu'à un point de distribution :.....	25
II.3.2 Les réseaux de desserte optique jusqu'à l'utilisateur :.....	27
II.4Les couches du réseau d'accès.....	29
II.4.1 Différents Composants d'un réseau optique	30
II.4.2 Chemin de la fibre dans le réseau d'accès FTTH	33

II.5	Architecture du réseau d'accès optique FTTH:	34
II.5.1	L'architecture point à point :	34
II.5.2	L'architecture point à multipoint passive ou PON (Passive Optical Network):	35
II.6	Les réseaux optiques passifs PON (Passive Optical Network):	35
II.6.1	L'architecture d'un réseau PON :	36
II.6.2	Principe de fonctionnement d'un réseau PON:	37
II.6.2.1	Sens montant du type PON	37
II.6.2.2	Sens descendant du PON	38
II.6.2.3	Architecture PON unidirectionnelle	38
II.6.2.4	Architecture PON bidirectionnelle	39
II.6.2.5	Quelques avantages et inconvénients d'un réseau optique passif (PON)	39
II.7	Les différents standards d'un réseau PON :	40
II.7.1	La norme A-PON (ATM-PON):	40
II.7.2	La norme B-PON (Broadband PON : évolution de la norme APON):	40
II.7.3	La norme E-PON (Ethernet PON) :	40
II.7.4	La norme G-PON (Gigabit PON) :	41
II.7.5	WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing-PON)	43
II.7.6	OFDMA-PON (Orthogonal Frequency Division Multiplexing PON)	43
II.7.7	Architecture AON (Active Optical Network ou Point MultiplePoint Active):	44
II.8	Comparaison entre xDSL et FTTH	45
II.9	Quelques usages du réseau d'accès FTTH	45
II.10	Conclusion:	46

Chapitre III : *Simulations & Résultats*

III.1	Introduction.....	47
III.2	Présentation du logiciel Optisystem.....	47
III.2.1	Applications d'Optisystem.....	48
III.2.2	Principales caractéristiques du logiciel Optisystem	49

III.3 Critères de qualité d'une transmission	50
III.3.1 Diagramme de l'œil	50
III.3.2 Le facteur de qualité en amplitude ou facteur Q.....	51
III.3.3 Le taux d'erreurs binaire	51
III.4 Schéma du réseau à simuler.....	51
III.4.1 Introduction.....	51
III.4.2 Sens descendant.....	53
III.4.3 Coupleur optique.....	54
III.4.4 Blocs des utilisateurs	55
III.4.4.1 ONU	56
III.5 Simulations & résultats	57
III.5.1 Signaux à la sortie pour une fibre de 1KM	58
III.5.2 Signaux à la sortie pour une fibre de 100 KM	59
III.5.3 Signaux à la sortie pour une fibre de 140 KM	61
III.5.4 Influence du débit de transmission sur le facteur de qualité Q :	67
III.5.5 Effet de l'atténuation sur la transmission	69
III.6 Conclusion	70
Conclusion générale.....	71

Bibliographies

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1: Structure de la fibre optique.	2
Figure I.2: Schéma simplifié d'une liaison optique.	3
Figure I.3: Structure d'une Diode Laser.	3
Figure I.4: Caractéristique de la fibre optique monomode.	5
Figure I.5: Caractéristique de la fibre optique multimode à saut d'indice	6
Figure I.6 : Caractéristique de la fibre optique multimode à gradient d'indice	7
Figure I.7: Performance des trois types fibres	8
Figure I.8: Propagation du signal lumineux dans le cœur.	9
Figure I.9 : Cône d'acceptance et ouverture numérique d'une fibre optique.	10
Figure I.10: Dispersion chromatique.	11
Figure I.11: Dispersion modale.	12
Figure I.12 : Différents types de connecteurs fibre optique.	12
Figure I.13 : Soudeuse fibre optique fujikura 19s.	13
Figure I.14 : Cliveuse fujikura CT-06.	13

Figure I.15: Schéma d'un amplificateur optique à fibre dopée aux ions d'erbium.	14
Figure I.16: Photodiode PIN.	15
Figure I.17: Différentes parties d'un réseau optique.	18

Chapitre II

Figure II.1 : Architecture générale d'un réseau NGN.	23
Figure II.2: Croissance du débit au cours des années.	23
Figure II.7: Différentes technologies FTTX.	25
Figure II.4: Réseaux optique jusqu'au point de distribution.	25
Figure II.5 : Structure d'un réseau FTTN.	26
Figure II.6: Structure d'un réseau FTTC/FTTCab.	27
Figure II.7: Réseaux optique jusqu'à l'utilisateur.	28
Figure II.8: Structure d'un réseau FTTH.	29
Figure II.9: Les couches d'un réseau d'accès.	30
Figure II.10: OLT MA5800-X17.	31
Figure II.11: Equipement OLT.	31
Figure II.12: Equipement ONT.	32

Figure II.13: Equipement ONU.	32
Figure II.14: Les différentes parties du réseau FTTH.	32
Figure II.15: Chemin de la fibre.	34
Figure II.16: Architecture P2P	34
Figure II.17: Topologies des réseaux FTTH, (a) point à point et (b) point à multipoint.	35
Figure II.18: Schéma d'un réseau PON.	36
Figure II.19: Différents architecture utilisé en PON	37
Figure II.20: PON en sens montant	38
Figure II.21: Architecture PON Sens descendant.	38
Figure II.22: Architecture PON unidirectionnelle	39
Figure II.23: Architecture PON bidirectionnelle.	39
Figure II.24: Architecture G-PON	41
Figure II.25: Technique de multiplexage WDM-PON.	43
Figure II.26: Schéma de principe de l'OFDMA-PON.	44
Figure II.27: Architecture du réseau d'accès optique point à multipoint actif.	44
Figure II.28: Quelques équipements numériques nécessitant du haut débit.	46

Chapitre III

Figure III.1 : Bibliothèque des composants	48
Figure III.2 :Interface d'utilisateur graphique (GUI).	48
Figure III.3 : Modification composant du paramètre.	49
Figure III.4 : Le diagramme de l'œil.	50
Figure III.5 : Schéma du réseau FTTH (WDM-GPON).	52
Figure III.6 : Sens descendant du réseau.	53
Figure III.7 : coupleur optique.	54
Figure III.8 : Bloc hôpital.	55
Figure III.9 : ONU.	56
Figure III.10 : paramètres du projet.	57
Figure III.11 : Q Facteur.	58
Figure III.12 : Signal oscilloscope.	58
Figure III.13 : diagramme de l'œil.	59
Figure III.14 : Q facteur pour 100 km.	60
Figure III.15 : Signal oscilloscope pour 100 km.	60
Figure III.16 : diagramme de l'œil pour 100 km.	61

Figure III.17 : Q facteur pour 140 km.	62
Figure III.18 : Signal oscilloscope pour 140 km.	62
Figure III.19 : diagramme de l'œil pour 140 km.	63
Figure III.20 : amplificateur optique à la sortie de la fibre.	63
Figure III.21 : Q facteur pour 140 km (signal amplifié).	64
Figure III.22 : Signal oscilloscope pour 140 km (signal amplifié).	64
Figure III.23 : diagramme de l'œil pour 140 km (signal amplifié).	65
Figure III.24 : Diagramme de l'œil par variation de la distance	66 67
Figure.III.25 : Diagramme de l'œil en fonction de la variation du débit.	68
Figure.III.26 : Diagramme de l'œil en fonction de variation d'atténuation	69 70

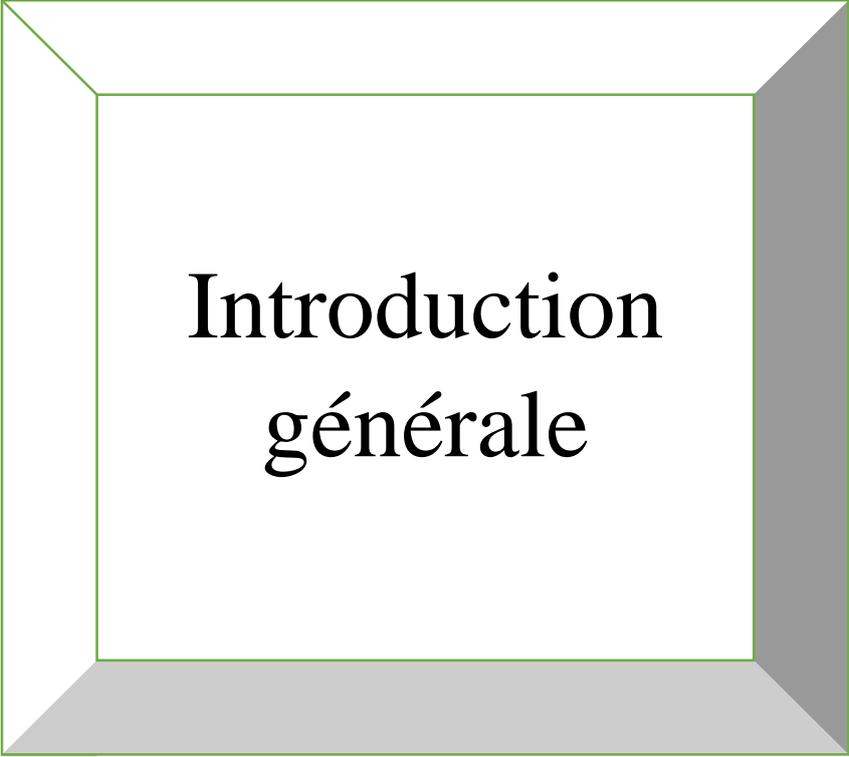
LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Comparaison de fibre mono et multimode.	8
Tableau I.2 : Types des réseaux optiques.	21
Tableau II.1: Comparaison entre les trois standards de PON.	42
Tableau II.2 : Comparaison du débit entre FTTH et ADSL.	45
Tableau II.3 : Comparaison entre xDSL et FTTH.	45
Tableau III.1 : Effet de variation de distance sur le facteur Q.	66
Tableau III.2: Les valeurs Q selon la variation du débit.	67
Tableau III.3 : Effet d'atténuation sur le facteur Q.	69

Liste des abréviations

A	F
APD: Avalanche Photo Diode.	FTTB: Fiber To The Building.
A-PON: Asynchronous Transfert Mode Passive Optical Network.	FTTC: Fiber To The Curb.
ATM: Asynchronous Transfert Mode.	FTTH: Fiber To The Home.
ADSL: Asymetrique Digital Subscriber Line.	H
B	HFC : Hybrid Fiber Coaxial)
B-PON: Broadband Passive Optical Network	L
BER: Bit Error Rate.	LAN: Local Area Network.
C	LASER: Light Amplifier Simulated Emission Radiated.
CR : Contre-Réaction.	LED: Light Emitting Diode.
D	M
DL : Diodes Laser	MAN: Metropolitan Area Network.
DEL : Diode Electroluminescente	MSAN: Multi Service Access Node.
DSLAM: Digital Subscriber Line Access Multiplexing.	N
DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing.	NRO: Nœud de Raccordement Optique.
E	NRZ: Non-Return-to-Zero.
E-PON: Ethernet Passive Optical Network	NGN: Next Generation Network.
O	T
ONT: Optical Network Termination	TM : Terminal Multiplexer
OLT: Optical Line Terminal	TDM : Time Division Multiplexing.
	V

<p>ON: Ouverture Numérique</p> <p>ONU : Optical Network Unit</p> <p>OptiSystem: Optical Communication System Design.</p> <p style="text-align: center;">P</p> <p>P2P: Point to Point.</p> <p>PDH: Plesiochronous Digital Hierarchy.</p> <p>PIN: Positive Intrinsic Photodiode.</p> <p>PON: Passive Optical Network.</p> <p>POP : Point Of Presence</p> <p>PTO : Point de Terminaison Optique</p> <p>PBO : Point du Branchement Optique</p> <p style="text-align: center;">R</p> <p>RTC: Réseau Téléphonique Commuté.</p> <p>3R: Retiming Reshaping Regenerating.</p> <p style="text-align: center;">S</p> <p>SRO: Sous-Répartiteur Optique.</p> <p>SDH: Synchronous Digital Hierarchy.</p> <p>SMF: Signal Mode Fiber.</p> <p>SONET: Synchronous Optical Network.</p>	<p>VDSL: Very high bit rate Digital Subscriber Line (Ligne Numérique d'Abonnée très haut débit).</p> <p style="text-align: center;">W</p> <p>WAN: Wide Area Network.</p> <p>WDM: Wavelength Division Multiplexing.</p>
---	--



**Introduction
générale**

La transmission de la parole était un souhait inné de l'homme. Historiquement le fil téléphonique fut le premier support de télécommunication et permit le développement du télégraphe et du téléphone. Il est toujours le média principal pour le raccordement aux réseaux téléphoniques et aux réseaux informatiques (téléphone, fax, internet...), sous forme de paire(s) torsadée(s). Puis fut la venue du câble coaxial (guides d'ondes) ainsi que le faisceau hertzien.

Le besoin croissant en capacité des réseaux de télécommunications dans le monde a fait que ces supports traditionnels soient saturés, en termes de débit et de bande passante.

A l'arrivée de la fibre optique, le monde des télécommunications a connu un grand essor en compensant les performances et l'offre en bande passante et débits que le cuivre n'est plus en mesure de répondre face à la demande du très haut débit des nouveaux services multimédias.

Dans ce cadre, l'objectif de notre projet sera de voir les améliorations apporté par la fibre optique en terme de qualité de service et de débit par rapport aux autre moyens de transmission, notre travail c'est porté plus exactement sur l'étude du réseau FTTH, répartie en trois chapitres, le premier chapitre est basé sur des généralités concernant la fibre optique, les différentes caractéristiques et composants de la chaine de transmission optique.

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

Et au final on termine avec le troisième chapitre dans lequel l'objet de la simulation du réseau FTTH, dans ce chapitre nous allons présenter une brève description de notre outil de travail le logiciel « OPTISYSTEM », la simulation est basé sur la variation en terme de distance de la liaison ainsi la variation de débit de transmission et l'effet d'atténuation sur notre liaison optique pour évaluer l'efficacité de cette dernière.

Chapitre I

Généralités sur la fibre optique

I.1 Introduction

Les systèmes numériques les plus rapides transmettaient l'information à un débit de 10 Mbits/s, le câble coaxial était absolument accommodé à assurer sa fonction de support de transmission, mais avec l'arrivée des nouveaux services liés au développement du multimédia, le besoin d'un débit de transmission d'informations plus élevé, des alternative au câble coaxial sont apparus à cause des pertes trop élevées, à des courtes distances de propagation, et des performances limitées.

La venue des technologies basées sur la fibre optique a révolutionné l'univers des télécommunications.

Ce chapitre sera consacré la fibre optique en générale, les caractéristiques d'une liaison optique, avantages et inconvénients ainsi les différents types des réseaux optiques.

I.2 La fibre optique

I.2.1 Définition

La fibre optique est un guide d'onde cylindrique, composée des éléments de base suivants :

➤ **Le cœur**

C'est la région centrale de la fibre qui permet le guidage des ondes lumineuses, d'indice de réfraction n_1 .

➤ **La gaine**

Représente une couche entourant le cœur de la fibre avec un indice de réfraction légèrement inférieur à celui du cœur ce qui permet par conséquent, la réflexion totale et perpétuelle des modes à l'interface cœur-gaine.

➤ **Le revêtement**

Le revêtement qui assure la protection.

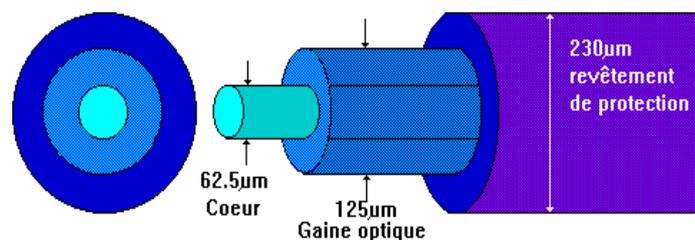


Figure I.1: Structure de la fibre optique [2]

I.2.2 Différents composants d'une liaison optique

Une Liaison point à point sur fibre optique met en jeu plusieurs sous-ensembles de base comme schématisé par la figure (Figure I.2) suivante :

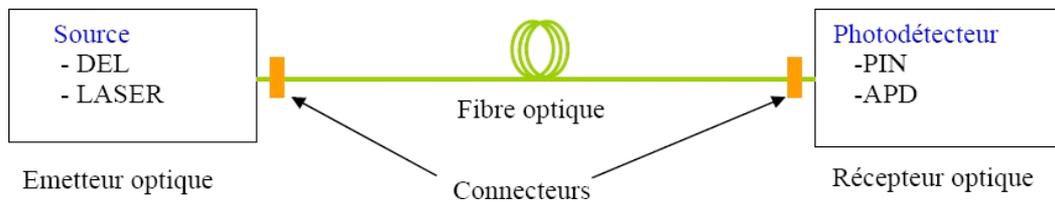


Figure I.2: Schéma simplifié d'une liaison optique [6]

I.2.2.1 Dispositif d'émission

En télécommunication optique, la nécessité d'utiliser des bandes passantes de plus en plus larges impose le choix de sources à spectres réduits telles que les diodes laser (DL) et les diodes électroluminescentes (DEL).

Diode laser (DL)

Elle se base sur deux processus fondamentaux qui sont : l'absorption ou pompage du courant électrique et l'émission stimulée (amplification dans les semi-conducteurs).

La diode Laser est une diode cohérente, elle est utilisée essentiellement dans les systèmes de transmission à très grandes distances (faible largeur spectrale et une bande passante importante).

Ainsi la diode laser est la source la mieux adaptée pour les télécommunications optiques car elle permet d'avoir la meilleure efficacité de couplage optique avec la fibre.

Un laser est un oscillateur composé d'un milieu amplificateur (A) et d'une boucle de contre-réaction (CR).

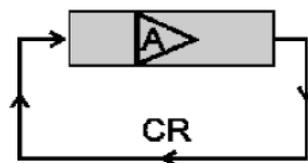


Figure I.3: Structure d'une Diode Laser

La diode laser représente les caractéristiques suivantes :

- * La source DL est cohérente et monochromatique.
- * Largeur de spectre étroite.
- * Les émissions se font dans la même direction (diagramme de rayonnement directive).
- * Utilisée dans les systèmes de transmission à grande distance.

Diode électroluminescente (DEL)

La DEL est une source incohérente qui est basée sur l'émission spontanée, elle est généralement utilisée dans des liaisons à courtes distances avec de la fibre multimodes. Elle présente un spectre d'émission assez large et elle est utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très grandes bandes passantes.

Les caractéristiques de ce dispositif sont :

- ✓ La diode DEL est une source polychromatique, et incohérente.
- ✓ Le spectre est assez large.
- ✓ Le diagramme de rayonnement est moins directif.
- ✓ La caractéristique puissance-courant est assez linéaire.
- ✓ Utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de grande bande passante

I.2.2.2 Canal de transmission: Fibre optique

A. Les différents types de la fibre optique

Les fibres optiques sont caractérisées par les dimensions du cœur et de la gaine ainsi que par la variation de l'indice de réfraction à l'intérieur du cœur. Les différents chemins que peut emprunter un rayon lumineux qui se propage à travers le cœur de la fibre sont appelés modes de propagation.

On distingue d'après ce critère, deux catégories de fibres optiques.

❖ La fibre optique monomode

Cette fibre est utilisée pour les longues distances et pour les hauts débits, son cœur très fin (8 à 10 μm) n'admet qu'un seul mode de propagation et les pertes y sont minimales. De cette façon, elle offre peu de dispersion du signal et celle-ci peut être considérée comme nulle.

La bande passante est presque infinie, supérieure à 10 GHz/km avec une longueur d'onde de coupure 1.2 μ m. Le diamètre du cœur (9. μ m) et l'ouverture numérique sont si faibles que les rayons lumineux se propagent parallèlement avec des temps de parcours égaux. Ce type de fibre est surtout utilisé en liaison longue distance. Le petit diamètre du cœur des fibres nécessite une grande puissance d'émission qui est délivrée par des diodes laser. Les longueurs d'onde employées sont 1310, 1550 et 1625 nm.

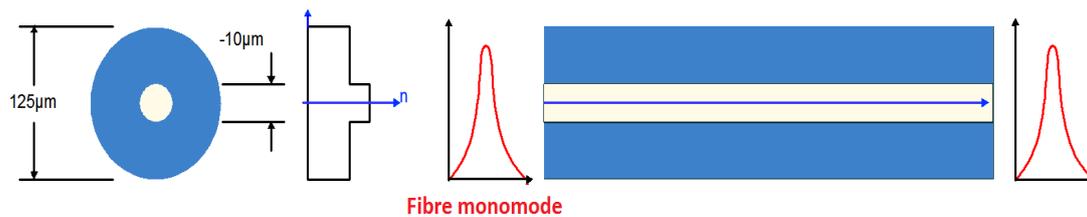


Figure I.4: Caractéristique de la fibre optique monomode

En utilisant une fibre monomode on peut souligner les avantages suivants :

- ✓ Débit : environ 100 Gbit/s
- ✓ Portée maximale : environ 100 Km.
- ✓ Affaiblissement : 0,5 dB/Km

❖ La fibre optique Multimode

Cette fibre est utilisée pour les courtes distances et peut atteindre le Gbit/s, elle a un cœur de diamètre important (50 μ m à 62.5 μ m)

Il existe deux types de fibres optiques multimode :

- La fibre à saut d'indice
- La fibre à gradient d'indice

➤ La fibre à saut d'indice

Le débit dans cette fibre atteint 50 Mbit/s. La propagation dans son cœur entraîne d'importantes déformations du signal à l'entrée et donc un étalement du signal transmis. Les différents rayons empruntent des trajectoires différentes, leurs chemins optiques et leurs temps de propagation sont différents. Il en résulte donc une dispersion intermodale. Pour

diminuer cet effet, le profil d'indice de cœur peut être modifié de telle sorte a créé un « Gradient d'indice ».

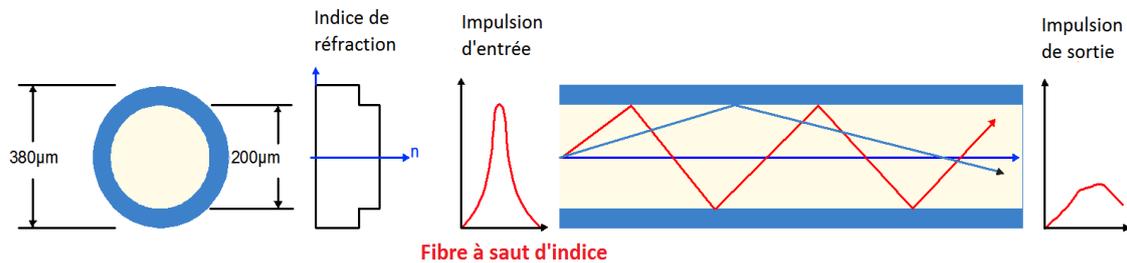


Figure I.5: Caractéristique de la fibre optique multimode à saut d'indice [3]

Avantages

Avec une fibre multimode à saut d'indice on peut bénéficier :

- ✓ Faible prix
- ✓ Facilité de mise en œuvre
- ✓ Débit : environ 50 Mbit/s
- ✓ Portée maximale : environ 2 Km
- ✓ Affaiblissement : 10 dB/Km

Inconvénients

L'inconvénient d'une fibre multimode à saut d'indice est la perte et distorsion importante.

➤ La fibre à gradient d'indice

La fibre multimode à gradient d'indice est utilisée dans les réseaux locaux. C'est une fibre multimode, donc plusieurs modes de propagation coexistent. A la différence de la fibre à saut d'indice, il n'y a pas de grande différence d'indice de réfraction entre cœur et gaine. Cependant, le cœur des fibres à gradient d'indice est constitué de plusieurs couches de matière ayant un indice de réfraction de plus en plus élevé, l'atténuation sur ce type de fibre est moins importante que sur les fibres à saut d'indice.

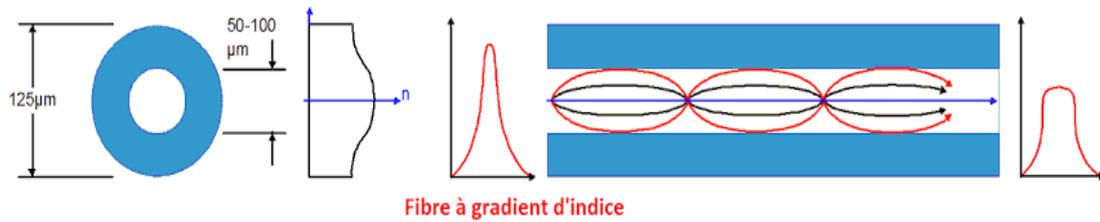


Figure I.6: Caractéristique de la fibre optique multimode à gradient d'indice [3]

Avantages

L'avantage d'une fibre multimode à gradient d'indice est :

- ✓ Bande passante raisonnable
- ✓ Bonne qualité de transmission
- ✓ Débit : environ 1 Gbit/s
- ✓ Portée maximale : environ 2 Km
- ✓ Affaiblissement : 10 dB/Km

Inconvénients

Une fibre multimode à gradient d'indice est difficile à mettre en œuvre.

❖ Fréquence normalisée et nombres de modes

La fréquence normalisée détermine le nombre de modes pouvant se propager dans la fibre, elle est exprimée par :

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{nc^2 - ng^2} \text{ avec } \lambda_0: \text{ longueur d'onde dans le vide.}$$

a : le rayon du cœur

On parle d'une fibre monomode si $V < 2.405$, autrement la fibre est multimode $V > 2.405$ pour une fibre à saut d'indice et $V > 2.405 * 1 + 2/\alpha$ pour une fibre à gradient d'indice.

Le nombre de modes M pouvant être transportés par une fibre multimode est calculé comme suit :

$$M = \frac{\alpha}{\alpha + 2} * \frac{v^2}{2} \text{ pour une fibre optique à gradient d'indice.}$$

$$M = \frac{v^2}{2} \text{ pour une fibre a saut d'indice.}$$

Avec α : Profil d'indice

B. Comparaison des performances des trois types de fibres

La figure suivante montre les performances des trois types de la fibre optique, l'atténuation est constante quelle que soit la fréquence, seule la dispersion lumineuse limite la largeur de la bande passante.

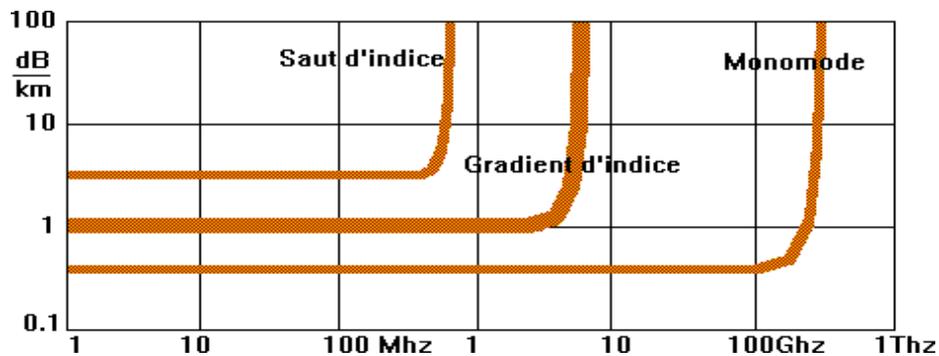


Figure I.7: Performance des trois types fibres

Le tableau suivant résume une comparaison entre la fibre monomode et multimode:

Fibre monomode	Fibre multimode
Faible dispersion	Forte dispersion
Connexion délicate	Connexion facile
Faible atténuation	Forte atténuation
Haut débit, longue distance	Réseau locaux

Tableau I.1: Comparaison de fibre mono et multimode

C. Notions sur l'optique géométrique

🌈 Indice de réfraction

Les caractéristiques d'un milieu de propagation sont :

- La permittivité ϵ
- La perméabilité μ
- La conductivité σ
- L'indice de réfraction est défini par : $n=\sqrt{\mu\epsilon}$

✚ Vitesse de propagation

La vitesse de propagation de la lumière dans le cœur de la fibre est calculée en fonction de l'indice de réfraction du cœur n_c et de la vitesse de la lumière dans le vide C .

$$V=C/n_c.$$

✚ Le principe de propagation dans la fibre

La propagation du signal lumineux dans les fibres optiques repose sur le principe de la réflexion totale. Les rayons lumineux qui se propagent le long du cœur de la fibre heurtent sa surface avec un angle d'incidence supérieur à l'angle critique : la totalité de la lumière est alors réfléchiée dans la fibre. La lumière peut ainsi se propager sur de longues distances, en se réfléchissant des milliers de fois. Afin d'éviter les pertes de lumière liées à son absorption par les impuretés à la surface de la fibre optique, le cœur de celle-ci est revêtu d'une gaine en verre d'indice de réfraction beaucoup plus faible ; les réflexions se produisent alors à l'interface cœur-gaine.

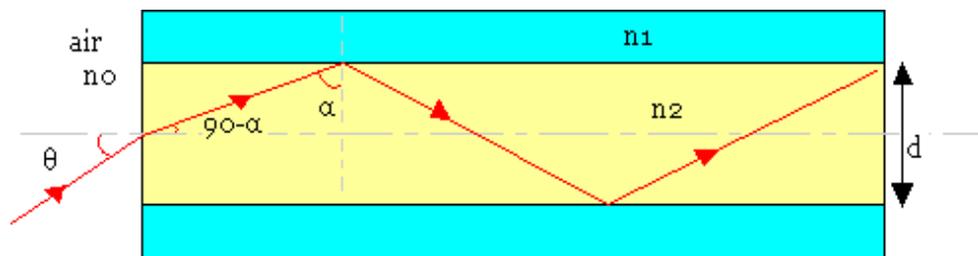


Figure I.8: Propagation du signal lumineux dans le cœur

✓ Caractéristiques de la fibre optique

La fibre optique est caractérisée par certains paramètres qui sont déterminés à partir de ses différents types. Les paramètres les plus remarquables sont l'ouverture numérique, l'atténuation, la bande passante et la dispersion.

a. Ouverture numérique et cône d'acceptance

L'ouverture numérique d'une fibre optique caractérise le cône d'acceptance : si un rayon lumineux tente de pénétrer la fibre en provenant de ce cône, ce dernier sera guidé par

réflexion totale interne, dans le cas contraire, le rayon ne sera pas guidé. L'ouverture numérique d'une fibre dans un milieu constitué d'air [$n(\text{air})=1$], s'exprime par la formule :

$$ON = \sin(i) = n_c - n_g$$

Avec : i : angle d'incidence

n_c : indice de réfraction du cœur de la fibre

n_g : indice de réfraction de la gaine de la fibre

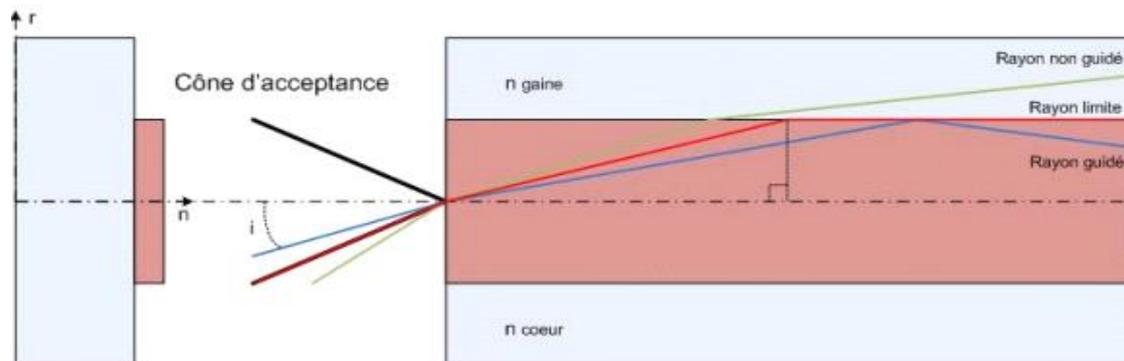


Figure I.9: Cône d'acceptance et ouverture numérique d'une fibre optique [2]

- a- Les rayons verts arrivent avec $\theta_i > \theta_{i \text{ Lim}}$ (en dehors du cône), ces rayons ne seront pas guidés.
- b- Les rayons rouges arrivent avec $\theta_i = \theta_{i \text{ Lim}}$, ces rayons seront guidés jusqu'au bout de la fibre, mais avec une direction parallèle à l'axe de la fibre.
- c- Les rayons bleus arrivent avec $\theta_i < \theta_{i \text{ Lim}}$, ces rayons seront guidés de façon normale, c'est à dire en suivant le principe de réflexion totale interne au sein du cœur de la fibre. [2]

b. Atténuation [1]

L'atténuation du signal dépend de la nature de la fibre essentiellement en fonction du type (monomode ou multimode). Le choix de la fibre optique utilisée est principalement imposé par la longueur d'onde du signal transmis. Ainsi, pour des signaux de longueur d'onde entre 800 nm et 1300 nm, on est contraint d'utiliser une fibre multimode, alors que pour des signaux de longueur d'onde de 1280 à 1640 nm, on peut utiliser une fibre monomode.

L'atténuation dans une fibre optique est définie comme étant le rapport de la puissance optique transmise dans la fibre et la puissance reçue exprimée en unité logarithmique par unité de longueur.

$$A[\text{dB}] = 10 \log \left(\frac{P_e}{P_r} \right)$$

Avec : P_e : la puissance lumineuse à l'entrée,

P_r : est la puissance lumineuse à la sortie,

c. La dispersion

La dispersion dans une fibre est répartie en deux types : chromatique et modale.

✓ Dispersion chromatique

La dispersion chromatique est la combinaison de deux types de dispersion : la dispersion du matériau et la dispersion du guide d'onde, la dispersion du matériau est causée par la dépendance de l'indice de réfraction de la longueur d'onde. En effet la dispersion du matériau est très petite par rapport à la longueur d'onde d'environ 1300nm, cette dispersion existe dans toute les fibres optique qu'elle soit monomode ou multimode. La dispersion du guide d'onde est particulièrement importante pour les fibres monomodes, elle est causée par le fait que la répartition de la lumière du mode fondamental sur le cœur et la gaine dépend de la longueur d'onde. La dispersion totale est la somme des dispersions due au matériau et la dispersion du guide d'onde.

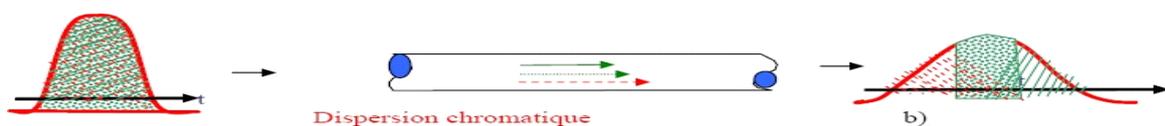


Figure I.10: Dispersion chromatique

✓ Dispersion modale (ou intermodale)

Ce type de dispersions se produit du fait de la propagation du signal optique suivant différents trajets correspondant à chaque mode. Ce phénomène se manifeste uniquement dans les fibres optiques à large cœur multimodes. Il n'existe pas dans les fibres monomodes où le cœur est très fin.

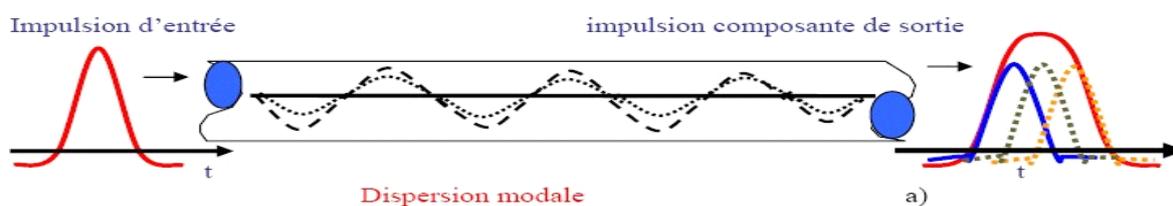


Figure I.11: Dispersion modale**D. Raccordement de la fibre optique**

Il existe deux méthodes permettant de réaliser le raccordement de fibres optiques :

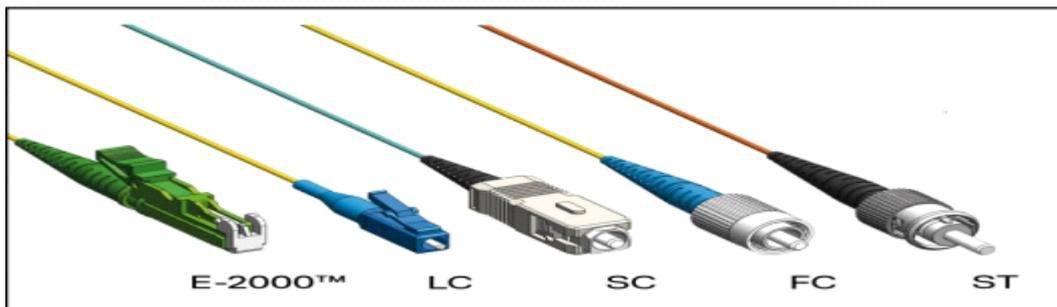
- Le raccordement par connecteurs
- Le raccordement par épissure (soudure)

✚ Raccordement à l'aide de connecteurs

Les connecteurs fibre optique sont des dispositifs normalisés terminant une fibre optique et permettant de les raccorder, on parle alors de couplage, et il existe trois types de couplages :

- Couplage source-fibre
- Couplage fibre-fibre
- Couplage fibre-récepteur

Il existe plusieurs types de connecteurs tel que : LC,SC,ST,FC,E2000

**Figure I.12 :** Différents types de connecteurs fibre optique**Avantage**

- Le raccordement est robuste et amovible.

Inconvénient

- Ce raccordement engendre des pertes de lumière.

✚ Raccordement par épissure

Elle consiste à raccorder deux brins par soudure grâce à une soudeuse après avoir été nettement coupés par une cliveuse.



Figure I.13: Soudeuse fibre optique fujikura 19s



Figure I.14: Cliveuse fujikura CT-06

Avantage

- C'est un raccordement simple et rapide à réaliser, et les pertes y sont très faibles.

Inconvénient

- C'est un raccordement fragile et il est définitif.
- Il faut investir dans une soudeuse.

E. Compensation des pertes

Les pertes dans une liaison optique peuvent être compensées par l'utilisation d'amplificateurs optiques qui ont pour but :

- a- Régénération
- b- Régénération et remise en forme
- c- Régénération, remise en forme et synchronisation Ainsi le signal atténué est restitué.

a. Amplificateur optique à semi-conducteur

La lumière incidente rentre dans le circuit de l'amplificateur, elle est amplifiée et sort de l'autre extrémité pour être couplée dans la fibre.

b. Amplificateur optique à fibre dopée en Erbium

C'est un amplificateur optique à fibre dopée aux ions d'erbium.

IL est composé de trois éléments :

- La fibre dopée elle-même
- Une source d'excitation de la fibre, cette source est un laser de puissance élevée, appelé laser de pompage

- Un multiplexeur qui permet de coupler dans la fibre le signal à amplifier ainsi que le laser de pompage

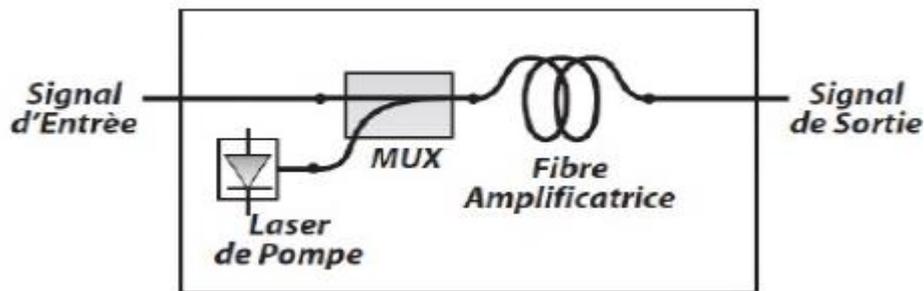


Figure I.18: Schéma d'un amplificateur optique à fibre dopée aux ions d'erbium.

I.2.2.3 Partie réception

Le photodétecteur est un composant indispensable dans les communications par fibres optiques. Son rôle est de traduire le signal optique envoyé par la fibre optique en signal électrique, qui sera traité par des dispositifs électroniques. Les photodétecteurs les plus utilisés dans les systèmes de transmission par fibre optique sont les photodiodes et les photodiodes PIN.

A. Photodiode

C'est une jonction PN polarisée en inverse. Les électrons minoritaires de P absorbent les photons lumineux et vont passer vers N, puis ils seront extrais à l'extérieur par le champ électrique du générateur, créant ainsi un faible courant électrique.

B. Photodiode PIN

C'est une jonction PN intercalée par une couche intrinsèque I, dans le but de diminuer le dopage de N pour augmenter d'avantage le courant électrique générer par la jonction. [1]

Dans la transmission optique les détecteurs doivent :

- ✓ Fournir un bon couplage avec la fibre.
- ✓ Avoir une grande sensibilité à la longueur d'onde de fonctionnement.
- ✓ Avoir une bande passante adéquate.
- ✓ Avoir une faible exigence du point de vue tension de source.

- ✓ Pas d'influence des conditions extérieures sur les caractéristiques.
- ✓ Avoir une grande fiabilité (bon rendement quantique).
- ✓ Avoir un temps de réponse très court et un faible bruit additionnel.



Figure I.15: Photodiode PIN

I.2.3 Les applications de la fibre optique

Parmi les applications de la fibre optique nous pouvons citer :

- ❖ Les télécommunications, pour la réalisation des réseaux à haut débit à grande distance en technologie WDM, SDH, ATM.
- ❖ Réseaux nationaux et internationaux de télécommunication.
- ❖ Réseaux locaux en environnement bruité
- ❖ L'audiovisuel, pour la réalisation des réseaux câblés de télévision en association avec le câble coaxial utilisé pour le raccordement de l'abonné.
- ❖ La médecine, ou la fibre optique est notamment utilisée :
 - En chirurgie, pour transporter le faisceau laser jusqu'au tissu à traiter.
 - En endoscopie, pour éclairer l'intérieur du corps et transmettre les images jusqu'au médecin.
- ❖ L'éclairage (muséographique, architectural, espaces d'agrément publics ou domestiques).

❖ Domaine militaire : la fibre optique répond aux besoins des lances missiles optiques, des systèmes de radars optiques ainsi que des systèmes de contrôles.

I.2.4 Avantages et inconvénients de la fibre optique

A. Avantages

- ✓ Les pertes du signal sur une longue distance sont très faibles
- ✓ Bande passante très grande,
- ✓ Immunité au bruit,
- ✓ Absence de rayonnement vers l'extérieur,
- ✓ Absence de diaphonie,
- ✓ Les fibres optiques sont insensibles aux perturbations radioélectriques.
- ✓ Isolation électrique
- ✓ Poids et dimensions réduites,
- ✓ Excellente qualité de la transmission,
- ✓ Les débits sont très élevés jusqu'à 100 Mbit/s
- ✓ Un faible taux d'entretien
- ✓ Durée de vie importante

B. Inconvénients

- ✓ Les interfaces électriques/optiques ainsi que les connecteurs sont d'un prix élevé
- ✓ Des composants fragiles
- ✓ Difficultés d'adaptation avec les transducteurs optoélectroniques
- ✓ Exigences micromécaniques importantes (connexions, alignement)
- ✓ Difficultés de raccordement aussi bien entre deux fibres qu'entre une fibre et le module d'émission ou de réception.

I.3 Les Réseaux optiques

Les réseaux optiques permettent de transporter des signaux sous forme optique et non électrique dans les réseaux classiques. Les réseaux optiques peuvent être classés en deux catégories : le réseau tout optique, et le réseau non tout optique.

I.3.1 Réseau tout optique (ou réseau transparent)

Dans un réseau optique (photonique, en anglais « photonic network »), les informations sont transmises sous la forme de signaux optiques et non pas électriques : dans ce type de réseau en effet, les données ne sont pas transportées par les courants électriques mais par la lumière.

I.3.2 Réseau non tout optique (ou réseau opaque)

Un réseau optique opaque est un réseau optique nécessitant des conversions optoélectroniques du signal entrant sur chaque port d'entrée d'un nœud du réseau. Le signal optique est converti en signal électrique lors de chaque passage dans un nœud. Dans ce type de réseau, la couche optique sert uniquement à transporter un signal optique entre deux nœuds du réseau. Ce réseau ne permet pas d'établir une connexion optique de bout à bout.

I.3.3 Caractéristiques des différentes parties d'un réseau de télécom [8]

Les réseaux de télécommunication peuvent être subdivisés en trois parties : le réseau cœur, le réseau métropolitain et le réseau d'accès.

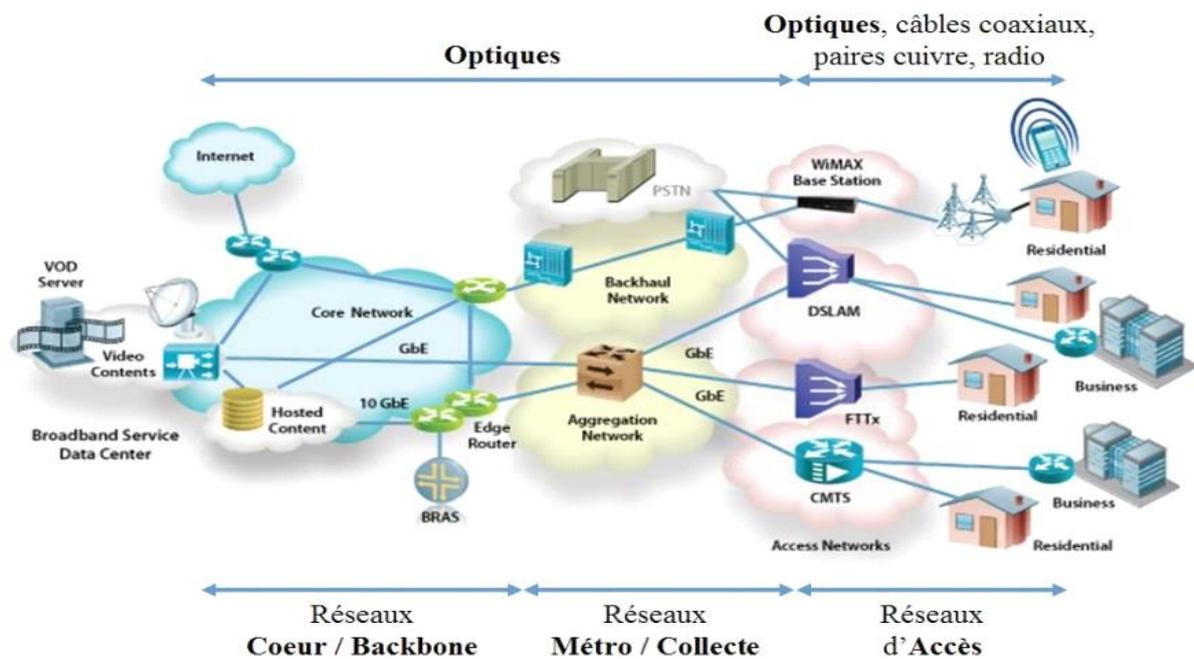


Figure I.16: Différentes parties d'un réseau optique [9]

Ces différentes parties se caractérisent par la dimension de leurs zones de couverture, les technologies mises en œuvre et les fonctions à remplir.

I.3.3.1 Réseau d'accès

Le réseau d'accès permet de raccorder les clients aux réseaux des opérateurs. Différentes technologies sont utilisées dans la conception des réseaux d'accès, notamment xDSL, wifi, Ethernet ou FTTH. Le réseau d'accès a une portée de moins de 10 km.

I.3.3.2 Réseau métropolitain

Le réseau métropolitain permet de collecter le flux d'information venant des réseaux d'accès et de le transmettre au réseau cœur ou de distribuer le flux reçu aux différents réseaux d'accès.

I.3.3.3 Réseau cœur

Le réseau cœur permet d'interconnecter les réseaux métropolitains entre eux, à l'Internet et aux différents réseaux des autres opérateurs. Le réseau cœur a typiquement une topologie maillée et s'étend sur plusieurs kilomètres. Il utilise les technologies les plus récentes pour accroître le débit de transmission car il supporte une grande quantité de données du réseau. Il a une portée de plus de 100 km.

I.4 Classification géographique des réseaux [9]

Nous pouvons classés les réseaux en trois grandes parties selon leurs portées maximale.

I.4.1 Le réseau étendu ou longue distance (WAN, Wide Area Network)

Il est déployé à l'échelle d'un pays ou d'un continent, et ses nœuds sont de très grands centres urbains. Ce type de système :

- comprend des systèmes terrestres ou sous-marins ;
- véhicule des données à grande vitesse sur des longues distances de plus de 100 km
- peut utiliser des répéteurs pouvant régénérer le signal optique.

Ces répéteurs sont constitués par des régénératrices optoélectroniques 3R (Retiming, Reshipping, Regenerating) et par des amplificateurs optiques.

I.4.1.1 Les réseaux terrestres

Les réseaux terrestres se définissent tels que les réseaux qui :

- Ont une dimension de quelques centaines de km et relie des grands centres urbains, reliés par des multiplexeurs d'insertion extraction
- Utilisent une topologie propre au SDH avec des boucles en double anneau, permettant en cas de panne d'un anneau de diriger les signaux sur l'autre ;
- Sont flexible vis-à-vis de la demande ; actuellement à 2.5 Gb/s, ils peuvent être augmentés, à l'aide du DWDM sur N canaux, à $N \times 2.5$ Gb/s ou $N \times 10$ Gb/s.

I.4.1.2 Les réseaux sous-marins

Ces réseaux se définissent tels que les réseaux qui :

- Peuvent atteindre plusieurs milliers de km
- Peuvent aussi relier des îles ou des pays d'un même continent. De plus, il est moins coûteux de poser des câbles sous-marins que des câbles enterrés ;
- Utilisent la 3^{ème} fenêtre de la fibre optique à $\lambda=1550$ nm où l'atténuation est la plus faible.

Les liaisons transocéaniques les plus anciennes sont de type point-à-point; dans les systèmes les plus modernes, on adopte la structure en anneau de façon à pouvoir réorienter les signaux en cas de défaillance d'une voie.

I.4.2 Le réseau métropolitain (MAN, Metropolitan Area Network)

C'est un réseau qui dessert une grande ville et ses environs, ce type de réseau :

- à une longueur qui varie entre 1 à 100 km ;
- Est de type récent, en constante évolution et croissance
- A un grand degré de connectivité ;
- Utilise des anneaux métropolitains qui se caractérisent généralement par un trafic maillé avec un certain degré de concentration lié à l'interconnexion avec le réseau longue distance. Les anneaux d'accès collectent en général le trafic de plusieurs nœuds pour le concentrer vers un nœud partagé avec un réseau métropolitain structurant
- Doit, à la différence du réseau longue distance, prendre en charge des formats, des protocoles et des débits de transmission très divers
- Mêlent les trafics de la hiérarchie numérique synchrone (SDH) ou autre encore. Les amplificateurs optiques sont essentiels pour les applications de ce type de réseau ;
- Est souvent équipé par des cartes transpondeurs multi-débits universelles, acceptant n'importe quel débit de 100 Mb/s à 2.5 Gb/s ;
- Utilise le DWDM, offrant les mêmes avantages que les systèmes à longues distances
- Les distances étant plus faibles, nécessite moins d'amplificateurs optiques, ce qui permet d'étendre la bande spectrale au-delà des amplificateurs EDFA et réduit les problèmes de dispersion.

I.4.3 Le réseau local (LAN, Local Area Network)

Aussi appelé réseau d'accès ou de desserte, ce réseau :

- À une longueur qui varie de 2 à 70 m ;
- Est constitué par une partie en fibre entre l'autocommutateur et la terminaison de réseau optique suivie d'une partie en conducteur métallique qui va jusqu'au terminal de l'abonné.

I.4.4 Comparaison entre les trois types de réseau fixe

Il existe trois types de réseau fixe qui se distinguent de leur dispersion géographique et leur protocole de communication.

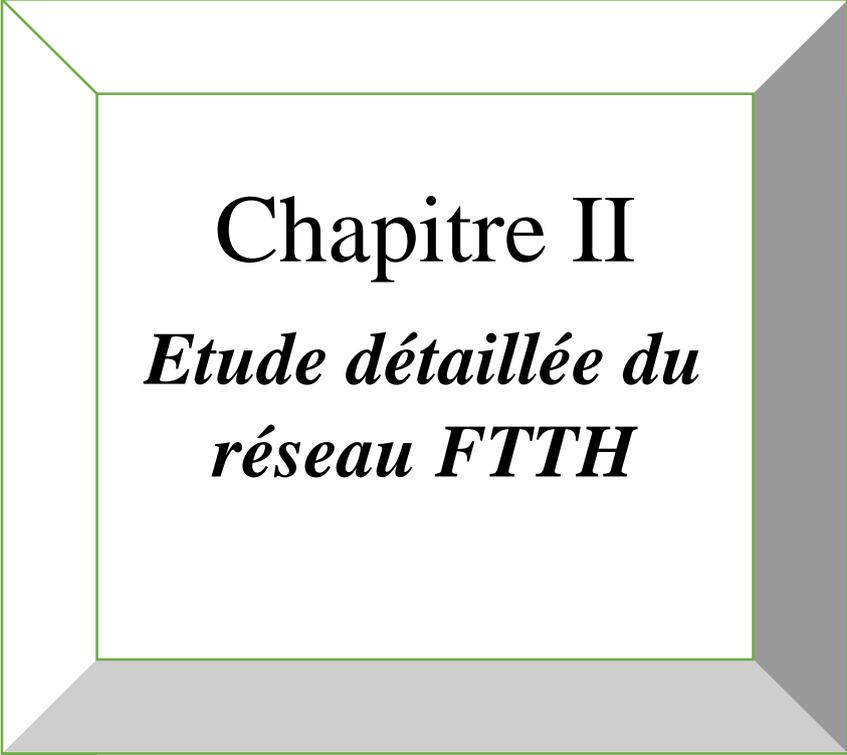
	Réseau LAN	Réseau MAN	Réseau WAN
Nombre d'éléments	un ensemble d'équipements, appartenant à une même société	interconnecte plusieurs LANs	interconnecte plusieurs LANs ou MANs
Dispersion Géographique	les machines sont situées sur un périmètre géographiquement restreint	Réseaux LANs géographiquement proches	Très grandes distance
Protocoles utilisés	Ethernet, Token Ring, FDDI,...	FDDI, ATM, SDH, etc	SDH, SONET, WDM,...

Tableau I.2: Types des réseaux optiques

I.5 Conclusion

Nous avons présenté au cours de ce chapitre les notions indispensables à la compréhension des phénomènes des télécommunications par fibre optique, on a commencé par présenter la fibre optique d'une manière générale ensuite, on a cité les différents types de fibre qui existent avec une explication sur chacune de ces dernières, puis on a parlé de ces avantages et inconvénients.

Malgré qu'elle est considérée comme le meilleur support de transmission, la fibre optique présente des limitations majeurs pouvant provoquer une grande déformation du signal émis en dégradant sa qualité au bout d'une longueur de transmission donnée, et donc récupération impossible de l'information émise. Pour corriger ces défauts plusieurs techniques ont été énumérées dont chacune d'elles à ses propres principes.



Chapitre II

Etude détaillée du réseau FTTH

II.1 Introduction

Les moyens de télécommunications ne cessent d'accroître à l'échelle exponentielle depuis le début du vingtième siècle, avec l'apparition des nouveaux services liés au développement du multimédia, un besoin d'un haut débit de transmission d'informations a vu le jour : la fibre optique est enfin utilisée via la technologie FTTH pour connecter les particuliers dans les années à venir, ce support de transmission apportera un changement radical dans l'environnement des télécommunications à travers le monde.

Actuellement, l'Internet est utilisé pour diffuser des programmes de télévision, contrôler des usines, interconnecter des banques, gérer des transmissions militaires, suivre des opérations médicales, ou transporter des conversations téléphoniques. Des services de plus en plus gourmands en bande passante comme le partage des contenus, le service de stockage en ligne, la télé haute définition (TV3D et TVHD), les jeux en ligne, le Peer To Peer, le téléenseignement et la télémédecine viennent s'ajouter à la liste des services usuels.

Ce chapitre portera une étude sur la technologie du réseau d'accès à fibre optique jusqu'à l'abonné (Fiber To The Home ou FTTH).

II.1.1 Historique

Les réseaux traditionnels de téléphonie fixe des opérateurs historiques, tel qu'Algérie Telecom, était basés sur la commutation de circuits entre les lignes, et sur une structure hiérarchique des commutateurs selon différentes zones d'appels. De plus, ce réseau téléphonique cohabite avec un ou plusieurs réseaux dédiés au transport de données (dont le réseau utilisé pour la fourniture des services haut-débit DSL). C'est ainsi que le réseau NGN est apparue, regroupant un certain nombre de réseau dans son architecture tel que RTC, DSLAM, MSAN comme le montre la figure (Figure II.1) ci-dessous.

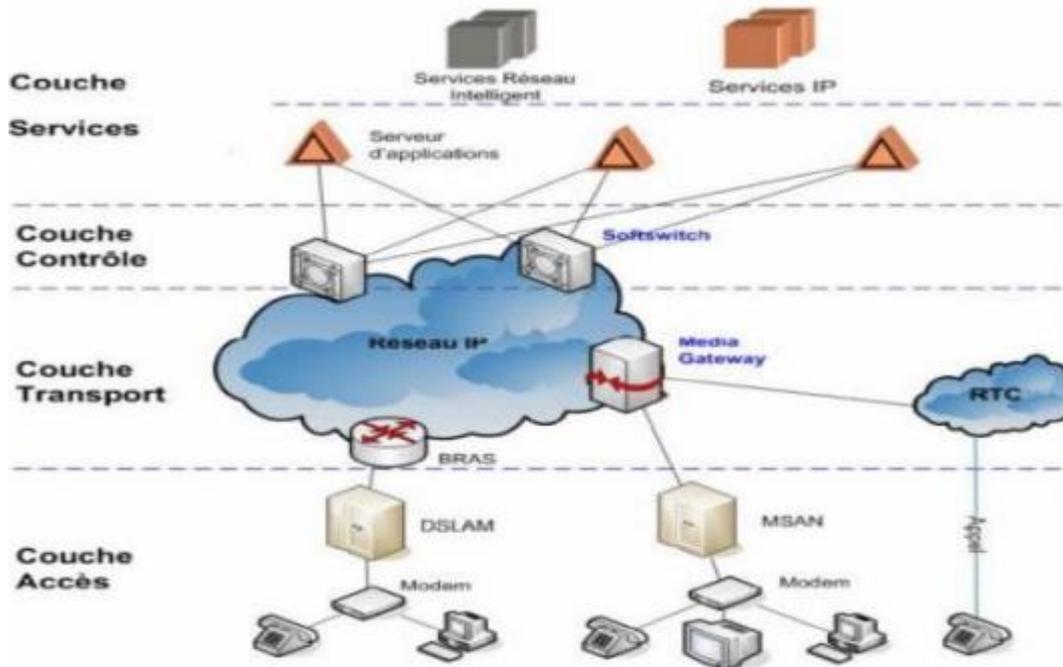


Figure II.1: Architecture générale d'un réseau NGN [11]

L'arrivée de la technologie Ethernet dans les réseaux d'accès a permis le déploiement à grande échelle de raccordement optique résidentiels FTTx (Fiber To The...) qui permet des débits de 10, 50 ou 100 Mbit/s, puisque l'affaiblissement de la fibre est moins important que celui du cuivre à très haut débit, la solution envisageable est d'amener la fibre plus près du client. La figure (Figure II.2) ci-dessous indique l'augmentation de débit en fonction des années.

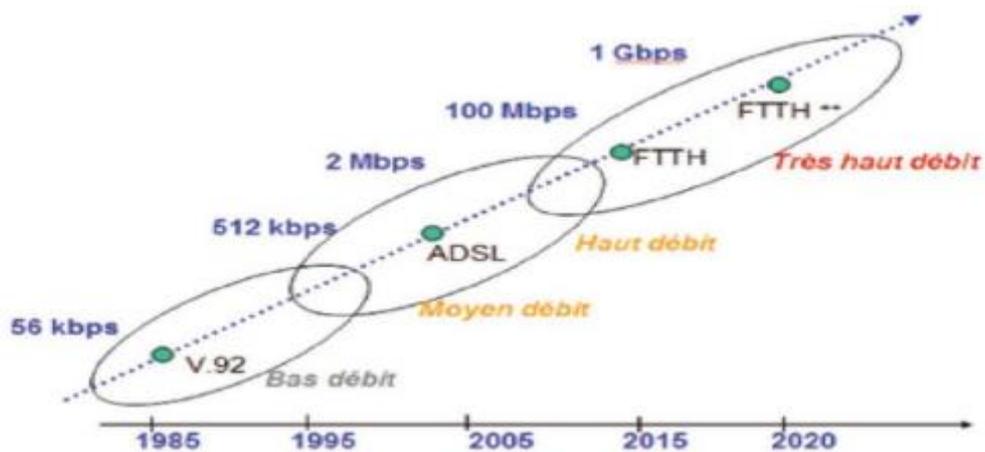


Figure II.2: Croissance du débit au cours des années [12]

II.2 Les technologies FTTX

La FTTx (fiber to the ...), est une technologie qui consiste à rapprocher la fibre optique au plus près de l'utilisateur afin d'augmenter le débit dont il pourra bénéficier.

❖ Différents sigles utilisés et architecture correspondante

- ✓ FTTN: Fiber To The Neighborhood (Fibre jusqu'au quartier)
- ✓ FTTC : Fiber To The Curb (Fibre jusqu'au trottoir)
- ✓ FTTS : Fiber To The Street (Fibre jusqu'à la rue - bâtiment)
- ✓ FTTN : Fiber To The Node (Fibre jusqu'au répartiteur)
- ✓ FTTB : Fiber To The Building (Fibre jusqu'au bâtiment)
- ✓ FTTCab : Fiber To The Cab (Fibre jusqu'au sous-répartiteur)
- ✓ FTTP : Fiber To The Premises (Fibre jusqu'aux locaux - entreprises)
- ✓ FTTH : Fiber To The Home (Fibre jusqu'au domicile)
- ✓ FTTE : Fiber To The Entreprise (Fibre pour les entreprises)
- ✓ FTTO : Fibre To The Office (Fibre jusqu'au bureau - entreprises)
- ✓ FTTLA : Fiber To The Last Amplifier (Fibre jusqu'au dernier amplificateur)

II.3 Les Catégories de technologie FTTx

Les réseaux FTTX peuvent être classés en deux grandes catégories :

- Les réseaux de desserte optique jusqu'à un point de distribution
- Les réseaux de desserte optique jusqu'à l'utilisateur.

La figure (Figure II.3) ci-dessous représente les différentes technologies FTTX :

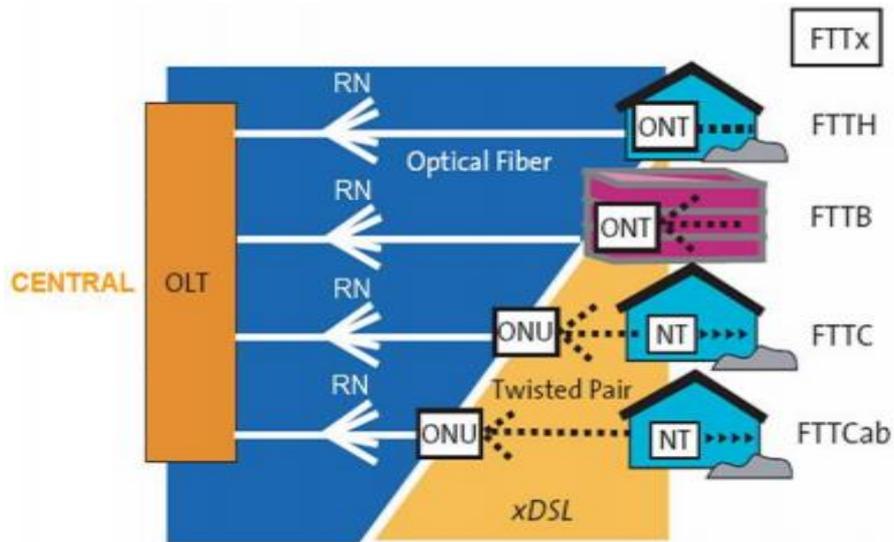


Figure II.3: Différentes technologies FTTX

II.3.1 Les réseaux de desserte optique jusqu'à un point de distribution [13]

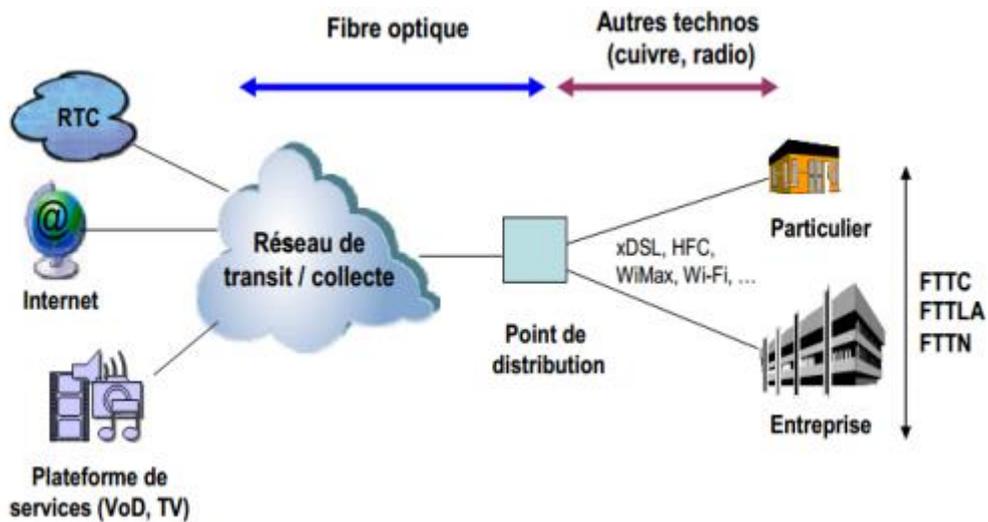


Figure II.4: Réseaux optiques jusqu'à un point de distribution

La fibre optique est déployée jusqu'au point de distribution (situé par exemple, à l'entrée d'une Zone d'Activité (ZA), ou au cœur d'un quartier résidentiel), puis la distribution terminale des usagers est réalisée par une autre technologique (câble, ADSL, réseaux hertzien)

Le point de distribution peut être situé au niveau :

- D'un NRA «Nœud de Raccordement d'abonnés» ou d'une station de base (Wi-Fi, Wi- Max), on parle alors de FTTN.
- D'un sous-répartiteur ou d'une armoire de rue, on parle alors de FTTC.
- Du dernier amplificateur dans le cas des réseaux des câblo-opérateurs, on parle de FTTLA ou bien le réseau HFC (Hybrid Fiber Coaxial), la fibre optique étant déployée en remplacement du câble jusqu'au dernier amplificateur (situé à quelques centaines de mètres des logements), puis prolongée sur la partie terminale par le câble coaxial.

a) FTTN (Fiber to the Node)

La fibre est déployée dans le quartier, elle correspond à une installation dans laquelle la fibre arrive à un point de distribution (sous-répartiteur) desservant un ensemble de bâtiments. Le raccordement d'abonné s'effectue ensuite sur le réseau cuivre ou par liaison radio (Wifi – Wimax). Cette technologie permet une amélioration du débit et de l'atténuation du signal chez les clients.

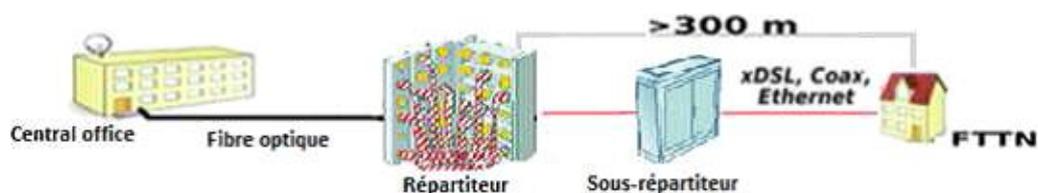


Figure II.5: Structure d'un réseau FTTN

b) FTTCab (Fiber To The Cabinet/ Fiber To The Curb)

En général, dans FTTCab, les signaux de toutes les maisons attachées sont multiplexés sur une seule fibre (ou plutôt une paire de fibres, une pour chaque direction de transmission) et l'équipement de l'armoire de rue effectue la conversion entre les signaux électriques et

optiques ainsi que le multiplexage, et démultiplexage. FTTCab exploite la capacité et la faible atténuation de la fibre tout en ne nécessitant qu'une seule paire d'émetteurs et de récepteurs optiques partagés entre plusieurs maisons (peut-être des dizaines, voire des centaines de maisons pourraient partager la même fibre), et les liaisons entre l'armoire et les maisons utiliseraient généralement câbles à paires torsadées.

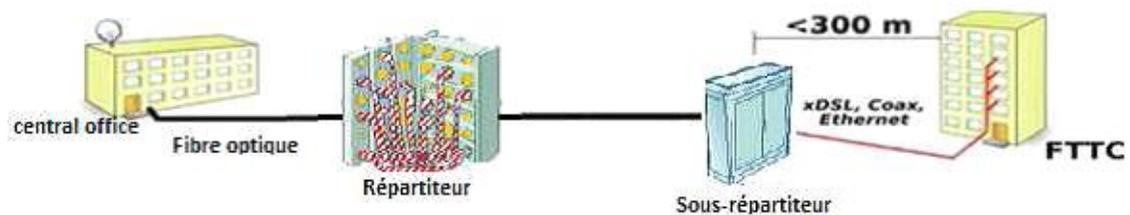


Figure II.6: Structure d'un réseau FTTC/FTTCab

c) FTTCurb (Fiber To The Curb)

La fibre optique est amenée jusqu'au point de concentration, situé sur le trottoir (curb, en anglais). Cette solution permet de se rapprocher, en moyenne, à 300 mètres du client.

d) FTTLA (Fiber To The Last Amplifier)

Le FTTLA (Fiber To The Last Amplifier ou Fibre jusqu'au dernier amplificateur) est une technologie permettant de fournir un accès très haut débit aux consommateurs.

Les câblo-opérateurs utilisent la présence dans les habitations d'un câblage coaxial pour apporter la fibre optique au plus proche des logements, en utilisant la câble existant pour le raccordement final de l'abonné.

Le FTTLA permet une connexion internet en très haut débit mais n'égale pas totalement les performances du FTTH, à ce titre il offre un débit maximal montant de 100 Mbit/s et un débit maximal descendant de 1 Gb/s.

II.3.2 Les réseaux de desserte optique jusqu'à l'utilisateur [13]

La fibre optique est déployée jusqu'au point de distribution puis jusqu'à la distribution terminale des usagers, en d'autres termes la fibre est raccordée au pied de l'immeuble (FTTB / FTTO) ou bien jusqu'au domicile de l'abonné (FTTH)

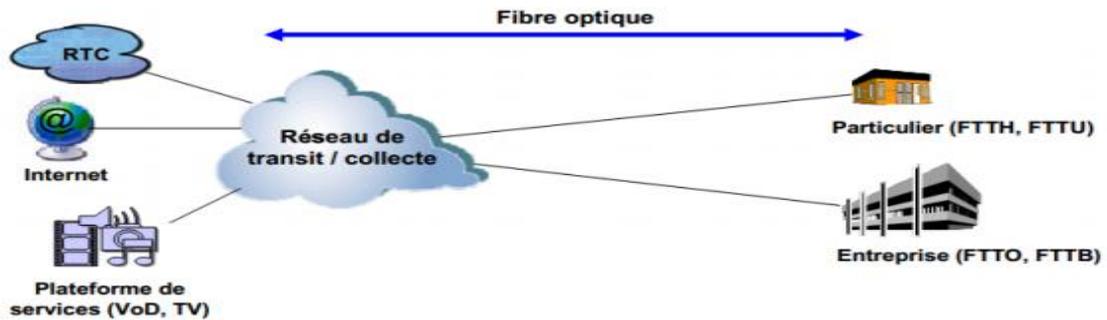


Figure II.7: Réseaux optiques jusqu'à l'utilisateur

a) FTTB (Fiber To The Building)

Le FTTB est une technique de raccordement avec laquelle la fibre optique arrive jusqu'au bâtiment de l'abonné mais où on retrouve un autre type de câble sur les derniers mètres (cuivre (technologie VDSL), coaxial).

Ce mode de raccordement permet de proposer des débits de plusieurs centaines de Mbit/s pour des coûts nettement inférieurs à la fibre optique de bout en bout (FTTH).

b) FTTO (fiber To The Office)

La terminaison de réseau optique, qui est propre à un abonné donné, est implantée dans ses locaux. La fibre va donc jusqu'à son bureau, et la partie terminale en cuivre est très courte.

c) FTTH (fiber To The Home)

Le FTTH (Fiber to the Home - Fibre jusqu'à l'abonné) correspond au déploiement de la fibre optique depuis le nœud de raccordement optique (lieu d'implantation des équipements de transmission de l'opérateur) jusque dans les logements ou locaux à usage professionnel. Le FTTH permet donc de bénéficier de tous les avantages techniques de la fibre sur l'intégralité du réseau jusqu'à l'abonné. Il se distingue d'autres types de déploiement qui combinent l'utilisation de la fibre optique avec des réseaux en câble ou en cuivre, il est actuellement possible d'atteindre des débits atteignant 2,5 Gbit/s dans le sens descendant et 1,2 Gbit/s dans le sens montant sur une même fibre qui peut être partagée entre 64 clients.

Le déploiement de la partie terminale des réseaux (boucle locale) s'entend :

- dans les rues (déploiement horizontal).
- puis dans les immeubles (déploiement vertical dans les immeubles collectifs)
- enfin jusque dans les logements (raccordement final).

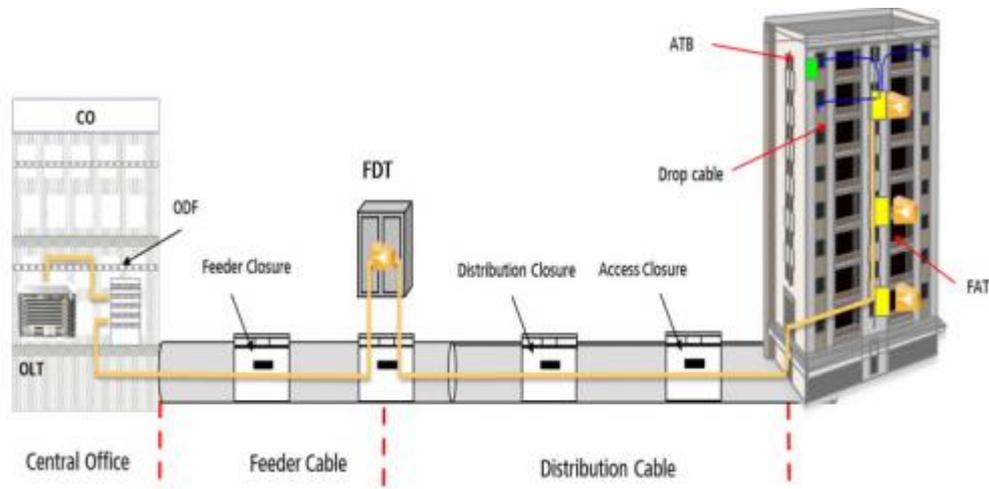


Figure II.8: Structure d'un réseau FTTH

II.4 Les couches du réseau d'accès

Afin de concevoir et de dimensionner les différents éléments qui constituent un réseau à très haut débit, il convient de structurer les différentes composantes dans une description en trois couches (voir Figure II.9) :

- ✓ **La couche d'infrastructure**, composée notamment des fourreaux, des chambres, des armoires de rue et des locaux techniques,
- ✓ **La couche optique passive**, comprenant notamment les câbles optiques, les boîtiers d'épissurage et les baies de brassage.
- ✓ **La couche optique active** qui transporte les services. Elle est constituée des équipements actifs.

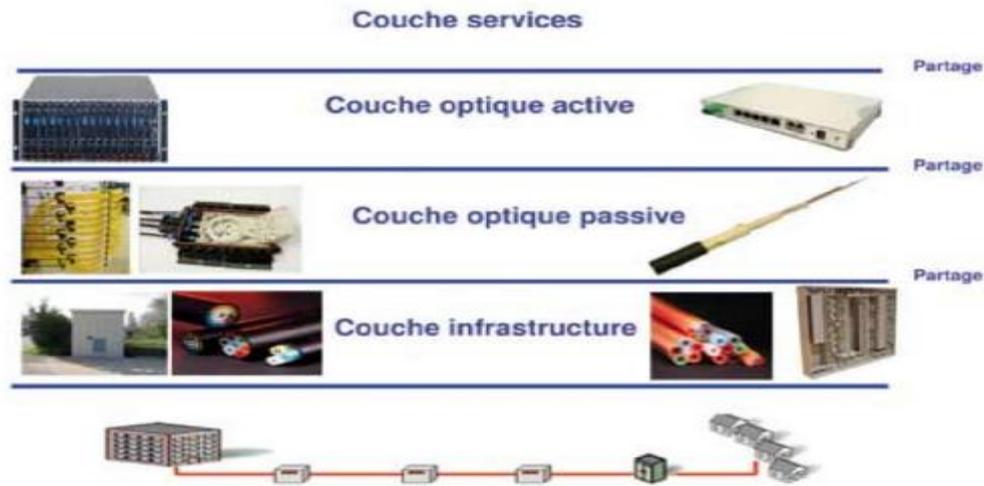


Figure II.9: Les couches d'un réseau d'accès

II.4.1 Différents Composants d'un réseau optique [14]

a) OLT (Optical Line Terminal)

C'est un équipement actif appelé communément « Optical Line Termination » ou «Terminaison de Ligne Optique », situé au niveau du central, il envoie et reçoit les signaux lumineux porteurs des données.

Le module optique de l'OLT est composé par un laser DBF (Distributed Feedback Laser) à 1490nm, un filtre WDM qui assure la coordination de multiplexage entre les différentes unités ONU, et une Photodiode APD (Avalanche Photodiode) qui permet de convertir le signal électrique au signal optique utilisé par l'équipement du fournisseur de service, et convertir le signal optique au signal électrique fournit par le réseau PON.

Dans un réseau FTTH, un OLT est relié à une ou à plusieurs terminaison d'abonnés, appelées Optical Network Unit (ONU) ou ONT, par des fibres optiques « point à point » (réseau FTTH P2P) ou multipoint (réseau GPON). L'OLT est généralement situé dans le nœud de raccordement optique (NRO).

Voici d'autres formations sur L'OLT:

- L'OLT est installé dans le CO
- L'OLT MA5800-X17 contient 17 cartes avec 16 ports dans chaque carte ce qui fait 272 ports

- Chaque GPON passe dans 2 splitters 1 :8 ce qui fait que le nombre maximal d'abonnés qu'une OLT peut couvrir est de $272*8*8=17408$
- La distance de couverture de L'OLT est de 10 Km. [4]



Figure II.10: OLT MA5800-X17 [4]

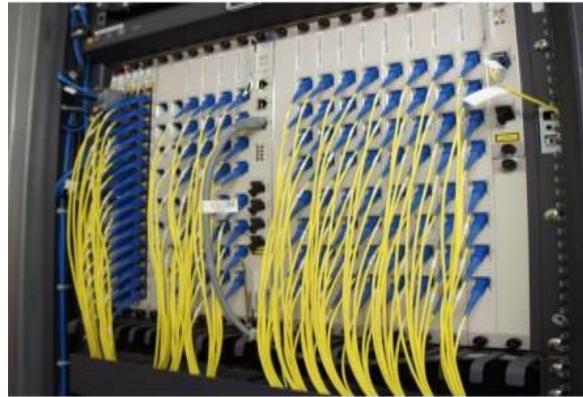


Figure II.11: Equipement OLT

b) RN (RemoteNode)

Point de répartition qui répartit le signal optique provenant de l'OLT vers plusieurs abonnés et combine les signaux optiques provenant des abonnés à destination de l'OLT.

c) ONU/ONT (Optical Network Unit / Optical Network Terminal)

Ce sont des équipements actifs, installés chez les utilisateurs finals du réseau et qui assurent la connexion avec les terminaux de l'utilisateur, sur les interfaces spécifiques de ces derniers (RJ45 cuivre pour le PC sur Internet, connecteur coaxial pour la télévision, RJ11 cuivre pour le téléphone analogique, ...) [18]. Cet équipement est appelé communément ONU « Optical Network Unit » si elle est partagée entre plusieurs clients et suivi d'une transmission secondaire (cas des FTTCab/Curb/Building) ou ONT pour « Optical Network Termination » ou « Terminaison de Réseau Optique » si elle est mono client FTTH. L'ONT peut être considéré comme un modem optique auquel le client vient connecter sa passerelle d'accès au haut débit.



Figure II.12: Equipement ONT



Figure II.13: Equipement ONU

e) NT (Network Termination)

Le module chez les abonnés dans le cas où la fibre ne pénètre que jusqu'à l'ONU. La figure (Figure II.14) suivante montre les différentes parties (distribution, terminaison et accès) du réseau FTTH ainsi que les composants.

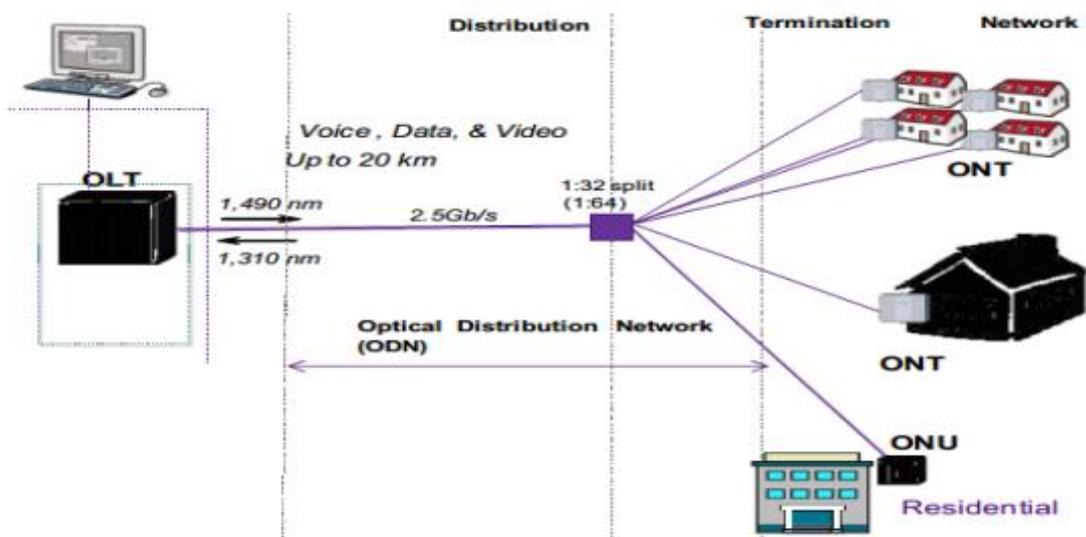


Figure II.14: Les différentes parties du réseau FTTH

II.4.2 Chemin de la fibre dans le réseau d'accès FTTH

Le déploiement d'une boucle locale en câbles en fibre optique est structuré autour de plusieurs nœuds et répartiteurs, dans ce qui suit on présente les principales règles d'ingénieries à appliquer lors du dimensionnement des réseaux d'accès FTTH.

Le dimensionnement des réseaux en fibre optique comprend le dimensionnement des différents nœuds (NRO, SRO, PBO, etc.) et des liaisons de transport et de distribution entre ces nœuds.

- **Nœud raccordement optique (NRO)**

Le nœud de raccordement optique est le point de départ des liens optique vers les utilisateurs. Ce nœud doit être dimensionné pour héberger les répartiteurs optiques. NRO peut avoir une capacité de distribution jusqu'à 50000 FO.

- **Sous répartiteur optique (SRO)**

Le sous-répartiteur optique SRO est une armoire de rue similaire aux sous - répartiteurs utilisés au niveau des réseaux téléphoniques. Il regroupera un nombre entier de point d'éclatement de câble (PEC) et il représente un point de convergence des infrastructures génie civil.

- **Boitier Pied de l'Immeuble (BPI)**

Situé généralement en pied d'immeuble, ce boîtier permet le raccordement des câbles venant de l'extérieur et ceux de la colonne montante où se trouvent les points de branchement qui desservent ensuite chaque logement.

- **Prise Terminale Optique (PTO)**

La Prise Terminale Optique PTO relie l'abonné au point de branchement (BPI) par un câble de branchement mono-fibre ou bi-fibre en fonction de la catégorie de l'abonné à desservir.

- **Point d'éclatement du câble (PEC)**

Le PEC a pour rôle d'optimiser et d'apporter de la flexibilité au réseau FTTH. Il est placé dans une chambre, à proximité des immeubles, le PEC permet d'éclater un câble optique en 8 afin de desservir plusieurs immeubles.



Figure II.15: Chemin de la fibre [17]

II.5 Architecture du réseau d'accès optique FTTH

Deux types de topologies physiques permettent d'acheminer la fibre jusqu'au client final : architecture point à point et architecture point à multipoint.

II.5.1 L'architecture point à point

Le point-à-point est l'architecture la plus simple à mettre en œuvre parmi les topologies physiques du réseau d'accès optique, elle consiste à avoir un lien physique en fibre optique directement entre le central et l'abonné (Figure II.16). Elle est principalement associée avec des technologies telles que la technologie à hiérarchie numérique synchrone (SDH/SONET) et les technologies xDSL (ADSL, HDSL, SDSL, VDSL, ...).

Le déploiement de cette technologie revient plus cher, le nombre de fibres à produire et à connecter étant plus élevé.

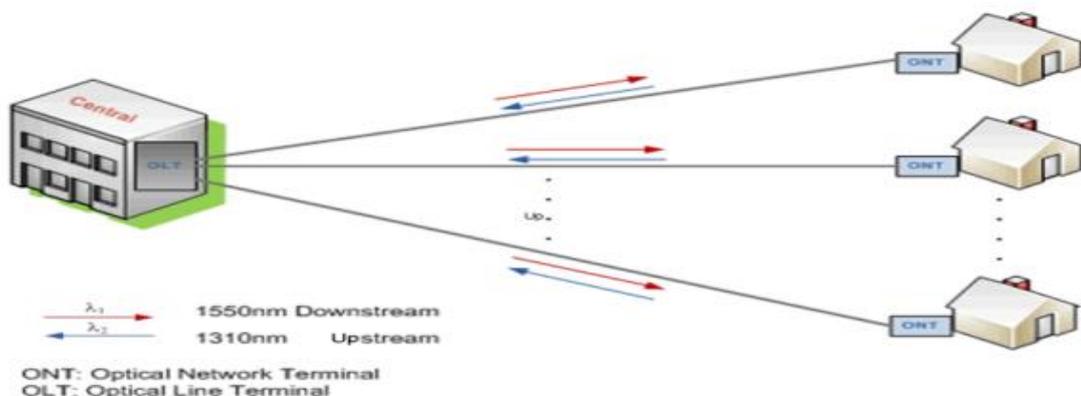


Figure II.16: Architecture P2P [12]

Cette architecture nécessite un investissement initial important mais présente l'avantage d'une gestion simplifiée (débit quasi-illimité par abonné, gestion de la qualité de service simplifiée), et d'un coût d'exploitation modéré. Par ailleurs, l'architecture du réseau est neutre vis-à-vis de la technologie employée sur les équipements actifs. En termes de performances (débit, portée), l'architecture point à point est considérée comme la meilleure solution, mais le coût très élevé est un problème majeur pour cette architecture.

II.5.2 L'architecture point à multipoint passive ou PON (Passive Optical Network)

Le PON représente une solution Point-à-Multipoint optique permettant la diffusion des données provenant du nœud de raccordement optique (NRO) vers chaque client. L'élément clé de l'architecture est un coupleur optique passif 1 vers N qui divise la puissance optique vers autant de ports de sortie (Figure II.17).

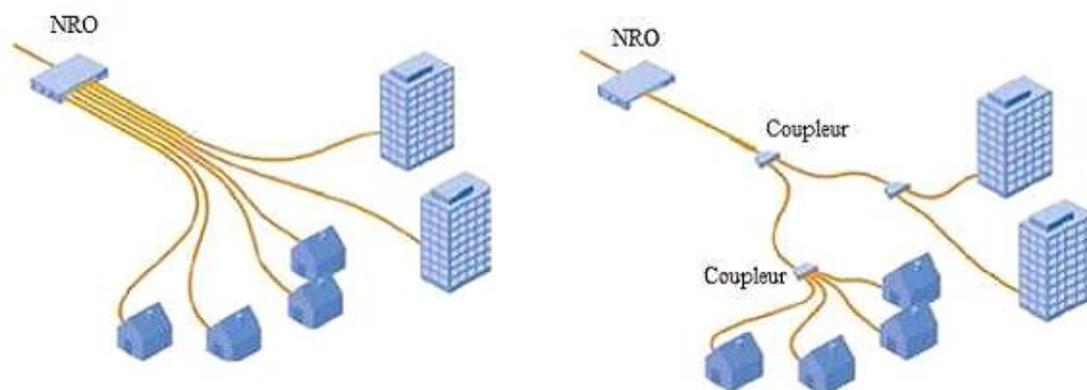


Figure II.17: Topologies des réseaux FTTH, (a) point à point et (b) point à multipoint.

II.6 Les réseaux optiques passifs PON (Passive Optical Network)

L'acronyme PON (Passive Optical Network) se traduit par « réseau d'accès optique passif », qui est un réseau à fibre optique utilisant une topologie point à multipoint et des séparateurs optiques pour fournir des données d'un point de transmission unique à plusieurs points d'extrémité utilisateur. Le passif, dans ce contexte, fait référence à l'état non alimenté de la fibre et des composants de division / combinaison.

Contrairement à un réseau optique actif, l'énergie électrique n'est requise qu'aux points d'émission et de réception, ce qui rend un PON intrinsèquement efficace du point de vue des coûts d'exploitation. Les réseaux optiques passifs sont utilisés pour transmettre simultanément

des signaux dans les directions amont et aval vers et depuis les points d'extrémité de l'utilisateur. [8].

II.6.1 L'architecture d'un réseau PON

La figure (II.18) montre l'architecture d'un réseau PON qui est la même que celle du point à multipoint, dans cette architecture un coupleur (Splitter) diffuse simultanément le même signal à un certain nombre de récepteurs

L'architecture d'un réseau PON vise à réduire l'utilisation des fibres optiques. Il s'agit de réseaux arborescents, où chaque nœud permet de séparer la fibre optique en branches secondaires connectées à un coupleur. Plusieurs coupleurs peuvent être utilisés sur le parcours d'une fibre optique [19].

L'utilisation des coupleurs permet de constituer des arbres de transmission passifs. Ces arbres, sont caractérisés par le départ d'une seule fibre à l'OLT qui constitue un élément de base des réseaux PON. Le PON utilise à la fois un multiplexage temporel et fréquentiel en longueur d'onde afin de réduire au minimum le nombre de fibres optiques utilisées dans le réseau.

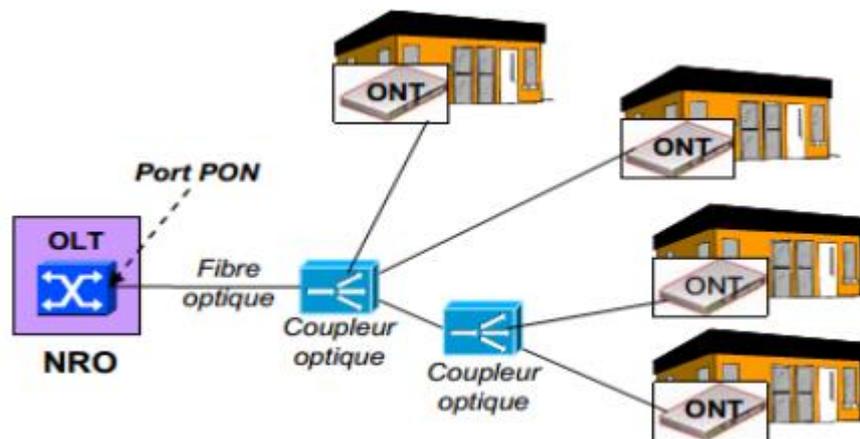


Figure II.18: Schéma d'un réseau PON

Les architectures PON peuvent être organisées en :

- a) **Étoile** (un coupleur en sortie de chaque port PON de l'OLT dessert n ONT).

b) Arbre (en cascasant les coupleurs, un coupleur pouvant desservir plusieurs sous-branches).

c) Bus (sérialisation des coupleurs).

C'est l'architecture en arbre qui est la plus souvent déployée, avec deux niveaux de coupleurs optiques (par exemple, un coupleur situé au NRO ou dans un sous-répartiteur optique, et un deuxième coupleur situé au plus près des abonnés, (i.e. dans l'immeuble desservi).

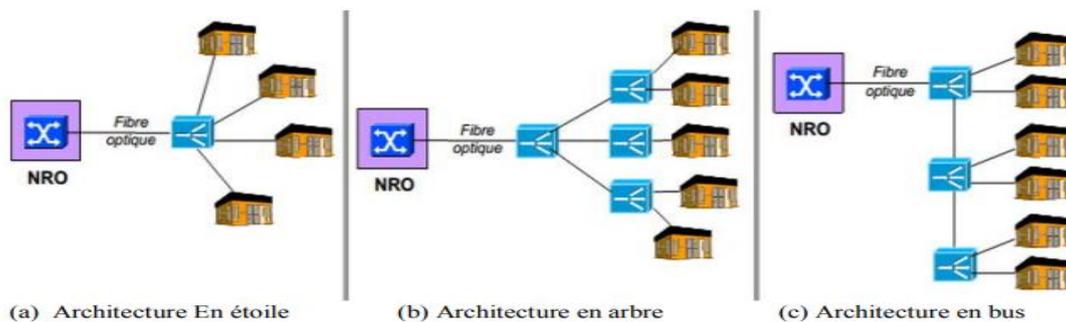


Figure II.19: Différents architectures utilisées en PON

II.6.2 Principe de fonctionnement d'un réseau PON

II.6.2.1 Sens montant du type PON

Le coupleur étant passif, et les ONT émettent tous dans la même longueur d'onde, si les signaux émis par deux ONT parviennent simultanément au coupleur, ils ressortiraient sous la forme d'un mélange illisible par l'OLT. On utilise donc un partage du temps de parole (TDM : Time Division Multiplexing) [20].

L'OLT attribue à tour de rôle à chaque ONT un intervalle de temps (quelques microsecondes) pendant lequel cet ONT est seul autorisé à émettre (figure II.20). S'il a beaucoup de données à transmettre, l'OLT lui attribue d'avantage de temps de paroles, et inversement elle réduit pour les ONT qui émettent peu.

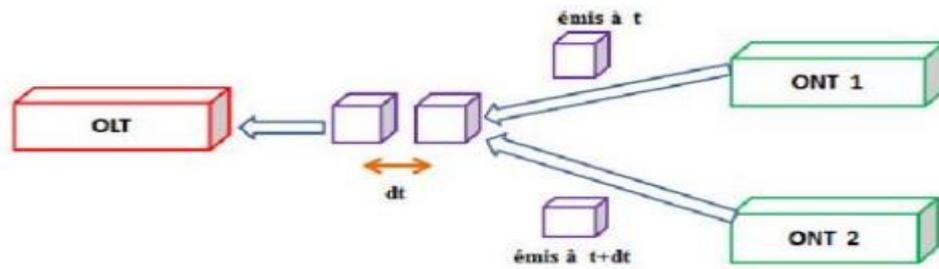


Figure II.20: PON en sens montant

II.6.2.2 Sens descendant du PON

Dans le sens descendant chaque abonné ne reçoit que les informations qui le concernent. Tous les ONT reçoivent l'ensemble des données mais seul l'ONT concerné les retransmet dans le réseau interne de l'abonné tel que la (figure II.21) le montre [20].

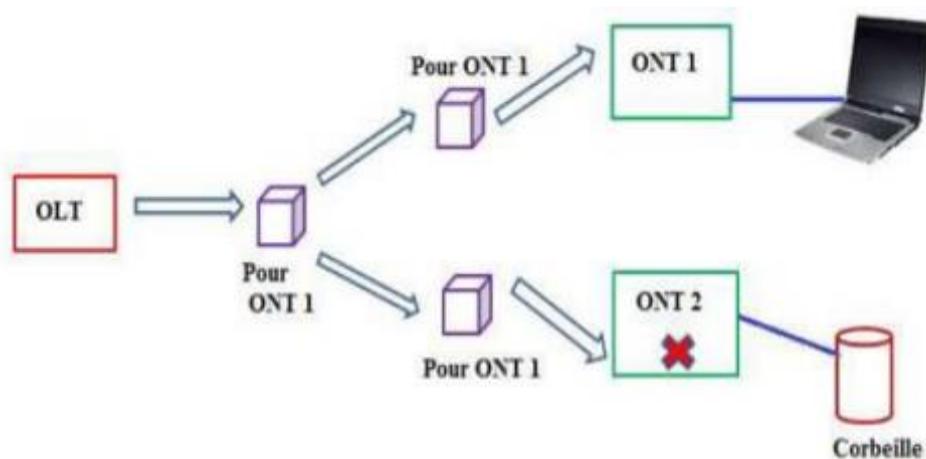


Figure II.21: Architecture PON Sens descendant

II.6.2.3 Architecture PON unidirectionnelle

L'architecture PON unidirectionnelle se caractérise par un émetteur OLT (Optical Line Terminal), coupleurs et ONT (Optical Network Termination), chaque ONU (Optical Network Unit) ne reçoit que les données qui lui sont destinées, chaque client a un intervalle de temps bien précis pour émettre afin de ne pas interférer avec un autre client.

La figure II.22 montre une liaison unidirectionnelle ou une fibre est dédiée pour le sens montant et une autre pour le sens descendant [20].

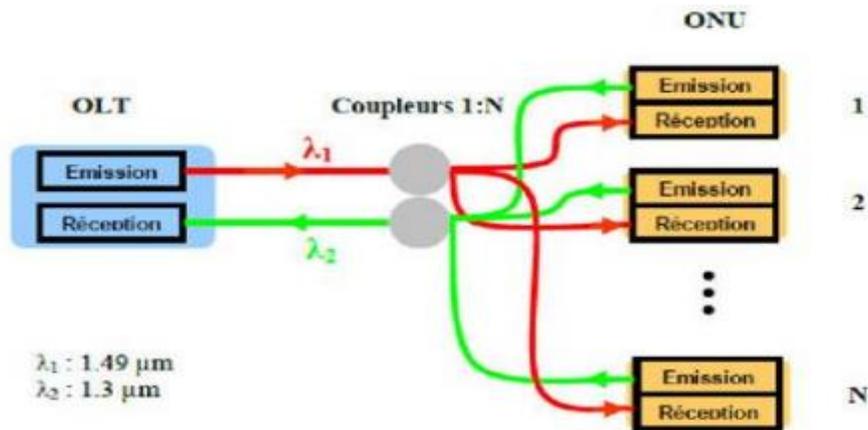


Figure II.22: Architecture PON unidirectionnelle

II.6.2.4 Architecture PON bidirectionnelle

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

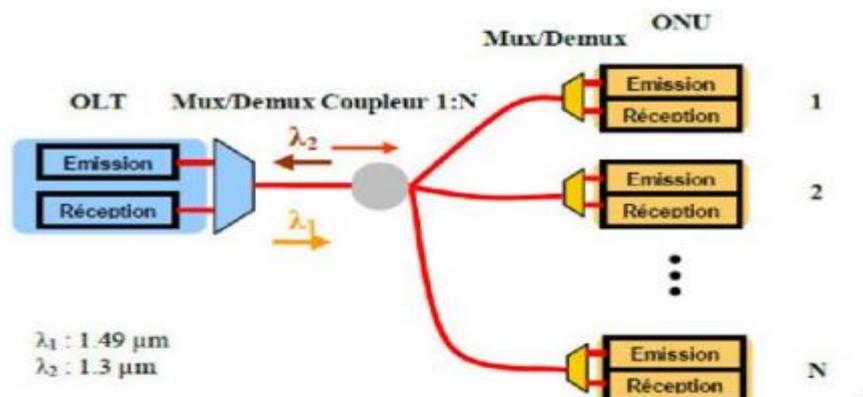


Figure II.23: Architecture PON bidirectionnelle

II.6.2.5 Quelques avantages et inconvénients d'un réseau optique passif (PON)

❖ Avantages

- Peu de fibres optiques sont employées dans le réseau PON
- Aucun local alimenté en énergie n'est nécessaire dans ce type de réseau, ce qui entraîne des économies d'investissement, d'exploitation et de maintenance.

➤ Au niveau de la centrale, le PON permet d'économiser de l'espace grâce au partage des ports des équipements actifs entre plusieurs abonnés.

❖ Inconvénients

➤ Si un réseau est construit sur une architecture PON strict, celui-ci ne peut être partagé entre plusieurs fournisseurs des services qu'au niveau transport : un opérateur unique gère les OLT, et transporte jusqu'à l'abonné les données apportées au centrale par des fournisseurs de service.

II.7 Les différents standards d'un réseau PON

Le réseau PON est basé sur plusieurs normes, ces dernières sont classifiées comme suit:

II.7.1 La norme A-PON (ATM-PON)

Il est issu des techniques PON associées à l'ATM. Il offre un débit 155/622 Mbit/s (sens descendant) et 155 Mbit/s (sens montant) pour 32 abonnés. La solution APON est complexe et coûteuse. Elle ne peut pas offrir de services vidéo. Le débit est limité et la récupération d'horloge peut poser des difficultés. [9]

II.7.2 La norme B-PON (Broadband PON : évolution de la norme APON)

Évolution de la norme APON, c'est une technologie APON modifiée pour permettre la diffusion de la vidéo. Elle supporte le WDM et possède une allocation de bande passante dynamique. Le BPON transmet sur la même fibre la voix et les données, et réserve des fréquences pour la télévision numérique et analogique (overlay wavelength).

Le BPON autorise des débits de 1Gb/s dans le sens descendant et 622Mb/s dans le sens remontant mais son utilisation est usuellement vue pour des débits de 622Mb/s descendant et 155Mb/s remontant. [10]

II.7.3 La norme E-PON (Ethernet PON)

La technologie utilise une transmission à base de paquets Ethernet. La différence majeure avec le APON est que les données sont transmises en paquets de longueur variable jusqu'à 1.518 octets, alors que l'APON oblige à utiliser les paquets ATM de 48 octets (avec 5 octets supplémentaires = contrôle). Selon le protocole Ethernet, chaque paquet descendant porte

l'adresse de l'ONU auquel il doit être fourni, mais ce paquet est transmis à tous les ONU. L'ONU auquel il est destiné le transmet, les autres le jettent.

Le débit maximal est 1,25 Gbit/s symétrique, dans ce réseau une longueur d'onde est utilisée par sens de transmission et peut atteindre 32 abonnés par OLT.

II.7.4 La norme G-PON (Gigabit PON)

La technique de ce réseau est basée sur le multiplexage temporel. Une longueur d'onde est utilisée pour le sens montant et une autre pour le sens descendant. GPON se différencie de BPON par sa capacité à transporter des paquets et des trames Ethernet de longueurs variables. Le GPON offre un débit de 1.2-2,4 Gbit/s (débit asymétrique). De plus, GPON permet une plus grande distance de déploiement, jusqu'à 60 km, avec 20 km maximum entre les ONT. Enfin, le GPON permet jusqu'à 64 lignes sortantes d'un coupleur optique (splitter). [9]

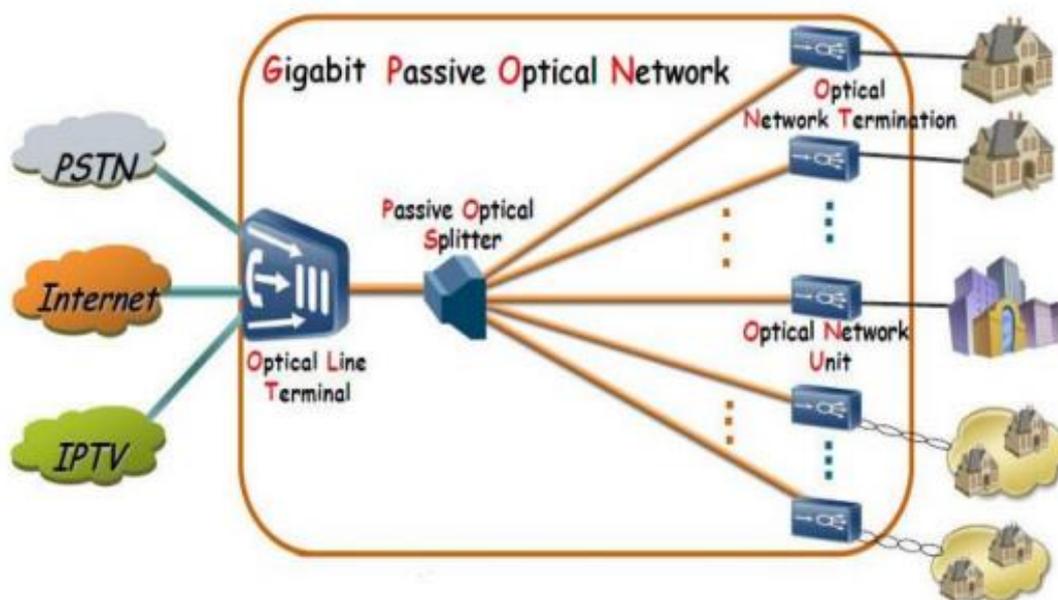


Figure II.24: Architecture G-PON

❖ Avantages du type G-PON

- La structure est passive car elle est à base de coupleurs optiques
- Le génie civil est optimisé et le coût réduit

- Infrastructure partiellement partagée (économie sur la fibre)
- L'architecture est favorable à la diffusion
- L'OLT est partagé (un duplexeur au central pour 32 clients)

❖ Inconvénients du type G-PON

Même si le G-PON est une architecture sollicitée mais nous rencontrons parfois quelque compromis tels que :

- Le débit étant partagé, il est donc limité
- La synchronisation est complexe pour le sens montant
- La sécurité des données en réception n'est pas optimale car l'ensemble des utilisateurs reçoit l'ensemble du flux émis par le central. Cependant la confidentialité est assurée par un processus de cryptage (G983/G984). Il reste la sécurité du réseau qui peut être mise à mal par injection malveillante de signal perturbateur d'un ONT.
- L'ONU doit fonctionner au débit agrégé (2,5 Gbit/s par exemple), qui est très supérieur au débit utile.

Le tableau suivant illustre une comparaison de débit entre B-PON E-PON et G-PON:

	B-PON	E-PON	G-PON
Taux des données au sens descendant	600 Mbit/s	1 Gbit/s	2.4 Gbit/s
Taux des données au sens descendant	150 Mbit/s	1 Gbit/s	1.2 Gbit/s
Format de transmission	Ethernet	ATM	ATM+TDM+Ethernet

Tableau II.1: Comparaison entre les trois standards de PON

II.7.5 WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing-PON)

Le WDM permet de multiplexer plusieurs signaux modulant des longueurs d'ondes différentes dans une seule fibre optique, en les mélangeant à l'entrée par un multiplexeur (MUX) et en les séparant à la sortie au moyen d'un démultiplexeur (DEMUX). La WDM permet ainsi l'utilisation optimale de la bande passante optique.

Les données électriques de chaque utilisateur sont appliquées à l'entrée de modulateurs optiques émettant à des longueurs d'ondes différentes. Les signaux en sortie des modulateurs sont multiplexés et émis sur la fibre (figure I.25).

A la réception, le signal optique reçu est démultiplexé puis appliqué à l'entrée d'un filtre optique qui permet d'extraire le signal à la longueur d'onde correspondant au destinataire. Une photodiode permet d'effectuer la conversion optique-électrique.

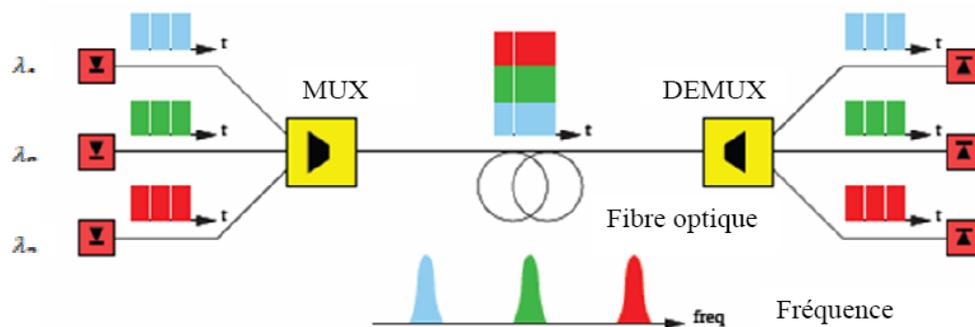


Figure II.25: Technique de multiplexage WDM-PON

II.7.6 OFDMA-PON (Orthogonal Frequency Division Multiplexing PON)

L'OFDM-PON (pour Orthogonal Frequency Division Multiplexing PON) est actuellement considéré comme une solution prometteuse pour les futurs systèmes PON à ultra haut-débit (40/100 Gbit/s) [10]. C'est une version optimale du système de transmission multiporteuse (sous porteuses), utilisée dans différents systèmes de communications : systèmes de communications radio du type Wi-Fi, WiMAX et plus récemment dans le système radio mobile de 4^{ème} génération, le LTE.

Le principe de l'OFDM-PON consiste à attribuer un certain nombre de sous-porteuses pour chaque abonné en répartissant le signal numérique que l'on veut transmettre.

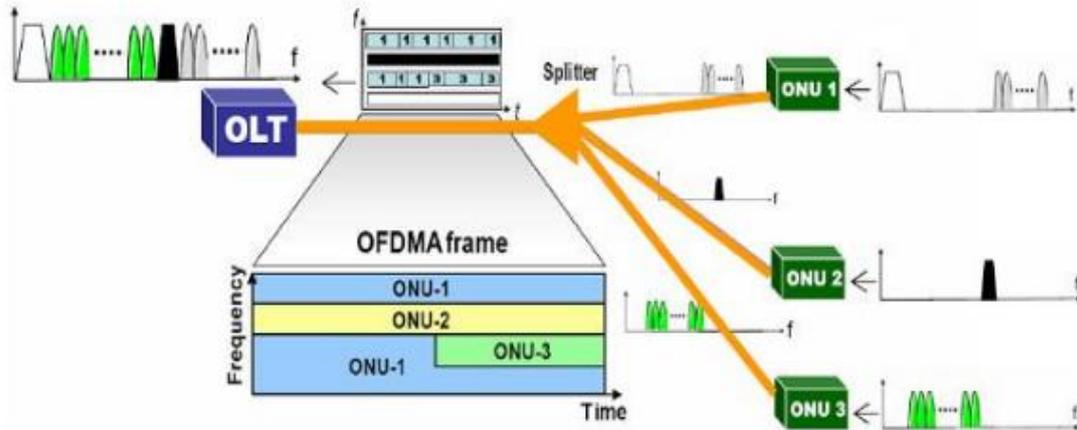


Figure II.26: Schéma de principe de l'OFDMA-PON

II.7.7 Architecture AON (Active Optical Network ou Point Multipoint Active)

Aussi appelé Double Étoile Active en français, le coupleur passif est remplacé dans cette architecture par un commutateur qui est un équipement électronique actif capable d'aiguiller le signal. La fibre optique entre le point de répartition RN et l'OLT est mutualisée entre plusieurs abonnés. Comme illustré dans la figure (Figure II.27) ci-dessous, l'agrégation des trafics provenant de plusieurs abonnés est réalisée à l'aide d'un équipement Ethernet actif situé au RN d'où son nom l'architecture point à multipoint active.

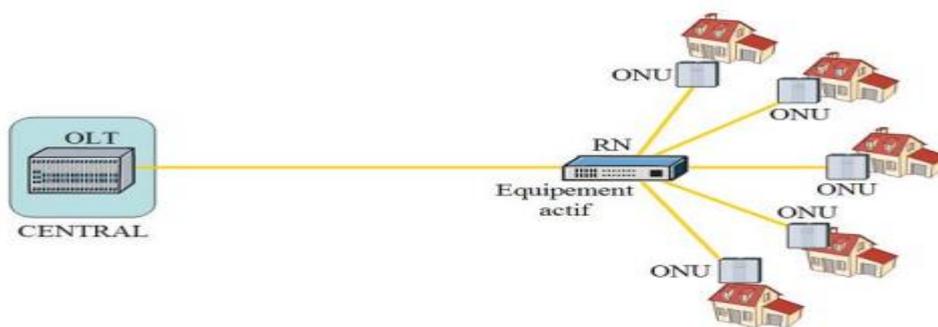


Figure II.27: Architecture du réseau d'accès optique point à multipoint actif

En termes de débit l'optique dépasse largement le cuivre selon le tableau II.2 suivant en comparant les deux réseaux d'accès FTTH et ADSL.

Différence entre la fibre optique et l'ADSL		
	Fibre optique (500 Mb/s)	ADSL (8 Mb/s)
Pour un film HD de 5 Go	1 min et 20 secondes	1 heure et 23 minutes
Pour un album de musique de 250 Mo	4 secondes	4 minutes et 16 secondes
Pour un fichier de 50 Mo	0.8 seconde	50 secondes

Tableau II.2: Comparaison du débit entre FTTH et ADSL [5]

II.8 Comparaison entre xDSL et FTTH

Le tableau II.3 indique l'évolution de la technologie xDSL en fonction de sa bande passante et de la distance ; ainsi que sa comparaison avec FTTH.

Transport	ADSL	ADSL2	ADSL2+	VDSL	VDSL2	FTTH PON
Bande passante	D : 8 M	12 M	24 M	55 M	100 M	100+
	U : 1 M	3.5 M	1 M	19 M	100 M	100+
Distance	3-5 Km			<= 1.3 Km		<= 100 Km

Tableau II.3: Comparaison entre xDSL et FTTH [5]

II.9 Quelques usages du réseau d'accès FTTH

Parmi les utilisations du réseau FTTH nous pouvons citer quelques-uns :

- Jeux en ligne,
- P2P (peer to peer)
- Télétravail, feux signalisation, vidéo surveillance
- TV-HD, Télévision en 3D, Vidéos à la demande,
- Télémédecine, des services de télémedicine Très Haut Débit se développent entre grands établissements hospitaliers pour la téléconsultation et la télé-expertise

- Visioconférence, Grâce au Très Haut Débit et à la télé-présence, des établissements d'enseignement supérieur développent des cours multi-sites et l'enseignement à distance
- Voix sur IP,
- Hébergement, en particulier Auto Hébergement.
- Equipements qui deviennent présents dans la majorité des foyers : caméra de vidéosurveillance, serveur domestique de données, livre électronique, terminal médical, écran de contrôle domotique, ... etc.



Figure II.28: Quelques équipements numériques nécessitant du haut débit [11]

II.10 Conclusion

La principale technologie permettant d'offrir à l'utilisateur une connexion à très haut débit est la fibre optique jusqu'au domicile (FTTH, fibre to the home).

Sur le plan des usages, on distingue deux tendances : d'une part, les volumes de données augmentent, notamment en raison d'éléments multimédia (son, vidéo) de plus en plus nombreux, d'autre part, les applications interactives (nécessitant des temps de réponse courts) se multiplient, tant pour le grand public (téléphonie sur IP, sites web interactifs...) que pour les professionnels (e-médecine, télétravail, entreprise en réseau...). Les échanges sont donc non seulement plus volumineux, mais exigent aussi d'être plus rapides et symétriques (débits montant et descendant équivalents).



Chapitre III
Simulations &
Résultats

III.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 WDM-GPON 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 et les différentes architectures WDM-GPON simulées et ainsi nous présentons les résultats obtenus.

III.2 Présentation du logiciel Optisystem

Au cours de notre travail nous avons opté pour un logiciel de simulation des systèmes de communications optique innovants qui conçoit, teste et optimise pratiquement n'importe quel type de liaison optique dans la couche physique d'un large éventail de réseaux optiques, il s'agit d'Optisystem qui est un simulateur basé sur la modélisation réaliste des systèmes de communications par fibre optiques.

Sa vaste bibliothèque de composants actifs et passifs comprend des paramètres réalistes, ces capacités peuvent être étendus facilement avec l'ajout des composants et peuvent être reliés à un large éventail d'outils (Figure III.1), une interface complète d'utilisateur graphique(GUI) contrôle la disposition optique des composants, les modèles et ces présentations graphiques (Figure III.2).

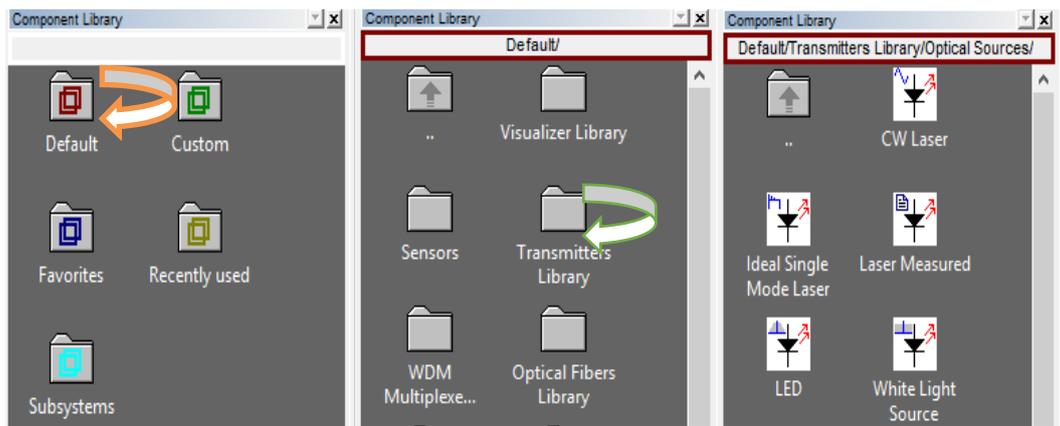


Figure III.1 : Bibliothèque des composants

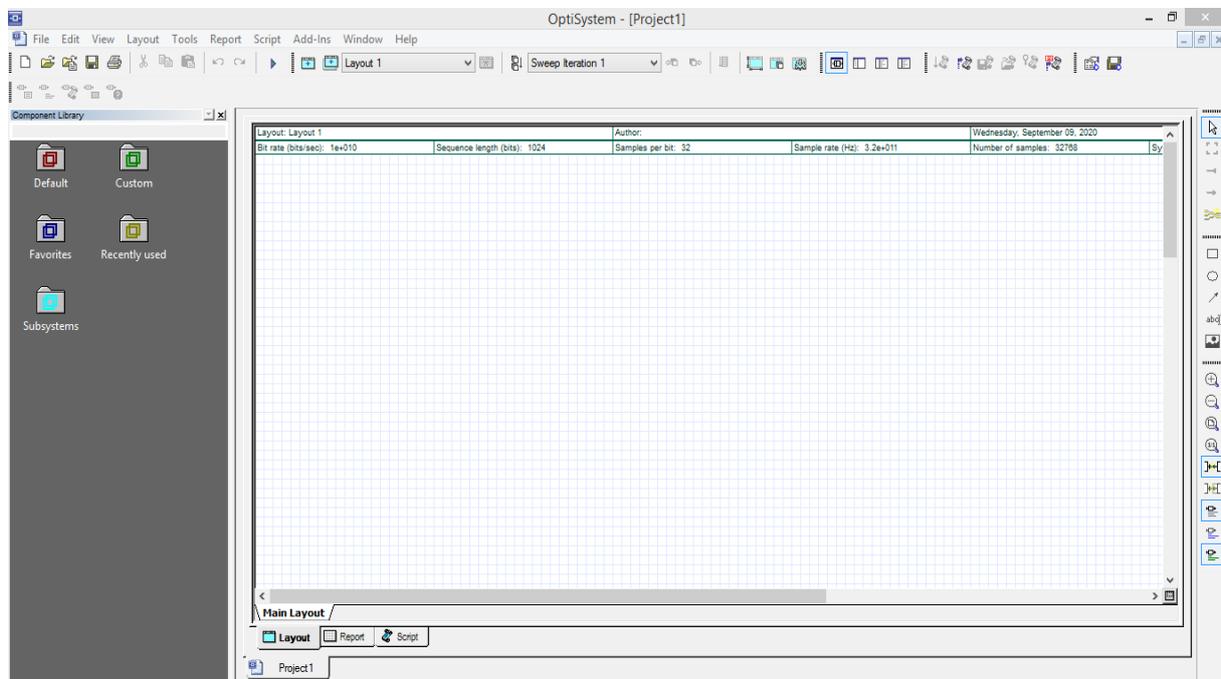


Figure III.2 : Interface d'utilisateur graphique (GUI)

III.2.1 Applications d'Optisystem

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

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

III.2.2 Principales caractéristiques du logiciel Optisystem

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- Les composants virtuels de la Bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.
- La bibliothèque des composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurés à partir de périphériques réels, il s'intègre aux équipements de test et de mesurer des différents fournisseurs (Figure III.3).
- Les outils de visualisation avancée produisent le SAOS Spectral, le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation, la constellation schémas et beaucoup plus.
- Il est possible de joindre un nombre arbitraire des visualiser sur le moniteur au même port.
- l'état de l'art et le calcul de flux de données.

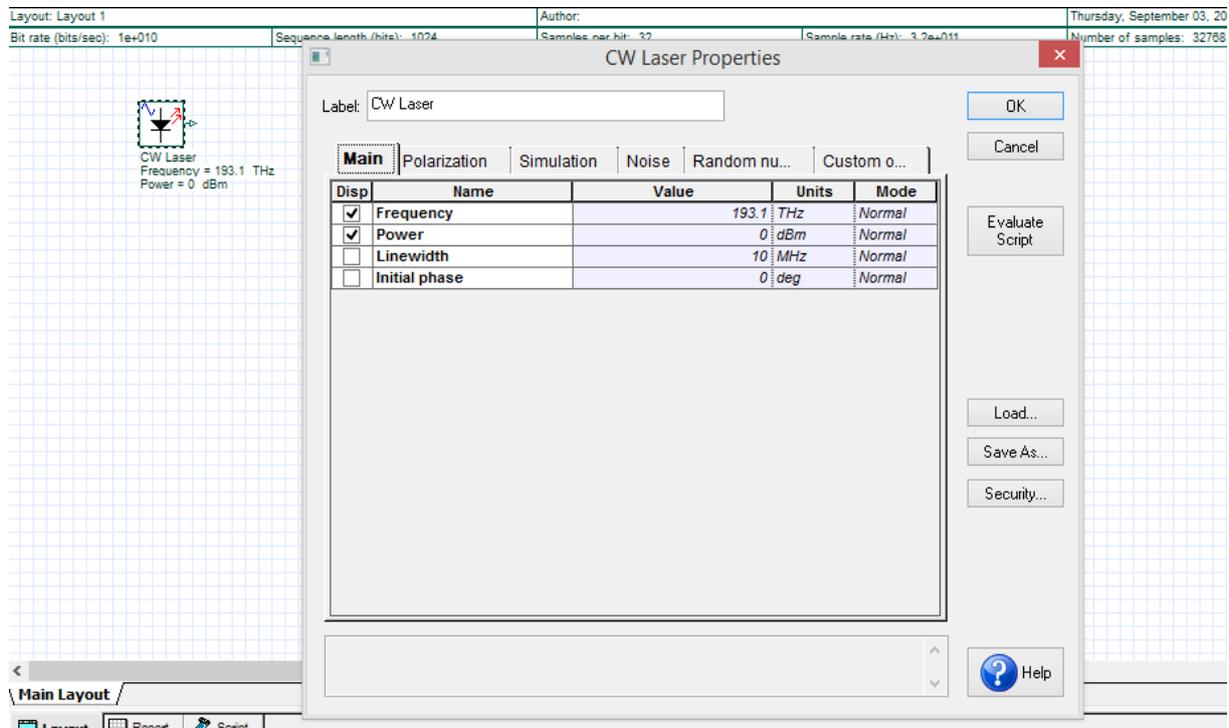


Figure III.3 : Modification composant du paramètre

III.3 Critères de qualité d'une transmission

Au vu de toutes les dégradations que peut subir le signal lors de son transport via la fibre optique, il s'est avéré nécessaire d'établir des critères pour juger de la qualité d'une transmission. En pratique, ces critères sont évalués après détection du signal et sont surtout utilisés en laboratoire pour tester les performances de nouvelles transmissions : impact de nouveaux formats, insertion de fonctions de traitement du signal.

III.3.1 Diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil représente la superposition synchrone de tout le symbole binaire de la séquence transmise pour estimer la qualité d'un signal d'une manière visuelle (Figure III.4).

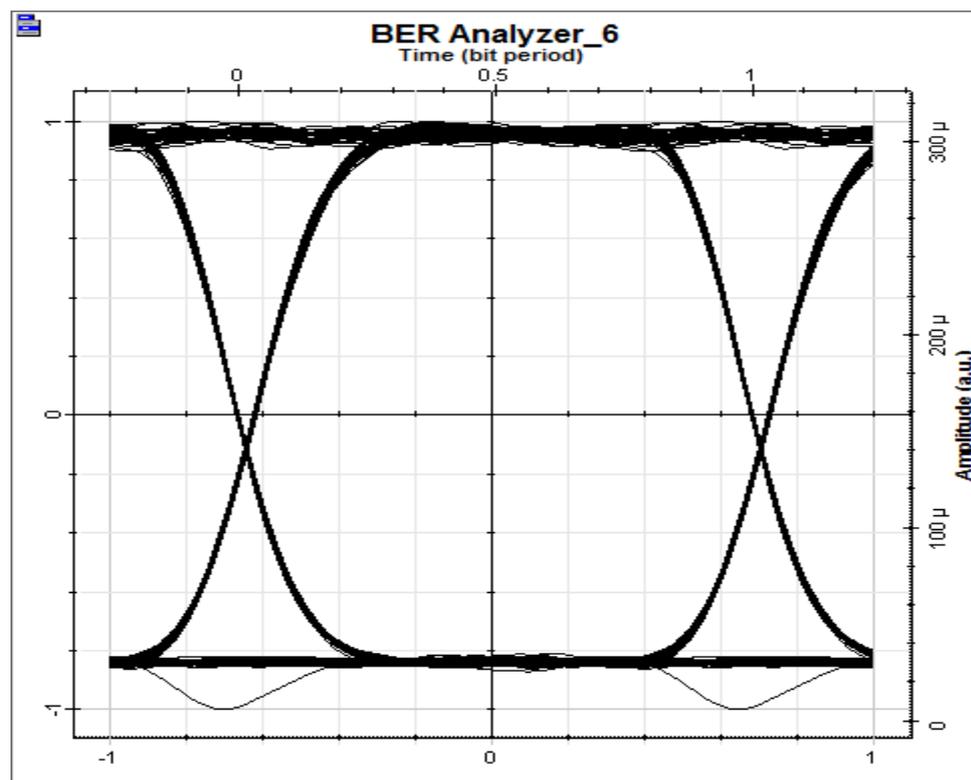


Figure III.4: Le diagramme de l'œil

Ce diagramme est caractérisé par :

- ❖ L'élargissement temporel des impulsions du signal dû à la dispersion chromatique causé par les interférences entre les symboles.

- ❖ Gigue temporelle provoqué par la dispersion et couplage entre les impulsions et le bruit d'émission amplifiée.
- ❖ Dans la liaison, le bruit d'amplitude qui résulte de l'accumulation du bruit d'émission amplifiée sur signal tout au long de son parcours.

III.3.2 Le facteur de qualité en amplitude ou facteur Q

Il existe un autre critère d'évaluation de la qualité de transmission appelé le facteur de qualité (Q) obtenu à partir des statistiques de bruit (moyennes et écarts-types) des niveaux « 1 » et « 0 » du signal à détecter.

C'est un paramètre permettant d'estimer le taux d'erreur binaire sans avoir à compter les erreurs, mais en considérant tout simplement l'amplitude moyenne des bits « 1 » et « 0 » et la valeur de leur écart type σ_1 et σ_0 , ce facteur est défini par :

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

Où : I_1 et I_0 sont respectivement les valeurs moyennes des niveaux « 1 » et « 0 », σ_1 et σ_0 les écart-type du bruit sur le signal des symboles « 1 » et « 0 ».

III.3.3 Le taux d'erreurs binaire

Si le Diagramme de l'œil est la façon la plus visuelle de qualité d'un signal numérique, alors le critère qui quantifie le mieux cette qualité de transmission est le Taux d'erreurs binaire (TEB, ou BER pour Bit Error Rate) qui représente la probabilité d'une prise de décision erronée sur un élément binaire. Il se définit comme suit :

$$\text{TEB} = \text{BER} = \frac{\text{nombre d'erreurs détectées}}{\text{nombre de bits transmis}}$$

III.4 Schéma du réseau à simuler

III.4.1 Introduction

Le travail que nous allons procéder à réaliser est d'alimenter certaines zones ou bien certains endroits de fibre optique, parmi ces derniers on cite : hôpital, résidence, banque, centre commercial ainsi que l'université.

La figure III.5 présente un schéma d'un réseau FTTH pour l'architecture (WDM-GPON).

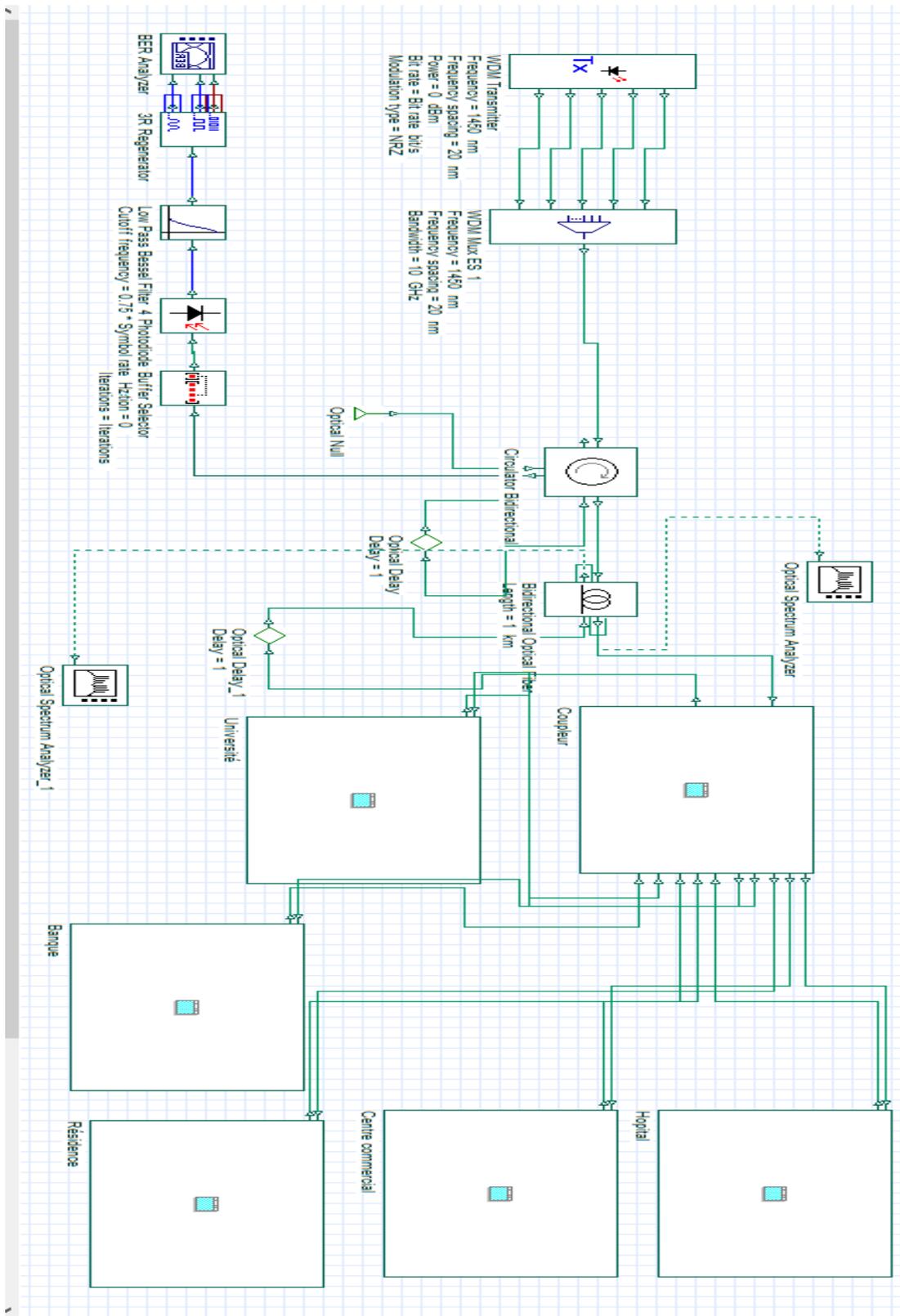


Figure III.5: Schéma du réseau FTTH (WDM-GPON)

III.4.2 Sens descendant

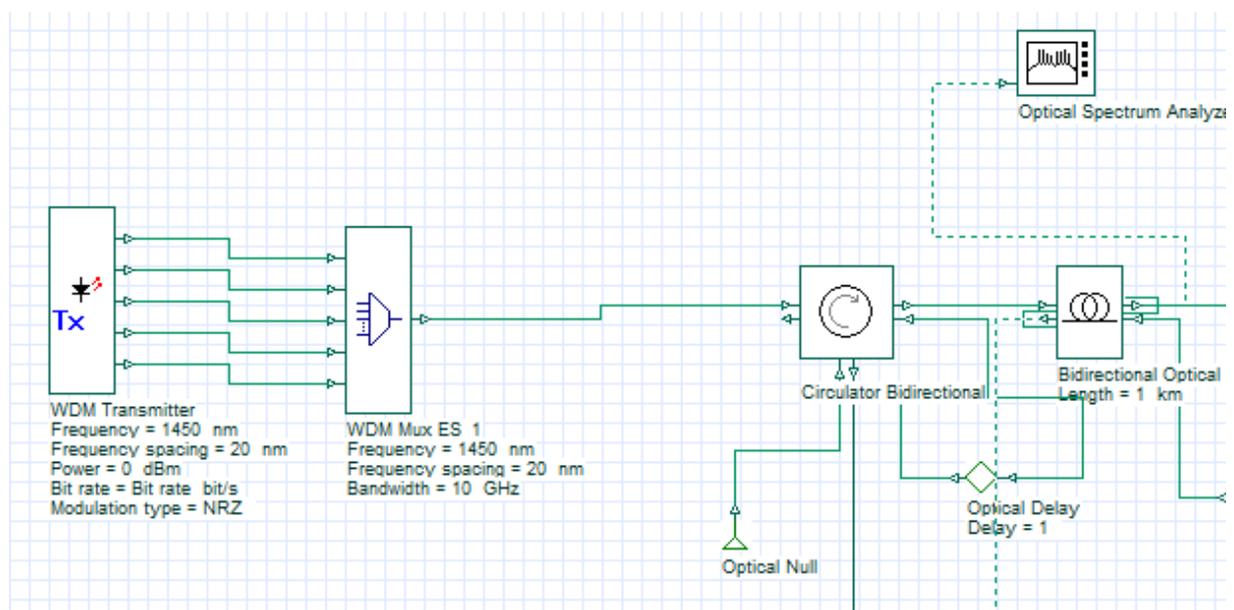


Figure III.6: Sens descendant du réseau

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

- ❖ **Un transmetteur optique : WDM Transmetteur** est composé d'un module dont l'émetteur est généralement une diode LASER, d'une fréquence de 1450 nm avec un espacement de 20 nm et d'un modulateur de type NRZ.
- ❖ **Un multiplexeur Optique : du type WDM** multiplexage à longueur d'onde de 1450 nm avec un espacement de 20 nm et une bande passante de 10 GHz.
- ❖ **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.

III.4.3 Coupleur optique

Le coupleur optique est un équipement passif déployé le long du parcours son rôle est de séparer le signal dans le sens descendant et de le combiner dans le sens montant. Ce coupleur est composé d'un multiplexeur/démultiplexeur optique à longueur d'onde de 1450 nm et 1270 nm pour le démultiplexeur avec un espacement de 20 m et une bande passante de 10 GHz respectivement.

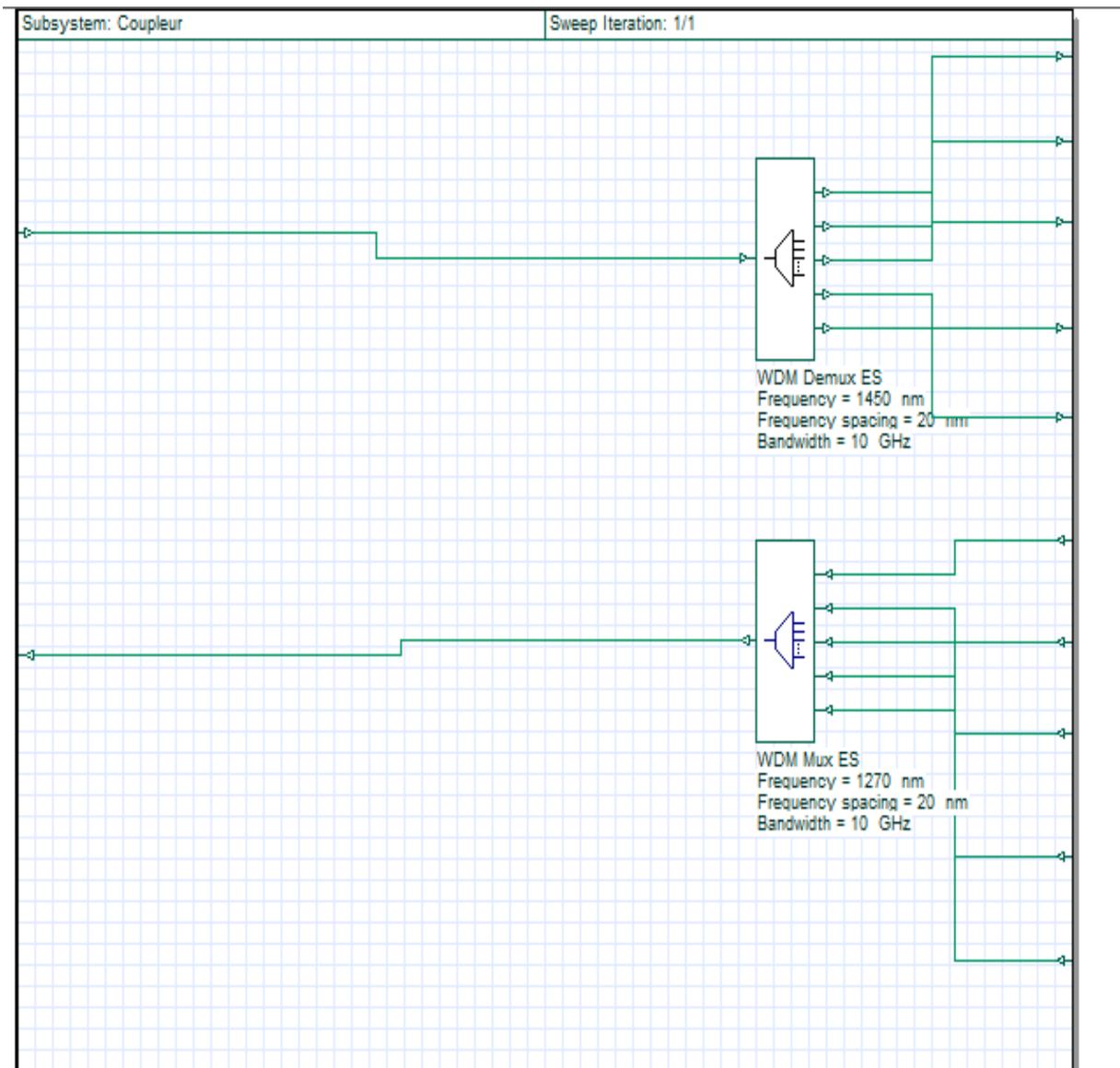


Figure III.7: coupleur optique

III.4.4 Blocs des utilisateurs

Dans notre travail on a alimenté 5 zones de fibre optique et ces derniers sont respectivement : hôpital, centre commerciale, résidence, université, banque. La figure ci-dessous montre les composants de chacun de ces blocs.

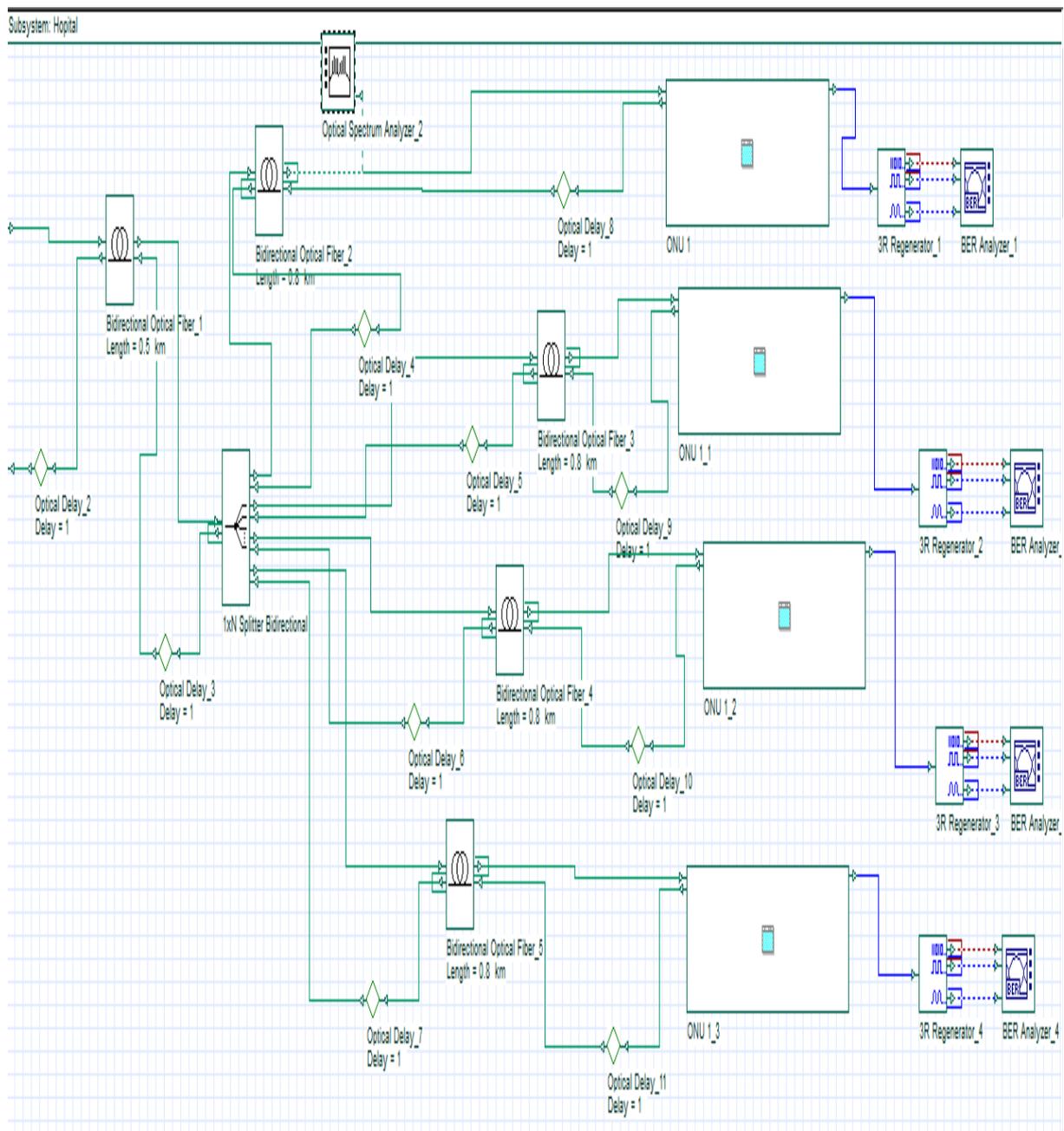


Figure III.8: Bloc hôpital

Tous les blocs disposent des mêmes composants et parmi ces derniers on 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 5 ports.
- **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.

III.4.4.1 ONU

L'abonné est représenté par ONU (Optical Network Unit) dans la structure FTTH, composé d'une partie émission et d'une partie réception où on trouve des composants tels que le photo-détecteur et filtre de Bessel, Chaque ONU est relié à un répéteur qui assure les fonctions de régénération, remise en forme et resynchronisation du signal.

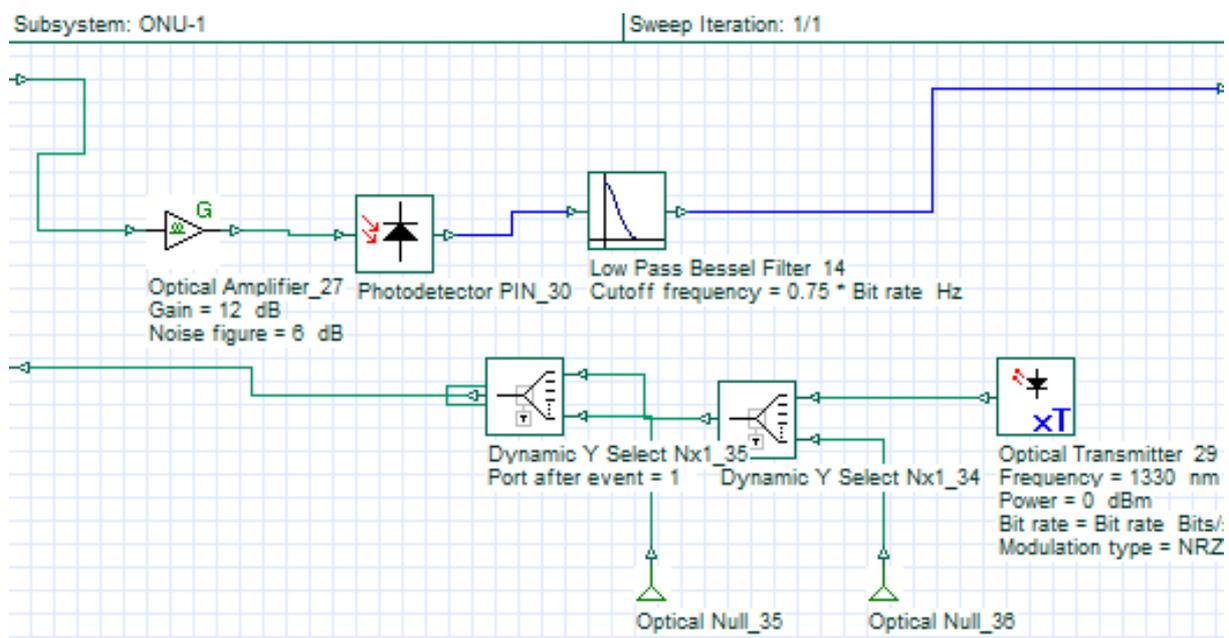


Figure III.9: ONU

Dans la partie de réception on trouve :

- **Un amplificateur optique** d'un gain de 12 dB et d'un bruit de 6 dB, qui amplifie le signal lumineux.

- **Un récepteur optique : Photodiode PIN**, transformant le signal optique en électrique, qui permet d'adapter le seuil de décision en fonction des paquets de données reçues.
- **Un filtre passe bas** : du type Bessel permettant d'extraire l'information utile d'une fréquence de coupure $=0.75 \times \text{symbole rate}$ (taux du symbole).

Par contre dans la partie de transmission on dispose :

- **Emetteur optique** : l'émetteur optique est une version à canal unique du composant émetteur WDM, composé d'une fréquence de 1330 nm et d'un modulateur de type NRZ.
- **Dynamic Y select** : il permet de contrôler les différentes valeurs d'atténuation et les valeurs de phases.

III.5 Simulations & résultats

Dans cette partie nous allons simuler notre projet et on va visualiser les résultats obtenues 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, la figure ci-dessous nous montre les paramètres de tout le projet

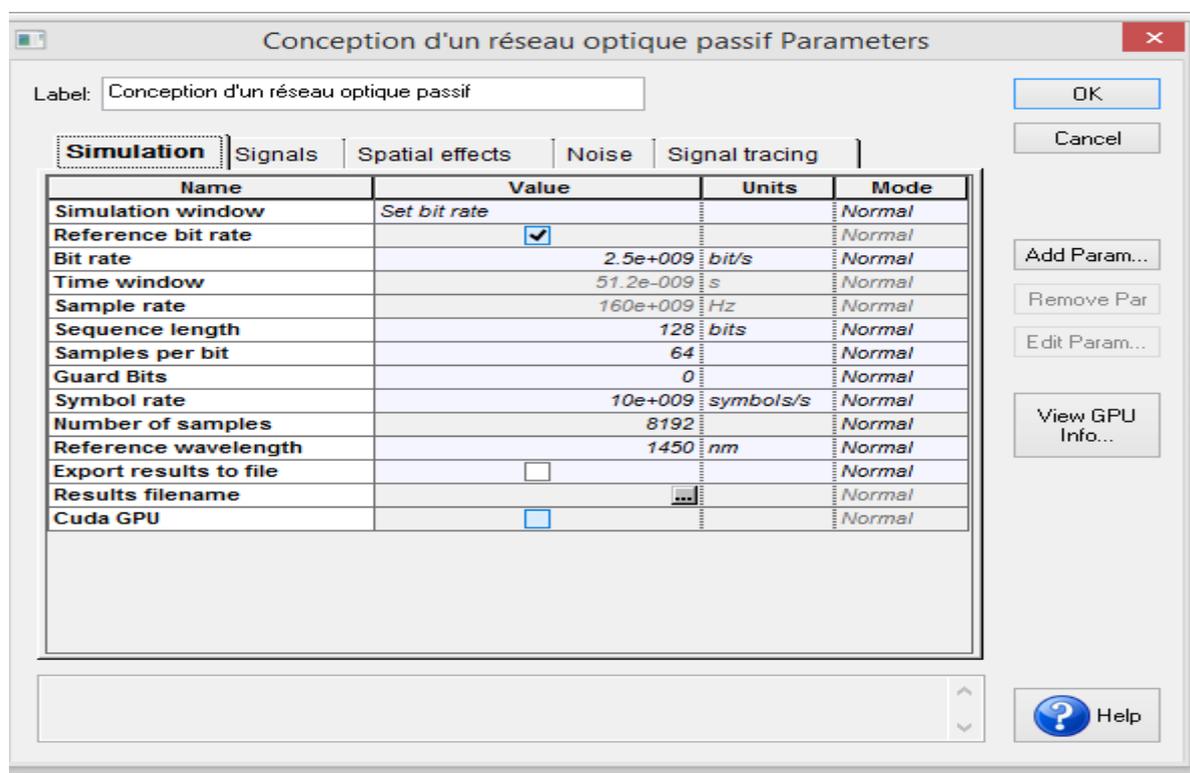


Figure III.10: paramètres du projet

III.5.1 Signaux à la sortie pour une fibre d'1 KM

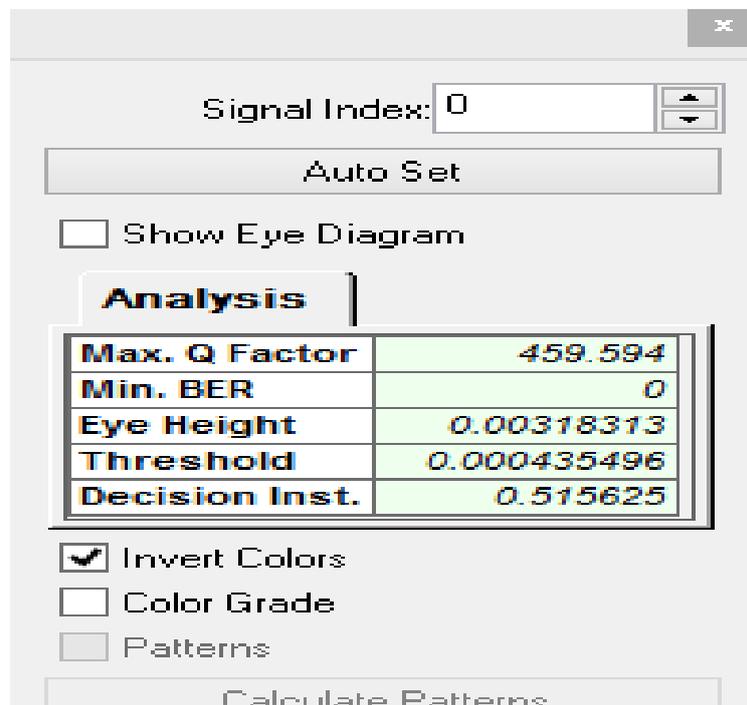


Figure III.11 : Q Facteur

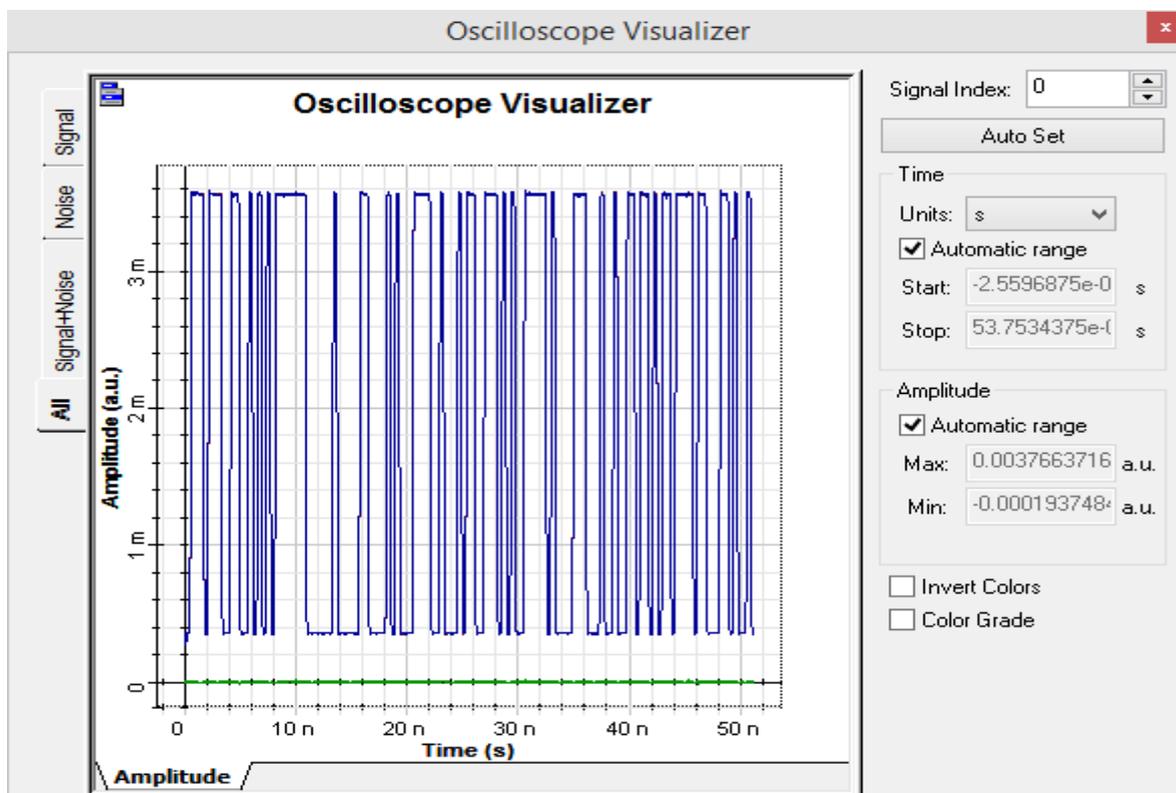


Figure III.12 : Signal oscilloscope

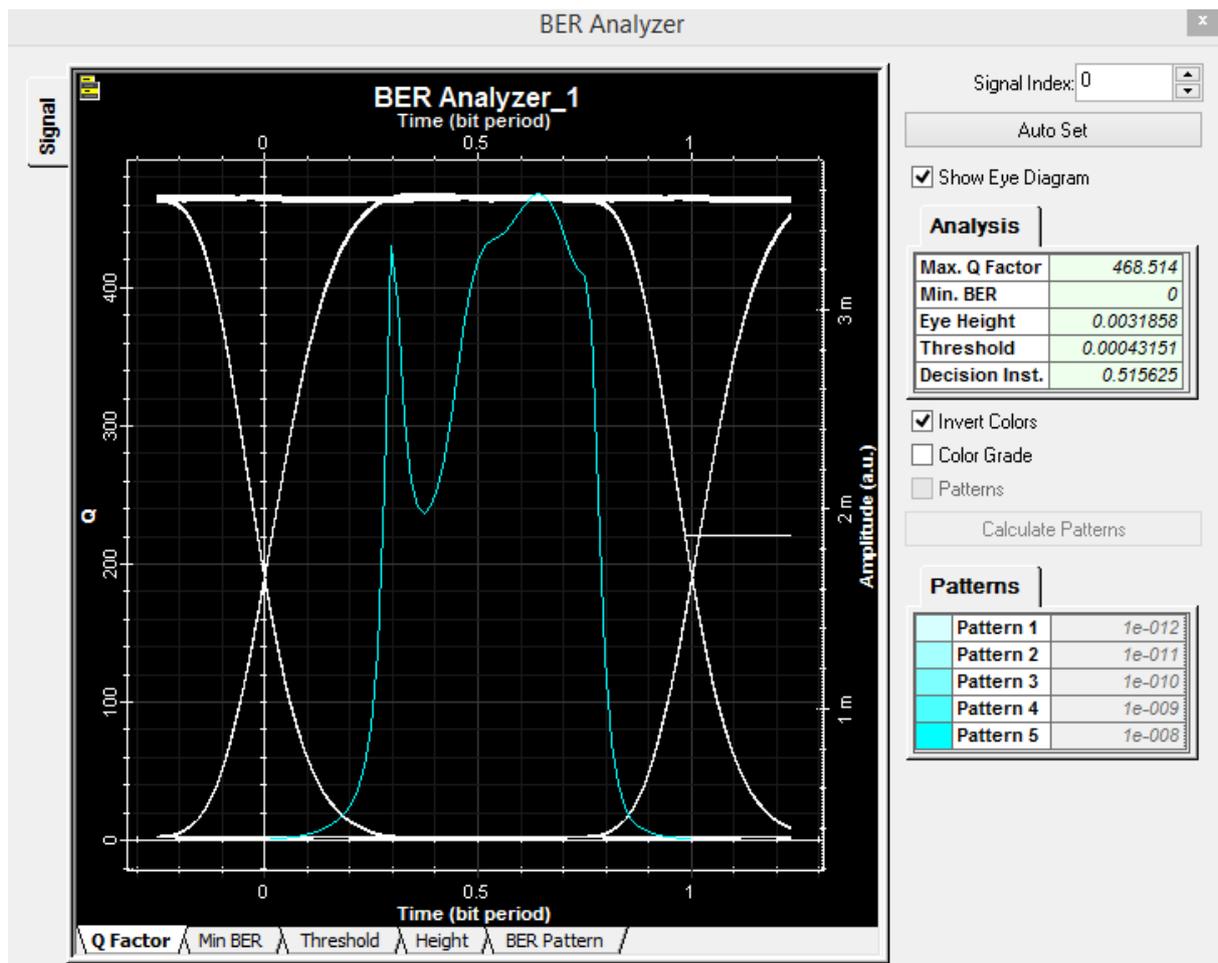


Figure III.13 : diagramme de l'œil

Commentaires :

On remarque d'après la figure III.11 que le facteur de qualité est d'une valeur optimale à la réception, ce qui se traduit également dans la figure III.13 dans le diagramme de l'œil qui montre que l'œil est bien ouvert, on conclue donc que le signal est très bien transmis pour une distance de 1 km

III.5.2 Signaux à la sortie pour une fibre de 100 KM

Si on change la distance de la fibre d' 1 km à 100 km on aura ces résultats suivant les figures ci-dessous :

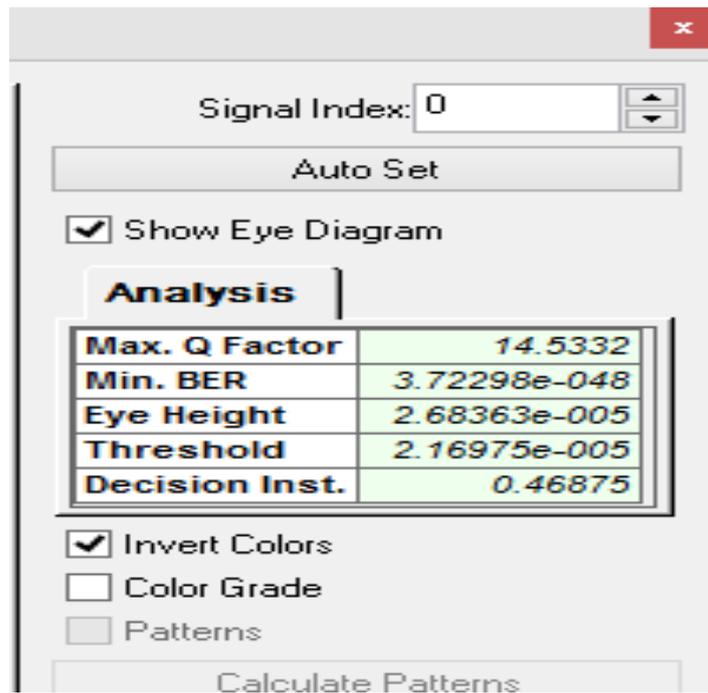


Figure III.114 : Q facteur pour 100 km

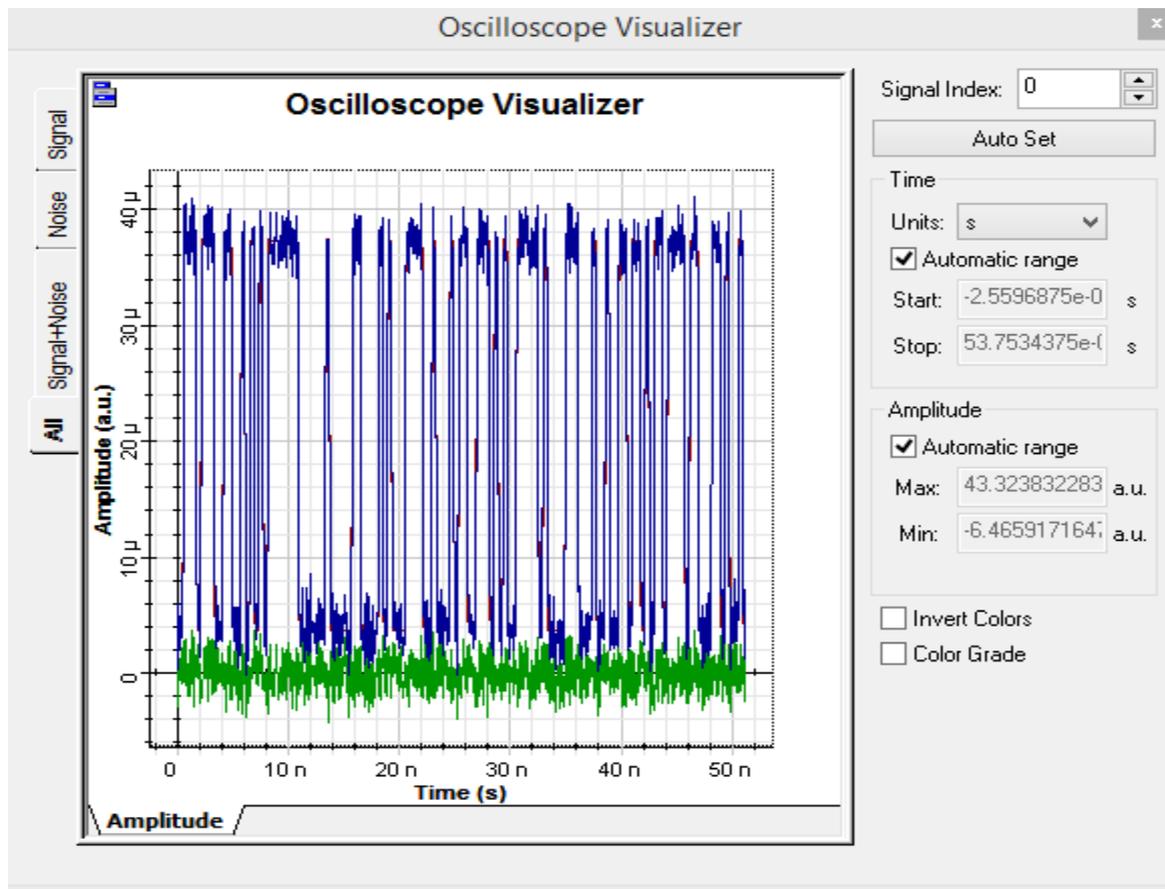


Figure III.15 : Signal oscilloscope pour 100 km

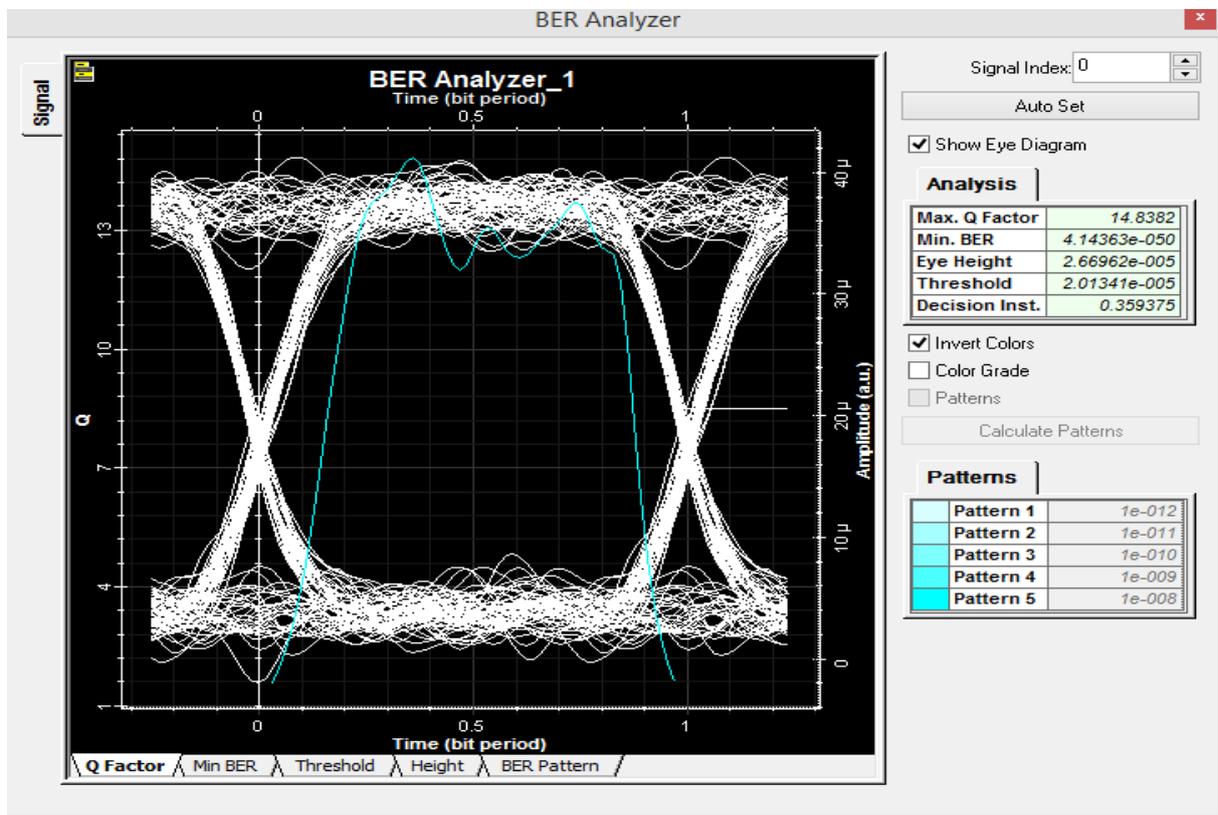


Figure III.16 : diagramme de l'œil pour 100 km

Commentaires

En visualisant la figure III.14 pour une fibre de 100 km on remarque que le Q facteur a diminué, ce qui entraîne une légère déformation du signal à la réception comme on peut le voir sur l'oscilloscope (figure III.15), le diagramme de l'œil pour cette distance a subit une dégradation (gigue d'amplitude) mais reste acceptable et permet la transmission du signal.

III.5.3 Signaux à la sortie pour une fibre de 140 KM

Cette fois ci nous allons changer la longueur de fibre optique jusqu'à 140 km pour interpréter le signal de sortie :

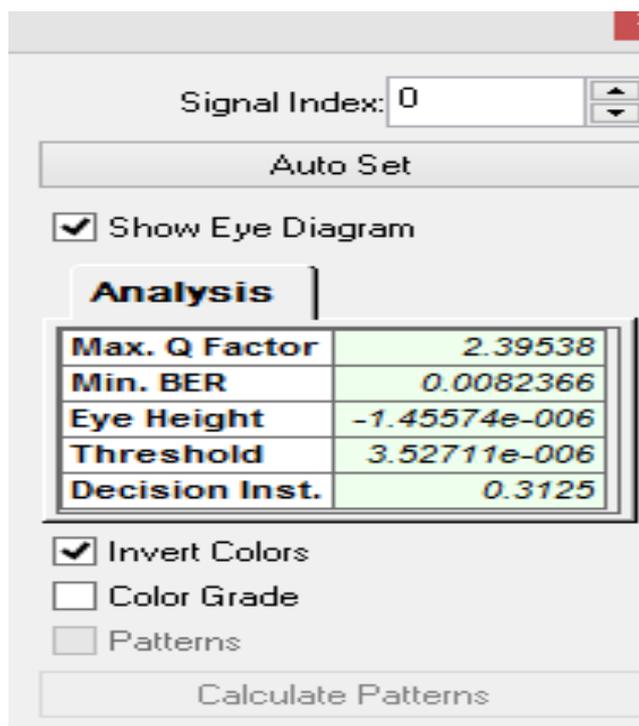


Figure III.17 : Q facteur pour 140 km

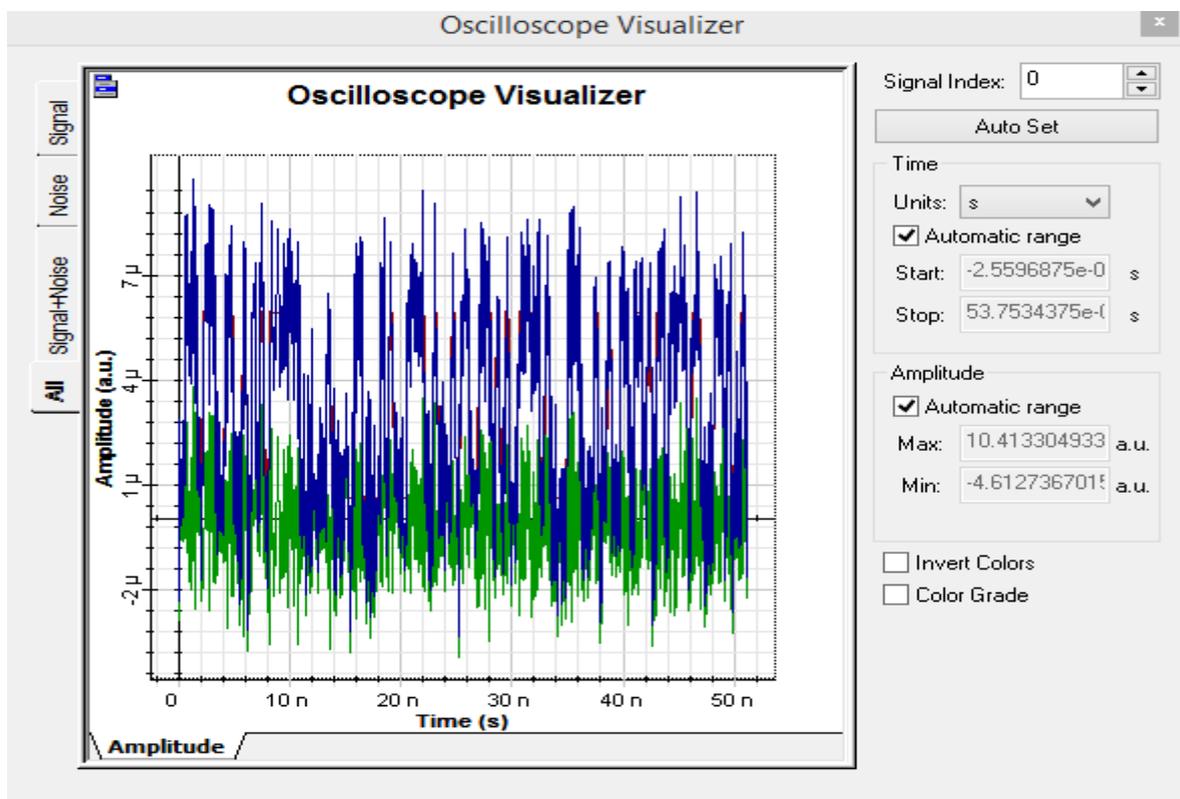


Figure III.18 : Signal oscilloscope pour 140 km

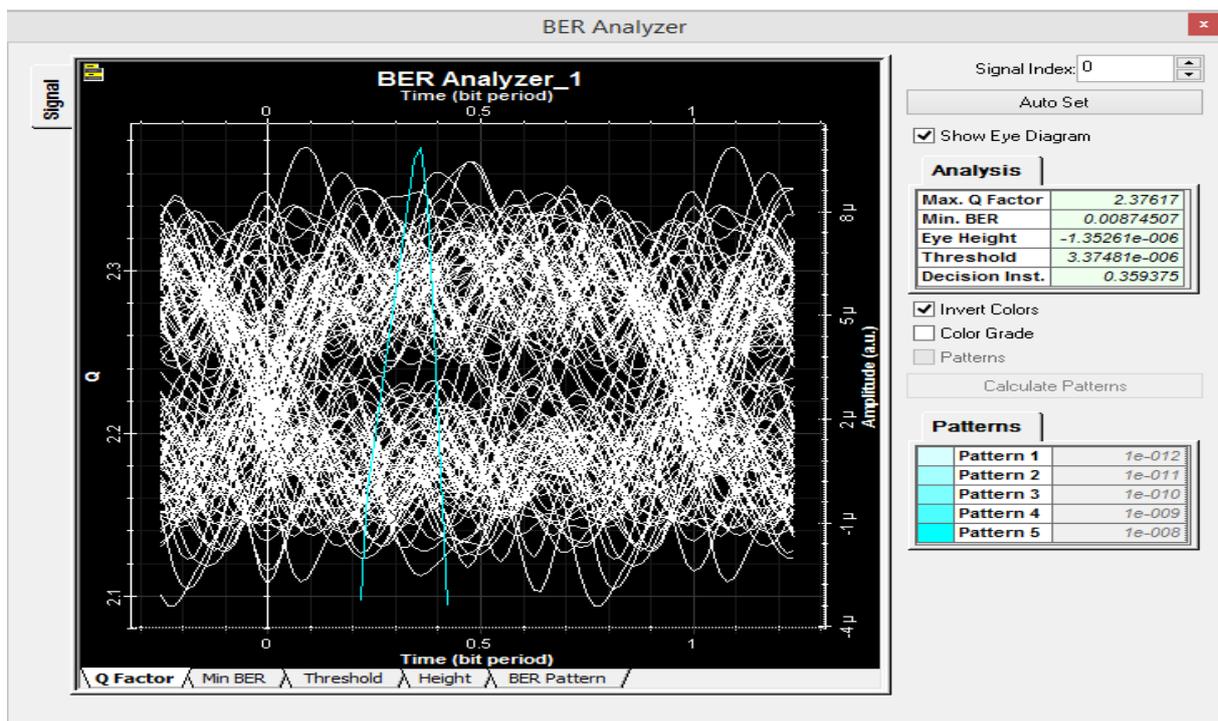


Figure III.19 : diagramme de l'œil pour 140 km

Commentaires

En visualisant la figure III.17 pour une fibre de 140 km on remarque que le Q facteur tend vers le zéro, ce qui signifie que le signal est complètement déformé (perte du signal), son diagramme de l'œil (figure III.18) présente un œil fermé ce qui traduit une mauvaise transmission.

A une certaine distance l'atténuation et la déformation rend la récupération du signal émis impossible.

Pour régénérer et récupérer ce signal déformé on a ajouté un amplificateur optique à la sortie de la fibre comme la figure ci-dessous le montre :



Figure III.20 : amplificateur optique à la sortie de la fibre

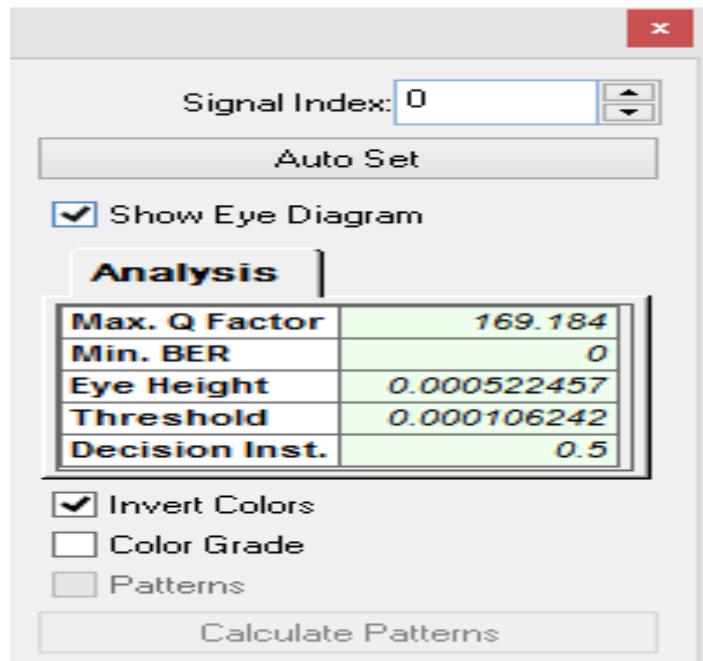


Figure III.21 : Q facteur pour 140 km (signal amplifié)

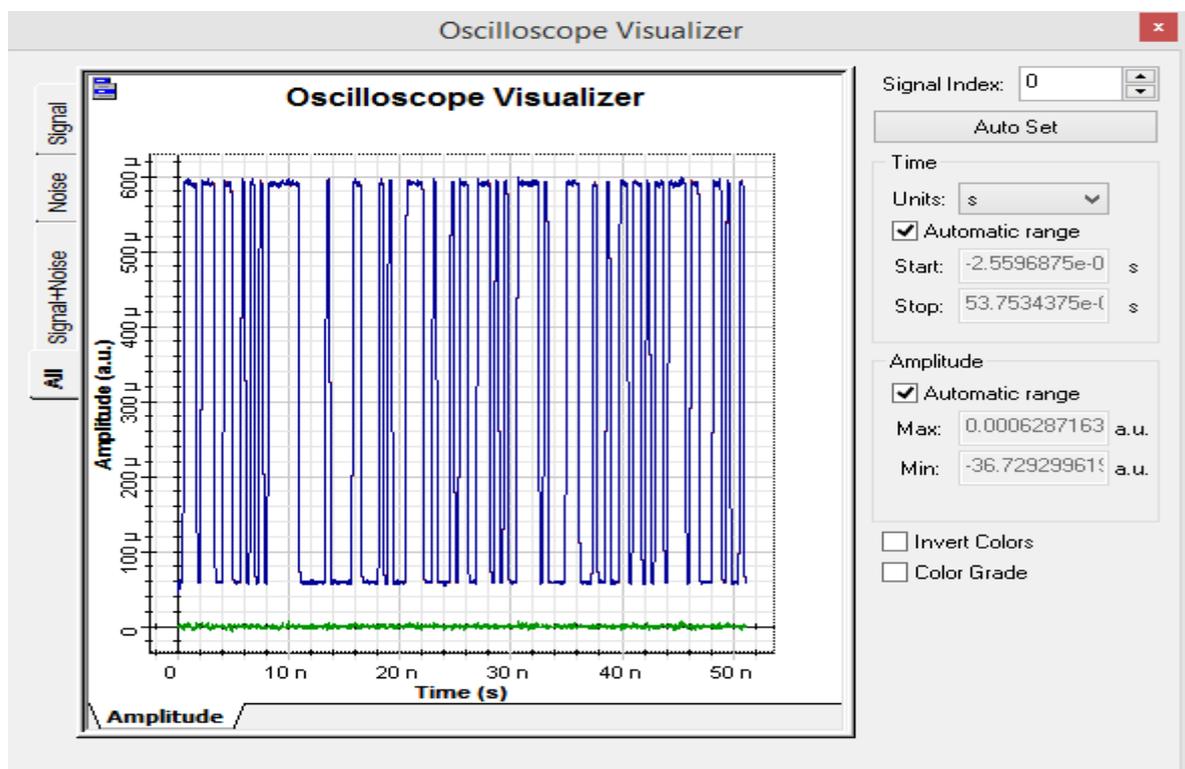


Figure III.22 : Signal oscilloscope pour 140 km (signal amplifié)

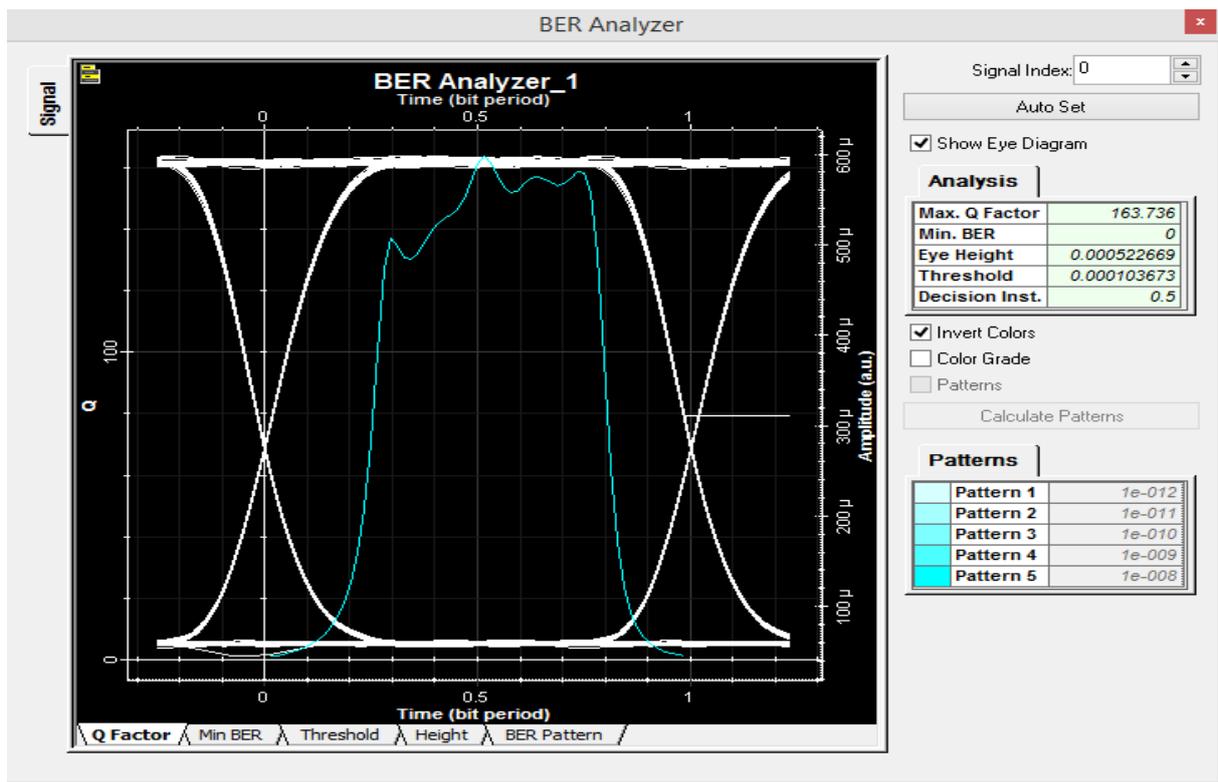


Figure III.23 : diagramme de l'œil pour 140 km (signal amplifié)

Commentaires

D'après la figure III.21 pour une fibre de 140 km (signal amplifié) on remarque que le Q facteur est d'une bonne valeur, en visualisant le signal à la réception (oscilloscope figure III.22) à la réception on notera que le signal n'a pas subi une importante déformation. Le diagramme de l'œil (figure III.23) présente un œil ouvert sans gigue ce qui confirme que le signal a été bien transmis.

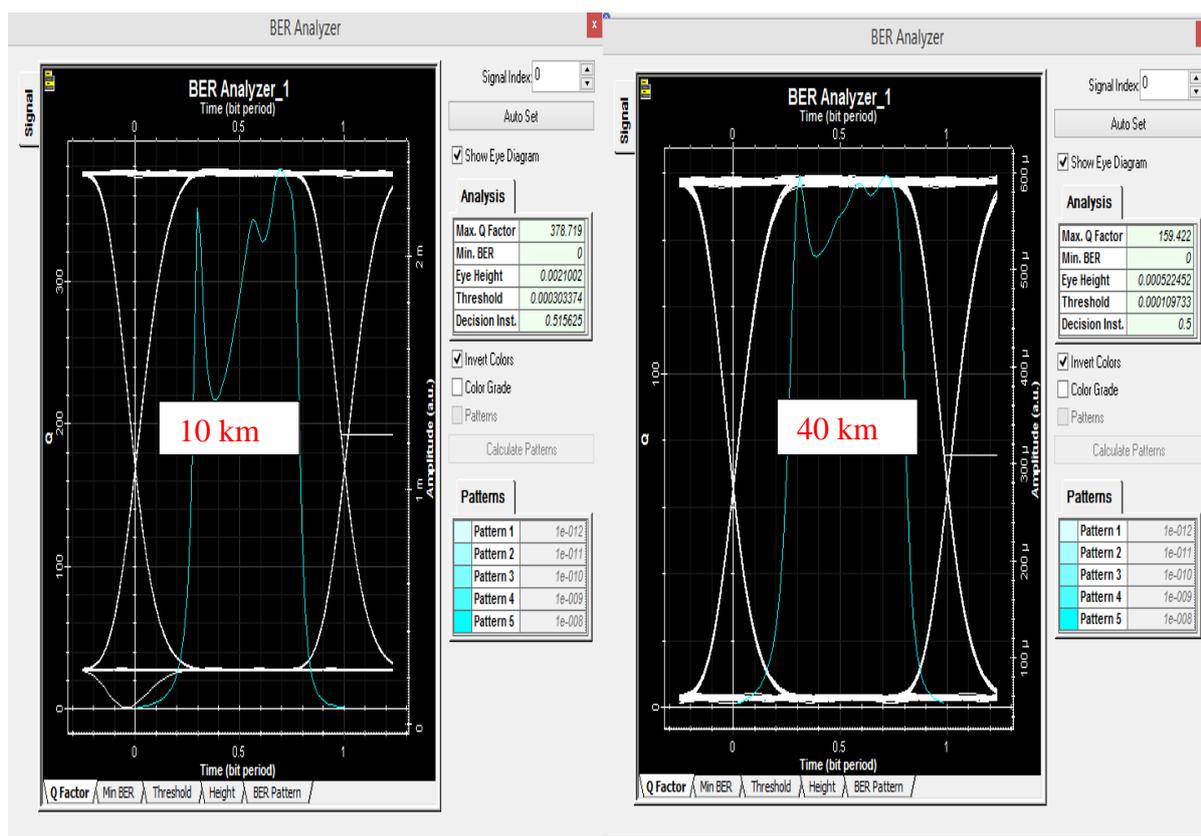
- L'amplificateur optique contribue à la régénération des signaux fortement atténués en les amplifiant.

Le tableau III.1 contient les valeurs issues de la variation de la distance sur le facteur de qualité Q avec les paramètres de simulation : débit 2.5 Gbits/s, atténuation 0.2dB/km.

Distance (km)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Facteur Q	378.8	284.5	252.3	159.4	115.2	80.5	52.5	34.5	21.3

Tableau III.1 : Effet de variation de distance sur le facteur Q

D'après le tableau III.1 on remarque que plus la distance augmente plus le facteur de qualité diminue progressivement donc il serait de nécessaire de tenir compte de la distance dans une transmission pour avoir une qualité optimale du signal à la réception.



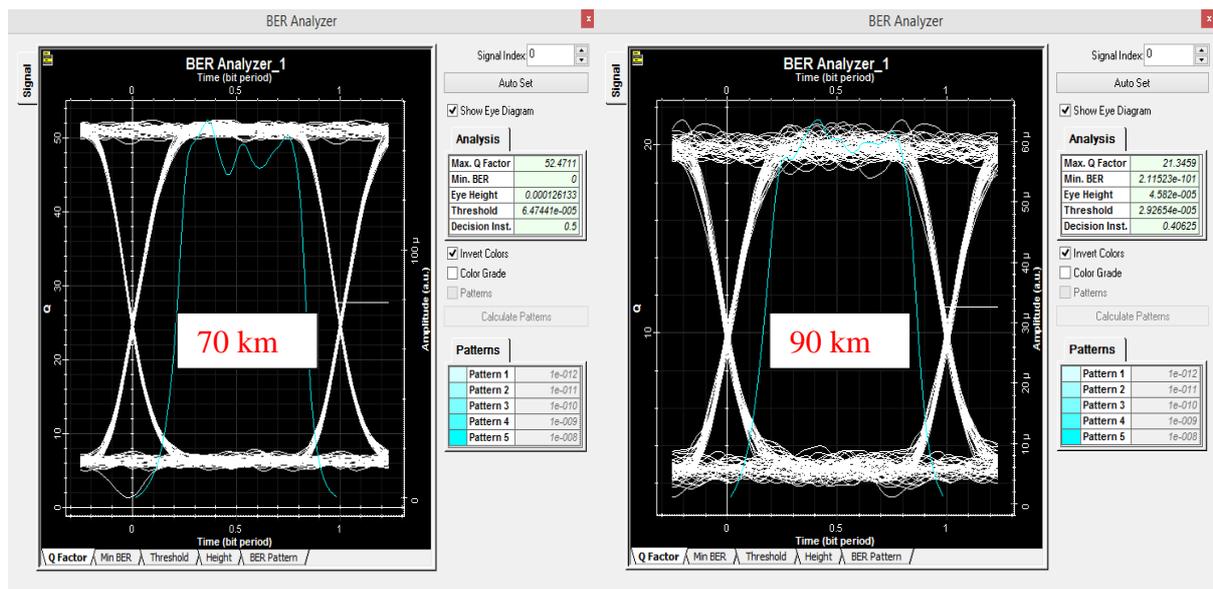


Figure III.24 : Diagramme de l’œil par variation de la distance

D’après ces graphes de la figure III.24, on observe sur le diagramme de l’œil, une dégradation de plus en plus légère causée par l’augmentation de la distance (des gigues d’amplitudes se forment), plus la qualité de transmission est bonne plus l’œil s’ouvre et dans le cas échéant il se ferme.

III.5.4 Influence du débit de transmission sur le facteur de qualité Q :

Pour observer l’effet du débit sur le facteur Q, nous allons effectuer notre simulation avec les paramètres suivants : distance 50 km, atténuation 0.2 dB/km.

Les résultats obtenu est dans le tableau suivant :

Débits (Gb/s)	0.5	1	2	2.5	5	10
Facteur Q	122.6	121.6	114	111	98.7	4.8

Tableau III.2 : Les valeurs Q selon la variation du débit

En se basant sur le résultat obtenu dans ce tableau III.2, le facteur de qualité est presque constant jusqu’à une valeur de 2.5 Gbit/s de débit, au-delà celle-ci, il diminue exponentiellement.

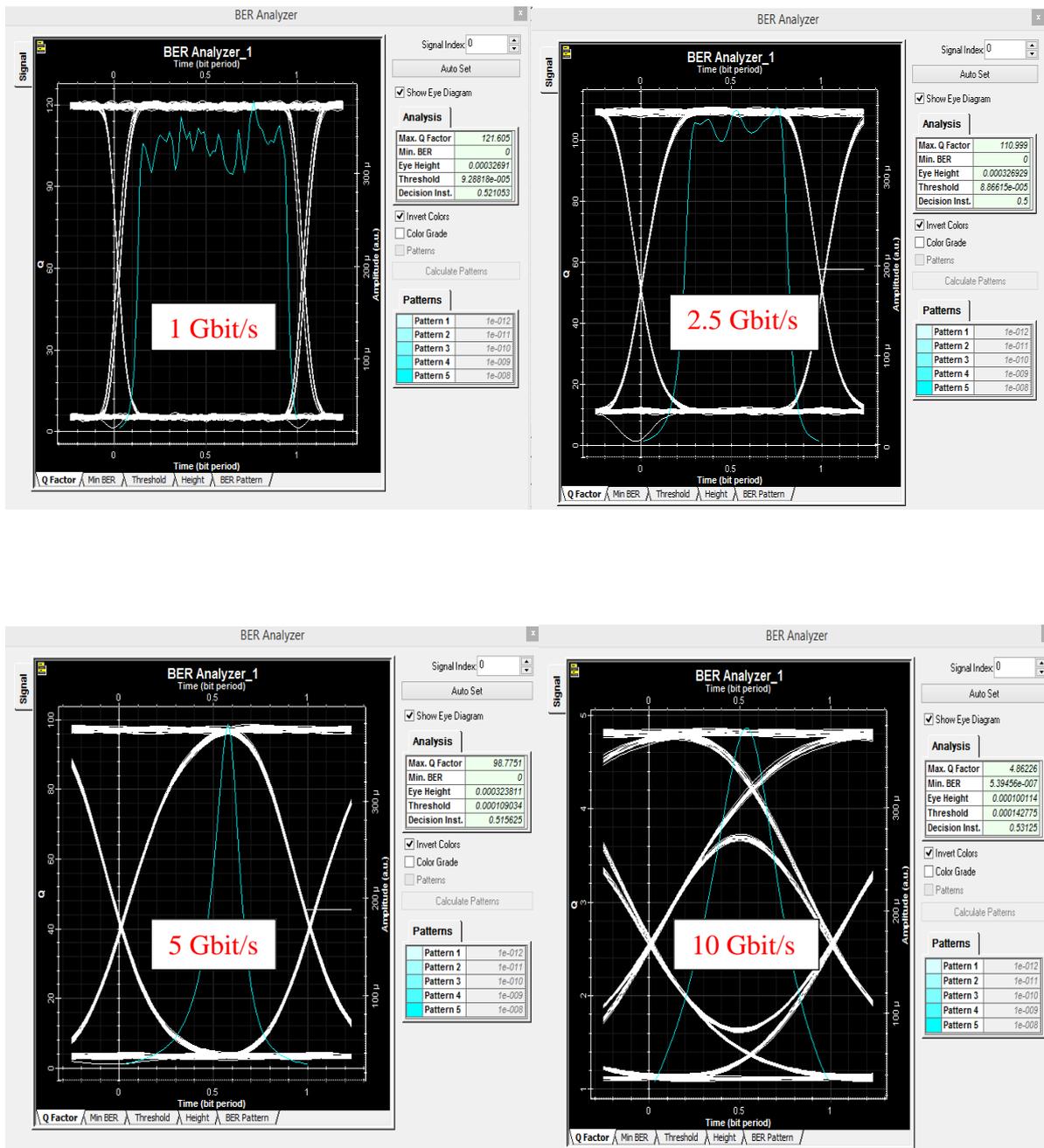


Figure.III.25 : Diagramme de l’œil en fonction de la variation du débit

En se référant sur les diagrammes de l’œil de la figure III.25, du 1 Gb/s jusqu’au 5 Gb/s on a une légère dégradation du diagramme de l’œil, traduisant une bonne ouverture de l’œil et qualité de signal, par contre à 10 Gb/s l’œil est presque fermé impliquant une mauvaise réception.

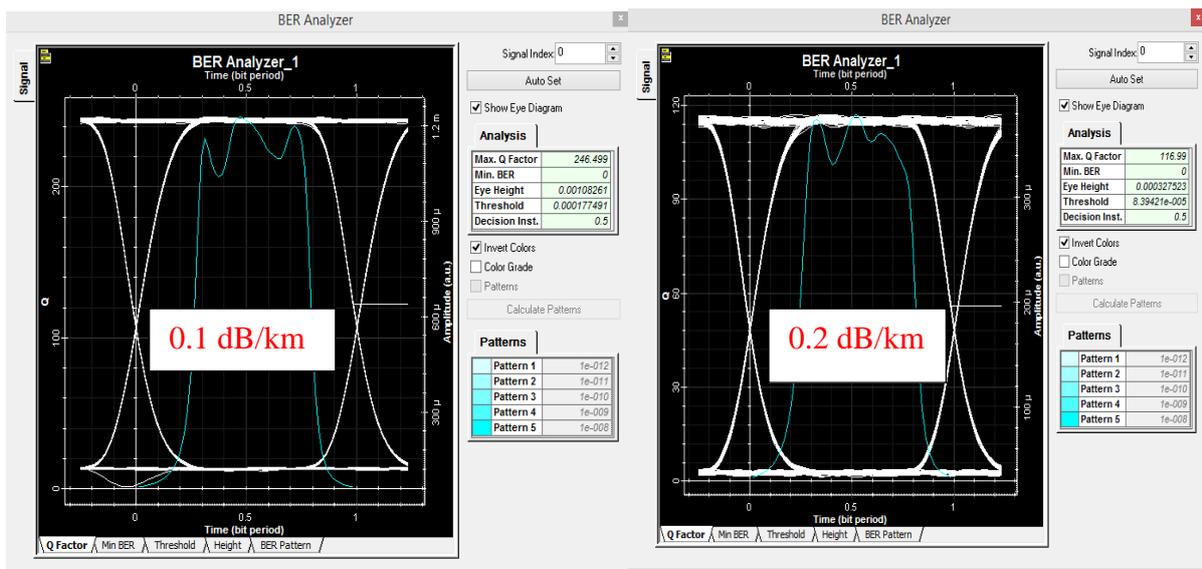
III.5.5 Effet de l'atténuation sur la transmission

Le tableau III.3 présente le résultat de la variation d'atténuation sur le facteur Q dont les paramètres d'entrés : débit 2.5 Gb/s, distance 50 km.

Pertes dB/km	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
Facteur Q	246.5	167.7	117	75.4	43.6	13.6	4.2

Tableau III.3 : Effet d'atténuation sur le facteur Q

L'atténuation du signal a un impact majeur sur le facteur de qualité Q comme nous l'indique ce tableau, plus elle est grande plus le facteur Q diminue considérablement.



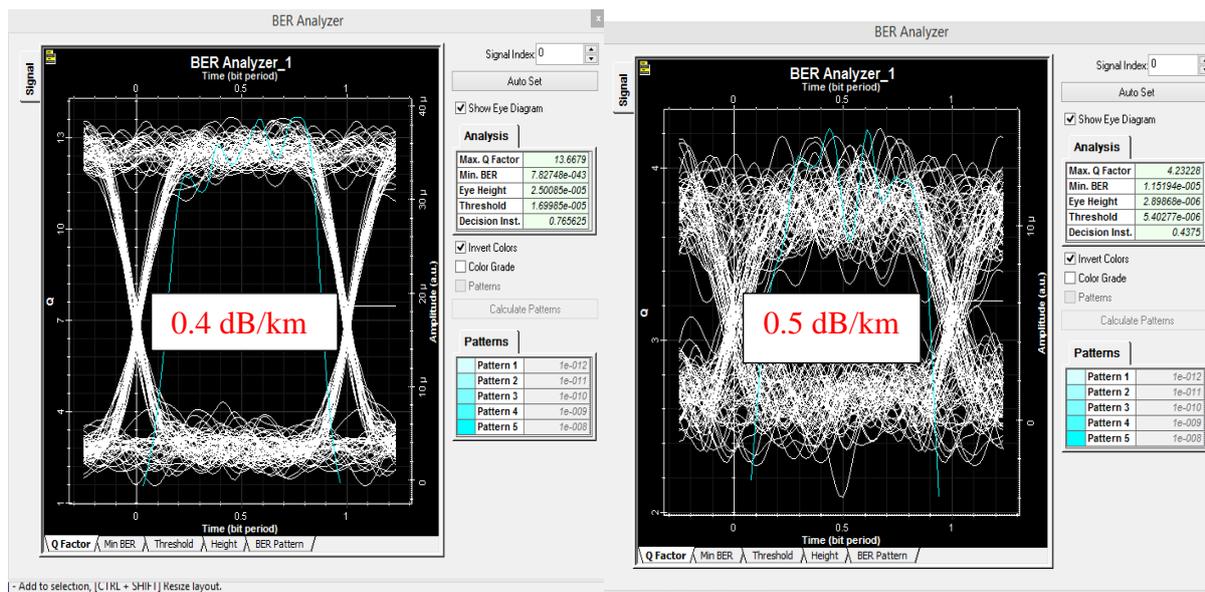


Figure.III.26 : Diagramme de l'œil en fonction de variation d'atténuation

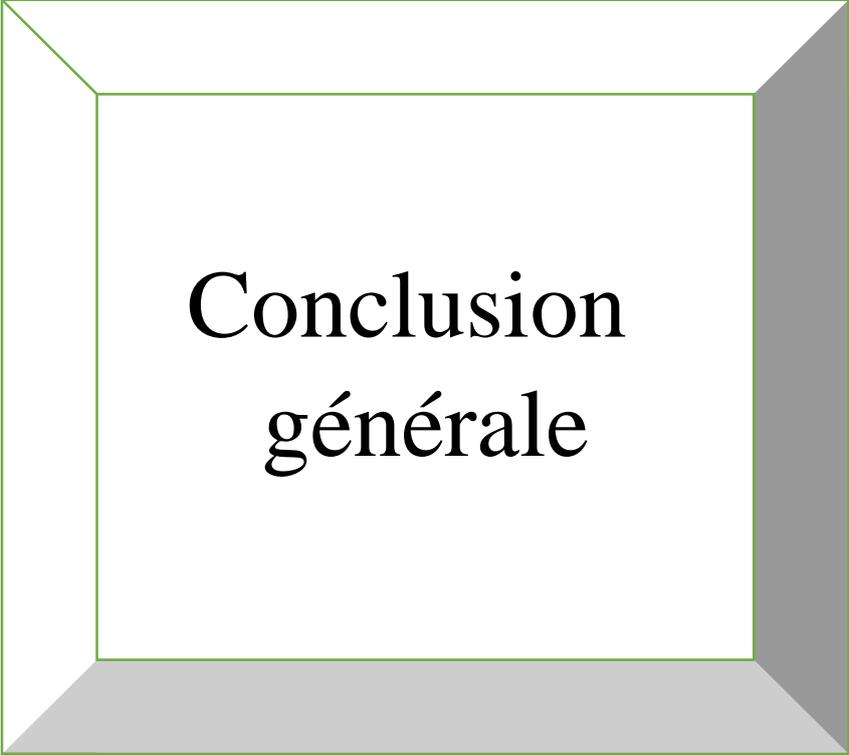
Sur ce diagramme de l'œil nous constatons que plus l'atténuation augmente plus l'œil tend à se fermer et inversement, de ce fait nous résumons que l'atténuation a un impact considérable sur la transmission vu que le signal d'émission n'atteint plus la réception.

III.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons effectué nos recherches sur les performances de transmission du système G-PON qui se repose sur le multiplexage en longueur d'onde WDM en agissant sur différents paramètres tel que la longueur de la fibre, le débit de la liaison.

Le taux d'erreur binaire et le facteur de qualité nous ont permis d'évaluer la qualité de la transmission pour le sens descendant et montant du réseau tout en respectant les valeurs utilisés en télécom optique.

Compte tenu des résultats des simulations faites dans ce chapitre pour les différentes architectures WDM /G-PON envisagées, nous pouvons établir qu'il serait nécessaire dans l'installation d'une liaison optique à très haut débit de tenir compte de la technologie, de l'architecture, de la distance, de l'atténuation, des longueurs d'ondes, du débit.



**Conclusion
générale**

L'évolution des télécommunications optiques a mis en relief l'apparition de nouvelles technologies de transport de l'information telles que les réseaux optiques. Actuellement, l'augmentation de la demande de débit jusqu'à l'utilisateur implique une recherche particulière sur la conception des réseaux d'accès de type FTTH, qui permettent d'atteindre des débits supérieurs à ceux de l'ADSL utilisés aujourd'hui.

Dans ce cadre, l'objectif de notre projet était de voir les améliorations apportées par la fibre optique en terme de qualité de service et de débit par rapport aux autres moyens de transmission, notre travail s'est porté plus exactement sur l'étude du réseau FTTH.

Notre premier chapitre nous a permis de comprendre la théorie de la fibre optique, les différents types de fibre à savoir monomode et multimode dont le monomode est généralement utilisé pour les longues distances. Aussi s'ajoutent ces caractéristiques à savoir l'atténuation, la bande passante, la diffusion et la dispersion ainsi les composants d'une liaison optique.

Le deuxième chapitre de notre travail a été consacré sur l'étude détaillée d'un réseau optique FTTH dans lequel nous avons parlé des différentes architectures PON et leurs comparaisons. Aussi s'ajoutent les différentes parties d'un réseau d'accès FTTH comme l'OLT et l'ONU, le splitter ainsi que les différents domaines d'application.

Dans le troisième chapitre nous avons étudié d'une part une liaison WDM-GPON avec le logiciel OPTISYSTEM, ainsi qu'en faisant varier les paramètres comme la distance, le débit, l'atténuation. En effet les résultats obtenus nous montrent une bonne transmission à une certaine distance, cette architecture pouvant supporter une atténuation allant à 0.3 dB et un débit atteignant 5 Gbit/s, elle offre des résultats intéressants avec une bonne qualité de transmission.

Suite à notre étude, on a conclu que les réseaux optiques peuvent atteindre des débits importants avec une transmission de bonne qualité, mais il faut nécessairement toujours garder les compromis utilisateurs / débits, et distances / débits.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M.Kaddeche. « Cours communication optique », université Djillali Bounaama Khemis Miliana. 2015.
- [2] : site web, igm.univ-mlv.fr : l'ouverture numérique d'une fibre
- [3] : FTTx opération & maintenance, Huawei.
- [4] : Document : ODN principale Algérie télécom.
- [5] : Document : Algérie télécom évolution du réseau d'accès haut débit vers très haut débit : janvier 2017
- [6]: D and O Committee. FTTH Hanbook, Fourth Edition. Fibre To The Home, Council Europe 2011, 2011.
- [7] : Groupe orange France Télécom, SA au capital de 10 412 239 188€ RCS Paris 380 129 866 - 6921.
- [8] : Ensemble d'industriels et équipementiers du domaine; 2006 – « Les réseaux PON », Passive Optical Network, Eléments d'appréciation techniques, économiques et réglementaires, p.5-30.
- [9] : MRABET. H ; 2011 – « Cours Réseau d'accès optique ». Institut Supérieur des Etudes Technologiques en Communications de Tunis.
- [10]: SARNI. M, HILT. B, CLEMENTZ. N et LORENZ. P ; 2007 – « Expérimentation de service Triple Play sur un réseau optique passif ». Projet ERAS (Expérimentation de Réseaux à Accès Symétriques). Laboratoire MIPS-GRTC, Société Vialis, Colmar, France.
- [11]: A. D. Kersey A review of recent developments in fiber optic sensor technology. Optical fiber Technology, 2:291.317, 1996.
- [12] : http://offres.neuf.fr/fibre_optique/home-fibre-optique.Html www.avoirlafibre.com
- [13]: Fiber to the home Council Europe FTTH Handbook Edition 6, par Eileen Connolly Bul, année 2014
- [14] : ABDOULAYE HALIDOU Bachirou et KANTE Souleymane, « Etude et planification du réseau FTTH pour les transmissions optiques à haut débit », PFE, université Djilali Bounaama Khemis Miliana
- [15] : « Livre Blanc» -Les réseaux PON «Passive Optical Network » éléments d'appréciation techniques, économiques et réglementaire 18 Décembre 2006 Extrait N° 801 de la Revue Générale des Routes
- [16] : EFORT : les technologies PDH SDH et WDM <http://www.efort.com>

[17] : Pierre Lecoy, «Télécom sur fibres optiques», 4ème édition année 2015.

[18] : Ensemble d'industriels et équipementiers du domaine; 2006 – « Les réseaux PON »,

Passive Optical Network, Eléments d'appréciation techniques, économiques et réglementaires, p.5-30.

[19] : GASSER Philippe- Thème « Les architectures FTTX » - MSH Paris Nord -Plate-forme arts, sciences, technologies.

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

[21] : FABIENNE Saliou ; Thème « Etudes des solutions d'accès optique exploitant une extension de portée »- 14/06/2010.