



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djillali Liabès de Sidi Bel-Abbès
Faculté de Génie électrique
Département d'Électronique



THESE DE DOCTORAT

Présentée pour obtenir le Diplôme de
DOCTORAT EN SCIENCES

Option:

Signaux et systèmes de communications

Par

Mr : BERRAHAL Belabbas

Etude et optimisation des caractéristiques optique photonique d'un amplificateur EYDWA pour le réseau optique passif GPON

Soutenu le : 15/10/2020

Devant le jury composé de :

Mr. CHAMA Zouaoui	Pr	Président	UDL Sidi Bel-Abbès
Mr. ANANI Macho	Pr	Directeur de thèse	UDL Sidi Bel-Abbès
Mr. MAHDJOUR Zoubir	Pr	Co-directeur de thèse	UDL Sidi Bel-Abbès
Mr. ARBOUCHE Omar	Pr	Examineur	Univ.Saida
Mr. BERKA Mohammed	MCA	Examineur	Univ.Mascara
Mr. MANSOURI Boualem	MCA	Examineur	Univ.Saida

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de ce travail et qui m'ont aidé à l'aboutissement de cette thèse.

*Je présente mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse, le Professeur **ANANI Macho**, mon co-directeur le Professeur **MAHDJOUB Zoubir** et **Mme. BENDAOUDI Amina**, Maître de Conférences « A », pour leurs patiences, leurs disponibilités et surtout leurs judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

Ma gratitude va aussi à tous mes collègues du laboratoire d'Electromagnétisme, de Photonique et d'Optronique (L.E.P.O) ainsi que ceux du département d'électronique pour leurs précieuses aide et contribution.

Je remercie également les membres de jury pour avoir accepté de juger et évaluer mes travaux de recherche accomplis dans le cadre de la préparation de ma thèse de doctorat.

Résumé

L'amplificateur optique à fibre dopée à l'Ytterbium (EYDWA) est un élément essentiel dans l'augmentation des qualités d'une liaison à fibre optique. Il est placé dans la ligne afin de compenser les pertes en régénérant les signaux dans la bande spectrale située entre 1530 nm et 1565 nm appelée bande C, recommandée par l'Union Internationale des Télécommunications. Le choix de cette plage réside dans le minimum d'atténuation des fibres optiques. Le but principal de ce travail est de prouver l'efficacité d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'Ytterbium EYDWA en vue de son emplacement dans un réseau d'accès optique passif de norme GPON (Gigabit Passive Optical Network) afin d'augmenter le nombre d'utilisateurs ainsi que les avantages que peut leur offrir ce réseau.

Dans ce contexte les recherches faites consistaient à étudier et analyser ce GPON amplifié (avec l'utilisation de l'EYDWA dans différentes positions de la liaison) en mode TDM (Time Division Multiplexing) pour prouver ses capacités vis-à-vis la demande en bande passante et en distance. Notre simulation est basée sur un logiciel système pour pouvoir réaliser des liaisons optiques demandées par le marché, les performances en termes de gain, du facteur de qualité, du diagramme de l'œil.

Mots clés : Fibre optique, Amplification optique, EYDWA, Réseaux d'accès, GPON, Gain, Facteur de qualité, Diagramme de l'œil.

Abstract

The Ytterbium Doped Fiber Optic Amplifier (EYDWA) is an essential element in increasing the quality of an optical fiber link. It is placed in line to compensate for losses by regenerating signals in the spectral band between 1530 nm and 1565 nm called C-band, recommended by the International Telecommunication Union. The choice of this range lies in the minimum attenuation of the optical fibers. The main goal of this work is to prove the efficiency of an EYDWA ytterbium-doped fiber optic amplifier for its location in a Gigabit Passive Optical Network (GPON) standard passive optical access network in order to increase the number of users and the benefits that this network can offer them.

In this context, the research carried out consisted in studying and analyzing this amplified GPON (with the use of EYDWA in different positions of the link) in TDM (Time Division Multiplexing) mode to prove its capabilities with regard to the demand for bandwidth and distance. Our simulation is based on system software to be able to realize optical links requested by the market, performances in terms of gain, quality factor, and eye diagram.

Keywords: Fiber Optics, Optical Amplification, EYDWA, Access Networks, GPON, Gain, Quality Factor, Eye Diagram.

ملخص

يعد مضخم الإربيوم عنصراً أساسياً في زيادة جودة وصلة الألياف الضوئية يتم وضعها في خط لتعويض الخسائر عن طريق إعادة توليد الإشارات في النطاق الطيفي بين 1530 نانومتر و 1565 نانومتر ، الموصى بها من قبل الاتحاد الدولي للاتصالات. يكمن اختيار هذا النطاق في الحد الأدنى من التوهين للألياف البصرية الهدف الرئيسي من هذا العمل هو إثبات كفاءة مضخم الألياف الضوئية المغطى بالإربيوم لموقعه في شبكة وصول ضوئي سلبي قياسي جيجابت من أجل زيادة عدد المستخدمين والفوائد التي يمكن للشبكة أن تقدم لهم.

في هذا السياق تضمن البحث الذي تم إجراؤه دراسة وتحليل هذا التضخيم جيجابت (مع استخدام الإربيوم في مواقع مختلفة من الرابط) في وضع مضاعفة تقسيم الوقت لإثبات قدراته فيما يتعلق بالطلب على النطاق الترددي والمسافة. تستند المحاكاة الخاصة بنا على برنامج النظام حتى تتمكن من تحقيق الروابط البصرية التي يطلبها السوق والأداء من حيث الكسب وعامل الجودة ومخطط العين.

الكلمات الدالة : الألياف الضوئية ، التضخيم البصري ، عامل الجودة ، شبكات الوصول ، مخطط العين ،

EYDWA ، GPON

Liste des matières

Résumé	<i>I</i>
Liste des matières	<i>II</i>
Liste des figures.....	<i>III</i>
Liste des tableaux.....	<i>IV</i>
Abréviations	<i>V</i>
Introduction générale.....	<i>1</i>

CHAPITRE I : PRINCIPE D'UNE LIAISON PAR LA FIBRE OPTIQUE

I.1	Introduction	4
I.2	Fibre optique	4
I.2.1	Catégories des fibres optiques	5
I.2.1.1	Fibre multi-modes à saut d'indice	5
I.2.1.2	Fibre multi-modes à gradient d'indice.....	6
I.2.1.3	Fibre monomode.....	6
I.3	Fibre a cristaux photoniques	7
I.3.1	Définition et historique de la fibre à cristaux photonique	7
I.3.2	Fabrication de la fibre à cristaux photonique	8
I.4	Caractéristiques des fibres optiques.....	11
I.4 .1	Atténuation dans la fibre optique	11
I.5	Dispersion dans une fibre optique	12
I.5.1	types de dispersion	13
I.5.1.1	La dispersion chromatique	13
I.5.1.2	La dispersion modale	13
I.5.2	Effet de dispersion.....	14
I.6	Modulation optique.....	15
I.6.1	Modulation directe	15
I.6.2	Modulation externe.....	16
I.6.2. 1	Modulateur électro-absorbant (MEA)	17

I.6.2. 2	Modulateur de Mach- Zehnder (MMZ)	18
I.7	Les effets non linéaires	18
I.7.1	Effet Kerr	19
I.7.1.1	Automodulation de phase SPM	19
I.7.1.2	Mélange à quatre ondes FWM.....	19
I.7.2	Diffusion stimulée	20
I.8	Emetteur optique.....	20
I.9	DIOD laser.....	21
I.10	Réception.....	22
I.10.1	La photodétection	23
I.10.2	Photodiode PIN	25
I.10.3	Photodiode à avalanche APD.....	25
I.11	La technique de multiplexage.....	25
I.11.1	Multiplexage temporel (TDM, Time Division Multiplexing)	26
I.11.2	Multiplexage en longueur d’onde (WDM, Wavelength Division)	28
I.12	Conclusion	30
	Références bibliographique.....	31

CHAPITRE II : RESEAUX D’ACCES OPTIQUES

I.1	Introduction	36
II.2	Historique.....	36
II.3	Motivations	37
II.4	Structure des réseaux optiques	38
II.4.1	Réseaux cœurs	38
II.4.2	Réseaux métropolitains	40
II.4.3	Réseaux d’accès	40
II.4.4	Technologies d’accès	41
II.5	Les couches du réseau d’accès.....	42
II.6	Les réseaux optiques passifs (PON)	43
II.6.1	Qu’est-ce qu’un réseau optique passif (PON)	43
II.6.2	Architecture d'un réseau optique passif (PON)	44
II.6.3	Etude des éléments d'un réseau optique passif.....	45
II.6.3.1	OLT (Optical Link Terminal)	45

II.6.3.2	ONT (Optical Network Terminal).....	45
II.6.3.3	Coupleur optique (splitter).....	45
II.6.4	Principe de fonctionnement d'un réseau PON.....	46
II.6.5	Les débits offerts par le réseau optique passif (PON)	47
II.7	Réseaux d'accès optiques FTTH.....	48
II.7.1	Architecture des réseaux FTTH.....	48
II.7.1.1	Architecture point à point	49
II.7.1.2	Architecture point à multipoint	50
II.8	Réseau GPON	50
II.8.1	Architecture G-PON (Gigabit PON).....	51
II.8.2	Les composants d'un réseau GPON	52
II.8.3	Caractéristiques d'un réseau GPON	52
II.8.4	Les performances du réseau GPON.....	53
II.8.4.1	Le diviseur optique	53
II.8.4.2	Atténuation linéique de la fibre et portée.....	53
II.8.4.3	Le budget optique	54
II.8.4.4	Les classes d'ODN GPON	55
II.8.5	Avantages et inconvénients d'un réseau GPON.....	56
II.9	Evolution des réseaux PON ou Les futurs réseaux	57
II.10	Les nouvelles générations de réseau d'accès optique	57
II.10.1	Les 10G(E) PON.....	57
II.10.2	Le NGPON2	59
II.10.3	Les prochaines générations PON	60
II.11	Les technologies pour le NG-PON.....	61
II.11.1	TDM-PON (Time Division Multiplexing-PON).....	61
II.11.2	WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing-PON).....	62
II.12	Types de réseaux d'accès PON et Normalisations.....	62
II.12.1	Migration vers le NG-PON2.....	65
II.12.2	Pourquoi le TWDM-PON ?.....	67
II.13	Conclusion.....	70
	Références bibliographique.....	71

CHAPITRE III : L'AMPLIFICATEUR OPTIQUE A FIBRE DOPEE Erbium/Ytterbium «EYDWA »

III.1	Introduction	77
III.2	Intérêt de l'amplification optique.....	78
III.3	Principe physique d'amplificateur optique.....	79
III.3.1	L'absorption	79
III.3.2	Emission stimulée et spontanée.....	79
III.3.3	L'inversion de population	80
III.3.4	L'amplification optique	81
III.4	Système Erbium/ytterbium	81
III.4.1	Etat de l'art de l'amplification à fibre dopée Yb.....	82
III.4.2	Les fibres dopées ytterbium	82
III.4.2.1	L'ion Ytterbium : Spectroscopi.....	82
III.4.2.2	Utilisation des matériaux ytterbium dans un laser	83
III.5	Fibre micro-structurée	86
III.5.1	La fabrication	86
III.5.2	La microstructure.....	89
III.6	Le dopage Yb.....	94
III.7	Mode de pompage	96
III.8	Conclusion	99
	Références bibliographique.....	101

CHAPITRE IV : SIMULATIONS ET RESULTATS

IV.1	Introduction.....	105
IV.2	Critères dévaluations de notre système de transmission.....	105
IV.2.1	Diagramme de l'œil	106
IV.2.2	Facteur de qualité Q.....	106
IV.2.3	Taux d'erreur binaire	106
IV.3	Présentation de l'amplificateur à fibre dopée Yb	107
IV.4	liaison optique simple sans amplificateur GPON.....	108
IV.4.1	L'influence de la puissance d'entrée	108
IV.4.2	L'influence de la longueur de la fibre	109

IV.5	Introduction de l'EYDWA dans le réseau optique GPON	110
IV.6	configuration en position Booster.....	113
IV.6.1	L'influence de la longueur de la fibre en fonction du facteur Q	113
IV.6.2	L'influence de la concentration des ions Yb en fonction du facteur Q....	114
IV.6.3	L'influence de la longueur de guide en fonction du facteur Q	115
IV.7	configuration en position en ligne	116
IV.7.1	L'influence de la longueur de la fibre en fonction du facteur Q.....	116
IV.7.2	L'influence de la longueur du guide de en fonction du facteur Q	117
IV.8	configuration en position amplificateur	118
IV.8.1	L'influence de la puissance d'entrée en fonction du facteur Q	119
IV.8.2	L'influence de la longueur de fibre en fonction du facteur Q	119
IV.8.3	L'influence de la longueur de guide en fonction du facteur Q	120
IV.8.4	L'influence de la concentration des ions Yb en fonction du Q	121
IV.9	comparaison des trois configurations de l'amplificateur	121
IV.9.1	influence du facteur Q en fonction de la puissance émise.....	121
IV.9.2	influence du Q en fonction de la concentration des ions Yb	123
IV.9.3	Influence du facteur Q en fonction de la longueur du GPON	124
IV.9.4	Le diagramme de l'œil	125
IV.9.5	Densité spectrale de puissance	126
IV.9.5.1	Position amplificateur	127
IV.9.5.2	Position au milieu de la fibre	128
IV.9.5.3	Position Booster	129
IV.10	Conclusion	130
	Références bibliographique.....	132
	Conclusion générale	133
	Références bibliographique.	

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1 : Schéma synoptique de liaison optique	4
Figure I.2 : Schéma de la fibre optique	5
Figure I.3 : Fibre multi-modes à saut d'indice	6
Figure I.4: Fibre multi-modes à gradient d'indice	6
Figure I.5 : Fibres monomodes à saut d'indice.....	7
Figure I.6 : Fibres monomodes à saut d'indice.....	8
Figure I.7 : Arrangement de la préforme primaire.....	9
Figure I.8 : Canne micro-structurée, performe secondaire et FCP	10
Figure I.9 : Dispersion chromatique.....	13
Figure I.10 : Dispersion modale.....	14
Figure I.11 : Schéma simplifié d'une modulation directe de données.....	15
Figure I.12 : Schéma synoptique de la modulation externe	16
Figure I.13 : Modulateurs optique externe : (a) MZM et (b) EAM.....	17
Figure I.14 : Mélange à quatre ondes	20
Figure I.15 : Schéma d'un récepteur de données à détection directe	23
Figure I.16 : Schéma synoptique d'une photodiode PIN et d'une photodiode APD.....	25
Figure I.17 : Schéma synoptique du multiplexage TDM pour deux séquences.....	27
Figure I.18 : La technique du multiplexage.....	27
Figure I.19 : Schéma synoptique du multiplexage WDM.....	28
Figure I.20 : Principe composantes d'un réseau DWDM	29

CHAPITRE II

Figure II.1 : 60 secondes de communications IP	38
Figure II.2 : Classification des réseaux de communication optique	39
Figure II.3 : Les couches d'un réseau d'accès	42
Figure II.4 : L'architecture d'un PON	44
Figure II.5 : L'architecture du sens montant	46
Figure II.6 : L'architecture du sens descendant.....	47
Figure II.7 : L'architecture point à point.....	49
Figure II.8 : L'architecture point à multipoint.....	50
Figure II.9 : l'architecture du réseau d'accès GPON	51
Figure II.10: Architecture G-PON	52
Figure II.11 : Atténuation linéique d'une fibre G.652.D	54
Figure II.12 : Un exemple de GPON classe B+.....	56
Figure II.13 : Exemple de migration du GPON au XG-PON1.....	58
Figure II.14 : L'architecture d'un réseau NG-PON2	60
Figure II.15 : FSAN Roadmap 2.0.....	61
Figure II.16 : la technique de multiplexage TDM-PON	61
Figure II.17 : Technique de multiplexage WDM-PON	62
Figure II.18 : Les étapes de normalisation du PON.....	64
Figure II.19 : L'architecture de base du TWDM.....	68
Figure II.20 : Réutilisation des longueurs d'onde du XG-PON en TWDM	69
Figure II.21 Répartition dans les longueurs d'onde de la bande C.....	69
Figure II.22 : Répartition suivant les longueurs d'onde inférieures des bandes C et L.....	70

CHAPITRE III

Figure III.1 : Diagramme des niveaux d'énergie d'un système erbium/ytterbium	78
Figure III.2 : Principe de l'amplificateur optique	78
Figure III.3 : diagrammes d'énergie des émissions spontané et stimulé	80
Figure III.4 : Principe de l'amplificateur optique	81
Figure III.5 : Niveaux d'énergie dans une matrice vitreuse d'Yb et de néodyme.....	84
Figure III.6 : Courbe d'absorption et d'émission de l'ion Yb ³⁺ dans une matrice vitreuse	85
Figure III.7 : Illustration de la technique d'assemblage/étirage	88
Figure III.8 : Schéma de la structure d'une fibre à double-gaine	90
Figure III.9 : Illustration d'une fibre double gaine avec cœur Yb et un air-clad	91
Figure III.10 : Illustration d'une fibre micro-structurée double-gaine à large cœur dopé Ytterbium et polarisante.....	94
Figure III.11: Schéma du principe de couplage de la pompe transverse par un V.....	97
Figure III.12 : Schéma du principe de couplage de la pompe	98

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Niveaux d'énergie de l'amplificateur co-dopé Erbium / Ytterbium.....	107
Figure IV.2 : Schéma synoptique de l'amplificateur EYDWA.....	108
Figure IV.3 : variation du facteur Q en fonction de la puissance d'entrée	109
Figure IV.4: variation du facteur Q en fonction de la longueur de la fibre.....	110
Figure IV.5 : Différents placements de l'EDFA dans un réseau GPON.....	111
Figure IV.6 : La configuration du système pour 2,5 Gb/s de GPON 64 utilisateurs.....	111
Figure IV.7 : schéma bloc d'un GPON avec amplificateur position Booster	113
Figure IV.8 : variation du Q en fonction de la longueur de la fibre optique.....	114

Figure IV.9 : variation du facteur Q en fonction de la concentration des ions Yb.....	114
Figure IV.10 : variation du facteur Q en fonction de la longueur du guide.....	115
Figure IV.11 : schéma bloc d'un GPON avec amplificateur position en ligne.....	116
Figure IV.12 : variation du facteur Q en fonction de la longueur de la fibre.....	117
Figure IV.13: variation du facteur Q en fonction de la longueur du guide (m)	118
Figure IV.14 : schéma bloc d'un GPON avec amplificateur	118
Figure IV.15 : variation du Q en fonction de la puissance optique d'entrée	119
Figure IV.16 : variation du facteur Q en fonction de la longueur de fibre L.....	120
Figure IV.17 : variation du Q en fonction de la longueur du guide (m)	120
Figure IV.18 : variation du Q en fonction de la concentration des ions Yb	121
Figure IV.19 : variation du facteur Q en fonction de la puissance émise	122
Figure IV.20 : Variation du Q en fonction de la longueur du guide d'onde pour trois positions de l'amplificateur optique	122
Figure IV.21 : Variation de la concentration des ions Yb en fonction du Q pour trois positions de l'amplificateur optique	123
Figure IV.22 : Variation du facteur Q en fonction de la longueur du GPON	124
Figure IV.23 : Variation du Min de BER en fonction de la longueur de fibre pour trois positions de l'amplificateur optique	125
Figure IV.24 : Diagramme de l'œil de trois positions utilisant EYDWA avec une concentration d'Yb ($C_{Yb} = 1e + 028$) et avec une concentration d'erbium de ($C_{Er} = 1e + 028$)	126
Figure IV.25 : Ampli densité spectrale sortie de l'ampli	127
Figure IV.26 : Ampli densité spectrale entrée de l'ampli.	127
Figure IV.27 : Au milieu densité spectrale sortie de l'ampli	128
Figure IV.28 : Au milieu densité spectrale entrée de l'ampli.....	128
Figure IV.29 : Booster densité spectrale sortie de l'ampli.	129
Figure IV.30 : Booster densité spectrale entrée de l'ampli.	129

Liste des tableaux

CHAPITRE 1

Tableau I.1: Valeur typiques des paramètres de photodiode24

CHAPITRE 2

Tableau II.1: Technologie d'accès déjà déployées42
Tableau II.2 : Tableau comparatif entre les standards du PON48
Tableau II.3 : Les classes d'ODN.....55
Tableau II.4 : Systèmes PON actuellement déployés63
Tableau II.5 : Comparaison des systèmes PON actuellement déployés66

CHAPITRE 4

Tableau IV.1: paramètre des amplificateurs à fibres dopées 111
Tableau IV.2: Densité spectrale de puissance des trois positions de l'ampli 130

Abréviation

A

ATM	Asynchronous Transfer Mode
APON	ATM Passive Optical Network
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
APD	Avalanche PhotoDiode
ASE	Amplified Spontaneous Emission

B

BPON	Broadband Passive Optical Network
BIP	Bande interdite photonique

C

CW	Continuous Wave
CDMA	Code Division Multiple Access

D

DSL	Digital Subscriber Line
DL	Les diodes Laser
DEL	Les diodes électroluminescentes

E

EPON	Ethernet Passive Optical Network
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier

F

FTTH	Fiber to the Home
FTTB	Fiber to the Building
FSAN	Full Service Access Network
FWM	Four Waves Mixing
FCP	Les Fibres à cristaux photoniques

G

GPON	Gigabit Passive Optical Network
------	---------------------------------

I

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITU	International Telecommunication Union

L

LTE	Long Terme Evolution
-----	----------------------

M

MMZ	Modulateur de Mach-Zehnder
MEB	Microscope électronique à balayage

N

NGA	Next Generation Access
NG-PON	Next Generation Passive Optical Network

O

OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OLT	Optical Line Termination

ONT Optical Network Termination

ONU Optical Network Unit

ONU Unité de réseau optique

P

PON Passive Optical Network

PIN Positive Intrinsic Negative

PM Maintien de polarisation

PER acronyme anglais pour polarisation extinction ratio

R

RF Radio frequency

RTC Réseau téléphonique Commuté

S

SPM Self Phase Modulation

SOA Semiconductor Optical Amplifier

SMF La fibre optique monomode standard

T

TWDM Time and Wavelength Division Multiplexed

V

VLAN Virtual Area Network (réseau local virtuel)

W

WDM Point-to-Point WDM

Wi-Fi Wireless Fidelity

X

XG-PON 10 Gb/s Passive Optical Network

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Durant ces dernières décennies, Les réseaux d'accès optique connaissent un développement très rapide que ce soit au niveau de l'accès fixe et radio ou bien des réseaux mobiles. Les réseaux câblés à base de fibre optique ont été en forte évolution avec un impact important sur un grand nombre d'applications des domaines civils et militaires. En effet, les fibres optiques s'avèrent très intéressantes pour leur bande passante et leur débit, très supérieurs à ceux offerts par les autres technologies.

La plupart des systèmes d'accès optique déployés aujourd'hui sont basés sur les technologies Gigabit PON (Passive Optical Network). Ce sont des réseaux optiques passifs à base d'une architecture point à multipoints fonctionnant au débit de 1,25 ou 2,5 Gb/s. Pour la future demande de bande passante pour laquelle un débit de l'ordre des Gbits/s par utilisateur serait nécessaire, la technologie PON à base du multiplexage temporel TDM semble insuffisante ou moins économique à cause du débit trop élevé pour un grand nombre d'utilisateurs. Donc, l'utilisation de la technologie de multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing) dans le réseau d'accès optique est une solution très prometteuse pour pouvoir monter à un débit très élevé. La forte capacité de montée en débit du WDM- PON est expliquée grâce au fait que la communication avec chaque utilisateur est dédiée à une longueur d'onde. Pour cette raison, la technologie WDM-PON apparaît actuellement comme un des candidats les plus potentiels pour la future génération PON après le 10 Gb/s TDM-PON.

L'objectif de cette thèse est d'étudier le déploiement des amplificateurs optiques dans les réseaux d'accès .Dans ce cadre, nous sommes intéressés sur les réseaux optiques et effet des amplificateurs à fibre dopée à l'ytterbium (EYDWA).

Le premier chapitre décrit de manière générale le principe d'une liaison numérique par la fibre optique. Nous citons les caractéristiques des composants qui interviennent dans ce type de liaison, nous verrons aussi dans cette partie les avantages et les inconvénients du support de transmission (fibres optiques) ainsi que ses applications.

Le deuxième chapitre sera consacré aux réseaux d'accès optiques avec les différentes architectures FTTx qui existent, ainsi que le fonctionnement d'un 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.

Le troisième chapitre parle sur Les amplificateurs à fibre dopée à l'ytterbium (EYDWA) qui sont une grande variété d'applications expérimentales et industrielles. Les études sur les EYDWA sont nombreuses; Cependant, deux aspects des EYDWA sont abordés dans cette these : le développement de systèmes EYDWA pour certaines applications grâce à la simulation de systèmes d'amplification à double longueur d'onde et un problème important connu sous le nom d'effet photodéchanteur lors de l'utilisation des YDFA. Bien que seuls des travaux préliminaires aient été réalisés dans cette mémoire, quelques idées uniques sont présentées et pourraient constituer une référence pour les travaux futures.

Le quatrième chapitre a pour objectif de présenter les résultats de simulations ainsi que les différentes interprétations avec le logiciel utilisé.

CHAPITRE I

Principe d'une liaison
par fibre optique

CHAPITRE I : PRINCIPE D'UNE LIAISON PAR LA FIBRE OPTIQUE

I.1	Introduction	4
I.2	Fibre optique	4
I.2.1	Catégories des fibres optiques	5
I.2.1.1	Fibre multi-modes à saut d'indice	5
I.2.1.2	Fibre multi-modes à gradient d'indice.....	6
I.2.1.3	Fibre monomode.....	6
I.3	Fibre a cristaux photoniques	7
I.3.1	Définition et historique de la fibre à cristaux photonique	7
I.3.2	Fabrication de la fibre à cristaux photonique	8
I.4	Caractéristiques des fibres optiques.....	11
I.4 .1	Atténuation dans la fibre optique	11
I.5	Dispersion dans une fibre optique	12
I.5.1	types de dispersion	13
I.5.1.1	La dispersion chromatique	13
I.5.1.2	La dispersion modale	13
I.5.2	Effet de dispersion.....	14
I.6	Modulation optique.....	15
I.6.1	Modulation directe	15
I.6.2	Modulation externe.....	16
I.6.2. 1	Modulateur électro-absorbant (MEA)	17
I.6.2. 2	Modulateur de Mach- Zehnder (MMZ)	18
I.7	Les effets non linéaires	18
I.7.1	Effet Kerr	19
I.7.1.1	Automodulation de phase SPM	19
I.7.1.2	Mélange à quatre ondes FWM.....	19
I.7.2	Diffusion stimulée	20
I.8	Emetteur optique.....	20
I.9	Diode laser.....	21
I.10	Réception.....	22
I.10.1	La photodétection	23
I.10.2	Photodiode PIN	25
I.10.3	Photodiode à avalanche APD.....	25
I.11	La technique de multiplexage.....	25
I.11.1	Multiplexage temporel (TDM, Time Division Multiplexing)	26
I.11.2	Multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division)	28
I.12	Conclusion.....	30
	Références bibliographiques	31

I.1 Introduction

A ce moment, la technologie la plus active et la plus répandue se base sur les systèmes de transmission par fibres optiques, les systèmes de transmission à très haute capacité est désormais possible. On présente dans ce chapitre des généralités sur la fibre optique qui est utilisée dans les réseaux à grande distance et à grande capacité, puisqu'elle joue un rôle important en comparant avec d'autres techniques dans le domaine des réseaux d'accès, pour le raccordement des clients a des opérateurs.

I.2 Fibre optique

L'arrivée de la fibre optique a pleinement changé le monde des télécommunications, un système de transmission optique est composé par les éléments suivants [1] :

- Une source optique (DEL ou LASER).
- Une ligne de transmission (fibre optique, amplificateur).
- Un détecteur optique (PIN ou APD).

La figure I.1 explique la composition d'une liaison par fibre optique.

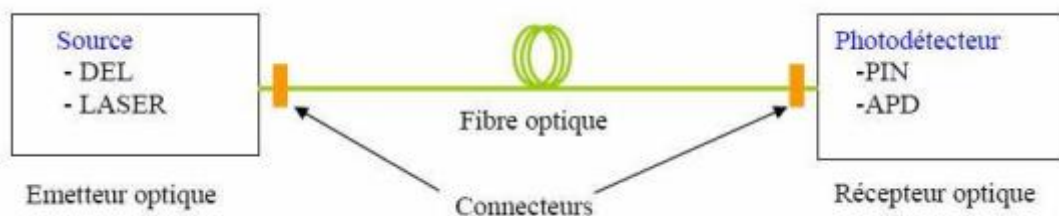


Figure I.1 : Schéma synoptique de liaison optique.

Cette chaîne de transmission simule le support de diffusion de la lumière (canal de la communication) dans les liaisons optiques elle est apparue très captivante pour l'usage des systèmes des télécommunications. C'est un support de transmission dont il présente de nombreux avantages qui sont [1] [2] :

- Performances de transmission
- Avantages de mise en œuvre
- Sécurité électrique

- Sécurité électromagnétique
- Avantage économique

Les fibres optiques sont des guides d'ondes diélectriques circulaires transportent de l'énergie et de l'information optique, qui ont un cœur central encerclé par une gaine concentrique tenant un indice de réfraction légèrement inférieur à celui de cœur. Les fibres optiques sont fabriquées essentiellement de silice pure hautement purifiée avec des dopants modificateurs d'indice, tels que GeO_2 [3]. A l'aide d'un revêtement protecteur pour diminuer la diaphonie entre fibres attenantes et la micro-courbure, augmentant les pertes qui lorsque les fibres sont adaptées contre des zones ternies. Les fibres sont fréquemment réunies dans des câbles afin d'être plus protégées contre les conditions ambiantes [3].

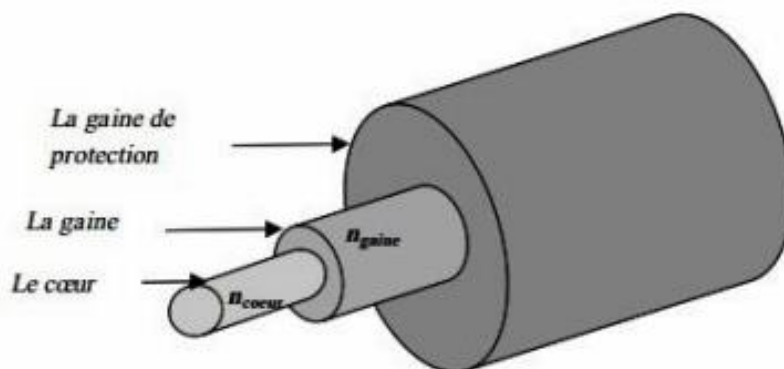


Figure I.2 : Schéma de la fibre optique.

I.2.1 Catégories des fibres optiques

Selon les formules de multiplications qu'elles utilisent, les fibres optiques sont divisées en 3 modèles:

I.2.1.1 Fibre multi-modes à saut d'indice [3]

Le cœur et la gaine signalent des signes de réfraction divers et stables. Le couloir d'un milieu vers l'autre est indiqué par un saut d'indice. Le faisceau lumineux appliqué à l'entrée de la fibre va atteindre la sortie avec des passages différents, ce qui s'explique par des temps de diffusion différents et donc une répartition du signal transmis. Ce phénomène est nommé dispersion modale.

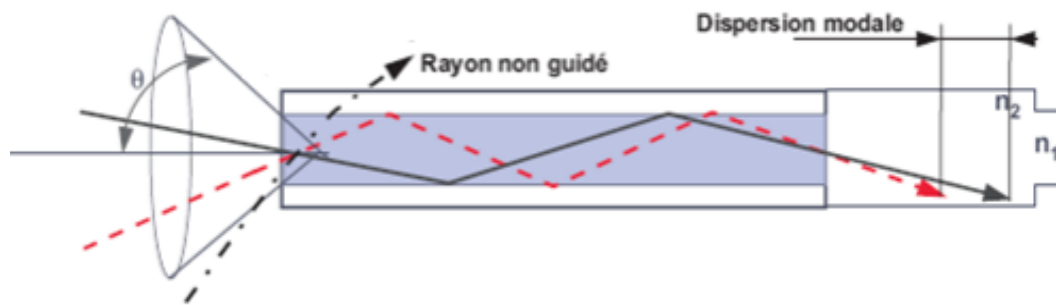


Figure I.3 : Fibre multi-modes à saut d'indice.

I.2.1.2 Fibre multi-modes à gradient d'indice [4]

Le cœur se définit par un indice flottant, il s'affaiblit suivant une loi expressive de l'axe jusqu'à l'interface cœur- gaine, cela veut dire que la célérité devienne très grande un parcours plus long est traversé plus rapidement, et cela mène a la de diminution la dispersion modale.

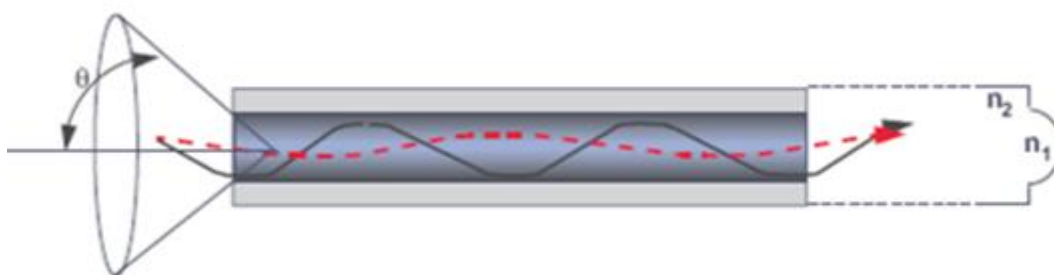


Figure I.4: Fibre multi-modes à gradient d'indice.

I.2.1.3 Fibre monomode [4]

Elle permet d'avoir une unique façon de propagation. Le passage de propagation est seul aussi parallèle par apport à l'axe de la fibre. Théoriquement le signal introduit en entrée abouti la sortie sans aucune dégradation. C'est ce modèle de fibre qui montre les plus grandes performances.



Figure I.5 : Fibres monomodes à saut d'indice.

I.3 Fibre a cristaux photoniques

I.3.1 Définition et historique de la fibre à cristaux photonique [5]

Les Fibres à cristaux photoniques (FCP) sont une partie des fibres optiques formées d'un accommodement de trous d'air parallèles à l'axe de diffusion dans d'une matrice de silice, duquel les toutes initiales ont été présentées par Kaiser et al. Aux Bell Labs en 1974. Le but était à l' instant d' reculer un robuste guidage dans un cœur de silice enrobé d'une gaine optique à très excellente proportion d'air. Pourtant ces fibres, trop multi-modes, n'ont pas stimulé d'importance originale dans l'union scientifique car elles n' présentaient pas de amélioration sensible en termes de développement.

Les études sur les Fibres à cristaux photoniques ont été poursuivies dans les années 90, afin de terminer des constitutions à bande interdite photonique (BIP). Ils ont brusquement conduit à installer en lumière des propriétés imprévues dans les Fibres à cristaux photoniques, même en la pénurie d'effet BIP. L'étude des propriétés la et leur production qui est à la source de l'extraordinaire enthousiasme dont les Fibres à cristaux photoniques réalisent le but depuis longtemps.

Les Fibre à cristaux photoniques sont partagées en deux groupes différents de fibres :

- Fibre à cristaux photoniques à guidage par l'indice, guide la lumière par une réflexion intérieure totale entre le cœur plein et la gaine avec des trous d'air divers.
- Les deuxièmes utilisent une structure absolument périodique présentant un effet de bande interdite photonique (BIP) à la longueur d'onde de travail pour guider la lumière dans un cœur à faible indice.

La figure I.6 illustre la coupe transverse d'une Fibres à cristaux photoniques.

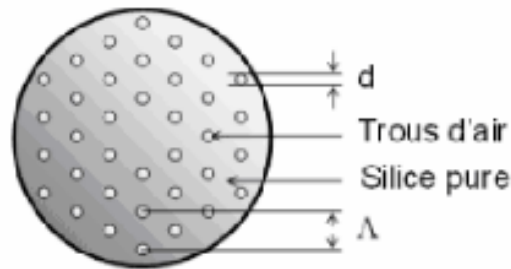


Figure I.6 : Fibres monomodes à saut d'indice.

La fibre à cristaux photonique à guidage par l'indice, aussi nommé fibres à trous ou fibres optique microstructure, disposent une propriété spécialement plaisante de la haute contrôlabilité de la dispersion chromatique en changeant le diamètre de trous et leurs vide.

I.3.2 Fabrication de la fibre à cristaux photonique [5]

La FCP a été réalisée dans les laboratoires de l'Université de Bath en 1996, avec la méthode de l'assemblage étirage qui comporte à étendre à grande température un accord de capillaires et de barreaux de silice.

Le marché de création de la fibre à cristaux photonique se fait en certaines étapes :

La première comporte à achever un accommodement de tubes capillaires à l'interne d'un tube de maintien, comme il est représenté dans la figure I.7. Ces capillaires sont triés en fonction de leurs diamètres interne et externe. Ils résultent soit du commerce soit d'étirages réalisés au niveau du laboratoire à partir des tubes de très grande diamètre. Un ou certains capillaires au milieu sont changés par des barreaux de silice afin de constitué le cœur. On s' prévoit à ce que l'unité de trous et leur position dans cet accommodement soient conservées dans la fibre étendue. Malgré cela les conditions d'allongement (température, pressions interne et externe) peuvent changer la taille et le contour de ces trous.

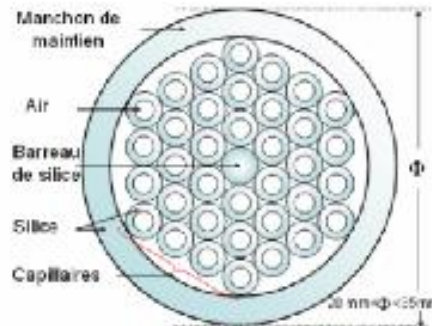


Figure I.7 : Arrangement de la préforme primaire.

Alors que la conformité de l'arrangement ne soit pas obligatoire au gain d'un guidage RTI, elle est étudiée pour deux causes. Le premier est que dans une attribution incertaine de trous présente des zones de silice plus vastes susceptibles de se assimiler comme aussi de "cœurs" avec lequel la lumière peut se accoupler. D'autre part, il est simplement douteux qu'une fibre concevant un arrangement de trous quelconque montre des caractéristiques de diffusion pouvant répondre à un cahier des charges originellement fixé. Différemment dit, la fibre faut apparenter le plus parfaitement possible aux structures réglementaires sur lesquelles sont reposées les simulations numériques qui admettent, apprenant les caractéristiques de propagation cibles, de décrire les paramètres géométriques à arriver. Le trou interstitiel entre les capillaires présents dans l'accommodement principal faudra être rebouché lors de l'allongement. C'est pour ça, on chauffe une extrémité de cet arrangement afin de émettre solidaires les capillaires mais aussi de les reboucher. On effectue ensuite une action de verrerie qui admet à enfermer une extrémité du manchon de tenue dans une ampoule de silice afin de pouvoir prouver ensuite la pression différentielle entre l'interne des capillaires et les interstices lors du fibrage. L'ensemble forme la préforme première depuis de laquelle vont être étalées des cannes micro-structurées aux dimensions externes millimétriques figure I.8. Cette première diminution d'échelle homothétique est exécutée grâce à une tour de fibrage équipée d'un système d'entraînement par galets et d'un dispositif de coupe de capillaires. Le contrôle des dimensions (diamètre extérieur des cannes, pas et diamètre des trous de la structure interne) repose sur le contrôle de la rhéologie de la silice l'ors de l'étirage. Les vitesses de descente de la préforme et de

fibrage, la température du four et les différences de pression dans la préforme sont aussi de paramètres qui doivent être dominés avec régularité pour parvenir une canne micro-structurée de qualité indispensable.

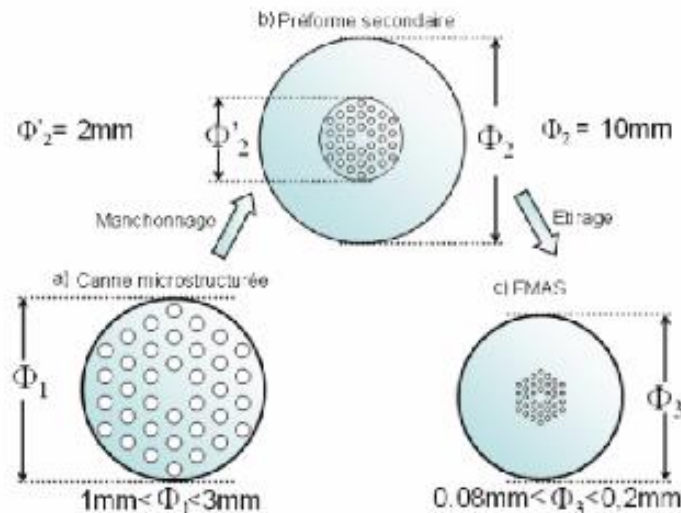


Figure I.8 : Canne micro-structurée, préforme secondaire et FCP.

La deuxième étape consiste à manchonner la canne micro-structurée dans un tube à bordure abondant pour établir la "préforme secondaire" d'environ dix millimètres de diamètre (Figure I.8). Finalement celle-ci est étendue sur une deuxième tour de fibrage qui arrange d'un tambour d'enroulement et du système d'enduction qui admet de garder la fibre par une gaine polymère. La fibre obtenue mesure typiquement 125um de diamètre extérieur (Figure I.8).

Ce fibrage en deux parties est obligatoire pour arriver un rapport d'échelle grave entre les motifs de la préforme première et ceux de la fibre.

Aux longueurs d'onde de transparence de la silice, le diamètre des trous dans la gaine faut être de l'ordre du micron, effectivement submicronique, pour avoir les caractéristiques de propagation voulues. Celui-ci montre que le rapport d'échelle entre les trous des capillaires de la préforme primaire et ceux de la fibre doit être très haut (supérieur à 1000). C'est pour cela le fibrage en deux étapes avec remanchonnage de la canne micro-structurée intermédiaire est une action nécessaire.

À la seconde étape de fibrage, la température montre comme un indice très critique, qui doit être surement vaincu. Ensuite, à température trop basse, la trop élevée viscosité de la silice peut mener à la fissure de la fibre. Tant que la température augmente, la viscosité de la silice diminue et la pression des canaux d'air augmente, ce qui a un fort influe sur la dimension des trous dans la fibre finale.

La figure I.8 illustre la coupe transverse d'une des fibres effectuée. Ses paramètres géométriques sont $d=2\mu\text{m}$ et $\ddot{E}=3,25\mu\text{m}$. Le diamètre extérieur de la fibre est de $125\mu\text{m}$. Elle comprend 4 couronnes de trous dans la gaine.

L'exécution des la fibre à cristaux photonique nécessite donc le contrôle de paramètres physiques (température, pression) qui sont interdépendants. L'évolution de fabrication décrit dans ce paragraphe se met aussi bien aux FCP BIP qu'aux FCP RTI.

I.4 Caractéristiques des fibres optiques

I.4.1 Atténuation dans la fibre optique

La fibre optique s'est exigée comme le meilleur moyen de transfert de l'information au vu de sa robustesse, ses propriétés mécaniques de endurance aux torsions et tractions, sa faible épaisseur mais surtout sa faible diminution attribuée au signal optique codé et déplacé via une chaîne d'éléments composée essentiellement de tronçons de fibre et d'amplificateurs optiques. Cette dernière induit certainement des pertes minimales en comparaison avec celles inférées par les câbles coaxiaux en cuivre. Malgré cela, elles ne sont pas nulles et ont donc devenir pénalisante pour de longues distances de diffusion. [6]

La diminution est automatiquement un des paramètres les plus essentiels pour une fibre optique, car c'est le facteur qui limite le plus fréquemment la distance de propagation maximale pour une liaison optique. Cela convient à la perte de puissance du signal optique se propageant dans la fibre de longueur L et il est caractérisé par la diversité entre la puissance injectée P_S et la puissance en sortie P_S . En effet, elle ressemble à une diminution de la puissance du signal fournis attribuée par l'équation [7]

$$P_s = P_e . e^{-\alpha L} \quad (I-1)$$

Tells que le coefficient d'atténuation linéique de la fibre exprimé en dB/km. Pour les fibres monomodes utilisé dans les réseaux optiques, la valeur de ce coefficient est admise entre 0,20 et 0.25 dB/km sur la fenêtre de transmission centrée sur 1550 nm. L'atténuation est un facteur important qui définit la distance de transmission possible entre émetteur et récepteur sans amplificateur.

La réduction dans la fibre a différentes origines [8]

- Pertes par absorption moléculaire: elles sont exposées par l'absorption des rayons optiques par
- les silices et les impuretés contenues dans celle-ci.
- Pertes par micro courbures: elles sont nécessitées particulièrement aux techniques de réalisation elles se traduisent par l'irrégularité de l'interface cœur-gaine.
- quand 'un faisceau de rayons optiques abouti l'interface coeur- gaine qui montre des accidents, chaque rayon incident est caractérisé par sa trajectoire qui est exigée avec un point de réflexion. En effet, certain rayon (θ incidente $\geq \theta$ critique) sont transformé en d'autre rayons menant ainsi des pertes de conversion, par contre d'autres rayons dominant se réfracter dans la gaine (θ incidente $< \theta$ critique) et produire un rayonnement.
- Pertes avec courbures: lorsqu'on courbe une fibre, l'angle d'incidence amoindris, ce qui a pour conséquence soit une conversion de mode, soit un rayonnement dans la gaine.
- Pertes par épissurage: elles sont falloir au couplage.

I.5 Dispersion dans une fibre optique [9,10]

Dans la télécommunication optique la dispersion s'explique par une augmentation des impulsions au cœur de leur propagation, cet accroissement limite la bande passante du canal de fibre optique.

La silice est un matériau appelé dispersif car son indice de réfraction « n » appartient de la longueur d'onde λ . Il en dépend que lorsqu'une impulsion se disperse

dans une fibre optique, elle soutient un phénomène de dispersion qui s'explique par une répartition temporelle de celle-ci.

I.5.1 types de dispersion

I.5.1.1 La dispersion chromatique

Provient de la variation de vitesses de groupes des plusieurs composantes spectrales du signal de transmission.

Ce genre d'un signal optique s'exprime par une distorsion du signal, et origine un étalement temporel des impulsions au cours de leur diffusion dans la fibre optique. Cette dispersion présente dans toutes les fibres optiques qu'elle soit, monomode ou multi-modes. Elle est nécessitée au changement de l'indice de réfraction par rapport à la longueur d'onde, du fait de la dispersion de temps de propagation, une impulsion courte infiltrée à l'entrée de la fibre va subir un élargissement comme il est montré dans la figure ci-dessous :

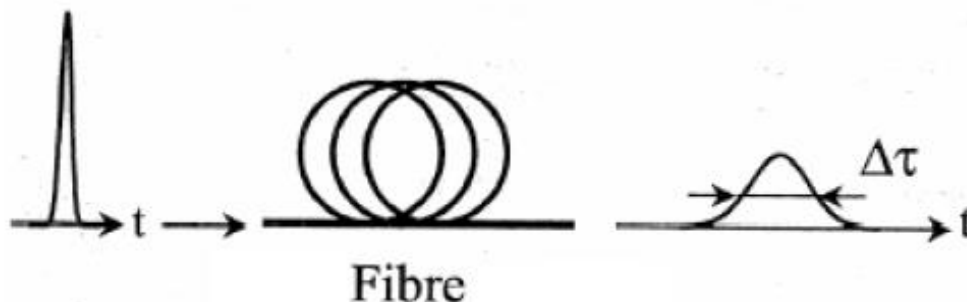


Figure I.9 : Dispersion chromatique.

I.5.1.2 La dispersion modale

Provient de la différence de temps de propagation ainsi que des nouvelles modes qui se propage dans la fibre multi-modes.

La dispersion est une grandeur très élevée pour les télécoms à grandes distances. Les fibres monomodes en silice proposent présentement la principale fiabilité et la plus haute bande passante comme toute autre fibre, c'est obligatoires pour une propagation d'un signal sur de longues des distances ou pour le WDM.

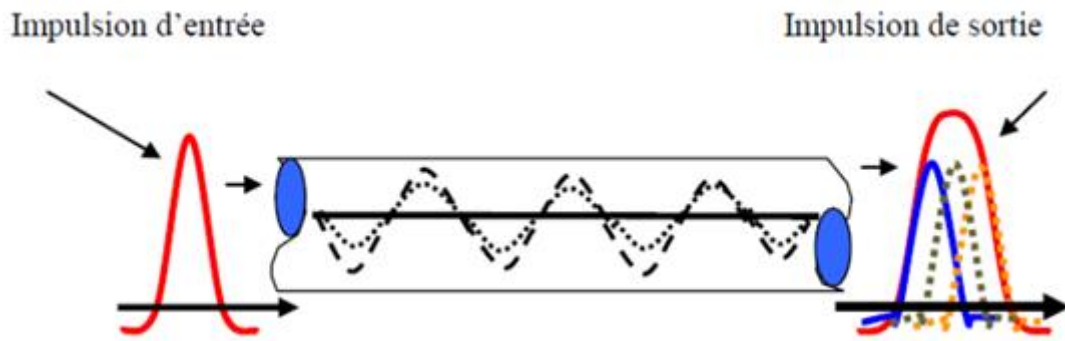


Figure I.10 : Dispersion modale.

La fibre optique multi-modes dans laquelle de plusieurs de modes peuvent se émettre, chacun suit un trajet opposé, l'énergie lumineuse attribuée dans la fibre se répartie dans les différents modes, et les vitesses de groupe sont différentes de manière qu'une impulsion qui se propageant dans cette fibre est élargie. L'ensemble des retards entre les divers rayons constituant le signal lumineux définis en réception une distorsion du signal électrique arrivé par le convertisseur optique et électrique ; cette distorsion est appelée la dispersion modale, qu'on trouve dans les fibres multimodales et moins dans les fibres multi-modes à gradient d'indice.

I.5.2 Effet de dispersion

Dans le domaine des télécommunications optiques, le signal est formé d'impulsions déterminées par quelque largeur spectrale serrées dans leur temps bit. Cela veut expliquer qu'il n'est pas seulement monochromatique mais se compose de nombreuses composantes spectrales.

Et, comme l'indice de réfraction dans un milieu, telle la fibre optique, varie avec la longueur d'onde du signal qui le explore, les constituantes spectrales de ce signal vont s'y émettre avec des vitesses divers. Elles sont donc retardées les unes par rapport aux autres ce qui déduit le caractère exprime « dispersif » de la fibre. Certaines fréquences arrivent ainsi à l'avant de l'impulsion, d'autres à l'arrière. Il s'opère alors une élévation temporelle des impulsions du signal. Cette amplification limite le débit, en nous force à augmenter le délai entre deux impulsions. [19]

I.6 Modulation optique

Afin d'insérer les informations dans des systèmes numériques optiques, il faut les graver sur le signal à envoyer dans la fibre, c'est ce que l'on nomme une modulation, qui est une activité indispensable au niveau de tous les systèmes de transmission. Afin d'exécuter la modulation d'émission, on a deux étapes à suivre:

I.6.1 Modulation directe

Ce genre de modulation approuve une modification dynamique du spectre, nécessitée à la modification amplitude fréquence (désignée par le terme anglo américain de chirp) et du diagramme de rayonnement, à l'aide des effets néfastes aux hautes vitesses de modulation [11]. La modulation du courant qui franchit le laser emporte immédiatement la modulation de la lumière exprimée par celui-là. La présente technique de modulation est désignée « modulation directe ». Il attendrit d' consigner les données sur l'approvisionnement du laser, c'est-à-dire sur le commun dirigé dans le laser à semi-conducteur, afin de moduler en amplitude le signal exprimé par celui-ci. [12]

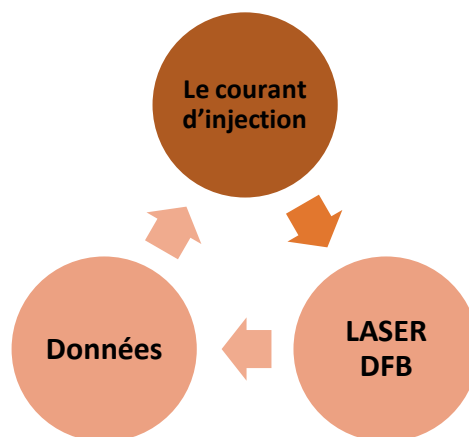


Figure I.11 : Schéma simplifié d'une modulation directe de données.

La modulation rectiligne, plus fondamental et moins ruineuse est encore très utilisé, si les données sont quelques gigabits/s, mais au-delà des 5 Gbits /s, la modulation extérieur est obligé pour avoir une bonne qualité de transmission. [13]

I.6.2 La modulation externe

Ce genre de modulation comporte d'écrire les données électriques sur un signal optique stable et constant. Elle est arrivée en modulant immédiatement le faisceau lumineux en sortie du laser et non pas le courant d'alimentation à l'entrée du laser. De ce fait les défauts de la modulation directe qui retombent au laser ne seront plus actuels dans le signal optique. [14]

La modulation externe sera donc réalisée sur une onde pure et constante et stable par un seul élément obligatoire qui est le modulateur extérieur. Le module d'émission est composé dans ce cas, d'une diode laser exprimant un signal continu, suivie d'un modulateur externe commandé quant à un driver duquel le rôle est de fixer les niveaux d'une tension $v(t)$ modulée et symbolique de l'information à donner. Cette tension habituée au modulateur a pour propriété de transformer le facteur de transmission en intensité à la sortie. [6]

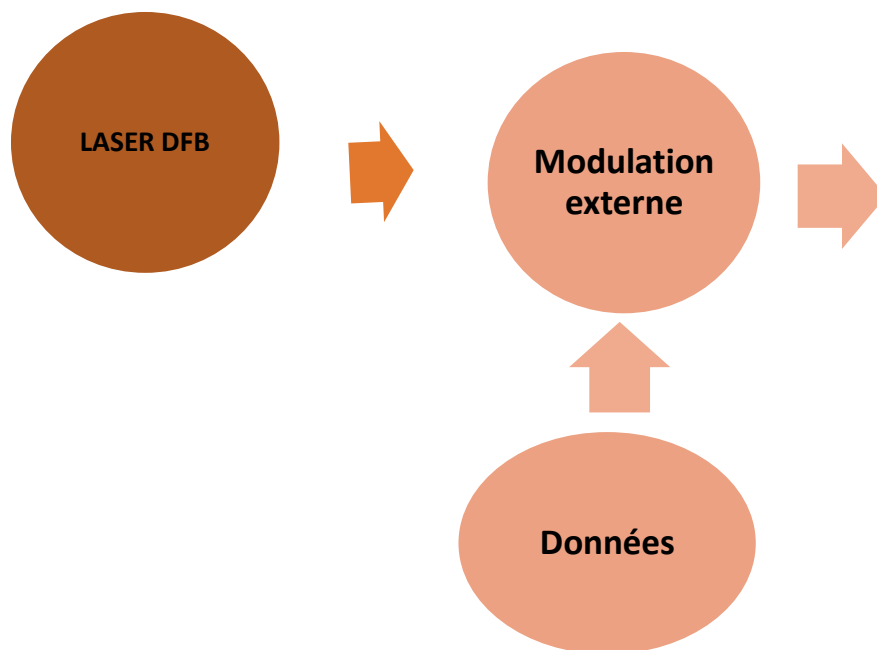


Figure I.12 : Schéma synoptique de la modulation externe.

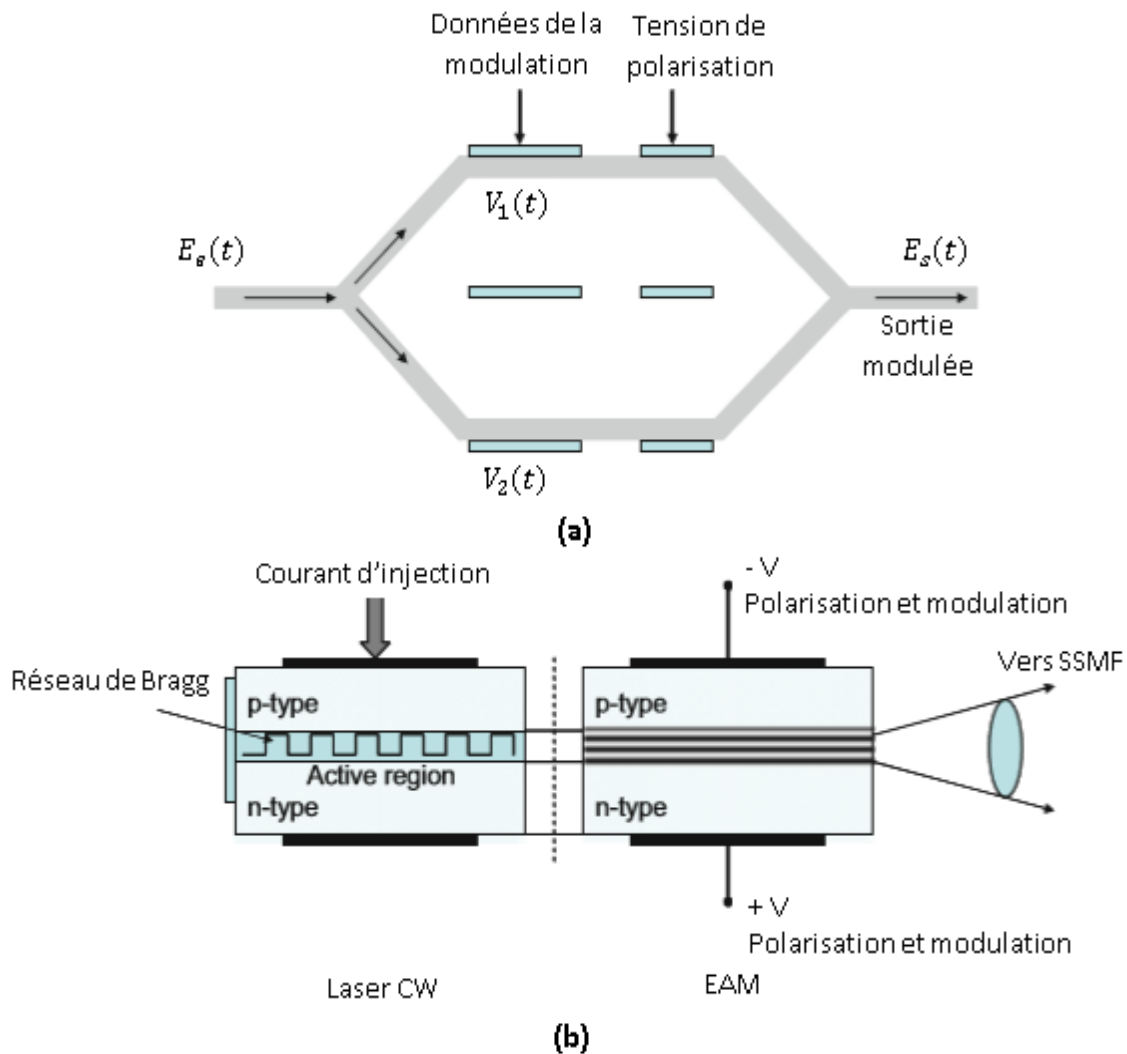


Figure I.13 : Modulateurs optiques externes : (a) MZM et (b) EAM [15].

Deux types principaux de modulateurs externes sont employés aujourd'hui : les modulateurs de Mach-Zehnder « MZ » sur Niobate de Lithium (LiNbO_3) et les modulateurs électro-absorbants « MEA ».

I.6.2.1 Modulateur électro-absorbant (MEA)

Les modulateurs à électro-absorption d'origine d'un acte qui détend sur les transmutations du spectre d'absorption d'un matériau semi-conducteur éprouvèrent à un champ électrique [1]. Cet effet se nomme l'effet Franz-Keldysh dans un matériau massif et d'effet Stark serré dans un matériau quantique. Une caractéristique particulièrement intéressante des modulateurs à électro-absorption est qu'ils peuvent

être facilement assimilés avec les diodes lasers pour créer des sources optiques compactes et à très large bande de modulation [8 ,16].

I.6.2.2 Modulateur de Mach- Zehnder (MMZ)

Les modulateurs de Mach-Zehnder sont des modulateurs électro-optiques que l'on pose immédiatement en sortie du laser. Ils sont couramment très utilisés pour les applications des télécommunications qui ont larges bandes. Les effets électro-optiques sont à la base de ce genre de modulateurs, à savoir que l' indice de réfraction de quelque matériau peut être modifié à l'aide d'une application d'un champ électrique. Ce phénomène ce qui nomme effet Pockels si les effets électro-optiques sont linéaires, c'est-à-dire que le changement de indice est relatif au champ qui est déjà utilisé, et effet Kerr quand elle est proportionnelle au carré du champ. [17]

Les performances d'un modulateur externe sont mesurées à l'aide de leur taux d'extinction (ER : Extinction Ratio) et sa bande passante. Ordinairement, les deux modulateurs ont une bande passante très grande environ de 60 GHz pour l'EAM et de 75 GHz pour le MZM. Mais, le taux d'extinction de l'EAM n'est pas aussi grand que celui du MZM, ce qui convient à environ 25 dB par rapport à 10 dB pour l'EAM [18]. De ce fait malgré qu'il soit cher, le MZM est le bon choix pour les fournissions à haut débit à longue distance.

I.7 Les effets non- linéaires

Un signal optique se propageant dans une fibre optique monomode, peut provoquer un nombre important d'effets non linéaires. Avec l'emploi dans les systèmes de communication par fibres optiques.

Actuellement les systèmes de transmission à haut débit utilisent des amplificateurs de puissance, ce qui oriente à des puissances transmises représentent des effets non linéaires [19].

I.7.1 Effet Kerr

L'effet non linéaire prépondérant dans une fibre optique est l'effet Kerr optique, il provient au rapport de l'indice de réfraction à l'intensité « E » du champ optique se divulguant dans la fibre. Il peut alors s'exprimer par la forme d'une fonction non linéaire, du champ électrique E (anisotropie du matériau) [10, 19,20].

$$\tilde{n} = n_1 + n_2 |E^2| \quad (I-2)$$

Tell que :

- n_1 : Représente l'indice de réfraction linéaire de la fibre ;
- n_2 : Représente l'indice de réfraction non-linéaire ;
- E : Représente l'intensité du champ optique dans la fibre.

Ce rapport d'indice de réfraction de l'intensité du signal est à la source de quelque effets non-linéaires est le phénomène d'auto-modulation de phase (SPM: Self Phase Modulation) où les fluctuations de la puissance optique articulent la phase du signal créant une augmentation du spectre. La non-linéarité induit aussi à une inflexion de phase croisée (XPM : Cross Phase Modulation), ainsi que des phénomènes sous le nom de mélange à quatre ondes (FWM : Four Waves Mixing) origine d'intermodulation entre les divers canaux d'un système de transmission utilisant de nombreuses longueurs d'ondes. [13]

I.7.1.1 Auto-modulation de phase SPM [3]

Le changement de l'indication de réflexion en fonction de la puissance expose directement dans la fibre, indique une modulation de phase qui dépends de la distance parcourus, sous l'effet d'une dispersion chromatique qui se développé par un élargissement de l'impulsion et donc la création d'interférences entre symboles.

I.7.1.2 Mélange à quatre ondes FWM [21]

La fusion à quatre ondes c'est un effet non linéaire qui dans les fibres optiques quand le signal est de forte puissance. Pour cela il se réalise par un effet qui participe

au moment où la puissance des signaux est suffisante pour que l'amplificateur remue au voisinage d'une saturation.

Lorsque deux porteuses, de fréquences voisines $V1$ et $V2$ sont amplifiées simultanément, il apparaît du fait de l'explication non linéaire de l'amplificateur, deux nouvelles fréquences $V3$ et $V4$, qui simultanément avec les canaux proches **I-1**

Tel que :

$$V3 = 2V1 - V2$$

$$V4 = 2V2 - V1$$

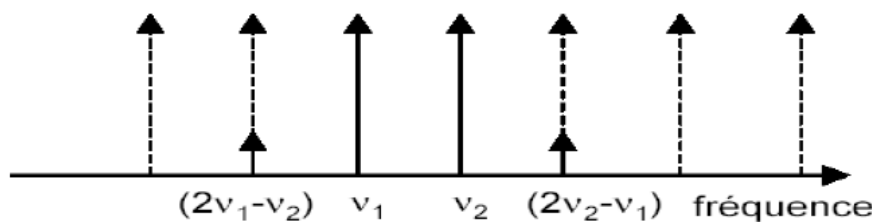


Figure I.14 : Mélange à quatre ondes.

I.7.2 Diffusion stimulée

La seconde catégorie d'effets non linéaires évoquée et qui engendre des pertes de puissances est représentée par les diffusions stimulées, elles proviennent d'interactions entre l'onde optique se propageant dans la fibre et les modes de vibration du verre. Ces effets se traduisent par un transfert partiel d'énergie du champ optique vers le centre de diffusion. Deux classes de diffusions stimulées peuvent être distinguées : les diffusions de Raman et celles de Brillouin stimulées [20].

I.8 Emetteur optique

L'émetteur optique est une méthode qui a pour rôle de transformer l'énergie électrique en énergie optique avec un rendement convenable et encore plus, il assure un bon couplage avec la fibre. Pour être exploitable, avec une certaine qualité, le signal lumineux doit être supérieur à un certain seuil de puissance et doit montrer une largeur de bande minime.

Dans le domaine de télécommunications optiques, il est nécessaire d'utiliser des bandes passantes de plus en plus larges, il impose le choix des spectres réduits telles que les diodes Laser (DL) et les diodes électroluminescentes (DEL). Ces deux sources sont fabriquées à partir de jonctions PN concentrées en direct. La source d'émission est due à la recombinaison des paires électrons trou. [8].

Les systèmes de propagation par fibre optique sollicitent des émetteurs optiques devant remplir certaines conditions [1, 16]:

- Puissance d'émission importante, coût raisonnable et faible dimension ;
- Fonctionnement à la température ambiante avec une longue durée de vie ;
- Largeur spectrale relativement étroite (pour limiter la dispersion chromatique);
- Capacité à énoncer immédiatement la lumière émise en influant sur le courant.

L'émetteur optique transforme le signal électrique en un signal optique et lance le signal optique produit dans la fibre optique. L'émetteur optique assimile un laser à onde poursuis (Continuous Wave (CW) laser), un signal OFDM RF et un modulateur MZM optique.

I.9 Diode laser

Le terme laser, vient de l'expression anglaise (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), indique amplification de lumière par émission excitée de diffusion. Le phénomène laser ne fut prouvé qu'en 1960 par Mainman en utilisant un barreau de rubis. Deux relations dominant synthétiser cet effet : amplification et contre-réaction. Un laser est un dispositif qui exprime de la lumière grâce au phénomène d'émission excitée, deux conditions bien éprouvées nécessitent être réalisées afin de conforter cette émission et dominer l'effet laser [22, 23] :

- Il faut qu'il possède assez d'électrons dans l'état d'énergie supérieure, lorsque ceci a lieu, on obtient une inversion de population. Cette inversion est achevée par l'action de pompage électrique.
- Il faut que le nombre de photons incidents spontanés prévienne un certain seuil. Pour cela, on les isole au sein du semi-conducteur dans une cavité résonante.

L'option des sources optiques s'est soutenu sur les émetteurs à semi-conducteur à cause de leurs largeurs spectral adapté avec celles du cœur des fibres optiques, de facilité de liaison que l'on a à détacher directement la lumière généré en remuant sur le courant, de leur spectre optique proportionnellement étroit et de leur faible consommation énergétique. Donc la diode laser est la source la plus ajustée pour les télécommunications optiques car elle admet d'avoir le meilleur rendement de couplage optique avec la fibre. [6]

L'activité primordiale de la photodiode dans une liaison de communication à fibre optique est de transformer la puissance du signal optique en un courant électrique nommé photo-courant. Elle absorbe les photons du signal optique rentrant et de les transformer en un courant électrique.

I.10 Détection

Si l'écriture des données sur un signal lumineux s'exploit de plusieurs méthodes, donc sa récupération en sortie, elle aussi, peut être faite de différentes façons dont le photodétecteur reste le constituant obligatoire pour toute émission (conversion optique électrique). On différencie pour cela deux procédés:

- La découverte homogène (détection hétérodyne et homodyne), dans lesquelles la porteuse optique est détachée en amplitude, en morceau ou en fréquence et démodulée dans un détecteur qui achève une activité de mélange.
- La détection directe est exécutée grâce à une photodiode changeant les fluctuations de puissance optique en fluctuations de courant électrique. C'est ce deuxième procédé qui sera étudiée par la suite en vue de sa facilité par relation à la réception cohérente, surtout avec l'apparition des amplificateurs à fibre dopée et les filtres optiques admettant ainsi de parvenir en découverte directe des performances similaires. [12]

Le module de réception est la finale étape de la chaîne de transmission, il a pour but d'acquérir le signal optique résultant de la fibre et le transformer en un signal électrique pour en détacher les données attribuées. Bienfait à son gros impact, de

plusieurs efforts ont été équipés pour le exprimer de plus en plus performants. Ce module est composé de nombreux blocs fonctionnels. On y retrouve trois parties:

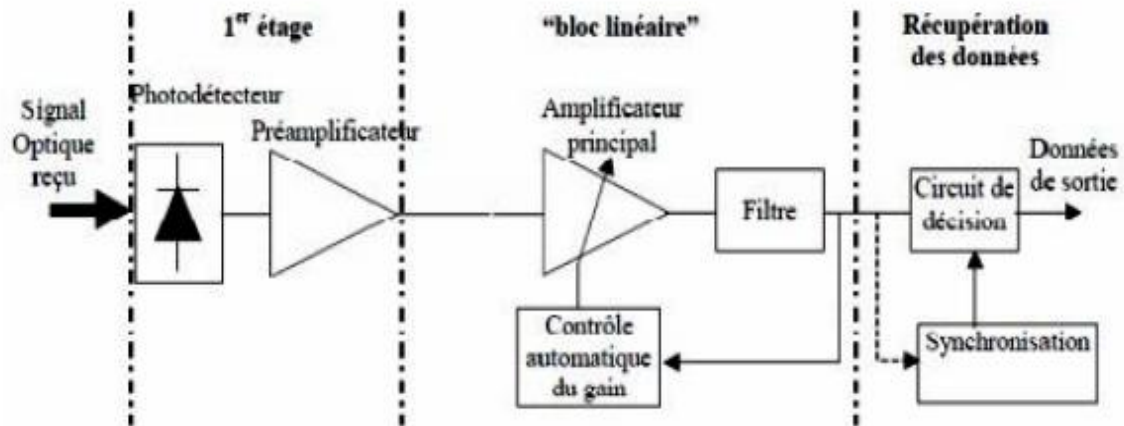


Figure I.15 : Schéma d'un récepteur de données à détection directe.

- Le bloc du 'premier étage' : créé du photodétecteur accompagné dans certains cas d'un préamplificateur, qui a pour objectif de rendre le photocourant procréé assez fort malgré le faible signal optique obtenu ou la faible sensibilité du photodétecteur ;
- Le bloc 'linéaire' : composé d'un amplificateur électrique à gain supérieur et d'un filtre, simplificateur de bruit ;
- Le bloc 'récupération des données' : correspondant au dernier étage du récepteur. On y devine un circuit de décision et un circuit de récupération de rythme, encore nommé circuit de synchronisation. [19]

I.10.1 La photodétection

Les photodiodes sont des constituants à semi-conducteurs possédant la disposition de détecter un signal du domaine optique et de le convertir en signal électrique. Elles absorbent des photons et engendrent un flux de courant proportionnel à la puissance optique incidente. La télécommunication optique demande la réalisation de photodétecteur dont les définitions nécessaires sont les suivantes [10, 14] :

- Une sensibilité grave pour la longueur d'onde transmise ;
- La rapidité de réponse, car il doit être pris dans des systèmes ayant de très grand débit à 10 Gbits/s voire même 40 Gbits/s ;
- Soutenir le minimum de bruit au signal lors de l'évolution de détection.

Tableau I.1: Valeur typiques des paramètres de photodiode [24]

Paramètres	PIN	APD
Sensibilité (A/W)	0.7 – 0.95	0.7 – 0.9
Fréquence de coupure (GHz)	Jusqu'à	jusqu'à 15
Gain interne	1	Jusqu'à 100

Il existe deux types de photodiode, photodiodes de type PIN (Positive Intrinsic Negative) ou de type APD (Avalanche PhotoDiode). Généralement, elles sont caractérisées par leurs réactivités, fréquence de coupure et le gain interne...etc. (Tableau I.1) [24]. Les photodiodes PIN étant largement par rapport au APD, parce que elles sont peu cher et simples à utiliser [24, 25].

Le photo-courant I engendré par la photodiode PIN est relatif à la puissance optique incidente P , donné par [26] :

$$I=R \cdot P \quad (I-3)$$

Où :

- R est la sensibilité ou la réactivité de la photodiode, exprimée en (A/W), donnée par :

$$R = \frac{q \eta}{h \nu} \quad (I-4)$$

Où :

- η est l'efficacité quantique de la photodiode et q est la charge d'un électron (1.6×10^{19} Coulombs).

En fréquence, le photo-courant est affecté par deux genre de bruits, à connaissance le bruit de grenaille (Shot noise) et le bruit thermique (Thermal noise).

I.10.2 Photodiode PIN

Cette photodiode, focalisée en contraire, est exécutée à partir de trois couches de semi-conducteurs.

Deux couches fortement dopées P+ et N+ entre lesquels trouve une couche de grande résistivité (presque intrinsèque) où il existe très peu de charges mouvantes. Les photodiodes PIN sont les plus employés car elles sont peu chères et facile à déployer avec une performance approuvable [10].

I.10.3 Photodiode à avalanche APD

Dans la photodiode à excès APD les électrons conçus dans la zone essentiel sont diffusés par l'effet d'avalanche pour que le relation signal sur bruit soit assez grave, l'idée d'utiliser ce phénomène de multiplication intérieure a été levé pour qu'un photon incident ne produis plus un seul photoélectron mais certains, ceci pour augmenter la puissance du signal électrique admettant à la puissance optique incidente attribuée [27, 28].

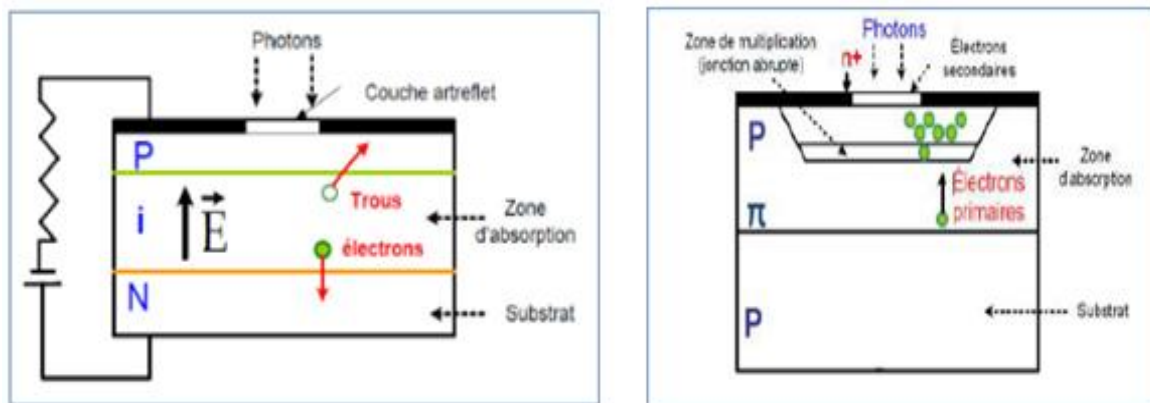


Figure I.16 : Schéma synoptique d'une photodiode PIN et d'une photodiode APD. [13]

I.11 La technique de multiplexage

Afin de rétablir la quantité d'informations données par fibres optiques, une voie étudiée est le multiplexage optique. Les exigences croissantes en débit ont amené à

étudier une technique pour augmenter les capacités de transmission des réseaux optiques. Cela comporte à envoyer conjointement dans une même fibre optique des faisceaux lumineux de longueurs d'onde différentes. L'une des résultats à cette demande est d'installer plus de câble ; mais ce résultat forme des problèmes techniques, puisque la fonction simultanée, le démultiplexage admet de fractionner des signaux utilisant des bandes de fréquences différentes. Deux techniques de multiplexages sont utilisées dans les systèmes de communications optiques : Le multiplexage temporel (TDM) et le multiplexage en longueurs d'ondes (WDM) [8,10].

Une bande passante d'une fibre optique monomode utilisée dans les transmissions optiques simule la fenêtre sur laquelle la diminution restant assez faible, est de 25 THz alentour de 1.55 μm . Elle est convenablement large pour que sa réaction ne déforme pas le signal même dans les transmissions à plusieurs Gb/s. Malgré cela, l'électronique dans l'amplificateur et le récepteur n'est pas capable d'exploiter cette performance exposée par la fibre optique et elle limite la vitesse de diffusion dans ces rapports. Il se trouve particulièrement trois façons pour résoudre ce problème [29]. Pendant de plusieurs années, additionner des fibres était l'unique façon dont ordonnaient les sociétés pour augmenter la capacité des transmissions optiques. Ce qui a admis d'accéder un débit de 2,5 Gb/s. Mais cette solution est très coûteuse et l'équipement est aussi difficile. De ce fait cette solution serait presque impossible à estimer.

I.11.1 Multiplexage temporel (TDM, Time Division Multiplexing)

Le TDM admet une division des signaux selon des périodes de temps. Ainsi, il est éventuel d'envoyer quelques signaux différents sur une seule fibre en utilisant des divisions de temps précédemment déterminés. Dans le système TDM, l'émetteur est conformé par « N » origines optiques en parallèle modulées au débit B b/s. Cette technique requière que les impulsions existent de durée inférieure à N Tb afin d'éviter le recouvrement. La technique TDM peut s' réaliser de façon tout-optique, on dit alors d'OTDM (Optical TDM), ou de manière électrique, on parle donc d'ETDM (Electrical TDM). La diversité entre l'ETDM et l'OTDM réside dans le fait que, dans l'ETDM, le

modulateur optique doit fonctionner non pas au débit des données fournies mais à celui du signal retirant du multiplexeur, ce qui fait qu'à la sortie du multiplexeur le débit est de $B N \times$ si on estime le nombre d'utilisateurs N et le débit de données B [30].

Le multiplexage temporel agrée typiquement de passer d'un débit de 10 Gbit/s à 40 Gbit/s ou même à 160 Gbit/s. Il peut être conçu de manière électrique (ETDM pour Electrical Time Domain Multiplexing) ou optique (OTDM pour Optical Time Domain Multiplexing).

La méthode ETDM/OTDM admet d'atteindre des débits de 1 Tb/s mais elle est beaucoup trop ruineuse étant donné qu'il est indispensable de exécuter de gros financements dans de nouvelles infrastructures [29].

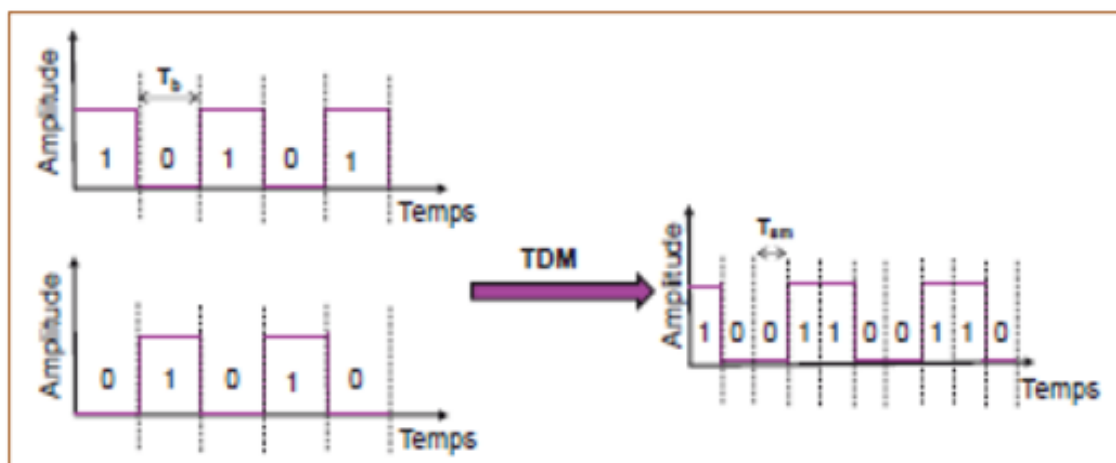


Figure I.17 : Schéma synoptique d'un multiplexage TDM pour deux séquences binaire. [31].

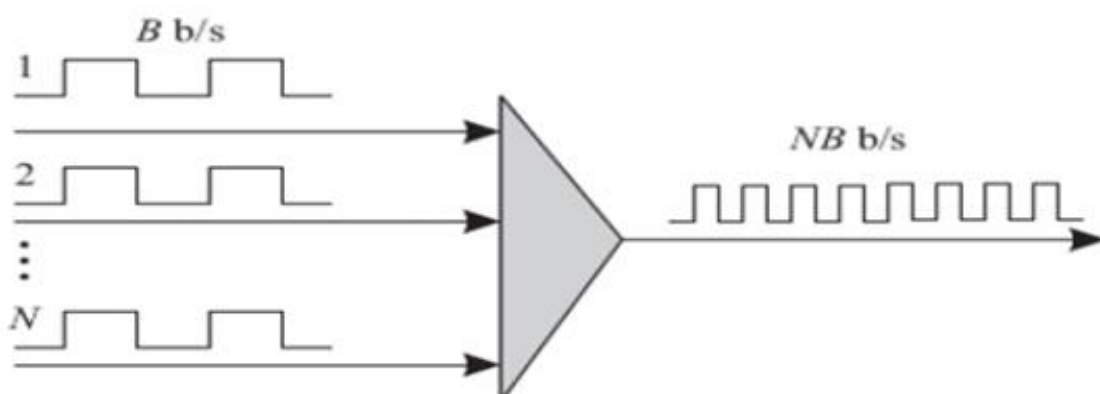


Figure I.18 : La technique du multiplexage.

I.11.2 Multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing)

Son principe consiste à envoyer plusieurs ondes de longueurs différentes sur la même fibre. La technique se base à augmenter le nombre de canaux par fibre est plus ordinairement nommée multiplexage WDM (multiplexage à répartition de longueur d'onde), elle consiste à juxtaposer plusieurs signaux optiques hauts débits de longueurs d'ondes différentes sur une identique fibre optique [31].

La fonction du multiplexage WDM nécessite un ensemble de diodes laser émettant à des longueurs d'ondes différentes mais suffisamment proches, sans qu'il y ait d'union entre eux au cours de la propagation. Ainsi un multiplexeur/démultiplexeur optiques afin ordonner / diviser l'ensemble des signaux optiques dans/de la fibre. La Figure I.19 illustre un exemple d'une liaison usant le multiplexage WDM.

La fibre optique transporte alors un débit numérique égal à $N * Db$. Cette dernière est fréquemment montrée comme la capacité du système [6]. Ce procédé ne conduit aucune modification optoélectronique. L'emploi de la bande passante de la fibre optique est donc maximisé.

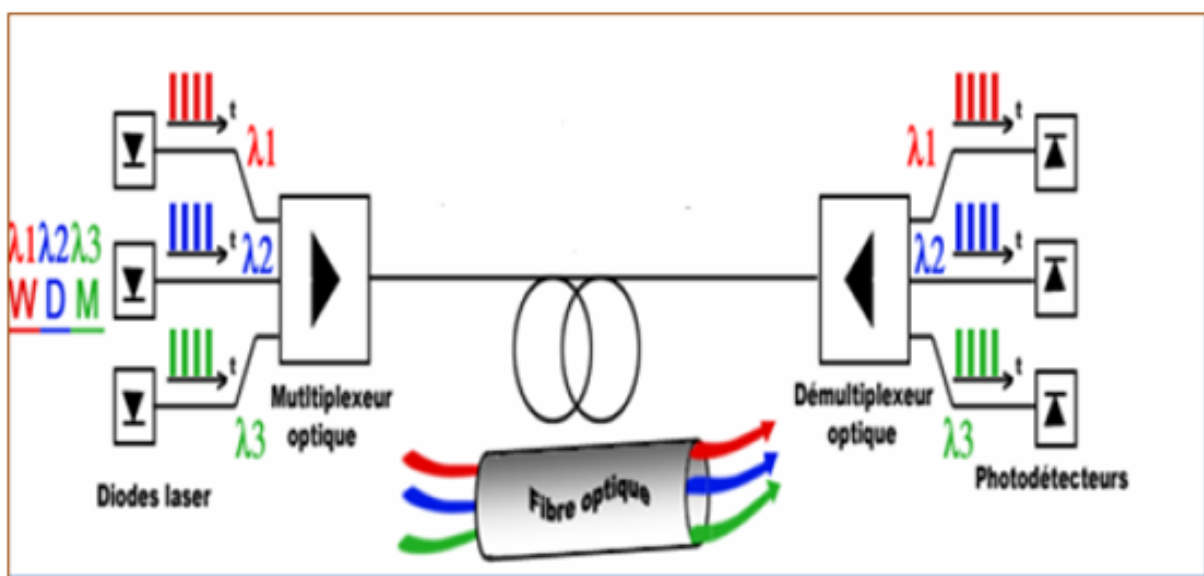


Figure I.19 : Schéma synoptique du multiplexage WDM.

La figure I.20 ci-dessous décrit l'architecture de base et le fonctionnement d'un réseau DWDM. Ce réseau se crée de nœuds d'extrémité, de nœuds de commutation et de liaisons par fibres optiques. Les nœuds de bout comportent en modulateurs-démodulateurs (ou modems) à chaque voie, ainsi qu'en multiplexeurs et démultiplexeurs soutenant respectivement au groupement et à la division des ondes lumineuses de fréquences différentes. Les modulateurs transforment les données numériques en ondes par modulation d'intensité ou d'amplitude, tandis que les démodulateurs reconvertissent les signaux optiques en données numériques. Les nœuds de changement se préparent de multiplexeurs et de démultiplexeurs à insertion-extraction, de commutateurs de longueur d'onde et de convertisseurs de longueur d'onde. Les multiplexeurs servent à grouper les signaux de longueurs d'onde différentes à des fins de propagation alors que les démultiplexeurs divisent ces mêmes signaux à des fins de commutation. Le commutateur de longueur d'onde interconnecte les voies d'entrée aux voies de sortie requises. Les convertisseurs de longueur d'onde ont pour activité de convertir, au sein d'une même fibre optique, les longueurs d'onde surexploitées en longueurs d'onde disponibles de manière à maximiser l'utilisation des voies [1].

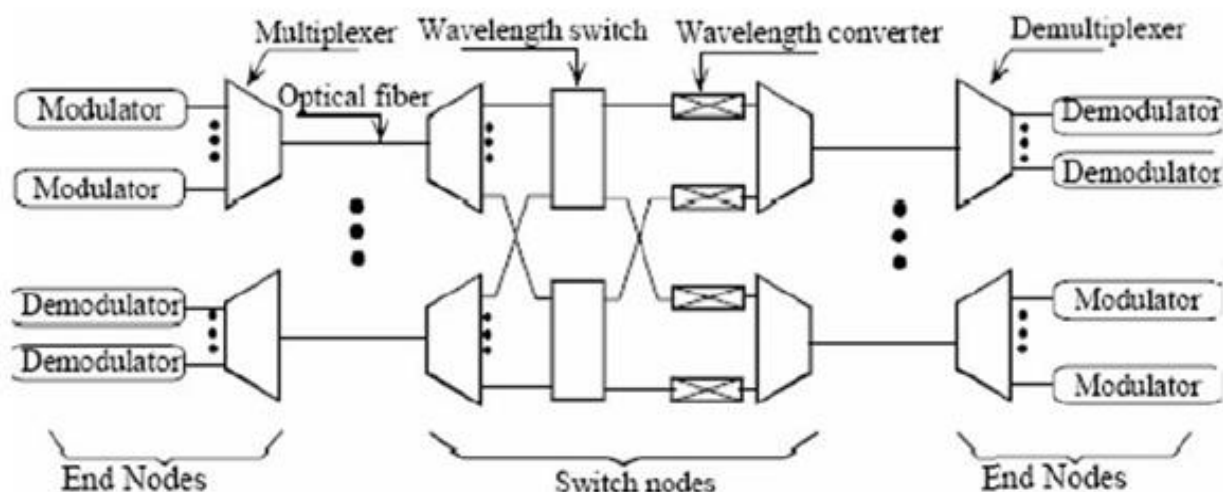


Figure I.20 : Principe composantes d'un réseau DWDM.

Le DWDM marche habituellement avec au moins 8 canaux de transmission. Il en existe également à 16, 40 voire beaucoup plus rarement 96 canaux. Un système

DWDM à 16 canaux peut augmenter un débit de 2,4 Gb/s à 40 Gb/s en propagation unidirectionnelle. Avec les fibres précédemment existantes, il est possible de multiplier le débit par 17, voire par 42, sans avoir à investir environ dans de nouvelles infrastructures.

Le domaine des communications optiques est aujourd'hui défini par un agrandissement de la demande en termes de capacité de transmission. Malgré cela, il allonge certaines limitations inhérentes à la fibre elle-même. La sensibilité aux défauts de diffusion augmente avec le débit, que ce soit pour les effets linéaires dus à la dispersion chromatique et la dispersion de mode de polarisation de la fibre, ou les effets non linéaires principalement induits par l'effet Kerr.

I.12 Conclusion

Les fibres optiques utilisées pour les communications à longue distance sont les fibres monomodes, c'est à dire qu'elles n'ont la capacité de guider qu'un seul et unique mode optique. En obligeant ainsi la lumière à prendre un seul et même chemin de diffusion, nous pouvons diminuer certains effets négatifs exprimés par le milieu de déploiement. Malgré cela, d'autres effets qui délimitent à la fois les distances de propagation et les débits de diffusion sont toujours actuels. Ces effets ennuyeux peuvent être classés en deux groupes: les effets linéaires et les effets non-linéaires.

En plus, la description des effets linéaires de la fibre optique, sa dispersion chromatique, son atténuation limitant à la fois les distances de diffusion et les débits de développement sont les distinctifs acceptant de décrire la problématique de notre thème.

Enfin, notre choix a été porté sur les paramètres de mesure de la qualité de transmission telle que le BER, l'OSNR et la puissance de pénalité.

Références bibliographiques

- [1] JOINDOT, Irène et Michel, Les Télécommunications par fibres optiques, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Paris : Dunod et CNET-ENST, 1996.
- [2] "Les techniques de l'ingénieur", Techniques de l'ingénieur, Paris, 1999.
- [3] These IGE 24. Liaison Par Fibre Optique à Haut Débit.
- [4] DeCusatis, Casimer. Fiber Optique Data Communication : Poughkeepsie New York, 2007.
- [5] Laurent LABONTÉ « Analyse théorique et expérimentale des principales caractéristiques du mode fondamental dans les fibres optiques micro-structurées air/silice » thèse de doctorat de l'université de Lemoges, 2005
- [6] Elodie Le Cren« Etude de composants absorbants saturables à semi-conducteurs à multi-puits quantiques dopés au fer pour la régénération de signaux optiques à très hauts débit d'information » Thèse de doctorat Université de Rennes I 2004.
- [7] Jean- Louis Verneuil, « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbit/s », Université de LIMOGES 2003.
- [8] Etude et simulation d'une transmission WDM : INT&TIC.
- [9] Julien Maury, « Étude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique », Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges, le 26 novembre 2003.
- [10] Jérôme Laurent, " Communication optique à très hautes débits, "Examen probatoire présenté au conservatoire national des Arts et Métiers de Paris départements STIC spécialité électronique, le 3 décembre 2004.
- [11] Chluda, Cédric. Bruit Basse et Moyenne Fréquence des amplificateurs : Sciences et Technique du LANGUEDOC, 2006.
- [12] Younes Zouine « Contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant technique CDMA » Thèse de doctorat Université de LIMOGES 2005.

- [13] Bentahar attaouia, Kandouci Malika, “ Performance Improvement by Pre-Amplifying with Erbium, Ytterbium Doped Devices Link Extenders of Fiber to the Home”, International Journal of Information Engineering and Electronic Business, 2016, 4, 26-34, Volume 8, Issue 4, MECS <http://www.mecspress.org>. 2016.
- [14] Nassima Boudrioua « Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD » Thèse de doctorat Université Paul Verlaine – Metz 2007.
- [15] I. B. Djordjevic, Advanced optical and wireless communications systems, Springer, 2017.
- [16] Sébastien Forget « Cours d'Optique Instrumentale 2007-2008 ». Site web: www.ucam.ac.ma/fssm/optima.
- [17] Houda Brahimi, “ Etude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences Modélisation, caractérisation et application a la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence, ” Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des télécommunications, 2011.
- [18] L. N. Binh, Optical modulation advanced techniques and applications in transmission systems and networks, CRC Press, 2018.
- [19] Stéphane Dellier, “ Contribution à la conception des circuits micro-ondes , ”Thèse de doctorat de l'université de Limoges, 2005.
- [20] Arnaud MUSSOT, “ Amplification paramétrique dans les fibres optiques pour les télécommunications à haut débit , ” Thèse de doctorat de l'université de Franche-Comté, France, 2002.
- [21] TINGYE L., “The impact of optical amplifiers on long-distance lightwave telecommunications”, Proceedings of the IEEE, November 1993, Vol. 81, n°11.
- [22] David Barat , “ Lasers mono fréquences à base de GaSb émettant à 2,6 μm pour l'analyse de gaz, ” Thèse de doctorat de l'université de Montpellier II, Soutenue le 22 novembre 2007
- [23] Talbi Ahmed , “ Etude et optimisation des paramètres physiques d'une diode laser monomode à contre réaction répartie DFB à base de GaInPSb/InP , ” Mémoire de magister de l'université de Sidi- Bel- Abbès, Algérie, 2007.
- [24] M. Cvijetic, Optical transmission systems engineering, Artech house Inc, 2004.

- [25] A. Seck, «Contribution à l'optimization des systems de transmission optiques cohérentes ($N \times 100$ Gbits/s) utilisant le multiplexage en polarisation par des formats de modulation en phase et une conception de ligne limitant l'impact des effets non-linéaires,» Thèse de Doctorat, Telecom Sud Paris, 2014.
- [26] S. Weinstein and P. Ebert, "Data transmission by frequency-division multiplexing using the discret Fourier transform," IEEE Transactions on Communication Technology, vol. 19, no. 5, pp. 628-634, 1971.
- [27] Hamidreza Khaleghi, "Influence des amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) sur la transmission cohérente de signaux optiques à format de modulation multi-porteuses (CO-OFDM) ," Thèse de doctorat de l'université de Bretagne occidentale, 2012.
- [28] Mustapha REMMACH, "Analyse de défaillance des circuits intégrés par émission de lumière dynamique: développement et optimisation d'un système expérimental," Thèse de doctorat de l'université Bordeaux 1, France, 2009.
- [29] S. Lee, Y. Xie, O. H. Adamczyk, and A. E. Willner, Penalty distribution comparison for different data formats under high PMD values, in Proc. ECOC'2000, Munich, Germany, 2 (2000) 93–94.
- [30] R. M. Jopson, L. E. Nelson, G. J. Pendock, and A. H. Gnauck, Polarization-mode dispersion impairment in return-to-zero and nonreturn-to-zero systems, in Proc. OFC'99, San Diego, CA, 1999, Paper WE3.
- [31] M. Thual, "Télécommunications optiques 2. Composants actifs, télécoms optiques," Université de Rennes 1, France, 2004-2005.

CHAPITRE II

Réseaux d'accès optiques

CHAPITRE II : RESEAUX D'ACCES OPTIQUES

I.1	Introduction	36
II.2	Historique.....	36
II.3	Motivations	37
II.4	Structure des réseaux optiques.....	38
II.4.1	Réseaux cœurs	38
II.4.2	Réseaux métropolitains	40
II.4.3	Réseaux d'accès	40
II.4.4	Technologies d'accès	41
II.5	Les couches du réseau d'accès.....	42
II.6	Les réseaux optiques passifs (PON)	43
II.6.1	Qu'est-ce qu'un réseau optique passif (PON)	43
II.6.2	Architecture d'un réseau optique passif (PON)	44
II.6.3	Etude des éléments d'un réseau optique passif.....	45
II.6.3.1	OLT (Optical Link Terminal)	45
II.6.3.2	ONT (Optical Network Terminal).....	45
II.6.3.3	Coupleur optique (splitter).....	45
II.6.4	Principe de fonctionnement d'un réseau PON.....	46
II.6.5	Les débits offerts par le réseau optique passif (PON)	47
II.7	Réseaux d'accès optiques FTTH.....	48
II.7.1	Architecture des réseaux FTTH.....	48
II.7.1.1	Architecture point à point	49
II.7.1.2	Architecture point à multipoint	50
II.8	Réseau GPON	50
II.8.1	Architecture G-PON (Gigabit PON).....	51
II.8.2	Les composants d'un réseau GPON	52
II.8.3	Caractéristiques d'un réseau GPON	52
II.8.4	Les performances du réseau GPON.....	53
II.8.4.1	Le diviseur optique	53
II.8.4.2	Atténuation linéique de la fibre et portée.....	53
II.8.4.3	Le budget optique	54
II.8.4.4	Les classes d'ODN GPON	55
II.8.5	Avantages et inconvénients d'un réseau GPON.....	56
II.9	Evolution des réseaux PON ou Les futurs réseaux	57

II.10	Les nouvelles générations de réseau d'accès optique	57
II.10.1	Les 10G(E) PON.....	57
II.10.2	Le NGPON2	59
II.10.3	Les prochaines générations PON	60
II.11	Les technologies pour le NG-PON.....	61
II.11.1	TDM-PON (Time Division Multiplexing-PON).....	61
II.11.2	WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing-PON)	62
II.12	Types de réseaux d'accès PON et Normalisations.....	62
II.12.1	Migration vers le NG-PON2	65
II.12.2	Pourquoi le TWDM-PON ?.....	67
II.13	Conclusion.....	70
	Références bibliographiques	71

II.1 Introduction

Un réseau d'accès FTTH (Fiber to the Home) est un réseau, utilisé dans le haut débit vu les caractéristiques de la fibre optique. Son déploiement est à partir du nœud de raccordement optique jusqu'aux abonnés. La fibre optique est un support de transmission caractérisé par sa large bande passante ainsi que sa compatibilité électromagnétique en le comparant avec d'autre support. Les premières liaisons optiques ont été réalisées pour les communications sous-marines longues distances. Les réseaux optiques assurent des capacités de transmission énormes. Utilisant des infrastructures commune dans laquelle de nombreux services peuvent être en profitent. Premièrement, la technologie optique est utilisée pour transmettre des données sur une grande distance et fournir une capacité élevée par rapport à celle des câbles coaxiaux. C'est pour cela les réseaux d'accès optiques FTTH présentent des solutions là pour offrir des services à très haut débit sur des distances longues. Dans ce chapitre on va présenter des généralités sur le développement des réseaux de communications optiques. La première partie explique la topologie du réseau optique dans le réseau cœur, réseau métropolitain et réseau d'accès. Les techniques des réseaux d'accès optiques passifs PON, ensuite un rappel sur les différentes architectures et technologies PON.

II.2 Historique

Dès l'apparition de la fibre optique, un des buts a été le déploiement de réseaux d'accès amenant chez les abonnés : le téléphone, plusieurs canaux de télévision...etc. Vue l'importance des images dans le trafic, les réseaux de vidéo communication ont été expérimentés dans les années 80 et déployés dans quelques réseaux opérationnels.

Ces réseaux de première génération (1G) étaient basés sur une structure en étoile : tout un abonné est accolé à sa nette fibre au milieu de distribution, mais un deuxième abonné peut ultérieurement partager cette fibre grâce au multiplexage en longueur d'onde.

Le développement de réseaux à distribution optique reste marginal, concernant des raisons de couts bien que les fibres optiques ont été rapidement utilisées dans la partie transport des réseaux à distribution coaxiale. L'effort a été fourni sur le développement

de technologies optoélectroniques car ça coute moins cher pour qu'il permet une compétitive dans la distribution grand public, mais a été entravé par le succès de l'ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), permettant des débits dépassant 10Mbit/s sur des lignes téléphoniques.

Certains années l'ADSL atteint ses limites, que le déploiement d'accès optiques a très haut débit (10 à 100 Mbit/s chaque abonné), réutilisé principalement en Asie (Japon, Corée, Chine), en Europe (Suède, Italie), les Etats-Unis privilégiant les architectures hybrides fibre-coaxiale pour bénéficier de l'existence massive du câble coaxiale dans la distribution de télévision [1].

II.3 Motivations

Durant les dernières dessinées la télécommunication optique évolue du jour en jour, par l'avènement du numérique. Des méthodes de communication telle que le télégraphe en 1836, en passant par le téléphone en 1876. La voix était la première forme de communication.

Le premier réseau dans le monde à utiliser les protocoles TCP/IP d'où l'invention de Internet, actuellement toutes les données sont transmises via la voie IP (VoIP et IPTV).

Les réseaux à base de cuivre étaient le support principal de transmission pour L'accès à Internet haut débit et aux services multimédia, mais au fur et mesure de la demande de al massive en termes de débit, la bande passante est devenu une problématique dès le début des années 2000 avec l'explosion du numériques comme le montre la Figure II.1.

Le réseau d'accès (ou boucle locale) permet de connecter les locaux du client (Customer Premises) au cœur de réseau de l'opérateur de télécommunications ou du fournisseur d'accès Internet [2].



Figure II.1 : 60 secondes de communications IP [1].

La fibre optique dans les réseaux d'accès expose de nombreux avantages par rapport aux autres médias de transmission tels que les câbles coaxiaux ou encore la voie hertzienne :

- Très large bande passante des fibres optiques elle peut aller jusqu'au 40Gbit/s pour un abonné final.
- l'installation et la maintenance du réseau ça coute moins cher.
- L'utilisation de la fibre optique dans les réseaux d'accès gagne du terrain de plus en plus.

II.4 Structure des réseaux optiques

Les technologies de transmission ont évolué jusqu'à intégrer les technologies optiques même dans les réseaux d'accès, la fibre optique est un support qui présente des exceptionnelles dont l'atténuation est très faible sur une large bande de fréquences, qui permet de transmettre un débit important avec une très grande vitesse.

En plus, insensible aux perturbations et interférences électromagnétiques, la fibre optique permet d'atteindre des niveaux de fiabilité et de stabilité inégales.

Cette partie présente l'utilisation du réseau optique en fonction de la couverture géographique. La Figure II.2 montre la typologie d'un réseau optique constitué du réseau cœur, ainsi que des réseaux métropolitains et d'accès.

II.4.1 Réseaux cœurs

Les réseaux cœurs sont le nœud central du réseau télécom qui fournit plusieurs services aux abonnés connectés via les réseaux d'accès. Ces réseaux acheminent des données importants d'un nœud à un autre en liant différents pays ou régions sur des dizaines voire des milliers de kilomètres entre nœuds.

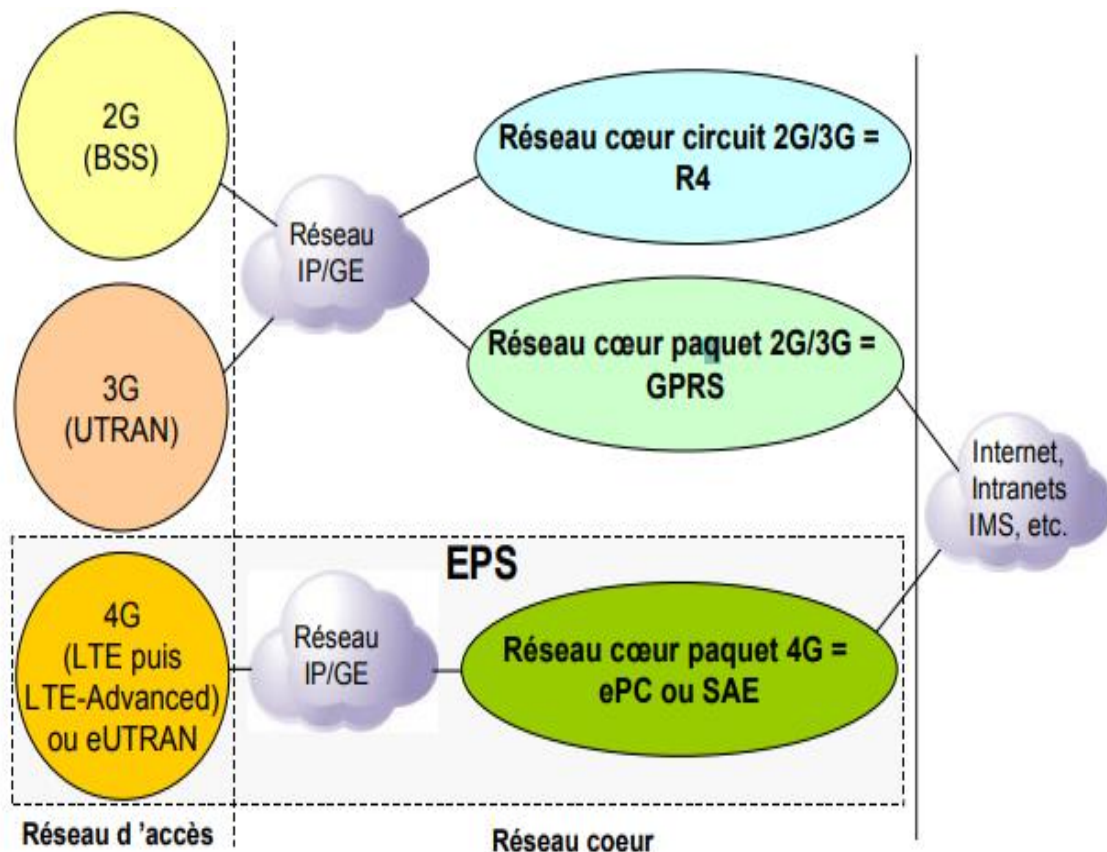


Figure II.2 : Classification des réseaux de communication optique.

Les nœuds installés, les villes ont pour objectif de transporter les données des réseaux métropolitains aux réseaux cœurs ou vice-versa par le biais de Switch optiques ou électriques. Les réseaux cœurs [3] sont fréquemment basés sur une

structure maillée et fonctionnent en technique WDM (Wavelength Division Multiplexing). Il y a des techniques de multiplexage qui sont utilisées pour le réseau cœur : le multiplexage à répartition spatiale (SDM : Spatial Division Multiplexing) et l'OFDM optique. La technique SDM [4] présente l'avantage d'accroître la bande passante du réseau cœur en jouant sur plusieurs longueurs d'onde ou les modes/cœurs de fibres multi-modes ou multi-cœurs. L'OFDM optique [5]. En effet, les réseaux cœurs utilisent la technologie WDM et peuvent atteindre un débit binaire de l'ordre de 1Tb/s. Des réseaux cœurs tout-optiques ont été déployés. Aujourd'hui avec l'aide de l'amplification optique et des formats de modulations avancées, des systèmes avec 80 canaux WDM pour 40Gb/s par canal (débit agrégé de 3.2Tb/s) ont été déployés [6].

II.4.2 Réseaux métropolitains

Le réseau métropolitain est un réseau qui raccorde le réseau d'accès et le réseau de transport, il est installé sur le réseau de transport pour acheminer les données jusqu'à des points de desserte (répartiteurs téléphoniques, antennes...etc.). Sa longueur comprise entre 1 et 100 kilomètres, il relie les bornes des quartiers des villes parmi elles.

II.4.3 Réseaux d'accès

Les réseaux d'accès est la partie du réseau qui relie le fournisseur de service à l'abonné. C'est le réseau métropolitain qui a pour but d'assembler le flux total d'informations provenant des abonnés ensuite de son transport vers le réseau métropolitain via les (CO).

C'est une transmission ascendante dans le cas diminuant, les réseaux d'accès allouent des sous-porteuses pour fournir la voix, des données, la vidéo et d'autres bienfaits aux autres abonnés.

Compte tenu de la dimension géographique limitée des réseaux d'accès, l'enjeu présent est basé sur l'usage des technologies moderne, d'architectures et infrastructures d'accès [7,8]. Pour bien connaître le réseau d'accès, il faut étudier et comprendre l'architecture PON, cœur, aussi des techniques de multiplexage.

II.4.4 Technologies d'accès

Les topologies utilisées auparavant, où la fibre optique n'arrive pas chez l'abonné, sont aujourd'hui introduites. Une première étude des réseaux FTTx est de faire une liaison avec fibre optique pour le raccord au nœud de raccordement d'abonnés (NRA), et réduire la distance entre l'abonné et le NRA. Le reste du réseau utilise la paire de cuivre. La minimisation du chemin entre l'abonné et le NRA, permet à l'ADSL d'augmenter le rapport signal sur bruit et d'augmenté un meilleur débit. Les réseaux câblés (FTTN ou FTTLA) constituent un exemple où un câble coaxial est le dernier tronçon. Si la distance le permet, Le multiplexage fréquentiel est utilisé, le réseau coaxial peut être passif (sans amplificateur) et s'identifie à la FTTLA. La norme Ethernet 802.3 est l'exemple correspond aux architectures avec cuivre.

La demande massive en termes de débits et l'apparition de nouveaux services qui demande une bande passante très large a mené à une très grande introduction dans les réseaux d'accès et cœurs. Le débit de transmission dans le réseau d'accès optique à augmenter d'une façon significative ces dix dernières années. Ce qui a engendré une forte croissance du débit dans les réseaux cœurs. Le débit des réseaux d'accès sans fil a augmenté avec l'arrivée des technologies mobiles LTE (Long Terme Evolution) où à larges bandes.

Pour satisfaire les besoins en bande passante des utilisateurs, nombreux technologies d'accès ont été apparues. La plus courante parmi elle est le xDSL (Digital Subscriber Loop) qui peut être divisé en deux standards communément déployés : l'ADSL (Asymmetric DSL) et le VDSL (Very high speed DSL), elle fournit une capacité peut être atteint les 256 à 1024 Kb/s.

Parmi les différents types de connexions présentes, on peut mentionner : le RTC (Réseau téléphonique Commuté), le WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), le CDMA (Code Division Multiple Access), le Wi-Fi (Wireless Fidelity) et liaisons Spécialisées variées [9].

Le réseau d'accès à base de fibre optique FTTx, qui a évolué pendant ces trente dernières années est la technologie d'accès la plus prometteuse en termes de déploiement et de débit. Le Tableau II.1 illustre les différentes technologies d'accès déployées.

Le Tableau II.1: Technologie d'accès déjà déployées [10]

Service	Milieu de transmission	Lieu descendant (Mb/s)	Lieu montant (Mb/s)	Portée maximum (Km)
ADSL	Paire torsadée	15	3.8	5.5
VDSL	Paire torsadée	100	30	0.5
HFC	Câble coaxial	40	9	25
Wi-Fi	Espace libre	54	54	0.1
Wi-MAX	Espace libre	134	134	5
B-PON	Fibre	622	155	20
E-PON	Fibre	2488	1244	20
G-PON	Fibre	1000	1000	20

II.5 Les couches du réseau d'accès

Afin de concevoir et de dimensionner les différents éléments qui constituent un réseau à très haut débit, il convient de structurer les différentes composantes en trois couches on les rappelle brièvement : (Figure II.3)

- **La couche d'infrastructure** : comprenant notamment des fourreaux, des armoires de rue, des locaux techniques et des chambres;
- **La couche optique passive** : ils ont composé notamment les câbles optiques, les boîtiers d'épissurage et les baies de brassage ;
- **La couche optique active** : pour le transport des services. Elle est constituée des équipements actifs.

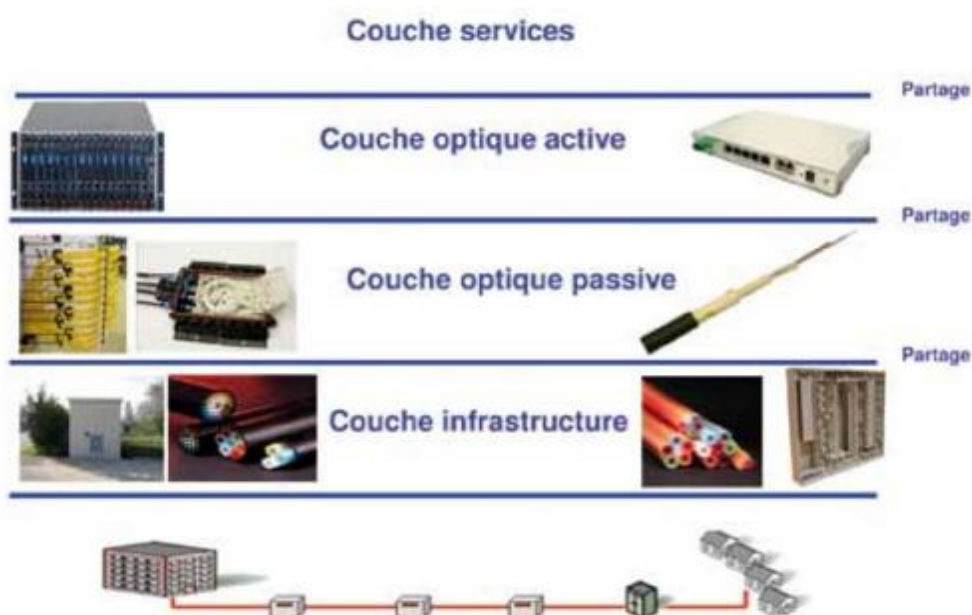


Figure II.3 : Les couches d'un réseau d'accès.

II.6 Les réseaux optiques passifs (PON)

L'architecture qui semble avoir actuellement la préférence des opérateurs est le PON (Passive Optical Network), faveur à des coupleurs passifs ou splitter formant des topologies en arbre, le réseau optique passif peut atteindre 32 à 64 abonnées qui se partagent la même fibre monomode, et qui permet d'offrir un débit qui se note en Gbit/s [11].

II.6.1 Définition d'un réseau optique passif (PON)

La technologie PON constitue une référence en matière de réseaux d'accès très haut débit, car elle offre une très forte capacité de transport et minimisation des infrastructures (fibres très nécessaires).

La technologie PON utilise des réseaux optiques passifs, premièrement optiques parce que cette technologie utilise comme infrastructure des fibres optiques, deuxièmement passifs parce que les équipements de la partie intermédiaire de ces réseaux sont inactif, ils ne sont pas l'électricité et ne chargent pas électronique. Cette technologie PON permet un service d'acheminement de flux bidirectionnels et un multimédia à un débit élevé, jusqu'à l'utilisateur final, entreprise ou particulier [12].

Ces réseaux (PON) sont normalisés 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).

Afin de réduire les coûts d'infrastructure, les réseaux PON inventés par l'utilité des composants passifs sur le chemin de la fibre optique, et permet de diviser le signal optique sur des branches secondaires.

Les informations seront alors démultipliées dans leur trajectoire aux l'utilisateur final. Des mécanismes d'allocation permettent d'éviter les collisions entre informations propagées par les usagers en distribuant l'usage de la ressource optique dans le temps. Aussi que, en éliminant le besoin d' placer des équipements actifs intermédiaires, alimentés électriquement, entre l'opérateur et l'abonné, les réseaux PON réduisent beaucoup les contraintes d'exploitation de ces réseaux optiques.

Les services de transport qui peut être proposés dans la technologie PON est accessible à les types d'opérateurs. Les réseaux PON trient les flux et permettent de partager des VLAN (Virtual Area Network, réseau local virtuel) sans contraintes pour l'utilisateur, chacun des VLAN étant spécifique aux opérateurs qui partagent ces infrastructures. Ces réseaux sont en fait configurés pour être utilisés par plusieurs opérateurs simultanément [12].

II.6.2 Architecture d'un réseau optique passif (PON)

Un réseau PON, représenté schématiquement dans la figure II.4 comporte le central qui se dénomme NRO (un nœud de raccordement optique), sur lequel sont connectées des sources multi services (images, des vidéos, connexion et les téléphones). Ce NRO est lui-même interconnecté, via la fibre optique aux utilisateurs finals (résidences, entreprises...) appelé ONU ou ONT [13].

Les réseaux PON ont classiquement une portée de 20 kilomètres, Peu importe les flux transportés, ce qui permet en vérité de couvrir une superficie de 20 kilomètres de rayon sans répéteur.

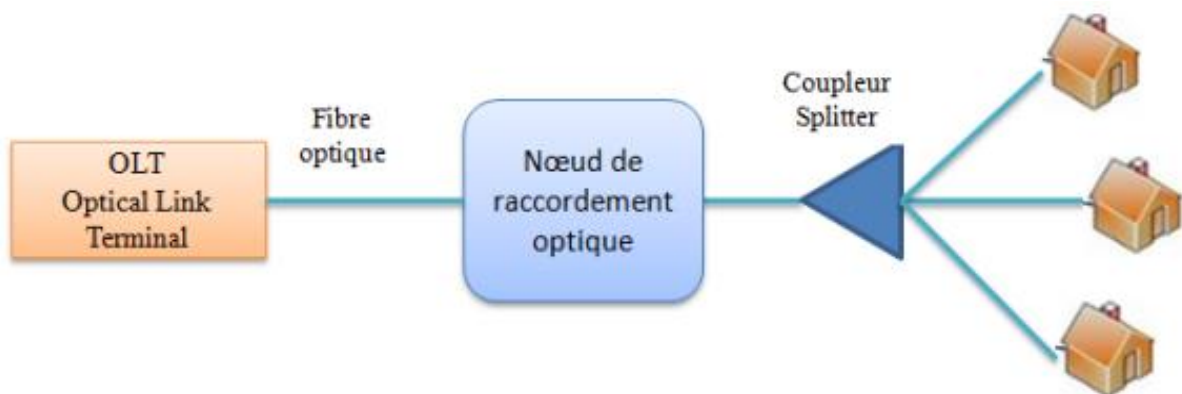


Figure II.4 : L'architecture d'un PON.

L'architecture d'un PON vise à réduire l'emploi des fibres optiques. Il s'agit de réseaux arborescents, où chaque nœud permet de séparer la fibre optique en branches secondaires connectées à un coupleur. Beaucoup de coupleurs sont utilisés sur le chemin d'une fibre optique [13].

L'usage des coupleurs permet de créer des arbres de transmission passifs. Ces arbres, sont caractérisés par le départ d'une seule fibre à l'OLT qui constitue un élément de base des réseaux PON. Ce réseau (PON) utilise un multiplexage temporel

et fréquentiel en la longueur d'onde afin de diminuer au minimal le nombre de fibres optiques utilisées dans le réseau.

II.6.3 Etude des éléments d'un réseau optique passif

L'architecture d'un réseau optique passif PON est basée sur trois éléments essentiels : OLT (Optical Line Terminal ou Terminaison de Ligne Optique), ONU (Optical Network Unit ou Unité de réseau optique), et l'élément passif qui est le coupleur ou (Splitter).

II.6.3.1 OLT (Optical Link Terminal)

L'OLT est l'équipement maître d'accès optique pour des utilisateurs connectés au FTTx, un lieu de collecte permet de partager des services comme : l'internet, la téléphonie et la vidéo, cet équipement est actif, installé au central, envoie et reçoit des signaux lumineux porteurs des données [14]. Le transmetteur optique est composé d'un module dont l'émetteur est généralement une diode LASER. Un récepteur qui permet d'adapter le seuil de décision de la photodiode en fonction des paquets de données reçues. L'OLT doit être conformes à la norme ITU.

II.6.3.2 ONT (Optical Network Terminal)

L'ONT est considéré comme un modem optique auquel l'utilisateur vient connecter sa passerelle d'accès au haut débit. C'est un élément terminal du réseau optique. L'ONU est un élément générique terminal du réseau d'accès optique FTTx. L'ONT est composé d'un module, d'un émetteur optique à base d'une diode LASER et un photorécepteur [14].

L'ONT est l'interlocuteur directe de L'OLT, les ONT émettent sur une même longueur d'onde pour les raisons de coût et de gestion des équipements.

II.6.3.3 Coupleur optique (splitter)

On dit coupleur le composant qui est assimilé dans la ligne, garantis la fonction diviseur ou concentrateur de la transmission. C'est un équipement passif qui demande plus une alimentation électrique, son principe de fonctionnement est basé sur la propagation de la lumière à l'intérieur de la fibre [1].

Dans le sens montant le coupleur permet de coordonner par addition les signaux optiques, dans le sens contraire (sens descendant) il divise le signal optique qui vient de L'OLT.

Le coupleur n'est pas la capacité d'aiguiller et de changer, de retarder ou de bloquer les signaux qui le traversent.

II.6.4 Principe de fonctionnement d'un réseau PON

Concernant le principe d'un réseau PON est de comporter un nœud de raccordement optique (NRO), sur lequel sont branchées des sources multi services. Ce NRO est interconnecté, via la fibre optique, aux utilisateurs finals [15].

- **Sens montant**

Le coupleur étant passif, et les ONT émettant tous dans la même longueur d'onde, si les signaux émis par deux ONT parvenaient simultanément au coupleur, ils ressortiraient sous la forme d'un mélange illisible par l'OLT.

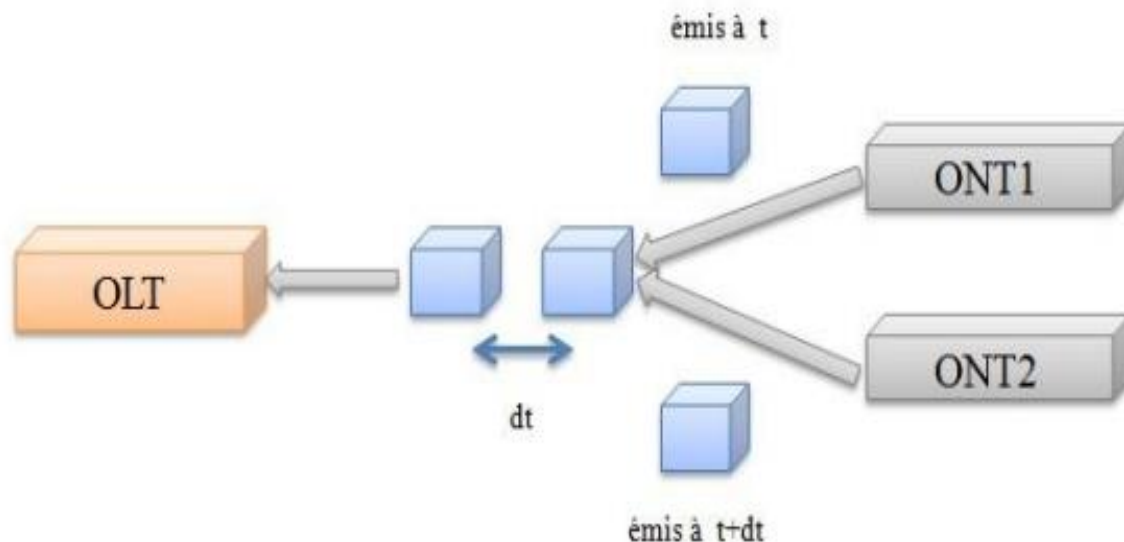


Figure II.5 : L'architecture du sens montant.

- **Sens descendant**

Les données envoyées par l'OLT sont étiquetées en fonction de leur destinataire. Les ONT acquièrent toutes les données mais unique l'ONT concerné les retransmet dans le réseau interne de l'abonné. Le débit instantané du PON est distribué entre tous les abonnés qui acquièrent des données. Si un seul abonné télécharge, il peut disposer de tout le débit maximal autorisé par le PON (sauf limitation mise en place par l'opérateur, par choix commercial ou technique vis à vis de son réseau de collecte).

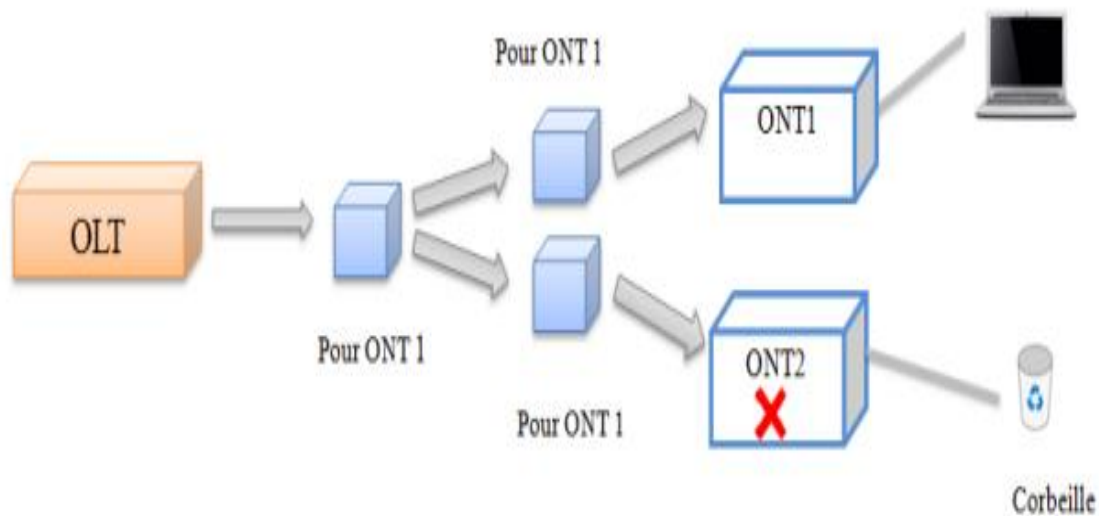


Figure II.6 : L'architecture du sens descendant.

II.6.5 Les débits offerts par le réseau optique passif (PON)

Le réseau PON permet d'offrir des débits importants qui peuvent aller de 1 jusqu'à 2.5 Gbit/s, alors les débits sont distribués entre N utilisateurs (N utilisateurs égale 64 utilisateurs), les ONU possèdent une interface RJ45 et autorisent des débits instantanés jusqu'à 1 Gbit/s [12].

L'architecture PON offre une énorme flexibilité pour l'allocation de la bande passante. Cette bande est allouée de manière dynamique à l'ensemble des clients ayant besoin de débit à un instant donné. Le reste de la bande passante disponible est alloué équitablement entre les utilisateurs actifs tout en respectant la qualité de service.

La gestion dynamique de la bande passante est d'autant plus nécessaire que l'ensemble des services qui migrent progressivement vers IP avec l'évolution de services caractérisés par la succession rapide des données sur des courtes périodes. C'est le cas du téléchargement de fichiers (Peer to Peer), de la vidéo à la demande (téléchargement de DVD), du chargement d'une page Web avec un contenu multimédia.

Le Tableau qui se suit (II.2) montre les différents débits offerts par les différents types du réseau PON ainsi que le format de transmission [16].

Le Tableau II.2 : Tableau comparatif entre les standards du PON

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

D'après le tableau ci-dessus le standard G-PON offre des débits très importants dans le sens montant et descendant par rapport aux deux standards B-PON et E-PON, utilisant la technologie ATM, TDM, Ethernet lors de la transmission des données.

II.7 Réseaux d'accès optiques FTTH

Le réseau d'accès FTTH (en anglais Fiber to the Home – en français Fibre jusqu'à l'abonné) est un réseau, en fibre optique déployé depuis un nœud de raccordement optique jusqu'aux logements des particuliers ou des locaux à usage professionnel.

La fibre optique est un support de transmission qui montre de faibles pertes et une large bande passante en comparaison avec autres supports de transmission tel que le cuivre ou la radio. C'est pour ça les réseaux d'accès optiques FTTH constituent maintenant la solution la plus pérenne pour offrir des services à très haut débit sur des grandes distances.

II.7.1 Architecture des réseaux FTTH

La fibre optique est déployée de bout en bout du réseau, jusqu'au domicile. Elle ne fait appel à aucune autre technologie intermédiaire. C'est la technologie la plus intéressante en termes de débit pour l'abonné (pas de partage) et de sécurité de transfert, mais la plus onéreuse en termes de coût de déploiement pour l'opérateur [17].

Deux types de topologies physiques permettent d'acheminer la fibre jusqu'au client final :

- L'Architecture active, aussi appelée point à point (P2P).
- L'Architecture passive est appelée communément point à multipoint (PON).

II.7.1.1 Architecture point à point

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

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

Dans l'architecture point à point, tout client est joint au répartiteur optique du réseau le plus proche, avec une fibre dédiée (point à point). Ce modèle est analogue à celui de la boucle locale téléphonique actuelle. Cette architecture permet une étanchéité absolue entre les lignes des différents abonnés : il y n'a plus de risque de sécurité, et garantie absolue de disponibilité totale de la ligne. Cependant c'est un inconvénient pour les opérateurs, toute fibre étant dédiée à un utilisateur il y a autant de fibres que d'abonnés (Figure II.7).

Plusieurs protocoles pour le transport des données peuvent être utilisés mais le plus souvent c'est Ethernet qui est choisi. Ces solutions sont alors nommées Ethernet P2P ou Ethernet Direct Fiber. Elles permettent des débits de 10Gb/s. Commercialement, les débits sont limités à des valeurs moindres, on donne un exemple de 100Mb/s symétriques [17].

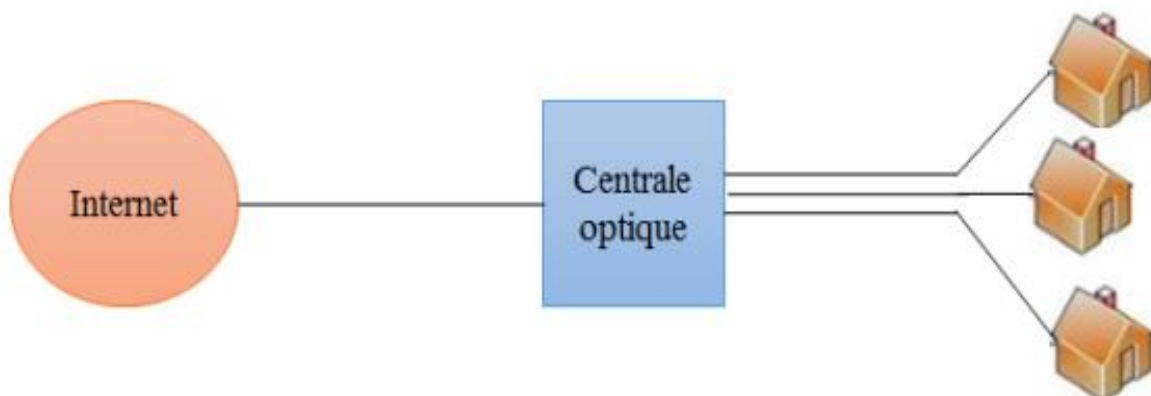


Figure II.7 : L'architecture point à point.

II.7.1.2 Architecture point à multipoint

Un réseau point-à-multipoint (P2M) appelé aussi PON (en anglais Passive Optical network, en français Réseau optique passif), le mot de passif s'appliquant au splitter qui ne comporte pas élément électronique.

En cette architecture, une seule fibre part du central optique dans le réseau et dessert nombreux habitations, sur lesquelles sont raccordées à cette fibre au niveau d'un équipement passif (coupleur ou splitter) installé à proximité de la zone à desservir. Chaque site acquiert toutes les informations envoyées par l'équipement central OLT (Optical Link Terminal) ; et les reçoivent par l'équipement récepteur ONT (Optical Network Terminaison) de chaque utilisateur, et garantit la fonction du filtrage : chacun des ONT et OLT n'exploitent que les données qui concernent l'utilisateur qui y est raccordé. Figure II.8 [17].

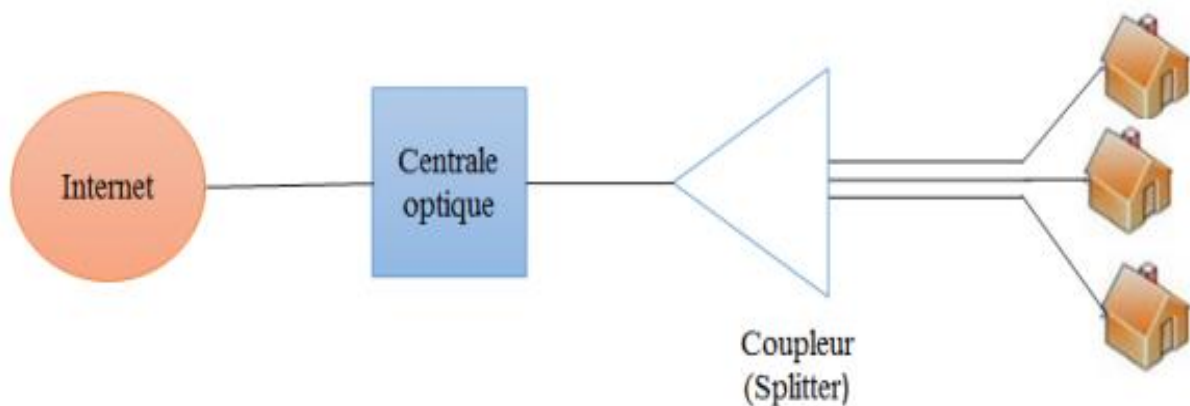


Figure II.8 : L'architecture point à multipoint.

II.8 Réseau GPON

Le réseau GPON est l'abréviation de Gigabit Passive Optical Network, c'est un protocole de 2ème génération des PON édité par l'ITU-T comme norme de recommandation G.984. Les solutions G-PON déployées offrent un débit de 2,5 Gbit/s en sens descendant et 1,25 Gbit/s en sens montant pour 32 ou 64 abonnés. La distance de fonctionnement de 20 kilomètres est fixée entre le central et l'utilisateur le plus distant. Cette distance correspond à une portée typique avec un taux de partage 1 : 64. Cependant si on pense en termes de portée logique, la distance de fonctionnement serait de 60 kilomètres [18, 19, 20].

Ce réseau GPON utilise une longueur d'onde porteuse de 1,31 (bande O) dans la voie montante avec une atténuation typique de 0.31dB/ Km et 1,49 (bande S) et avec une atténuation de 0.25 dB/Km dans la voie descendante. Cependant, pour séparer les deux longueurs d'onde, les ONT utilisent des duplexeurs optiques. Optionnellement, le GPON permet la diffusion de télévision, c'est pour ça une troisième longueur d'onde est essentiel. En fait, la longueur d'onde retenue par le réseau est de l'ordre de 1,55 μ m (bande C) avec une atténuation 0.2 dB/Km. Dans ce cas, un système WDM est nécessaire pour multiplexer les longueurs. [21]

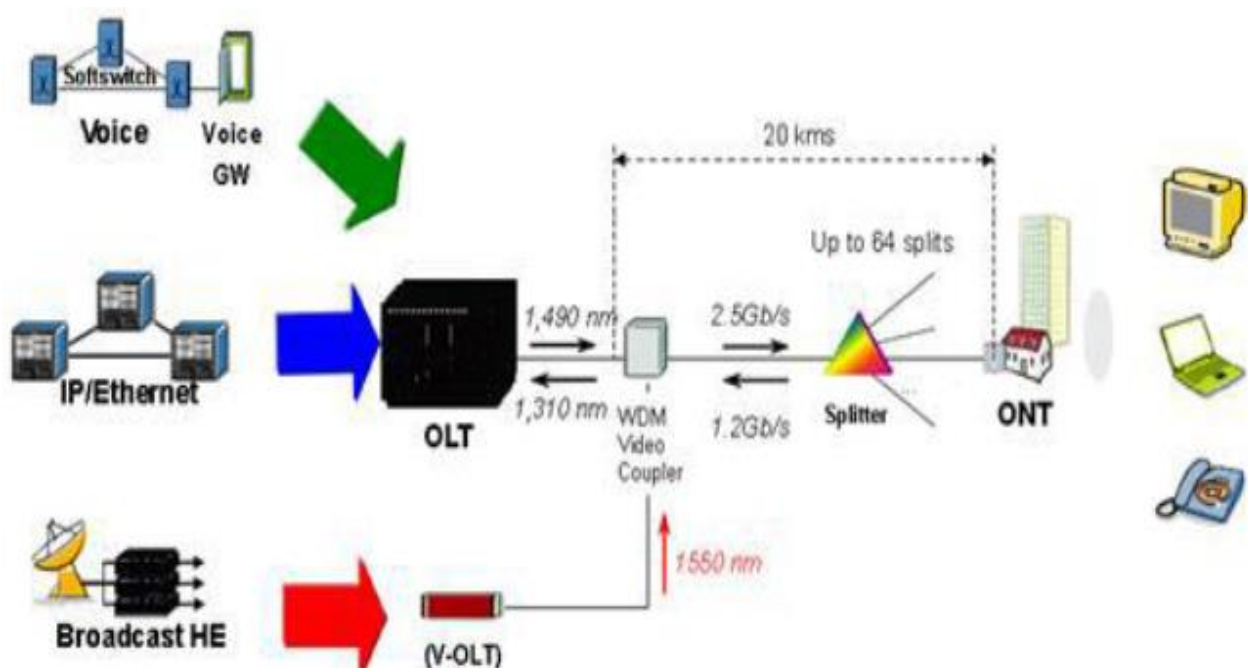


Figure II.9 : l'architecture du réseau d'accès GPON.

Les dispositifs GPON proposent des services hauts débit de voix, les services triple-play à savoir la technologie voix sur IP (VoIP), et l'Internet haut débit et la Télévision IP (IPTV) à tous les clients privés et les entreprises. Cette technique est la solution qui a été choisie par l'équipe France Télécom « FT » pour le déploiement de la FTTH, elle exploite la puissante bande passante et offre une connexion fiable longue portée jusqu'au dernier kilomètre [20 ,22].

II.8.1 Architecture G-PON (Gigabit PON)

La technique du réseau G-PON est basée sur le multiplexage temporel. Une longueur d'onde est utilisée pour la voie montante et une autre pour la voie

descendante. Ce réseau se différencie de BPON par sa capacité à transporter des paquets et des trames Ethernet de longueurs variables. Le réseau GPON offre un débit de 1,2 à 2,4 Gbit/s (débit asymétrique). En plus, ce réseau (GPON) permet une plus grande distance de déploiement, jusqu'à 60 kilomètres, avec 20 kilomètres maximum entre les ONT. Finalement, le réseau GPON permet jusqu'à 64 lignes sortantes d'un coupleur optique (splitter).

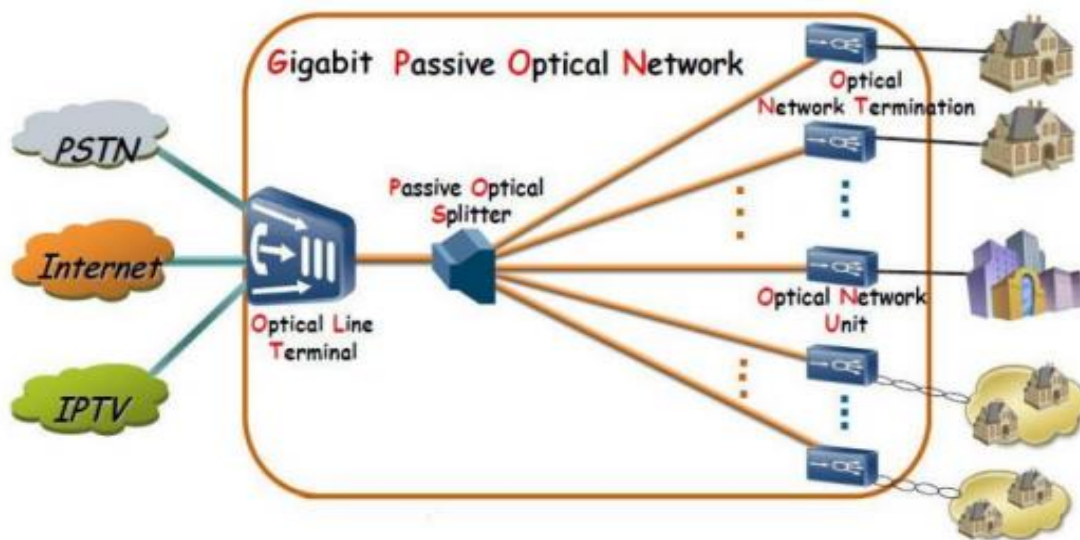


Figure II.10 : Architecture G-PON

II.8.2 Les composants d'un réseau GPON :

Les unités du réseau GPON sont interconnectées sous forme d'une arborescence, l'OLT se situe au point de racine de l'arborescence, l'ONU est situé aux extrémités des branches de l'arborescence. Une seule fibre de transmission qui part du central est raccordée à un groupe de liaisons fibres distributions au niveau d'un point de partage afin de desservir nombreux habitations. Un coupleur (ou splitter) qui permet la transmission des longueurs d'ondes [23,24].

II.8.3 Les caractéristiques d'un réseau GPON :

Les caractéristiques propres du GPON le distinguant de toutes les technologies xDSL à base de cuivre sont :

- La portée physique (de l'ordre de 20 km) ou la distance physique maximale entre l'OLT et l'ONU en tenant compte de toutes les pertes induites le long de la liaison à savoir les pertes dues à l'atténuation de la fibre.

- La portée logique (de l'ordre de 60 km) qui définit comme étant la distance entre l'OLT et les ONT qui peuvent être achevée sous les bonnes conditions en tenant compte des pertes de l'atténuation de la fibre.
- Le taux de division, fondamentalement, plus est grand ce taux dans un réseau GPON, plus celui-ci présente d'intérêt pour les opérateurs. Étant donné les techniques actuelles, des taux de division pouvant atteindre une valeur de 1: 64.

II.8.4 Les performances du réseau GPON

II.8.4.1 Le diviseur optique

Les diviseurs optiques (ou splitter) sont des diviseurs de puissance passifs permettant la communication entre l'OLT et les ONU. Néanmoins, ils combinent également de la puissance : ce sont des dispositifs de distribution optique bidirectionnels avec une seule entrée et multi sorties. Alors On dit diviseurs/coupleurs.

- La puissance du signal qui entre par le port d'entrée (liaison descendante) provient de l'OLT et est divisée uniformément entre plusieurs ports de sortie.
- Les signaux qui entrent dans les sorties (liaison montante) proviennent des ONU et sont combinés à l'entrée.

En théorie l'atténuation du diviseur s'exprime de la manière suivante :

$$Att_{diviseur} (dB) = 100 \log \frac{1}{2^n} \quad (II-1)$$

En pratique, il y a des pertes additionnelles dans le diviseur (0,5 dB pour un diviseur 1:2).

II.8.4.2 Atténuation linéique de la fibre et portée

L'atténuation dans une fibre monomode à base de Silice est due aux impuretés du verre qui peuvent absorber et diffuser la lumière. Les caractéristiques d'atténuation linéique (pertes en fonction de la distance parcourue) sont données en fonction de la longueur d'onde transmise pour une fibre standardisée G.652.D. (Figure II.11)

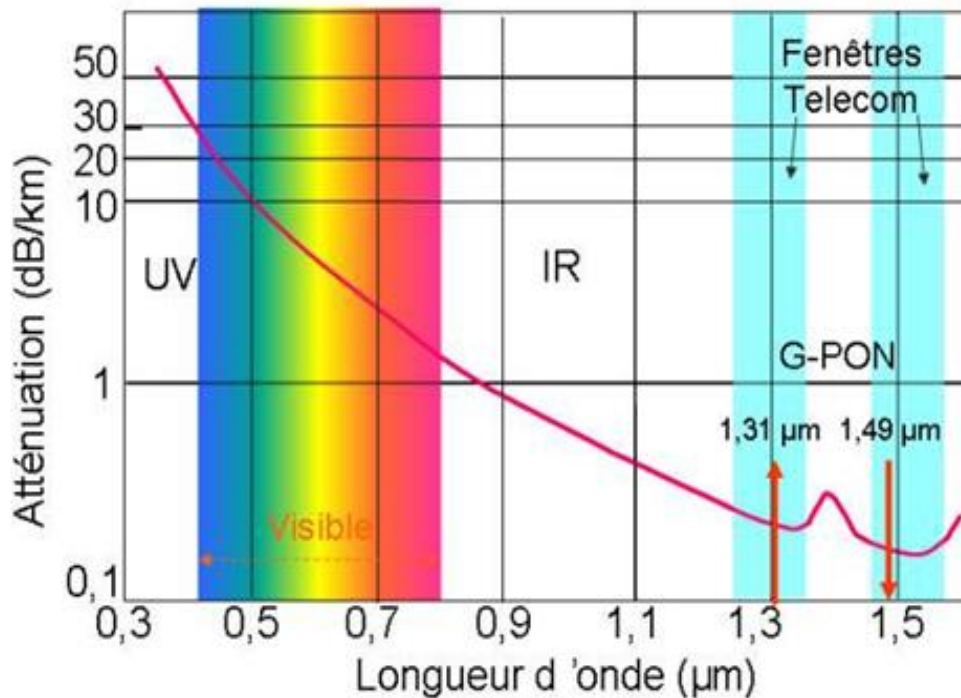


Figure II.11 : Atténuation linéique d'une fibre G.652.D

Pour le GPON, on maintiendra les valeurs d'atténuation, de 0,31dB/km pour le signal montant à 1,31 μ m et 0,25dB/km pour le signal descendant à 1,49 μ m.

II.8.4.3 Le budget optique

Le budget optique (BO) est généralement considéré comme étant l'atténuation totale entre la source optique et le récepteur optique.

L'un des paramètres clés pour chaque concepteur de réseau FTTx est la distance réalisable entre le CO et les abonnés, autrement dit le budget optique maximal autorisé dans le système.

La portée du GPON, désignant donc la distance possible entre l'OLT et les ONUs, ainsi limitée souvent à 20 kilomètres selon le taux de couplage utilisé par l'architecture. La norme G.984.1 définit également une portée logique maximale de 60 kilomètres. De plus, une distance différentielle de fonctionnement de 20 kilomètres est fixée entre le client à connecter le plus proche du central, et celui le plus éloigné. Ceci est lié notamment à la taille de la fenêtre de ranging nécessaire à la synchronisation des ONUs, conformément à la norme ITU-T Rec. G.983.1.

La puissance optique de l'émetteur et la sensibilité du récepteur sont deux paramètres qui définissent la portée possible d'un réseau d'accès. La norme a défini des classes d'ODN. Elles définissent le budget optique entre le central et les clients suivant les caractéristiques techniques, les coûts des émetteurs-récepteurs et les débits montants et descendants.

II.8.4.4 Les classes d'ODN GPON

Les classes de la norme GPON A, B, B+, C, C+ est représenté dans le tableau suivant :

Le Tableau II.3 : Les classes d'ODN

Classe	Atténuation (dB)	
	Min	Max
A	5	20
B	10	25
B+	13	28
C	15	30
C+	17	32

La Figure qui se suit (II.12) montre le schéma qui justifier le budget défini pour la classe B+. En outre, l'abonné qui est le plus proche peut se trouver aussi bien après un premier coupleur 1:N, ce qui représente environ 10dB de perte dans le cas où N=8 ; il peut également être à l'extrémité du réseau après 2 coupleurs et 20 kilomètres de fibre qui représentent environ 25dB de perte pour le signal (dépendant de la longueur d'onde). Pour assurer à chaque utilisateur un bon accueil, la classe B+ est donc définie avec un minimum de 13dB de pertes depuis l'OLT pour l'abonné le plus proche et un maximum de 28dB pour l'utilisateur le plus distant.

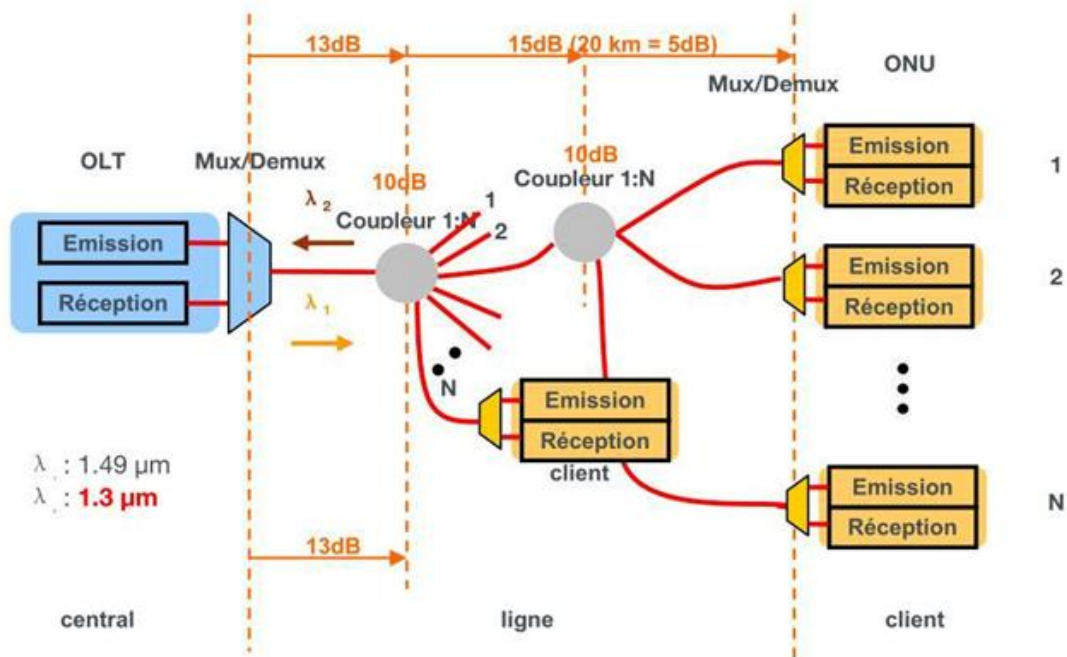


Figure II.12 : Un exemple de GPON classe B+

Dans l'optique pour profiter d'un budget supérieur, il existe désormais des émetteurs-récepteurs GPON Classe C+ mais leur utilisation est freinée pour une question de coût de cette technologie.

II.8.5 Avantages et inconvénients d'un réseau GPON

a. Avantages

Les avantages d'un réseau GPON sont principalement économiques :

- Un OLT peut desservir au moins 64 clients.
- Peu de fibre sont employée dans le réseau GPON
- Architecture favorable à la diffusion
- Aucun local alimenté en énergie n'est essentiel dans le réseau GPON.

b. Inconvénients

- Budget optique limité par le coupleur, alors portée réduite.
- Synchronisation compliquée pour la voie montante.
- Les flux étant reçus par tout le monde et le tri se faisant au niveau des ONT.

Malgré tous les inconvénients mentionnés. Elle reste l'architecture généralement retenue par les manipulateurs. Le choix de cette architecture se justifie à posteriori par la conjecture économique actuelle qui est à l'économie.

II.9 Evolution des réseaux PON ou Les futurs réseaux

Pour répondre à la demande de la forte croissance de l'utilisation de services gourmands en bande passante, comme par exemple la télévision ou la visioconférence haute définition dans le domaine résidentiel et professionnel, de nouvelles générations PON sont en cours d'être standardisées au sein de FSAN/ITU-T. A partir du GPON, les opérateurs et les équipementiers industriels et commerciaux pour le très haut débit, effectuent de plusieurs recherches pour découvrir et normaliser les composants, in addition les architectures et les protocoles du réseau d'accès de demain, appelé "projet NGA" (Next Génération Access), en fibre optique.

Le XG-PON (ou 10 Gigabit PON) est quasi-finalisé en normalisation à l'ITU depuis fin 2010, ce standard propose un débit 10 Gbit/s dans le sens descendant et 2,5 Gbit/s dans le sens montant. Ils y a peu de temps l'ITU et le FSAN envisageaient une deuxième sous-étape de migration nommée XGPON2 permettant entre autres d'augmenter le débit montant et d'offrir ainsi 10 Gb/s symétrique.

II.10 Les nouvelles générations de réseau d'accès optique

Après le GPON, ces dix dernières années, le FSAN a développé deux générations de PON appelées Next-Generation PON (NG-PON) 1 et 2. De manière similaire et en parallèle, le groupe IEEE 802.3av a fait évoluer sa technologie vers de nouvelles générations offrant des débits plus importants.

II.10.1 Les 10G(E) PON

La première étape, NG-PON1, de l'évolution des travaux du FSAN intègre des solutions permettant une montée en débit jusqu'à 10Gbit/s et qui nécessitent une compatibilité avec une infrastructure GPON existante. L'avantage est la minimisation du coût de migration. On y distingue le XG-PON1 (publié en 2010) et le XG-PON2 qui offre respectivement un débit

Asymétrique (10Gbps montant et 2.5Gbps descendant) et symétrique (10Gbps descendant et montant) : on parle de technologies 10GPON. En option, le NG-PON1

offre la possibilité d'une coexistence (overlay WDM) avec un système GPON en service. Cette option est rendue possible si les éléments du GPON sont conformes à la recommandation G.984.5 qui précise la superposition en longueurs d'onde de chaque système Figure II.13. Ceci permet de migrer individuellement chaque client sans couper le service aux autres clients. Il est a noté que bien que le concept ait été défini en 2006, le XG-PON2 n'a véritablement vu le jour qu'en 2016 sous l'appellation XGS-PON (10-Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network). Le XG-PON1 a par la suite été rebaptisé XG-PON tout court dans la recommandation ITU-T G.987.2 amendement 1.

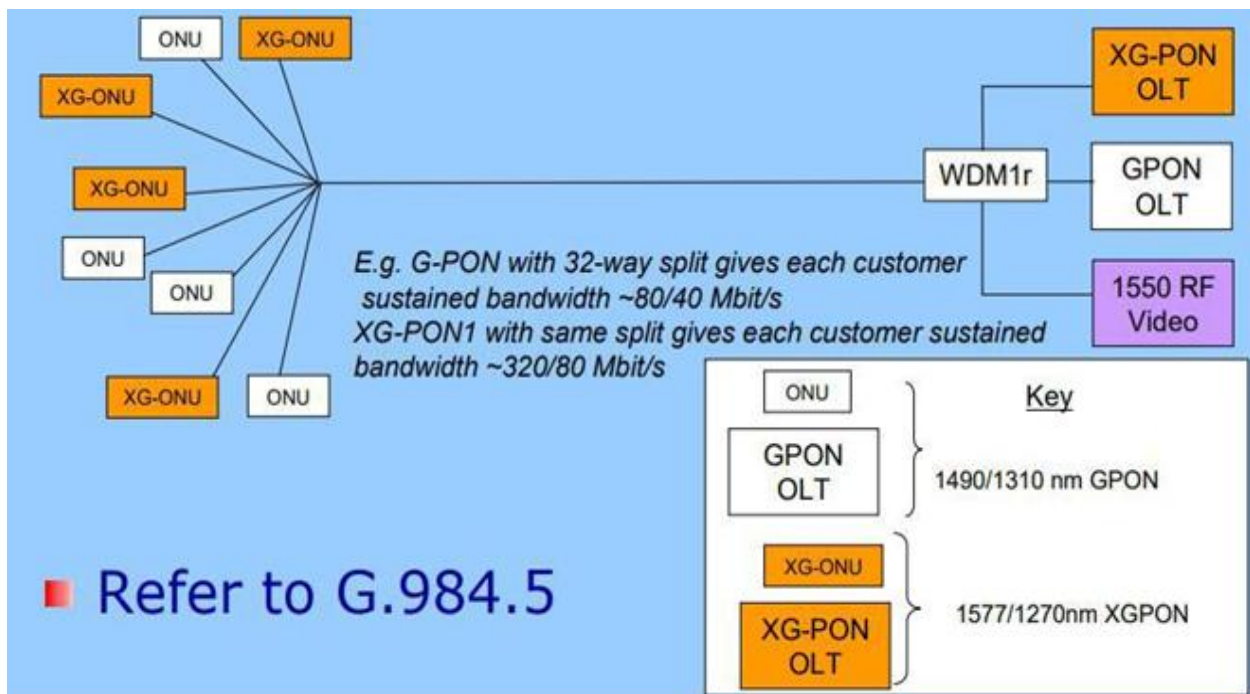


Figure II.13 : Exemple de migration du GPON au XG-PON1.

Du côté de l'IEEE, le standard 802.3av a été défini et fourni les spécifications associées au 10G-EPON. Ce standard définit également un débit asymétrique (10Gbps descendant et 1Gbps montant) et un débit symétrique (10Gbps descendant et montant) et peut être implémenté sur une infrastructure EPON existante. La migration est faite comme dans un XG-PON : le CO est pourvu d'OLTs EPON et 10G-EPON et les clients (ONU/ONT) des deux générations coexistent.

II.10.2 Le NGPON2

Pour répondre à la demande en débit de plus en plus grandissante, l'ITU-T a révélé le NG-PON2 du FSAN en 2015. Avec un débit descendant de 40Gbps et un débit montant de 10Gbps, ce système opère sur le même ODN que le GPON et le XG-PON et prévoit aussi une coexistence avec ces derniers afin de faciliter la migration. Il permet donc d'atteindre les budgets optiques définis dans le XG-PON ; i.e. de 29 à 35dB avec une perte différentielle allant à 15dB. La perte différentielle est la différence absolue entre les budgets optiques de deux trajets quelconques dans le même ODN. La technologie utilisée cette fois-ci est le TWDM (Time and Wavelength Division Multiplexed) avec une option additionnelle de PtP WDM (Point-to-Point WDM) pour offrir des liaisons dédiées, à haute capacité et à faible latence pour certains services sur le même réseau ODN autres que les services résidentiels. La technologie TWDM a été choisie au détriment d'autres technologies par exemple le TDM à haut débit, le WDM PON, le Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) PON, etc. Il est difficile de dire avec précision les raisons de ce choix puisqu'elles ne sont pas purement techniques et contiennent un peu de subjectivité. En plus des caractéristiques du NG-PON2 mentionnées plus haut, les facteurs clés considérés étaient les suivants: utilisation efficace de la capacité du système; capacité à offrir des services commerciaux / de backhaul à la fois résidentiels et à large bande passante et à faible latence sur le même ODN; échéancier pour la première disponibilité du système; maturité relative des composants; perspectives pour les équipements résidentiels à faible coût; potentiel de croissance progressive des capacités ou canaux dédiés à différents services; consommation d'énergie et applicabilité des modes d'économie d'énergie; et risque technologique.

Le TWDM est le mariage entre le partage temporel et le partage en longueur d'onde dans la même architecture. Il s'agit d'un partage temporel de plusieurs longueurs d'onde entre plusieurs utilisateurs. Dans le cas du NG-PON2, quatre canaux bidirectionnels sont utilisés avec des débits individuels de 10Gbps dans le sens montant et 2.5Gbps dans le sens descendant.

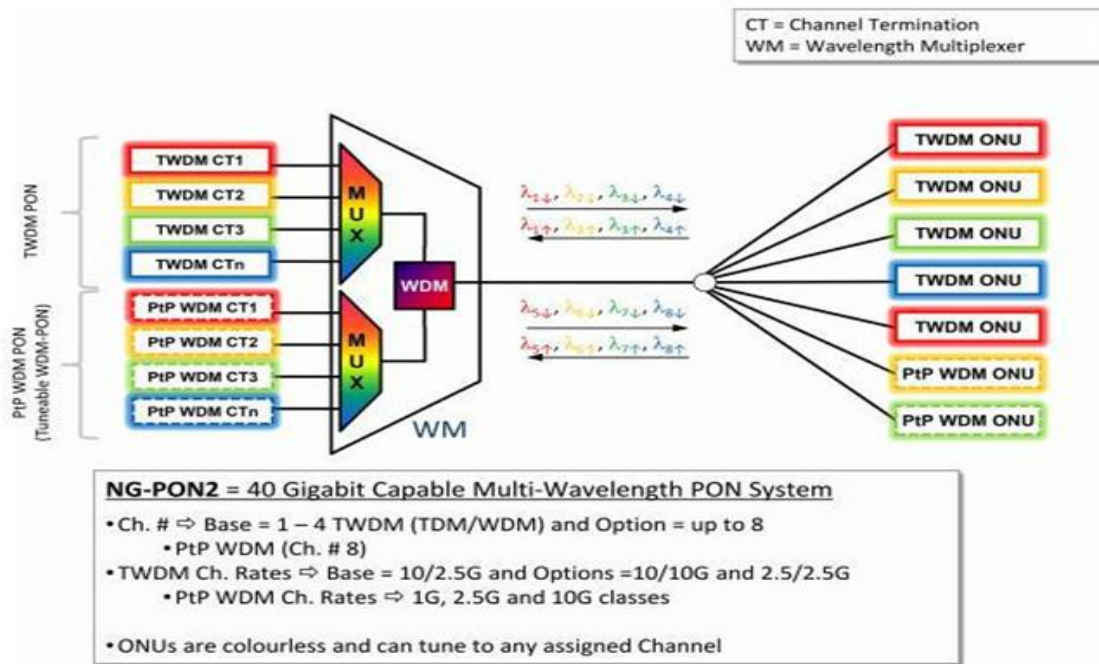


Figure II.14 : L'architecture d'un réseau NG-PON2.

II.10.3 Les prochaines générations PON

En novembre 2016, le FSAN a publié une feuille de route de normalisation Figure II.16 FSAN Roadmap 2.0) qui prévoit de futurs systèmes d'accès optique devant offrir non seulement une capacité de transmission maximale supérieure, mais aussi plusieurs nouveaux attributs : portée longue, reconfigurabilité et flexibilité du système. L'IEEE, de son côté a commencé à travailler sur la normalisation de 100G-EPON qui sera publié d'ici 2020.

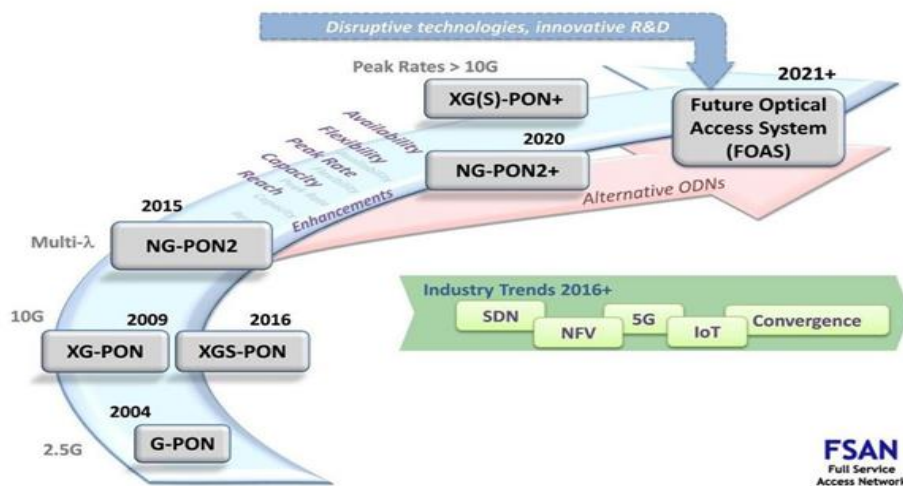


Figure II.15 : FSAN Roadmap 2.0.

Le choix de la technique de OFDM-PON est envisagé pour le NG-PON2+.

II.11 Les technologies pour le NG-PON

La transmission dans un réseau passif notamment pour les nouvelles architectures de réseau d'accès est assurée via des techniques de multiplexage, à savoir le multiplexage temporel, le multiplexage en longueur d'onde et le multiplexage fréquentiel.

II.11.1 TDM-PON (Time Division Multiplexing-PON)

La conception de déploiement de l'architecture du réseau PON, dans la plupart des opérations repose sur la distribution temporelle d'une longueur d'onde unique entre nombreux clients [25].

Le principe du multiplexage temporel (ou TDM PON) est montré dans la Figure II.16 ci-dessous.

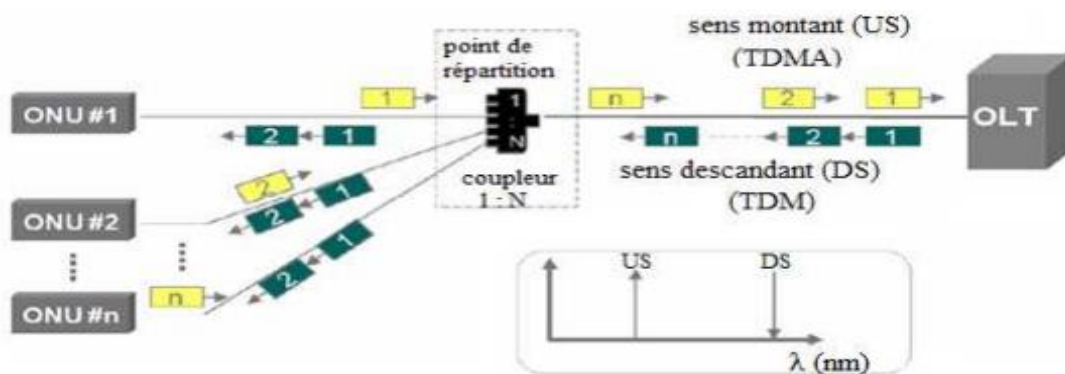


Figure II.16 : la technique de multiplexage TDM-PON.

Pour le sens montant (de l'ONU vers l'OLT), la distribution des ressources s'effectue par le TDMA (Time Division Multiple Access) où tout utilisateurs dispose d'un intervalle de temps bien précis [26], nommés « time slots » pour émettre afin de ne plus interférer avec un autre abonné. L'OLT permet de reprendre et de synchroniser vite l'horloge avec les données venant des clients situés à des distances différentes.

Pour le sens descendant (de l'OLT vers l'ONU), les données sont réparties dans les trames temporelles en fonction de l'abonné destinataire. Chaque ONU reçoit tout le flux d'informations parce que les données sont diffusées, cependant la synchronisation et le codage lui permettent de récupérer exceptionnellement les données qui lui sont destinées. De plus, La répartition du débit entre les utilisateurs peut être fixe ou variable [26].

II.11.2 WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing-PON)

Le multiplexage en longueur d'onde WDM est la réponse à un accroissement des débits et du taux de distribution dans le réseau d'accès utilisant la longueur d'onde comme composante de multiplexage, ça veut dire que tout utilisateur va attribuer une longueur d'onde particulière. Alors dans l'architecture WDM-PON, les ONU peuvent fonctionner à plusieurs longueurs d'onde, comme il est montré dans la Figure ci-dessous (II.17).

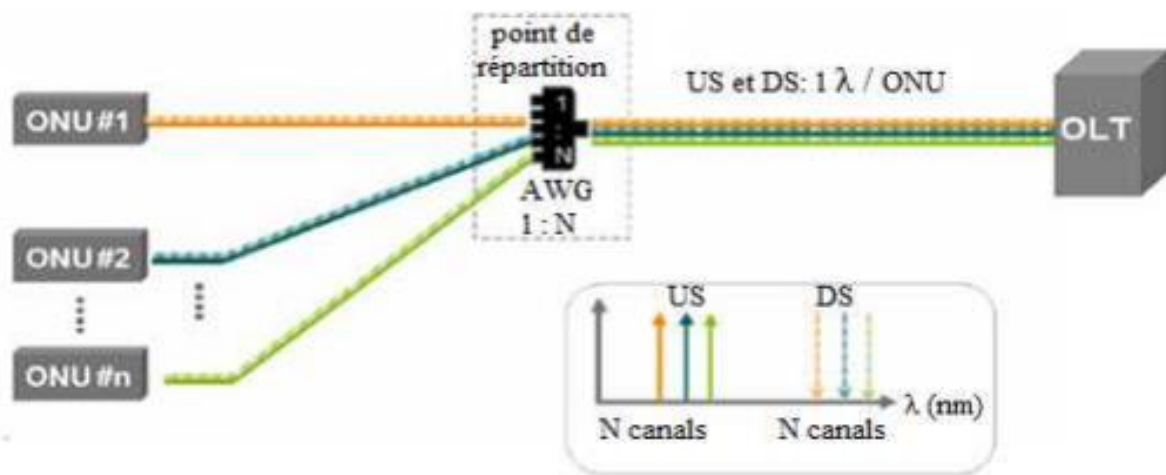


Figure II.17 : Technique de multiplexage WDM-PON.

Dans la voie descendante, D'abord l'OLT émet toutes les longueurs d'onde sur la même fibre distribuée. On utilise un répartiteur de longueur d'onde ou en utilisant un démultiplexeur de type AWG (Arrayed Waveguide Grating) dans le point de répartition, tout ONU reçoit une longueur d'onde dédiée, en plus un filtre en longueur d'onde au niveau de l'ONU permet de sélectionner la longueur d'onde dédiée à tout abonnés.

Dans la voie montante, les ONU renvoient des différentes longueurs d'onde vers l'OLT. L'abréviation WDMA (Wavelength Division Multiple Acces) indique l'accès multiple en longueur d'onde dans la voie montante.

II.12 Les types des réseaux d'accès PON et Normalisations

La réussite du réseau repose non seulement sur sa grande bande passante, son coût est moins cher à long terme, sa maintenance et son principe de fonctionnement simplifié néanmoins l'absence de composants actifs entre l'OLT et les ONU. Ainsi

que, son déploiement dans le réseau d'accès permet une transparence du réseau, de l'émetteur jusqu'au récepteur [27]. Au tableau qui se suit (II.4), On a introduit les grandes instances de normalisations (IEEE et ITU) aussi que les types de ce réseau (PON) déployés dans le réseau d'accès pour le haut débit: l'APON, le B-PON, l'E-PON et le G-PON [28, 29].

Le FSAN est l'organisme de pré-normalisation de l'ITU qui est à l'écoute des besoins des opérateurs qu'il analyse, pour ensuite leur proposer des solutions. Il assemble un ensemble de groupes manipulateurs de télécommunication et d'équipementiers tel que : Orange, Nippon Telegraph & Telephone, British Telecom, Huawei, NEC, Finisar, Alcatel-Lucent, etc. Le réseau GPON est largement déployé au Japon et en Corée du Sud, également que l'E-PON est déployé aux Etats-Unis et en Europe [28, 29]. Dans les standards PON, la transmission dans la voie descendant de la liaison est réalisée en TDM. Pour éviter les collisions à travers le réseau, le TDMA est utilisé dans la voie montante, Le Tableau suivant (II.4) montre une étude comparative des standards TDM-PON maintenant déployés en termes : de protocole, de bande passante totale ou par client, de nombre d'utilisateurs par réseau PON et d'appréciation du coût global de réalisation.

Le Tableau II.4 : Systèmes PON actuellement déployés [34, 30].

	A-PON	B-PON	E-PON	G-PON
Standards	ITU-TG.983.21	ITU-TG.983.2x	IEEE 802.3ah	ITU-TG.984.x
Protocoles	ATM	ATM	Ethernet	GEM
Bande passante maximale	155 Mb/s (↓↑)	622 Mb/s (↓↑)	1.25 Gb/s (↓↑)	2.5 Gb/s (↑) 1.5 Gb/s (↓)
Nombre d'abonnés par PON	16-32	16-32	16-32	32-64
Bande passante par abonné	10-20 Mb/s	20-40 Mb/s	30-60 Mb/s	40-80 Mb/s
Vidéo	RF/IP	RF/IP	RF/IP	RF/IP
Coût	faible	faible	faible	moyen

- ATM : Asynchronous transfer mode ;
- GEM : G-PON encapsulation mode ;
- RF/IP: Radio frequency / internet protocol.

Bien que tous les avantages du TDM-PON comme les services et applications qui apparaissent de plus en plus nombreux et que la bande passante augmentent, le réseau PON a besoin d'être gracieusement mis à niveau. Mais, il est nécessaire qu'il soit conçu pour être évolutif (de manière à ce que, seuls les abonnés qui ont besoin du haut débit soient mis à niveau, et pas tout le réseau). C'est dans ce contexte que le collectif (FSAN, IEEE et ITU SG-15) a proposé le NG-PON (Next-generation PON).

La Figure II.18 montre les étapes de normalisation du PON (depuis l'A-PON jusqu'au NG-PON [31, 32]). Pour 2020, les réseaux NG-PON doivent:

- proposer une capacité atteignant les 90 Gb/s à 160 Gb/s ou bien plus de ça;
- supporter jusqu'à 256 utilisateurs voire 1024;
- atteindre environ 20 à 60 kilomètres de distance de transmission ;
- posséder une consommation faible de l'énergie ;
- Moins coût à réaliser et évolutifs ;
- faciliter une coexistence avec le G-PON.

Toutes ces exigences sont adoptées pour que le réseau PON puisse fournir de très grandes performances, s'élargissant jusqu'aux réseaux métropolitains et cœurs tout en se liant avec les réseaux sans fil, renforçant les réseaux hybrides du futur [33, 34].

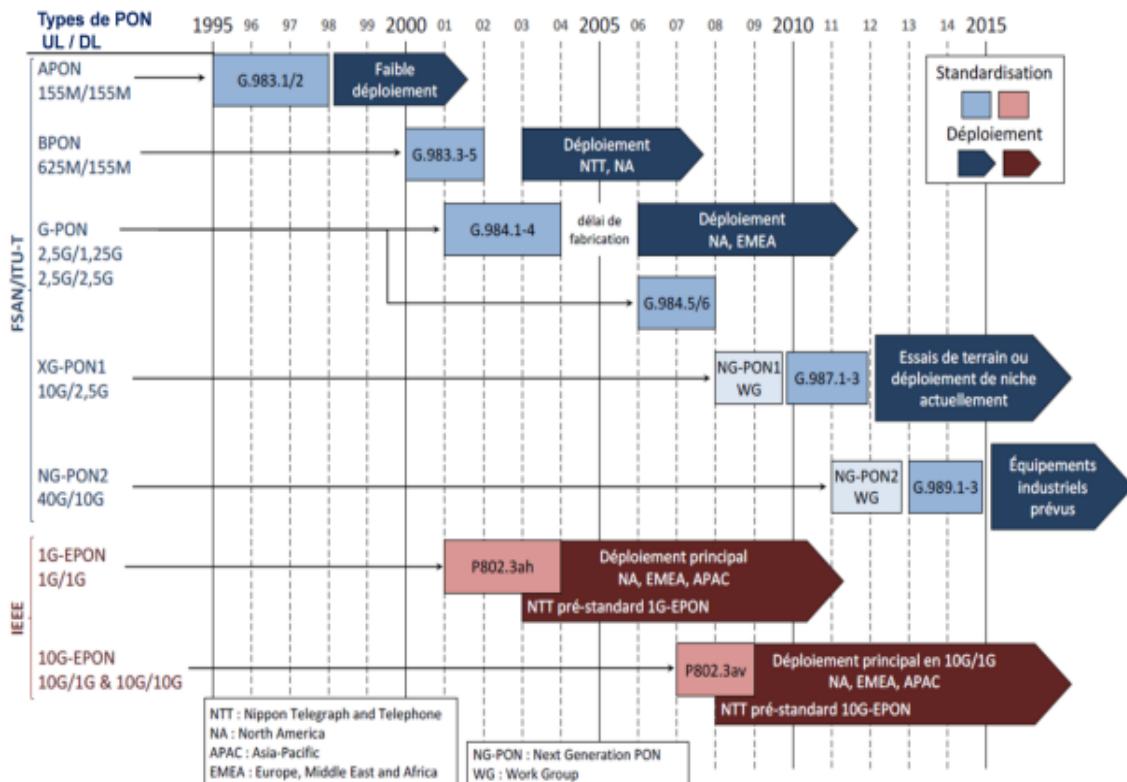


Figure II.18 : Les étapes de normalisation du PON [35].

Les manipulateurs télécoms envisagent pour le NG-PON, des solutions qui permettent de le faire coexister avec le PON actuel (infrastructures fibrées actuelles). Ces solutions devraient permettre une bonne flexibilité du réseau, aussi qu'une mise à niveau graduelle facile, favorisant un revenu total moins cher avec un temps d'installation minimum [36]. La migration du G-PON à la toute première étape du NG-PON (XG-PON1) résulte que les équipements OLT et ONU du G-PON soient premièrement déployés pour qu'ensuite, ceux du XG-PON1 puissent être implantés. Cela oblige que l'ODN du G-PON (comportant la fibre optique de transport et le répartiteur) soit fixe et inchangé, afin de rester en harmonie avec le XG-PON1. L'objectif n'est plus d'interrompre des services aux clients qui décident de rester sur le G-PON, mais d'intégrer d'autres composants en bout de chaîne pour les utilisateurs voulant bien migrer au XG-PON1. Un filtre WDM est utilisé pour arranger ou séparer les signaux G-PON et XG-PON1 de part et d'autre de l'ODN afin d'éviter tout le difficulté du fonctionnement du service clients [37].

II.12.1 Migration vers le NG-PON2

Le Tableau II.5 illustre les caractéristiques nécessaires des standards NG-PON1. On notera que : même si le débit client, le nombre d'utilisateur par PON et la distance de transmission ont augmenté, le coût de réalisation reste encore élevé par rapport au GPON. Le nombre des clients par PON (ou taux de partage) permet de fixer le budget optique. Le budget optique (BO) est généralement considéré comme étant l'atténuation totale en (dB) entre la source optique et le récepteur optique. Dans [38], le BO est donné par :

$$BO = P_e - P_r \quad (II-2)$$

Où P_e et P_r sont respectivement les puissances optiques émise et reçue. Aussi que le budget optique maximal et la distance de transmission L d'un système PON sont reliés par :

$$BO(dB) \gg B_0 + \alpha L + \log_{10}(N) + M_s (dB) \quad (II-3)$$

On note que :

- B_0 la perte due au multiplexeur ;
- N le nombre d'utilisateurs ;
- M_s la marge en puissance de couplage [38].

Dans NG-PON1, le budget optique conçu sans amplification optique (pré/post) est dit nominal. Le cas opposé, il est dit « étendu » [37].

Face à l'évolution constante de l'internet et le besoin accru des clients, une autre phase de migration a été envisagée pour le NG-PON. Il y a un NG-PON2 qui est par rapport aux différentes versions PON, couvrira beaucoup de distance et de bande passante pour être bas coût et moins gourmand en énergie. Cela fera le bonheur des manipulateurs télécoms parce que leur permettra de recouvrir les frais investis pour détruire les systèmes PON passés. Le NG-PON2 est prévu pour être déployé à long terme. La capacité visée par le NG-PON2 dans l'immédiat, est de 40 Gb/s en sens descendant et 10 Gb/s en sens ascendant pour environ 160 Gb/s en sens descendant et 80 Gb/s en sens ascendant dans ses futures versions. Il doit satisfaire des taux de partage d'au moins 1×256 sur au moins 40 kilomètres sans extension dont 60 à 100 kilomètres avec extension [39]. Pour faciliter la maintenance du réseau, vu qu'il serait difficile de différencier un ONUx d'un autre ONU, le NG-PON2 est prévu pour fonctionner en longueur d'onde avec des composants bas coûts. Ce qui veut dire, qu'à par le fait que les longueurs d'onde soient séparées pour les clients et les équipements restent les mêmes [38].

Tableau II.5 : Comparaison des systèmes PON actuellement déployés [40, 41].

	10 GE-PON	XG-PON1	XG-PON2
Standards	IEEE 802.3av	FSAN	FSAN
Protocoles	Ethernet	GEM	GEM
Bande passante Maximale	10 Gb/s (↓↑)	10 Gb/s (↓) 2.5 Gb/s (↑)	10 Gb/s (↓↑)
Nombre d'abonnés par PON	≥ 64	≥ 64	≥ 64
Bande passante par abonné	≥ 100 Mb/s	≥ 100 Mb/s	≥ 100 Mb/s
Vidéo	RF/IP	RF/IP	RF/IP
Portée maximum	20-60 Km	20-60 Km	20-60 Km
Coût	Elevé	Elevé	Elevé

Bien que les différentes technologies envisagées pour le NG-PON2 dont le TDM-PON, le WDM-PON, l'OFDM-PON, Que l'architecture TWDM-PON a été retenue par le FSAN comme meilleur candidat [37, 42].

II.12.2 Pourquoi le TWDM-PON ?

Au début du projet NG-PON2 [39] par l'équipe FSAN l'année 2011, les exigences standards requises étaient le premier choix d'un système montrant au moins une capacité de 40 Gb/s dans le sens descendant (4x10 Gb/s) et 10 Gb/s dans le sens ascendant (4x2, 5 Gb/s) pour 40 kilomètres de portée avec un taux de distribution d'au moins 64 abonnés. Il n'était pas encore question de compatibilité avec les précédentes versions PON sur le réseau de partage. En fonction de ces critères, plusieurs propositions ont été faites. La première de ces proposition est basée sur l'architecture TDM-PON qui devrait proposer 40 Gb/s XG-PON en sens descendant pour 10 Gb/s TDMA dans la voie montant. En raison d'une part, de la rareté sur le marché de composants à 40 Gb/s (au moment de l'étude du NG-PON2), de la distance de transmission limitée par la dispersion chromatique en TDM-PON, et d'autre part, du faible budget optique diminuant le nombre d'abonnés, finalement il a été conclu que le TDM-PON ça coûte très cher et alors ce n'est pas un très préférable choix pour le NG-PON2. En plus une autre proposition a été l'approche WDM-PON qui a longuement sollicité l'intérêt des opérateurs par son évolutivité et sa fluidité en supportant différentes solutions FTTx dont la configuration FTTH. Le WDM-PON utilise plusieurs longueurs d'onde [33] pour communiquer entre l'émetteur et le récepteur, alors nécessite un ODN sélectif en longueur d'onde pour satisfaire les capacités voulues. Néanmoins l'échec de cette proposition provient du fait qu'il était question que le NG-PON2 puisse rester compatible avec les versions antérieures du PON. Ce qui n'est pas le cas d'un système WDM-PON.

Quant à l'OFDM-PON qui montre des différents avantages en mot de robustesse face à la dispersion chromatique dans la fibre, de solution pour le haut débit avec une trop bonne flexibilité recherchée par le NG-PON2, il ne sera pas retenu pour le NG-PON2. Ça découlerait d'une part, de son PAPR (Peak to Average Power Ratio) grand, de sa sensibilité au bruit de phase et à l'offset en fréquence aussi que de la faible disponibilité sur le marché de composants pouvant satisfaire les conditions NG-PON2

désirées. Mais des études approfondies sont toujours en menées pour intégrer un futur déploiement de l'OFDM-PON dans le NG-PON2.

Or, la solution ayant été retenue est une proposition hybride TWDM-PON (Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network) [37, 42, 43]. Au nombre des arguments ayant autorisé ce choix, on peut énumérer son taux élevé de distribution (qui conclut en une consommation très bas de puissance, alors du coût par client), et sa capacité à être flexible dans l'allocation des ressources adaptées en fonction de la demande du trafic. Le WDM est utilisé pour développer le débit et alors de multiplexer différents sous-systèmes XGPON en longueur d'onde. Les amplificateurs optiques sont utilisés côté OLT pour booster les signaux descendants et une pré-amplification du signal montant à l'ONU est faite pour obtenir des budgets optiques élevés. Le réseau de partage optique (ODN) est passif parce que les composants (amplificateurs optiques et Multiplexeurs/Démultiplexeurs WDM) sont placés du côté de l'OLT comme il est montré dans la figure II.19. Le distributeur utilisé dans l'ODN permet de partager le signal vers tous les ONUs de telle manière que chaque ONU reçoive toutes les longueurs d'onde émises. Grâce aux composants (source et récepteur optiques) accordables en longueur d'onde prévus au niveau de chaque ONU, la démodulation est ainsi facilitée. Le TWDM-PON revient à multiplexer en longueur d'onde, 4 ou 8 sous-systèmes XG-PON individuels à l'intérieur d'un même réseau de partage optique (ODN) utilisant des paires de longueurs d'onde (en sens ascendant et descendant) [44].

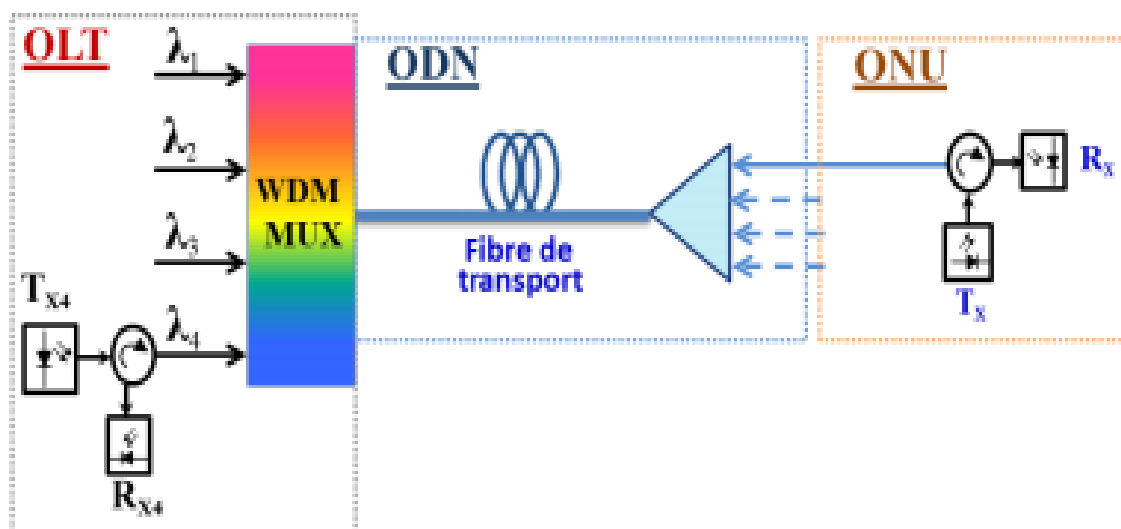


Figure II.19 : L'architecture de base du TWDM.

Les longueurs d'onde du TWDM ont été planifiées de trois manières [45]. Première répartition est obtenue en réutilisant certaines longueurs d'onde prévues pour le XGPON avec pour précaution, des intervalles grisés pour éviter toute interférence. C'est ce qui est indiqué à la Figure II.20 où le TWDM-PON peut coexister avec le GPON, la vidéo analogique mais pas avec le XG-PON1 (1260 – 1280nm ↑ et 1575-1580nm ↓).

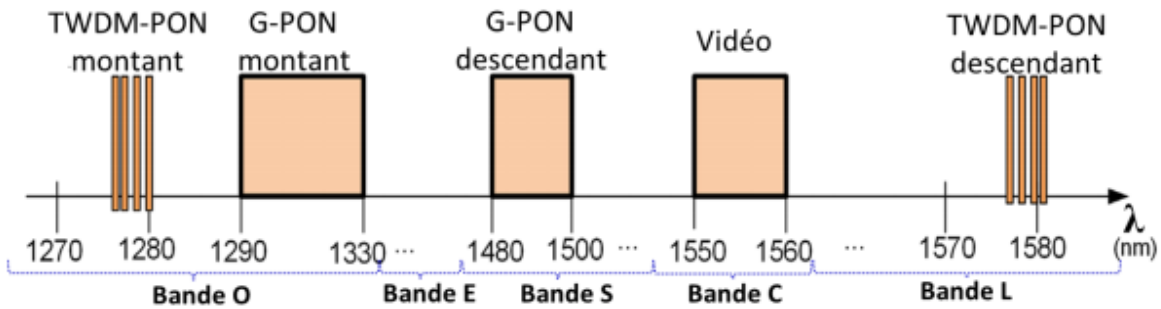


Figure II.20 : Réutilisation des longueurs d'onde du XG-PON en TWDM [46].

Deuxième répartition est pour accroître le budget optique et la portée du NG-PON2, une redéfinition de la bande C a été élaborée. Celle-là a pour objectif de permettre l'utilisation d'amplificateurs optiques type EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) pour amplifier le signal et pallier ainsi aux pertes en ligne. Comme montré à la Figure suivante (II.21), le TWDM-PON pourrait ainsi coexister avec le GPON et le XG-PON mais pas avec la vidéo analogique.

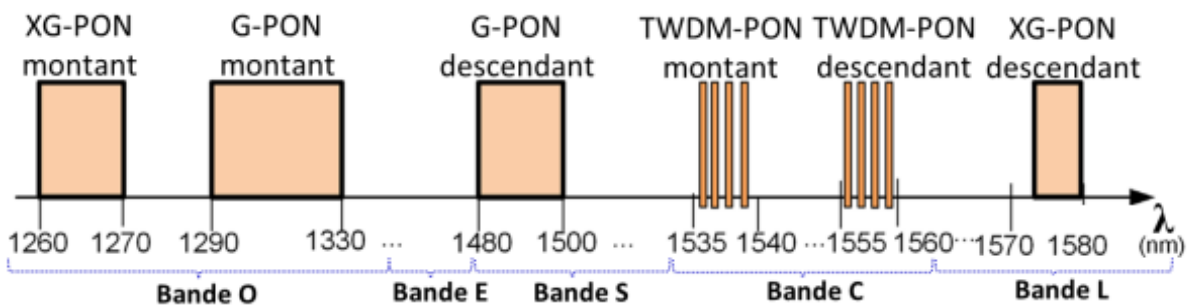


Figure II.21 Répartition dans les longueurs d'onde de la bande C [46].

La troisième option est un mixte des deux premières options [48]. Dans cette nouvelle possibilité de la longueur d'onde (Figure II.22), les canaux descendants sont placés aux longueurs d'onde supérieures de la bande L (bandes descendant allouées au XG-PON) comme les canaux montants se retrouvent aux longueurs d'onde inférieures de la bande C (bandes ascendantes de la bande C).

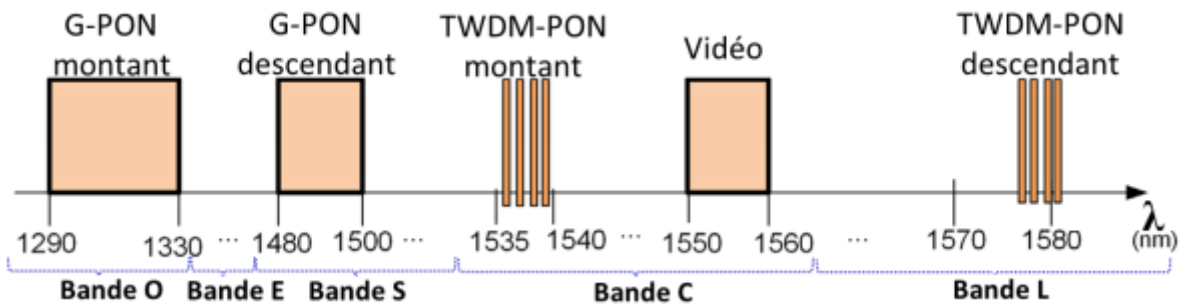


Figure II.22 : Répartition suivant les longueurs d'onde inférieures des bandes C et L [46].

D'un autre point de vue, on dit maintenant de post NG-PON2 pour lequel, de modernes formats de modulation seront possibles. C'est pour ça que de nouvelles recherches sont en cours d'étude pour approfondir la possibilité d'intégrer d'autres solutions pour le NG-PON2 et évolutions [47, 49].

II.13 Conclusion

La technologie PON continue à se développer, ces avantages économiques du déploiement des réseaux PON sont de plus en plus intéressants. Il est le dernier tronçon entre le fournisseur et l'utilisateur, à l'immeuble (FTTB), aux locaux de la société (FTTP), suivant l'emplacement où se finit la fibre optique. Jusque-là, les réseaux de fibre à l'utilisateur (FTTH) est l'application principale PON. Entre les défis auxquels les futures générations de constructeurs seront confrontées sont particulièrement l'amélioration de la portée et les relations de division très élevés pour de réduire les charges liées aux câblages. Ces améliorations, avec les débits dépassant les 10 Gbit/s, favoriseront le développement des réseaux optiques passifs, surtout dans les agglomérations denses, intelligents pour un monde connecté de la future.

Références bibliographiques

- [1] LECOY Pierre- Titre « Télécom sur fibre optique ». Edition 2008.
- [2] <http://www-public.imtbs-tsp.eu/~maigron/Internet/Acces.html>.
- [3] L. Paraschis, “Chapter 18 - Advancements in Metro Regional and Core Transport Network Architectures for the Next-Generation Internet”, Optics and Photonics, Academic Press, Boston, 2013, Pages 793-817, ISSN 1557-5837.
- [4] R. Essiambre, et al., “Breakthroughs in Photonics 2012: Space-Division Multiplexing in Multimode and Multicore Fibers for High-Capacity Optical Communication”, IEEE Photonics Journal, vol.5, no.2, pp.0701307-0701307, Apr. 2013.
- [5] G. Zhang, et al., “A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.15, no.1, pp.65-87, First Quarter 2013.
- [6] Y. Wang, X. Cao, “Multi-Granular Optical Switching: A Classified Overview for the Past and Future”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.14, no.3, pp.698- 713, Third Quarter 2012.
- [7] F. J. Effenberger, T. El-Bawab, “Passive Optical networks (PONs): past, present, and future”, Journal on Optical Switching and Networking, vol. 6, no. 3, pp. 143-150, July 2009. Bibliographie 183
- [8] R. Yadav, “Passive-optical-network- (PON-) based converged access network [Invited]”, IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol.4, no.11, pp. B124-B130, Nov. 2012.
- [9] AEDEV - Etat des lieux des TIC au Bénin, <http://www.aedev.org/spip.php> Article 1480, dernière consultation, Septembre 2014.
- [10] L. G. Kazovsky, et al., “Broadband Optical Access Networks”, John Wiley & Sons, United States, 2011.
- [11] << Mémoire sur les réseaux FTTH >>-juillet2009 ; Cogisys ; Architecture des systèmes de communication
- [12] Livre Blanc- Titre « Les réseaux PON (Passive Optical Network) » - 18/12/2006.

- [13] GASSER Philippe- Thème « Les architectures FTTX » – MSH Paris Nord – Plate-forme arts, sciences, technologies.
- [14] Fabienne Saliou ; << Etudes des solutions d'accès optique exploitant une extension de portée >> -14/06/2010.
- [15] Y.Zouine, «Contribution par la simulation système a l'étude des contraintes des composants optiques sur la transmission optique utilisant la technique CDMA », Thèse de doctorat, Univ Limoge, Octobre 2005. 2
- [16] NAKANO Yuluo Hitachi- Thème « Technologie and applications of Passive Optical Networks (PON) » FTTH.
- [17] Septembre 2009-43, rue de Meuniers, 94300 Vincennes -Etude de chiffrage pour le développement du très haut débit en aquitaine.
- [18] Ali Heibi, « Hybridation de fibres optiques et de nanoparticules semiconductrices : application aux sources lumineuses », Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges, le 14 Juin 2014.
- [19] A. Temmar, «Caractérisation de l'amplificateur optique a fibre dopée a erbium», 2007.
- [20] Oussama MHIBIK, «Développement de sources lasers solides continues, visibles et stabilisées en fréquence : une alternative aux lasers à colorants», Thèse de Doctorat de l'Université de Paris 11, Orsay.
- [21] Bentahar attaouia, Kandouci Malika, “ Performance I mprovement by Pre-Amplifying with Erbium,Ytterbium Doped Devices Link Extenders of Fiber to the Home”, International.Journal of Information Engineering and Electronic Business, 2016, 4, 26-34, Volume 8, Issue 4, MECS <http://www.mecspress.org>. 2016.
- [22] Antoine Al Choueiry, « Nanoparticules de silicium et ions erbium pour l'amplification optique », Thèse de doctorat, January 2007.
- [23] Romain Peretti, «Saturation spectrale de gain dans les amplificateurs à fibres dopées erbium : largeurs homogène et inhomogène et approche des nanomatériaux», Thèse de doctorat, Octobre 2008.
- [24] Emmanuel Desurvire, « Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications », April 1994.
- [25] RAHARIMANITRA. F.N ; 2012 – « Contribution à l'étude des architectures basées sur le multiplexage en temps et en longueur d'onde dans le réseau

- d'accès, permettant la migration vers la nouvelle génération de PON (NG-PON) à 10 Gbits/s ». Thèse de doctorat présenté à Télécom Bretagne, Université de Bretagne-sud, France.
- [26] SALIOU. F ; 2010 – « Etude des solutions d'accès optique exploitant une extension de portée ». Thèse de doctorat présenté à TELECOM PARIS TECH, Université de LIMOGES, Paris, France.
- [27] R. Avizu, et al., “Hybrid WDM-XDM PON architectures for future proof access networks”, *International Journal on Advances in Systems and Measurements*, vol.5, No.3 & 4, 139-154, 2012.
- [28] M. Hernandez, et al., “A review of XDMA-WDM-PON for Next Generation Optical Access Networks”, *Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)*, vol., no., pp.1-6, 17-19 Dec. 2012.
- [29] F. J. Effenberger, et al., “Standardization trends and prospective views on the next generation of broadband optical access systems”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.28, no.6, pp.773-780, Aug. 2010.
- [30] L. G. Kazovsky, et al., “Next-Generation Optical Access Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, vol.25, no.11, pp.3428,3442, Nov. 2007.
- [31] F. J. Effenberger, et al., “XG-PON1 versus NG-PON2: Which one will win?”, *38th European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC)*, vol., no., pp.1-3, 16-20 Sept. 2012.
- [32] Z. Li, et al., “Key technologies and system proposals of TWDM-PON”, *Frontiers of Optoelectronics*, vol.6, no.1, pp.46-56, Mar. 2013.
- [33] M. Maier, M. Lévesque, “Dependable Fiber-Wireless (FiWi) Access Networks and their Role in a Sustainable Third Industrial Revolution Economy”, *IEEE Transactions on Reliability*, vol.63, no.2, pp.386-400, June 2014.
- [34] A. Dixit, et al., “Wavelength switched hybrid TDMA/WDM (TWDM) PON: A flexible next-generation optical access solution”, *14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, vol., no., pp.1-5, 2-5 July 2012.
- [35] M. Hajduczenia et H. Da Silva, “Next Generation PON Systems – Current Status”, *International Conference on Transparent Optical Networks*, 2009, Tu.B5.2
- [36] M. Maier, et al., “NG-PONs 1&2 and beyond: the dawn of the uber-FiWi network”, *IEEE Network*, vol.26, no.2, pp.15-21, Mar.-Apr. 2012.

- [37] J. -I. Kani, et al., "Next-generation PON-part I: Technology roadmap and general requirements", *IEEE Communications Magazine*, vol.47, no.11, pp.43-49, Nov. 2009.
- [38] L. G. Kazovsky, et al., "Broadband Optical Access Networks", John Wiley & Sons, United States, 2011.
- [39] ITU-T Rec. ITU-T G.989.1, "40-Gigabit-capable passive optical networks (NGPON2)".
- [40] L. G. Kazovsky, et al., "Next-Generation Optical Access Networks" *Journal of Lightwave Technology*, vol.25, no.11, pp.3428-3442, Nov. 2007.
- [41] Md. S. Ashan, et al., "Migration to the Next Generation Optical Access Networks Using Hybrid WDM/TDM-PON", *Journal of Networks*, vol.6, No.1, 18-25, Jan 2011.
- [42] N. Iiyama, et al., "Two-phased capacity upgrade method for NG-PON2 with hierarchical star 8-QAM and square 16-QAM", *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, vol., no., pp.1-3, 17-21 Mar. 2013.
- [43] Y. Luo, et al., "Wavelength management in time and wavelength division multiplexed passive optical networks (TWDM-PONs)", *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, vol., no., pp.2971-2976, 3-7 Dec. 2012.
- [44] R. Schneir, et al., "Strategic and economic aspects of network sharing in FTTH/PON architectures", *Proc. of the 23rd European Regional Conference of the International Telecommunication Society (ITS)*, pp. 1-13, 2012.
- [45] Y. Ma, et al., "Demonstration of a 40Gb/s Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network Prototype System", in *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (Optical Society of America)*, paper PDP5D.7, 2012.
- [46] S. Bindhaiq, et al., "Recent development on time and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation passive optical network stage 2 (NG-PON2)", *Optical Switching and Networking*, ISSN 1573- 4277.
- [47] M. Maier, "The Escape of Sisyphus or What "Post NG-PON2" Should Do Apart from Neverending Capacity Upgrades", *Photonics*, vol.1, no.1, pp.47-66, 2014.

- [48] Y. Ma, et al., “Demonstration of a 40Gb/s Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network Prototype System”, in Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (Optical Society of America), paper PDP5D.7, 2012.

CHAPITRE III

Amplificateur optique à Ytterbium

**CHAPITRE III : L'AMPLIFICATEUR OPTIQUE A FIBRE DOPEE
Erbium/Ytterbium «EYDWA »**

III.1	Introduction	77
III.2	Intérêt de l'amplification optique.....	78
III.3	Principe physique d'amplificateur optique.....	79
III.3.1	L'absorption	79
III.3.2	Emission stimulée et spontanée.....	79
III.3.3	L'inversion de population	80
III.3.4	L'amplification optique	81
III.4	Système Erbium/Ytterbium	81
III.4.1	Etat de l'art de l'amplification à fibre dopée Yb.....	82
III.4.2	Les fibres dopées Ytterbium	82
III.4.2.1	L'ion Ytterbium : Spectroscopi.....	82
III.4.2.2	Utilisation des matériaux Ytterbium dans un laser	83
III.5	Fibre micro-structurée	86
III.5.1	La fabrication	86
III.5.2	La microstructure.....	89
III.6	Le dopage Yb	94
III.7	Mode de pompage	96
III.8	Conclusion	99
	Références bibliographiques	101

III.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de faire un état de l'art de l'amplificateur à fibre dopée Ytterbium (Yb), afin de cibler la problématique de notre recherche dans un cadre technologique très développé. Ensuite, nous introduisons brièvement la thématique des fibres optiques micro-structurées, leur mode de fabrication et les différentes spécificités associées à la microstructure de trous d'air et au dopage Yb. Enfin, dans la dernière section, nous présentons quelques techniques de pompage d'amplificateur à fibre, avant de conclure sur ces généralités.

Depuis 35 ans, des chercheurs de l'Université de Southampton ont montré que l'on pouvait amplifier la lumière dans une fibre optique autour de 1540 nm avec l'ion d'erbium Er^{3+} , cette nouvelle fenêtre d'amplification dans la fibre optique, tombant sur une plage de haute transmission des fibres de silice, ce qui a permis une révolution dans les télécommunications optiques. Ils ont remplacé répéteurs-régénérateurs optoélectroniques. Plusieurs recherches s'attaquent à l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA) pour découvrir rapidement que ce type d'amplification permettait un gain élevé [Kimura 1989], cette technologie est mise en œuvre avec association du multiplexage en longueur d'onde (WDM). L'utilisation de l'erbium avec l'Ytterbium permet d'augmenter le niveau de l'absorption de la pompe, en utilisant fibre à double gaine est utilisée. L'ion d'Ytterbium absorbe la puissance pompe et excite l'ion d'erbium par relaxation croisée comme le montre la figure III.1. L'avantage d'utiliser l'Ytterbium au lieu d'exciter directement l'erbium est qu'il est possible de doper très fortement une fibre optique avec l'Ytterbium sans produire d'agrégats. De plus, l'ajout d'Ytterbium diminue aussi la formation d'agrégats d'erbium et permet d'utiliser une plage de longueur d'onde beaucoup plus large pour pomper le système.

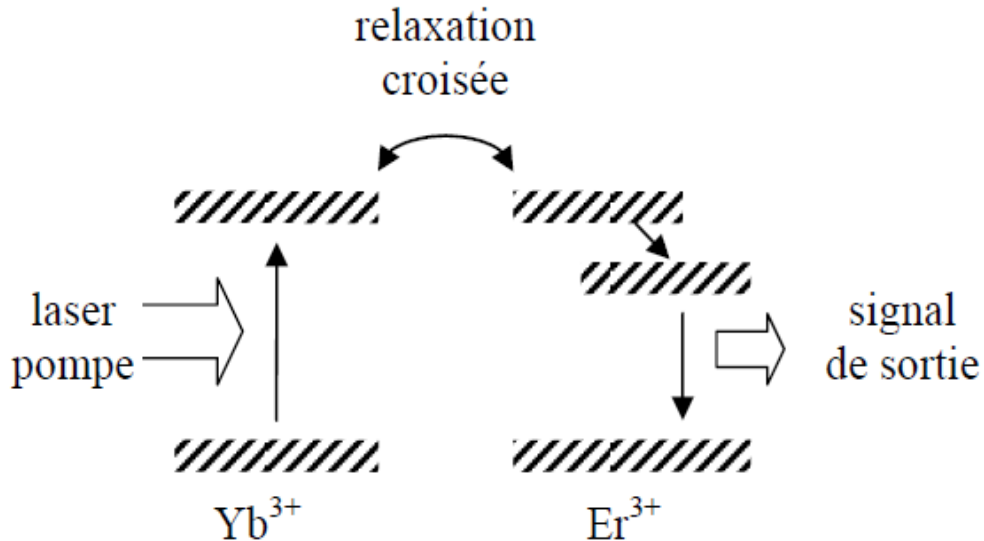


Figure III.1 : Diagramme des niveaux d'énergie d'un système erbium/Ytterbium

III.2 Intérêt de l'amplification optique

L'utilisation de l'amplificateur optique présente plusieurs avantages par rapport au répéteur régénérateur. En effet, dans un amplificateur optique, la bande passante est illimitée on peut atteindre plusieurs centaines de Giga Hertz. Il offre l'avantage d'amplifier les signaux sur une large plage sans tenir compte du débit de transmission et du format de modulation utilisé. Par contre il présente l'inconvénient du bruit dans le signal optique lorsque celui-ci le traverse, figure III.2.

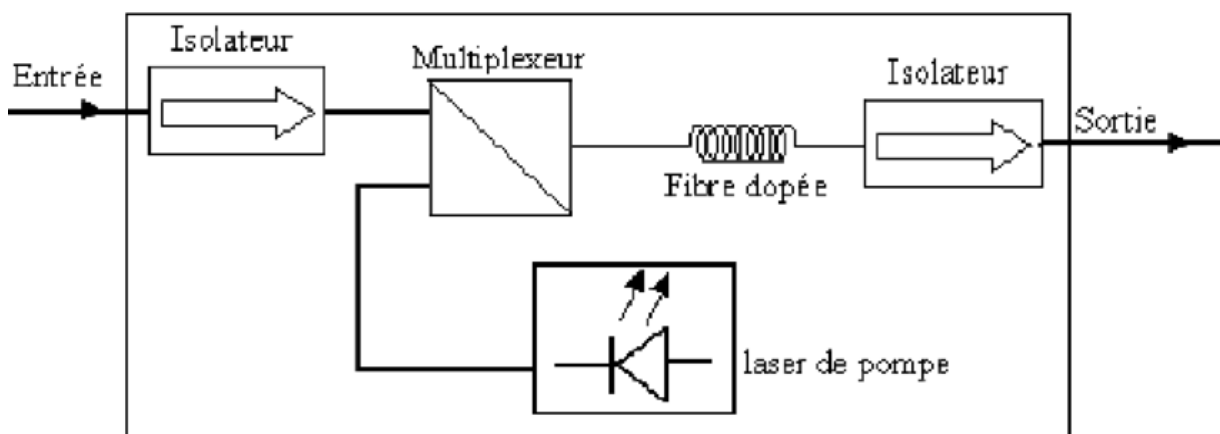


Figure III.2 : Principe de l'amplificateur optique.

Il existe plusieurs types d'amplificateurs optiques qui ont été développés au cours des dernières années, parmi ces amplificateurs nous avons: les amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA : Semiconductor Optical Amplifier) et les amplificateurs à fibre optique tels que les amplificateurs à fibre dopée erbium (EDFA : Erbium Doped Fiber Amplifier).

III.3 Principe physique d'amplificateur optique

Pour amplifier un signal lumineux Il existe plusieurs méthodes physiques différents a utilisés. Ils utilisent le même principe d'amplificateurs optiques. Dans des amplificateurs à fibre dopée, l'émission stimulée dans l'amplificateur de milieu de gain provoque une amplification de la lumière entrante. Il existe les amplificateurs optiques semi-conducteurs qui utilisent un semi-conducteur pour fournir le milieu de gain. Ainsi que des amplificateurs a effet Raman. La diffusion Raman de la lumière entrante avec des phonons dans le réseau du milieu de gain produit des photons cohérents avec les photons entrants. Enfin, les amplificateurs paramétriques utilisent l'amplification paramétrique.

III.3.1 L'absorption

Le principe de l'absorption, est qu'un photon d'énergie $h \cdot \nu$ est absorbé, il provoque une transition de niveau fondamental E_1 vers un niveau existé E_2 ou il laisse un trou en bande de valence. L'écart de cette énergie $E_2 - E_1$ égale a l'énergie E du photon.

$$E = E_2 - E_1 = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (III-1)$$

- h : La constante de Planck ;
- λ : La fréquence de l'onde émise ;
- c : la vitesse de la lumière dans le vide ;
- E_2 et E_1 : Les niveaux d'énergie fondamentale et excité.

III.3.2 Emission stimulée et spontanée

Avec une source de lumière usuelle l'émission de la lumière est spontanée, lorsqu'un électron dans état excité peut revenir à un état d'énergie plus basse en émettant un photon, par émission spontanée. Celle-ci est un phénomène aléatoire, car

il est imprévisible de savoir sa direction et sa phase puisqu'ils sont aléatoire. Pour une émission stimulé l'ion excité va créer un nouveau photon, dont la fréquence, la direction, la phase et la polarisation sont strictement identiques à celles du photon ayant déclenché. Les amplificateurs à fibres dopées aux terres rares reposent sur cette base.

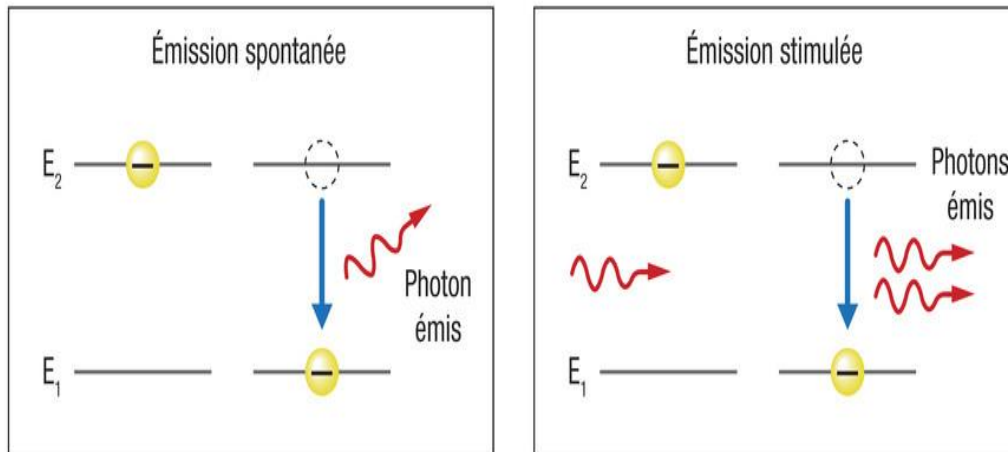


Figure III.3 : digrammes d'énergie des émissions spontanée et stimulée

III.3.3 L'inversion de population

Le phénomène d'inversion de population est obtenu par le pompage avec excitation d'extérieure pour peupler le niveau d'énergie supérieure (N_2) plus élevée dans le niveau du haut que dans le niveau du bas (N_1) et quelle n'est pas un moment d'équilibre. En effet, à l'équilibre thermodynamique, la répartition des populations sur les niveaux est donnée par la loi de Boltzmann [1]:

$$N_2 = N_1 \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) \quad (III-2)$$

- K : Constante de Boltzmann.
- T : Température.
- N_2, N_1 : niveaux d'énergies.

III.3.4 L'amplification optique

L'amplificateur optique, qui a fait l'objet de nombreux travaux depuis le début des années 1970, après avoir un milieu d'inversion de population, la lumière est amplifiée par émission de photons dans ce milieu. Un amplificateur joue le principe d'un laser sans contre réaction optique qui augmentera, dans le domaine optique, la puissance aura donc un gain. La figure III.4 montre ce phénomène.

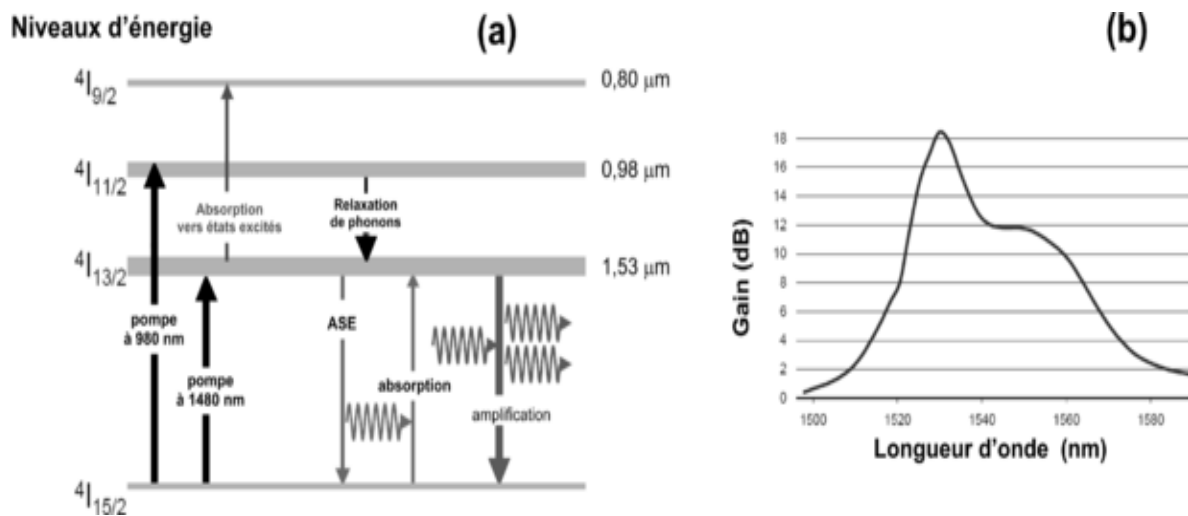


Figure III.4 : Principe de l'amplificateur optique.

III.4 Système Erbium/Ytterbium

L'association de l'erbium avec l'Ytterbium nous permet d'augmenter très largement l'absorption de la pompe, avec l'utilisation de la fibre à double gaine. Le principe du phénomène est lorsque l'ion d'Ytterbium absorbe la puissance pompe et excite l'ion d'erbium par relaxation croisée. L'utilisation de l'Ytterbium au lieu d'exciter directement l'erbium permet un fort dopage de la fibre optique sans produire d'agrégats. En plus, l'association d'Ytterbium diminue aussi la création d'agrégats d'erbium et permet d'utiliser une très large plage de longueur d'onde pour pomper de la lumière dans un système.

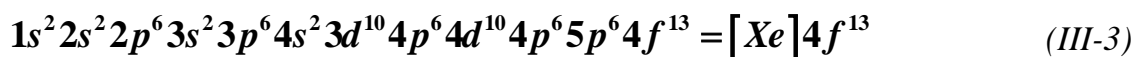
III.4.1 Etat de l'art de l'amplification à fibre dopée Yb

Le système de l'amplification à fibre dopé est un domaine en très forte progression, surtout ces dernières décennies. Cette thématique est notamment marquée par la difficulté à réaliser des lasers monomodes de forte puissance [2, 3]. Le concept monomode est en effet favorable pour éviter le couplage inter-modal (néfaste en terme de rendement). Le but est de réaliser un système utilisant des fibres où les modes d'ordre supérieur (HOM, acronyme anglais pour higher order mode) qui n'existe pas en sortie de système, pour un cœur (supérieur à 30 μm de diamètre) afin augmenter le seuil d'apparition des effets non-linéaires (problèmes dans les lasers de forte puissance). Mais, l'élargissement de la taille du cœur induit une dégradation du concept monomode des fibres optiques. Pour y remédier, de nouvelles méthodes de sélection modale sont développées, de même des techniques de fabrication pouvant réaliser un indice cœur/gaine très minime. On distingue les amplificateurs utilisant des fibres « naturellement **multi-modes** » (où plusieurs modes de propagation. Puis nous présentons une autre étude, qui consiste à fabriqué des amplificateurs à base de fibres « d'origine **monomodes** » (un seul mode propagation), particulièrement les fibres micro-structurées à trous d'air. Cette valeur nous permet de donner une focalisation du faisceau. Lorsque cette valeur est proche de 1, on peut supposer que le faisceau est en limite de diffraction, monomode transverse. D'autre part, la taille du mode est comparée à la taille du cœur de la fibre

III.4.2 Les fibres dopées Ytterbium

III.4.2.1 L'ion Ytterbium : Spectroscopie

L'ion Ytterbium appartient à la famille des lanthanides plus connus sous le nom des terres rares, son model électronique est comme suit :



La couche 4f présente un déficit d'électron qui confère à l'ion Yb^{3+} . L'état d'un système est fixé par ces trois nombres quantiques L, S, J où L, est le moment angulaire orbital, S le moment angulaire du spin et enfin J le moment angulaire total.

L'état du système est noté :

$$2S+1LJ \quad (III-4)$$

Avec :

$$|L-S| \leq J \leq |L+S| \quad (III-5)$$

Dans le cas de l'Ytterbium, $L = 3$ et $S = 1/2$. J est donc compris entre $5/2$ et $7/2$. Les niveaux d'énergie de l'Ytterbium dans son état isolé noté correspondent respectivement à l'état fondamental et l'état excité. La différence d'énergie entre ces deux états est égale à 10000cm^{-1} . Ce schéma à deux niveaux de l'Ytterbium à l'état isolé, ne fait pas de cet ion un élément attrayant pour la réalisation de milieux lasers. Cependant, une fois introduit dans une matrice vitreuse, l'atome d'Ytterbium peut s'ioniser en Yb^{3+} . L'éclatement des niveaux est dû au fait qu'insérer dans la matrice et soumis à un champ électrique, l' Yb^{3+} , subit une levée de dégénérescence partielle par effet Stark. Les deux multiplets $2F7$ éclatent respectivement en 4 et 2 sous niveaux. C'est cette dégénérescence des multiplets qui détermine de façon directe les caractéristiques du matériau dopé aux ions Yb^{3+} notamment les sections efficaces, les longueurs d'onde d'absorption et d'émission ainsi que le temps de vie du multiplet excité.

III.4.2.2 Utilisation des matériaux Ytterbium dans un laser

L'Ytterbium et le néodyme font partie des dopants les plus utilisés dans les systèmes lasers fournissant des fortes puissances émettant dans le proche infrarouge. Les matériaux dopés néodyme sont généralement pompés à 808 nm. L'Ytterbium dans une matrice vitreuse est quant à lui pompé autour de 915 nm ou 980 nm. Malgré la découverte et l'identification relativement ancienne des propriétés des ions Ytterbium en matrice vitreuse en 1962 [Etzel et al. 1962], les matériaux lasers dopés Ytterbium n'ont intéressé les scientifiques que récemment. L'ion Yb^{3+} a longtemps été négligé notamment au profit du néodyme qui bénéficiait de l'existence de moyen de pompage puissant autour de 800 nm. L'insertion de l'ion Ytterbium dans une matrice vitreuse ainsi que l'avènement sur le marché des diodes lasers ont marqué le regain d'intérêt des chercheurs pour les lasers dopés Ytterbium. L'Ytterbium est alors rapidement devenu l'un des ions dopants incontournables pour la réalisation des lasers de fortes

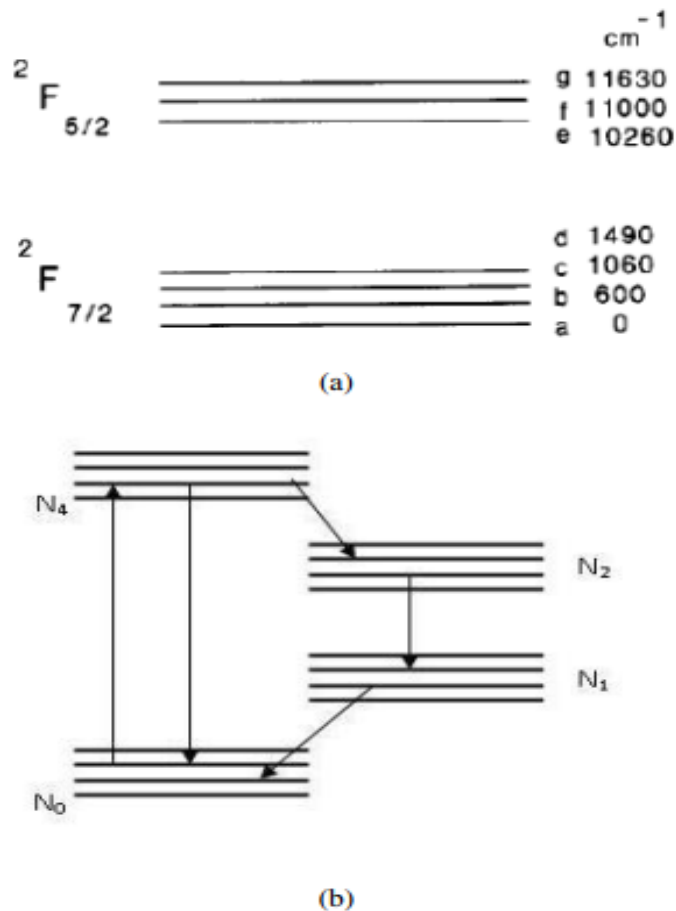


Figure III.5 : Niveaux d'énergie dans une matrice vitreuse (a) : de l'ion Ytterbium. (b) : de l'ion néodyme.

Puissances émettant dans le proche infrarouge. L'utilisation de l'ion Ytterbium présente des avantages par rapport au néodyme. La structure simple de l'ion Ytterbium permet d'éviter de nombreux effets parasites tels que les phénomènes d'up conversion, d'absorption par des états excités et de quenching. L'Ytterbium possède par ailleurs un faible défaut quantique 1 de 4 à 10 % (de l'ordre de 30 % dans le cas du néodyme) qui limite l'échauffement de la matrice hôte. Ce comportement thermique est très intéressant dans le cas des fibres dopées Ytterbium car la charge thermique est répartie sur une grande longueur d'où la possibilité de pomper plus fort et d'extraire des puissances.

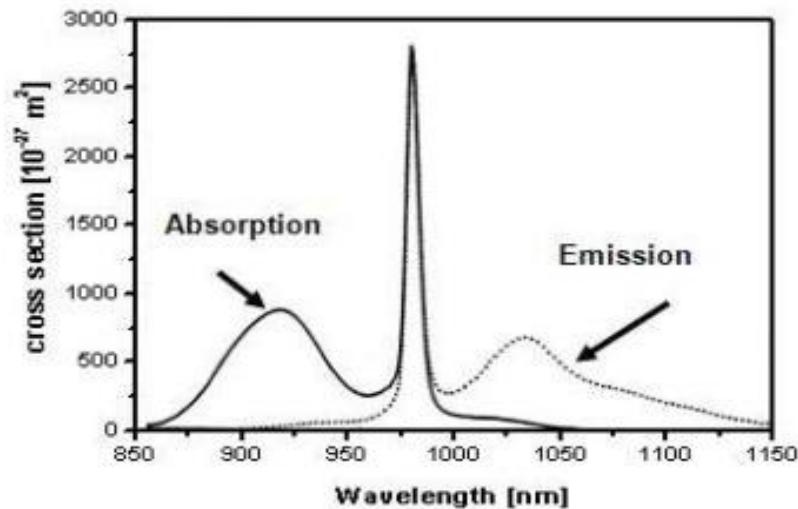


Figure III.6 : Courbe d'absorption et d'émission de l'ion Yb³⁺ dans une matrice vitreuse.

Assez élevées. Ces systèmes lasers à fibre offrent d'ailleurs une alternative aux lasers à solide basés sur des cristaux. La large plage spectrale d'absorption (900 nm-980 nm) et d'émission (1000 nm -1100 nm) de la silice dopée Ytterbium permet d'utiliser des sources de pompage et des longueurs d'onde laser variables selon l'application visée (voir figure III.6).

On trouve de nos jours des diodes de pompage émettant plus de 3.5 kW [Dilas] coïncidant avec les pics d'absorption de l'Ytterbium inséré dans une matrice vitreuse (915 nm et 980 nm). Comparé au néodyme qui est adapté aux hautes cadences, la durée de vie du niveau excité (de l'ordre de la milliseconde) permet de stocker une grande quantité d'énergie à des cadences relativement basses (quelques centaines de Hz).

Cependant, comme on le remarque sur le graphe 3.8, le pic d'absorption (~ 980 nm) et le pic d'émission de l'Yb³⁺ coïncide largement. Ceci induit des pertes par réabsorption du signal laser à 980 nm. Elles réduisent considérablement l'émission laser autour de cette longueur d'onde. C'est ainsi que sans précaution particulière, le laser basé sur des matériaux dopés Ytterbium émet tout naturellement dans la bande s'étalant entre 1000 nm et 1080 nm. Notons cependant qu'une émission à 976 nm pourrait être envisageable sous certaines conditions [Boullet et al, 2008, Roeser et al, 2008, Bouchier, 2005]. De façon schématique, l'émission laser autour de 976 nm n'est possible que si le pompage du matériau est assez important pour annuler l'absorption à

cette longueur d'onde et provoquer l'inversion de population. L'intensité de transparence limite considérablement le choix de la matrice hôte des ions Ytterbium. Elle doit rester faible pour éviter l'absorption de l'émission engendrée et donc diminuer le rendement du laser.

III.5 Fibre micro-structurée

Comme nous l'avons expliqué précédemment, l'invention des fibres optiques micro-structurées à trous d'air est une rupture technologique importante, en particulier dans le domaine des amplificateurs fibrés de forte énergie. Bien que nous ayons utilisé quasi-exclusivement des fibres commerciales dans nos expériences, il semble nécessaire de présenter brièvement les procédés de fabrication de ces fibres particulières, afin de mettre en évidence les difficultés techniques et technologiques surmontées. Nous définissons ensuite les éléments constitutifs de cette microstructure de trous d'air dans le cas d'une fibre dopée, et terminons par une présentation rapide du dopage aux ions Yb.

III.5.1 La fabrication

Le premier élément de la fabrication est le matériau utilisé. Il doit être d'une très grande pureté afin de diminuer les pertes, et dans le cas de fibres actives favoriser une distribution homogène de l'amplification. Cette problématique de pureté des matériaux utilisés dans la fabrication des fibres optiques a été initiée à la fin des années 1960 par C.K. Kao, prix Nobel de Physique en 2009. A cette époque, les fibres optiques présentaient des pertes de l'ordre de 1000 dB/km. Depuis, les progrès dans le secteur des matériaux ont profité à toute la communauté scientifique et industrielle des fibres optiques. Aujourd'hui, les pertes en ligne des fibres télécoms se rapprochent des limites théoriques, inférieures à 0,15 dB/km [4]. Les techniques d'élaboration permettant de réaliser des pièces de grand volume avec une grande pureté, sont essentiellement basées sur les méthodes de déposition chimique en phase vapeur modifiées (MCVD : Modified Chemical Vapor Deposition, OVD : Outside Vapor Deposition, VAD : Vapor Axial Deposition). Le dopage de barreaux de silice aux ions terre rare demeure néanmoins une opération délicate. Récemment, l'utilisation de

poudre de silice dopée [5] est une voie de plus en plus explorée comme alternative à ces méthodes connues. La tendance actuelle dans la fabrication de fibres actives est d'avoir une forte concentration d'ions actifs dans le cœur dopé, afin de réduire les longueurs de fibres utilisées et ainsi augmenter le seuil d'apparition des effets non-linéaires. Comme il est difficile de réaliser des barreaux de grande dimension (pour des surfaces de cœur dopé supérieures à 25 μm de diamètre), la technique la plus couramment utilisée consiste à réaliser plusieurs barreaux assemblés conjointement, afin de réaliser une pseudo-surface dopée. L'homogénéité de cette zone dopée résultante demeure toutefois discutable, et cette technique est très complexe à mettre en œuvre. De plus, une forte concentration de dopant peut par exemple conduire à une agglomération d'ions sur un même site, favorisant des échanges énergétiques nuisibles pour les rendements de conversion à court et moyen terme [6]. Des techniques de co-dopages (aluminium, germanium, bore, phosphore...) permettent de réduire ces effets néfastes. Ainsi, un équilibre est à trouver dans l'adjonction de dopants pour contrôler à la fois l'indice de réfraction et la concentration en ions actifs tout au long de la fibre.

A partir de cette matière première, dont la maîtrise constitue un corps de métier à part entière, différentes méthodes de fabrication sont développées. La plus répandue, dite d'assemblage/étirage (« stack and draw »), est aussi celle utilisée pour réaliser la première fibre micro-structurée à trous d'air [7]. Les étapes successives sont illustrées sur un exemple en Figure III.7. Cela consiste tout d'abord à assembler manuellement des capillaires de diamètres millimétriques selon un motif géométrique précis. Cette étape d'empilement peut devenir très complexe en fonction du nombre de capillaires et de la structure géométrique désirée. Cet assemblage est ensuite inséré dans un tube manchon, en prenant soin de conserver la structure géométrique. L'ensemble ainsi constitué est appelé préforme, et peut être tirée directement en fibre optique à l'aide d'une tour de fibrage conventionnelle. Il s'agit d'un four atteignant des températures de l'ordre de 2000 °C, autour desquelles la silice peut être étirée. A titre d'exemple, une préforme de 40 mm de diamètre et de longueur utile de 1 m, tirée directement en fibre, permet de réaliser plus de 100 km de fibre de 125 μm de diamètre.

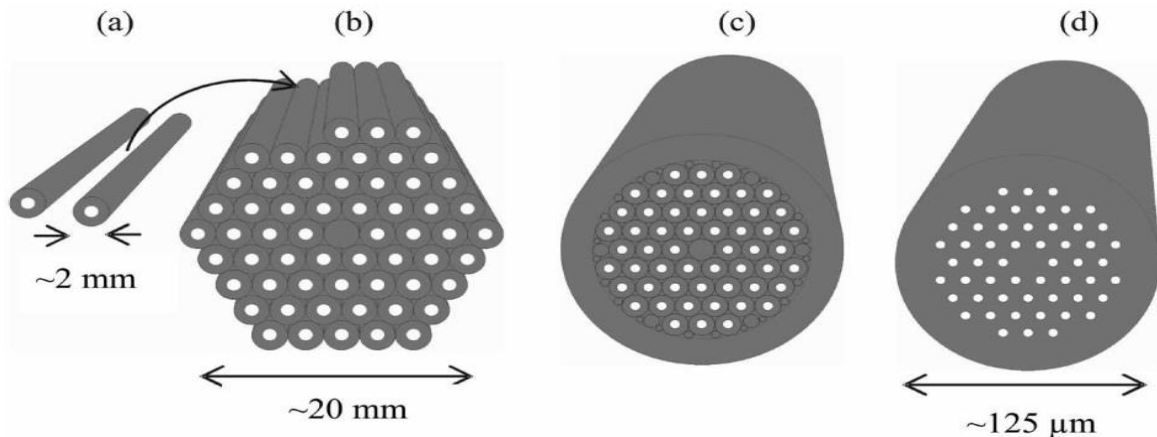


Figure III.7 : Illustration de la technique d'assemblage/étirage : (a) assemblage de capillaires millimétriques, (b) formation du motif périodique, (c) un tube manchon permet de contenir cet assemblage, (d) une fois tiré en fibre, seul les trous correspondant à l'intérieur des capillaires sont maintenus ouverts.

Contrairement aux fibres conventionnelles dont les préformes sont entièrement solides, les préformes de fibres micro-structurées contiennent des trous d'air qui ont naturellement tendance à se déformer (voir se refermer) lors du tirage. Tout le travail consiste donc à contrôler finement la vitesse de tirage, la température et les différences de pression appliquées à la préforme au cours du tirage, afin de réaliser les dimensions finales désirées.

Très versatile, cette méthode est malgré tout coûteuse en temps, notamment en main d'œuvre lors de l'assemblage, et induit de nombreuses interfaces entre les capillaires, ce qui peut être source de pertes en ligne. Pour réduire ces interfaces et tendre vers une industrialisation de ces procédés, d'autres techniques existent pour réaliser les préformes (le perçage, l'extrusion et le moulage), mais elles sont finalement peu utilisées.

D'une façon générale, le savoir-faire en matière de fabrication est une information très protégée et peu répandue aujourd'hui encore. Nous pouvons dénombrer à peine plus d'une vingtaine de laboratoires de recherche possédant leur propre tour de fibrage de fibre micro-structurée dans le monde, concernant des applications très variées. Il est à souligner que durant plusieurs années le marché n'était pas encore assez suffisant pour que plusieurs sociétés lancent ce genre de produit commercialement. Au cours de la thèse, seule la société NKT Photonics (anciennement Crystal Fibre) était en mesure de commercialiser des fibres micro-structurées LMA (supérieur à $30 \mu\text{m}$ de

diamètre) monomodes dopées Yb. Les progrès dans la maîtrise des matériaux et le fort développement du marché des lasers à fibre permettent aujourd'hui à des sociétés industrielles, comme par exemple Nufern ou Liekki, de commercialiser des fibres LMA monomodes dopées Yb de 20 à 30 μm de diamètre de cœur en fibre à saut d'indice tout solide.

III.5.2 La microstructure

Les différentes méthodes de fabrication permettent de réaliser des fibres dont les géométries sont très variées, répondant à une multitude de problématiques [8]. Dans cette sous-section, nous décrivons la microstructure de trous d'air de fibre à cœur solide, dont la géométrie correspond à celle utilisée dans nos applications (assemblage de plusieurs couronnes de trous d'air en symétrie hexagonale).

La caractéristique la plus intéressante pour les applications aux amplificateurs fibrés de forte énergie est d'avoir un comportement monomode indépendamment de la taille du cœur, i.e. offrant la possibilité d'avoir un large cœur monomode. En effet, la fréquence normalisée (définie dans l'annexe A) est fonction de la géométrie du motif périodique [9]. En ajustant soigneusement les paramètres de la microstructure, i.e. le pas du réseau de trous noté Λ (« pitch ») et le diamètre des trous noté d , il est possible de trouver un régime de propagation monomode sur une large plage de longueur d'onde [10].

Le cœur peut être décrit comme étant un certain nombre de trous manquants dans la structure périodique, situé(s) au centre de la fibre (ou pas d'ailleurs, pour d'autres applications). On parle alors de fibre ayant un défaut de 1 (un trou manquant au centre), un défaut de 7 (sept trous manquants au centre), etc. Cependant, pour conserver le caractère monomode de la fibre à la longueur d'onde de travail, plus le nombre de trous manquants est important, plus le rapport d/Λ doit être petit [11]. Ainsi, plus on cherche à avoir un cœur de grande dimension, plus les écarts au ratio théorique d/Λ sont critiques pour la conservation du guidage monomode.

D'une manière générale, il est donc difficile de fabriquer des fibres LMA ayant un caractère monomode robuste, même avec la technologie des fibres micro-structurées à trous d'air. En effet, en augmentant la taille du cœur, la sensibilité aux contraintes

extérieures est accrue, notamment la sensibilité aux rayons de courbure. Par exemple, une fibre ayant un cœur de diamètre $40\ \mu\text{m}$ (monomode autour de $1\ \mu\text{m}$ de longueur d'onde) ne supporte pas moins de $20\ \text{cm}$ de rayon de courbure [12, 13]. Pour des cœurs encore plus larges, la fibre doit même rester droite. C'est pourquoi, plus les fibres ont un diamètre de cœur important, plus elles sont rigidifiées pour les isoler au maximum de leur environnement. Dans le cas « extrême » de fibre dont la taille du cœur est supérieure à $50\ \mu\text{m}$, la fibre est complètement rigide, semblable à un barreau de verre, on parle d'ailleurs de fibre « rod-type ». Ce guide d'onde rigide semble à la frontière entre fibre optique et état solide, et son utilisation nécessite une attention particulière. Pour conserver le potentiel de compacité et d'intégrabilité des fibres optiques, nous avons limité volontairement nos travaux à l'utilisation de fibres dite « souples », c'est-à-dire pouvant être courbées et intégrées à terme dans un système entièrement fibré.

- **La double-gaine**

Le concept de double-gaine [14] consiste à entourer le cœur monomode, dans lequel se propage le signal à amplifier, par un autre cœur, lui multi-mode, dans lequel la pompe va se propager et exciter les ions actifs du cœur dopé par recouvrement spatial au cours de sa propagation, comme illustré sur la Figure III.8. Là encore, il est question de guidage de la pompe par RTI. Dans ce second guide d'onde, (appelé gaine interne ou « inner-cladding »), des sources de pompe ayant une faible brillance peuvent facilement y être injectées. Le but étant d'exciter le cœur central dopé, il est donc très important de maximiser le recouvrement entre les modes de la pompe et les ions actifs.

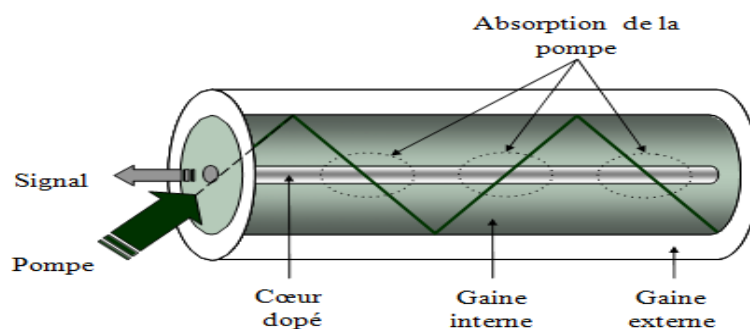


Figure III.8 : Schéma de la structure d'une fibre à double-gaine.

Pour éviter la propagation de rayons hélicoïdaux, qui ne recouvriraient pas le cœur dopé et donc seraient une perte en termes d'efficacité de pompage, des structures particulières sont imaginées (structure en D, géométrie rectangulaire, en pétale, hexagonal...). Toutes ont pour objectif de casser la symétrie transversale circulaire de la fibre optique. Des techniques de courbure périodique de la fibre (forme en haricot) permettent également d'améliorer l'absorption de la pompe dans des fibres à saut d'indice [15].

En utilisant un couronne de trous d'air de gros diamètres et très rapprochés les uns des autres, réalisant un « air-clad » comme illustré sur la Figure III.9, pour confiner la pompe dans la gaine interne, il est possible de créer une dissymétrie suffisante pour éviter la propagation de ces rayons hélicoïdaux. L'ajout de tous les trous d'air (différentes couronnes pour le confinement du signal et l'air-clad pour le confinement de la pompe) contribue à cette inhomogénéité.

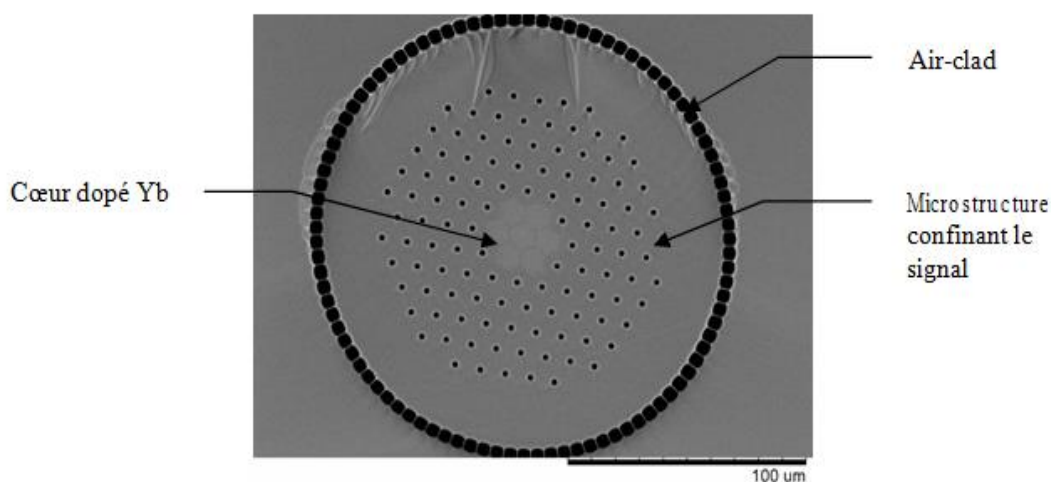


Figure III.9 : Illustration (photo MEB) d'une fibre (NKT Photonics, DC-170/40-Yb) double gaine avec un cœur dopé Yb de 40 µm de diamètre et un air-clad de 170 µm de diamètre.

D'autre part, cet anneau d'air-clad présente aussi et surtout l'avantage de permettre une grande ouverture numérique de la gaine interne (typiquement 0,55 au lieu de 0,45). Il devient alors plus facile d'améliorer le coefficient de couplage de la pompe. Cette caractéristique est très importante, car à fort pompage, les résidus de pompe non confinés dans la gaine interne peuvent causer des dommages importants. Par exemple, si l'on souhaite injecter 200 W de pompe avec un couplage de 90 %, cela signifie que

20 W de pompe sont à dissiper sur des dimensions submillimétriques. Si le matériau utilisé n'est pas du verre, par exemple un polymère bas indice, il devient alors indispensable d'utiliser des techniques de dissipation rapide de ces fuites (« mode stripper »), sinon le polymère peut brûler. Il en est de même avec les éventuels résidus de pompe non absorbée. De plus, l'interface air-verre permet une meilleure dissipation thermique comparée à une fibre ayant une gaine à saut d'indice par une couche de polymère. L'air-clad est donc un sérieux atout en faveur de ce type de fibre.

En revanche, nous expliquons dans le chapitre 3 que pour la mise en œuvre expérimentale, l'air-clad représente une difficulté supplémentaire par rapport à des fibres tout solide, surtout lors de la préparation des faces de la fibre. De même pour des perspectives d'intégration du système développé, ils existent des difficultés inhérentes à la présence de ces trous d'air de gros diamètre, notamment dans la réalisation de combineur de pompe.

- **Le maintien de la polarisation**

Dans une description idéale, la fibre peut être considérée comme étant un milieu isotrope à géométrie cylindrique parfaite. Le guide d'onde monomode confine deux états de polarisations orthogonales, qui ont la même constante de propagation. En pratique, les irrégularités de fabrication, aussi infimes soient-elles, perturbent cette homogénéité et la constante de propagation devient dépendante de l'état de polarisation. Ainsi, une onde incidente polarisée linéairement qui se propage dans un tel milieu, voit se mélanger ses deux composantes orthogonales au cours de sa propagation, et ce mélange peut s'accroître en fonction des différentes contraintes extérieures. A titre d'exemple, la biréfringence d'une fibre monomode standard est de l'ordre de 10^{-7} .

Dans de nombreuses applications, il est pourtant nécessaire de contrôler l'état de polarisation. Pour y remédier, les fibres sont volontairement fabriquées avec une forte biréfringence. En effet, cela consiste à introduire deux barreaux, dopés bore généralement, de part et d'autre du cœur, qui ont un coefficient d'expansion thermique plus important que celui de la silice. En se refroidissant après tirage de la fibre, les barreaux vont se rétrécir plus rapidement que la silice et créer une contrainte mécanique autour du cœur. On parle alors de barreaux de contrainte, ce qui génère une

biréfringence allant jusqu'à 10^{-4} . Les fibres possèdent alors deux axes privilégiés, appelés axe « rapide » et axe « lent », et sont dites à maintien de polarisation (PM). La sensibilité aux contraintes extérieures est alors beaucoup moins importante. En outre, si une onde polarisée linéairement est injectée selon un de ces deux axes, alors les échanges énergétiques entre axes seront très limités, et son état de polarisation sera inchangé au cours de sa propagation dans le guide d'onde. Le taux de transfert énergétique d'un axe vers l'autre, appelé aussi taux d'extinction de polarisation (PER, acronyme anglais pour polarization extinction ratio), est défini comme étant le rapport des puissances d'un axe sur l'autre au bout d'une certaine longueur de fibre. Par exemple, pour des fibres PM standards, le PER est typiquement de 20 à 25 dB après 100 m de propagation, soit moins de 1 % de transfert de puissance d'un axe sur l'autre.

Dans le cas de fibre micro-structurée à trous d'air, double-gaine monomode à large cœur, l'ajout de barreaux de contraintes est effectué dans la gaine interne, au plus près du cœur monomode, comme illustré sur la Figure III.10. Les barreaux de contrainte sont constitués eux-mêmes de plusieurs plots d'indice. Cette technique de discrétisation du barreau de contrainte permet de réaliser une zone dopée de grande dimension, (plus ou moins homogène). Dans la fibre considérée, on obtient un comportement polarisant en la courbant dans le plan de l'axe lent, qui présente (dans ce design) une moins grande sensibilité au rayon de courbure. On dit alors que la fibre est polarisante (PZ), car une seule composante de polarisation peut s'y propager sans pertes. Il convient alors d'injecter ce type de fibre selon l'axe lent.

Dans nos travaux, il est important de conserver une polarisation linéaire tout au long de l'architecture amplificatrice. C'est pourquoi, nous utilisons des fibres PM et/ou PZ. Nous expliquons dans le chapitre 3 au cours de la mise en œuvre de l'architecture, comment nous caractérisons le PER.

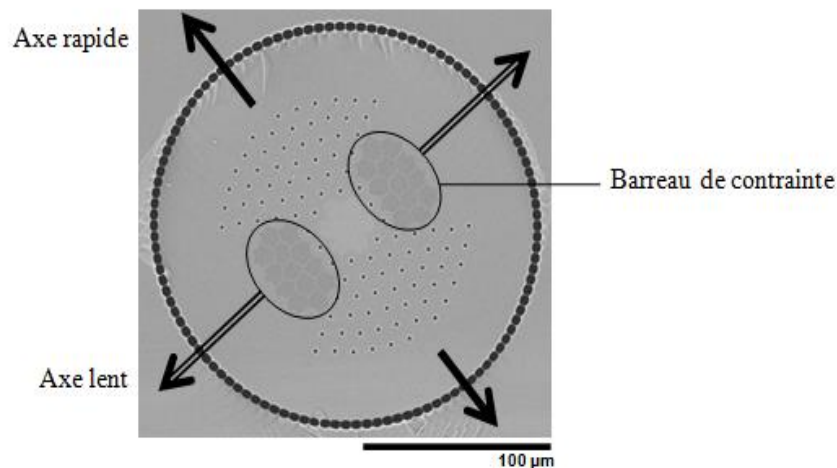


Figure III.10 : Illustration (photographie MEB) d'une fibre (NKT Photonics, DC-200/40- PZ-Yb) micro-structurée double-gaine à large cœur dopé Yb et polarisante.

III.6 Le dopage Yb

Plus connu sous le nom de terre rare, l'ion Yb appartient en fait à la famille des lanthanides, tout comme l'erbium et le néodyme par exemple. Les récents progrès réalisés sur les diodes semi-conductrices de forte puissance (de type InGaAs) possédant une longueur d'onde d'émission compatible avec une des bandes d'absorption de l'Yb (915 ou 975 nm), ont accru l'intérêt porté à cette terre rare. Aujourd'hui extrêmement répandu dans le domaine des lasers fibrés émettant dans le proche infrarouge (autour de 1 µm de longueur d'onde), l'ion Yb présente les meilleures performances grâce notamment à son très faible défaut quantique. Il s'agit du rapport entre la longueur d'onde de pompe et la longueur d'onde d'émission, traduisant ainsi la quantité d'énergie que le matériau réémet de façon non radiative, i.e. par effet thermique par exemple. Il est de l'ordre de 10 % pour l'ion Yb, ce qui permet de limiter l'échauffement de la matrice hôte, offrant la possibilité de pomper fortement le milieu amplificateur. D'autre part, l'ion Yb possède un temps de fluorescence relativement long (de l'ordre de la milliseconde), ce qui permet de stocker une grande quantité d'énergie à des cadences d'impulsion relativement basses.

Dans nos applications, le choix d'utiliser des fibres dopées Yb n'en était pas un réellement ; il apparaît comme une évidence. En effet, pour amplifier des longueurs d'onde autour de 1 µm, les fibres dopées Yb sont les plus répandues. Seul le dopage

aux ions néodyme pourrait le concurrencer, car il possède également une bande d'émission à cette longueur d'onde [16]. Mais le néodyme présente certains inconvénients rédhibitoires pour les applications aux lasers fibrés de forte puissance, comme par exemple un défaut quantique supérieur par trois fois à celui de l'Yb, un temps de vie relativement court ou encore, dans une moindre mesure, une bande d'absorption plus étroite que celle de l'Yb.

Ne s'agissant pas de détailler ici les propriétés spectroscopiques de l'ion Yb [17], nous nous intéressons à certaines grandeurs caractéristiques, à savoir la concentration en ions Yb du cœur dopé (notée n_{tot}), le temps de fluorescence (noté τ_{flu0}) et les sections efficaces d'absorption et d'émission (notées σ_a et σ_e respectivement). Ces données spectroscopiques sont essentielles pour déterminer le comportement du milieu amplificateur et donc indispensables pour la modélisation numérique. En revanche, comme elles sont intimement liées aux procédés de fabrication, elles ne sont bien souvent pas communiquées avec une grande précision. Pour s'affranchir de cette difficulté, il serait nécessaire de mesurer directement ces valeurs. Or, cette métrologie complexe requière des moyens spécifiques dont nous ne disposons pas au sein du laboratoire. Elle est d'autant plus complexe du fait des faibles dimensions du cœur dopé, et que nous ne disposons pas des préformes des fabricants de ces fibres.

Concernant le **taux de dopage**, i.e. la concentration en ions Yb par unité de volume, le fabricant de fibre donne une valeur estimative de l'absorption à la longueur d'onde de pompe par unité de longueur (noté α_p et exprimé en dB.m^{-1}), sans explications sur le procédé de mesure. Nous faisons l'hypothèse que cette absorption est mesurée en injectant la pompe dans la gaine interne et en faisant le ratio avec la puissance de sortie en fonction de la longueur de fibre parcourue. Or, il est possible que l'absorption soit mesurée sur la préforme directement avant étirage, car cette mesure est plus aisée du fait de sa plus grande dimension. Dans ce cas, nous ne possédons aucune information sur les variations et l'étendue spatiale de la concentration du dopant après étirage. De plus, nous supposons que les dopants ont une distribution (transverse et longitudinale) uniforme. Or, lorsque l'on réalise une photographie au microscope électronique à balayage (MEB) de la face d'une fibre, il apparaît clairement que le cœur est constitué de plusieurs « pétales ». Cette technique couramment utilisée, comme pour les

barreaux de contrainte, permet de réaliser des surfaces dopées de grande dimension (plusieurs dizaines de micromètres une fois tirées en fibre). Mais on peut se poser la question de l'homogénéité globale de la zone cœur, où se répartit le mode fondamental.

Concernant les **sections efficaces d'absorption et d'émission**, le fournisseur communique des valeurs standards qui ne sont pas mesurées sur chacune des fibres distribuées. Dans un article de Paschotta et al. [18], des mesures sur une matrice de verre germano silicate dopé Yb sont réalisées, et devenues par la suite des valeurs de référence de la littérature. L'article fait état de variations d'une fibre à l'autre allant jusqu'à 30% dans la plage en longueur d'onde de [900 ; 1200] nm. Les raisons de ces variations résident en particulier dans les concentrations relatives de dopants utilisés. Par exemple, des fibres ayant une concentration en germanium plus importante (dopant qui permet d'obtenir des ouvertures numériques plus grandes) auront des sections efficaces plus importantes. A contrario, un dopage Yb dans une matrice de silice pure ou dans une matrice phosphosilicate, produira des sections efficaces plus faibles. Une autre raison de ces fluctuations est que les sections efficaces fluctuent significativement avec des variations de température [19], ce qui est le cas lorsque la fibre est fortement pompée. Dans la suite de nos travaux, nous utilisons les valeurs de sections efficaces d'émission et d'absorption de la référence [18], bien qu'il n'y ait aucune raison pour que les fibres utilisées aient exactement les mêmes valeurs. Nous discutons dans le chapitre 2 de l'influence de ces variations probables sur les résultats de la modélisation numérique.

Enfin, le **temps de fluorescence** est calculé à partir de la section efficace d'émission sur la bande spectrale considérée [20]. Cette dernière valeur fluctue assez peu, car s'agissant d'une intégrale sur une grande plage en longueur d'onde, les variations sur les sections efficaces sont moyennées. Elle est donc plutôt indépendante du type de fibre étudiée, et reste systématiquement dans la gamme de la milliseconde.

III.7 Mode de pompage

Le mode de couplage de la pompe le plus ancien est celui dit de **pompage par le cœur** de la fibre. Cela consiste à injecter directement la pompe dans le cœur dopé de la fibre. Contrairement au laser solide pompé longitudinalement, les intensités sont

guidées tout au long de la fibre, sans limitation par diffraction à la longueur de Rayleigh. Les pertes intrinsèques des fibres n'ont eu de cesse d'être améliorées, favorisant ainsi l'interaction entre la pompe et le signal au cours de la propagation. Toutefois, pour ce type de pompage, il est nécessaire de disposer des sources de pompe spatialement cohérente, afin de les coupler efficacement dans le cœur monomode. Pendant longtemps, ces diodes étaient limitées en puissance au watt. Il est à noter que très récemment, de nouvelles sources à 976 nm et à forte brillance ont été développées [21], et font leur apparition sur le marché avec plus de 10 W continu, ce qui ouvre actuellement de nouvelles possibilités. Avec l'invention de la fibre à double gaine, les techniques de pompage se sont diversifiées, gagnant en efficacité. Plus ou moins exotiques, ces techniques sont souvent difficilement industrialisables. En revanche, nous pouvons citer l'**injection transverse par une rainure en V** [22], comme illustré en Figure III.11. Dans cette configuration, la pompe est couplée dans la fibre double gaine par l'intermédiaire d'une microlentille et par réflexion sur une rainure en V inscrite transversalement dans la fibre dénudée. Très efficace en termes de rendement optique (de l'ordre de 90 % de couplage de pompe), cette technologie offre la possibilité d'ajouter les sources de pompage tout au long de la fibre. Dans le développement des lasers fibrés de forte puissance, cette technique nécessite cependant un développement spécifique répondant aux problématiques de dissipation thermique. De plus, elle n'est pas adaptée pour des fibres à géométrie singulière ou à microstructure de trous d'air par exemple.

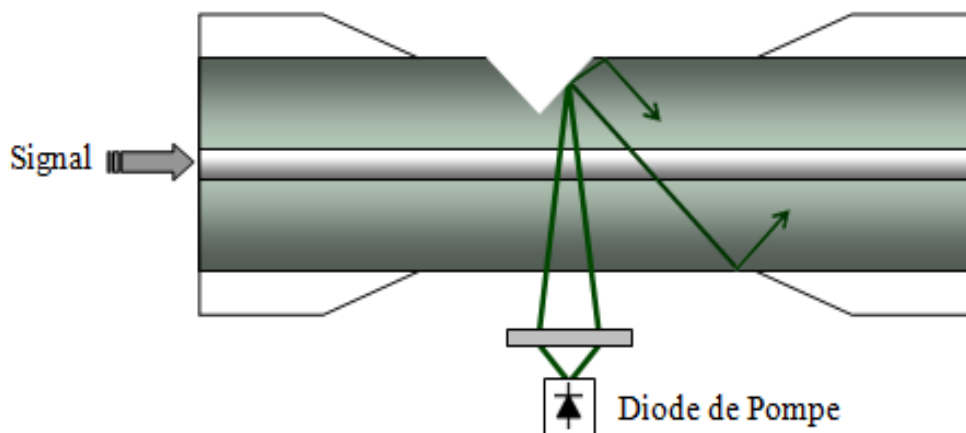


Figure III.11: Schéma du principe de couplage de la pompe transverse par un V

Dans le même ordre d'idée de couplage transverse via une partie de fibre dénudée, nous pouvons citer des techniques d'injection par voie externe avec l'utilisation de miroir [23] ou de prisme [24] collé sur la fibre, ou encore un réseau [25] réalisant l'injection de la pompe dans la gaine interne. Plus difficilement industrialisables, ces techniques sont délaissées au profit de l'utilisation du pompage par une rainure en V.

Une autre technique très adaptée au développement des lasers de forte puissance est celle du couplage par **combineur multi-mode** de pompe, comme illustré dans l'exemple sur la Figure III.12. Cela consiste à étirer plusieurs fibres multi-modes dans lesquelles sont injectées des faisceaux de pompe. Ces brins étirés sont ensuite fusionnés sur une fibre à cœur monomode dans laquelle se propage le signal. L'ensemble est ensuite soudé sur une fibre double gaine. Cette technique peut être déclinée en fusionnant et étirant autant de fibres de pompe que la géométrie de la fibre double gaine le permet, à condition de réaliser des transitions adiabatiques afin de limiter les pertes de couplage. Cela permet également d'atteindre de grandes efficacités de couplage, et d'être commercialisé dans des versions de fibre monomode de dimensions encore modestes (20 μ m de diamètre de cœur, exemple Nufern ou Liekki).

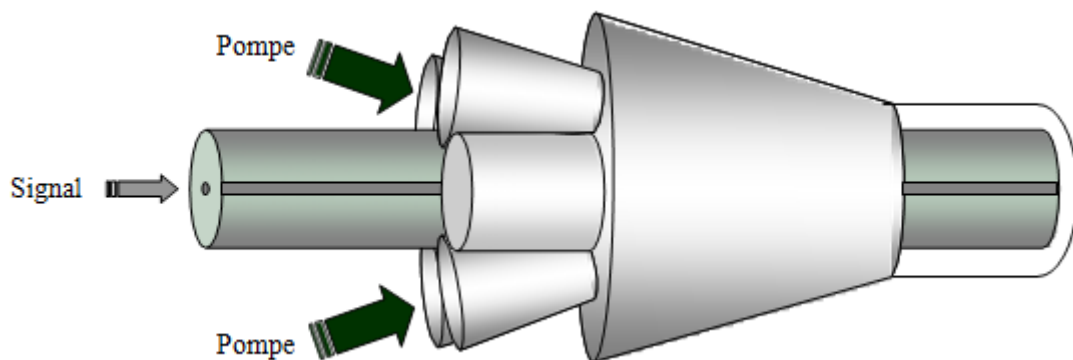


Figure III.12 : Schéma du principe de couplage de la pompe par combineur multi-mode.

Cette technique est très complexe à mettre en œuvre avec des fibres micro-structurées, en raison des trous d'air qui confinent les différentes ondes. Nous présentons dans le chapitre 3 les problématiques inhérentes à la réalisation de composant intégré à base de fibre micro-structurée à trous d'air. Par exemple, les

étapes de fusion et étirage sont très critiques à cause de la déformation, voire la fermeture, des trous lors de l'élévation en température. Il est possible de faire appel à des fibres de transition dimensionnées pour que les trous se réduisent parfaitement lors des étapes de fusion, et perdurent le confinement des ondes. Mais les démonstrations expérimentales se sont limitées à des fibres de diamètre de mode 15 μ m [26].

Pour injecter des fibres micro-structurées de plus grande dimension, une technique présentée récemment [27] consiste à souder sur la fibre active un cône de silice (appelé « taper »), mis en forme par trempage dans un bain d'acide fluorhydrique puis polissage via un laser CO₂. Ce taper permet de guider la pompe dans la gaine interne. Toutefois, la démonstration expérimentale se heurte à une difficulté inhérente à ce procédé, qui est de souder les fibres de pompe sur le taper après réalisation de ce composant. Bien qu'efficace en termes de couplage de la pompe dans la gaine interne, cette technique est très complexe à réaliser et il semble extrêmement compliqué technologiquement de souder des fibres de pompe sur ce taper.

Il existe une autre solution intégrée, qui consiste en l'utilisation d'un miroir parabolique collé à une extrémité de la fibre double gaine et troué au niveau du cœur de la fibre pour l'extraction du signal. La pompe est alors injectée par réflexion sur ce miroir. Il s'agit de couplage en espace libre, mais en optique « intégrée ». Commercialisés par NKT Photonics (Patent Pending WO27006317), ces combineurs de pompe demeurent complexes et onéreux.

D'autre part, la stabilité et la robustesse de ce type de combineur sont des sujets sur lesquelles nous avons peu d'informations.

Enfin, il est à noter qu'il existe d'autres approches de pompage, basé par exemple sur des designs de fibres à deux cœurs accolés [28] : un cœur monomode pour le signal et un cœur multi-mode pour la pompe très proche du premier. Le couplage de la pompe dans le cœur dopé est effectué par onde évanescente. Pour atteindre de grandes dimensions de cœur, cette technique nécessite le recours à plusieurs cœurs de pompe. Il est donc indispensable de disposer d'une fibre spécifiquement dimensionnée et fabriquée. De plus, la problématique du couplage de la pompe dans le cœur est là encore reportée sur le couplage de la diode de pompe dans le cœur de pompe. En effet, il apparaît délicat d'intégrer ce type de fibre, avec une soudure de la fibre de pompe

sur le cœur multi-mode.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons tout d'abord opté pour des **injections en espace libre**. Bien que très encombrante, cette solution nous permet d'avoir accès en permanence aux extrémités des fibres actives. Nous avons donc la possibilité d'intercaler ou de distribuer le faisceau sur autant de diagnostics que nécessaires, et également d'inter-changer aisément les fibres actives. Même si la réalisation d'un système tout intégré est l'objectif ultime, les systèmes intégrés figent d'une certaine manière l'architecture amplificatrice. C'est pourquoi nous avons choisi cette solution plus ouverte dans la phase d'étude. Les contraintes d'injection de fibres micro-structurées à trous d'air en espace libre sont détaillées dans la mise en œuvre expérimentale du chapitre 3. Nous expliquons notamment les différentes étapes de préparation des faces de ces fibres particulières, la nécessité d'adapter la taille et l'ouverture numérique du faisceau avant injection, ainsi que le choix d'optiques de focalisation adaptées.

III.8 Conclusion

Pour conclure, nous avons présenté dans ce chapitre un état de l'art de l'amplification à fibre optique. Ainsi que nous avons vu : Le signal amplifié dans la fibre se propage en régime monomode et justifie les études faites autour des paramètres de la microstructure. L'extraction des fortes puissances moyennes imposent l'utilisation des fibres à large cœur et ayant de fort gain. Le dopage en ions Ytterbium permet d'assurer l'effet laser dans le proche infrarouge. La structure double gaine quant à elle permet la propagation du signal et de la pompe dans deux zones distinctes

Références bibliographiques

- [1] http://optiqueingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M01_C01/co/Contenu_07.
- [2] D.J. Richardson, J. Nilsson and W.A. Clarkson, "High power fiber lasers: current status and future perspectives," *JOSA B* 27, 11, B63-B92 (2010).
- [3] A. Tünnermann, T. Schreiber and J. Limpert, "Fiber lasers and amplifiers: an ultrafast performance evolution," *Appl. Opt.* 49, 25, F71-F78 (2010)
- [4] K.C. Kao and G.A. Hockham, "Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies," *Proc. IEEE* 113, 1151-1158 (1966)
- [5] M. Leich, F. Just, A. Langner, M. Such, G. Schötz, T. Eschrich and S. Grimm, "Highly efficient Yb-doped silice fibers prepared by powder sinter technology," *Optics Letters* 36, 9, 1557-1559 (2011)
- [6] F. Auzel and P. Goldner, "Towards rare-earth clustering control in doped glasses", *Opt. Mater.* 16, 93- 103 (2001).
- [7] J.C. Knight, T.A. Birks, P.St.J. Russell and D.M. Atkins, "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding," *Optics Letters* 21, 19, 1547-1549 (1996)
- [8] P.St.J. Russell, "Photonic-Crystal Fibers," *Journal of Lightwave Technology* 24, 12, 4729-4749 (2006)
- [9] N.A. Mortensen, J.R. Folkenberg, M.D. Nielsen and K.P. Hansen, "Modal cutoff and V parameter in photonic crystal fiber," *Optics Letters* 28, 20, 1879-1881 (2003)
- [10] T.A. Birks, J.C. Knight and P.St.J. Russell, "Endlessly single-mode photonic crystal fiber," *Optics Letters* 22, 13, 961-963 (1997)
- [11] K. Saitoh, Y. Tsuchida, M. Koshiba and N.A. Mortensen, "Endlessly single-mode holey fibers: the influence of core design," *Optics Express* 13, 26, 10833-10839 (2005)
- [12] J.M. Fini, "Bend-resistant design of conventional and microstructure fibers with very large mode area," *Optics Express* 14, 1, 69-81 (2006)
- [13] <http://www.nktpotonics.com>

- [14] E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tuminell and B. C. McCollum, "Double clad, offset core Nd fiber laser", Proceedings PD5-1, 1988
- [15] S. Bordais, « Etude des amplificateurs et lasers à 1 μm de forte puissance à base de fibre double gaine dope Ytterbium », Thèse, Université de Rennes I (2002)
- [16] H. Po, J.D. Cao, B.M. Laliberte, R.A. Minns, R.F. Robinson, B.H. Rockney, R.R. Tricca and Y.H. Zhang, "High power neodymium-doped single transverse mode fibre laser, " Electronics Letters 29, 17, 1500- 1501 (1993) 1.5 Bibliographie 35
- [17] S. Grot, « Montée en puissance de lasers et d'amplificateurs à fibres dopées Ytterbium en régime continu et d'impulsions », Thèse, Université de Rennes I (2006)
- [18] R. Paschotta, J. Nilsson, A.C. Tropper and D.C. Hanna, "Ytterbium-doped fiber amplifiers," Journal of Quantum Electronics 33, 7, 1049-1056 (1997)
- [19] X. Peng and L. Dong, "Temperature dependence of Ytterbium-doped fiber amplifiers," J. Opt. Soc. Am. B 25, 1, 126-130 (2008)
- [20] D.E. McCumber, "Einstein relations connecting broadband emission and absorption spectra," Physical Review 136, 23, 954-957 (1964)
- [21] J. Bouillet Y. Zaouter, R. Desmarchelier, M. Cazaux, F. Salin, J. Saby, R. Bello-Doua and E. Cormier, "High power Ytterbium-doped rod-type three-level photonic crystal fiber laser," Optic Express 16, 22, 17891-17902 (2008)
- [22] D.J. Ripin and L. Goldberg, "High efficiency side-coupling of light into optical fibres using imbedded vgrooves," IEEE Electronics Letters 31, 25, 2204-2205 (1995)
- [23] J.P. Koplow, S.W. Moore and D.V. Kliner, "A new method for side pumping of double-clad fiber sources," IEEE Journal of Quantum Electronics 39, 4, 529-540 (2003)
- [24] T. Weber, W. Lüthy, H.P. Weber, V. Neuman, H. Berthou and G. Kotrotsios, "A longitudinal and sidepumped single transverse mode double-clad fiber laser with a special silicone coating," Optics Communications 115, 99-104 (1995)
- [25] R. Herda, A. Liem, B. Schnabel, A. Drauschke, H.J. Fuchs, E.B. Kley, H. Zellmer and A. Tuennermann, "Efficient side-pumping of fibre lasers using

- binary gold diffraction gratings,” *Electronics Letters* 39, 3, 276-277 (2003)
- [26] D. Noordegraaf, M.D. Maak, P.M.W. Skovgaard, S. Agger, T.T Alkeskjold and J. Laegsgaard, “7+1 to 1 pump/signal combiner for air-clad fiber with 15 μm MFD PM single-mode signal feed-through,” in *Fiber Lasers VII: Technology, Systems and Applications*, Proc. of SPIE Photonics West 7580, 75801A (2010)
- [27] C. Jauregui, S. Böhme, G. Weniadis, J. Limpert and A. Tünnermann, “Side-pump combiner for all-fiber monolithic fiber lasers and amplifiers,” *Journal of Society of America B* 27, 5, 1011-1015 (2010)
- [28] A.V. Kir'yanov, S.M. Klimentov, I.V. Mel'nikov and A.V. Shestakov, "Specialty Yb fiber amplifier for microchip Nd laser: toward $\sim 1\text{mJ}/1\text{ns}$ output at kHz range repetition rate," *Optics communications* 282, 4759-4764 (2009)

CHAPITRE IV

Simulations et résultats

CHAPITRE IV : SIMULATIONS ET RESULTATS

IV.1	Introduction.....	105
IV.2	Critères dévaluations de notre système de transmission.....	105
IV.2.1	Diagramme de l'œil.....	106
IV.2.2	Facteur de qualité Q.....	106
IV.2.3	Taux d'erreur binaire.....	106
IV.3	Présentation de l'amplificateur à fibre dopée Yb.....	107
IV.4	liaison optique simple sans amplificateur GPON.....	108
IV.4.1	L'influence de la puissance d'entrée.....	108
IV.4.2	L'influence de la longueur de la fibre.....	109
IV.5	Introduction de l'EYDWA dans le réseau optique GPON.....	110
IV.6	configuration en position Booster.....	113
IV.6.1	L'influence de la longueur de la fibre en fonction du facteur Q.....	113
IV.6.2	L'influence de la concentration des ions Yb en fonction du facteur Q....	114
IV.6.3	L'influence de la longueur de guide en fonction du facteur Q.....	115
IV.7	configuration en position en ligne.....	116
IV.7.1	L'influence de la longueur de la fibre en fonction du facteur Q.....	116
IV.7.2	L'influence de la longueur du guide de en fonction du facteur Q.....	117
IV.8	configuration en position amplificateur.....	118
IV.8.1	L'influence de la puissance d'entrée en fonction du facteur Q.....	119
IV.8.2	L'influence de la longueur de fibre en fonction du facteur Q.....	119
IV.8.3	L'influence de la longueur de guide en fonction du facteur Q.....	120
IV.8.4	L'influence de la concentration des ions Yb en fonction du Q.....	121
IV.9	comparaison des trois configurations de l'amplificateur.....	121
IV.9.1	influence du facteur Q en fonction de la puissance émise.....	121
IV.9.2	influence du Q en fonction de la concentration des ions Yb.....	123
IV.9.3	Influence du facteur Q en fonction de la longueur du GPON.....	124
IV.9.4	Le diagramme de l'œil.....	125
IV.9.5	Densité spectrale de puissance.....	126
IV.9.5.1	Position amplificateur.....	127
IV.9.5.2	Position au milieu de la fibre.....	128
IV.9.5.3	Position Booster.....	129
IV.10	Conclusion.....	130
	Références bibliographique.....	132

IV.1 Introduction

La distance de transmission d'un GPON (Gigabit Passive Optical Network), est limitée à 25 Km en raison de l'utilisation d'un signal optique de classe B+ (13 dB pour le client le plus proche de l'OLT et 28 dB pour le client le plus éloigné) qui est restreint. Dans ce but, le déploiement de l'amplification dans le réseau GPON-TDM représente le cœur dans cette thèse. La solution est d'obtenir une portée au-delà de 65 Km grâce à l'utilisation d'amplificateur EYDWA.

Comme premier objectif, nous présentons les paramètres caractérisant l'EYDWA pour une longueur d'onde de 1550 nm en termes de gain et du facteur de bruit à savoir : la puissance du signal d'entrée, la puissance de pompe, la concentration d'ions d'Erbium et Ytterbium...etc.

L'influence de chaque paramètre sur la qualité du système du gain de l'EYDWA plusieurs longueurs d'ondes (huit longueurs d'onde à l'entrée) de la platitude du spectre du gain de l'EYDWA multi-longueur d'onde (huit longueurs d'onde à l'entrée) est détaillées. La deuxième partie est basé sur les résultats de simulation concernant l'amélioration des performances d'un système GPON amplifié, avec la configuration booster en premier temps, en termes de facteur de qualité, diagrammes de l'œil ; et ceci en fonction des paramètres opto-géométriques optimisés de l'EYDWA. Dans un second temps, nous plaçons notre amplificateur en position de pré-amplification des changements de ces paramètres physiques ont pour but d'améliorer ces performances en fonction d'autres paramètres tels que la puissance, le débit...etc.

Les résultats sont comparés pour les différentes positions de l'EYDWA dans le système GPON (amplification post-, pré- et en ligne).

IV.2 Critères dévaluations de notre système de transmission

Pendant la transmission d'un signal optique dans un réseau, il subit plusieurs dégradations, des outils internationaux sont capables de juger la qualité du système après la réception du signal. Ces outils représentent des paramètres d'observation pour but d'évaluer la qualité de la transmission. Ces paramètres sont : le facteur de qualité (Q) et le diagramme de l'œil.

IV.2.1 Diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil est un outil de visualisation de la qualité du signal en termes de bruit d'amplitude, d'interférences inter symboles ou de giges temporelles. Il est défini par la superposition d'un grand nombre de symboles binaires dans le domaine temporel, le long et aux extrémités de la chaîne. Pour tracer le diagramme de l'œil, on envoie dans le canal un signal numérique aléatoire, on superpose le signal en sortie du canal plus l'œil est ouvert et plus la situation est favorable pour la discrimination des bits hauts et bas. A l'opposé, un œil fermé se traduira inévitablement par de nombreuses erreurs de transmission [1, 2].

IV.2.2 Facteur de qualité Q

Le facteur de qualité Q peut juger les performances des transmissions. Il évalue à partir d'un graphe représentant l'amplitude des oscillations amorties en fonction du temps. La constante de temps des oscillations est l'instant où la tangente initiale de l'enveloppe exponentielle intercepte l'axe des abscisses. On compte ensuite le nombre d'oscillations pseudopériodiques qui se produisent pendant cette durée.

IV.2.3 Taux d'erreur binaire

Un taux d'erreur binaire indique les erreurs qui se produisent dans n'importe quel système de transmission. Ceci peut être traduit par le nombre d'erreurs qui se produisent dans un débit binaire. La définition du taux d'erreur binaire peut être traduite en une formule simple:

$$TEB = \frac{\text{nombre d'erreurs}}{\text{nombre de bits transmis}} \quad (IV-1)$$

Si la liaison entre l'émetteur et le récepteur est meilleure et le rapport signal sur bruit est élevé, le taux d'erreur binaire sera très faible. Toutefois, si le bruit est considérable, le taux d'erreurs binaires devra être pris en considération. Le TEB est habituellement accepté pour une transmission de qualité inférieure à 10^{-9} .

IV.3 Présentation de l'amplificateur à fibre dopée Yb

L'objectif de cette thèse est l'introduction de l'amplificateur à fibre dopée Ytterbium (Yb) dans les réseaux d'accès optique. Le domaine de l'amplification fibrée est un secteur en très forte progression durant ces deux dernières décennies. La figure IV.1 montre le synoptique d'un système amplifié YDFA-EDFA.

Dans l'analyse numérique des amplificateurs de guides d'ondes de silice co-dopés Er^{3+} / Yb^{3+} à haute concentration ont démontré que le transfert d'énergie induit par la paire Yb^{3+} vers Er^{3+} montre que les ondes dopées à l'Erbium Ytterbium (EYDWA) avec des concentrations optimisées de terres rares réduisent efficacement les effets néfastes des uniformes et des paires. Mécanismes de conversion induits du niveau d'Erbium métastable. Des amplificateurs à gain élevé et de quelques centimètres de long peuvent être fabriqués, fournissant des fonctions importantes pour les systèmes de communication optique [3]. Des études théoriques et expérimentales ont été menées sur les performances d'un amplificateur à fibre d'erbium-Ytterbium dopé haute puissance. Ils ont montré que l'EYDWA fournit une puissance de sortie supérieure à 23 dB et un gain plat en utilisant un pompage multimodal à 927 nm pour une bande passante allant de 1541 à 1565 nm [4].

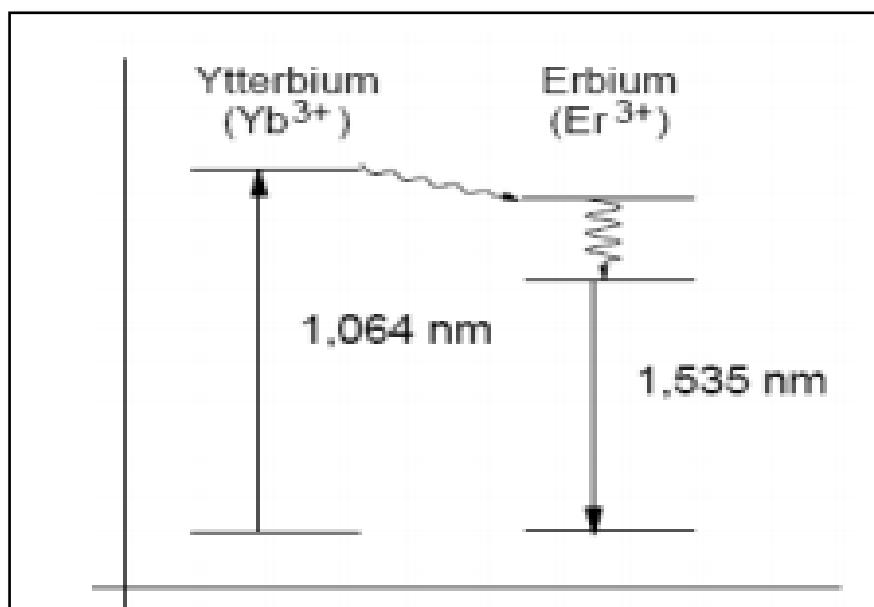


Figure IV.1 : Niveaux d'énergie de l'amplificateur co-dopé Erbium / Ytterbium. [5]

Les matériaux Co-dopés les plus utilisés sont l'aluminium (Al), l'Ytterbium (Yb) et le germanium (Ge). Les changements induits affectent le spectre de gain de l'amplificateur. Par exemple, si l'on est dopé au Ge, on obtient deux pics de gain sur le spectre, l'un à 1536 nm et l'autre à 1550 nm.

Ce processus aplatit et élargit le gain dans le spectre dans la plage de 1540 nm à 1560 nm. La figure 2 montre l'emplacement du niveau d'énergie de l'amplificateur co-dopé utilisant Erbium et Ytterbium.

A cet effet, l'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact de la localisation de l'amplification optique sur les performances d'un système de communication optique. Il a ensuite été présentée une liaison optique externe modulée à 2,5 Gbit / s et les résultats de la simulation du système simulé ont permis de comparer les performances obtenues pour une configuration de pré-amplification, post-amplification et amplification en ligne.

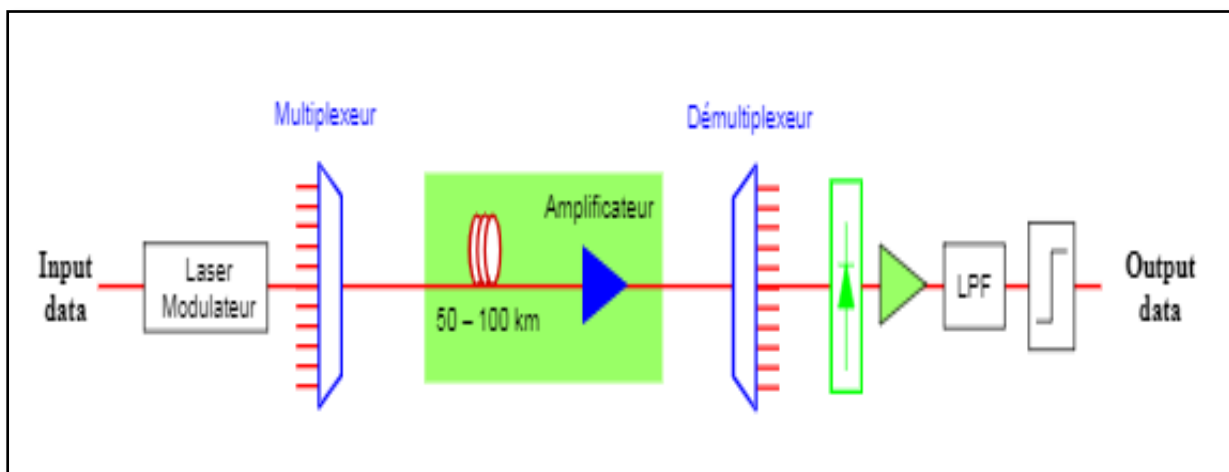


Figure IV.2 : Schéma synoptique de l'amplificateur EYDWA.

IV.4 liaison optique simple sans amplificateur GPON

IV.4.1 L'influence de la puissance d'entrée

Une fois la conception du schéma-bloc terminée, OPTISYSTEM peut effectuer plusieurs types d'analyse, on commence de faire varier la puissance d'entrée du système et voir à la sortie les performances telles que le facteur Q.

En faisant varier puissance du signal d'entrée (P_{in}). L'évolution du facteur Q, pour différentes valeurs de puissance de signal d'entrée est donnée par la figure IV.3. On observe à partir de cette courbe, que le facteur Q augmente lorsque la puissance d'entrée augmente jusqu'à la valeur de 18 dBm puis il commence à diminuer en dépassant cette valeur.

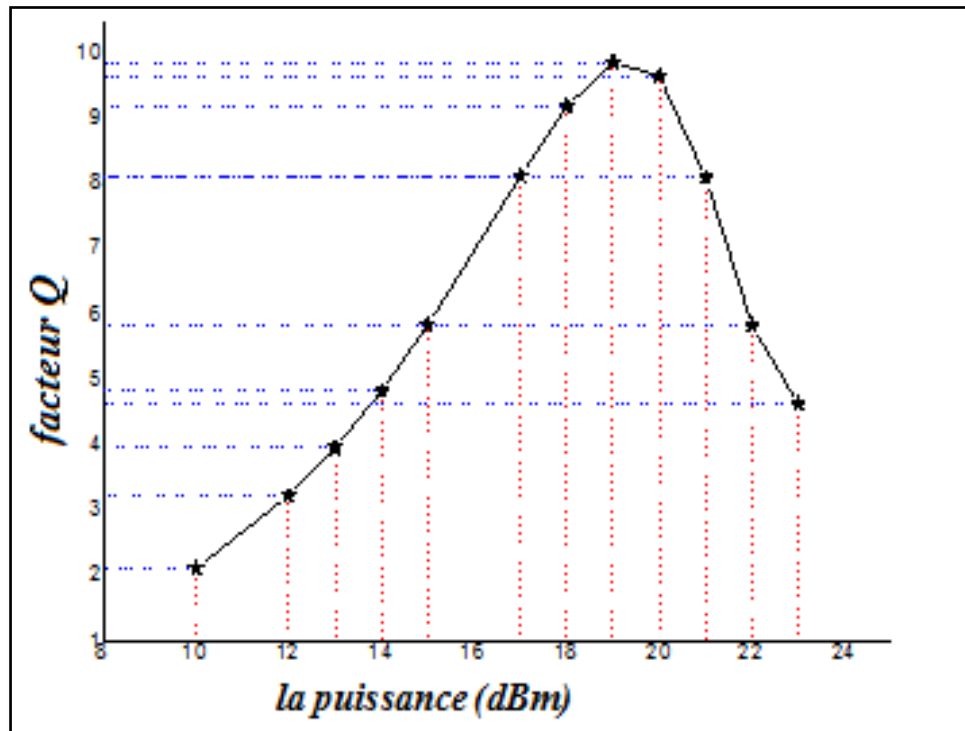


Figure IV.3 : variation du facteur Q en fonction de la puissance d'entrée.

IV.4.2 L'influence de la longueur de la fibre

On fixe une puissance d'entrée de 18 dBm prise comme valeur laquelle notre système résonne puis on fait varier la longueur, on a remarqué que la distance maximale qu'on peut atteindre ne dépasse pas les 60 km comme nous le montre la figure IV.4 : avec un débit binaire égale du GPON au maximum la longueur des fibres de 100 Km et à chaque fois on change le débit binaire 2.5 Gbits/s.

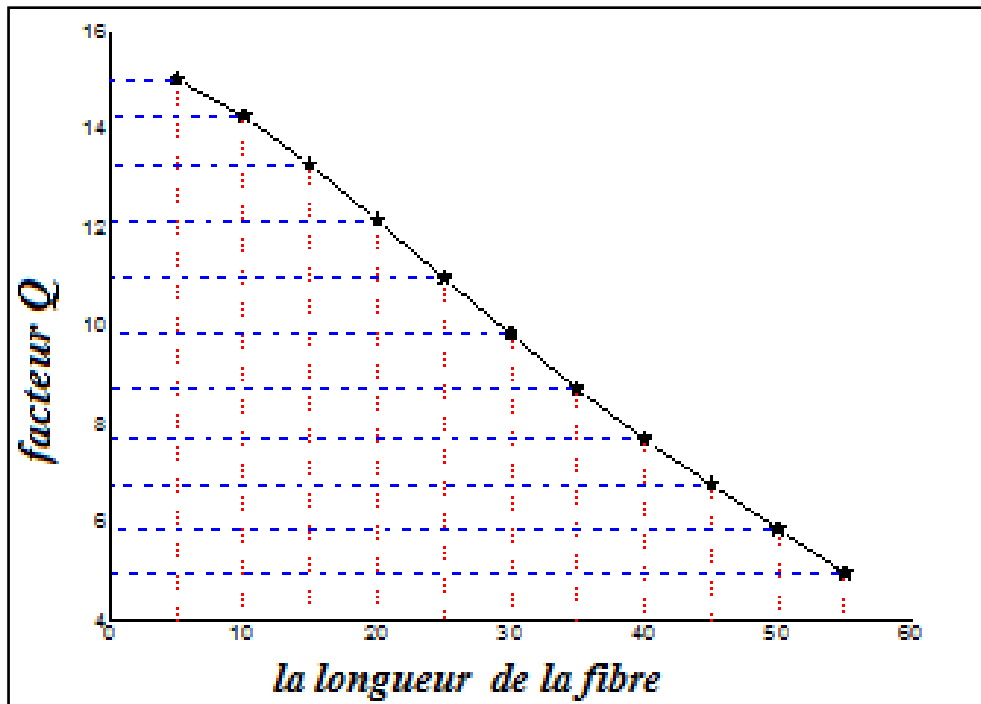


Figure IV.4: variation du facteur Q en fonction de la longueur de la fibre.

IV.5 Introduction de l'EYDWA dans le réseau optique GPON

Le déploiement de l'amplificateur à fibre dopée à l'Ytterbium dans le réseau est indispensable afin de couvrir une zone géographique plus grande avec un nombre important d'abonnés. En utilisant ce type d'amplificateurs, on va augmenter le budget optique total.

Le but de cette thèse est d'estimer l'impact de l'emplacement de l'amplificateur optique EYDWA sur les performances d'un système de communication optique GPON.

Notre recherche porte sur son utilisation dans un GPON ou on va le placé en trois positions différentes comme pré-amplification, post-amplification et d'amplification en ligne. Le signal d'entrée à $\lambda = 1550$ nm est modulé à 2.5 G bit/s pour un taux de partage de 64 et sur une distance de transmission de l'ordre de 100 Km. Figure IV.5.

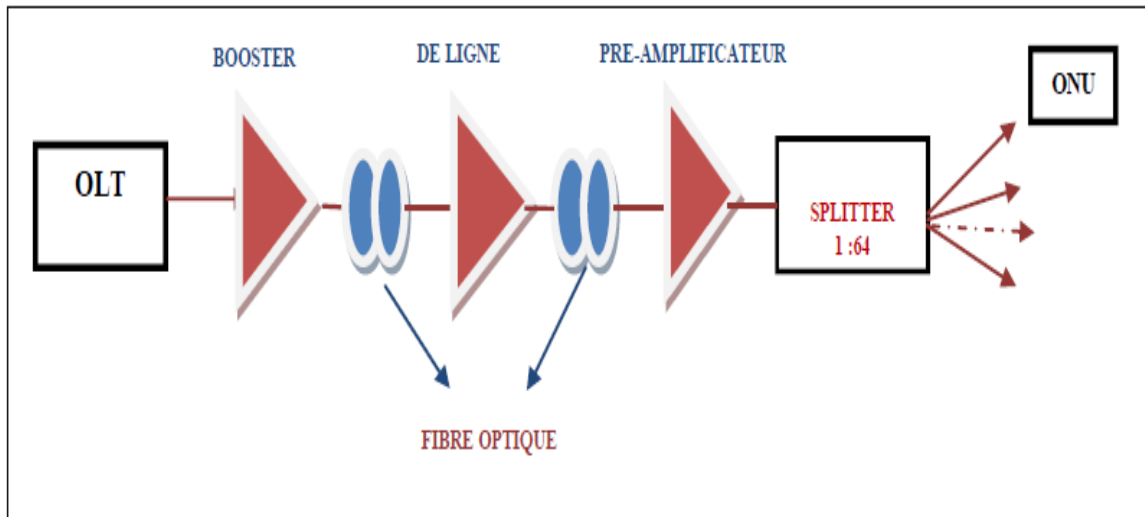


Figure IV.5 : Différents placements de l'EDFA dans un réseau GPON. [6]

La figure IV.6 montre les éléments du système hybride à longue portée et sans fil GPON proposé. Cette architecture explique le fonctionnement du transfert de données aux utilisateurs.

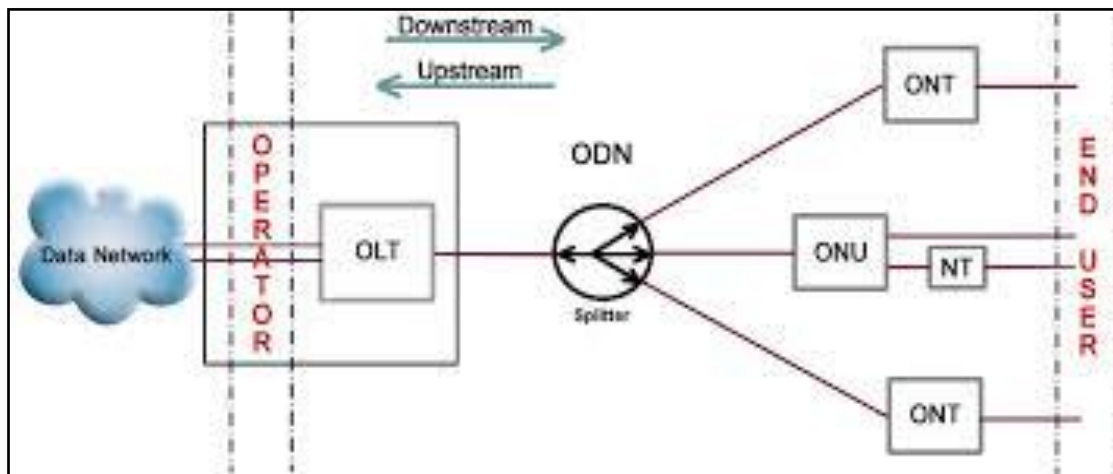


Figure IV.6 : La configuration du système pour 2,5 Gb / s de système GPON avec 64 utilisateurs.

Cependant, cette thèse a rapporté que les données ont été transmises sur une longueur de fibre de 250 km à 1550 nm avec un débit binaire pseudo-aléatoire de 2,5 Gbit / s. Ensuite, le signal a été divisé avant d'être transmis via un récepteur équipé d'une unité de réseau optique (ONU), après quoi la détection a été effectuée par le récepteur optique qui est un photo-détecteur APD combiné avec un filtre de Bessel et un régénérateur 3R.

Les paramètres de la photodiode APD sont les suivants: courant d'obscurité = 10nA et réactivité = 1A / W. Le filtre passe-bas de Bessel donne à la fois la valeur du facteur Q du facteur de qualité ainsi que des diagrammes oculaires. Pour compenser les pertes dues à la fibre optique, un EYDWA de 4 cm de long [7] est placé en aval de la fibre en tant que post-amplificateur pour augmenter la puissance du signal d'entrée [7].

Le supprimeur utilisé a des concentrations d'ions erbium et Ytterbium de $+026$ ions / m^3 et $5.1e^{+027}$ ions / m^3 , respectivement. Cet amplificateur a été pompé à 250 mW avec une longueur d'onde de 980 nm.

Pour analyser les différentes configurations simulées, on a présenté dans un premier temps les performances en fonction de la puissance émise et ensuite on a montré les performances en faisant varier la longueur du guide de 0,15 m à 0,65 m.

Le tableau IV.1 montre les paramètres de l'amplificateur à fibre dopée. La taille du guide peut avoir un impact positif sur les amplificateurs et le facteur Q augmente avec une distance fixe de 60 km. A titre de comparaison, on note que pour la position de l'amplificateur après la fibre optique, le facteur de qualité Q est meilleur puisqu'il atteint presque 20 avec celui de la position Booster ou de la ligne.

Tableau IV.1: paramètre des amplificateurs à fibres dopées.

Paramètres	valeurs
densité d'ions Erbium (m^{-3}) C_{Er}	$1e^{+026}$
Densité d'ions Ytterbium (m^{-3}) C_{Yb}	$5.1e^{+027}$
Ouverture Numérique NA	0.24
Longueur du guide (m)	0.15-0.65

IV.6 configuration en position Booster

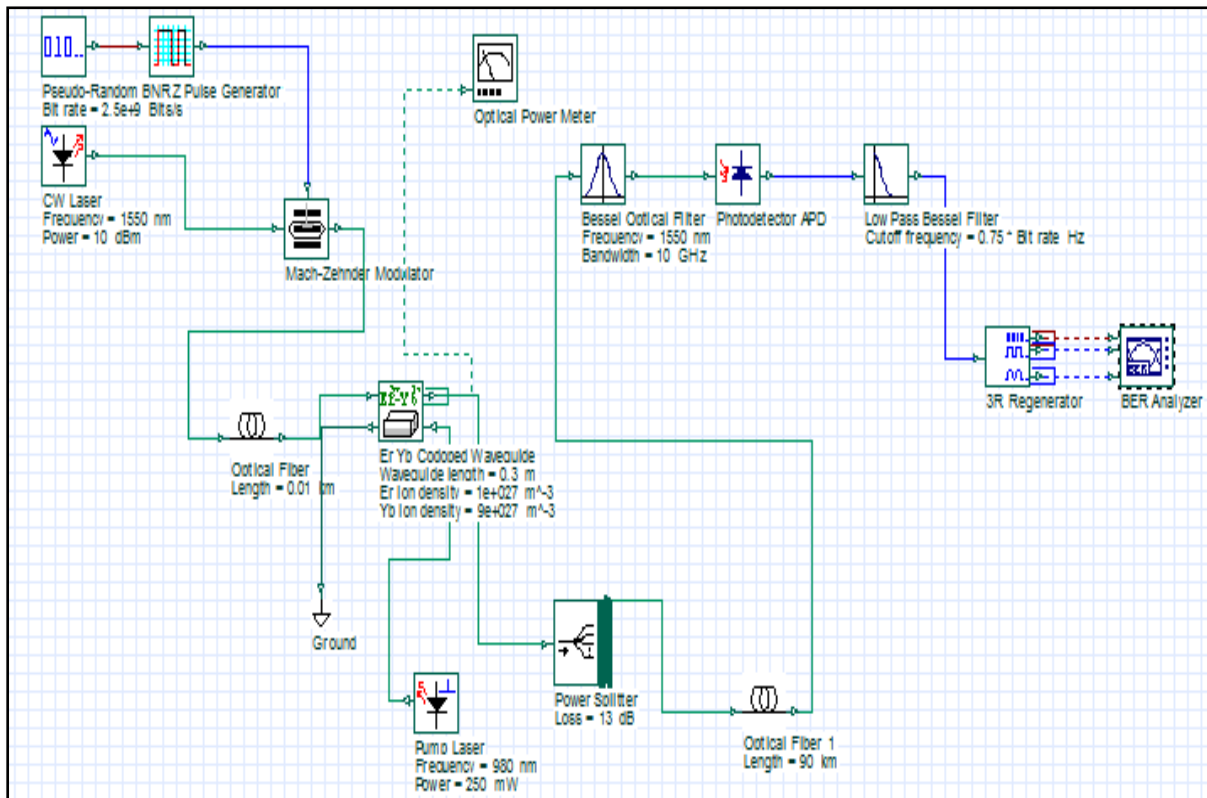


Figure IV.7 : schéma bloc d'un GPON avec amplificateur position Booster.

Dans ce cas l'amplificateur EYDWA est positionné en aval du canal de transmission et qui est la fibre optique comme il est indiqué dans la figure ci-dessus (Figure IV.7).

IV.6.1 L'influence de la longueur de la fibre en fonction du facteur Q

En fixant la puissance du Laser à 10 dBm avec les paramètres caractéristique de l'amplificateur cité au paravent, et en faisant varier la longueur de la fibre, les résultats de simulation montre que pour un facteur $Q=3.430$ on a pu atteindre une distance de 132 Km comme il est indiqué dans la figure IV.8.

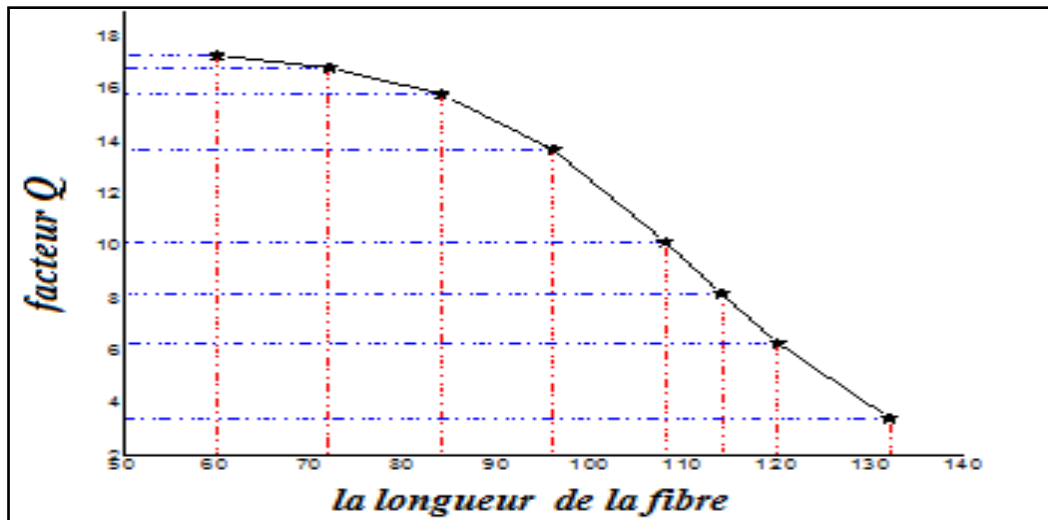


Figure IV.8 : variation du facteur Q en fonction de la longueur de la fibre optique.

IV.6.2 L'influence de la concentration des ions Ytterbium en fonction du facteur Q

Les performances de l'amplificateur optique s'améliorent en augmentant la concentration des ions Ytterbium toute en fixant la valeur de la concentration des ions Erbium à $1e^{+0.26} \text{ m}^{-3}$ et la longueur de fibre à 60 Km où on a pu atteindre une un facteur de qualité de 14.6553 pour une concentration d'ions de $9e^{+27} \text{ m}^{-3}$. Comme nous le montre la figure IV.9.

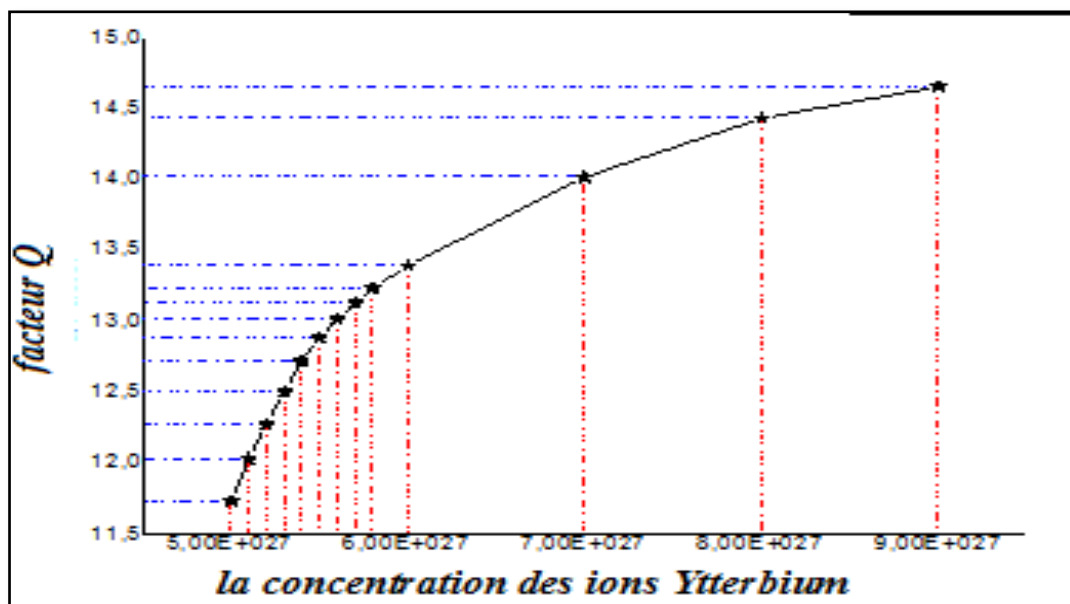


Figure IV.9 : variation du facteur Q en fonction de la concentration des ions Ytterbium.

IV.6.2 L'influence de la longueur de guide de l'amplificateur en fonction du facteur Q

L'amplificateur EYDWA dont les paramètres sont indiqués dans le tableau IV.1 et sont fixés sauf de la longueur L du guide. La courbe de figure ci-dessous montre l'effet de la longueur de la fibre dopée à l'Ytterbium (variant de 0.3 m à 0.65 m) sur la réponse du facteur Q. Les résultats obtenus montrent qu'il y a une relation proportionnelle entre la longueur de guide et le facteur Q, c'est-à-dire que le facteur augmente lorsque la longueur de guide augmente, pour une longueur L égale 0.65 on a pu avoir un Q égale 14.1826.

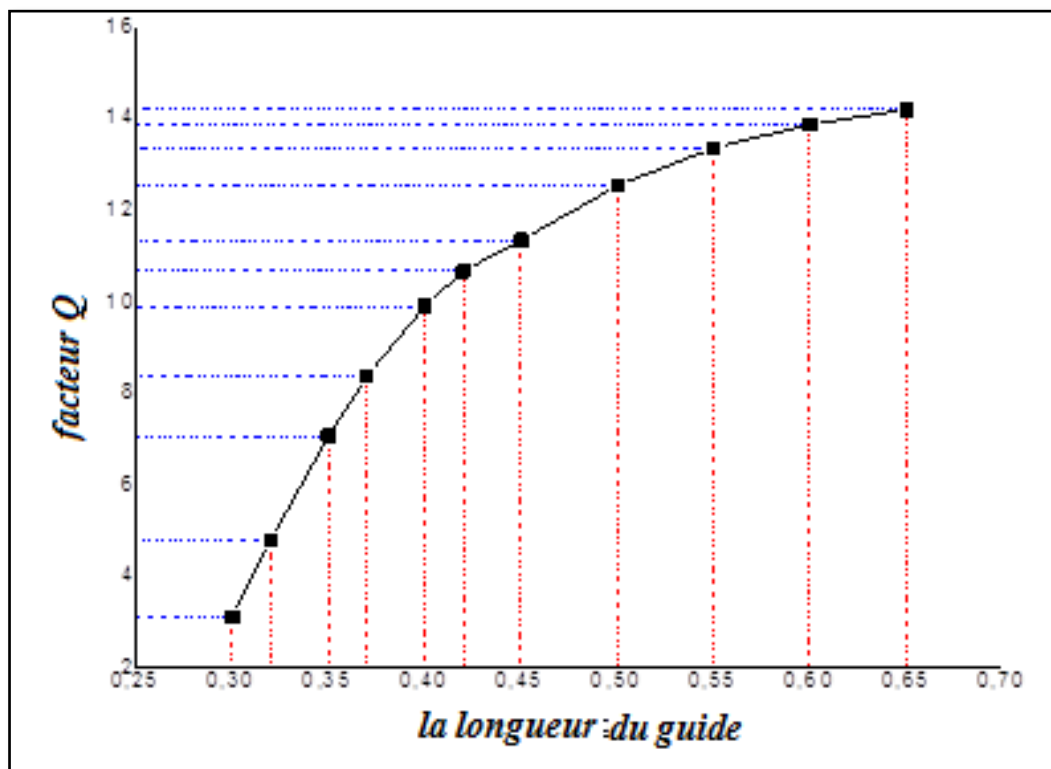


Figure IV.10 : variation du facteur Q en fonction de la longueur du guide.

IV.7 configuration en position en ligne

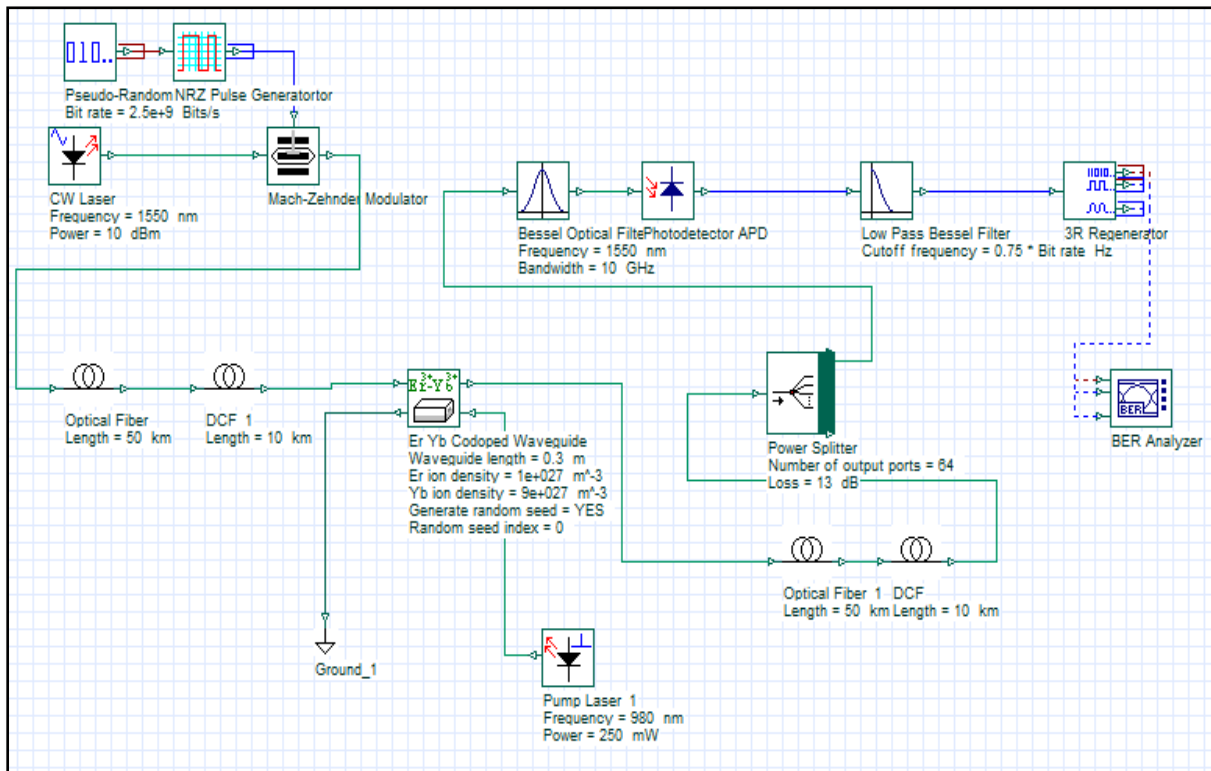


Figure IV.11 : schéma bloc d'un GPON avec amplificateur position en ligne.

Dans le cas de l'amplification en ligne, l'amplificateur EYWDA est placé au milieu du canal de transmission qui est à fibre optique comme il est indiqué sur le schéma de la figure IV.11.

IV.7.1 L'influence de la longueur de la fibre en fonction du facteur Q

Pour analyser cette configuration simulée, nous présentons dans un premier temps les performances en fonction de la distance parcourue avec amplification en ligne.

Les résultats obtenus sur la figure ci-dessous montre que une puissance d'entrée fixée à 10 dBm et avec une fibre de compensation de dispersion chromatique, la courbe montre que la distance maximum atteindré est de 250 Km pour un facteur Q de 4.1813.

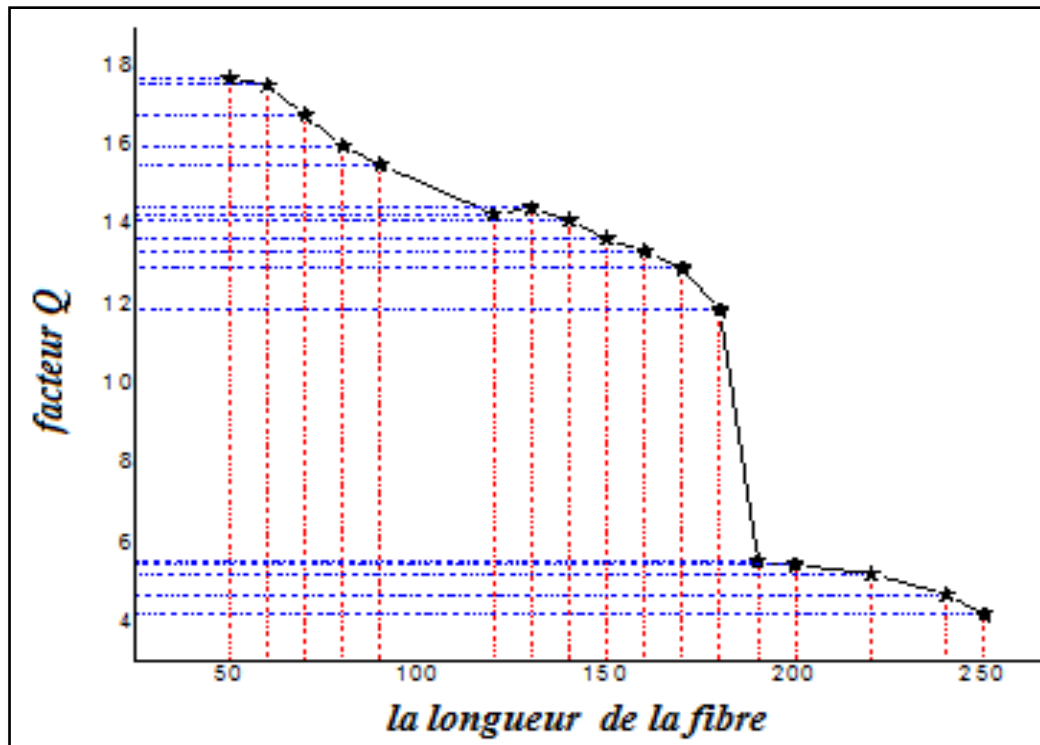


Figure IV.12 : variation du facteur Q en fonction de la longueur de la fibre.

IV.7.2 L'influence de la longueur du guide de l'amplificateur en fonction du facteur Q

Les simulations montrent que pour une puissance fixe de 10 dBm à 1550 nm de longueur d'onde, et avec les mêmes concentrations d'Erbium et Ytterbium, on a fait varier la longueur de guide de 0.15 à 0.37m.

D'après la courbe de la figure IV.13 on remarque que l'effet de la variation de la longueur de guide agit sur les performances du GPON car pour une longueur de 0.37 m on a un facteur Q égale 15.0316, d'où l'importance des paramètres physique.

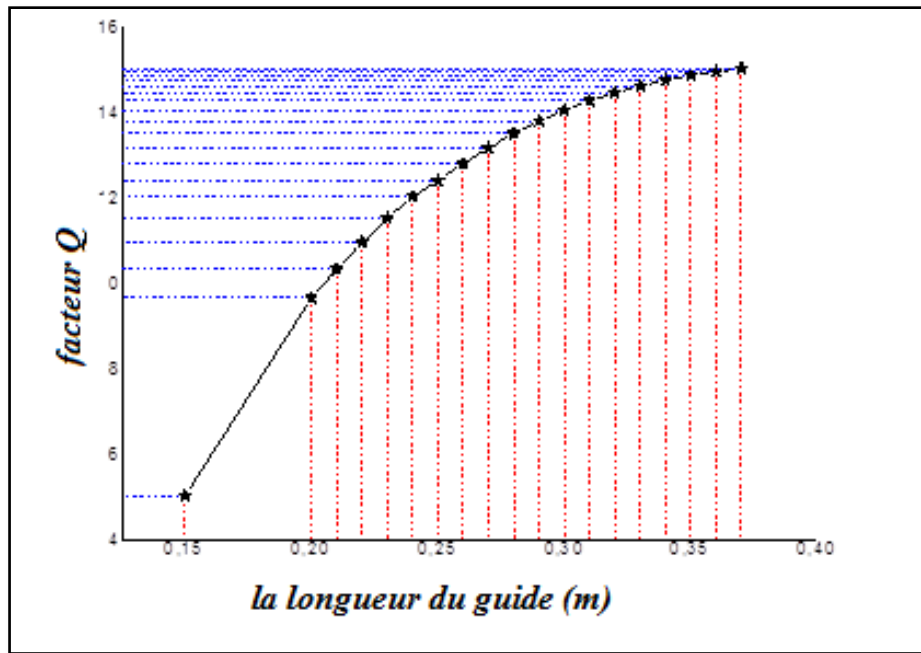


Figure IV.13: variation du facteur Q en fonction de la longueur du guide (m).

IV.8 configuration en position amplificateur

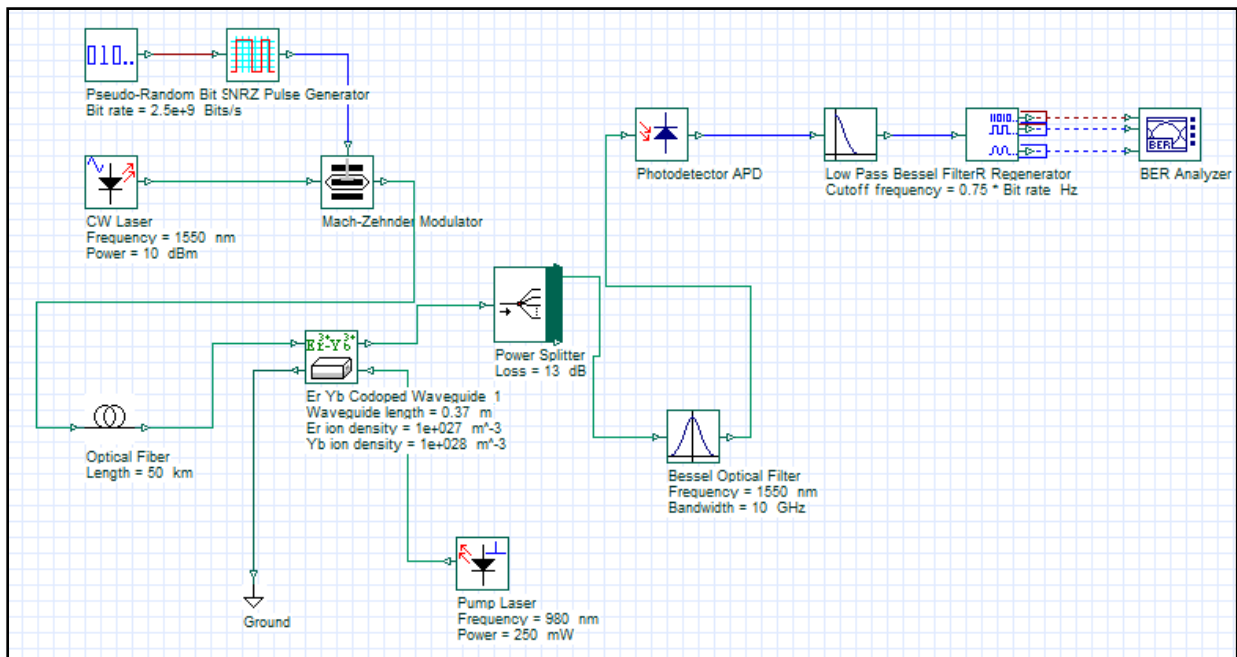


Figure IV.14 : schéma bloc d'un GPON avec amplificateur.

Dans ce cas, nous proposons d'évaluer la contribution de l'emplacement de l'amplificateur optique sur les performances d'un GPON.

IV.8.1 L'influence de la puissance d'entrée en fonction du facteur Q

Afin de connaître la puissance optimale que peut être un amplificateur optique résonne en maximum on a fait varier la puissance optique d'entrée de tel façon à avoir une meilleur de qualité de performance, en fixant la longueur de GPON à 65 Km.

On observe à partir de cette courbe, que pour une puissance optique d'entrée de 18 dBm on a pu avoir un facteur de qualité de 19.0925.

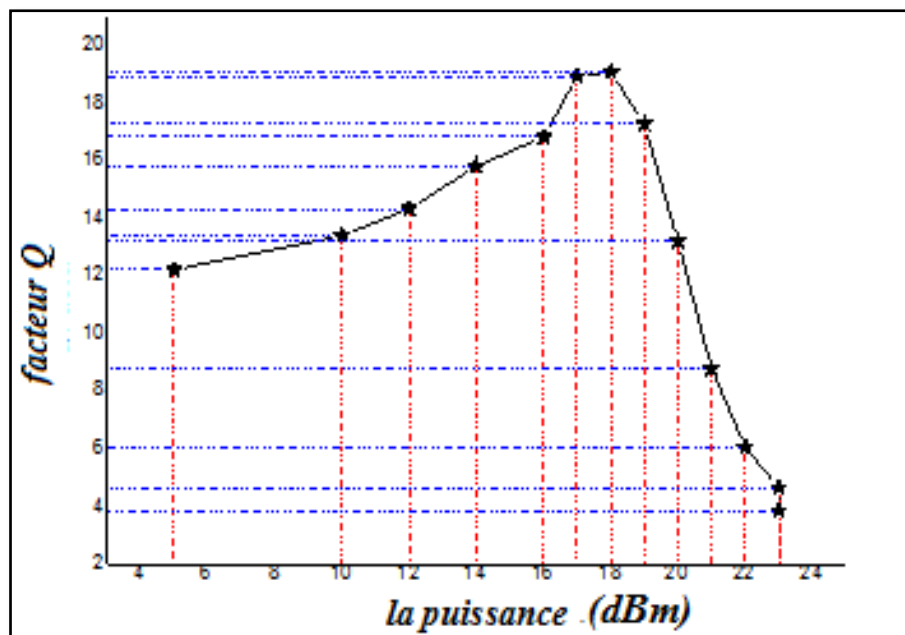


Figure IV.15 : variation du facteur Q en fonction de la puissance optique d'entrée.

IV.8.2 L'influence de la longueur de fibre en fonction du facteur Q

La dispersion chromatique et l'atténuation, sont les principaux phénomènes linéaires limitant la bande-passante d'une transmission sur la fibre optique.

On remarque que pour une longueur de fibre de 50 km le facteur de qualité est au maximum, à partir de cette valeur on note une dégradation de la qualité du signal jusqu'à atteindre un facteur de qualité de 4.10274 et un TEB de $1.1244 \cdot 10^{-005}$, pour une longueur de 255 km comme l'indique la figure suivante.

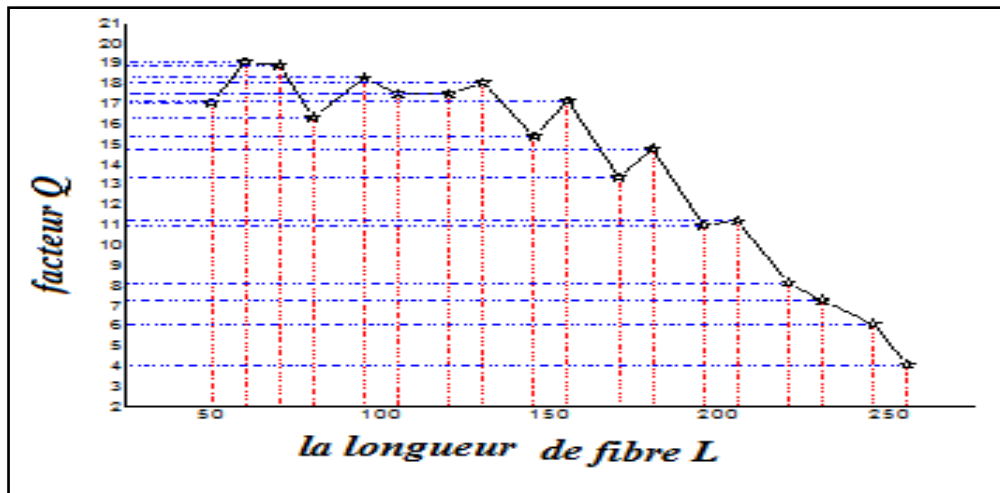


Figure IV.16 : variation du facteur Q en fonction de la longueur de fibre L.

IV.8.3 L'influence de la longueur de guide de l'amplificateur en fonction du facteur Q

Lors de cette configuration, nous sommes penchés aussi à l'étude de l'impact de la longueur de guide sur les performances du système, de telle façon à avoir une meilleure qualité du système. La courbe de la figure IV.17 relève cette réponse, d'où on a obtenu une valeur de facteur Q égale 19.0365 pour une longueur de 0.6 m ce qui nous a permis de savoir l'importance des paramètres physique optimale de chaque composant du système.

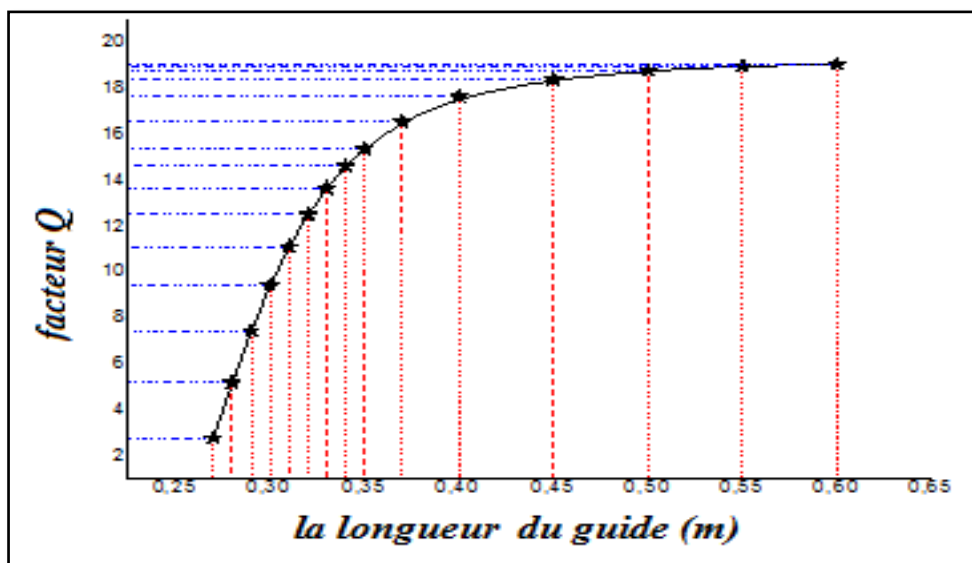


Figure IV.17 : variation du facteur Q en fonction de la longueur du guide (m).

IV.8.4 L'influence de la concentration des ions Ytterbium en fonction du facteur Q

Dans ce cas, pour une longueur de fibre optique de 60 Km, une puissance de 18 dBm, et une concentration des ions d'Erbium de $1e^{+0.27}$ en faisant varier la concentration des ions Ytterbium de $5.1e^{+0.27}$ à $1e^{+0.28}$. La courbe ci-dessous nous montre l'évolution du facteur Q avec la concentration d'où on a obtenu un facteur de qualité de 17.6838 et avec un TEB de $1.7629e^{-0.70}$.

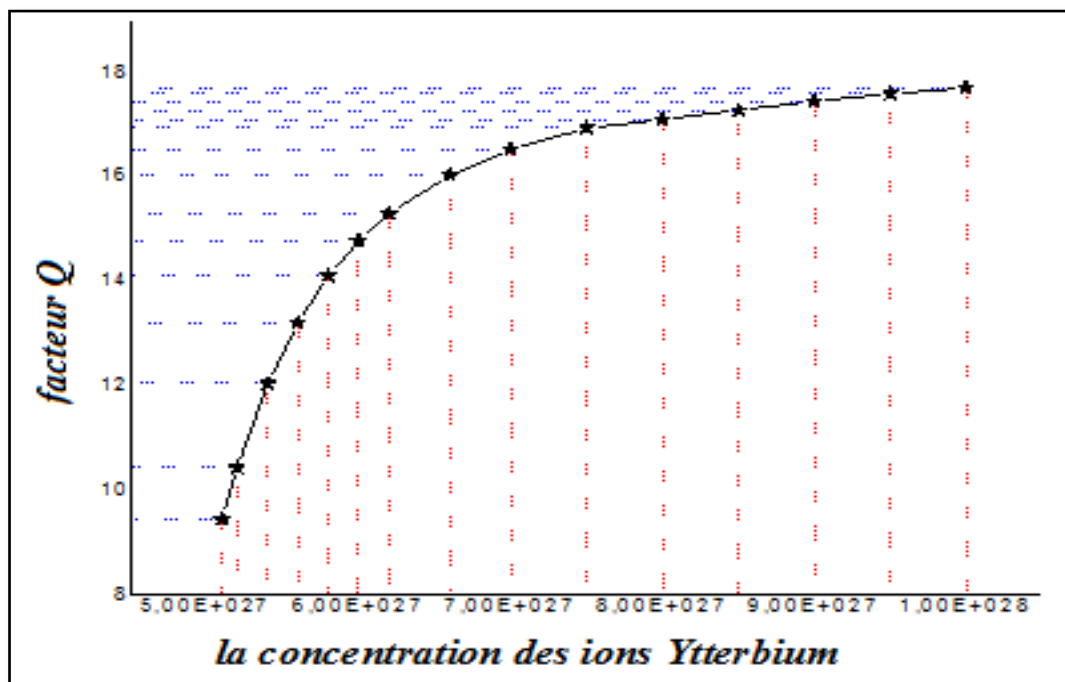


Figure IV.18 : variation du facteur Q en fonction de la concentration des ions Ytterbium.

IV.9 comparaison des trois configurations de l'amplificateur

IV.9.1 influence du facteur Q en fonction de la puissance émise

En fixant les paramètres géométriques indiqués dans le tableau 1 de l'amplificateur (EYDWA), les mesures suivantes ont été effectuées en faisant varier la puissance du laser tout en conservant une longueur de fibre constante de 60 km avec un débit binaire de 2,5 Gbits / s. Les graphiques des figures de IV.19 à IV.21 ci-dessous montrent la variation du facteur de qualité (Q) et du taux d'erreur binaire (BER) en fonction de la puissance transmise du laser.

Les résultats des simulations («figure IV.19» et «figure IV.20») montrent que plus la puissance émise par le laser augmente, meilleur est le facteur de qualité obtenu. On a noté qu'à la puissance de 18 dBm, on a un facteur de qualité de 19,0925 lorsque la puissance s'est stabilisée. On a également obtenu de très bonnes valeurs du taux d'erreur binaire pour cette puissance. Dans tous les cas, le facteur de qualité est supérieur à 3,85.

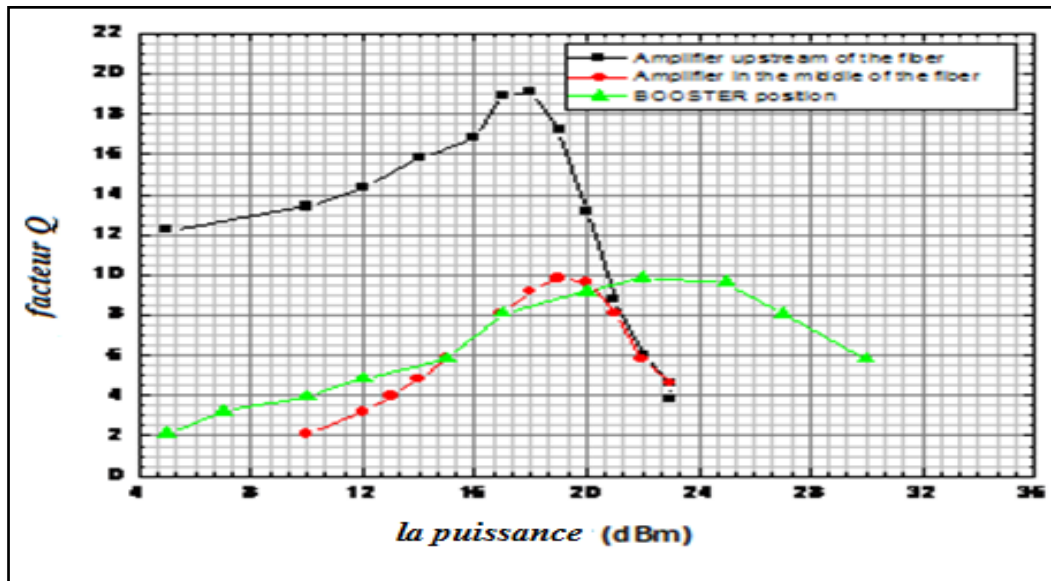


Figure IV.19 : variation du facteur Q en fonction de la puissance émise.

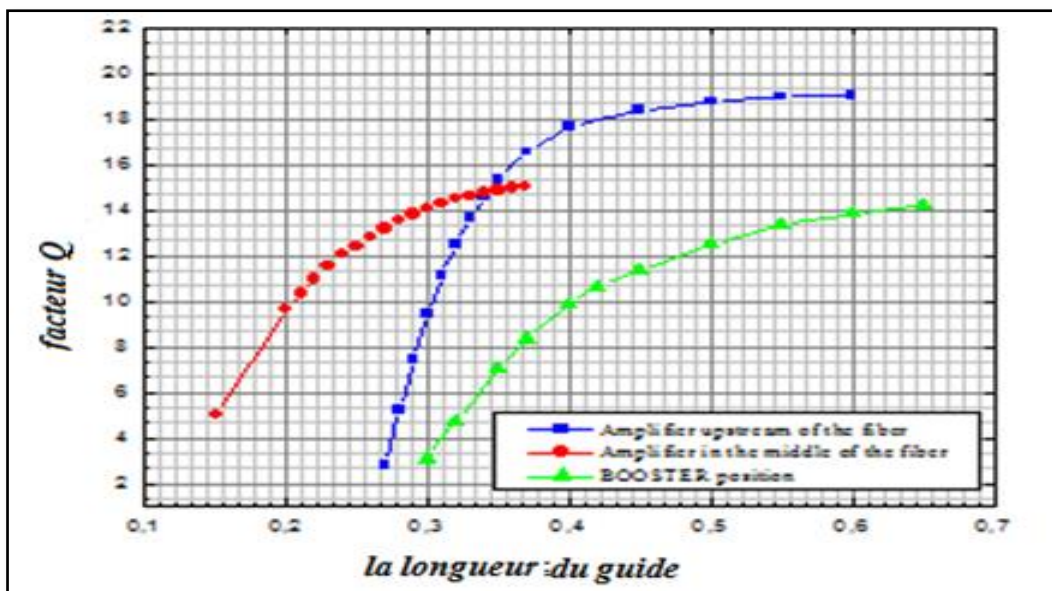


Figure IV.20 : Variation du facteur de qualité en fonction de la longueur du guide d'onde pour trois positions de l'amplificateur optique.

IV.9.2 influence du facteur Q en fonction de la concentration des ions Yb

L'amplificateur optique est en trois positions dans la liaison optique et ceci pour une puissance de 18 dBm et une longueur de fibre de 60 km, afin de démontrer l'impact de la concentration ionique sur les amplificateurs à guide d'ondes EYDWA pour différentes valeurs de dopage à l'Ytterbium $C_{Yb} = 5.2e + 027, 1e + 028 / m^3$ pour les positions de préamplificateur et de ligne mais en position booster, la concentration est limitée entre $5,2e + 027, 9e + 027 / m^3$ et les concentrations d'Erbium $C_{Er} = 1e + 026$ ions / m^3 . D'après les chiffres ci-dessus, on peut observer que le gain obtenu dans EYDWA était limité par le coefficient de conversion à la hausse, cependant, les meilleurs résultats en termes de facteur de qualité Q sont de 17,63 et pourraient être obtenus en augmentant la concentration en Ytterbium à plus de $C_{Yb} = 1e + 028$ ions / m^3 . Avec une valeur fixe de celle d'Erbium de $C_{Er} = 1e + 026$ ions / m^3 , il a été observé que le facteur de qualité Q atteint la meilleure valeur de 17,7 comme le montre la figure IV.21.

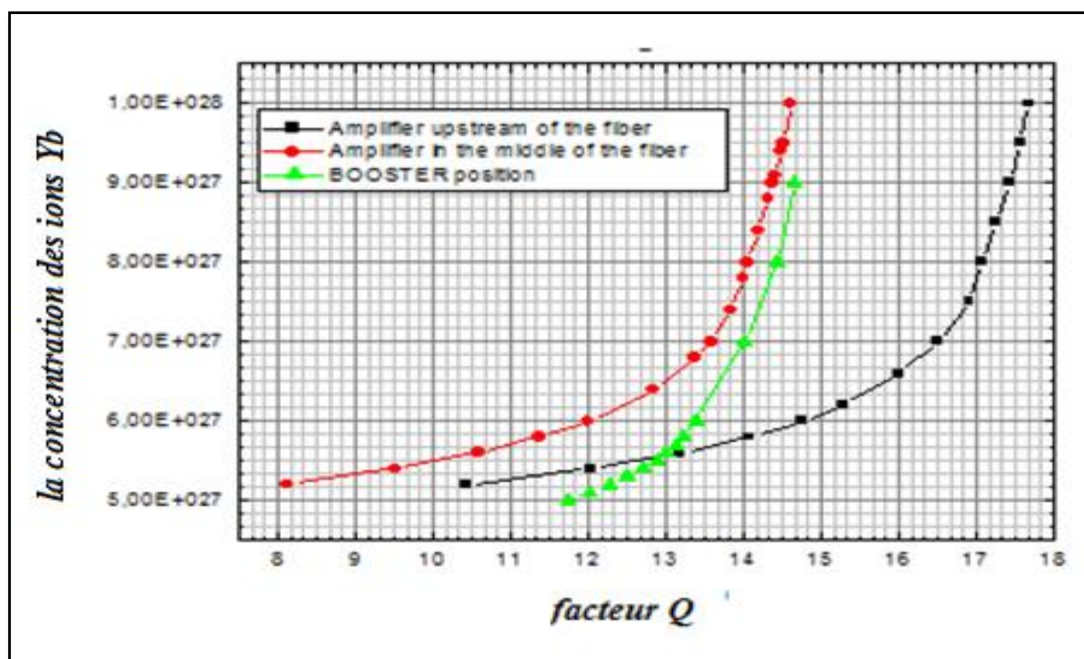


Figure IV.21 : Variation de la concentration des ions Yb en fonction du facteur Q pour trois positions de l'amplificateur optique.

IV.9.3 Influence du facteur Q en fonction de la longueur du GPON

Les résultats ont été évalués en faisant varier la longueur de la fibre optique de 50 à 255 km. Les paramètres optiques non linéaires dans la liaison sont pris en compte comme la fibre optique monomode standard (SMF) d'une atténuation = égale à 0,2 dB / km, une dispersion = de 17ps / nm / km, une fibre de compensation de dispersion égale à - 85ps / nm / km. Les différents paramètres de l'amplificateur (EYDWA) sont une longueur guide de 0,6 m, une température de fonctionnement = de 300 K, une longueur d'onde de la pompe = aussi grande que 980 nm et une puissance de pompage = d'environ 250 mW. Sur la figure IV.22, on peut en déduire que les performances de l'amplificateur optique (EYDWA) ont été comparées en fonction de sa localisation dans le GPON. Il a été observé que la qualité de la transmission est meilleure pour la position amont du préamplificateur à une distance de 255 Km et un facteur de qualité de 4,10. Par conséquent, pour la position médiane, la longueur est de 250 km pour un facteur de qualité de 4,10 lorsque la position du booster est d'environ 132 km avec $Q = 3,4$.

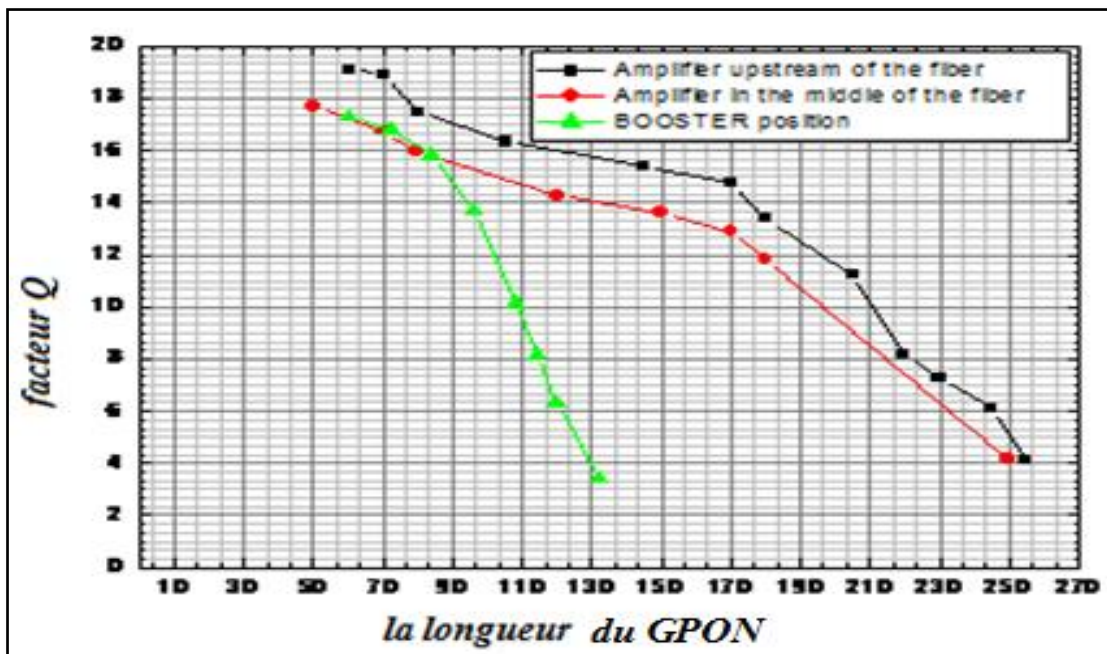


Figure IV.22 : Variation du facteur Q en fonction de la longueur du GPON.

La figure IV.23 présente une comparaison entre les différents amplificateurs de position comme en balayant la longueur de fibre GPON (de 50 à 255 km). Selon les courbes trouvées, on constate que le meilleur résultat avec le plus faible log Min de BER est trouvé dans le cas d'EDFA utilisant dans la transmission en amont, mais les performances diminuent avec la configuration du booster. Ainsi, le facteur BER augmente simultanément en raison de la perte totale (fibre, séparateur et séparateur).

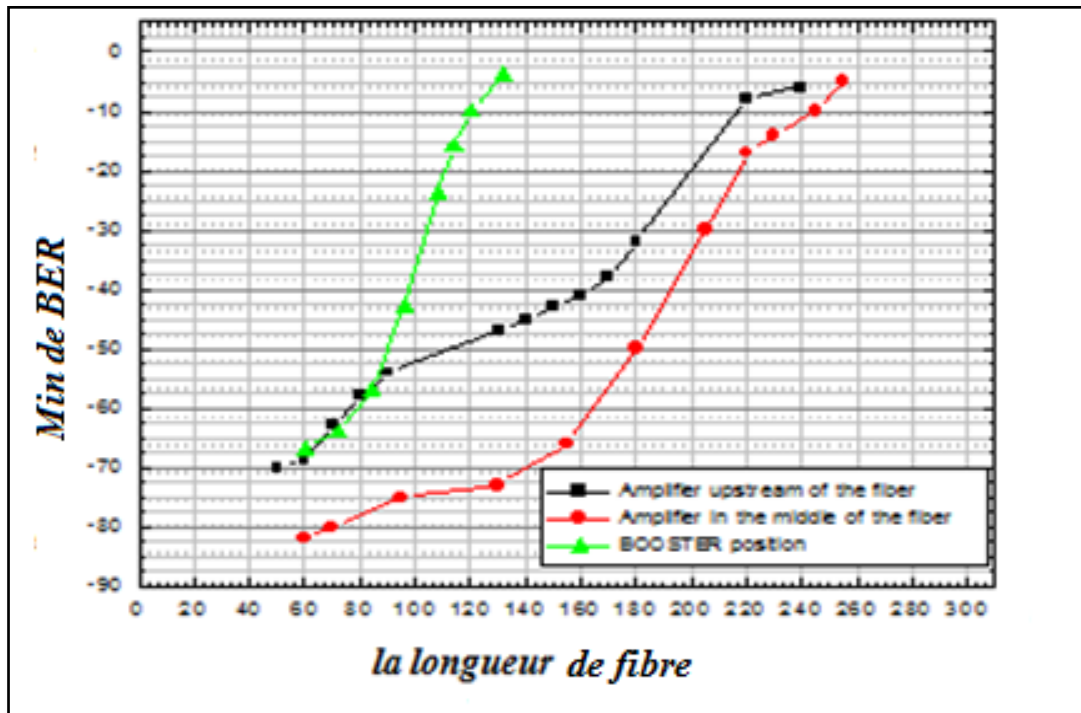


Figure IV.23 : Variation du Min de BER en fonction de la longueur de fibre pour trois positions de l'amplificateur optique.

IV.9.4 Le diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil est un outil graphique utilisé pour évaluer la qualité d'un signal numérique à la sortie du système et pour optimiser les réglages de l'amplificateur trouvés le long du canal.

Il montre également les performances en termes de facteur Q et le diagramme de l'œil du système simulé utilisant EYDWA avec une concentration en Ytterbium $C_{Yb} = 1e^{+028}$ ions / m³ et avec une concentration en Erbium de $C_{Er} = 1e^{+028}$ ions / m³.

D'après la figure IV.24, on peut noter que le facteur Q pour la position de l'amplificateur, la position en ligne et le booster est 19,0925, 12,7029 et 13,4481, respectivement avec 60 km de GPON. On a remarqué que pour les mêmes paramètres physiques de l'amplificateur, la qualité du système a changé en fonction de son emplacement dans la chaîne optique.

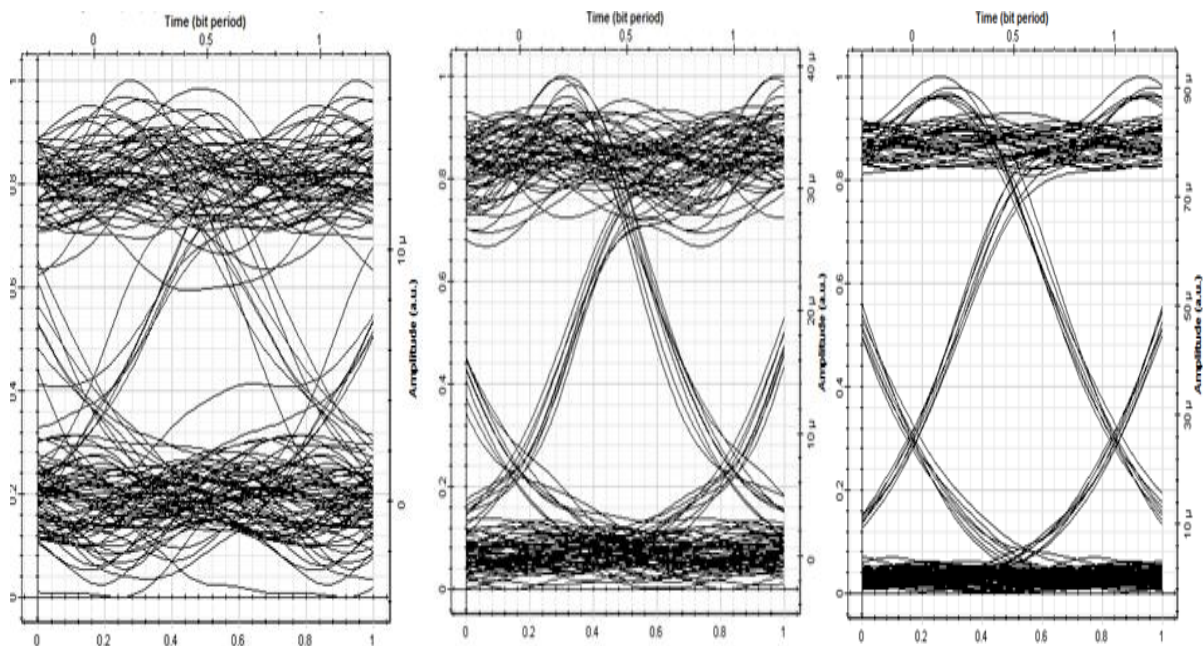


Figure IV.24 : Diagramme de l'œil de trois positions utilisant EYDWA avec une concentration d'Ytterbium ($C_{Yb} = 1e + 028$) et avec une concentration d'Erbium de ($C_{Er} = 1e^{+028}$).

En comparant notre système utilisant l'amplificateur optique co-dopé Yb / Er avec celui utilisant uniquement Erbium, il y a une nette amélioration du système en termes de facteur de qualité, ainsi que la distance qui sépare la transmission de la réception des données car avec notre configuration permettait d'atteindre une distance de 255 km avec un facteur Q de 4,1, alors qu'avec celle d'Erbium la distance est limitée à 200 km avec un Q très bas.

IV.9.5 Densité spectrale de puissance

Afin de montrer l'influence de l'amplificateur, on compare les différentes densités spectrales de puissance à l'entrée et en sortie de l'EYDWA.

IV.9.5.1 Position amplificateur

D'après les résultats de simulation (figure IV.25 et IV.26) nous voyons que, l'apport de l'amplification dans une liaison optique améliore significativement la valeur de la puissance du signal d'où à l'entrée de l'amplificateur on a une valeur de la puissance qui égale à -4.63 dBm et à la sortie égale à 12.78 dBm.

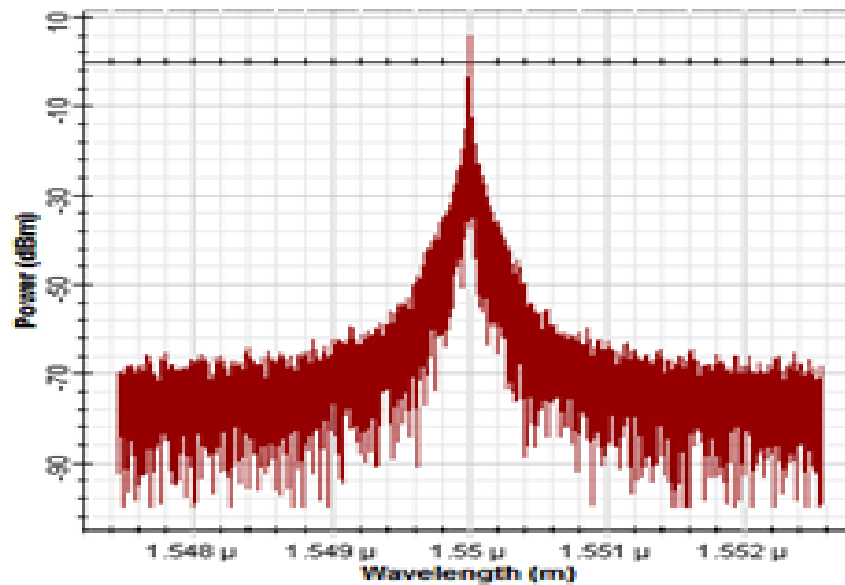


Figure IV.25 : Ampli densité spectrale sortie de l'ampli. Pour $L_T = 60\text{Km}$

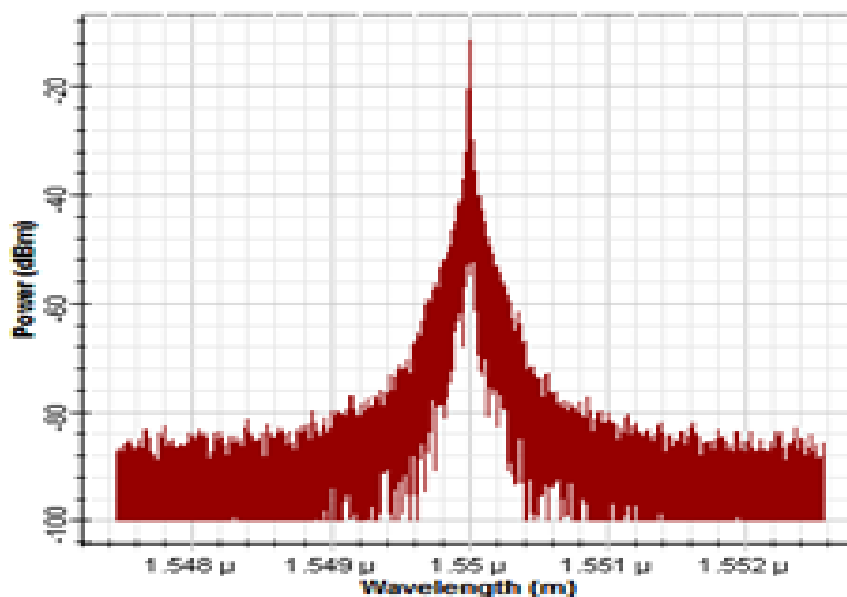


Figure IV.26 : Ampli densité spectrale entrée de l'ampli. Pour $L_T = 60\text{Km}$

IV.9.5.2 Position au milieu de la fibre

Les résultats de simulation (figure IV.27 et IV.28) nous montre que, pour cette position on remarque que la puissance à l'entrée de l'amplificateur on a pour valeur de -3.01 dBm et à la sortie égale à 10.78 dBm.

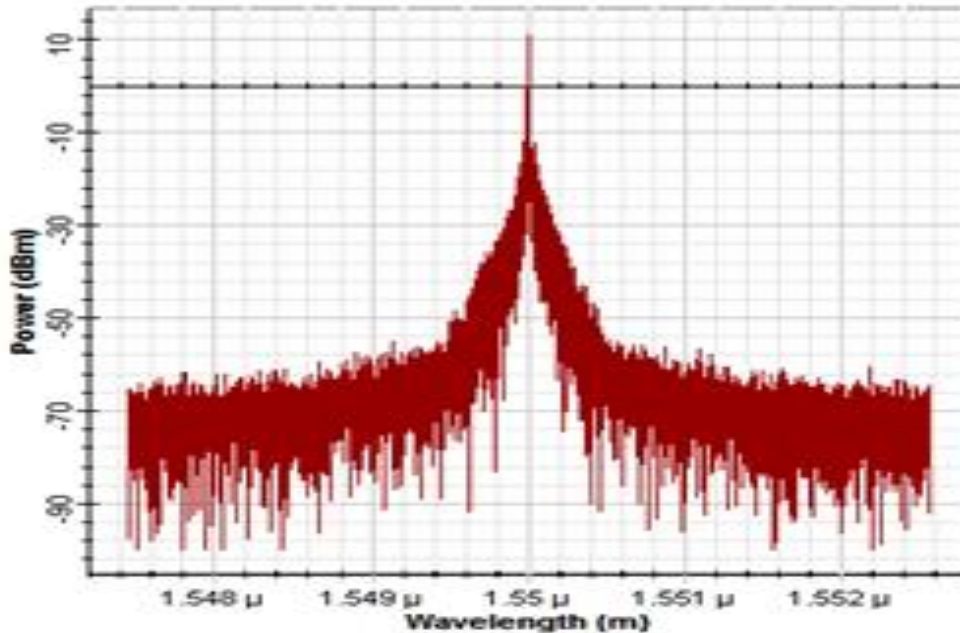


Figure IV.27 : Au milieu densité spectrale sortie de l'ampli. Pour $L_T = 60\text{Km}$

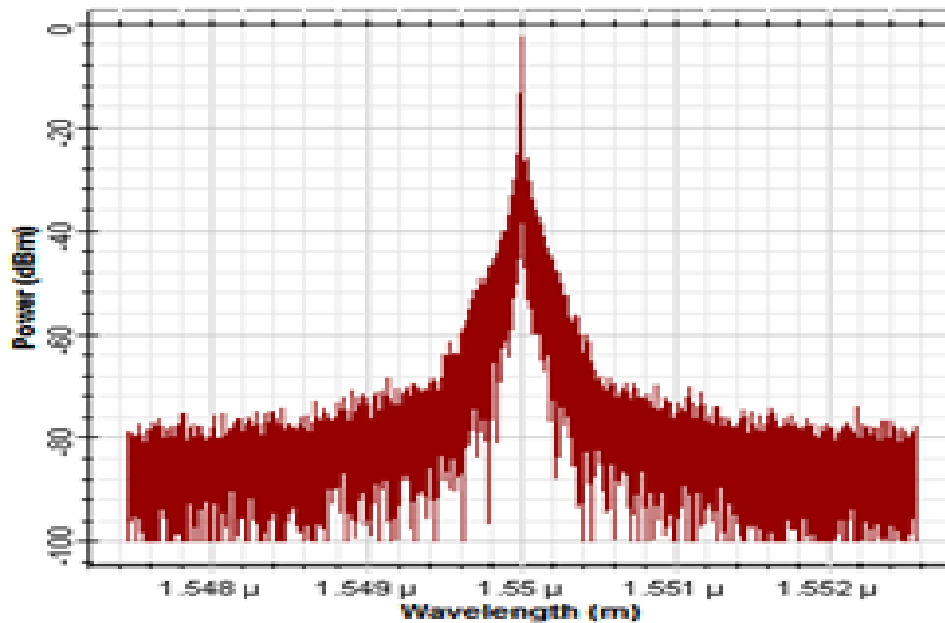


Figure IV.28 : Au milieu densité spectrale entrée de l'ampli. Pour $L_T = 60\text{Km}$

IV.9.5.3 Position Booster

Le résultat de simulation suivante (figure IV.28 et IV.29) nous montre que, pour cette position on note que la puissance à l'entrée de l'amplificateur on a pour valeur de 6.70 dBm et à la sortie égale à 19.12 dBm.

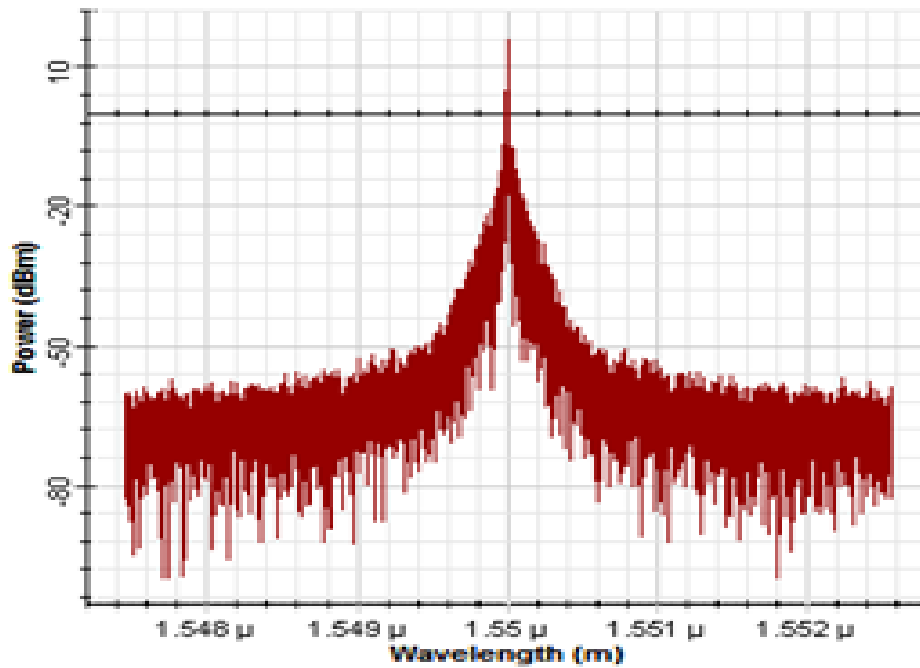


Figure IV.29 : Booster densité spectrale sortie de l'ampli. Pour $L_T = 60\text{Km}$

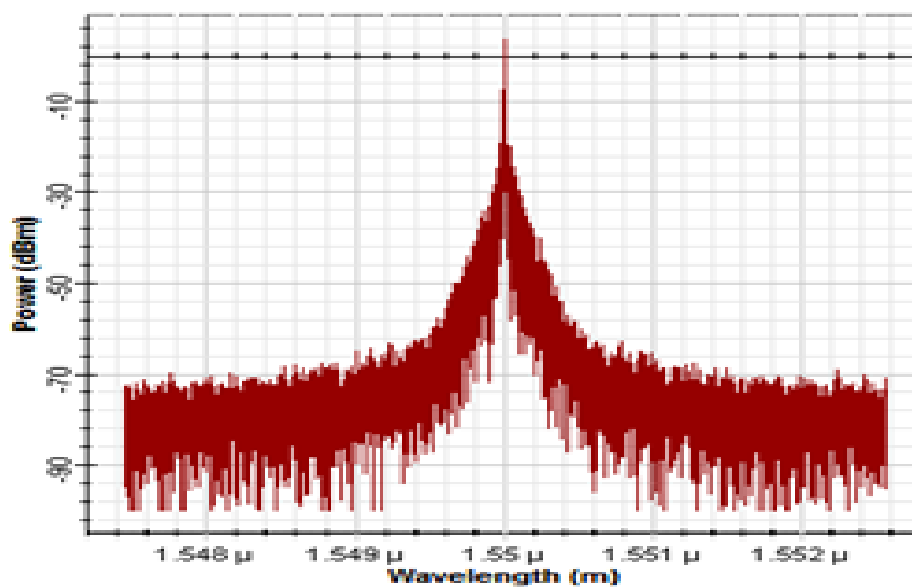


Figure IV.30 : Booster densité spectrale entrée de l'ampli. Pour $L_T = 60\text{Km}$

Tableau IV.2: Densité spectrale de puissance des trois positions de l'amplificateur EYDWA pour $L_T = 60\text{Km}$.

Position de l'amplificateur	Puissance d'entrée (dBm)	Puissance de sortie (dBm)
Préamplificateur	-4.63	12.78
Au milieu	-3.01	10.78
Booster	6.70	19.12

D'après le tableau ci-dessus nous confirme toujours que l'emplacement de l'amplificateur optique en position amplificateur contribue à la diminution de l'atténuation, et par conséquent une amélioration des performances de la liaison. Mais l'amplification génère toujours du bruit qui vient s'ajouter au signal amplifié par amplification de l'émission spontanée (ASE, Amplified Spontaneous Emission), qui est la principale source de bruit des amplificateurs EYDWA. On constate aussi que la puissance décroît au fur et à mesure que la longueur de la fibre augmente.

Pour $L_T = 60\text{Km}$

IV.10 Conclusion

La technologie des réseaux d'accès optiques évolue de plus en plus impliquant de nouvelles générations avec une très large bande passante en termes de débit. Dans cette évolution, la technologie utilisant l'accès optique est une solution d'avenir. Le présent travail fait partie d'une étude sur les différentes caractérisations d'amplificateurs (EYDWA) qui dépendent de leurs paramètres physiques, tels que les concentrations d'ions Erbium / Ytterbium et la longueur du guide utilisé. Pour la valeur de longueur optimale de 0,60 m, et un guide Erbium / Ytterbium ont montré que les amplificateurs de guide d'ondes les plus courts dopés à l'erbium et à l'Ytterbium avec des concentrations de $C_{Er} = 1e^{+026}$ ions / m^3 et $C_{Yb} = 1e^{+028}$ ions / m^3) avoir un meilleur impact dans les systèmes hybrides. On a remarqué que pour les mêmes paramètres physiques de l'amplificateur, la qualité du système changeait en fonction de son emplacement dans la chaîne optique. Comparer notre système utilisant l'amplificateur optique co-dopé Yb / Er avec celui utilisant uniquement Erbium, le facteur de qualité est augmenté ainsi que la distance qui sépare la transmission de la réception des données.

Au final, il apparaît que les amplificateurs n'offrent pas le même gain selon la configuration choisie car la puissance de saturation ne sera jamais dépassée quelle que soit la puissance d'entrée de l'amplificateur.

Références bibliographiques

- [1] G.P Aggarwal, “Fiber Optic Communication Systems,” John Wiley and Sons, New York, 1997.
- [2] TS. Nguyễn Văn Tuấn - Fiber Optic Information - Education Publishing House Vietnam - 2010.
- [3] A. Sheetal, A.K. Sharma, R.S. Kaler, “Simulation of high capacity 40 Gb/s long haul DWDM system using different modulation formats and dispersion compensation schemes in the presence of Kerr’s effect”. *Optic- International Journal of light Electron*, vol. 121, no. 4, pp 739-749, 2010.
- [4] M.R.A. Moghaddama, S.W. Haruna, R. Parvizi , Z.S. Sallehb, H. Arofb, A. Lokmanb, H. Ahmada, “Experimental and theoretical studies on Ytterbium sensitized Erbium-doped fiber amplifier”. *Optik-International Journal for Light and Electron*, Elsevier, Science, Germany, vol. 122, pp 1783-1786, 2011.
- [5] http://imedea.uibcsic.es/~salvador/docencia/coms_optiques/addicional/ibm/ch05/05-06.html
- [6] Bentahar attaouia, Kandouci Malika, “ Performance I mprovement by Pre-Amplifying with Erbium, Ytterbium Doped Devices Link Extenders of Fiber to the Home”, *International.Journal of Information, Engineering and Electronic Business*, 2016, 4, 26-34, Volume 8, Issue 4, MECS <http://www.mecspress.org>. 2016.
- [7] Sun Hyok Chang, Hee Sang Chung, Hyun Jae Lee, and Kwangjoon Kim, “Suppression of Transient Phenomena in Hybrid Raman/EDF Amplifier”. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 5, pp 1004-1006, 2005.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Les travaux menés dans cette thèse ont eu comme principaux objectifs, d'une part , d'améliorer les performances d'un système de transmission à fibre optique et d'autre part , de proposer des solutions adaptatives. Ces travaux ont été réalisés au sein du Laboratoire d'Electromagnétisme, de Photonique et d'Optronique (LEPO) domicilié à l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes.

Afin de cibler l'objectif des travaux réalisés, nous avons commencé par une étude des briques d'un système de transmission à fibre optique à savoir : les émetteurs, modulateurs optiques, la fibre optique, les amplificateurs optiques et les détecteurs, ainsi que les différentes limitations rencontrées le long de la propagation du signal. Cette étude nous a permis de maîtriser le calcul théorique d'un tel système et de simplifier sa conception qui devient de plus en plus complexe avec l'apparition de nouveaux composants et donc de nouveaux paramètres influents sur les performances de la liaison. Cette étude a contribué à confirmer l'efficacité d'un amplificateur optique à fibre dopée Ytterbium (EYDWA) dans la perspective de son emplacement sur un réseau d'accès optique passif GPON étendu (Gigabit Passive Optical Network) afin d'augmenter le nombre d'abonnés bénéficiant de tous les services que peut offrir ce réseau. Les travaux de simulations reposent sur l'étude et l'analyse d'un GPON en mode TDM (Time Division Multiplexing) afin de vérifier ses capacités en termes de bande passante et distance.

Pour le deuxième chapitre , nous nous intéressés au réseau d'accès optique et son évolution en décrivant le type de réseau d'accès et ses topologies telles que la FTTH (la fibre jusqu'à la maison). On a utilisé le réseau d'accès optique à 2,5Gbit/s de débit, avec une bande passante de 100Mbit/s pour un nombre maximum de 64 abonnés pour une portée de 25 km. Parmi les candidats à base d'amplification optique, l'amplificateur optique à fibre dopée Ytterbium apparait comme la solution la plus adaptée à nos objectifs. Il permet l'amélioration de la qualité du GPON et présente des avantages en termes de débit et une bonne adaptation avec un multiplexage en longueur d'onde.

Le troisième chapitre a été consacré à l'étude détaillée de l'amplificateur optique, à savoir : l'émission spontanée et l'émission stimulée sur laquelle est basé le principe d'amplificateur optique d'un système. Le principe de fonctionnement de l'EYDWA, ses caractéristiques telles que le gain et le facteur de bruit, ainsi que son emplacement dans différentes positions dans le GPON dans une fibre à silicate ont été largement relatés et commentés.

Le quatrième chapitre a été réservé aux différentes simulations de l'amplificateur à fibre optique dopée à l'Ytterbium (Yb). Les premières simulations ont été menées dans le but de fixer les paramètres essentiels tels que la longueur de la fibre dopée la concentration et la puissance de la pompe, paramètres nécessaires à l'optimisation du gain de l'amplificateur. Notre objectif était d'étendre le réseau GPON au maximum possible.

Les résultats de simulation trouvés montrent la qualité des performances du GPON amplifié avec la configuration post-amplificateur en termes de facteur de qualité et de diagrammes de l'œil et ceci en fonction des paramètres opto-géométriques optimisés caractérisant l'EYDWA. Toutes les simulations ont été faites en fonction des paramètres tels que le débit de transmission, les formats de modulation et les types de photolectures afin d'obtenir un meilleur facteur de qualité ainsi que le diagramme de l'œil.

Enfin, pour toutes les simulations effectuées à différentes positions de l'EYDWA dans le système GPON (post-, pré- et en ligne amplification), il y a eu comparaison. Nous avons remarqué que la configuration en post amplificateur pour les transmissions au-delà de 200 km est la meilleure en termes de distance parcourue, suivie par l'amplificateur au milieu et position boostée, respectivement. Nous pourrions utiliser une post-amplification pour des configurations particulières et des distances inférieures à 100km.