

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des sciences et de la Technologie  
Département d'Electronique et Télécommunications



Domaine : **Sciences et Technologie**

Filière : **Télécommunications**

**Mémoire fin d'étude en vue de l'obtention**

**Du diplôme de : MASTER**

**En : Réseaux et Télécommunications**

---

# **Simulation d'un Réseau d'accès PON par VPI**

---

Présenté par :

**BECHAA Romayssa**

Sous la direction de :

**Dr. Bouchemel Ammar**

Jun 2022

## *Remerciement*

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

*Je tiens à remercier mon encadreur le Dr. Bouchemel Ammar de m'avoir fait confiance en me proposant ce sujet. Je voudrai aussi le remercier pour sa gentillesse, sa disponibilité et du temps consacrer à ce travail.*

*Je remercie tous les membres du jury qui se sont fait un honneur d'accepter et de lire cette mémoire :*

*Mr. Abed Djamel*

*Mr. Ghdjati Mouhamed*

*Je ne pouvais pas terminer sans remercier tous les enseignants, tous les collègues qui m'aide et qui m'entièrement soutenus au cours des dernières années.*

*Merci beaucoup.*

## Dédicas

*Je dédie ce modeste travail*

*A mon père, source d'énergie pour ma réussite,*

*A ma très chère maman*

*Qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté*

*A qui je dois tout*

*A mes frères Sohaïb et Badri*

*A mes sœurs Sihem, Rima et Intissar*

*A mes chères amies Soumia, Warda et Houda*

*A toutes ma famille.*

*A tous les gens qui m'aiment*

*A tous ceux que j'aime*

## Résumé

Le domaine des communications par fibres optiques est actuellement caractérisé par une augmentation de la demande en termes de capacité de transmission. On cherche à transmettre de plus en plus de données et de nouvelles applications voient le jour pour répondre aux besoins demandés. La fibre optique va peu à peu remplacer les câbles téléphoniques. Elle permet de répondre à la problématique du haut débit, mais elle permet aussi le développement de nouveaux services. Parmi ses différents services on trouve le réseau optique passif PON (Passive Optical Network) qui est une référence en matière de réseaux d'accès très haut débit.

Le but de ce mémoire est d'étudier un réseau optique PON, et de déterminer la meilleure qualité de transmission possible, puis de passer à une architecture plus avantageuse en terme de débit et de nombre d'utilisateur, l'architecture WDM-PON.

**Mots clés :** fibre optique, réseaux optiques passifs, WDM.

## Abstract

The field of optical fiber communications is currently characterized by an increase in demand in terms of transmission capacity. We are trying to transmit more and more data and new applications are emerging to meet the needs. Fiber optics will gradually replace telephone cables. It makes it possible to respond to the problem of broadband, but it also allows the development of new services. Among its various services is the passive optical network PON (Passive Optical Network) which is a reference in terms of very high speed access networks.

The purpose of this thesis is to study a PON optical network, and to determine the transmission quality possible, then switch to a more advantageous architecture in terms of throughput and number of users, the WDM-PON architecture.

**Keywords:** optical fiber, passive optical networks, WDM.

# Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
CHAPITRE I .....	3
I.1 Introduction : .....	4
I.2 Généralité sur la fibre optique : .....	4
I.2.1 Définition : .....	4
I.2.2 Fonctionnement d'une fibre optique : .....	6
I.2.3 Différents types de fibres optiques : .....	7
I.2.3.1 La fibre monomode : .....	7
I.2.3.2 Fibre optique multimode : .....	8
I.2.3.2.2 La fibre optique à gradient d'indice : .....	9
I.2.4 Phénomènes liés à la propagation sur la fibre optique : .....	10
I.2.4.1 Effets linéaires : .....	10
I.2.4.2 Effets non linéaires : .....	13
I.2.5 Applications de la fibre optique : .....	13
I.2.6 Avantages et inconvénients des fibres optiques : .....	14
I.2.6.1 Les avantages : .....	14
I.2.6.2 Les inconvénients : .....	14
I.3 Les systèmes de transmissions optiques : .....	14
I.3.1 Composants d'un système de transmission optique : .....	15
I.3.1.1 Composants d'émission : .....	16
I.3.1.2 Composants de réception : .....	18
I.3.1.3 Le support de transmission : .....	20
I.3.1.4 Amplificateurs optiques : .....	20
I.3.2 Techniques de multiplexage : .....	21
I.3.2.1 Le multiplexage en longueur(WDM) : .....	22
I.3.2.2 Le multiplexage en temps (TDMA) : .....	23
I.3.2.3 Le multiplexage par répartition de code (OCDM) : .....	23
I.4 Conclusion : .....	24
CHAPITRE II .....	25
II.1 Introduction : .....	26
II.2 Les réseaux d'accès : .....	26
II.2.1 Le réseau local (LAN) : .....	26
II.2.2 Le réseau métropolitain (MAN) : .....	26

II.2.3 Le réseau long distance (WAN) :	27
II.3 Les réseaux d'accès optiques :	27
II.3.1 Fibre jusqu'à sous-répartiteur (FTTN) :	27
II.3.2 Fibre jusqu'au trottoir (FTTC) :	28
II.3.3 Fibre jusqu'à domicile (FTTH):	28
II.4 Architectures FTTH :	29
II.4.1 Architecture point à point :	29
II.4.2 Architecture point à multipoint :	31
II.4.3 Tableau comparatif :	32
II.5 Les réseaux Optique Passifs (PON) :	34
II.5.1 Définition :	34
II.5.2 Topologie des réseaux PON :	34
II.5.3 Composants et appareils pour réseaux optiques passifs :	35
II.5.3.1 Le terminal de ligne optique (OLT) :	36
II.5.3.2 le terminal de réseau optique (ONT) :	36
II.5.3.3 Coupleur optique (splitter) :	37
III.6 Types de services PON :	37
III.6.1 La norme APON :	37
III.6.2 La norme BPON :	37
III.6.3 La norme EPON :	38
III.6.4 La norme GPON :	38
III.6.5 La norme XGPON :	38
III.6.6 La norme NG-PON2 :	39
III.6.7 Tableau récapitulatif :	39
III.7 Le multiplexage en longueur d'onde (WDM-PON) :	41
III.7.1 Architecture de multiplexage en longueur d'onde WDM PON :	42
III.7.1 Sens descendant :	43
III.7.2 Sens montant :	43
III.8 Les débits offerts par les réseaux optiques passifs (PON) :	43
III.9 Les performances d'un réseau optique passif :	43
III.10 Limites des réseaux optiques passifs :	44
III.10.1 La distance :	44
III.10.2 Test d'accès :	44
III.10.3 Vulnérabilité élevés aux ruptures au niveau de la ligne d'alimentation ou de l'OLT :	44
II.11 Conclusion :	45
CHAPITRE III	46

III.1 Introduction :	47
III.2 Description de l'outil de simulation :	47
III.2.1 Fenêtres VPI :	48
III.2.2 Applications :	51
III.3 Description du système 10-GPON par VPI :	52
III.3.1 Évaluation et Interprétation des résultats :	53
III.3.1.1 Diagramme de l'œil :	53
III.3.1.2 Le BER :	54
III.4 Etude d'une chaîne de transmission WDM-PON :	56
III.4.1 Description de réseau WDM-PON :	57
III.4.1.1 OLT :	57
III.4.1.2 Le canal de transmission :	57
III.4.1.3 RN (Nœud de Raccordement) :	58
III.4.1.4 ONU :	58
III.4.2 Résultats et interprétation :	59
III.4.2.1 Spectre optique:	59
III.4.2.2 Diagramme de l'œil :	60
III.4.2.3 BER :	62
III.5 Conclusion :	63
<i>Conclusion Générale</i> .....	65
<i>Bibliographie</i> .....	67

# Liste des Figures

Figure I.1 : Fibre Optique.....	5
Figure I.2 : Loi de snell discart. ....	5
Figure I.3 : Transmission d'une fibre optique.....	6
Figure I.4 : Ouverture numérique d'une fibre optique. ....	7
Figure I.5 : fibre optique monomode. ....	8
Figure I.6 : fibre à saut d'indice. ....	9
Figure I.7 : fibre a gradient d'indice.....	9
Figure I.8 : La dispersion dans la fibre optique.....	11
Figure I.9 : La dispersion modale dans les trois types de fibre.....	12
Figure I.10 : chaine de transmission optique.....	15
Figure I.11 : Spectre d'émission d'une DEL.....	16
Figure I.12 : Spectre d'émission d'une DL. ....	17
Figure I.13 : Schémas de principe de laser.....	18
Figure I.14 : Photodiode PIN. ....	19
Figure I.15 : Structure d'une photodiode à avalanche APD.....	20
Figure I.16 : Principe de l'amplificateur optique. ....	21
Figure I.17 : Concept de base du WDM.....	22
Figure I.18 : Multiplexage en temps TDM. ....	23
Figure II.1 : Structure d'un réseau FTTN ....	28
Figure II.2 : Structure d'un réseau FTTC. ....	28
Figure II.3 : Structure d'un réseau FTTH... ..	29
Figure II.4 :Architecture P2P ....	30
Figure II.5 : Architecture point à multipoint. ....	31
Figure II.6 : Architecture point à multipoint ..... ..	35
Figure II.7 : Composants d'un réseau PON. ....	36
Figure II.8 :Le multiplexage en longueur d'onde WDM.....	41
Figure II.9 : Architecture PON base sur le multiplexage en longueur d'onde WDM. ....	42
Figure III.1 : Interface utilisateur VPI Design Suite avec un schéma ouvert.....	48
Figure III.2 : Panneaux Recherche rapide recherche en texte intégral.....	49
Figure III.3 : Panneau de ressource. ....	50
Figure III.4 : Onglet accueil.. ....	51



Figure III.5 : Onglet outils.....	51
Figure III.6 : Onglet graphique. ....	51
Figure III.7 : schéma d'un module émetteur-récepteur.....	52
Figure III.8 : Diagramme de l'œil (électrique).....	53
Figure III.9 : Diagramme de l'œil (optique).. ....	54
Figure III.10 : le BER en modulation NRZ.....	55
Figure III.11 : BER en modulation RZ.. ....	55
Figure III.12 : Chaine de transmission WDM-PON. ....	56
Figure III.13 : partie émission OLT.. ....	57
Figure III.14 : Fibre optique.....	57
Figure III.15 : Démultiplexeur au RN.....	58
Figure III.16 : Partie réception ONU. ....	58
Figure III.17 : Spectre optique modulé en NRZ.....	59
Figure III.18 : Spectre optique modulé en RZ.. ....	60
Figure III.19 : Diagramme de l'œil modulé en NRZ.. ....	61
Figure III.20 : Diagramme de l'œil modulé en RZ.....	61
Figure III.21 : Variation du BER en fonction de la longueur de la fibre. ....	62
Figure III.22 : Variation du BER en fonction de la longueur de la fibre.. ....	63

# *Liste des tableaux*

<b>Tableau II.01</b> : Tableau comparatif entre les architectures P2P et P2MP.....	33
<b>Tableau II.02</b> : Comparaison des standards PON.....	40

## *Abréviations*

### **A**

APD: Avalanche Photo Diode.

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line.

AMRC: Accès Multiple à Répartition par Code.

APON : ATM PON Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network.

ATM : Asynchronous Transfer Method.

AWG: Arrayed Waveguide Grating.

### **B**

BPON: Broad Passif Optical Network

BER: Bit Error Rate.

### **C**

CSMA: Carrier Sense Multiple Access

CD: Collision Detect

### **D**

DL: Diode Laser.

CDMA: Code Division Multiple Access.

### **E**

EDFA: Erbium Doped Fibre Amplifier.

EPON: Ethernet Passive Optical Network

## **F**

FTTX: Fiber To The terminal X.

FTTN: Fiber To The Node.

FTTC: Fiber To The Curb.

FTTH: Fiber To The Home.

FTTB: Fiber To The Building.

FSAN: Full Service Access Network.

## **G**

GPON : Gigabit Passive Optical Network

## **H**

HDSL: High-bit-rate Digital Subscriber Line.

## **I**

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

ITU: International Telecommunication Union.

## **L**

LED: Light Emitting Diode.

LAN: Local Area Network.

LASER: Light Amplifier Stimulated Emission Radiated.

## **M**

MAN: Metropolitan Area Network.

MCVD: Modified Chemical Vapor Deposition.

## **N**

NRO: Nœud de Raccordement Optique.

NG-PON: Next-Generation Passive Optical Network.

NRZ: Non Retour a Zéro.

## **O**

OLT: Optical Link Terminal.

ON: Ouverture Numérique.

ONT: Optical Network Terminal.

ONU: Optical Network Unit.

## **P**

PIN: Positive Intrinsic Photodiode.

PABX: Protocol Automatic Branch eXchange.

P2P: Point To Point.

PON: Passive Optical Network.

P2MP: Point To MultiPoint.

PMD: Dispersion Modale de Polarisation.

## **R**

RN: Remote Node.

Rx: Réception en télécommunication.

RZ: Retour a Zero.

## **S**

SR: Sous Répartiteur

SDH: Synchronous Digital Hierarchy.

SONET: Synchronous Optical Network.

SNR: rapport signal à bruit.

## **T**

TDM: Time Division Multiplexing.

Tx: Transmission en télécommunication.

TEB: Taux d'Erreur Binaire.

TV: TéléVision.

## **U**

UIT: Union International de Telecommunication.

## **V**

VDSL: Very high Digital Subscriber Line.

VPI: Virtual Photonics Integrated.

## **W**

WAN: Wide Area Network.

WDMA: Wavelength Division Multiplexing Access.

# INTRODUCTION GENERALE

Durant le long terme, en plein essor depuis plus de 25 années, les réseaux d'accès continuent à développer très rapidement et les chercheurs dans ce domaine pensent à des technologies plus en plus compatibles avec ce développement que ce soit au niveau de la technique de multiplexage ou bien de type de support de transmission utilisé.

A l'époque, ni les systèmes à câble coaxiaux, ni les systèmes micro-onde, ne permettaient de transmettre un débit supérieur à 100Mbit/s en moyenne. Le système coaxial le plus évolué était capable de transmettre un débit de 274Mbit/s, mais à condition de prévoir l'installation de répéteurs tous les kilomètres.

Depuis la pose de premier câble optique, les systèmes de transmissions les plus rapides véhiculent l'information à un débit de l'ordre de quelques dizaines ou centaines de Mbit/s sur des distances courtes. L'apparition du multimédia, la téléphonie, le trafic de données et internet ont été les facteurs clés d'une demande en bande passante toujours grandissante et un support de transmission plus pratique. [04]

L'augmentation de cette demande avec le nombre des utilisateurs a provoqué le développement de la technologie de multiplexage en longueur d'onde. La montée en puissance qui s'ensuivit a été possible grâce au perfectionnement des lasers, source prodige des systèmes optiques, et d'amplificateurs optiques.

L'évolution de la transmission des données par fibre optique s'est accélérée depuis l'apparition de la technique de multiplexage en longueurs d'ondes (WDM), qui permet d'atteindre des débits binaires de quelques Tbit/s transportés sur une seule et unique fibre optique. Après avoir transmis 2.5 Gbit/s, puis 10 Gbit/s par canal sur des longueurs de transmission qui atteignent des centaines de km, le besoin de transmettre un débit plus élevé (aujourd'hui supérieur ou égal à 40 Gbit/s) sur des longueurs de transmission de plus en plus grandes ne cesse de croître. L'accès au haut débit est devenu une nécessité dans le monde actuel où la quantité et la qualité des informations à transporter augmente continuellement. [07]

L'objectif de ce travail de mémoire de fin d'étude est d'étudier le réseau optique passif (PON). Dans ce cadre, on s'intéresse à une architecture PON-WDM (PON avec multiplexage en longueur d'onde).

## **Introduction Générale**

---

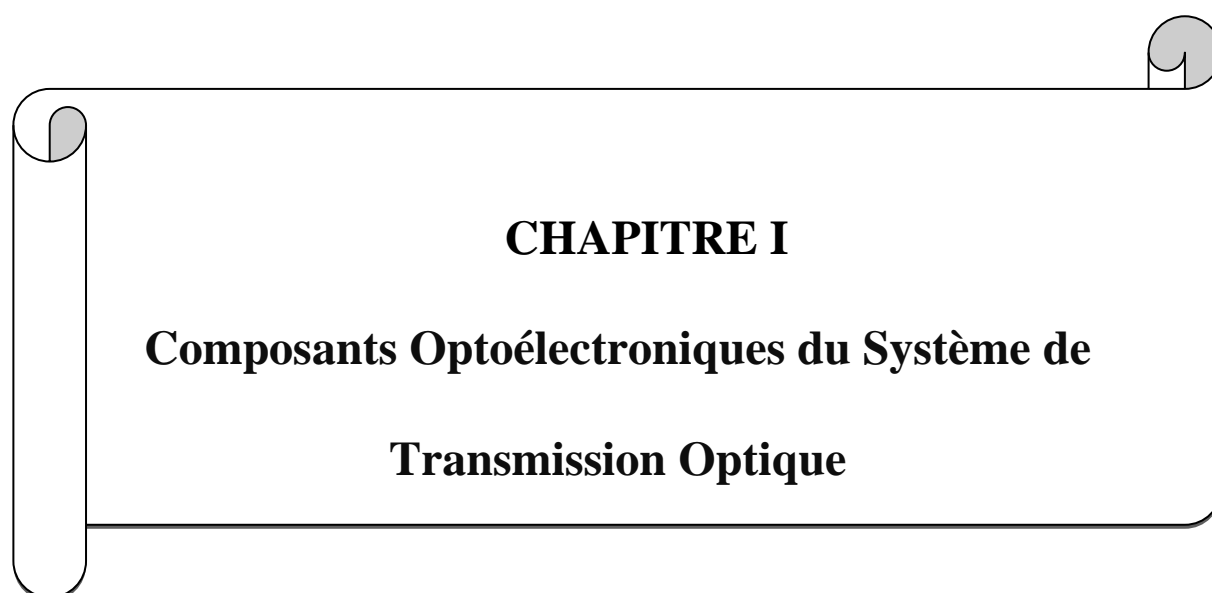
Le travail est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre décrit les différents types de la fibre optique passant par les phénomènes liés à la propagation, après on a défini les systèmes de transmission optique avec ces composants d'émissions et de réceptions, et on finissant avec les différents techniques de multiplexage.

Le deuxième chapitre sera consacré aux réseaux d'accès optiques avec les différentes architectures FTTx, ainsi que le fonctionnement du réseau optique passif(PON), avec ses différents éléments tel que L'ONT, L'ONU, et le coupleur. Ensuite Nous allons présenter le système PON-WDM, et on finira notre chapitre par citer les débits offerts par les réseaux PON, ainsi que les performances des réseaux et ces limites.

Pour finir, le dernier chapitre a pour objectif de présenter succinctement le logiciel de simulation VPI permettant d'étudier le réseau optique PON. On présenter deux systèmes différents avec des paramètres différents, le premier système va être le système le plus simple puisqu'il présente les caractéristiques d'un émetteur-récepteur PON. Dans le deuxième système on va étudier une chaîne de transmission WDM-PON basé sur le découpage du spectre.

Finalement, on termine ce mémoire par une conclusion générale.



**CHAPITRE I**  
**Composants Optoélectroniques du Système de**  
**Transmission Optique**



## **I.1 Introduction :**

Le concept de communication optique est connu depuis longtemps, et l'utilisation de la lumière pour envoyer des informations doit être aussi ancienne que les signaux de feu ou de fumée, et s'est poursuivie dans les temps modernes; nous sommes dans une période de pleine croissance dans le développement des réseaux Internet. Aujourd'hui, avec le développement du multimédia lié au l'émergence de nouveaux services, il existe une demande de transmission d'informations à haut débit; par conséquent, l'objectif principal de la communication optique est de transmettre des données et des informations très rapidement.

La transmission optique étudie la propagation de la lumière plutôt que celle des ondes radio et nécessite un support de transmission particulier appelé "fibre optique", qui s'effectue à l'aide de guides de lumière. [17]

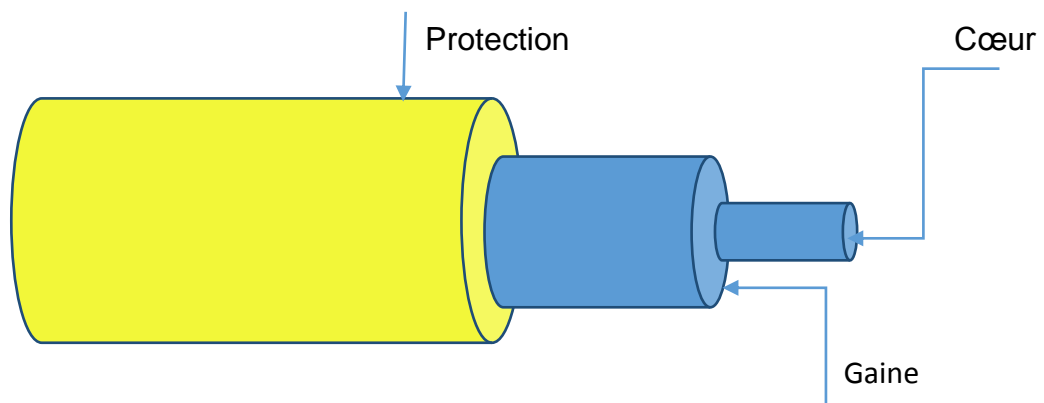
## **I.2 Généralité sur la fibre optique :**

### **I.2.1 Définition :**

La fibre optique est un dispositif qui guide la lumière, et permet ainsi la transmission de signaux lumineux sur de longues distances.

Une fibre optique est un fil en verre (silice) ou en plastique très fin, de quelques microns de diamètre, qui a la propriété de conduire la lumière et sert dans les transmissions terrestres et océaniques de données. Elle offre un débit d'informations nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux, et supporte un réseau « large bande » par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques. [6]

Elle est formée d'un fil de verre très fin. Comprend un cœur, dans lequel se propage la lumière émise par une diode électroluminescente ou une source LASER et une gaine optique dont l'indice de réfraction garantit que le signal lumineux reste dans la fibre. [1]



**Figure I.1 :** Fibre Optique.

❖ **Indice de réfraction  $n$  :**

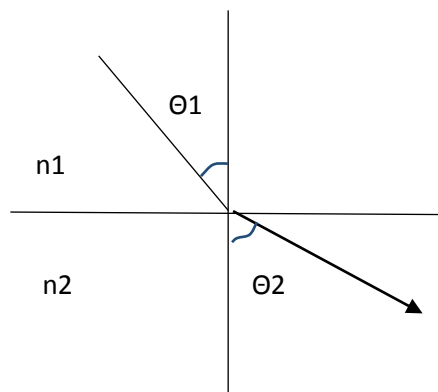
Dans un matériau transparent, l'indice de réfraction mesure la vitesse de la lumière par rapport à sa vitesse dans le vide. [2]

$$V = c \div n \quad (I.1)$$

Où  $n$  est l'indice de réfraction absolu du milieu considéré,  $c$  la vitesse de la lumière dans le vide ( $3 \times 10^8$  m/s), et  $v$  la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu considéré.

❖ **Loi de Snell-Descartes :**

Est une équation permettant de calculer les angles incidents et réfractés ainsi que les indices de réfraction absolus des milieux en présence. [3]



**Figure I.0 :** Loi de Snell-Descartes.

La loi de Snell-Descartes est déterminée par l'équation suivante:

$$n_1 \times \sin\theta_1 = n_2 \times \sin\theta_2 \quad (I.2)$$

Où

$n_1$  : représente l'indice de réfraction du rayon incident.

$\theta_1$  : représente l'angle d'incidence.

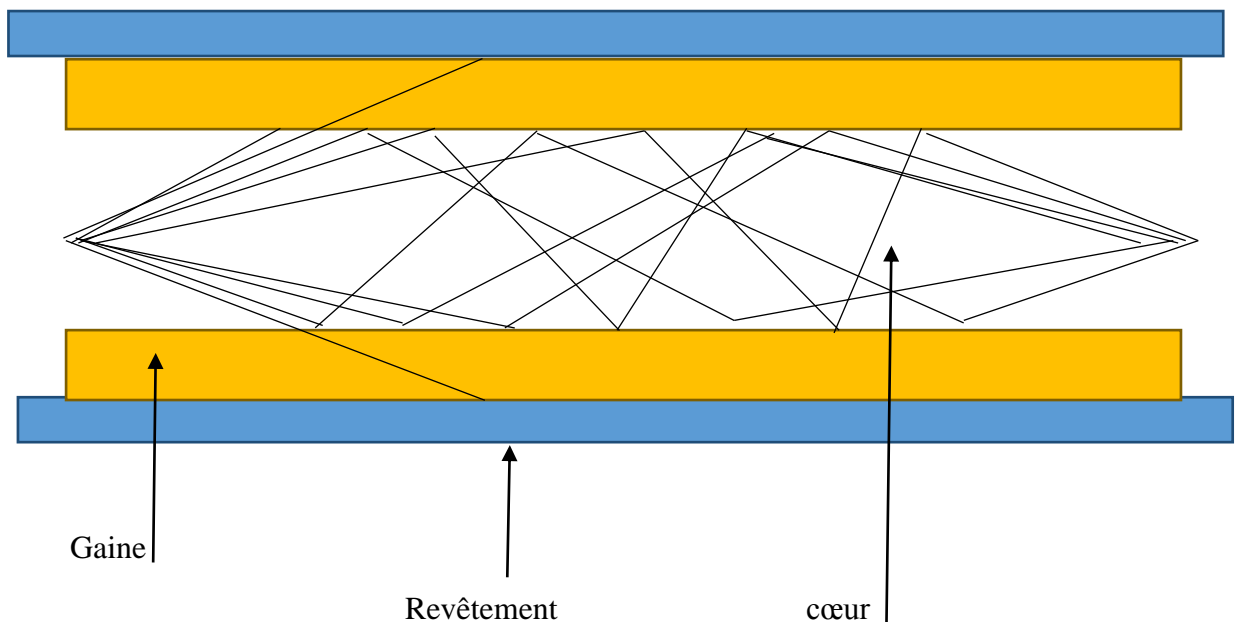
$n_2$  : représente l'indice de réfraction du rayon réfléchi.

$\theta_2$ : représente l'angle de réfraction. [3]

### I.2.2 Fonctionnement d'une fibre optique :

La fibre optique est capable de faire la transmission en un seul mode (fibre optique monomode) ou aux plusieurs modes (fibre optique multimode).

Le mode c'est chaque angle d'injection de rayon dans la fibre optique (voir figure I.3), qu'une fibre optique soit monomode où multimode dépend de la structure de la fibre et aussi de la longueur de l'onde à transmettre. Chaque mode de transmission est indépendant et suit un chemin différent aux autres et donc, différents temps de transmission. [4]



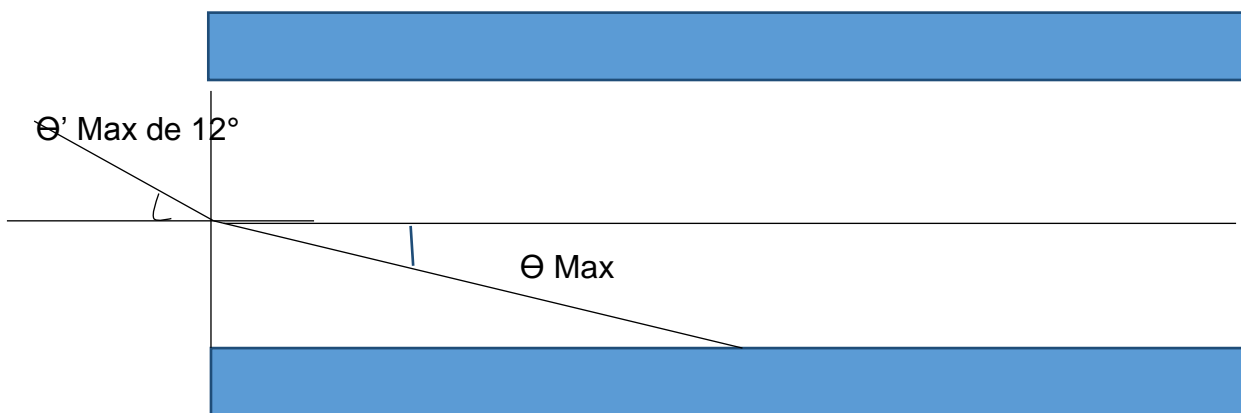
**Figure I.3 :** Transmission d'une fibre optique.

Aussi on parle sur l'ouverture numérique qui est par définition le sinus de l'angle  $\Theta$  Max. (angle formé par l'axe de la fibre et le rayon le plus incliné par rapport à cet axe susceptible d'être guidé). [5]

$$ON = \sin \Theta' \text{ Max} \quad \Theta' \text{ Max} = 12^\circ$$

$$ON = 0,2 \quad \sin 12^\circ = 0,2$$

L'ouverture numérique en fait le cône d'acceptance des rayons par une fibre. Elle est en général de 0,2 ce qui correspond à un angle Max de  $12^\circ$  (donc un cône d'acceptance de  $24^\circ$ ).



**Figure I.4 :** Ouverture numérique d'une fibre optique.

### I.2.3 Différents types de fibres optiques :

Il existe deux grands types de fibre optique : la fibre multimode et la fibre optique monomode. On parle de fibre multimode quand le diamètre du cœur de la fibre est important, c'est à dire de 50 à 60 microns environ et lorsque plusieurs rayons appelés « modes », sont transportés dans la fibre optique de manière simultanée. Et on parle de fibre optique monomode lorsque le diamètre du cœur est très petit et lorsqu'on envoie qu'un seul rayon lumineux dans la fibre. [5]

#### I.2.3.1 La fibre monomode :

La fibre optique monomode a un cœur dont le diamètre est inférieure ou égale à  $10\mu\text{m}$ , ce qui permet le passage d'un unique rayon lumineux dans la fibre optique qui suit l'axe de la

fibres. Il n'y a donc plus de phénomène de dispersion des temps de propagation d'où un très grand débit.



**Figure I.5 :** fibre optique monomode.

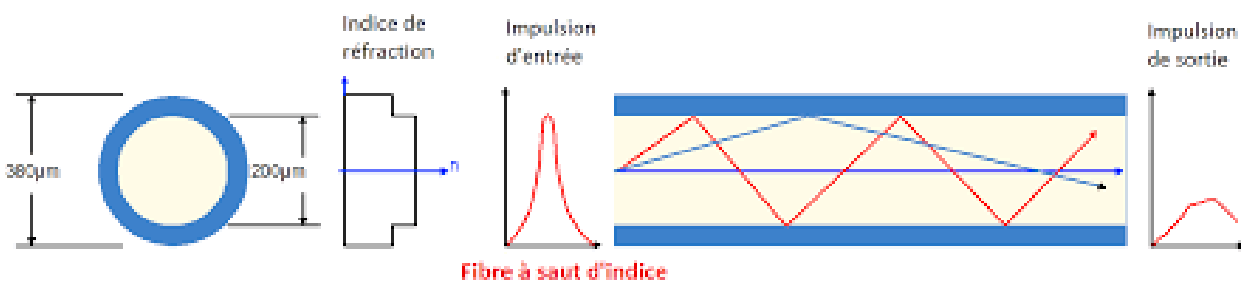
La fibre monomode est la meilleure fibre existante à l'heure actuelle. C'est ce type de fibre qui est utilisé pour les différentes connexions mondiales. [5]

### **I.2.3.2 Fibre optique multimode :**

Qui est à son rôle composé par deux types :

#### **I.2.3.2.1 La fibre optique à saut d'indice :**

Tous les trajets se font à la même vitesse; les temps de propagation sont directement proportionnels aux distances parcourues, et dépendent donc de l'angle d'incidence à l'entrée de la fibre. Cependant, le chemin optique varie, ce qui est gênant puisqu'un même signal se retrouve étendu à la lumière dans la fibre est guidée par une réflexion totale interne à l'interface cœur-graine, elle suit un chemin en zigzag (figure I.6).



**Figure I.6 :** fibre à saut d'indice.

Ce type de fibre utilisées sur des courtes distances car le signal est modifié.

Débit: environ 100 Mbit/s ;

Portée maximale: environ 2 Km ;

Affaiblissement: 10 dB/Km. [17]

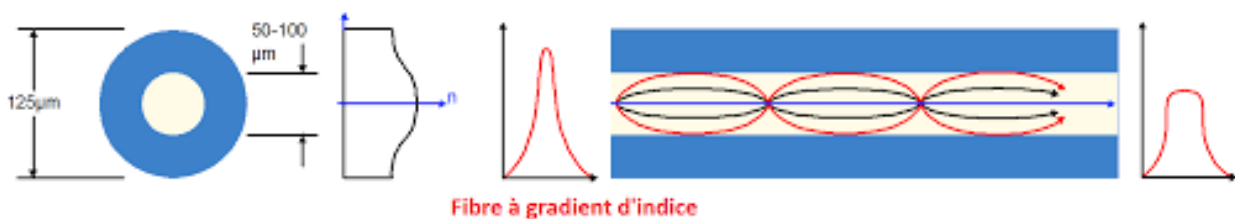
La fibre à saut d'indice possède un cœur très large. L'atténuation sur ce type de fibre est très importante comme on peut le voir (figure I.6) sur la différence des impulsions d'entrée et de sortie. [7]

### I.2.3.2.2 La fibre optique à gradient d'indice :

La fibre multimode à gradient d'indice 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.

Ces différentes couches de silice de densités multiples influent sur la direction des rayons lumineux, qui ont une forme elliptique comme il est présenté dans la figure suivante.



**Figure I.7 :** fibre a gradient d'indice.

La fibre à gradient d'indice possède un cœur de taille intermédiaire. L'atténuation sur ce type de fibre est moins importante que sur les fibres à saut d'indice.

Avec:

Débit : environ 1 Gbit/s ; [17]

Portée maximale : 10 à 20 Km ; [34]

Affaiblissement: 10 dB/Km. [17]

## **I.2.4 Phénomènes liés à la propagation sur la fibre optique :**

Les phénomènes de propagation sur fibre optique comprennent de nombreux effets physiques tels que les effets linéaires et des effets non linéaires variés dont il faudra analyser les conséquences sur la qualité de transmission.

### **I.2.4.1 Effets linéaires :**

#### **I.2.4.1.1 Atténuation :**

Est un paramètre important de la fibre puisqu'elle caractérise sa capacité à transporter à une certaine distance les ondes optiques sans trop les atténuer. En effet, les modes en propagation guidée sont sujets à de nombreux types de pertes : connexions ou épissures entres fibres, absorption due aux impuretés ou aux imperfections géométriques du guide...

Pour caractériser la contribution globale de ces pertes, on introduit le paramètre  $\alpha$  (en dB/km) représentant l'atténuation en puissance par unité de longueur de fibre :

$$\alpha = (10 \div L) \log (P(L) \div P(0)) \quad (I.3)$$

Avec  $P(0)$  et  $P(L)$  respectivement la puissance à l'entrée et celle à la sortie de la fibre de longueur  $L$ .

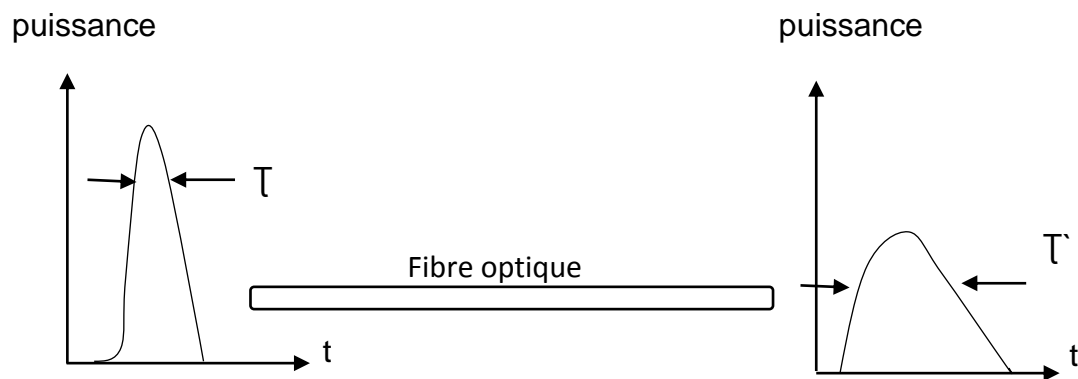
Fort heureusement, grâce au procédé industriel dénommé MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition), on réalise actuellement des fibres en silice dont l'atténuation (0,2 dB/km à 1,55  $\mu\text{m}$ ) est très proche de la limite théorique (0,18 dB/km), permettant la transmission de données sur 50 km à 100 km sans répéteur ni amplificateur. [8]

#### **I.2.4.1.2 Dispersion :**

Lorsqu'on veut transmettre une impulsion sur la fibre optique, on produit l'impulsion avec un émetteur laser. Cette impulsion n'est pas idéale car elle présente une durée dans le temps. Dans une transmission idéale, on espère avoir à la sortie la même impulsion, mais cette impulsion a une durée plus grande que la durée initiale. [4]

Il y a plusieurs causes pouvant expliquer ce phénomène :

- Dispersion modale.
- Dispersion chromatique.



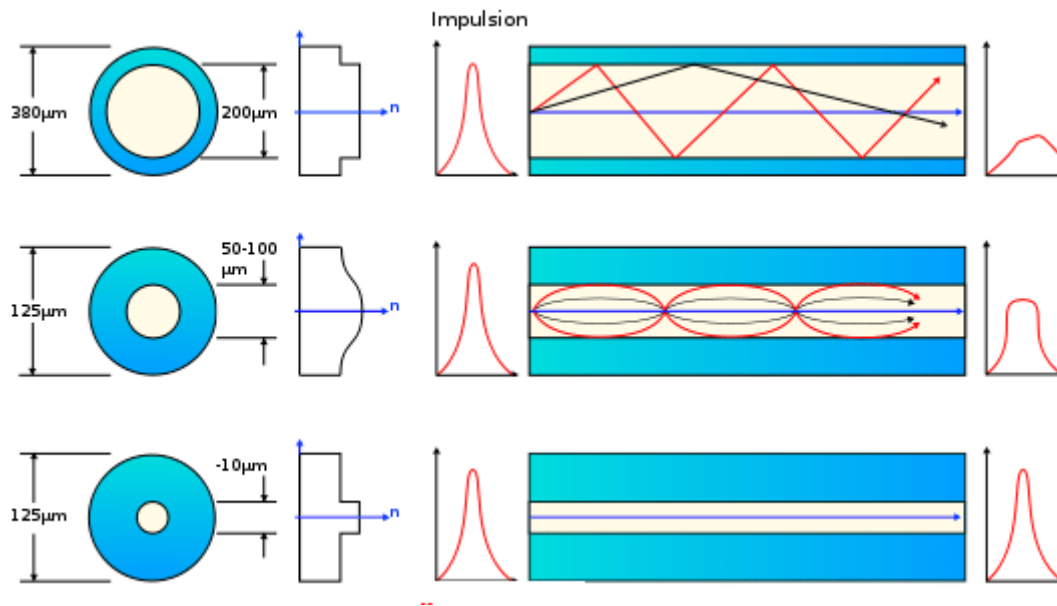
**Figure I.8 :** La dispersion dans la fibre optique.

❖ **Dispersion modale :**

Les chemins suivis par les différents rayons lumineux n'ont pas la même longueur, et leurs temps de propagation sont donc différents, cette différence étant proportionnelle à la longueur de la fibre. Ce phénomène représente l'inconvénient majeur pour les fibres multimode.

En fait; dans les fibres multimodes, chaque mode se propage à une vitesse différente, cette différence est due aux différents angles d'incidence à l'interface cœur-gaine. Ce phénomène peut être réduit en utilisant les fibres à gradient d'indice dans lesquelles, l'indice de réfraction change progressivement entre le cœur et la gaine. Cependant; même avec les fibres à gradient d'indice, la dispersion modale peut encore limiter le débit binaire du signal transmis et la distance que le signal peut parcourir. [1]





**Figure I.9 :** La dispersion modale dans les trois types de fibre.

Il n'y a qu'un seul mode de propagation dans les fibres monomode, donc il n'y a aucun effet de dispersion modale. [4]

❖ **Dispersion chromatique :**

Ce terme regroupe en fait deux types de dispersion :

- ❖ **La dispersion matériau :** les lasers et les LEDs ne sont pas des sources monochromatiques. Ils produisent de la lumière dans une gamme de longueurs d'ondes. Une impulsion lumineuse issue de source optique est donc composée de plusieurs longueurs d'onde. L'indice de réfraction des fibres étant différent selon la longueur d'onde de la lumière, chaque longueur d'onde se propage dans la fibre à une vitesse spécifique. Certaines longueurs d'ondes arrivent donc avant d'autres et l'impulsion s'étale (s'élargit).
- ❖ **La dispersion guide :** Ceci est dû au fait que la lumière n'est en fait pas strictement confinée dans le cœur. Les champs électrique et magnétique constituant l'impulsion lumineuse s'étendent en fait (légèrement) à l'extérieur du cœur, donc dans la gaine. Le champ électromagnétique "déborde" dans la gaine d'autant plus que la longueur d'onde est grande. L'indice de réfraction vu par l'onde est donc une moyenne entre de l'indice de réfraction du cœur et celui de la gaine. Les longueurs d'ondes les plus petites auront donc tendance à se propager plus lentement que les longueurs d'ondes plus grande, d'où un élargissement de l'impulsion lumineuse.

Cet effet est quasiment négligeable avec les fibres multimodes (qui n'ont un rayon de cœur relativement grand) mais ne l'est pas avec les fibres monomodes (pour lesquelles le rayon du cœur est quasiment de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde). [20]

### **I.2.4.2 Effets non linéaires :**

Les deux effets non linéaires principaux dans les fibres optiques sont l'effet Kerr et l'effet Raman-Brillouin.

#### **I.2.4.2.1 Effet Kerr :**

Cet effet non linéaire est à l'origine de phénomènes qui se produisent parfois dans les fibres de silicium, produisant notamment un élargissement spectral, à savoir l'auto modulation de phase et le mélange à quatre ondes, car il traduit la dépendance de l'indice de réfraction à la puissance injectée dans la fibre. [10]

#### **I.2.4.2.2 Effet Raman :**

La fibre transporte le signal sur une certaine longueur d'onde. Avec la distance, ce signal se « dilue ». Mais il n'est pas perdu. En fait, nous le retrouvons dans le flux utile au transport des informations. L'amplification Raman récupère ou « pompe » ce signal. Dans la pratique, la distance de transfert (sans répéteur) peut ainsi être portée à près de 250 km. [11]

### **I.2.5 Applications de la fibre optique :**

L'avènement de la fibre optique dans les systèmes sous-marins en 1988, Fonctionnement au débit de 280 Mbit/s (équivalent de 4000 communications téléphoniques) Cette capacité des systèmes sous-marins a été multipliée par plus de 1000 en 10 ans : 32 x 10 Gbit/s en 2000 (équivalent d'un peu moins de 4 000 000 de communications téléphoniques) systèmes terrestres mis en service en 2000 : capacité de N x 2,5 Gbit/s (N = 2 à 16). Les nouveaux systèmes sont étudiés sur la base de 10 Gbit/s par fibre.

#### **❖ Performances actuelles :**

Les fibres monomodes qui satisfont aux spécifications de l'UIT ont un coefficient de dispersion maximum D de 3,5 Ps/(km.nm), à  $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$  pour la fibre G652 ou à  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  pour la G653 (fibre à dispersion décalée).

Si la source a une largeur spectrale  $\Delta\lambda$  de l'ordre de 0,5 nm, on obtient le produit (débit binaire) x (longueurs de fibre) :

$$(B.L) \max = (1 \div 2D\Delta\lambda) \approx 570 \text{ Gbit / s} \quad (\text{I.4})$$

Transmission à environ 10 Gbit/s pour des distances de 50 à 100 km entre régénérateurs. [2]

## **I.2.6 Avantages et inconvénients des fibres optiques :**

### **I.2.6.1 Les avantages :**

La fibre optique a plusieurs avantages :

- bande passante importante ;
- immunité électromagnétique ;
- faible taux d'erreur  $10^{-12}$  ;
- faible affaiblissement (0,2 à 0,5 dB/km) ;
- faible encombrement et poids ;
- vitesse de propagation élevée (monomode) ;
- sécurité (absence de rayonnement à l'extérieur et difficulté de se mettre à l'écoute) ;
- légèreté.

Ces caractéristiques font la fibre optique le support le plus privilégié dans le domaine des télécommunications à haut débit et grande distance, dans les applications aéronautiques et navales (sous-marin), et dans les transmissions de données en milieu perturbé. [12]

### **I.2.6.2 Les inconvénients :**

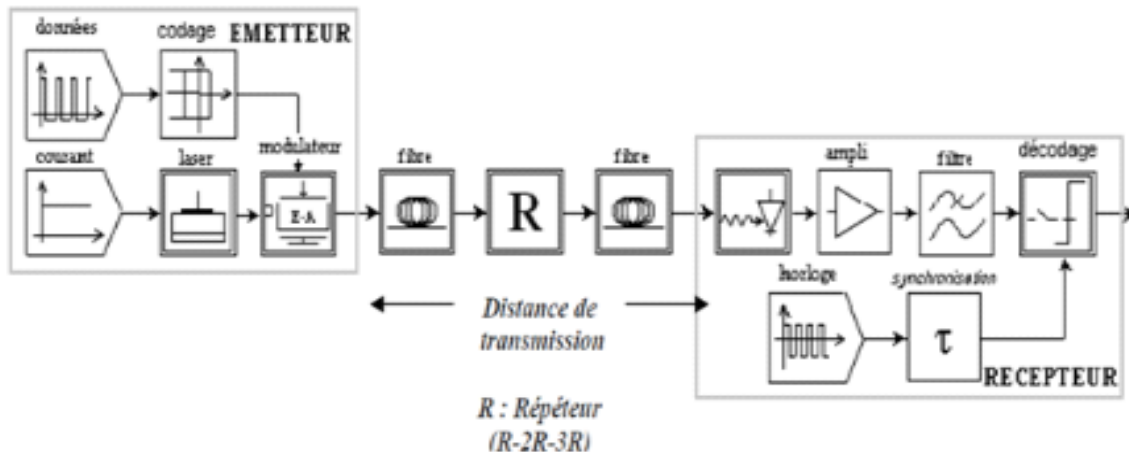
**Puissance faible** : Les sources lumineuses sont limitées à une puissance faible. Donc il faut placer des émetteurs de grande puissance qui améliorent l'approvisionnement, et cela ajouterait un coût supplémentaire.

**Fragilité** : La fibre optique est assez fragile et plus sensible aux dommages que les fils de cuivre. Il est préférable de ne pas tordre ou plier les fibres pour les protéger.

**Distance** : La distance entre l'émetteur et le récepteur doit rester courte, sinon des répéteurs sont nécessaires pour amplifier le signal. [13]

## **I.3 Les systèmes de transmissions optiques :**

Les télécommunications optiques constituent un domaine multidisciplinaire. Elles mettent en jeu des composants et circuits d'émission et de réception, un support de transmission aux propriétés bien particulières et des techniques appropriées de codage, de modulation et de récupération des informations.[14]



**Figure I.10** : chaîne de transmission optique. [35]

Les systèmes de télécommunication optiques mettent en jeu un ensemble d'éléments, commençons par les composants d'émission/réception de la lumière, le support de propagation qui est la fibre optique, les amplificateurs optiques, ainsi que les composants spécifiques pour le multiplexage. À ces fonctions purement optiques et/ou optoélectroniques s'ajoutent des circuits électroniques rapides permettant de moduler et d'amplifier les signaux émis et recueillis, de récupérer les signaux de référence, ainsi que des organes de haut niveau de gestion du réseau. [14]

### I.3.1 Composants d'un système de transmission optique :

Pour la réalisation d'une communication fiable, il est nécessaire que l'ensemble des composants soient compatibles, et que leurs caractéristiques individuelles améliorent, plutôt que ne dégradent pas les caractéristiques du système global. Un outil de simulation de la liaison, prenant en compte l'essentiel des caractéristiques physiques de chacun de ces éléments. [14]

### I.3.1.1 Composants d'émission :

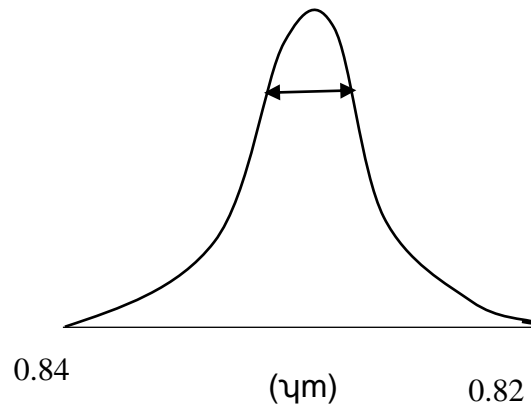
On distingue classiquement les diodes électroluminescentes et les diodes laser.

Pour l'émission de lumière : on a une émission spontanée pour les DEL, et émission stimulée pour les DL. Dans le cas des liaisons haut débit, seules les diodes laser, nettement plus performantes, sont utilisées. [14]

#### I.3.1.1.1 La diode DEL (électroluminescente) :

Les diodes électroluminescentes (DEL) ou LED (Light Emitting Diode) sont des composants émetteurs les plus simples, émet des photons directement par recombinaison porteurs polarisés en direct dans une hétérojonction.

Ce sont des sources lumineuses incohérentes et polychromatiques qui présentent un spectre d'émission et un diagramme de rayonnement assez large et moins directionnel. Pour une utilisation dans les systèmes, la transmission ne nécessite pas une très grande bande passante. Elle a un spectre d'émission typique spontanée, continue et assez large, donc grande sensibilité à la dispersion chromatique. [4]

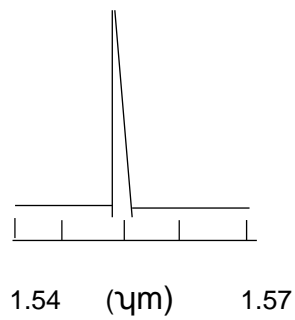


**Figure I. 21** : Spectre d'émission d'une DEL.

#### I.3.1.1.2 La diode laser (DL):

Le laser est une amplification de la lumière par émission stimulée de Radiation (en anglais Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Une diode laser est une source de lumière monochromatique cohérente utilisée dans les systèmes Transmission sur de longues distances, elle se caractérise par : une faible largeur spectrale et bande passante importante. Le spectre est monomode longitudinal. [4]

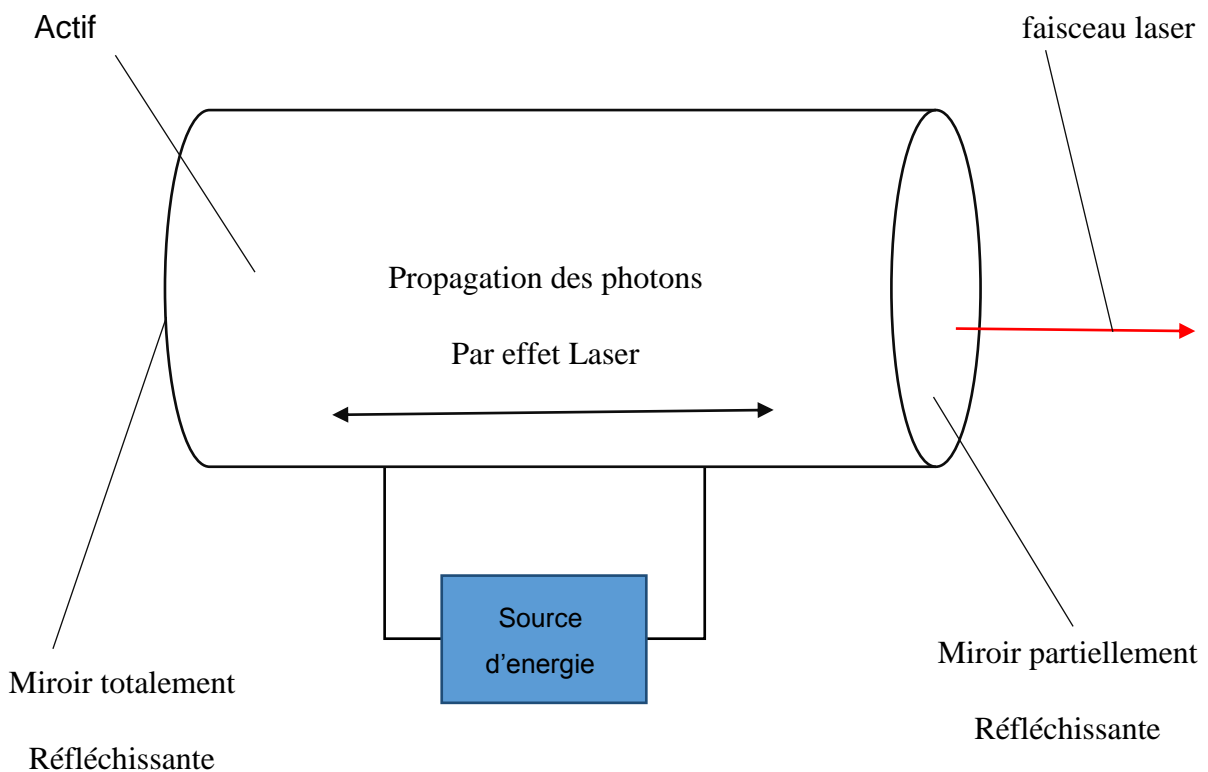


**Figure I.32 :** Spectre d'émission d'une DL.

La diode laser est composée de trois éléments essentiels (voir figure I.13) :

- Le milieu est actif.
- La pompe : c'est une source énergétique réalise l'inversion de population.
- La cavité : est limitée par deux surfaces, l'une réfléchissante presque à 100%, l'autre à 98% de façon à laisser sortir le faisceau laser. [4]

Matériau optique



**Figure I.13 :** Schémas de principe de laser.

Les diodes laser ont les propriétés suivantes :

- Les sources DL sont cohérentes et monochromatiques ;
- Largeur spectrale étroite, bande passante jusqu'à plusieurs gigahertz ;
- Diagramme de rayonnement directionnel (même direction d'émission) ;
- Pour les systèmes de transmission longue distance ;
- La densité de courant de seuil est d'environ une dizaine de mA. [4]

### **I.3.1.2 Composants de réception :**

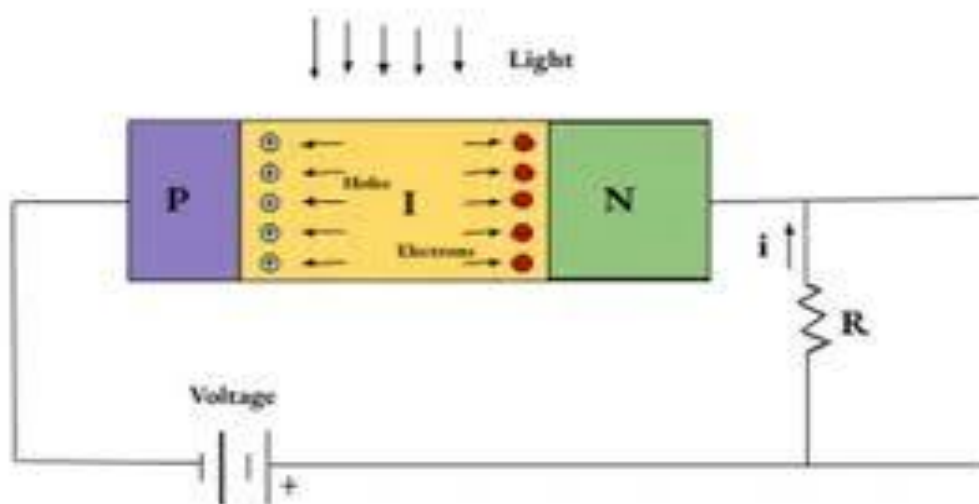
Pour la réception, on va transformer le signal lumineux reçus en signal électrique.

Les récepteurs sont :

- les photodiodes PIN, les plus utilisées car elles sont peu coûteuses et simples à utiliser avec une performance satisfaisante.
- les photodiodes à avalanche qui sont utilisés pour détecter des puissances optiques très faibles. [5]

#### **I.3.1.2.1 Photodiode PIN :**

En anglais (Positive Intrinsèque Négative Photodiode). Cette photodiode, polarisée en inverse, est Composé de trois couches de semi-conducteurs. Deux couches de P+ fortement dopé, et il y a une couche de haute résistivité (presque intrinsèque) entre N+ (voir la figure I.14), dont il y a très Petites charges mobiles.

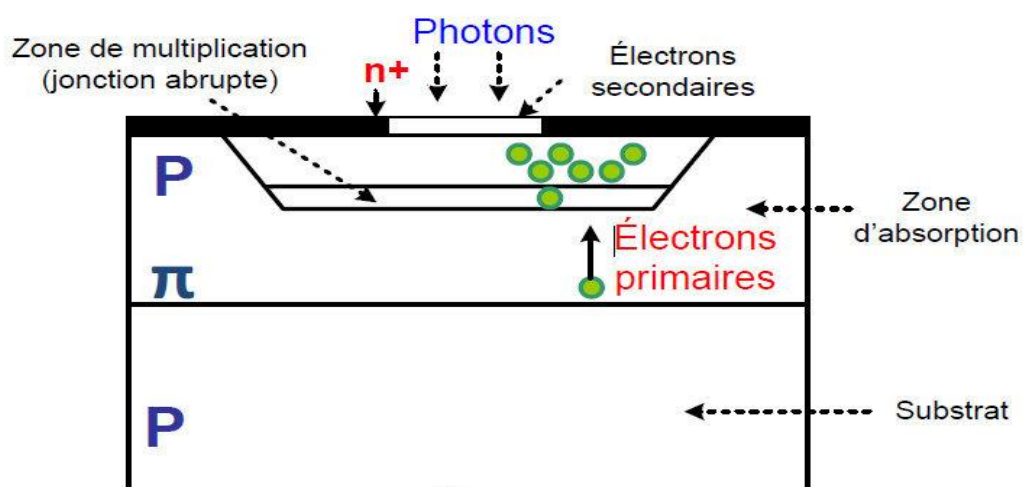


**Figure I.14:** Photodiode PIN. [36]

Les photodiodes PIN sont les plus couramment utilisées car elles sont peu coûteuses, faciles à utiliser et ont des performances satisfaisantes. [4]

### I.3.1.2.2 Photodiode APD (Avalanche Photo Diode) :

Lorsque la puissance optique reçue est faible, le courant détecté est faible et se superpose au courant d'obscurité, ce qui entraîne un mauvais rapport signal sur bruit. Pour augmenter ce dernier, il est nécessaire d'augmenter le courant détecté en utilisant d'autres types de photodiodes, telles que des photodiodes à gain interne de type avalanche. Une photodiode à avalanche est une diode PIN dans laquelle on effectue une amplification de puissance, ce qui permet d'extraire des signaux électriques forts même pour de faibles puissances optiques.



**Figure I.15 :** Structure d'une photodiode à avalanche APD. [37]



Les photodiodes à avalanche sont également utilisées pour leurs performances, leur gain élevé et leur réponse rapide, mais elles sont plus chères, difficiles à utiliser et nécessitent une polarisation inverse forte. [4]

Dans les communications optiques, les détecteurs doivent :

- Fournit un bon couplage à la fibre.
- Haute sensibilité à la longueur d'onde de fonctionnement.
- La bande passante est suffisante.
- A des exigences de tension de source faible.
- Les conditions externes n'ont aucun effet sur les caractéristiques.
- Haute fiabilité (bonne efficacité quantique) et faible coût.
- A un temps de réponse très court et un faible bruit additif [4]

### **I.3.1.3 Le support de transmission :**

On trouve deux grands types de fibres optiques : les monomodes (ou unimodales) et les multimodes (ou multimodales). Pour distinguer ces deux types de guide, on introduit le paramètre  $V$ , appelé fréquence normalisée défini par :

$$v = (2\pi \div \lambda)ON \quad (I.5)$$

Avec  $\lambda$  longueur d'onde du rayonnement.

La fibre est monomode lorsque  $V < 2,405$ ; au-delà, le nombre de modes de propagation est approximativement  $V^2/2$ . Il faut savoir que de nos jours la quasi-totalité des transmissions sur fibres optiques s'effectuent sur guides monomodes, du fait de leurs incomparables caractéristiques (portées chiffrées en dizaines de kilomètres, débits de plusieurs dizaines de Gbits...). [8]

### **I.3.1.4 Amplificateurs optiques :**

L'amplificateur optique est un dispositif qui assure l'amplification du signal tout en restant dans le domaine optique. [15]

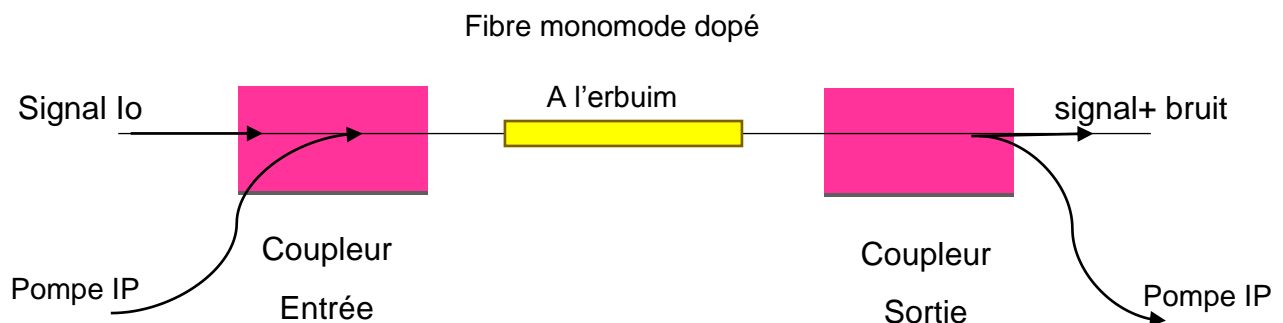
Ils sont destinés à amplifier les signaux optiques sans recourir de le convertir d'abord en signal électrique avant de l'amplifier avec les techniques classiques de l'électronique. [14]

On distingue deux types d'amplificateurs optiques :

### I.3.1.4.1 Amplification EDFA :

La fibre optique est dopée en ion Erbium sur une certaine distance. Un signal pompe d'une des longueurs spécifiques à l'excitation des ions erbium va être introduit dans la fibre à l'aide d'un coupleur. Lorsque que ce signal est en contact avec les ions, une énergie photonique va être dégagée. L'avantage de cet amplificateur est que l'énergie dégagée par cette réaction chimique va amplifier tous les canaux qui constituent la fibre.

Afin de ne pas polluer la transmission d'information dans la fibre, le signal pompe est retiré de la fibre. [9]



**Figure I.46 :** Principe de l'amplificateur optique.

### I.3.1.4.2 Amplification Raman :

L'amplification Raman repose légèrement sur le même principe de fonctionnement que son homologue à l'Erbium. L'amplification se fait par une réaction physique et par un échange d'énergie entre le rayon lumineux et le milieu de propagation du signal (Le silice). [9]

On utilise des amplificateurs optiques dans les liaisons à longue distance, ils remplacent les plus anciens régénérateurs opto-électriques afin de créer des liaisons transparentes. [20]

## I.3.2 Techniques de multiplexage :

C'est une technique ou l'opération de grouper les informations de plusieurs sources afin de les transmettre sur le même support physique sans qu'elles se mélangent mutuellement. À la réception, une opération inverse, un démultiplexage doit nous permettre de reproduire

chacune des sources et de l'acheminer à sa destination. [16]A l'aide de ce simple principe, de larges économies sont possibles grâce à la réduction des coûts d'installation et/ou d'exploitation (Moins de câbles pour faire passer la même quantité d'information). [17]

Dans les systèmes de transmission optique; trois principales techniques d'accès multiples sont utilisées :

### I.3.2.1 Le multiplexage en longueur(WDM) :

Le WDM (Wavelength Division Multiplexing) est la technologie la plus utilisée dans les réseaux optiques actuels. C'est une technique permis de transporter 10 Gbit/s ( $4 \times 2,5$  Gbit/s) sur une seule fibre optique.

Le principe de cette technique de multiplexage consiste à moduler en parallèle plusieurs sources laser émettant à différentes longueurs d'onde plus ou moins rapprochées, et à les faire propager simultanément dans la fibre optique. La modulation d'une onde se fait d'une façon classique. Les ondes sont ensuite multiplexées par des systèmes optiques passifs. Au niveau du récepteur, les canaux sont démultiplexés au moyen de composants similaires, et chacun est détecté indépendamment des autres. [7]

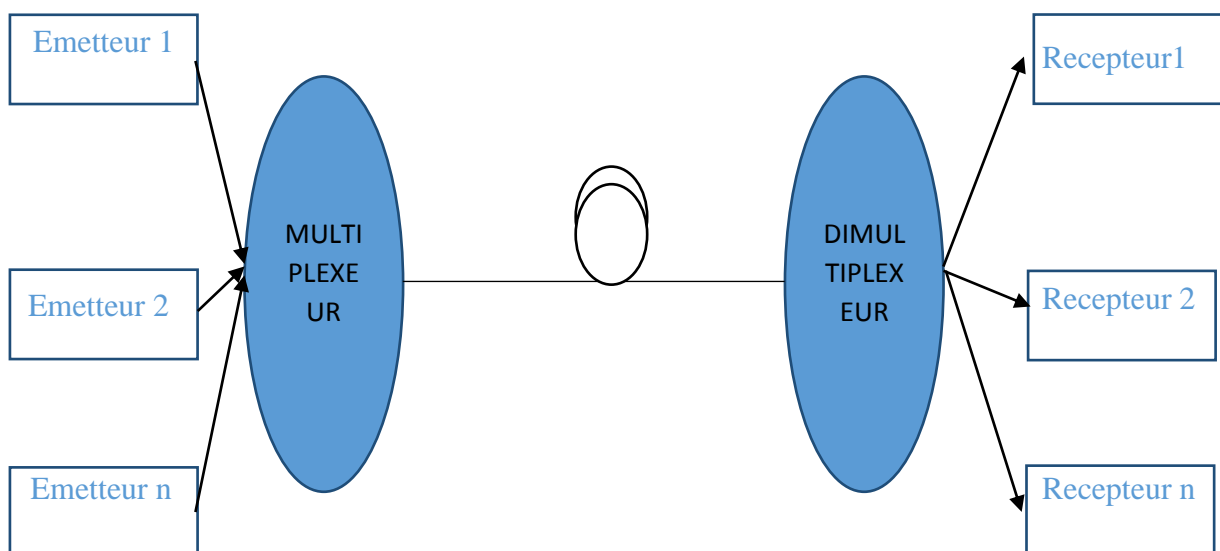


Figure I.57 : Concept de base du WDM. [38]

Les signaux peuvent être à des longueurs d'onde différentes, peuvent être cadencés à des débits binaires différents ou peuvent correspondre à des formats de codage différents, sans

que cela ne pose aucun problème, dans la mesure où les signaux n'interagissent pas entre eux. [14]

### I.3.2.2 Le multiplexage en temps (TDMA) :

Le TDMA (Time Division Multiplexing Access) permet à tous les émetteurs ou sources d'information de transmettre périodiquement sur le support. [16]

Le TDMA consiste à partager les ressources de la fibre optique en les allouant de façon temporaire à chaque utilisateur. Les utilisateurs ne peuvent pas accéder aux ressources simultanément, mais uniquement durant les intervalles temporels définissant le canal qui leur est alloué. A la réception, un démultiplexage temporel est effectué permettant de récupérer les données de chaque utilisateur suivant les intervalles temporels du canal correspondant. [1]

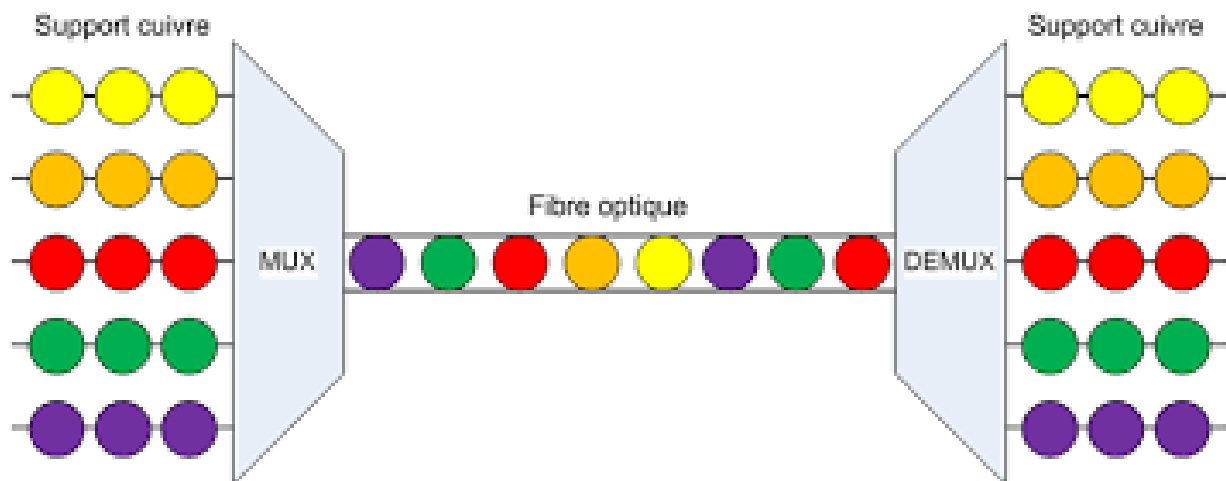


Figure I.68 : Multiplexage en temps TDM. [39]

### I.3.2.3 Le multiplexage par répartition de code (OCDM) :

La troisième technique de multiplexage est le CDMA (Code Division Multiple Access), on dit aussi l'Accès Multiple à Répartition par Code (AMRC). Cette technique permettant la transmission des données des utilisateurs sur la même bande de fréquence et en même temps. A la réception, les différents signaux sont distingués grâce à des codes distincts associés à chacun des utilisateurs. Le CDM permet d'étaler spectralement le signal transmis sur une bande N fois plus large que celle du signal initial, N étant la longueur du code.

Elle a été utilisée initialement dans le domaine de la radiofréquence, l'adaptation du CDMA à l'optique OCDMA a été étudiée à partir de 1986. L'implémentation du CDMA optique est totalement différente du CDMA radio. Cette différence est due

principalement à la différence entre les deux milieux de propagation.

Le multiplexage OCDMA a pour avantage de permettre un accès multiple asynchrone, ainsi qu'un partage de ressources flexible sans gestion de temps ni de fréquence. Cette technique peut être réalisée tout-optiquement grâce à des dispositifs de codage/décodage optiques. [1]

Le principe de base est celui de l'étalement de spectre. Le multiplexage par répartition de codes ne nécessite ni une allocation fixe, ni un séquençement strict [19]; cette technique nécessite un niveau de synchronisation élevée, ce qui augmente la complexité du système et par conséquent le coût et qui fait qu'elle n'a pas été retenue par les opérateurs à ce jour. [16]

### **I.4 Conclusion :**

La fibre optique fournit une connexion Internet rapide, constante et stable qui permet de transmettre beaucoup de données sur des distances incroyables. Comme les demandes de données deviennent énormes, le câblage en fibre optique est la solution la plus sûre pour assurer la flexibilité et la stabilité du réseau. [13]



## **CHAPITRE II**

### **Réseau d'Accès PON**

## **II.1 Introduction :**

Comparée aux autres supports de transmission existants, la fibre présente une atténuation quasiment constante sur une énorme plage de fréquences (plusieurs milliers de gigahertz) et offre ainsi l'avantage de bandes passantes gigantesques, permettant d'envisager aujourd'hui la transmission de débits numériques très importants (plusieurs téra-bit/seconde) exigés par la multiplication des services et les besoins accrus de transmission d'images. Très vite également, il est apparu que les systèmes optiques permettaient, par rapport aux systèmes sur câble coaxial de capacité équivalente, un gain notable sur la distance entre répéteurs-régénérateurs, qui passait de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres. À partir de 1978 furent installés des systèmes travaillant à la longueur d'onde optique de 0,8  $\mu\text{m}$ , acheminant un débit compris entre 50 et 100 Mbit/s, avec un espacement entre répéteurs de 10 km, c'est-à-dire trois fois plus environ que les systèmes sur câble coaxial de capacité équivalente. [23]

## **II.2 Les réseaux d'accès :**

### **II.2.1 Le réseau local (LAN) :**

Il est également appelé réseau de distribution ou d'accès. C'est la dernière partie de réseau de télécommunication, le réseau reliant l'utilisateur au dernier PABX. Il a des longueurs variant de 2 à 50 km, avec des capacités au plus du même ordre de grandeur que celle du réseau métropolitain.

### **II.2.2 Le réseau métropolitain (MAN) :**

Le réseau MAN (Métropolitain Area Network), appelé aussi le réseau intermédiaire, il connaît en ce moment un véritable essor. Déployé entre le dernier autocommutateur à autonomie d'acheminement réseau longue distance et une zone plus précise (arrondissement, campus, petite ville, ...), il possède un environnement souvent très complexe et divers.

La structure des réseaux MAN est généralement constituée d'anneaux de 80 à 150 km de circonférence avec six à huit nœuds. Ainsi, les réseaux métropolitains d'accès sont des anneaux de 10 à 40 km de circonférence dotés de trois ou quatre nœuds avec des embranchements vers des sites distants. [21]

### **II.2.3 Le réseau long distance (WAN) :**

Réseau WAN (Wide Area Network) ; parfois également appelée réseau structurant, il représente la couche supérieure du réseau de télécommunications. Elle est comprise entre deux autocommutateurs à autonomie d'acheminement, qui ont pour rôle d'aiguiller les informations d'une région à une autre, de la zone de l'expéditeur vers celle du destinataire. La transmission de ces informations se fait désormais sur fibre optique à une longueur d'onde de  $1,55\mu\text{m}$  et à un débit élevé qui ne cesse de s'accroître (les débits 2,5Gbits/s et 10Gbits/s sont déjà installés et le 40Gbits/s le sera très prochainement). [04]

### **II.3 Les réseaux d'accès optiques :**

Les réseaux d'accès optiques consistent généralement en un segment de fibre optique avec une partie du conducteur métallique connectée au terminal utilisateur.

Le réseau permet aux applications vocales d'accéder au réseau téléphonique public, Parce qu'il permet d'accéder aux applications de transfert de données (voix et vidéo) grâce à l'utilisation de la technologie numérique. [24]

Le rôle principal d'un réseau d'accès est de collecter les signaux émis par les abonnés aux divers services de télécommunication et d'assurer leur acheminement vers un centre local où s'effectue leur aiguillage vers le réseau de service adéquat. [23]

Plusieurs techniques pour raccorder les abonnés à la fibre optique sont définies ; appelées aussi FTTx. Selon la localisation de la terminaison de réseau optique, on cite les techniques les plus répandues :

#### **II.3.1 Fibre jusqu'à sous-répartiteur (FTTN) :**

Le FTTN (Fiber To The Node), correspond à une installation dans laquelle la fibre arrive à un point de distribution (sous-répartiteur) desservant un ensemble de bâtiments. [25]



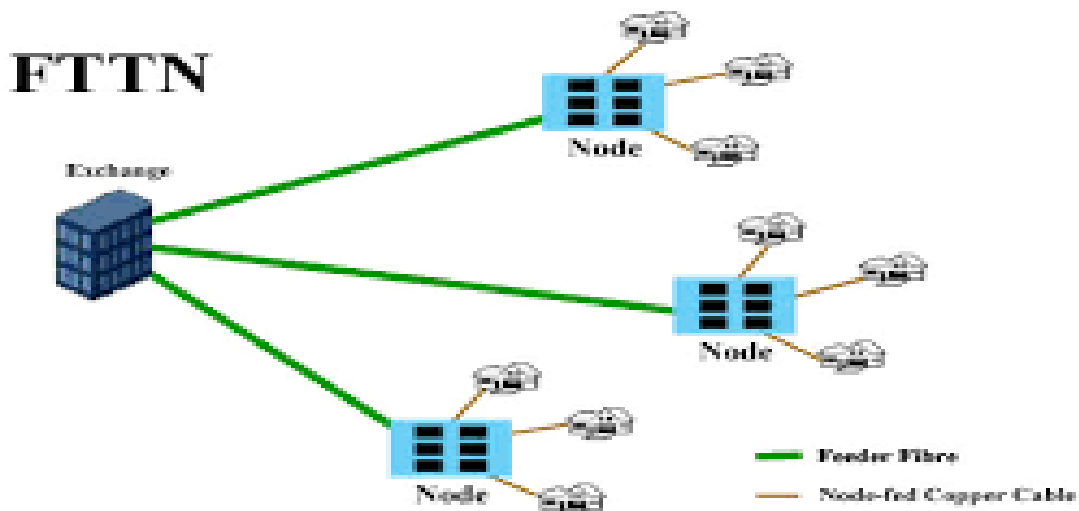


Figure II.01 : Structure d'un réseau FTTN. [40]

### II.3.2 Fibre jusqu'au trottoir (FTTC) :

La « Fibre jusqu'au trottoir » (Fiber to the curb, FTTC) est une expression qui peut être trompeuse, car le terme « curb » (trottoir) est utilisé pour décrire un boîtier ou un poteau sur lequel l'équipement réseau est installé.

La « Fibre jusqu'au trottoir » est une option similaire au FTTN, à ceci près qu'un nombre plus réduit de clients est desservi à partir de chaque emplacement et que les distances coaxiales sont généralement beaucoup plus courtes. Cette configuration est utile, car elle se rapproche du lien fibre optique direct sans pour autant exiger une connexion optique au sein du périmètre de la propriété. [26]

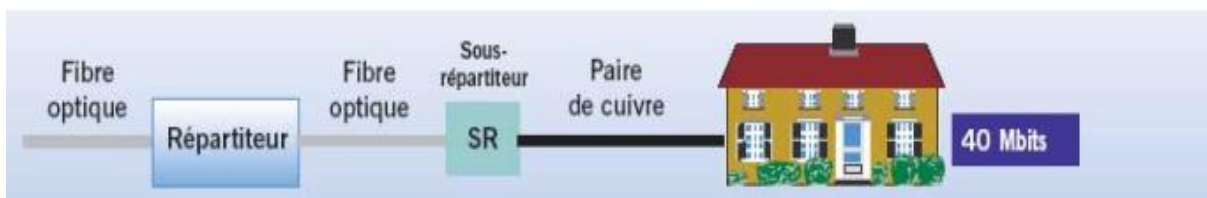
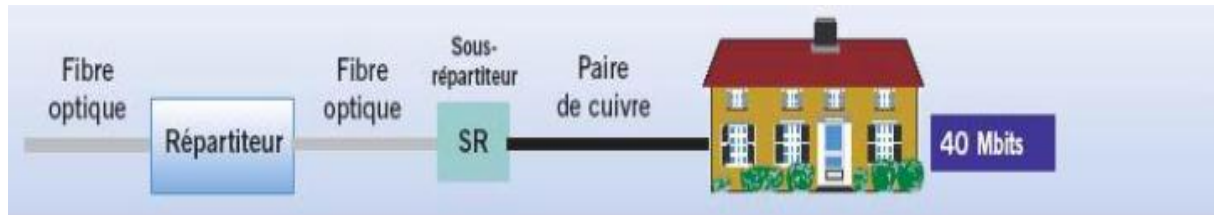


Figure II.02 : Structure d'un réseau FTTC. [24]

### II.3.3 Fibre jusqu'à domicile (FTTH):

La fibre à l'abonné (FTTH) crée une connexion optique directe jusqu'au point de raccordement du particulier, offrant ainsi la bande passante la plus élevée possible à ce type

d'abonnés. Comme cette option peut aussi être chère à installer, elle est plus courante dans les zones de nouvelle construction. L'un des inconvénients potentiels du FTTH est l'emplacement de la ligne d'alimentation électrique. L'alimentation électrique ne pouvant pas être fournie par le biais de câbles de fibre optique, ces déploiements peuvent exiger l'installation de lignes électriques totalement distinctes. Malgré ces défis, le FTTH est devenu l'une des applications les plus populaires au monde. [26]



**Figure II.03 :** Structure d'un réseau FTTH. [24]

Les réseaux de « Fibre au bâtiment » (Fiber to the building, FTTB) sont semblables aux réseaux FTTH, à ceci près que la terminaison optique se trouve dans un lieu autre qu'un domicile privé. Le « B » de FTTB peut également signifier « business » (entreprise) ou « basement » (sous-sol). [26]

### II.4 Architectures FTTH :

La fibre est déployée de bout en bout du réseau jusqu'au domicile. . C'est la technologie la plus intéressante au monde ; Débit pour les abonnés (non partagé) et sécurité du transport (de Différents utilisateurs sont séparés), mais plus coûteux en termes de coût de déploiement.

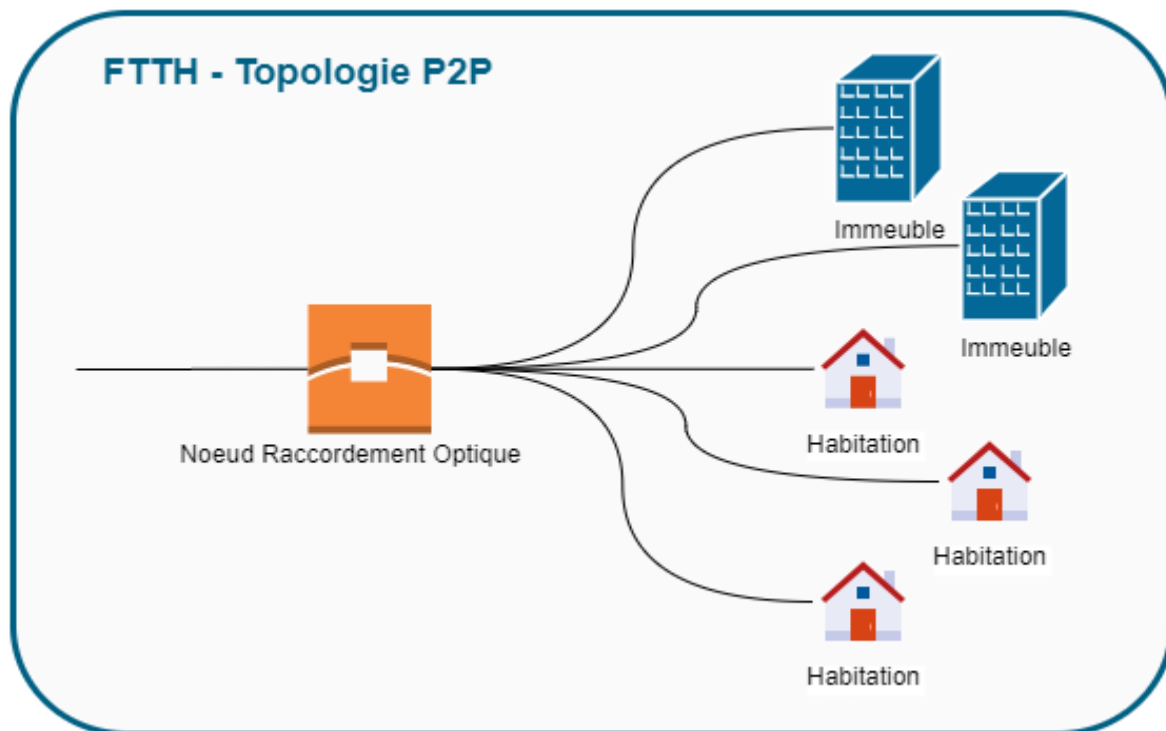
Il existe deux types de topologies physiques peuvent acheminer la fibre jusqu'aux clients finaux :

- ❖ Architecture active, également appelée peer-to-peer (P2P).
- ❖ Les architectures passives sont souvent appelées point à multipoint (PON). [24]

#### II.4.1 Architecture point à point :

Dans cette architecture, comme son nom le laisse supposer, chaque abonné est raccordé au répartiteur optique du réseau le plus proche, avec une fibre dédiée (point à point). Ce modèle est identique à celui de la boucle locale téléphonique actuelle. Cette architecture

permet une étanchéité absolue entre les lignes des différents abonnés : aucun risque de sécurité, et garantie absolue de disponibilité totale de la ligne (aucun partage de débit). [27]



**Figure II.04 :** Architecture P2P. [41]

Cette architecture est la plus facile à mettre en œuvre. La topologie physique d'un réseau d'accès optique, qui consiste en un lien physique en fibre qui est directement lié entre le commutateur et l'utilisateur. Il est principalement lié à une technologie de hiérarchie numérique synchrone (SDH/SONET) et technologies xDSL (ADSL, HDSL, VDSL, etc.).[24]

#### **Les avantages de la P2P :**

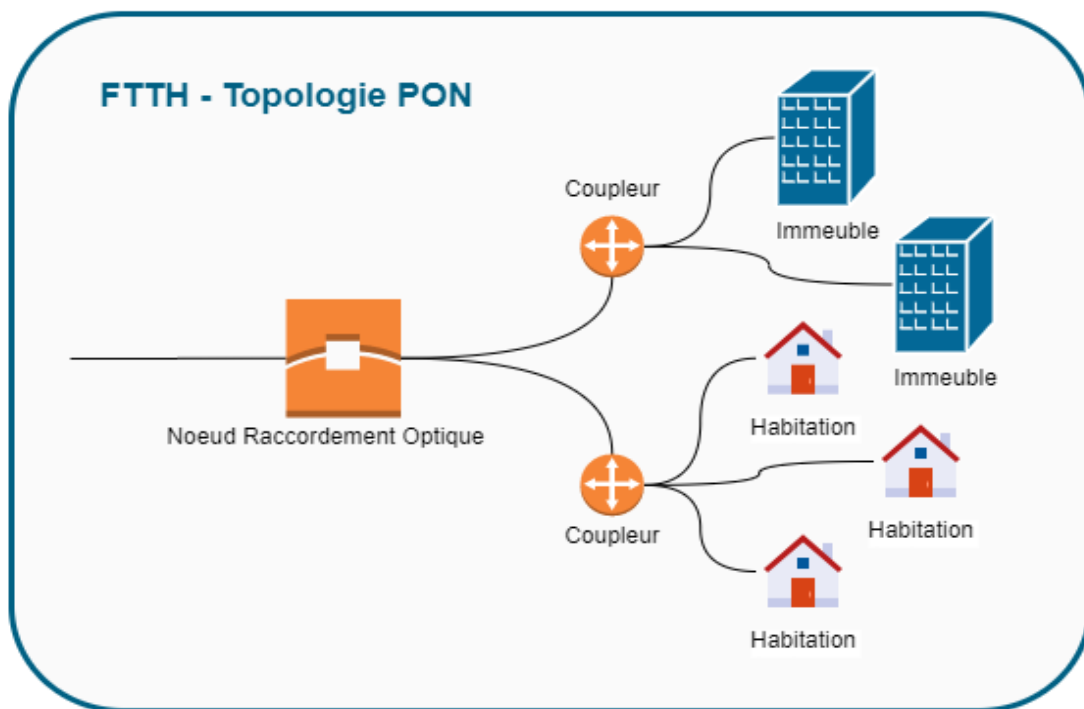
- ✓ Solution universelle pour les clients résidentiels et commerciaux.
- ✓ Meilleur budget optique car il n'y a pas d'optique entre OLT et ONT.
- ✓ La sécurité des données est garantie car une ou deux fibres sont dédiées par client.
- ✓ La gestion du réseau est très simple.
- ✓ Bande passante illimitée.
- ✓ Plus économique dans les zones d'utilisateurs à faible densité.
- ✓ Une plus grande flexibilité de service.

**Les inconvénients :**

- ✓ Gestion de la fibre au niveau central (gestion TxRx).
- ✓ Aucune agrégation de fibres.
- ✓ Confusion au sein de l'échange en raison du grand nombre de transcriptions.
- ✓ Ne partagent pas les ports OLT ou optiques, déployez de nombreuses fibres (pas très économique). [24]

**II.4.2 Architecture point à multipoint :**

L'architecture point à multipoint a été sélectionnée en tant qu'architecture PON la plus viable pour les réseaux d'accès optique, car elle associe l'efficacité inhérente au partage de la fibre optique à une faible consommation d'énergie. [26]



**Figure II.05 :** Architecture point à multipoint. [42]

Dans ces architectures, une fibre unique part du central optique (dans le réseau) et dessert plusieurs habitations, lesquelles sont raccordées à cette fibre au niveau d'un équipement passif (coupleur ou splitter) placé à proximité de la zone à desservir. Chaque site reçoit toutes les informations envoyées par l'équipement central (OLT: Optical Link Terminal);l'équipement récepteur (ONT: Optical Network Terminal) de chaque abonné assure le filtrage. Ces

architectures permettent des économies sur la quantité de fibres à poser et donc sur le dimensionnement des infrastructures d'accueil (OLT). [27]

### ❖ **Avantages et inconvénients des architectures P2MP :**

#### **Avantage :**

- Architectures passives ne nécessitant pas d'élément actif dans le réseau optique entre le nœud optique et l'abonné (simplicité de gestion et de maintenance)
- Les coupleurs passifs sont très peu encombrants et ne nécessitent pas de maintenance (positionnement possible dans une chambre souterraine ou armoire de rue),
- Réduction du nombre de fibres utilisées pour desservir les abonnés  
Optimisation de la place utilisée dans les locaux (moins d'équipements actifs),  
Optimisation des fourreaux (moins de fibre à passer).

#### **Inconvénients:**

- L'évolutivité du réseau est moins importante que dans le cadre d'une infrastructure P2P,
- Le partage de l'infrastructure entre plusieurs fournisseurs d'accès est contraignant : un seul opérateur (exploitant) pourra gérer les équipements actifs et le transport des données entre le nœud optique et l'abonné, les autres opérateurs étant alors dépendants des choix technologiques de l'opérateur ayant déployé l'infrastructure (ce qui est contraire à la stratégie générale de l'opérateur Free). [27]

### **II.4.3 Tableau comparatif :**

Le tableau suivant présente une comparaison entre les deux architectures P2P et P2MP :

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

**Tableau II.01** : Tableau comparatif entre les architectures P2P et P2MP. [30]

## **II.5 Les réseaux Optique Passifs (PON) :**

### **II.5.1 Définition :**

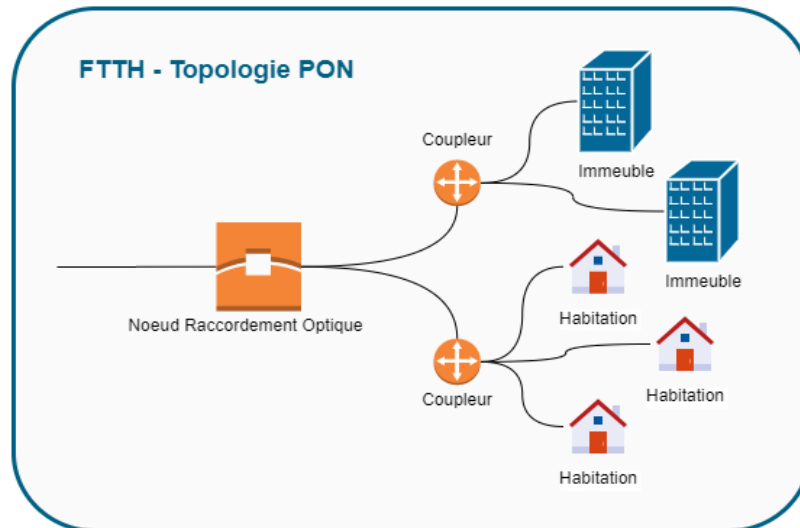
Un réseau optique passif (PON) est un réseau de fibre optique utilisant une topologie point à multipoint et des coupleurs optiques pour générer des données à partir d'un point de transmission unique vers de multiples terminaisons d'utilisateurs. Le terme « passif », dans ce contexte, fait référence au fait que la fibre et des composants de couplage/combinaison ne sont pas alimentés. [26]

Les réseaux PON ont fait l'objet de procédures de normalisation au niveau international par les principaux organismes de normalisation : l'ITU (International Telecommunication Union) et le FSAN (Full Service Access Network), l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). [28]

### **II.5.2 Topologie des réseaux PON :**

Les réseaux PON adoptent une architecture point à multipoint (P2MP) qui utilise des coupleurs optiques pour diviser le signal descendant d'un OLT unique en de multiples voies descendantes vers les utilisateurs finaux. Ces mêmes coupleurs combinent les multiples voies de signaux ascendants depuis les utilisateurs finaux jusqu'au même OLT.

L'architecture point à multipoint a été sélectionnée en tant qu'architecture PON la plus viable pour les réseaux d'accès optique, car elle associe l'efficacité inhérente au partage de la fibre optique à une faible consommation d'énergie. Cette architecture a été standardisée en 1998 par la norme ATM-PON G.983.1. [26]



**Figure II.06 :** Architecture point à multipoint. [43]

Cette architecture permet des économies sur la quantité de fibres à poser et donc sur le dimensionnement des infrastructures d'accueil(OLT).

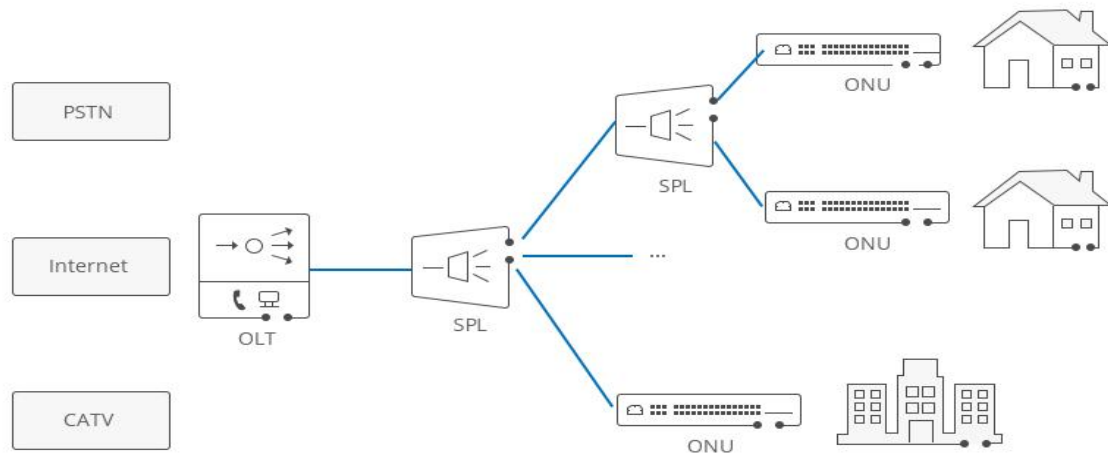
Les principaux inconvénients sont le partage du débit et la nécessité de chiffrer les connexions des abonnés (qui utilisent la même fibre). [27]

### **II.5.3 Composants et appareils pour réseaux optiques passifs :**

Un réseau PON débute par le terminal de ligne optique (OLT) qui est placé sur le site source du fournisseur de service, généralement connu sous le nom de Bureau central ou local, ou parfois appelé « point d'échange » ou « tête de réseau ». À partir de là, le câble d'alimentation de la fibre optique (ou système d'alimentation à fibre optique) est acheminé vers un coupleur passif, avec une fibre de secours le cas échéant. Les fibres optiques de distribution sont ensuite connectées du coupleur à un terminal de chute, lequel peut être situé dans une armoire extérieure ou dans un solide boîtier monté dans un fossé, sur un poteau téléphonique ou même sur le côté d'un bâtiment. Les fibres de chute fournissent ensuite la connexion finale individuelle depuis le port de terminal de chute jusqu'à l'ONT/ONU de l'utilisateur final. Dans certains cas, plusieurs coupleurs en série sont utilisés. On parle alors d'architecture de coupleur en cascade. [26]



Un réseau PON, comporte un nœud de raccordement optique (NRO), sur lequel sont connectées des sources multiples de services (vidéo, Internet et téléphonie classique). Ce NRO est lui-même interconnecté, via la fibre optique, aux utilisateurs finals. [28]



**Figure II.07 :** Composants d'un réseau PON. [44]

### II.5.3.1 Le terminal de ligne optique (OLT) :

Le terminal de ligne optique (Optical Line Terminal, OLT) constitue le point de départ de tout réseau optique passif. Il est connecté à un commutateur central via des connecteurs Ethernet enfichables. La fonction première de l'OLT est de convertir, d'encadrer et de transmettre des signaux pour le réseau PON, puis de coordonner le multiplexage du terminal de réseau optique (Optical Network Terminal, ONT) pour la transmission ascendante partagée. Les appareils de l'utilisateur final sont parfois qualifiés d'unités de réseau optique (Optical Network Unit, ONU).

Il s'agit d'une simple différence de terminologie entre les deux principaux organismes de normalisation : ONT pour l'ITU-T et ONU pour l'IEEE. Ces deux termes sont, dans les faits, interchangeables, mais on utilise l'un ou l'autre en fonction du service PON et de la norme utilisée. [26]

### II.5.3.2 le terminal de réseau optique (ONT) :

L'ONT est un appareil, installés chez les utilisateurs finals duréseau et qui assurent la connexion avec les terminaux del'utilisateur, sur les interfaces spécifiques de ces derniers (RJ45cuivre pour le PC sur Internet, connecteur coaxial pour latélévision, RJ11 cuivre pour le téléphone analogique, ...). [28]

### **II.5.3.3 Coupleur optique (splitter) :**

Le splitter est un composant passif, installés sur le cheminement de la fibre optique entre l'OLT et les ONU. Ils ont pour rôle de partager le signal optique pour la voie dite descendante (de l'OLT vers les ONUs) et de recomposer le signal à partir des multiples signaux remontants dans l'autre sens (des ONUs vers l'OLT).

## **III.6 Types de services PON :**

Depuis son lancement dans les années 1990, la technologie PON n'a cessé d'évoluer et de nombreuses versions de la topologie des réseaux PON ont pris forme. Les normes PON d'origine, APON et BPON, ont petit à petit laissé la place à la bande passante et aux avantages globaux, en termes de performance, des versions plus récentes. [26]

### **III.6.1 La norme APON :**

C'est la première norme apparue suite aux travaux démarrés en 1995 dans l'initiative du groupe FSAN (Full Service Access Network) regroupant 21 opérateurs majeurs. L'ATM (Asynchronous Transfer Method) est un protocole de transport, apparu au début des années 1990, gérant le transport de la voix, de la vidéo aussi bien que celle des données en garantissant une qualité de service. Les performances de l'ATM sont très évolutives. Ces performances sont obtenues grâce à la taille très réduite des cellules transmises : tout le trafic est divisé en trames de 53 octets (48 octets de données plus cinq d'entête), que l'on peut traiter avec des commutateurs très rapide. [29]

### **III.6.2 La norme BPON :**

Le BPON (Broad PON) est l'extension de l'APON en vue de fournir d'autres services, tels que l'Ethernet et la diffusion de la vidéo (Broadcast vidéo). C'est un réseau de distribution en fibre optique en large bande. [26]

Les caractéristiques des réseaux BPON sont:

- ✓ Utilise le multiplexage WDMA pour le sens descendant,
- ✓ Utilise le multiplexage TDMA pour le sens montant,
- ✓ BPON est l'extension de l'APON avec l'intégration d'autres services tels que l'Ethernet et la diffusion de la vidéo,
- ✓ Un système BPON peut relier jusqu'à 32 abonnés au réseau PON,

- ✓ La voix et les données utilisent 1490nm et 1310nm pour le sens descendant et le sens montant respectivement,
- ✓ Pour le transport de la vidéo numérique dans le sens descendant, la longueur d'onde 1550nm peut être utilisée.
- ✓ Distance OLT-ONU ne dépasse pas 20km.

### **III.6.3 La norme EPON :**

Ethernet (connu aussi sous le nom de norme IEEE 802.3) est une technologie de réseau local basé sur le principe que tous les utilisateurs d'un réseau Ethernet sont reliés à une même ligne de transmission et la communication se fait à l'aide d'un protocole appelé CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect) ce qui signifie qu'il s'agit d'un protocole d'accès multiple avec surveillance de porteuse et de détection de collision. [29]

EPON est basé sur la technologie Ethernet PON, combine les avantages de la technologie PON et de la technologie Ethernet, adopte une structure point à multipoint, une transmission passive par fibre optique et fournit divers services via Ethernet.

### **III.6.4 La norme GPON :**

La norme GPON (réseau optique passif compatible Gigabit) est un protocole de 2ème génération des PON édité par l'ITU-T comme norme de recommandation G.984. Le GPON ouvre les débits symétriques ou asymétriques jusqu'à 2.5 Gbits/s et optimise la mise en œuvre des services sur FTTH, avec des normes G.984.1 (caractéristiques générales du Giga PON), G.984.2 (couche physique PMD) et G.984.5 (couche de transmission). Le taux de couplage peut atteindre 64 et 128 abonnés et la sécurité met en usage dans le sens descendant une clé à 128 bits. [29]

### **III.6.5 La norme XGPON :**

Le standard XG-PON est caractérisé par un débit descendant de 10 Gbit/s et un débit montant de 2,5 Gbit/s. Le plan d'allocation en longueur d'onde de ces transmissions a également été défini : les signaux descendants devront être émis en 1575 et 1580 nm et les signaux montants entre 1260 et 1280nm.

### **III.6.6 La norme NG-PON2 :**

Le NG-PON2 est normalisé par l'UIT en 2014 et 2016 (G.989.1 et G.989.2), il permet un débit de 40 Gbit/s (voir jusqu'à 80 Gbit/s) dans le sens descendant et 10 Gbit/s dans le sens montant. Il possède 3 types de débit canal : basic : 10/2.5 Gbit/s ou optionnel 10/10 Gbit/s et 2.5/2.5 Gbit/s. NG-PON2 est basé sur les technologies TDM-PON et WDM-PON (attribution de longueur d'onde aux utilisateurs). [30]

### **III.6.7 Tableau récapitulatif :**

Le tableau suivant résume les différentes caractéristiques des différentes normes des réseaux PON en termes de débit, protocole, débit descendant et montant, taux de partage, taille de la trame, et la distance ONT /OLT.

	<b>APON</b>	<b>BPON</b>	<b>EPON</b>	<b>GPON</b>
<b>Norme</b>	ITU-T G.983	ITU-T G.983	CSMA/CD	G.984
<b>Protocole</b>	ATM	ATM	CSMA/CD	GFP
<b>Debit descendant</b>	622Mb/s ou 155Mb/s	155Mb/s ou 622Mb/s	1.25Gb/s	1.25 Gb/s ou 2.5Gb/s
<b>Debit montant</b>	155Mb/s	155Mb/s Ou 622Mb/s	1.25 Gb/s	155Mb/s Ou 622Mb/s Ou 1.25 Gb/s Ou 2.5Gb/s
<b>Taux de partage</b>	16,32	16,32	16,32,64	16,32,64, 128
<b>Taille de la trame (octets)</b>	53	53	1.518	65.535
<b>Distance OLT/ONT</b>	10 ou 20 Km	10 ou 20Km	20Km	20Km

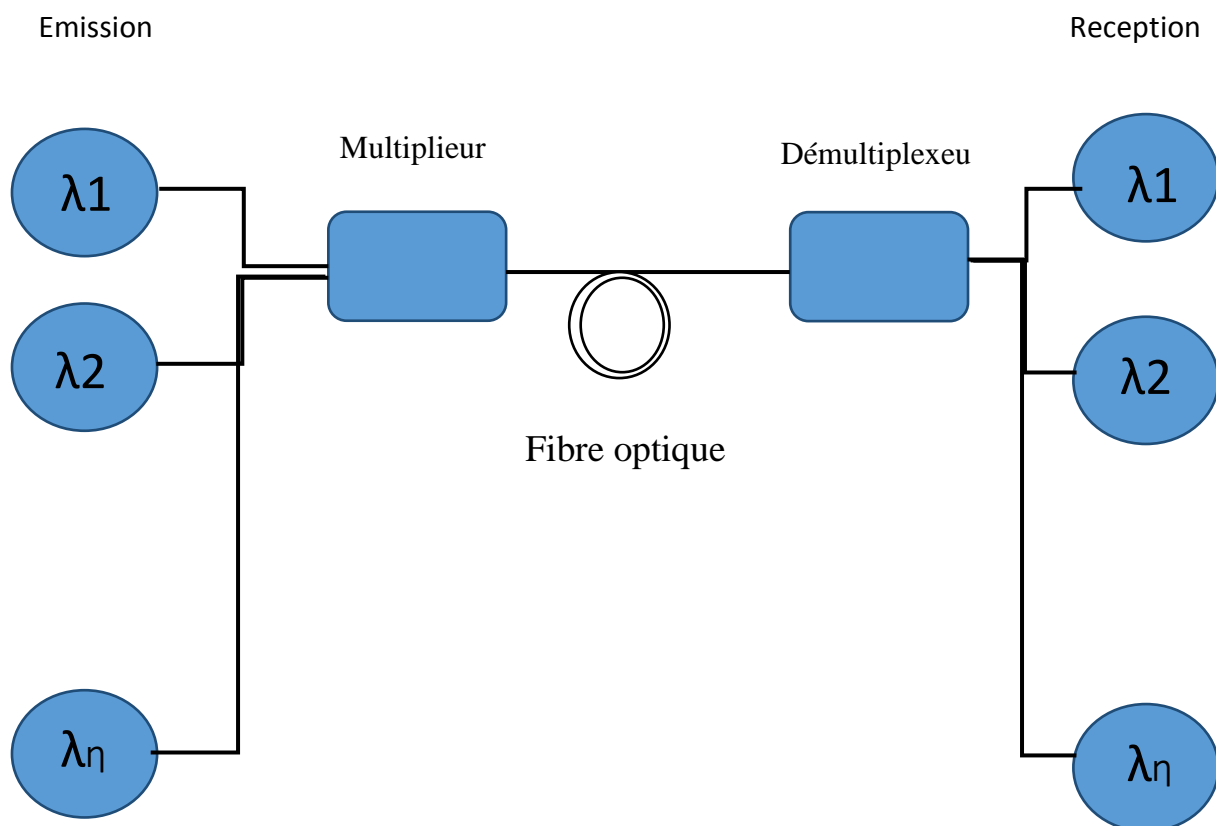
**Tableau II.02** : Comparaison des standards PON. [24]

### III.7 Le multiplexage en longueur d'onde (WDM-PON) :

Le multiplexage en longueur ou WDM (pour Wavelength Division Multiplexing) définit le type de multiplexage le plus probable pour la prochaine génération de solution pour les réseaux d'accès.

Les réseaux optiques passifs à multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM, PON) est le réseau d'accès de nouvelle génération. Ils peuvent fournir la plus grande largeur Bande au moindre coût. En principe, l'architecture d'un PON WDM est similaire à l'architecture PON. La principale différence est que le fonctionnement de l'ONU est différent longueur d'onde, de sorte que des taux de transmission plus élevés peuvent être atteints.

Les solutions PON WDM offrent une plus grande bande passante et peuvent supporter de grandes ONU plus grande sur le PON. En fait, il fournit plusieurs longueurs d'onde dans le même PON. L'approche classique dans l'architecture WDM PON consiste à utiliser le canal WDM séparé de l'OLT à chaque ONU. [26]



**Figure II.08 :** Le multiplexage en longueur d'onde WDM.

Il existe plusieurs types de multiplexage WDM en fonction des longueurs d'ondes utilisés :

- Le CWDM pour Coarse Wavelength Division Multiplexing.

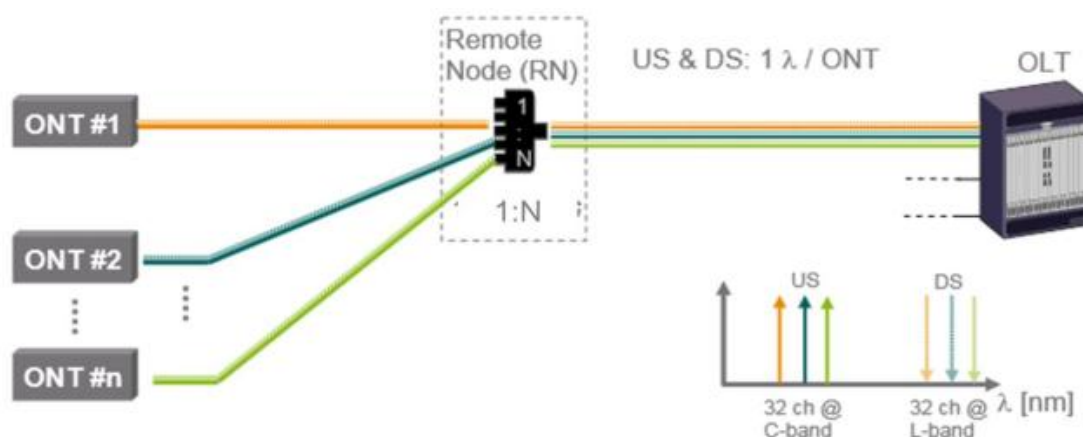
- Le DWDM pour Dense Wavelength Division Multiplexing.

Les deux technologies fonctionnent de manière identique, la seule différence est le nombre de canaux (i.e. de longueurs d'onde) utilisables. Le DWDM utilise un espacement entre 1.6 et 0.4 nanomètre contre 20 nanomètre pour le CWDM, ce qui permet d'avoir un nombre de canaux normalisés beaucoup plus important (de 96 pour la bande C à 160 théoriques contre 8 ou 18). DWDM utilise des longueurs d'ondes autour de 1550nm. La tranche de fréquence la plus utilisée est la bande C (Conventionnelle) : 191,560 à 195,942 THz (de 1 565 à 1 530 nm). [22]

### III.7.1 Architecture de multiplexage en longueur d'onde WDM PON :

Le PON, WDM satisfera ainsi pleinement ceux qui souhaiteraient voir les collectivités investir dans des réseaux d'accès FTTx exclusivement passifs et de fait clôturera le débat, définitivement cette fois, sur les avantages comparés des infrastructures fibre noire point à point et des réseaux PON, en permettant de superposer sur la même topologie arborescente de fourreaux et de fibre des topologies d'accès PON et des topologies d'accès point à point. [28]

Dans l'architecture WDM PON, les ONTs peuvent fonctionner à différentes longueurs d'onde, ce qui permet d'atteindre un débit élevé de transmission.



**Figure II.9 :** Architecture PON base sur le multiplexage en longueur d'onde WDM. [45]

La capacité totale de bande passante du système d'accès multipliée par le nombre des longueurs d'onde dont elle est multiplexés sur une fibre optique. Ces signaux optiques sont ensuite séparés (ou démultiplexés) à différentes fibres. [24]

### **III.7.1 Sens descendant :**

L'OLT transmet toutes les longueurs d'onde sur une même fibre partagée. Si on utilise un coupleur au point de distribution (RN) il répartit la puissance et attribue toutes les longueurs d'onde à chaque maison connectée. Un filtre de longueur d'onde de l'ONU permet alors de sélectionner la longueur d'onde dédiée pour chaque client. Si un répartiteur de longueur d'onde ou un démultiplexeur de Type AWG (Arrayed Waveguide Grating) est utilisé en RN, chaque ONU reçoit une longueur d'onde dédiée.

### **III.7.2 Sens montant :**

Dans ce cas, l'ONU renvoie des longueurs d'onde différentes vers l'OLT. L'acronyme WDMA (Wavelength Division Multiple Accès) désigne l'accès multiple en longueur d'onde dans le sens montant. [24]

### **III.8 Les débits offerts par les réseaux optiques passifs (PON) :**

Dans un réseau PON, N utilisateurs se partagent un débit de 1 à 2,5 Gbit/s, N Jusqu'à 64. L'ONU a une interface RJ45 normalisée et permet un débit instantané jusqu'à 1 Gbit/s. L'architecture PON offre une grande flexibilité pour l'attribution des bandes de fréquences passante. La bande passante est en fait allouée de manière totalement dynamique à Tous les utilisateurs qui ont besoin de débit à un moment donné.

La bande passante disponible restante est répartie équitablement entre les utilisateurs tout en respectant la qualité de service. [24]

### **III.9 Les performances d'un réseau optique passif :**

Un réseau d'accès PON s'adapte aux topologies en fonction des contraintes du terrain et des besoins des clients grâce à l'utilisation des coupleurs optiques totalement passifs et modulaires, positionnés au plus près des abonnés, le tout sans nécessiter d'armoires de rue dédiées ni d'alimentation spécifique. Les coupleurs autorisent tous les types de topologies possibles: en étoile, en arborescence, en bus.

Cette flexibilité dans la conception du réseau permet un déploiement beaucoup plus simple qu'avec toutes les technologies nécessitant des équipements actifs entre les têtes de réseau et les abonnés.



En outre, le support fibre permet d'envisager des services ou des débits insoupçonnés aujourd'hui, grâce à l'augmentation de débit nominal de fonctionnement ou à la possibilité de multiplexage en longueur d'onde WDM, si bien qu'un réseau de fibres et de coupleurs PON, déployé aujourd'hui, permettra, sans évolution de la base installée, de répondre aux besoins du futur. [28]

### **III.10 Limites des réseaux optiques passifs :**

#### **III.10.1 La distance :**

Malgré leurs nombreux avantages, les réseaux optiques passifs présentent quelques inconvénients potentiels par rapport aux réseaux optiques actifs. La limite de portée d'un réseau PON se situe entre 20 et 40 km, alors qu'un réseau optique actif peut atteindre 100 km.

#### **III.10.2 Test d'accès :**

Dans certains cas, la recherche de panne peut s'avérer difficile, car l'accès de test peut être oublié ou ignoré lors de la conception d'un réseau PON. De plus, les outils de test doivent permettre un dépannage en service sans provoquer d'interruption pour les autres utilisateurs finaux sur le même réseau PON. S'il existe un accès de test, les tests peuvent être réalisés à l'aide d'une solution portable ou centralisée en utilisant une longueur d'onde en dehors de la plage de trafic (par exemple, 1 650 nm) afin d'éviter tout conflit avec les longueurs d'onde PON existantes. Lorsqu'aucun accès de test n'a été prévu, l'accès doit être obtenu à partir d'une extrémité au niveau de l'OLT ou de l'ONT, ou une section du réseau PON doit être temporairement mise hors service.

#### **III.10.3 Vulnérabilité élevés aux ruptures au niveau de la ligne**

##### **d'alimentation ou de l'OLT :**

Dans l'architecture P2MP, la ligne d'alimentation et l'OLT desservent de multiples utilisateurs finaux (potentiellement jusqu'à 256). Il y a très peu de redondance et, en cas de coupure accidentelle de la fibre optique ou de défaillance d'un OLT, l'interruption de service peut être longue. [26]

## **II.11 Conclusion :**

Dans cette partie on a vu les différents réseaux optiques, premièrement on a cité les différents types d'un réseau d'accès optiques, ainsi que les différents topologies utilisées lors du déploiement de FTTH (fibre to the home), point à point, point à multipoint, après on a vu les standards XPON et on a particulièrement mit l'intérêt sur le réseau GPON et son fonctionnement et à la fin on a vu le type de multiplexage WDM.

Dans le chapitre suivant nous allons voir les caractéristique des architecture PON et WDM-PON.



## **CHAPITRE III**

### **Simulation D'une Chaine de Transmission**

#### **PON-WDM**

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

L'introduction des fibres optiques dans le domaine des télécommunications constitue certainement une évolution technologique d'importance primordiale. Le besoin de transmettre un débit plus élevé sur des longueurs de transmission plus importantes s'accroît, du fait de l'arrivée sur le marché des nouvelles technologies d'accès haut débit. L'accès au haut débit est devenu une nécessité dans le monde d'aujourd'hui où la quantité et la qualité des informations à transporter ne cessent d'augmenter.

La conception des systèmes associés est un problème de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances de la liaison est important. De plus, il est demandé à ces derniers à la fois de transporter des capacités d'informations de plus en plus importantes, et de se renouveler très rapidement. Pour cette raison les outils de simulation sont de plus en plus utilisés pour aider à trouver rapidement des solutions, aussi bien au niveau du composant que du système.

Cependant, contrairement à l'électronique et aux micro-ondes, il n'existe pas d'outils standards et bien admis dans le domaine des transmissions optiques. Il est apparu, récemment, sur le marché, un certain nombre de logiciels permettant la simulation de systèmes de communications optiques.

Ce chapitre est composé de trois parties :

- Présentation du logiciel de simulation (VPI).
- Etude des caractérisations de l'émetteur-récepteur PON qui est la nouvelle technologie dans lequel elle remplace les fils de cuivre par la fibre optique.
- Etude d'une chaîne de transmission WDM-PON basé sur une LED à découpage de spectre.

### **III.2 Description de l'outil de simulation :**

Virtual Photonics Integrated (VPI) est un outil puissant qui peut simuler une grande gamme de modes de transmission optique, permettant la création de multiples configurations pour un scénario de transport donné.

La combinaison d'une interface graphique et d'une simulation basée sur une représentation robuste avec des signaux optiques flexibles permet une modélisation efficace de tout système Transport, y compris les réseaux bidirectionnels, en anneau et maillés. [31]

VPI photonics a inventé le terme "Photonic Design Automation" (PDA) en 1998 pour décrire les méthodologies de conception, les outils logiciels et les services utilisés pour concevoir des réseaux et produits photoniques. Le PDA aide les fournisseurs de composants et de systèmes optiques à gérer la propriété intellectuelle et réduire les charges d'exploitation en rationalisant des processus spécifiques aux ventes techniques et au marketing. [32]

C'est une application comprend essentiellement une fenêtre principale répartit en plusieurs parties (voir la figure III.1) :

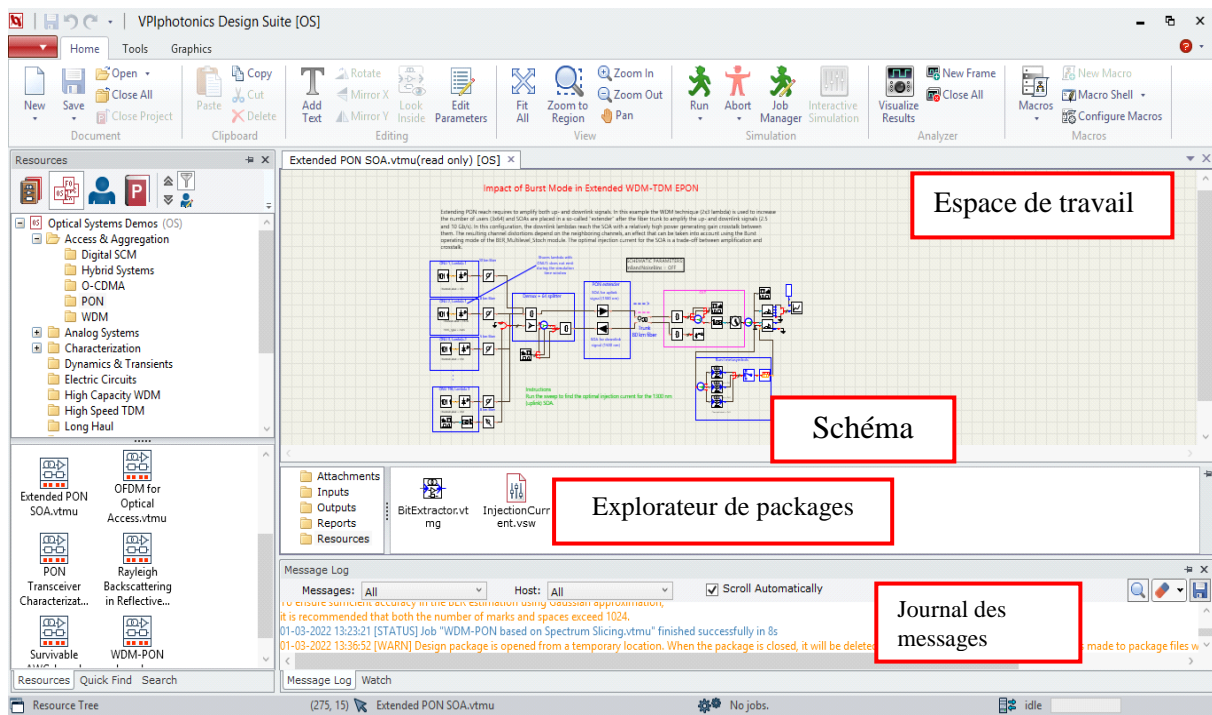


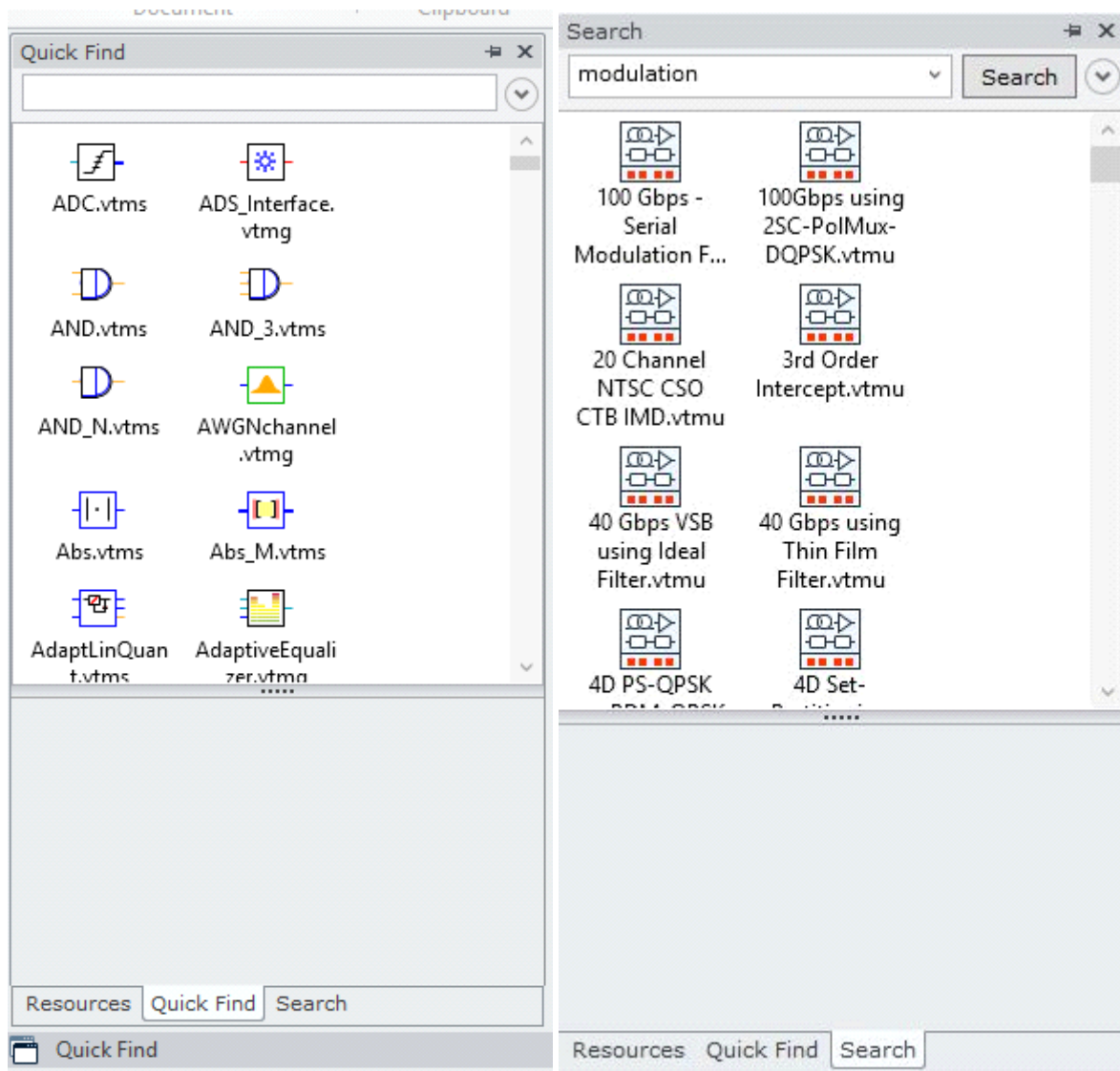
Figure III.1 : Interface utilisateur VPI Design Suite avec un schéma ouvert.

### III.2.1 Fenêtres VPI :

#### III.2.1.1 Recherche rapide et recherche en texte intégral :

VPI est un logiciel très performant qui permet aussi de concevoir et demodéliser des composants optiques. Lors de la conception, l'onglet Ressources regroupe les ressources par application, mais si vous n'êtes pas familier avec cette structure, il peut être difficile de

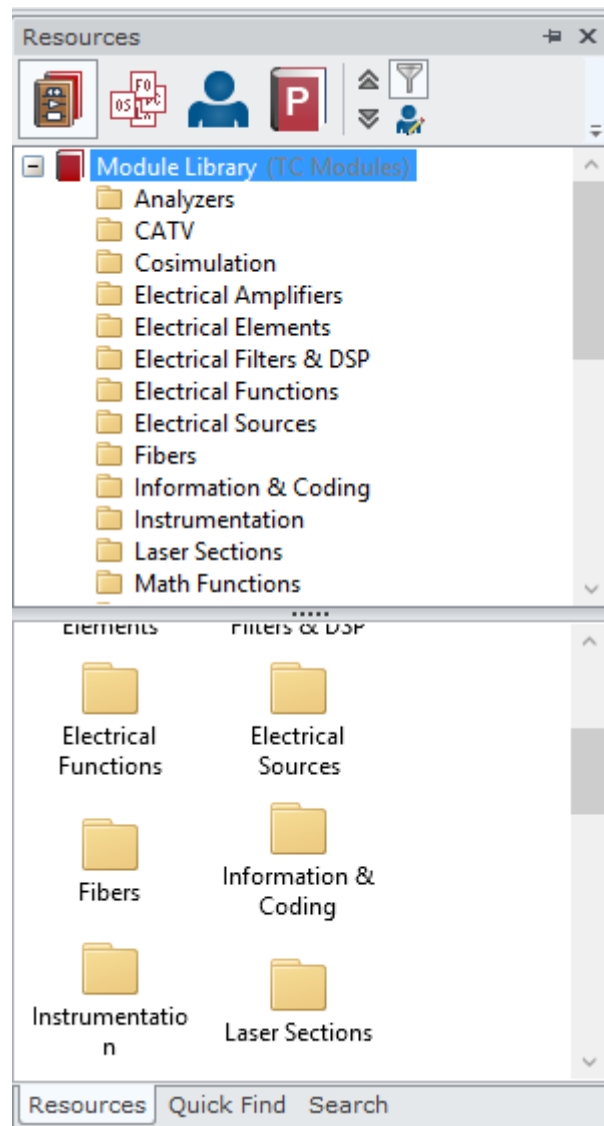
localiser rapidement un module. La Recherche rapide et complète des panneaux et la recherche en texte intégral illustrés à la Figure III.2 offrent un autre moyen de naviguer dans la bibliothèque pour vous aider à trouver ce que vous cherchez.



**Figure III.2 :** Panneaux Recherche rapide recherche en texte intégral.

### III.2.1.2 Ressource:

Le panneau de navigation Ressources (Figure III. 3) permet d'accéder à des collections de modules intégrés et personnalisés et d'explorer la vaste bibliothèque de démonstrations incluses dans le produit pour vous aider à démarrer avec vos propres conceptions. Ce panneau aide à organiser les modules et les schémas d'une manière facilement gérable.

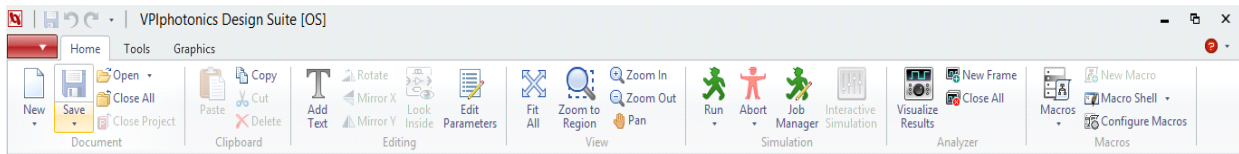


**Figure III.3 :** Panneau de ressources.

### III.2.1.3 Onglets du ruban :

Toutes les commandes nécessaires pour travailler avec le schéma actuel sont situées sur le ruban. Le ruban est divisé en trois onglets (Accueil, Outils et Graphiques) :

L'onglet Accueil comprend les commandes les plus fréquemment utilisées, comme il montre la figure III.4, permettant d'exécuter/d'arrêter et gérer vos simulations, ouvrir et fermer des schémas, zoomer-les, créer de nouveaux designs, décorer les schémas avec des zones de texte, faire pivoter et refléter les modules sur les schémas, etc.



**Figure III.4 :** Onglet accueil.

L'onglet Outils (figure III.4) rassemble les commandes les moins fréquemment utilisées, il permettant d'exporter les schémas vers d'autres formats de fichiers, chiffrer-les et déchiffrer-les, enregistrer des instantanés du courant état, personnaliser les galaxies du module, gérer les raccourcis Ressources via le Raccourci Boîte de dialogue du gestionnaire, masquer et afficher les principaux panneaux, et administrer la télécommande serveurs de simulation.



**Figure III.5 :** Onglet outils.

Enfin, l'onglet Graphiques vous permet de décorer vos schémas avec du texte, des images et des autres éléments graphiques (figure III.6). Cela aide à rendre les schémas plus explicites.



**Figure III.6 :** Onglet graphique.

### III.2.2 Applications :

- Conception de systèmes de grande capacité, y compris les nouveaux systèmes WDM, avec amplification Raman et systèmes hybrides et traitement du signal optique.
- Analyse de la performance, des fonctions de lien et des règles de l'ingénierie de conception.
- Évaluation de la diaphonie et de la dynamique dans les réseaux DWDM.
- Évaluation des avantages des formats de modulation comme Duobinary, CSRZ, mQAM, (CSRZ-) DPSK, (RZ-) DQPSK.



- Quantification de la dégradation d'un signal dans une fibre optique induite par des effets prédéfinis.
- Évaluation de nouveaux formats, tels que l'agrégation optique CDMA et SCM-OFDM.
- Identification des paramètres de conception, y compris le chirp du laser, amplificateur de gain, les pertes, et le filtrage.
- Analyse de la performance, des fonctions de lien et des règles de l'ingénierie de conception.

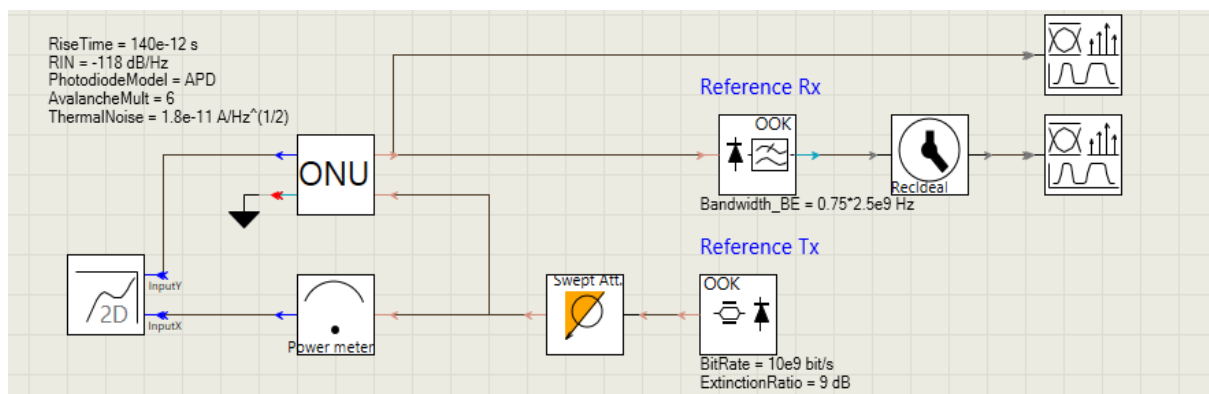
Ainsi, VPI permet d'accélérer la conception de nouveaux systèmes photoniques, y compris des liens de transmission et tout type de réseau optique, et permet d'améliorer les stratégies à développer pour les installations existantes. [31]

### III.3 Description du système 10-GPON par VPI :

Cette configuration montre comment définir les paramètres d'un module émetteur-récepteur basé sur 10-GPON DML (Directly Modulated Lasers)/APD pour répondre à des exigences spécifiques.

Ce système contient un émetteur à base de modulation OOK (On-Off key) qui fonctionne à une fréquence de 193.1 Thz avec un débit de 1Gbit/s; cet émetteur fonctionne avec un récepteur compatible d'une bande passante de 1.875GHz, passant par un ONU d'une photodiode de model APD.

La figure suivante montre le système émetteur-récepteur PON :



**Figure III.7 :** schéma d'un module émetteur-récepteur.

### III.3.1 Évaluation et Interprétation des résultats

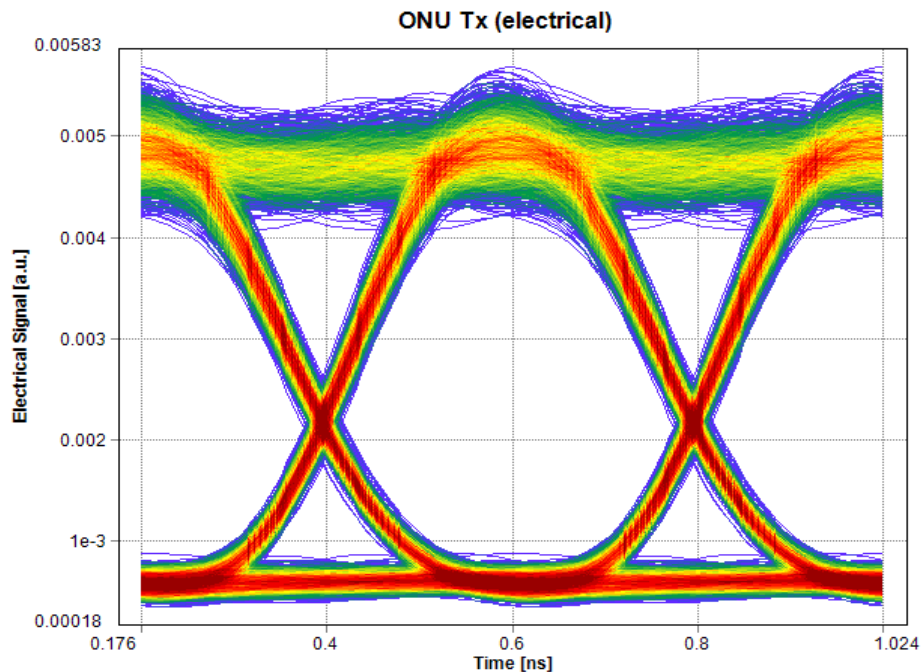
Dans cette section, nous allons évaluer les performances du système 10-GPON en termes de diagramme de l'œil et le BER pour deux formats de modulation RZ et NRZ.

#### III.3.1.1 Diagramme de l'œil :

Le diagramme de l'œil permet d'une manière très simple d'apprécier la qualité des signaux électrique et optique reçus. Il est défini par la superposition d'un grand nombre de symboles binaires dans le domaine temporel. [30]

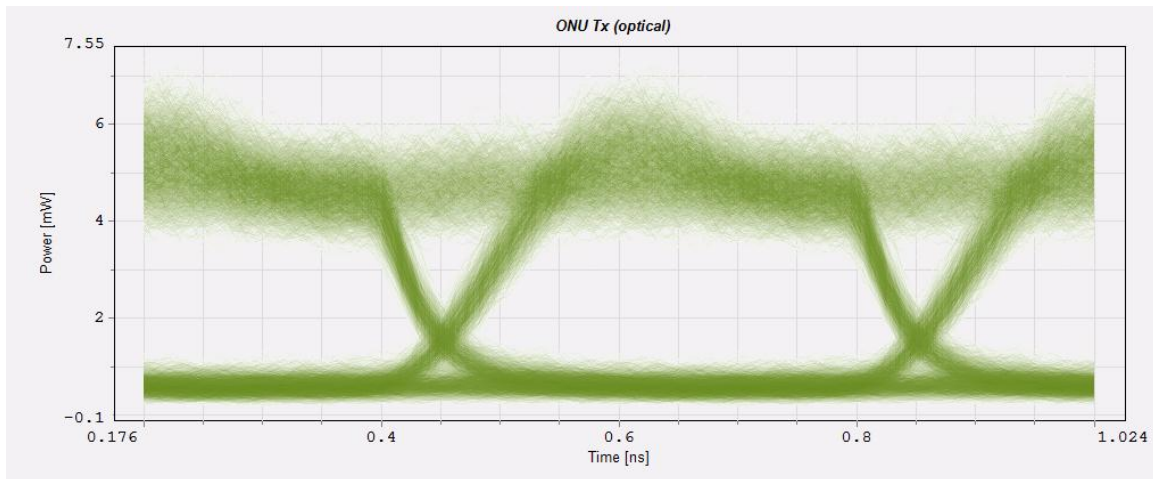
Le signal reçu après son conditionnement par un filtre passe bas et une modulation de type NRZ est présenter dans les figures suivantes :

La première figure présente le diagramme de l'œil du signal électrique.



**Figure III.8 :** Diagramme de l'œil (électrique).

Et la figure suivante représente le diagramme de l'œil en optique :



**Figure III.9 :** Diagramme de l'œil (optique).

Les diagrammes de l'œil obtenus montrent une très bonne qualité du signal. Les niveaux sont parfaitement définis, le niveau de bruit est faible. Il n'y a pas d'interférence inter-symbole.

Ces diagrammes expliquent ainsi la possibilité d'avoir une réception correcte, avec un débit binaire de 1Gbit/s. et par conséquent on dit que ce système présente une meilleure performance.

La partie la plus ouverte de l'œil présente le meilleur SNR (rapport signal-sur-bruit).

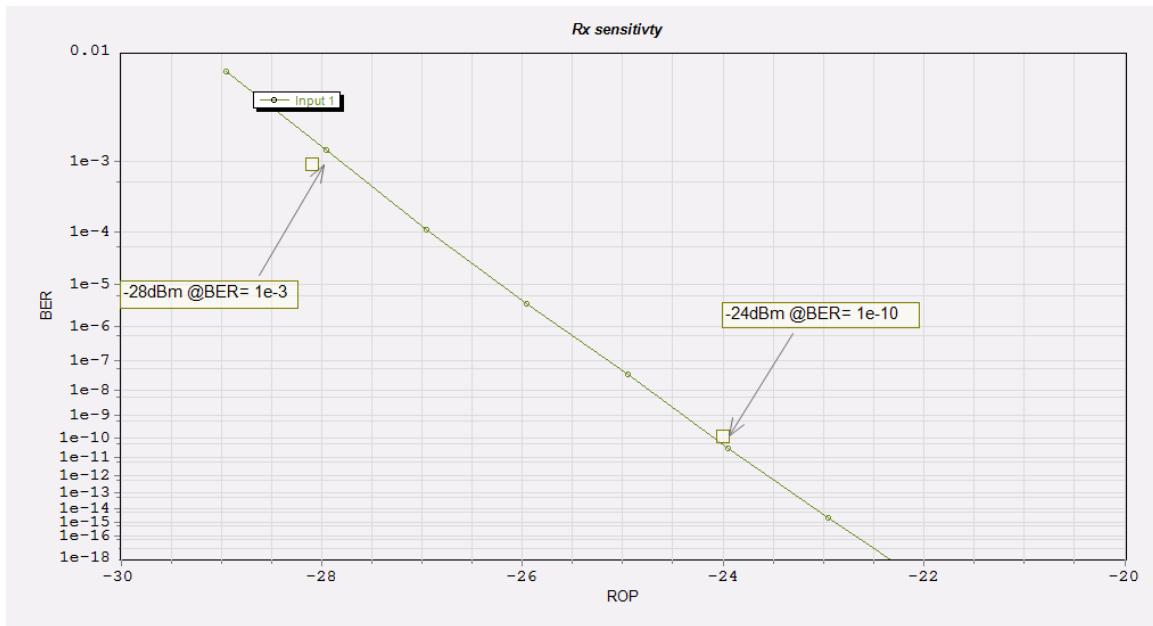
### III.3.1.2 Le BER :

Bit Error Ratio ou BER, en français le taux d'erreur binaire (TEB), c'est le pourcentage de bit qui présente le nombre d'erreurs par rapport au nombre total de bits reçus dans la transmission.

$$BER = \frac{\text{nombre de bit erronés}}{\text{nombre de bit transmis}} \quad (\text{III.1})$$

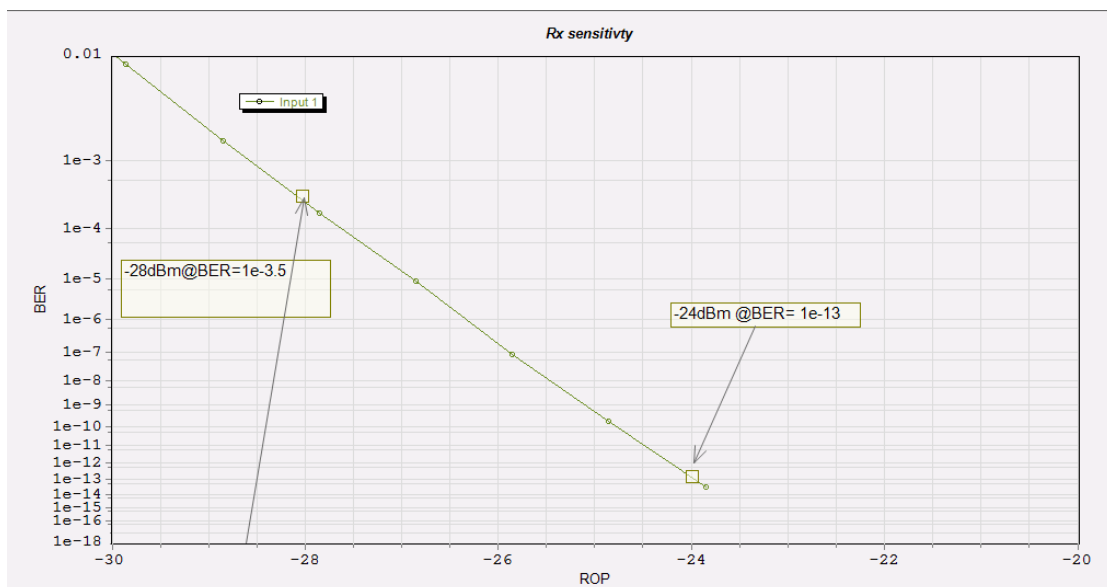
En générale, pour les télécommunications optiques, on considère qu'on a une bonne qualité de transmission pour un BER variant entre  $10^{-9}$  et  $10^{-12}$ . [33]

Dans notre cas on veut examiner le BER pour les deux types de modulation, commençant par la modulation NRZ on obtient le résultat suivant :



**Figure III.10** : le BER en modulation NRZ.

Par les mêmes propriétés de la chaîne de transmission on faire changer la modulation précédente par une modulation RZ, on obtient :



**Figure III.11** : BER en modulation RZ.

❖ **Comparaison des résultats :**

La comparaison est faite entre les deux types de modulation RZ et NRZ, avec un débit de 10 Gbit/s, et on prend les mêmes composants et leurs paramètres de simulation.

La Figure III.10 présente la performance en BER pour une liaison NRZ-OOK à 10 Gbit/s, les résultats obtenus de la variation du BER en fonction de la puissance optique reçue (POR) pour différentes distances de la fibre.

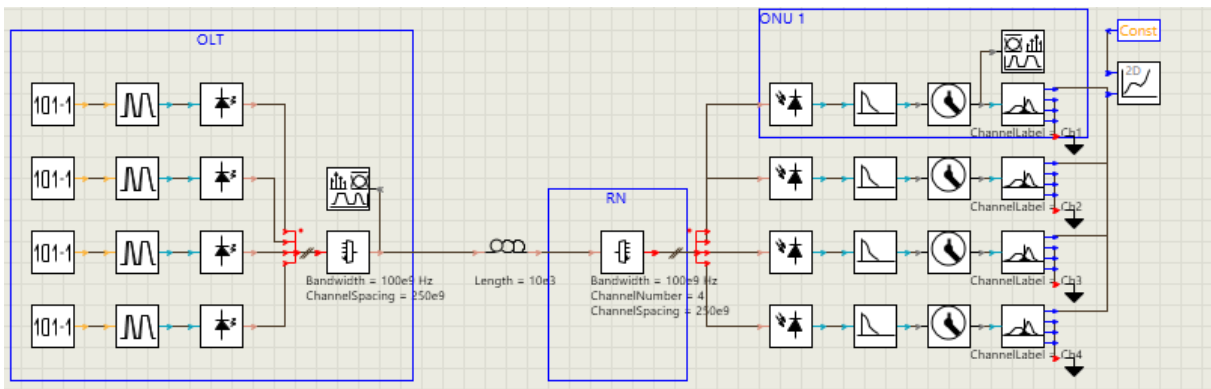
Les figures ci-dessus présentent la variation du BER en fonction de la puissance optique reçue (ROP). L'analyse des résultats obtenus montre d'une part, qu'avec un ROP cible de -24, le BER est  $10^{-10}$  pour la modulation NRZ et de  $10^{-13}$  pour la modulation RZ. On observe bien que le tracé du BER du format RZ est en dessous de celui du format NRZ et donc, le format RZ présente moins d'erreur que le format NRZ.

On constate que le format RZ est plus robuste que le NRZ devant des ROP faibles.

**III.4 Etude d'une chaîne de transmission WDM-PON :**

Dans cet exemple, les LEDs sont utilisées comme une source d'émission spontanée avec la technique de découpage du spectre sur WDM-PON, le système se compose de quatre canaux à 1Gbit/s.

Les transmetteurs sont des LEDs directement modulées, après modulation les signaux sont multiplexés et transmis via un SMF (fibre optique monomode), le multiplexeur effectue le découpage des canaux. Au nœud du contrôle, les canaux sont démultiplexés et détectés par une photodiode APD.



**Figure III.12 :** Chaîne de transmission WDM-PON.

On va présenter dans ce qui suit l'architecture de chaque partie (émission, réception) du système WDM-PON.

### III.4.1 Description de réseau WDM-PON :

Le réseau WDM-PON est constitué de :

#### III.4.1.1 OLT :

La partie d'émission de l'OLT contient une LED disposé pour convertir le signal électrique en signal Optique. Le générateur des séquences binaires aléatoires PRBS (Pseudo Random Bit Sequence) pour générer des bits aléatoires, Chaque séquence binaire est converti en signal électrique via un codeur NRZ. Le signal optique est ensuite passé par un multiplexeur d'un filtre passe-bande qui multiplexe les quatre canaux sur un seul canal WDM puis il les envoyé sur Fibre Optique. La figure suivante présente la partie d'émission OLT.

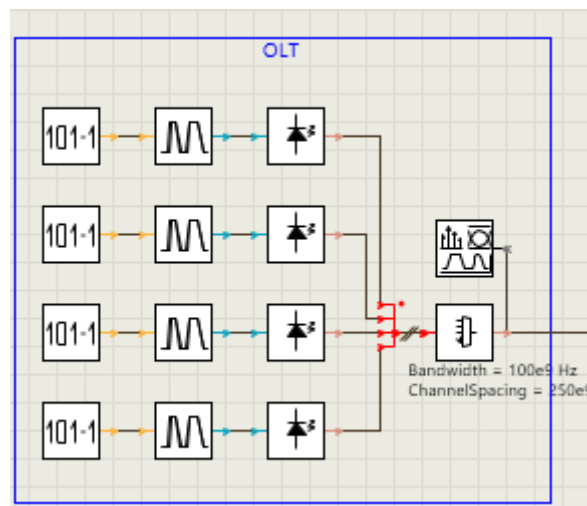


Figure III.13 : partie émission OLT.

#### III.4.1.2 Le canal de transmission :

Pour ce qui concerne le canal de transmission on dispose une version simplifiée du module fibre optique universel unidirectionnel, d'une longueur de 1Km. l'atténuation de la fibre optique est de 0.2 à 0.3 dB/m.



Figure III.14 : Fibre optique.

### III.4.1.3 RN (Nœud de Raccordement) :

C'est le nœud de raccordement où se passe le démultiplexage des canaux, il contient un filtre passe-bande, une atténuation idéale, et une bande passante de 100GHz. La figure qui suit présente le RN.

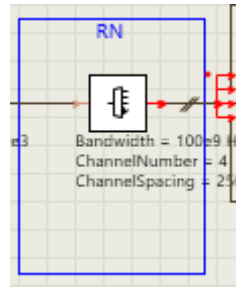


Figure III.15 : Démultiplexeur au RN.

Après, chaque chaîne avec ces éléments présente un ONU.

### III.4.1.4 ONU :

Dans la sortie du canal, la partie réception contient une photodiode de modèle APD, un filtre passe bas, un bloc de récupération d'horloge suivi d'un étage de décision, permet de détecter la trame reçue et d'en estimer le nombre d'erreurs. Pour une modulation NRZ, le diagramme de l'œil est un critère qualitatif de performance tandis que le taux d'erreur binaire (BER) représente un critère quantitatif. La figure III.16 présente le bloc d'ONU :

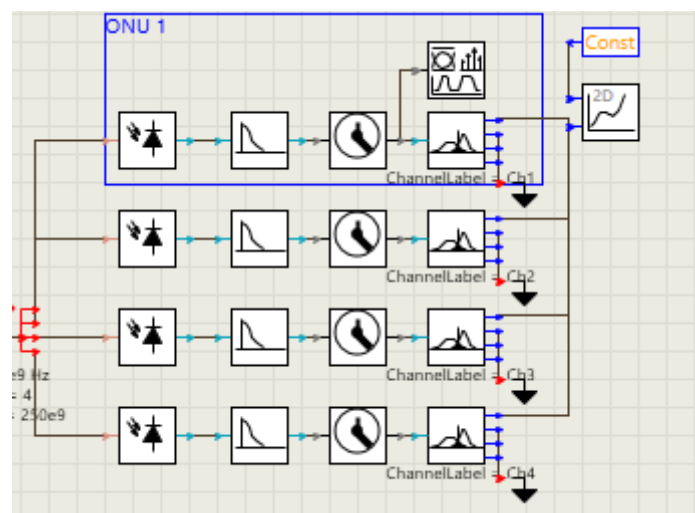


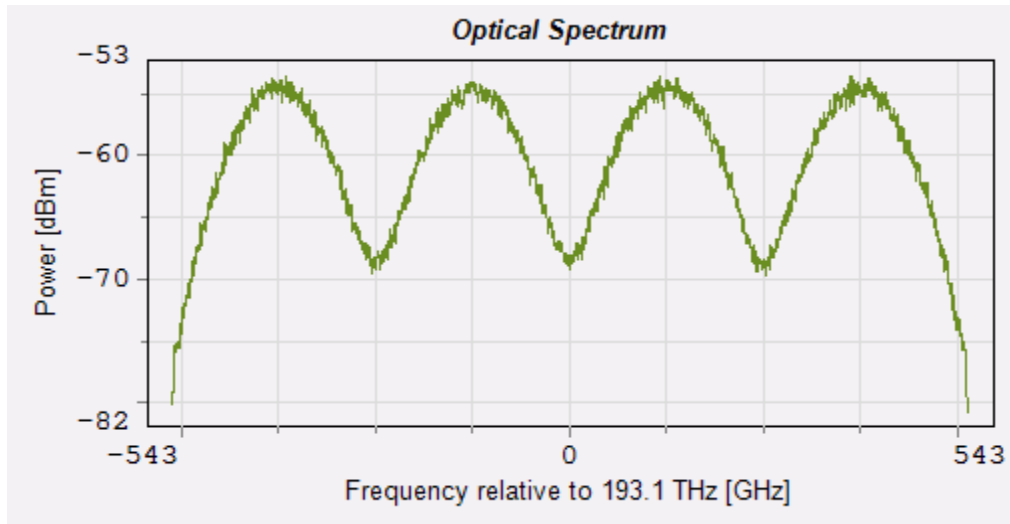
Figure III.16 : Partie réception ONU.

### III.4.2 Résultats et interprétation :

La simulation du réseau d'accès WDM-PON se fait pour les deux types de modulation : RZ et NRZ et on a obtenu les résultats suivantes :

#### III.4.2.1 Spectre optique:

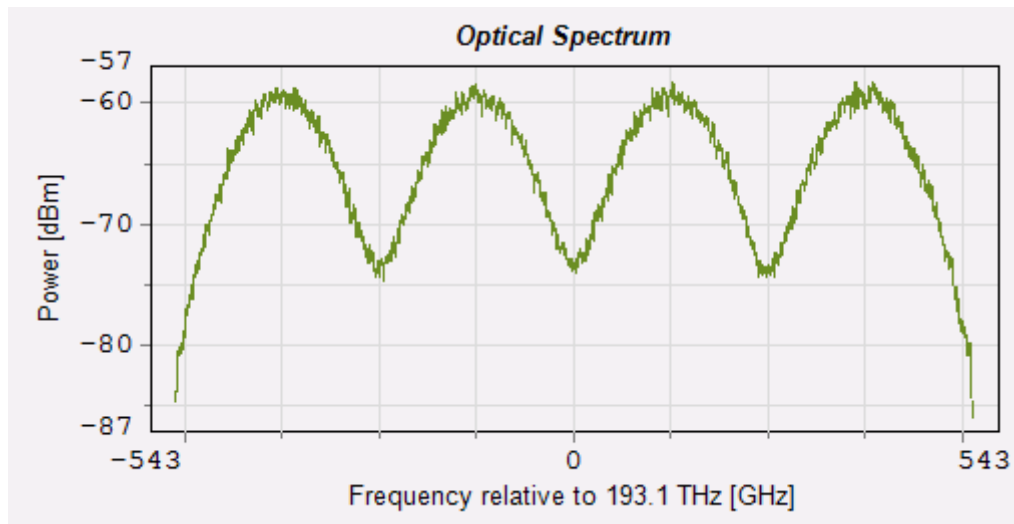
Le spectre optique du signal à la sortie de l'OLT est présenté dans la figure suivante.



**Figure III.17 :** Spectre optique modulé en NRZ.

Dans la figure suivante (figure III.18) on change la modulation NRZ par RZ, et on observe :





**Figure III.18 :** Spectre optique modulé en RZ.

La figure présente la puissance du spectre des longueurs d'ondes obtenues en fonction de fréquence.

Le spectre optique est symétrique et bien centré au niveau du multiplexeur dans les deux cas du codage NRZ et RZ.

Dans ce cas on observe des longueurs d'ondes séparées à des fréquences élevées, alors on peut envoyer différents types de données sur le support de transmission optique. Donc, au lieu d'utiliser plusieurs fibres pour chaque Abonnée, les différents canaux de lumière sont envoyés sur la même fibre optique, chaque canal à une longueur d'onde spécifique.

#### **III.4.2.2 Diagramme de l'œil :**

A la sortie de l'ONU on obtient le diagramme de l'œil présenté sur la figure ci-dessous :

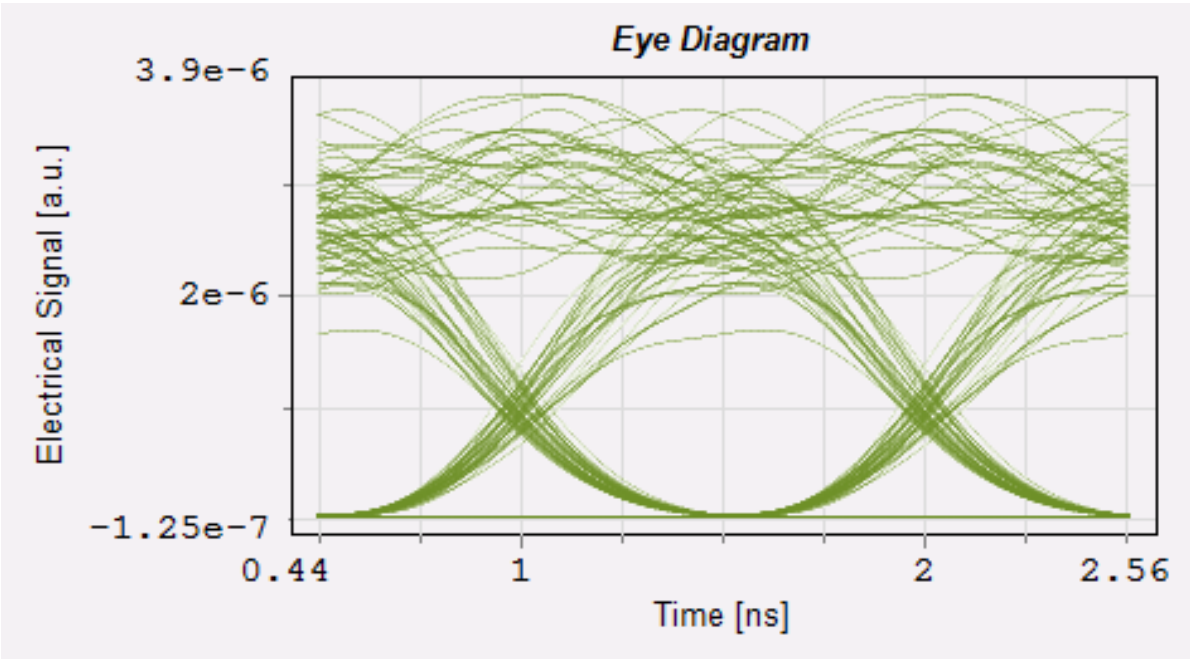


Figure III.19 : Diagramme de l'œil modulé en NRZ.

Ensuite, par la modulation RZ on a :

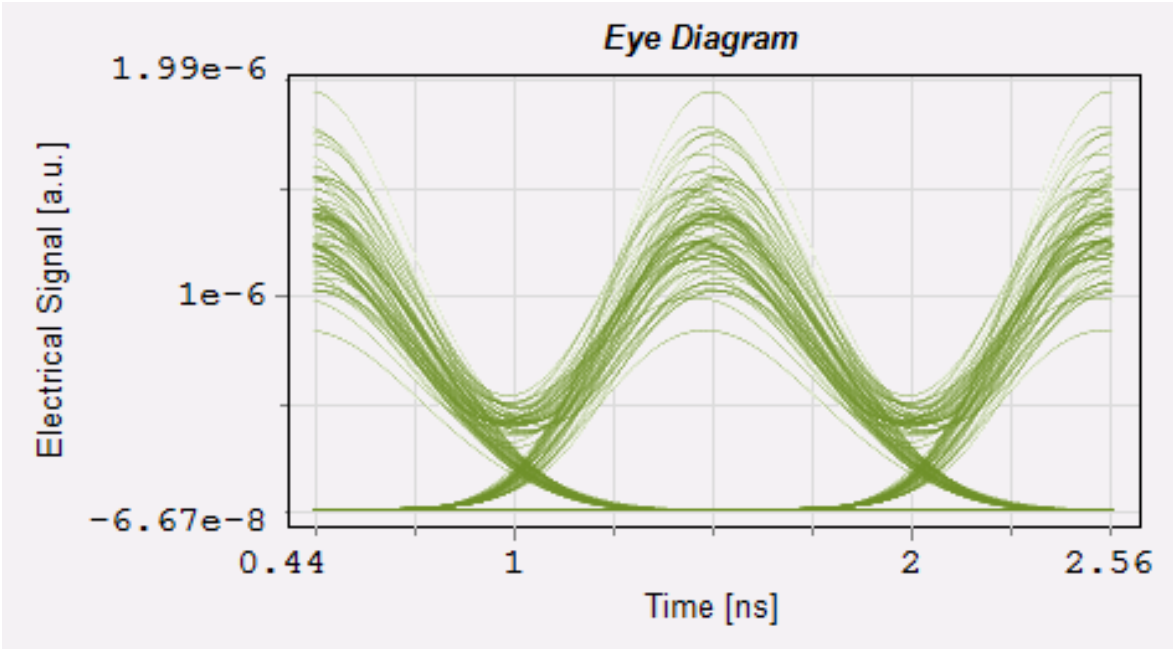


Figure III.20 : Diagramme de l'œil modulé en RZ.

On note ci-dessus un diagramme de l'œil ouvert avec un bruit très réduit, ce qui témoigne d'une très bonne qualité de transmission.

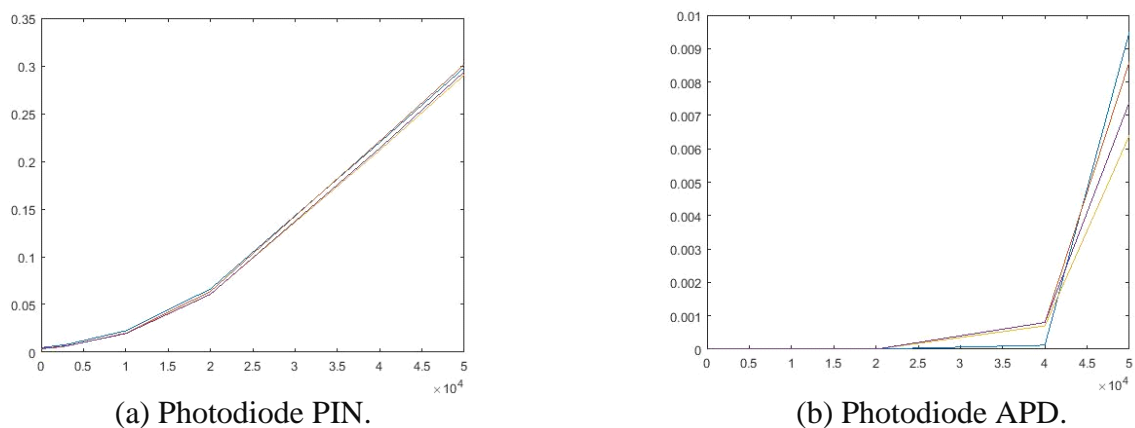
Le diagramme de l'œil dans le cas du codage NRZ présente un œil ouvert et clair par rapport au codage RZ.

### III.4.2.3 BER :

Dans cette partie, nous avons fait varier la longueur de la fibre de 100 m à 50 km, et on note à chaque fois le BER pour les 4 utilisateurs, on va comparer les résultats obtenus dans les deux photodiodes.

### III.4.2.3 Modulation NRZ :

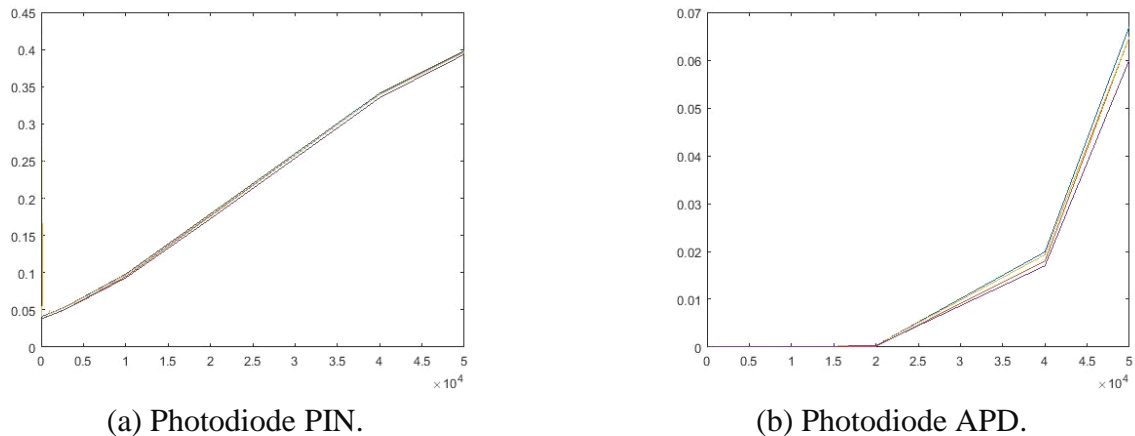
Les figures suivantes présentent la variation de BER en fonction de distance sur les deux types de photodiode :



**Figure III.21** : Variation du BER en fonction de la longueur de la fibre.

### III.4.2.4 Modulation RZ :

Maintenant, on a varié la modulation NRZ par RZ et on obtient les résultats suivants :



**Figure III.22 :** Variation du BER en fonction de la longueur de la fibre (APD).

### ❖ Comparaison :

D'après les résultats obtenus dans les figures précédentes (Figure III.20 et 21), on décrit les remarques suivantes :

- Une augmentation du BER en fonction de la distance dans les deux types de photodiodes et aussi de modulation.
- Les photodiodes de type APD présentent de meilleures performances que les types PIN dans les deux types de modulation.
- Les quatre canaux présentent les mêmes variations de BER.
- Le BER de la PIN commence à augmenter depuis les courtes distances (100m), par contre, l'APD avec une longueur inférieure à 20Km présente un BER de valeur très petite.
- Pour garder les bonnes conditions de fonctionnement du système étudié, il ne faut pas dépasser la distance de 15Km pour la PIN et 20Km pour l'APD.
- La photodiode APD est mieux adaptée aux fortes distances que la photodiode PIN.
- La modulation NRZ est meilleure pour ce type de transmission.

### III.5 Conclusion :

Ce chapitre nous permet d'étudier la liaison PON, en effectuant les recherches sur les performances de transmission qui reposent sur le multiplexage en longueur d'onde WDM en agissant sur différents paramètres tels que la longueur de la fibre, le type de la modulation, et le type de photodiode utilisé. Pour cela nous avons utilisé différents critères pour étudier la qualité de transmission.

Cette étude a révélé que l'évaluation des performances d'une liaison optique PON-WDM est jugée par des critères comme le diagramme de l'œil et le taux d'erreur binaire qui permettent à l'ingénieur de suivre la qualité de son réseau et déterminer toute dégradation peut affecter la qualité de transmission de données.

# Conclusion Générale

L'état de l'art sur la fibre optique montre qu'on assiste actuellement à un renouvellement de l'intérêt porté à ce domaine prometteur des télécommunications optiques. Les recherches en cours portent sur les performances des composants, du système complet et sur de nouvelles applications (intégration de nouveaux réseaux optiques).

Le développement de la fibre optique nécessite la maîtrise de ses aspects théoriques d'un côté et des méthodes de mesures d'un autre côté. En effet, les méthodes de mesure peuvent être utilisées à la fabrication, au câblage et même à l'installation.

Comparés aux fibres optiques monomodes, les fibres multimodes présentent des problèmes de caractérisation énormes, ce qui rend leurs méthodes de mesure très coûteuse. D'un autre côté les fibres monomodes sont plus utilisées dans les télécommunications compte tenu de leurs avantages par rapport aux fibres multimodes. L'objectif de ce travail consiste à étudier deux types de réseaux d'accès en télécommunications optiques. Il s'agit le réseau PON et le réseau WDM-PON.

Nous avons fait l'étude du système de transmission par fibre optique au cours du premier chapitre en précisant les différents types des composants ainsi qu'une étude approfondie sur la fibre optique.

Au cours du deuxième chapitre, l'étude était portée sur les réseaux d'accès en télécommunications et sur la description des réseaux fibrés FTTX, notamment les réseaux optiques passifs PON, leurs principaux composants constitutifs, leur principe de fonctionnement, et finalement les limites et les débits offerts par ces réseaux.

Dans le dernier chapitre, on fait la simulation d'un système de transmission par fibre optique sous le logiciel de simulation VPI. Dans notre mémoire, on choisit de simuler un système PON simple et puis un système WDM-PON. Ensuite, nous avons évalué les performances de ces deux systèmes optiques en termes de BER et du diagramme de l'œil dans les fibres optiques. Dans cette simulation on a modifié les longueurs de la fibre, les deux types de modulation RZ et NRZ, et les paramètres des composants nécessaires à la simulation système, tout en essayant de maintenir les performances globales de la liaison.

## Conclusion Général

---

Enfin, ce projet m'a donné l'occasion de découvrir les métiers de la recherche en télécommunications et plus particulièrement dans le domaine des systèmes de transmission optique tout en me permettant d'élargir mes connaissances dans ce domaine. La réalisation de mon stage au sein d'Algérie Telecom m'a permis d'enrichir mes qualités humaines, mes compétences relationnelles ainsi que ma vision du métier de recherche et développement tant d'un point de vue technique que relationnel.

# Bibliographie

- [1]. **BERROUANE.W** «Etude de conception d'une chaîne de transmission optique à très haut débit à base de semi-conducteur du type III-Nitrures», Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes, 2018.
- [2]. «TRANSMISSION DES TELECOMMUNICATIONS», CNAM Cours B11, - Partie 2 - Chapitre 5.
- [3]. <https://www.alloprof.qc.ca/fr/elevs/bv/physique/la-loi-de-snell-descartes-sur-la-refraction-p1034>  
visité le 29/03/2022
- [4]. **BILLAMI.H** et **BENDAHMANE.R** «Etude d'un réseau optique ADM 10Gbit/s», Mémoire de Master, université Abou bakr Belkaid, 2013.
- [5]. **Dorian DUMEZ** «La fibre optique», Article, élaboré dans le cadre de la réalisation des TPE, 2011-2012.
- [6]. <https://www.cite-telecoms.com/accueil/musee-des-telecommunications/les-telecommunications-filaires/fibre-optique/>  
visité le 26/03/2022
- [7]. **BENNAT.M** «Effet de la dispersion et de la modulation directe sur une liaison DWDM», Mémoire de master, université Abou Bekr belkaid, 2018.
- [8]. **Pierre FERDINAND** «Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg», Article, 1999.
- [9]. **Dominique Revuz et Etienne Duris** «La fibre optique et la technologie WDM», Cours, Université Paris Est-Marne la vallée.
- [10]. **Stéphanie LEPARMENTIER** «Développement et caractérisation de fibres optiques multi matériaux verre/silice ou verre/air/silice réalisées par un procédé basé sur l'utilisation de poudre de verres», Thèse de doctorat, L'UNIVERSITE DE LIMOGES, 2010.



## Bibliographie

---

[11]. **David Feugey** «L'effet Raman au service des liaisons optiques longue distance», Article, 2008.

[12]. **Claude Servin** «RÉSEAUX ET TÉLÉCOMS -Cours et exercices corrigés-», Dunod, Paris, 2003.

[13]. <https://community.fs.com/fr/blog/the-advantages-and-disadvantages-of-fiber-optic-transmission.html>

visité le 02/04/2022

[14]. **E. Cassan** «Une introduction aux télécommunications optiques par la simulation de systèmes simples», article, IEF, Université Paris-Sud Orsay, 2003.

[15]. **A. B. Bendé et M. A. Duguay et P. Fortier** «Étude sur l'amplification en ligne des systèmes de communication optique», Article, université Laval, Ste-Foy (Québec) Canada.

[16]. [https://www.connecthostproject.com/mux\\_1.html](https://www.connecthostproject.com/mux_1.html)

visité le 16/04/2022

[17]. **S.Asnouni et N.Meklleche** «Etude et caractérisation d'une chaîne de transmission optique à 40 Gigabit/S», Mémoire de master, Université Abdelhamid Ibn Badis, 2018.

[18]. **Camille-Sophie Brès** «Communication par fibre optique: des Romains à nos jours», article, école polytechnique fédérale de lausanne.

[19]. <http://www.telecom.ulg.ac.be/teaching/notes/multimedia/node63.html>

visité le 16/04/2022

[20]. <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:XZYECxq0nlgJ:https://elearning-facsci.univ-annaba.dz/mod/resource/view.php%3Fid%3D8240+&cd=1&hl=fr&ct=clnk&gl=dz>

visité le 26/03/2022

[21]. **F.FARHAOUI et F.ZAIDI** «Etude et Simulation d'une Chaîne de Transmission Numérique sur Fibre Optique Haut Débit», Mémoire de master, université Dr. Tahar Moulay, 2017.

## Bibliographie

---

- [22]. «Multiplexage WDM Introduction», Pro vision, 2018.
- [23]. **Irène et Michel Joindot** «Les télécommunication par fibre optique», 3ème édition, 1996.
- [24]. **M.LOUAZANI et S.MEDDANE** «Etude des réseaux d'accès optique exploitant le multiplexage en longueur d'onde», Mémoire de master, université Abou bakr Belkaid, 2017.
- [25]. «Déploiement FTTX», R et M France, 2006.
- [26]. <https://www.viavisolutions.com/fr-fr/reseau-optique-passif-pon>  
visité le 08/05/2022
- [27]. «Etude de chiffrage pour le développement du très haut débit en aquitaine», Région Aquitaine, 2009.
- [28]. «Les réseaux PON (Passive Optical Network)», Livre blanc, 2006.
- [29]. **HICHEM MRABET** «Réseau d'accès optique», cours, Institut Supérieur des Etudes Technologiques en Communications de Tunis, 2010.
- [30]. **B.BENABDERRAHMANE et B.CHELDA** «ETUDE DES PERFORMANCES DES RESEAUX OPTIQUES GPON», Mémoire de master, université Abou Bekr BELKAID, 2020.
- [31]. **SALMI Khalid** «Etude et modelisation d'un système de transmission radio-sur-fibre», Mémoire présenté par, Université Med premier Faculté des sciences Oujda, 2012.
- [32]. «VPI photonics Design Suite TM», -Simulation Guide-.
- [33]. **F.BENGHALEM et F.BENHAMED** «Etude d'un système WDM DPSK-NRZ», Mémoire de master, université AbouBekr BELKAID, 2015.
- [34].<https://community.fs.com/fr/blog/step-index-multimode-fiber-vs-graded-indexmultimode-fiber.html>  
visité le 14/06/2022
- [35]. memoireonline.com

## Bibliographie

---

- [36]. [memoireonline.com](http://memoireonline.com)
- [37]. [fr.lambdageeks.com](http://fr.lambdageeks.com)
- [38]. [fr.lambdageeks.com](http://fr.lambdageeks.com)
- [39]. [fr.lambdageeks.com](http://fr.lambdageeks.com)
- [40]. [reaserchgate.net](http://reaserchgate.net)
- [41]. [igm.univ-mlv.fr](http://igm.univ-mlv.fr)
- [42]. [networxsecurity.org](http://networxsecurity.org)
- [43]. [it-connect.fr](http://it-connect.fr)
- [43]. [it-connect.fr](http://it-connect.fr)
- [45]. [community.fs.com](http://community.fs.com)

