
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Faculté du Génie Electrique
Département d'Electronique



THÈSE

Présentée pour obtenir le Diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Option:

Signaux et systèmes de communications

par

Attaouia BENTAHAR

**Étude et évaluation de la contribution de l'amplification optique dans
l'amélioration des performances d'un système de communication optique**

Soutenue le 06/04/2017

Devant le jury composé de:

Président: Pr.ABID Hamza	Université Djillali Liabés de Sidi Bel-abbés
Encadreure : Pr. KANDOUCI Malika	Université Djillali Liabés de Sidi Bel-Abbés
Examineur: Pr.SEDDIKI Omar	Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen
Examineur: Pr. SAHNOUN Mohammed	Université de Mascara

Année 2017



Remerciements

J'exprime toute ma reconnaissance et ma gratitude à madame Malika KANDOUCI, professeure à l'université Djillali Liabés de Sidi Bel-abbés, qui a bien voulu m'accueillir au sein de l'équipe « signaux et systèmes de communication » et m'a proposé ce sujet. Je tiens à la remercier tout particulièrement pour son aide efficace, ses conseils judicieux, sa disponibilité et tout l'intérêt qu'elle a porté à l'aboutissement de ce travail.

Monsieur Hamza ABID, Professeur à l'université Djillali Liabés de Sidi Bel-abbés a bien voulu juger ce travail et me faire l'honneur de présider le jury. Je lui exprime toute ma gratitude.

Monsieur Omar SEDDIKI, Professeur à l'université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, a accepté de faire partie de ce jury de thèse, je le remercie vivement.

Monsieur Mohammed SAHNOUN, Professeur à l'université de Mascara, a bien voulu participer à ce jury de thèse, je le remercie chaleureusement.

Je remercie également le réseau NOUR 21 et à sa tête Monsieur le Professeur Azzeddine BOUDRIOUA pour l'aide efficace en équipements informatiques.

Enfin, j'exprime toute ma sympathie à tous les membres de notre équipe au centre de recherches.

Résumé

L'amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium demeure actuellement un élément important dans l'amélioration des performances d'un système à transmission à fibre optique. Il est inséré dans la ligne dans le but de contrer les pertes en régénérant les signaux dans la bande spectrale allant de 1530 à 1565 nm appelée bande C (dans la norme recommandée par l'Union Internationale des Télécommunications). L'intérêt de cette plage réside dans le fait qu'elle correspond au minimum d'atténuation des fibres utilisées. L'objectif principal de cette étude est de montrer l'efficacité d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium EDFA en vue de sa faisabilité et son déploiement sur un réseau d'accès optique passif de norme GPON (Gigabit Passive Optical Network) étendu qui permettrait d'augmenter le nombre d'utilisateurs à bénéficier de tous les avantages que peut leur offrir un tel réseau).

Dans ce contexte les travaux de simulations consistaient à étudier et analyser ce GPON amplifié (avec l'utilisation de l'EDFA à différentes positions de la liaison) en mode TDM (Time Division Multiplexing) afin de constater ses capacités vis-à-vis des exigences en bande passante et en distance. Ce réseau est orienté vers l'accès au service triple play (voix, données et vidéo). La partie simulation de ce mémoire de thèse fait appel au logiciel système qui nous donne la possibilité de concevoir des chaînes comparables à celles existantes dans la « réalité », avec visualisation des performances en termes de gain, du facteur de qualité, du facteur de bruit et du diagramme de l'œil.

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

Abstract

The fiber optical amplifier doped with erbium currently remains an important element in improving the performance of an optical fiber transmission system. It 's inserted in to the line in order to counter the loss by regenerating the signals in the spectral band from 1530 to 1565 nm band called C (the standard recommended by the International Telecommunications Union). The value of this range lies in the fact that it corresponds with the minimum attenuation of the used fibers. The main objective of this study is to demonstrate the effectiveness of an optical fiber amplifier EDFA erbium doped for feasibility and deployment of a passive optical access network (Gigabit Passive Optical Network) GPON extended which would increase the number of users to benefit from all the advantages that can offer such a network). In this context the simulation work is to study and analyze this amplified GPON (with the use of EDFA in different positions) in TDM fashion (Time Division Multiplexing) to see his vis-à-vis band capacity requirements bandwidth and distance. This network oriented access to triple play service (voice, data and video). The simulation part of this thesis uses the software system that gives us the opportunity to design comparable to those channels existing in "reality", with visualization performances in terms of the gain, quality factor, noise factor and the eye diagram.

Keywords: Optical fiber, Optical amplifier, EDFA, Optical access network, GPON, Gain, Quality Factor, Noise Factor, Eye Diagram.

ملخص

يبقى مكبر للصوت الألياف البصرية مخدر مع الإرييوم حاليا عنصرا هاما في تحسين أداء نظام انتقال الألياف البصرية. يتم (المعيار C إدراجها في خط لمواجهة الخسائر عن طريق تجديد الإشارات في النطاق الطيفي 1530-1565 نانومتر يسمى الموصى به من قبل الاتحاد الدولي للاتصالات). قيمة هذا النطاق تكمن في حقيقة أنه يتوافق مع الحد الأدنى للتخفيف من الإرييوم **EDFA** الألياف المستخدمة. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إثبات فعالية من الألياف الضوئية مكبر للصوت تمديد التي من شأنها زيادة عدد **GPON** مخدر لجوى ونشر شبكة النفاذ الضوئية السلبية (جيجابت سلبية الشبكة البصرية) المستخدمين من الاستفادة من جميع المزايا التي يمكن أن تقدم مثل هذه الشبكة). في هذا السياق تضمنت محاكاة لعمل دراسة الأزياء (الوقت بالتقسيم) لنرى له **TDM** في المواقف المختلفة) في **EDFA** تضخيم (مع استخدام **GPON** وتحليل هذه وجها لوجه متطلبات القدرة الفرقة عرض النطاق الترددي والمسافة. هذه الشبكة الموجهة الوصول إلى خدمة التشغيل الثلاثي الجزء محاكاة لهذه الأطروحة يستخدم البرنامج نظام يعطينا القدرة على تصميم سلاسل مشابهة. ((الصوت والبيانات والفيديو لتلك الموجودة في الواقع، مع التصور من الأداء من حيث الربح، عامل الجودة، وعامل الضوضاء و الرسم البياني للعين

كلمات البحث : الألياف البصرية، والتضخيم البصري ،

، كسب، عامل الجودة، الضوضاء، مخطط العين **GPON**، شبكات النفاذ، **EDFA**



TABLE DES MATIERES



Remerciements	
Résumé	
Table de matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Glossaire	
Introduction générale.....	page 1

Chapitre I : Généralités sur la télécommunication par fibre optique

I.1. Introduction	page 4
I.2. Les réseaux de télécommunications	page 5
I.3. Hiérarchie des réseaux de télécommunication	page 5
I.3.1 Réseau longue distance	page 5
I.3.2 Réseau métropolitain.....	page 6
I.3.3 Réseau d'accès.....	page 6
I.4. Intérêts de la fibre optiques.....	page 6
I.5. Présentation générale des fibres.....	page 6
I.5.1. Indice de réfraction.....	page 7
I.5.2. Loi de Descartes.	page 7
I.5.3. Principe de guidage de la lumière.....	page 8
I.5.4. Angle d'acceptance et ouverture numérique.....	page 9
a. Mode de propagation...:	Page 9
I.5.5. Fibre multimode.....	page 10
a. Fibre multimode à saut d'indice.....	page 10
b. Fibre multimode à gradient d'indice.....	page 10
I.6. Du multimode au monomode	page 11
I.6.1. Fibres optiques monomodes.....	page 11
I.6.2 . Types de fibres optiques monomodes.....	page 12
I.7. Fenêtres de transmission.....	page 13
I.8. Limitations de la propagation dans une fibre optique.....	page 13
I.8.1. L'atténuation.....	page 14
a. L'atténuation dans la fibre optique monomode.....	page 14
b. Amplification optique.....	page 15

I.8.2. La dispersion.....	page 16
a. La dispersion chromatique.....	page 16
b. La dispersion dans la fibre optique monomode.....	page 17
c. Compensation de la dispersion chromatique.....	page 18
I.8.3. Les effets non linéaires.....	page 18
a. Effet Kerr.....	page 19
b. Diffusion stimulée.....	page 19
I.9. Principe de transmission par la fibre optique.....	page 20
I.9.1. L'émetteur optique.....	page 20
a. Principe de fonctionnement d'un laser	page 21
b. Bruit d'un laser	page 21
c. Laser à semi conducteur	page 22
I.9.2. Modulation.....	page 25
a. Modulation directe	page 25
b. Modulation externe	page 26
c. Les formats de modulation... ..	page 27
I.9.3. Le récepteur.....	page 28
a. Principe de la photo détection	page 29
b. Paramètres d'une photodiode... ..	page 29
c. Photodiode PIN.....	page 31
d. Photodiode APD.....	page 31
I.10. Capacité de transmission d'une fibre optique.....	page 32
I.10.1. Les techniques de multiplexage en optique	page 32
a. Multiplexage temporel.....	page 32
b. Multiplexage en longueur d'onde	page 33
I.11. Conclusion.....	page 34
Références bibliographiques.....	page 35

Chapitre II : Réseaux d'accès optiques

II.1. Introduction.....	page 37
II.2. Réseaux d'accès optique.....	page 38
II.3. La technologie FTTH.....	page 39

II.4. Déploiement de la technologie FTTH	page 40
II.5. Description des réseaux optiques passifs PON.....	page 41
II.6. Standardisations du PON.....	page 42
II.7. Le réseau GPON	page 43
II.7.1. Les composants d'un réseau GPON.....	page 44
a. Terminal de liaison optique.....	page 44
b. Terminal de réseau optique.....	page 44
c. Coupleur optique passif « splitter ».....	page 45
II.7.2. Modes de transmission d'un réseau GPON.....	page 45
a. <u>Sens descendant « Downstream : l'OLT vers l'ONU »</u>	page 46
b. <u>Sens montant « Upstream : l'ONU vers l'OLT »</u>	page 46
II.7.3. Caractéristiques d'un réseau GPON.....	page 47
II.7.4. Avantages et limites d'un réseau GPON.....	page 47
II.8. Classes de la norme GPON.....	page 48
II.9. Limitations du budget optique d'un réseau GPON.....	page 49
II.10. Extension de la portée des réseaux GPON.....	page 50
II.11. Amplificateurs optiques pour les réseaux d'accès.....	page 50
II.12. Evolution des réseaux PON ou Les futurs réseaux.....	page 51
II.12.1. Le standard NG-PON1.	page 52
II.12.2. Le standard NG-PON1.....	page 53
II.13. Le multiplexage dans le réseau PON.....	page 53
II.13.1. PON avec multiplexage en longueur d'onde WDM/PON.....	page 54
II.13.2. PON avec multiplexage hybride WDM/TDM-PON.....	page 55
II.14. Conclusion.....	page 56
Références bibliographiques.....	page 57

Chapitre III : L'amplificateur optique à fibre dopée Erbium « EDFA »

III .1. Introduction.....	page 60
III .2. Intérêt de l'amplification optique	page 60
III .3. Principe physique d'un amplificateur optique.....	page 61
III .3.1. L'absorption.....	page 61
III .3.2 L'émission stimulée et spontanée.....	page 62
III .3.3. L'inversion de population.....	page 62

III. 3.4. L'amplification optique.....	page 63
III.4. Caractéristique de l'erbium dans la silice.....	page 63
III.4.1 Intérêt de l'Erbium.....	page 64
III.4.2. Sections efficaces d'absorption et d'émission	page 65
III.4.3 Élargissement spectral des transitions électroniques.....	page 66
a. Elargissement spectral homogène.....	page 66
b. Elargissement spectral inhomogène.....	page 66
III .5. Amplificateur à fibre dopée Erbium « EDFA ».....	page 68
III .5. 1. Structure de l'EDFA.....	page 68
III .5. 2. Le pompage optique.....	page 69
III .6. Principe de l'amplificateur à fibre dopée Erbium	page 70
III .6. 1. Modélisation d'un amplificateur à fibre dopée Erbium.....	page 72
III.7. Propagation du pompage et du signal dans la fibre dopée.....	page 73
III .8. Caractéristiques de l'amplificateur à fibre dopée Erbium.....	page 76
III.8.1. Le gain optique	page 76
III.8.2. L'émission spontanée amplifiée (ESA).....	page 77
III.8.3. Le facteur de bruit θ	page.78
III.8.4. Type de la fibre amplificatrice.....	page 79
III.8.5. La puissance de saturation.....	page 80
III.8.6. La bande passante.....	page 81
III.8.7. La platitude du gain.....	page 82
III.8.8. Le rendement d'un EDFA.....	page 82
III .9. Applications de l'amplificateur à fibre dopée Erbium.....	page 83
III.9.1. Le post- amplificateur optique EDFA.....	page 83
III.9.2. L'amplificateur optique de ligne EDFA.....	page 84
III.9.3. Le pré- amplificateur optique EDFA.....	page 84
III .10. Conclusion	page 85
Références bibliographiques... ..	page 86

Chapitre IV : Simulations et résultats

IV.1. Introduction.....	page 88
IV.2. Critères d'évaluations des performances de transmission.....	page 88
IV.2.1. Facteur de qualité.....	page 89

IV.2.2. Diagramme de l'œil.....	page 89
IV.2.3. Taux d'erreur binaire.....	page 89
IV .3 Présentation de l'amplificateur à fibre dopée à l'Erbium.....	page 90
IV. 4 Optimisation du gain et du facteur de bruit de l'EDFA.....	page 91
IV.4.1. L'influence de la puissance d'entrée.....	page 91
IV.4.2. L'influence du rayon du cœur de la fibre dopée.....	page 91
IV.4.3. L'influence de la puissance de pompe.....	page 93
IV.4.4. L'influence de la longueur d'onde de pompe.....	page 93
IV.4.5. L'influence de la configuration de pompage.....	page 94
IV. 5 Modélisation de la fibre dopée erbium.....	page 95
IV.5.1. Longueur optimale de la fibre dopée.....	page 95
IV.5.2. La concentration d'ions erbium dans la fibre dopée.....	page 97
IV. 6 Optimisation du gain et du facteur de bruit pour un système WDM ..	page101
IV.6.1. Description du système simulé.....	page 101
IV.6.2. Optimisation de la platitude du gain en fonction de la concentration et de la longueur de la fibre dopée.....	page 103
IV. 7 Introduction de l'EDFA dans le réseau optique GPON.....	page 105
IV.7.1 Schéma bloc de la liaison simulée.....	page 106
IV.7.2 Optimisation du choix de paramètres opto-géométriques de l'EDFA	page 109
a. Le choix de la longueur optimale de la fibre dopée.....	page 109
b. Le choix de la concentration d'Erbium.....	page 111
c. Le choix de la longueur d'onde de pompage.....	page 113
IV.8. Optimisation du GPON avec l'EDFA en position de pré- amplification	page 116
IV.8.1. L'influence du format de modulation et du nombre d'utilisateurs	page117
IV.8.2 L'influence du type de modulation.....	page 119
IV.8.3 L'influence de débit binaire.....	page 120
IV.8.4 L'influence de type de la photodiode.....	page 122
IV.9. Comparaison du GPON selon la position de l'EDFA.....	page 125
IV.9.1 L'impact de la longueur de la fibre avant et après l'EDFA de ligne	page 125

IV.9.2. Comparaison en fonction de la longueur de la fibre de transmission	page 128
IV.9.3. Comparaison en fonction de la puissance d'entrée.....	page 131
IV.9.4. Comparaison en fonction de la perte de splitte.....	page 133
IV.10. Conclusion.....	0page 135
Références bibliographiques	page 137
Conclusion générale	page 138
Annexe : chapitre I	page 140
Annexe : chapitre II	page 142



LISTES DES FIGURES



Chapitre I :

Figure (I.1): Les réseaux de télécommunications.....	05
Figure(I.2): La structure d'une fibre optique standard	07
Figure (I.3) : Loi de Descartes.....	08
Figure (I.4) : Le principe de guidage dans une fibre optique	08
Figure (I.5): Types de fibre optique multimode.....	11
Figure (I.6) : Trajet du signal dans une fibre monomode, b) Fibre optique monomode	12
Figure (I.7) : Affaiblissement d'une impulsion le long d'une fibre	14
Figure (I.8) : Courbe d'atténuation spectrale d'une fibre en silice.....	15
Figure (I.9) : Dispersion d'une impulsion le long d'une fibre	16
Figure (I.10) : Courbe de dispersion pour quelques types de fibres monomode	18
Figure (I.11) : Synoptique générale d'un système de communication par fibre optique	20
Figure (I.12) : Schéma de principe d'un laser à semi-conducteur.....	21
Figure (I.13) : Laser Fabry Pérot : a)- Structure, b)- spectre d'émission.....	23
Figure (I.14) : a- Présentation d'un laser DFB et d'un laser DBR, b- spectre d'émission	23
Figure (I.15) : Diode laser à émission par la surface et à cavité verticale.....	24
Figure (I.16) : Schéma simplifié d'une modulation directe de donnée.....	26
Figure (I.17) : Schéma synoptique de la modulation externe.	26
Figure (I.18) : Schéma synoptique du format de modulation NRZ et RZ	28
Figure (I.19) : Schéma synoptique du module de réception	28
Figure (I.20) : Schéma synoptique d'une photodiode PIN, et d'une photodiode APD.....	31
Figure (I.21) : Schéma synoptique du multiplexage TDM pour deux séquences binaires.	33
Figure (I.22) : Schéma synoptique du multiplexage WDM.....	33

Chapitre II:

Figure (II.1) : Schématisation d'architecture d'un réseau d'accès.....	37
Figure (II.2): Technologie de la FTTX.....	39

Figure (II.3) : Différentes architectures de la technologie FTTH.....	40
Figure (II.4) : Schéma simplifié d'un réseau d'accès optique point à multipoint.....	41
Figure (II.5) : Topologies de base: (a) arbre; (b) bus; (c) anneau	42
Figure (II.6) : Architecture du réseau d'accès GPON.....	43
Figure (II.7) : Principe de fonctionnement de l'architecture G-PON.....	45
Figure (II.8) : Principe de fonctionnement de G-PON (sens descendant	46
Figure (II.9) : Principe de fonctionnement de G-PON (sens montant).....	47
Figure (II.10) : Schéma justifiant le budget du G-PON de classe B+.....	49
Figure (II.11) : Principe de fonctionnement de G-PON intégrant un Reach Extender (sens descendant).....	50
Figure(II.12) : Principe de fonctionnement de G-PON amplifié (sens descendant).....	51
Figure (II.13) : Nouvelles normes G-PON	52
Figure (II.14) : Principe de fonctionnement de l'architecture WDM-PON.....	55
Figure (II.15) : Principe de fonctionnement de l'architecture WDM/TDM-PON.....	55

Chapitre III

Figure (III.1) : Utilisation du multiplexage en longueur d'onde couplé avec l'amplification optique	60
Figure (III.2): Principe de l'amplificateur optique.....	60
Figure (III.3) : Mécanisme d'interaction entre un atome et un photon.....	62
Figure (III.4) : Principe de l'amplificateur optique.....	63
Figure(III.5) : Longueurs d'onde d'émission obtenues avec différents ions de terre rare.....	64
Figure (III.6) : Niveaux d'énergie (dans la silice).....	65
Figure (III.7) : Spectre des sections efficaces de l'erbium dans une matrice en verre de silice....	65
Figure (III.8) : Représentation en deux dimensions de la répartition des ions Erbium dans une matrice de silice	67
Figure (III.9) : Spectres des puissances de sortie à 1530 nm pour différentes puissances d'entrées : - 60 , - 40 , -20 , -10 , -5 , et 0 dBm : (a) cas d'élargissement homogène, (b) cas d'élargissement inhomogène.....	68
Figure (III.10) : Schéma d'un amplificateur optique à fibre dopée Erbium	69
Figure (III.11) : Différents types de pompage (1)- pompage co-propagatif, (2) pompage contra- propagatif, (3) pompage bidirectionnel.	70
Figure (III.12) : Principe de fonctionnement d'un amplificateur	71
Figure (III.13) : Différentes bandes associées à chaque terre rare	71
Figure (III.14) : Niveaux d'énergie mis en jeu pour un pompage : (a) 980 nm, (b) 1480nm dans le cas de l'ion Erbium.....	73

Figure (III.15) : Principe de l'amplification	74
Figure (III.16) : Spectre de gain en fonction de la longueur d'onde	77
Figure (III.17) : Spectre de puissance de l'ESA et spectre du gain en fonction de la longueur d'onde	79
Figure (III.18) : Variation du gain en fonction de la longueur d'onde pour deux types de la fibre amplificatrice	79
Figure (III.19) : Variation du gain en fonction de la puissance d'entrée	80
Figure (III.20) : Les bandes spectrales d'amplification de l'EDFA	81
Figure (III.21) : Rendements maximaux de pompage des amplificateurs optiques pour différentes longueurs d'onde de pompe	83
Figure (III.22) : Amplificateur optique à l'émission (Booster)	83
Figure (III.23) : Amplificateur optique en ligne	84
Figure (III.24) : Amplificateur optique à la réception (préamplificateur)	84

Chapitre IV

Figure (IV.1) : Schéma synoptique de l'amplificateur EDFA	90
Figure (IV.2) : Variation du gain (a) et du facteur de bruit (b) en fonction de la longueur d'onde du signal d'entrée, pour les puissances P_{in} = -30 dBm à 5dBm	91
Figure (IV.3) : Variation du gain (a) et du facteur de bruit (b) en fonction de la longueur d'onde du signal d'entrée, pour R = 1μm à 8μm	92
Figure (IV.4) : Variation du gain (a) et du facteur de bruit (b) en fonction de la puissance du signal d'entrée pour R = 1μm à 8μm	92
Figure (IV.5) : Variation du gain (a) et du facteur de bruit (b) en fonction de la longueur d'onde pour différentes puissances de pompe	93
Figure (IV.6) : Variation du gain (a) et du facteur de bruit (b) en fonction de la longueur d'onde pour deux longueurs d'onde de pompage (980 nm et 1480 nm)	94
Figure (IV.7) : Variation du gain (a) et du facteur de bruit (b) en fonction de différents types de pompage pour la fibre dopée (λ=980nm)	95
Figure (IV.8) : Variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la longueur d'onde pour la fibre dopée pompée à λ=980 nm	96
Figure (IV.9) : Variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la puissance d'entrée pour la fibre pompée à λ=980 nm	96
Figure (IV.10) : Variation du gain et facteur de bruit en fonction de la longueur de la fibre à λ=1530 nm et pour deux longueurs d'onde de pompage de la fibre amplificatrice (λ=980 nm et 1480 nm)	97

Figure (IV.11) : Variation du gain et facteur de bruit en fonction de la longueur de la fibre à $\lambda=1550$ nm et pour deux longueurs d'onde de pompage de la fibre amplificatrice ($\lambda=980$ nm et 1480 nm).....	97
Figure (IV.12) : Variation du gain (a) et du facteur de bruit (b) en fonction de la longueur d'onde pour différentes concentrations d'ions erbium.....	98
Figure (IV.13) : Variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la longueur de la fibre dopée à l'erbium pour différentes concentrations d'ions Erbium.....	99
Figure (IV.14) : Zoom de variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la longueur de la fibre dopée à l'erbium pour différentes concentrations d'ions erbium.....	99
Figure (IV.15) : Variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la concentration d'ions erbium de pompe pour différents cas de transfert d'énergies HUC et PIQ.....	100
Figure (IV.16) : Variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la puissance de pompe pour différents cas de transfert d'énergies HUC et PIQ.....	100
Figure (IV.17) : Schéma de principe d'un EDFA utilisant une entrée multi-longueurs d'onde.....	102
Figure (IV.18) : Spectre de puissance d'un système WDM de 8 longueurs d'onde (a) à l'entrée de l'EDFA (b) et en sortie de l'EDFA	102
Figure (IV.19) : Variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la longueur d'onde pour différentes puissances de signal d'entrée.....	103
Figure (IV.20) : Spectre de puissance et spectre de bruit en sortie de l'EDFA pour différentes valeurs de la concentration et de la longueur de la fibre dopée à l'erbium.....	104
Figure (IV.21) : Différents placements de l'EDFA dans un réseau GPON.....	106
Figure (IV.22) : Schéma synoptique de la liaison GPON avec amplificateur EDFA en position "booster".....	107
Figure (IV.23) : Allure des signaux avant et après l'amplification pour une liaison de longueur $L=10$ et 60 Km.....	108
Figure (IV.24) : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la distance de transmission du GPON sans et avec un EDFA en position " booster".....	108
Figure (IV.25) : Diagramme de l'œil d'une liaison (a) avec et (b) sans l'amplificateur optique EDFA.....	109
Figure (IV.26) : Variation du gain et du facteur de bruit NF en fonction de la longueur de la fibre dopée pour trois puissances de signal d'entrée.....	110
Figure (IV.27) : Variation du facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre dopée pour trois puissances de signal d'entrée.....	111
Figure (IV.28) : Diagrammes de l'œil à $P_{in}=10$ dBm pour trois longueurs de la fibre dopée : (a) $L=14$ m, (b) $L=7$ m, (c) $L=4$ m.....	111

Figure (IV.29) : Variation du gain et du facteur de bruit NF en fonction de la concentration de la fibre dopée pour trois puissances de signal d'entrée.....	112
Figure (IV.30) : Variation du facteur de qualité en fonction de la concentration de la fibre dopée pour trois puissances de signal d'entrée	112
Figure (IV.31) : Diagrammes de l'œil à $P_{in} = 10$ dBm pour trois concentrations de la fibre dopée.....	113
Figure (IV.32) : Variation du gain et du facteur de bruit NF en fonction de la puissance d'entrée pour $\lambda_P = 980$ et $\lambda_P = 1480$ nm	113
Figure (IV.33) : Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance d'entrée : $\lambda_P = 980$ nm et $\lambda_P = 1480$ nm.....	114
Figure (IV.34) : Diagrammes de l'œil pour les longueurs d'onde de pompage : $\lambda_P = 980$ nm, $\lambda_P = 1480$ nm.....	114
Figure (IV.35) : Les facteurs de qualité Q obtenus en post-amplification en fonction de la puissance d'entrée après 60, 65 et 70 km de distance de transmission	115
Figure (IV.36) : Diagrammes de l'œil obtenus en post-amplification après 60, 65 et 70 Km de longueur de fibre optique, respectivement.....	116
Figure (IV.37) : Schéma synoptique de la liaison GPON avec l'EDFA en préamplificateur.....	116
Figure (IV.38) : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la puissance d'entrée pour trois longueurs de fibre optique	117
Figure (IV.39) : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la longueur de la fibre optique pour les formats de modulation NRZ et RZ , et pour différents nombres d'utilisateurs.....	118
Figure (IV.40) : Diagrammes de l'œil pour différents nombres d'utilisateurs pour le format de modulation NRZ et RZ.....	119
Figure (IV.41) Variation du facteur de qualité Q en fonction de la longueur de transmission pour la modulation directe (DM) et la modulation externe (EM).....	119
Figure (IV.42) Variation de la puissance reçue en fonction de la longueur de transmission pour la modulation directe (DM) et la modulation externe (EM).....	120
Figure (IV.43) : Diagrammes de l'œil : a)- La modulation directe (DM), b)- La modulation externe (EM).....	120
Figure (IV.44) : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la longueur de transmission pour trois débits binaires	121
Figure (IV.45) : Variation de la puissance reçue en fonction de la longueur de transmission pour trois débits binaires.....	121
Figure (IV.46) : Variation de Min log de TEB en fonction de la longueur de transmission pour trois débits binaires.....	122
Figure (IV.47) : Diagrammes de l'œil : D = 2.5 Gbits/s, D = 5 Gbits/s .c). D = 10 Gbits/s ...	122

Figure (IV.48) : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la longueur de transmission pour la photodiode PIN et la photodiode APD.....	123
Figure (IV.49) : Variation de la puissance reçue en fonction de la longueur de la fibre pour la photodiode PIN et la photodiode APD.....	123
Figure (IV.50) : Diagrammes de l'œil à 80 Km : a)- photodiode PIN,b)- photodiode APD	124
Figure (IV.51) : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la sensibilité S pour la photodiode APD et la photodiode PIN.....	124
Figure (IV.52) : Diagrammes de l'œil à la sensibilité 0.9 A/W : a)- photodiode PIN, b)- photodiode APD.....	125
Figure (IV.53) : Architecture du réseau GPON avec amplificateur EDFA en ligne	126
Figure (IV.54) : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la puissance d'entrée pour les trois cas de l'amplification de ligne.....	127
Figure (IV.55) : Diagrammes de l'œil à 10 dBm de puissance de signal d'entrée pour les trois cas de l'amplification de ligne.....	127
Figure (IV.56) : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la puissance d'entrée pour les trois longueurs de l'amplification de ligne 80, 90 et 100.....	128
Figure (IV.57) : Diagrammes de l'œil à 10 dBm de puissance de signal d'entrée pour les trois longueurs de l'amplification de ligne 80, 90 et 100 km.....	128
Figure (IV.58) : Variation du facteur du qualité en fonction de la longueur de la fibre de transmission pour les trois configurations a) pré-, post et l'amplification de ligne.....	129
Figure (IV.59) : Diagrammes de l'œil en 10 dBm en fonction de la puissance de signal d'entrée pour les trois configurations	130
Figure (IV.60) : La superposition de diagrammes de l'œil à différentes puissances de signal d'entrée pour les trois configurations	130
Figure (IV.61) : Graphiques en 3D du TEB en fonction de la longueur de la fibre pour les trois configurations.....	130
Figure (IV.62) : Variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la puissance d'entrée pour les trois configurations.....	132
Figure (IV.63) : Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance d'entrée pour les trois configurations.....	132
Figure (IV.64) : Diagrammes de l'œil en 10 dBm de puissance de signal d'entrée pour les trois configurations	132
Figure (IV.65) : La superposition de diagrammes de l'œil pour différentes puissances de signal d'entrée pour les trois configurations.....	133

Figure (IV.66) : Graphiques en 3D du TEB en fonction en fonction la puissance du signal d'entrée à 80 Km de distance pour (a) en ligne amplification (b) pré- amplification et (c) post – amplification.....133

Figure (IV.67) : La variation du facteur de qualité en fonction des pertes de splitter pour les trois configurations a) pré- , b)post et c) en ligne amplification.....134


Figure (IV.68) : Diagrammes de l'œil à 10 dBm de puissance de signal d'entrée pour les trois configurations a) pré- , b) post et c) en ligne amplification à 19 dB de perte de splitte.....134





INTRODUCTION GENERALE






Depuis quelques années, le développement des systèmes de télécommunications a rendu indispensable l'utilisation des transmissions optiques par rapport aux moyens de transmissions électriques. Les technologies optiques se sont imposées grâce à leurs capacités à transporter des données à haut débit. L'introduction de l'optique dans les systèmes de communication est progressive depuis les années 1970, cette révolution est le fruit de recherches technologiques menées sur les fibres optiques, puis sur les composants d'extrémités assurant la transformation des signaux électroniques en signaux optiques et vice-versa. La fibre optique s'est imposée dans les réseaux à grande distance et grande capacité. Elle joue aussi un rôle croissant, partagé avec d'autres techniques, dans le domaine des réseaux d'accès, pour le raccordement des clients des opérateurs. Par rapport au câble de cuivre, dont les possibilités ont pourtant été augmentées de manière extraordinaire par l'ADSL, elles offrent la possibilité de débits encore plus importants et donc d'accès Internet à bande de plus en plus large.

Mais les performances de la télécommunication optique restent entravées par des effets pénalisants parmi lesquels on peut citer entre autres les effets non linéaires, et les effets de la dispersion chromatique. Cette dernière devient pénalisante, particulièrement dans le cas du haut débit. Elle limite énormément la distance de transmission. Pour lutter contre l'atténuation de la puissance, il est donc important d'utiliser une amplification optique de façon à limiter les effets nuisibles sur les transmissions à grandes distances.

La venue des amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA) fut une force majeure dans le développement des réseaux de communications optiques à multiplexage de longueurs d'onde opérant dans la bande C (1530 nm – 1565 nm). De nos jours les EDFA sont utilisés dans tous les réseaux de transmission longue distance. Plusieurs facteurs font de l'erbium un élément de prédilection pour les communications optiques. Ses propriétés naturelles d'amplification autour d'une longueur d'onde de 1550 nm en font un candidat de choix pour être combiné avec les fibres en silice qui possèdent une fenêtre spectrale de faibles pertes autour de 1550nm. Ces amplificateurs sont des composants clefs des réseaux de télécommunication par fibres optiques. Ils sont utilisés pour ré-amplifier le signal optique qui peut alors parcourir des distances transocéaniques. Le véritable essor des télécommunications optiques a été permis par la mise au point et l'installation des amplificateurs à fibre optique dopée Erbium (EDFA) à la fin des années 80.



Pour les réseaux d'accès passifs PON (Passive Optical Network), des études sont menées activement concernant l'extension de la portée du PON. Les deux moyens de base pour mettre en œuvre la boîte d'extension sont l'implémentation d'un nœud distant d'amplification optique et / ou une régénération optique-électrique-optique (OEO). Les longueurs d'onde peuvent être amplifiées pour compenser les pertes dues à la longue distance de transmission des fibres ou /et les pertes passives élevées (pertes du coupleur, du multiplexeur, ..etc...). Les EDFA se révèlent très intéressants par leur bande d'amplification qui se situe autour de 1560 nm, en termes de facteur de bruit qui est de l'ordre de 5dB, ce qui promet une transmission à un bon taux d'erreur binaire (TEB) pour un fort gain (G de l'ordre de 35dB à 45dB). L'inconvénient de l'introduction des EDFA dans un réseau PON reste le coût du système par rapport à une solution avec des SOA.

C'est dans ce contexte que s'inscrivent les travaux présentés dans ce mémoire de thèse. Ces travaux ont pour objectif principal la caractérisation et la simulation de l'amplificateur optique à fibre dopée Erbium, à l'aide d'un logiciel système, et de fournir un aperçu sur le choix adéquat de paramètres caractérisant l'EDFA afin d'optimiser la puissance amplifiée reçue et par conséquent les performances de la liaison optique simulée.

Cette thèse s'articule en quatre chapitres :

- ✓ Le premier chapitre fait l'objet d'une introduction au monde des télécommunications optiques ; nous décrivons le principe des télécommunications optiques, leurs intérêts, les principes de transmission par fibre optique et ses limitations en termes de débits ainsi que les différentes techniques de transmission. Nous parlerons aussi de l'amplification optique, de ses avantages et ce que cette technologie procure en association avec le multiplexage en longueur d'onde.
 - ✓ Le deuxième chapitre dans ce mémoire de thèse porte sur la caractérisation et la description générale du réseau d'accès avec un rappel des différentes terminologies et architectures concernant les réseaux d'accès en cuivre et optique. Un résumé des différentes caractéristiques de la technologie PON est présent rappelant les spécifications et les différentes normes. Un aperçu des futures architectures PON est abordé en caractérisant en détails la technologie GPON et les futures générations.
 - ✓ Le troisième chapitre traite l'amplification optique, principalement les amplificateurs à fibre dopées à l'erbium, nous présentons une étude théorique sur le principe physique,
-

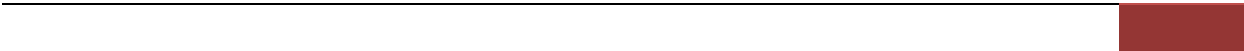
système de trois niveaux et sur les différentes caractéristiques en termes de gain, de puissance de saturation et de facteur de bruit de l'amplificateur EDFA.

- ✓ Le quatrième, et dernier, chapitre est l'étude des différentes caractéristiques de cet amplificateur EDFA à base d'un logiciel système. Cette caractérisation basée sur des simulations qui permettent d'évaluer les deux paramètres essentiels à savoir le gain G et le facteur de bruit NF (Noise Factor), ceci en fonction des paramètres opto-géométriques (la puissance incidente, la puissance de pompe, la longueur et la concentration d'ions Erbium de la fibre amplificatrice...etc.) . Enfin, dans un contexte d'extension de portée du réseau PON, nous allons chercher à augmenter le budget optique de la technologie GPON. A travers les différentes simulations d'un GPON étendu, nous allons évaluer et comparer les capacités d'extension du budget optique en termes de facteurs de qualité, de diagrammes de l'œil et de « Min » de BER en y insérant l'amplificateur optique EDFA en différentes positions d'amplification (post-(booster), pré- et l'amplification de ligne). Les différents formats de modulation seront testés et comparés afin d'avoir de meilleures performances en terme de TEB.
- ✓ Finalement, une conclusion résumant les principaux résultats obtenus viendra clore ce mémoire de thèse.



CHAPITRE I

Généralités sur la télécommunication par fibre optique



I.1. Introduction :

Le principe de base des télécommunications est de transmettre un signal, porteur d'une information d'un lieu à un autre lieu distant. Divers dispositifs de communication existent depuis des temps très anciens: la communication visuelle (système de signaux militaires chez les romains), le télégraphe visuel et mécanique (télégraphe de Chappe, 1794), le télégraphe électrique (Samuel Morse, 1832), le téléphone (Graham Bell, 1876), la radio (la découverte des ondes hertziennes voit naître le monde sans fil avec Marconi 1921), la télévision (Boris 1907). Tous ces moyens de communications avaient une capacité très limitée et une portée relativement faible dépendant énormément des conditions atmosphériques [1,2].

A l'heure actuelle, la technologie la plus efficace et la plus répandue repose sur les systèmes de transmission par fibres optiques, ces dernières représentent l'un des supports physique les plus fiables quasiment insensible aux bruits électromagnétiques et offre ainsi l'avantage de bandes passantes énormes pour la transmission à haut débit, il semble bien que les télécommunications aient trouvé là un support de transmission idéal. Cependant, il persiste certaines limitations inhérentes à la fibre que ce soit pour les effets dus à la dispersion chromatique et à l'atténuation ou les effets non linéaires essentiellement induits par l'effet Kerr [3,4]. La venue des fibres monomodes, permet de limiter la déformation du signal transporté (en limitant l'allongement temporel des impulsions qui se propagent sur de grandes distances). Les fibres monomodes présentent aussi un minimum d'atténuation vers 1550 nm, cette longueur d'onde du proche infrarouge sera donc privilégiée pour les télécommunications optiques [5].

Dans cette partie, nous décrirons dans un premier temps les trois catégories des réseaux de télécommunications, nous caractériserons aussi les fenêtres optiques, la fibre optique (en silice) et les différents types de fibre (multimode et monomode). Nous présenterons par la suite le principe d'une chaîne de transmission optique (description des éléments essentiels qui constituent notre chaîne). Nous aborderons le multiplexage optique et les avantages que cette technologie procure pour les télécommunications ainsi que les facteurs qui limitent la capacité d'une transmission optique tels que l'atténuation, la dispersion et les effets non linéaires.

I.2. Les réseaux de télécommunications :

Les réseaux de télécommunications sont devenus des ressources stratégiques dans les entreprises et les institutions publiques, et leur importance économique ne cesse d'augmenter. En vue de profiter des dernières applications de l'internet à haut débit, le consommateur de services télécoms (que ce soit en usage privé ou professionnel) désire avoir une liaison permettant d'échanger des informations avec un débit élevé et un coût raisonnable. Dans ce but, et grâce aux dernières évolutions technologiques, les systémiers et équipementiers du secteur des télécoms font évoluer la capacité de transmission des réseaux existants. Un réseau de communications électroniques s'articule autour de trois niveaux : le transport, la collecte et la desserte.

I.3 Hiérarchie des réseaux de télécommunications :

La figure ci-dessous schématise la notion de hiérarchie dans les réseaux de télécommunications. Les clients, résidentiels ou professionnels, peuvent ainsi accéder à des serveurs ou à des personnes quelle que soit leur situation géographique, passant ainsi du niveau local au niveau national ou mondial.

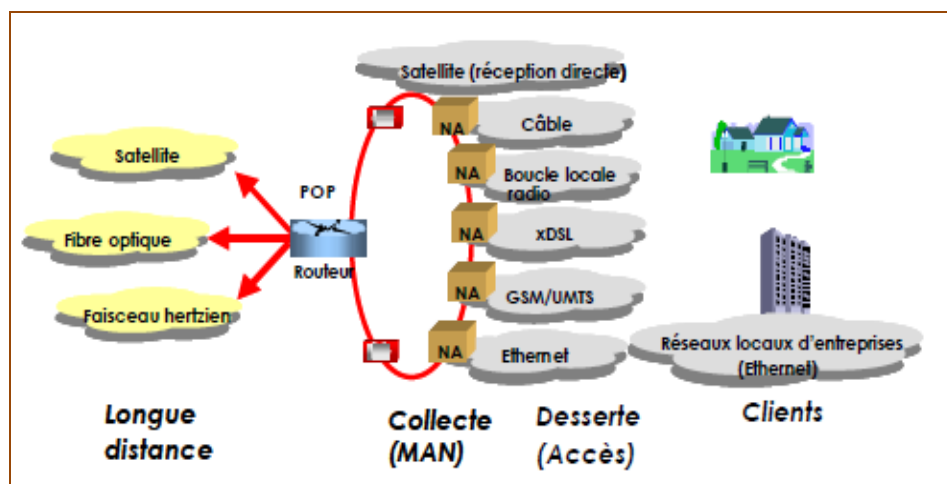


Fig. (I.1) : Les réseaux de télécommunications.

I.3.1 Réseau longue distance (Wide Area Network « WAN »):

Le réseau longue distance (national ou intercontinental) encore appelé le réseau de transport, est utilisé pour relier les grandes villes entre elles. Ce dernier parcourt de longues distances pouvant aller jusqu'à 1000 Km. La transmission de ces informations se fait désormais sur

fibre optique à une longueur d'onde de $1,55\mu\text{m}$ et à un débit élevé qui ne cesse de s'accroître. Les autres technologies mises en œuvre à ce niveau sont :

- Les liaisons par faisceaux hertziens,
- Les liaisons optiques, terrestres ou sous-marines,
- Les liaisons satellitaires, fondées sur des satellites de télécommunications.

1.3.2 Réseau métropolitain (Metropolitan Area Network « MAN ») :

Le réseau métropolitain ou bien le réseau intermédiaire est déployé pour faire le lien entre le réseau d'accès et le réseau de transport, ce dernier se branche sur le réseau de transport pour amener les flux de données jusqu'à des points de desserte (répartiteurs téléphoniques, antennes...etc...). Sa longueur comprise entre 1 et 100 km, il relie les bornes des quartiers des villes entre elles [6].

1.3.3 Réseau d'accès (Local Area Network « LAN ») :

Le réseau d'accès ou réseau de desserte, assure le raccordement de l'utilisateur final au réseau de collecte. Sa longueur varie de 2 à 50 Km, il est souvent constitué d'une partie en fibre optique suivie d'une partie en conducteur métallique qui va jusqu'au terminal de l'abonné permettant à l'utilisateur d'accéder à un opérateur. Le signal optique peut être converti au niveau d'un immeuble d'affaire (FTT Building), d'un quartier résidentiel (FTT Curb) ou de l'utilisateur final (FTT Home). Ces réseaux ont par ailleurs la particularité d'être placés sous une autorité privée.

I.4. Intérêts des fibres optiques:

Les principaux intérêts et caractéristiques qui ont assuré le développement de la fibre optique et qui en ont fait le support privilégié pour les liaisons grandes distances et haut débits sont :

- ✓ Une *bande passante très large*, ce qui autorise des débits de transmission très élevés ;
 - ✓ Une *faible atténuation*, ce qui autorise des liaisons à grande distance;
 - ✓ Une *insensibilité aux perturbations électromagnétiques*, ce qui garantit une grande sécurité;
 - ✓ Un *poids et des dimensions très réduites*, ce qui permet d'insérer dans le même câble un nombre très important de lignes.
 - ✓ La *légèreté du câble optique* comparé au câble coaxial.
-

I.5. Présentation générale des fibres :

Une fibre optique est un cylindre de matériaux diélectriques transparents, elle est constituée d'un cœur d'indice de réfraction n_1 , entouré par la gaine optique d'indice de réfraction n_2 plus faible. Ces deux régions essentielles pour le guidage de la lumière sont réalisées avec deux matériaux différents. La fibre optique est souvent recouverte d'une gaine dite mécanique qui est rajoutée pour protéger la fibre optique en assurant une meilleure résistance mécanique [4,7].

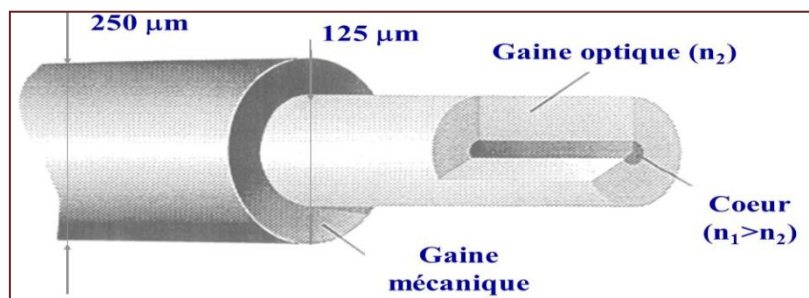


Fig. (I.2) : La structure d'une fibre optique standard pour les télécommunications.

I5.1. Indice de réfraction [4,8] :

La vitesse de la lumière dans le vide C_0 est de 300.000 km/s, dans le milieu transparent tel que le verre, cette vitesse va diminuer d'un facteur n . Ce facteur se nomme indice de réfraction qui est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le matériau C_1 :

$$n = \frac{C_0}{C_1} \quad \text{I.1}$$

Où C_0 et C_1 sont exprimées avec la même unité de vitesse (mètre par seconde ou kilomètre par seconde).

I5.2. Loi de Snell Descartes [4,8]:

Lorsqu'un rayon lumineux traverse un milieu d'indice de réfraction n_1 pour venir frapper un autre milieu d'indice n_2 plus faible, il change de direction et de vitesse et il se divise en deux rayons:

- ✓ Un rayon réfléchi : qui se propage encore dans le premier milieu.
- ✓ Un rayon réfracté : qui se propage dans le second milieu.

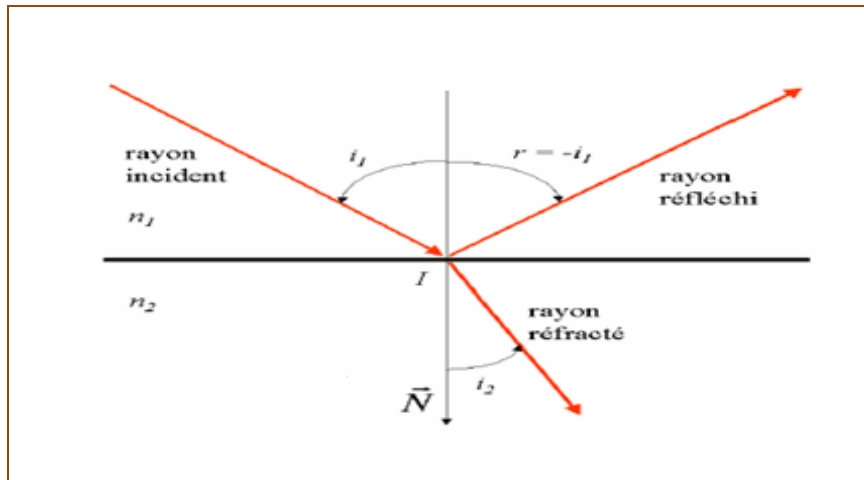


Fig.I.3 : Loi de Descartes.

La formule de Descartes pour la réflexion et la réfraction d'onde lumineuse entre deux milieux est :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad \text{I.2}$$

Où i_1 et i_2 représentent les angles d'incidence aux surfaces par rapport à la normale.

Les deux phénomènes de réflexion et de réfraction se produisent en général simultanément. Il existe cependant un cas particulier où toute la lumière est réfléchie c'est la réflexion totale.

I.5.3. Principe de guidage de la lumière :

Dans une fibre optique, on se sert du phénomène de réflexion totale interne pour transmettre la lumière sur de très grandes distances.

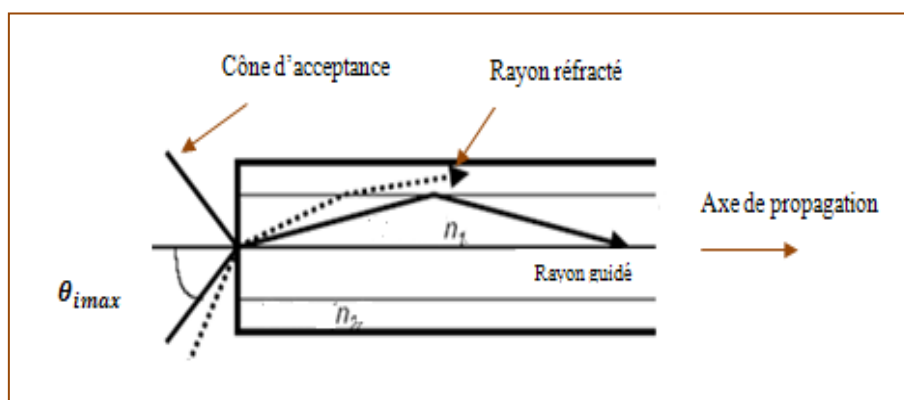


Fig.I.4 : Le principe de guidage dans une fibre optique

Pour assurer le guidage (afin d'avoir une réflexion totale à l'interface cœur/gaine), deux conditions doivent être réunies [9] :

- ✓ Le rayon doit se trouver dans un milieu d'indice n_1 entouré d'un autre milieu d'indice n_2 avec : $n_1 > n_2$
- ✓ De plus, pour parvenir à injecter un signal dans la fibre ce signal doit être inclus dans le cône d'acceptance.

a. **Angle d'acceptance et ouverture numérique** [10, 11] :

- Pour qu'un rayon lumineux se propage dans la fibre par une réflexion totale interne, il doit être injecté dans la fibre selon un angle d'incidence maximal $\theta_{i\max}$ appelé « angle d'acceptance », cet angle permet de définir l'ouverture numérique.
- L'ouverture numérique est un paramètre qui permet d'exprimer la capacité d'une fibre de propager un faisceau lumineux ou c'est une mesure de la quantité maximale de la lumière qu'un système optique peut accepter, elle est définie par le sinus de l'angle d'acceptance.

$$ON = \sin \theta_{i\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{I.3}$$

Un rayon hors du cône d'acceptance sera simplement réfracté à l'entrée de la fibre puis à l'interface des deux couches, il passera alors dans la gaine et sera perdu.

b. **Mode de propagation** [1,12] :

Les différents rayons lumineux parcourant la fibre optique sont appelés « modes ». Chaque mode étant une solution spécifique de l'équation d'onde, le nombre de modes ne dépend que de la fréquence normalisée "V", pour un rayon "a" de la fibre, elle est définie par:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{I.4}$$

Cette grandeur permet de calculer la longueur d'onde. Il existe deux types de fibres optiques : multimode et monomode, cette classification peut être déterminée au moyen de la fréquence normalisée V.

- Si $V \leq 2.405$, la fibre est monomode (une dimension du cœur très petite),
 - Si $V > 2.405$, la fibre est multimode (une dimension du cœur très élevée).
-

Le tableau suivant compare les caractéristiques de ces deux familles de fibres optiques et en donne les champs d'application :

Tableau (I1) : Caractéristique d'une fibre monomode et d'une fibre multimode.

Fibre monomode	Fibre multimode
ON faible (connexion délicate) ;	ON forte (connexion facile) ;
Très faible atténuation ;	Faible atténuation ;
Faible dispersion ;	Forte dispersion ;
Haut débit, longues distances.	Réseaux locaux.

15.5. Fibres multimodes :

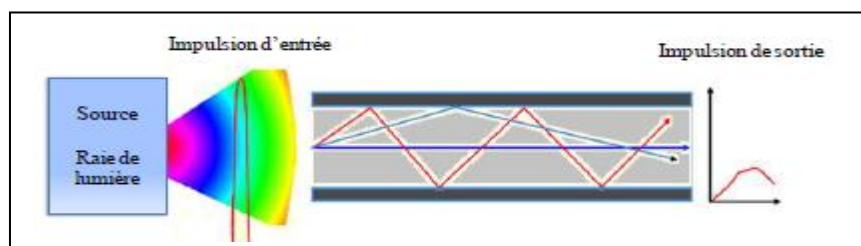
Les fibres multimodes ont un diamètre de cœur de 50 μm et de gaine de 125 μm et les différents rayons empruntent des trajectoires différentes. Ils se divisent en deux groupes : fibre optique à saut d'indice et fibre optique à gradient d'indice [13,14].

a. Fibres multimodes à saut d'indice :

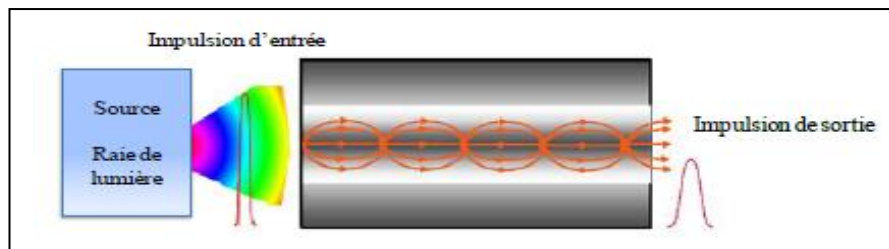
Ce sont les premières fibres optiques produites, dans ce type de fibres, l'indice de réfraction du cœur est constant, il y a un changement brusque de l'indice de réfraction entre le cœur et la gaine. La lumière se propage par réflexion interne, elle suit un chemin en zigzag [14].

b. Fibre multimode à gradient d'indice :

Dans la fibre à gradient d'indice, le cœur est constitué de couches de verre successives ayant un indice de réfraction proche. Donc l'indice de réfraction diminue graduellement du centre du cœur vers la gaine et les rayons lumineux présentent une allure sinusoïdale [13,14].



a) *Fibre multimode à saut d'indice.*



b) - Fibre multimode à gradient d'indice.

Fig.15 : Types de fibre optique multimode.

I.6. Du multimode au monomode :

Lorsque l'impulsion lumineuse est injectée dans la fibre, plusieurs modes propres sont alors excités; mais puisque les vitesses de propagation de chaque mode diffèrent, l'impulsion s'allonge au fur et à mesure qu'elle se propage. Il en résulte qu'au-delà d'une certaine distance, une impulsion en vient à chevaucher l'impulsion précédente, provoquant ainsi une perte d'information et la largeur de bande disponible des fibres multimodes est limitée par la dispersion modale ; le fait qu'un seul mode se propage limite cette dispersion, c'est bien le cas des fibres monomodes. Donc la fibre monomode est couramment utilisée dans les canaux à haute vitesse de débit de données en raison de sa faible perte de dispersion par rapport aux fibres multimodes qui peut être utilisée que pour des communications sur de courtes distances.

I.6.1. Fibres optiques monomodes :

Lorsque le diamètre du cœur optique est petit (de l'ordre de 5 à 10 μ m) et la différence d'indice faible (moins de 0,5 %), Il est possible de sélectionner un seul mode qui se propage au voisinage de l'axe d'où une bande passante maximale et théoriquement illimitée. Cette catégorie de fibre est employée comme moyen de transmission optique dans les réseaux des télécommunications à cause de leurs avantages [4,15] :

- ✓ Durée de vie du support de transmission environ 20 ans,
- ✓ Faible perte de puissance et grande quantité d'informations à transmettre,
- ✓ Absence de dispersion modale, compatibilité avec les technologies modernes.

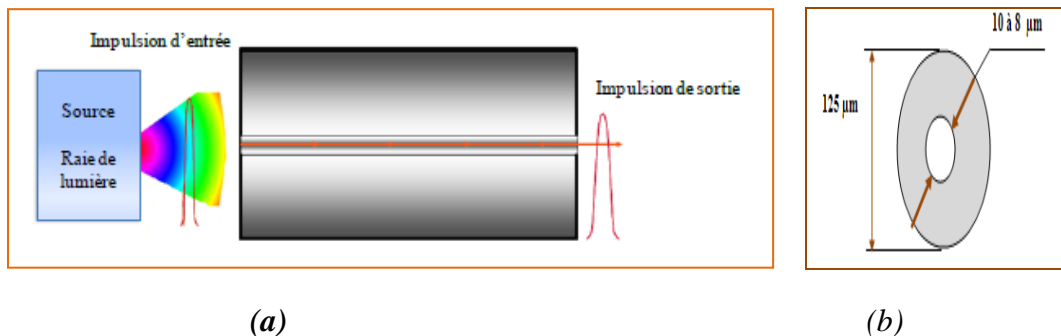


Fig.I.6 : a) Trajet du signal dans une fibre monomode, b) Fibre optique monomode.

I6.2. Types de fibres monomodes [1,13] :

La fibre optique monomode, dénommée SMF (Single Mode Fiber) est principalement utilisée par les opérateurs pour parcourir de longues distances. La transmission des données se fait au moyen d'un laser d'une longueur d'onde allant de 1300 à 1550 nanomètres. L'UIT (Union Internationale des Télécommunications) a normalisé plusieurs catégories de plus en plus performantes, tant en débit qu'en distance on peut distinguer:

- ◆ **G.652** - fibre à dispersion non décalée (NDSF : Non-Dispersion Shifted Fiber) c'est la fibre monomode standard aussi appelée SSMF (*standard single mode fiber*), elle présente une dispersion nulle autour de 1310 nm et une dispersion de l'ordre de 17 ps/nm/km autour de 1550 nm.
- ◆ **G.653** -fibre à dispersion décalée, communément appelée DSF (Dispersion Shifted Fiber) : elle est disponible depuis 1985, et elle présente une dispersion nulle dans la bande C, entre 1530 et 1550 nm.
- ◆ **G.655** - (NZ-DSF : Non Zero Dispersion Shifted Fiber ou fibre à dispersion décalée non nulle en français). Comme leur nom l'indique, les NZ-DSF sont des fibres monomodes DSF dont la particularité est de présenter une dispersion chromatique en valeur absolue qui doit être supérieure à une valeur non nulle sur toute la gamme des longueurs d'onde correspondant à un usage prévisible. Cette dispersion supprime la croissance du mélange à quatre ondes, un effet non linéaire qui peut être particulièrement fâcheux lors du multiplexage en longueur d'onde (WDM).
- ◆ L'UIT a normalisé la dernière génération de fibre optique monomode, c'est la fibre **G.657** qui a des caractéristiques très spéciales, (très résistante à l'humidité et aux micro courbures et courbures), optimisée pour la transmission à 1310 nm, 1490 nm et

1550 nm. Elle est spécialement conçue pour des applications FTTx (utile pour réaliser le câblage notamment à l'intérieur des bâtiments).

I.7. Fenêtres de transmission :

Les systèmes pratiques utilisent des sources à semi conducteurs émettant autour de trois plages de longueurs d'onde de la lumière, appelées « fenêtres optiques (en anglais: Telecommunication Windows)».

On choisit une fibre optimisée pour une fenêtre, en fonction de la distance de transmission et du système de transmission (multimode ou monomode) compte tenu de l'atténuation et de la dispersion des fibres. Les trois fenêtres de transmission sont définies comme suit [1,13] :

- La première fenêtre, de 0,8 à 0,9 μm , n'est pas un minimum d'atténuation ni de dispersion, mais un optimum d'utilisation des matériaux les plus économiques : silicium pour les détecteurs, GaAs pour les émetteurs ; cette fenêtre permet des liaisons peu coûteuses à courtes distances.
- La deuxième fenêtre, autour de 1,3 μm correspond à est une faible atténuation (vers 0,4 dB/km) et le minimum de dispersion chromatique; elle est couramment utilisée en transmission à grande distance, mais nécessite des matériaux très chers (essentiellement GaInAsP).
- La troisième fenêtre vers 1,55 μm correspond au minimum absolu d'atténuation (autour 0,2 dB/km) mais la dispersion chromatique n'est pas négligeable, ainsi l'optimisation de la bande passante à cette longueur d'onde nécessite l'utilisation de source de lumière cohérente d'une diode laser (DL).

I.8. Limitations de la propagation dans une fibre optique :

Dans une fibre optique, le premier phénomène néfaste limitant les débits de transmission est la dispersion chromatique, elle est due à la nature dispersive de la silice (dispersion du matériau). D'autre part l'affaiblissement ou l'atténuation est certainement un des paramètres les plus importants pour une fibre optique, car c'est le facteur qui limite le plus souvent la distance de transmission maximale pour une liaison optique. Ce paramètre est donné généralement sous la forme d'un coefficient d'affaiblissement ou affaiblissement linéique (affaiblissement par unité de longueur de la fibre). Enfin, et avec l'apparition de transmissions optiques à longue distance, les effets non linéaires dans ces systèmes ont apparus, ces effets limitent effectivement la capacité de transmission puisqu'ils donnent lieu à des interférences ou des distorsions et limitent le taux d'information transférée dans les canaux à haut débit.

18.1. L'atténuation :

Ce phénomène correspond à la perte de puissance du signal optique se propageant dans la fibre de longueur L et il est caractérisé par la différence entre la puissance injectée P_e et la puissance en sortie P_s . En effet, elle correspond à une diminution de la puissance du signal transmis donnée par l'équation [4] :

$$P_s = P_e \cdot e^{-\alpha L} \quad \text{I.5}$$

α étant le coefficient d'atténuation linéique de la fibre (donné en dB/km). Pour les fibres monomodes utilisées dans les réseaux optiques, la valeur de ce coefficient est comprise 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.

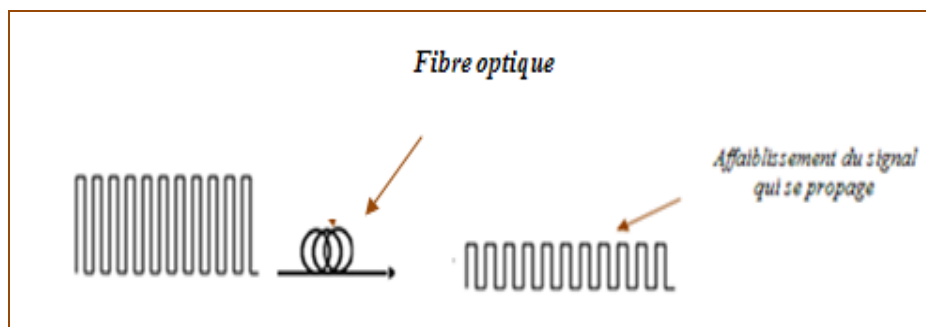


Fig.I7 : Affaiblissement d'une impulsion le long d'une fibre.

a. L'atténuation dans la fibre optique monomode [15,16]:

La propagation d'un signal dans une fibre optique monomode est accompagnée d'une réduction de sa puissance moyenne, cette réduction est liée au phénomène d'atténuation. La figure (I.8) montre la courbe d'atténuation d'une fibre en silice multimode et monomode. Pour une fibre standard monomode (SMF pour « Single Mode Fiber »), les pertes aux basses longueurs d'onde sont liées à la diffusion Rayleigh du verre de silice (en effet, le noyau de la fibre est composé de verre avec un indice de réfraction légèrement supérieur à celui de la gaine extérieure). Alors qu'aux grandes longueurs d'onde elles sont engendrées par l'absorption infrarouge. On voit aussi les effets de vibration de la liaison hydroxyde OH (OH

oxygène hydrogène) et qui présentent un pic de forte atténuation autour de 1400 nm. La figure montre aussi que les fibres en silice connaissent un minimum d'atténuation de l'ordre de 0,2 dB/km vers 1550 nm. Cette longueur d'onde sera donc privilégiée pour les communications optiques.

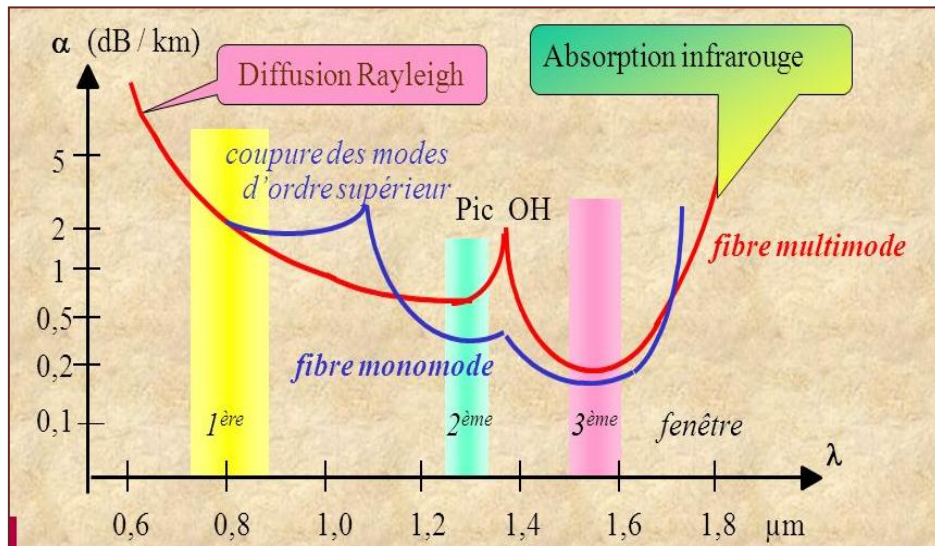


Fig.I8 : Courbe d'atténuation spectrale d'une fibre en silice.

b. Amplification optique :

Comme l'atténuation est l'une des principales limitations de la distance de transmission des systèmes de télécommunications optiques, il est nécessaire de trouver les solutions qui permettent de régénérer le signal à intervalle régulier dans la fibre. La première solution pour y parvenir c'était d'utiliser un répéteur régénérateur optoélectronique, qui tant par sa complexité et par son coût élevé a conduit à étudier un système amplifiant directement le signal optique. C'est l'amplificateur optique qui a révolutionné l'évolution des systèmes de transmission, il permet de compenser les pertes de la fibre optique et de contrôler régulièrement la puissance optique des signaux. Selon le standard de l'union internationale des télécommunications UIT-T, les caractéristiques qui déterminent la qualité d'un amplificateur optique sont [17,18] :

- ✓ La puissance en entrée et la puissance de sortie en dBm,
- ✓ Le gain exprimé en décibels, qui exprime le rapport entre la puissance du signal d'entrée et le signal de sortie,

- ✓ La largeur de bande des fréquences amplifiables,
- ✓ Le facteur de bruit (NF: Noise Factor).

Ces amplificateurs se répartissent en deux catégories : les amplificateurs à semi-conducteur (SOA: *Semiconductor Optical Amplifier*) et ceux à fibre en fonction du milieu qui les compose. L'amplificateur à fibre est en effet particulièrement attrayant en raison de son gain et de sa puissance de saturation élevés ainsi que son faible facteur de bruit.

Le SOA a de moins bonnes performances en gain et en puissance de saturation, mais il possède une plus large bande-passante optique en plus de sa petite taille et de sa capacité à être intégré avec d'autres dispositifs optiques. L'amplificateur optique le plus répandu est à fibre dopée à l'erbium (EDFA : Erbium Doped Fiber Amplifier), il amplifie les signaux optiques, dont le spectre optique appartient à la fenêtre optique 1525-1565 nm, appelée communément bande C.

18.2. La dispersion :

La silice est un matériau dit dispersif car son indice de réfraction n dépend de la longueur d'onde λ . Il en résulte que lorsqu'une impulsion se propage dans une fibre optique, elle subit un phénomène de dispersion qui se traduit par un étalement temporel de celle-ci. Les phénomènes qui provoquent la déformation du signal durant sa propagation sont de deux types : la dispersion chromatique et la dispersion intermodale [9,12].

La dispersion chromatique est liée à une différence de vitesse de propagation dans la fibre en fonction de la longueur d'onde qui provoque un élargissement des impulsions optiques.

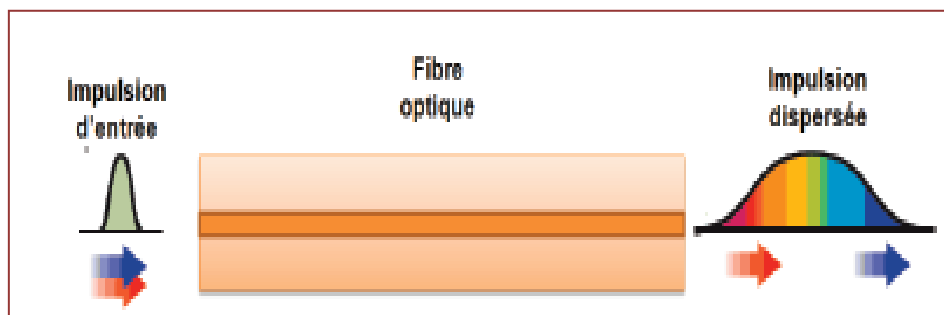


Fig.19 : Dispersion d'une impulsion le long d'une fibre.

a. La dispersion dans la fibre optique monomode [3, 9,19]:

Puisque la dispersion intermodale ne peut pas se produire dans la fibre monomode, on s'intéressera uniquement à la dispersion chromatique car elle correspond à la principale cause de dispersion. Cette dernière est un facteur majeur de limitation des performances des systèmes de transmission à haut débit puisqu'elle entraîne un élargissement temporel des impulsions qui, au bout d'une certaine distance, provoque un recouvrement générateur d'interférences inter-symboles; elle introduit aussi une pénalité de puissance, ce qui peut entraîner une dégradation de l'ensemble rapport signal-bruit du coefficient de système (SNR).

b. Calcul de la dispersion chromatique :

La vitesse de propagation v_g de l'onde (vitesse de groupe) étant fonction de l'indice de réfraction n du milieu de propagation ($v_g = \frac{c}{n}$), après avoir parcouru une longueur L de fibre, deux longueurs d'ondes espacées de $\Delta\lambda$ se verront retardées de $\Delta\tau_c$:

$$\Delta\tau_c = D_c \cdot L \cdot \Delta\lambda \quad \mathbf{I.6}$$

Où:

L : est la longueur de la fibre donnée en kilomètres,

- $\Delta\lambda$: est la largeur spectrale de la source optique,
- D_c : est le coefficient de dispersion chromatique, qui est mesuré en unités de ps / (nm.km)

On peut calculer le coefficient de dispersion D_c par :

$$D_c = \frac{\Delta\tau_c}{L \cdot \Delta\lambda} = \frac{1}{L} \cdot \frac{dt_g}{d\lambda} \quad \mathbf{I.7}$$

Où

t_g : est le temps de propagation de groupe .

Le coefficient de la dispersion chromatique se décompose en deux termes :

$$D_c = D_M + D_G \quad \mathbf{I.8}$$

- ✓ Le premier terme D_M est la dispersion matériau (due à la variation de son indice avec λ) et s'annule au voisinage de $1,3 \mu\text{m}$, ce qui est l'intérêt de cette longueur d'onde.
- ✓ Le second terme D_G est la dispersion guide : faible et toujours négatif, il augmente si on accroît la différence d'indice et si on réduit le diamètre du cœur.

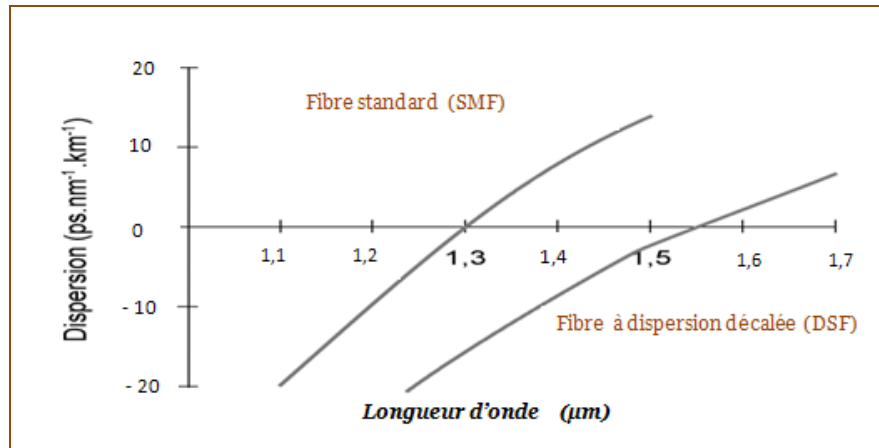


Figure (I10): Courbe de dispersion pour quelques types de fibres monomodes.

La figure (I.10) montre le coefficient de dispersion en fonction de la longueur d'onde pour différents types de fibres optiques. L'observation de la figure nous indique que pour une fibre monomode (SMF), la capacité de transmission est la plus importante pour une longueur d'onde d'environ $1,3 \mu\text{m}$ (la dispersion chromatique a une faible influence autour de $1,3 \mu\text{m}$), alors qu'elle devient un obstacle pour la transmission à $1,55 \mu\text{m}$ où l'atténuation est minimum.

c. Compensation de la dispersion chromatique :

Pour résoudre le problème de dispersion et pour que les impulsions transmises à cette longueur d'onde ne soient pas allongées, les deux alternatives sont : soit d'utiliser une fibre à dispersion nulle à $1,55 \mu\text{m}$ (DSF), soit de compenser les effets de la dispersion par une propagation dans une longueur adéquate de fibre à dispersion de signe opposé (DCF : Dispersion Compensation Fiber), cette dernière technique est considérée comme meilleure solution permettant de minimiser les pénalités introduites par la dispersion chromatique sur une large bande de longueurs d'onde.

18.3. Les effets non- linéaires :

Aujourd'hui, les systèmes de transmission à haut débit utilisent des amplificateurs de puissance, ce qui conduit à des puissances injectées dans la fibre très élevées et l'apparition

non-négligeable des effets non linéaires [3]. Les effets non linéaires se traduisent par la réponse d'un milieu diélectrique lorsqu'on applique un champ électromagnétique intense susceptible de modifier les propriétés de la silice.

Ces effets limitent effectivement la capacité de transmission puisqu'ils donnent lieu à des interférences ou à des distorsions et limitent le taux d'information transférée dans les canaux à haut débit. Dans les fibres optiques en silice, il est possible de classer les non linéarités en deux catégories :

- ◆ Celles induites par l'indice de réfraction non linéaire (effet Kerr),
- ◆ Celles dues à la diffusion stimulée (Brillouin et Raman).

a. Effet Kerr :

L'effet non linéaire prépondérant dans une fibre optique est l'effet Kerr optique, il provient de la dépendance de l'indice de réfraction \tilde{n} à l'intensité E du champ optique se propageant dans la fibre. Il peut alors s'exprimer sous la forme d'une fonction non linéaire, du champ électrique E (anisotropie du matériau) [3, 9,20] :

$$\tilde{n} = n_1 + n_2|E|^2 \quad \text{I.9}$$

Avec :

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.

Cette dépendance de l'indice de réfraction à l'intensité du signal est à l'origine de certains effets non-linéaires intéressants comme le phénomène d'auto-modulation de phase (SPM: Self Phase Modulation) où les fluctuations de la puissance optique modulent la phase du signal produisant un élargissement du spectre. La non-linéarité induit aussi à une modulation de phase croisée (XPM : Cross Phase Modulation), ainsi que des phénomènes connus sous le nom de mélange à quatre ondes (FWM : Four Waves Mixing) sources d'intermodulation entre les différents canaux d'un système de transmission utilisant plusieurs longueurs d'ondes.

b. 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 milieu de propagation. Deux classes de diffusions stimulées peuvent être distinguées : les diffusions de Raman et celles de Brillouin stimulées [20].

I.9. Principe de transmission par la fibre optique [1,12] :

L'architecture d'une liaison, quelque soit le niveau du réseau auquel elle est destinée, est composée des mêmes blocs de base, à savoir, un émetteur, un module de transmission et un récepteur (figure I.11). Dans le cas d'une transmission par fibre optique, l'émetteur est un laser à semi-conducteur ou une diode électroluminescente qu'on peut moduler facilement à l'aide d'un courant d'injection. Le message émis par la source est ensuite diffusé dans la fibre optique qui réalise l'acheminement de ce dernier. Enfin, le dernier élément de la chaîne est le récepteur qui va reconstituer le message qu'il reçoit par l'intermédiaire d'une photodiode.

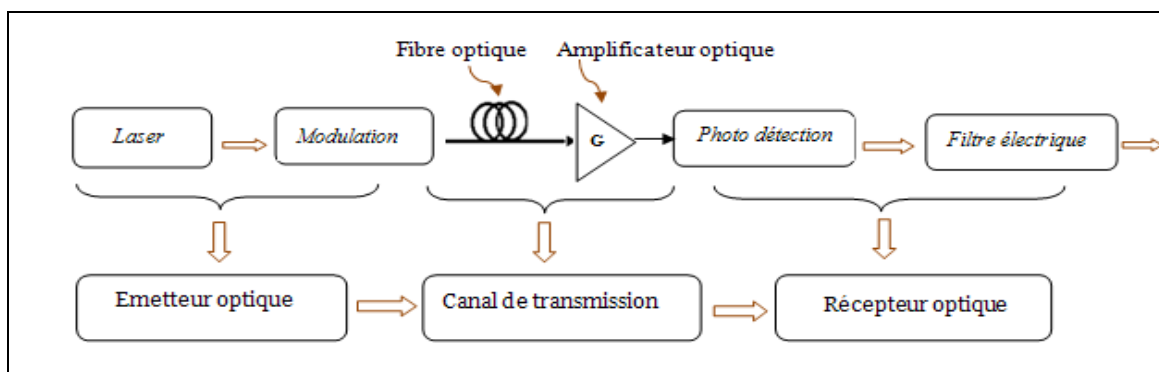


Fig. .I11: Synoptique générale d'un système de communication par fibre optique.

I9.1. L'émetteur optique :

Depuis le début des télécommunications par fibre optique, les émetteurs optiques jouent un rôle crucial surtout pour les nouvelles générations. Les systèmes de transmission par fibre optique nécessitent des émetteurs optiques devant remplir certaines conditions [1,8]:

- ✓ 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 moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant.

Le choix des sources optiques s'est porté sur les émetteurs à semi-conducteur à modulation directe DML (Directly Modulated Laser) de type DFB (Distributed FeedBack) c'est à dire à contre réaction distribuée et des lasers à modulation externe EML (External Modulated Laser) qui permettent d'améliorer les performances au point de vue débit (des débits en ligne à 10 Gbit/s).

a. Principe et fonctionnement d'un laser :

Un **laser** (acronyme de l'anglais **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, signifie amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement) est un dispositif qui émet de la lumière grâce au phénomène d'émission stimulée, deux conditions bien connues doivent être réalisées afin de favoriser cette émission et obtenir l'effet laser [21,22] :

- ✓ Il faut qu'il y ait suffisamment d'électrons dans l'état d'énergie supérieure, lorsque ceci a lieu, on obtient une inversion de population. Cette inversion est réalisée par l'opération de pompage électrique.
- ✓ Il faut que le nombre de photons incidents spontanés dépasse un certain seuil. Pour cela, on les confine au sein du semi-conducteur dans une cavité résonante.

Le seuil de l'effet laser est obtenu lorsque le gain maximal compense toutes les pertes que l'onde rencontre au cours de ses allers-retours entre les deux miroirs du résonateur. Les trois principaux composants d'un laser sont les suivants : un milieu actif, un mécanisme de pompage et un résonateur optique. Un système laser est schématisé dans la figure (I.12) :

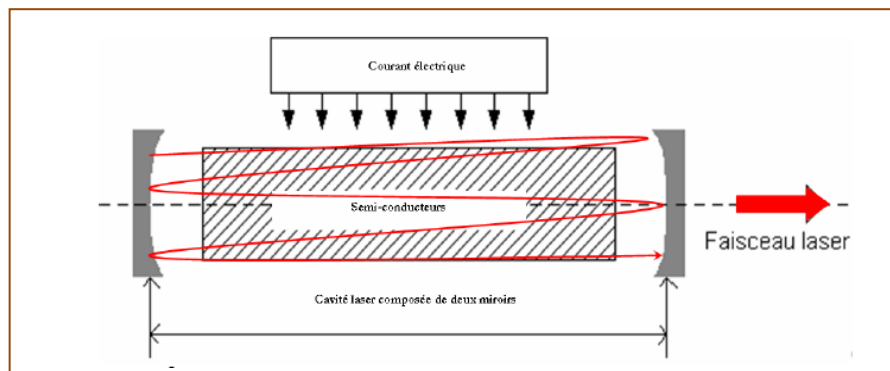


Fig. (I12) : Schéma de principe d'un laser à semi-conducteur.

b. Bruit d'un laser :

Le signal optique délivré par une diode laser présente des fluctuations en amplitude et en fréquence, même si le laser est polarisé avec un courant constant. Les deux mécanismes fondamentaux qui concourent à la génération du bruit sont l'émission spontanée et la recombinaison électron-trou. On définit ainsi le bruit relatif d'intensité RIN (de l'anglais, « **Relative Intensity Noise** ») comme le rapport entre la densité spectrale des fluctuations du nombre de photons et le nombre de photons au carré, ou entre la densité spectrale de fluctuations de puissance optique et le carré de la puissance optique moyenne :

$$\text{RIN}(f) = \frac{[\Delta P_{opt}^2]}{P_{opt}^2} \quad \text{I.10}$$

Le RIN s'exprime en Hz^{-1} mais il est généralement présenté en décibel et donc s'exprime alors en dB/Hz, puisque le bruit est intégré dans 1 Hz de bande.

c. Lasers à semi-conducteur :

Pour répondre à l'extension des systèmes optiques et leurs besoins en sources performantes, le développement des lasers à semi-conducteurs a été très rapide et des progrès considérables ont été faits au niveau de la bande passante et du rendement, notamment grâce au développement des structures à cavités modifiées par rétroaction interne distribuée. Les quatre principaux types de lasers à semi-conducteurs sont :

➤ ***Laser Fabry Pérot :***

C'est le dispositif d'émission cohérente le plus classique. Ce type de laser est constitué dans le cas le plus simple, par deux miroirs plans, parallèles (dont au moins un est partiellement réfléchissant) entre lesquels les ondes lumineuses font de multiples allers-

retours, et d'un milieu actif. Les lasers Fabry-Pérot (FP) sont peu performants en bruit mais sont peu coûteux [21].

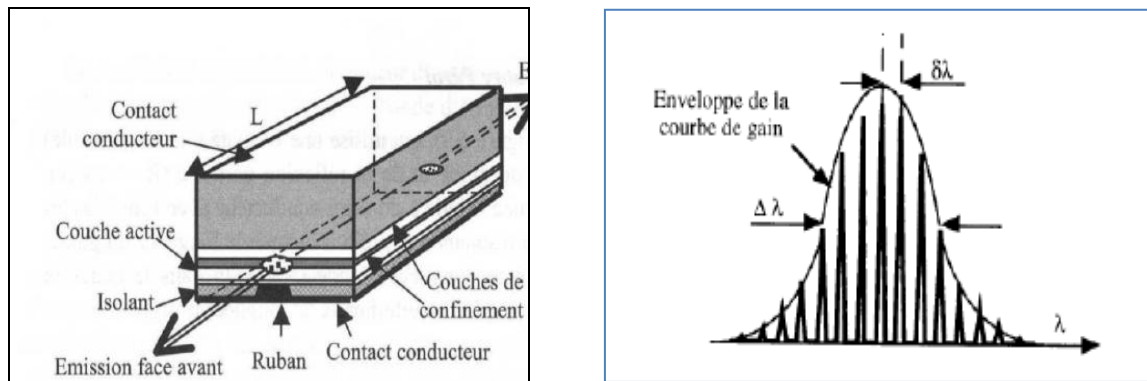


Fig. (L13) : Laser Fabry Pérot : a)- Structure, b)- spectre d'émission.

Le spectre du laser Fabry Pérot contient plusieurs raies, ce spectre est dit multimode longitudinal. La largeur spectrale n'est pas nulle, ce qui est acceptable à 1300 nm mais pas acceptable à 1550nm, à cause de la dispersion chromatique.

➤ **Laser à contre-réaction répartie DFB :**

Un laser Distributed Feedback (DFB) est un laser monomode, sa longueur d'onde atteint 1550 nm. Largement utilisé pour les télécommunications, il présente un coût sensiblement plus élevé que celui des diodes laser de type Fabry-Pérot et de très bonnes performances en bruit et de meilleures propriétés spectrales. Sa structure est la même que celle d'un laser Fabry-Pérot seulement les deux miroirs de la cavité sont supprimés et remplacés par un réflecteur de Bragg distribué permettant la sélection d'une longueur d'onde [21,23].

Dans les lasers Distributed Bragg Reflector (DBR), la contre-réaction n'a pas lieu à l'intérieur du milieu actif. En effet les extrémités d'un laser DBR se comportent comme des miroirs dont la réflectivité est maximale pour une longueur d'onde donnée. Ils restent plus difficiles à réaliser et présentent un coût élevé.

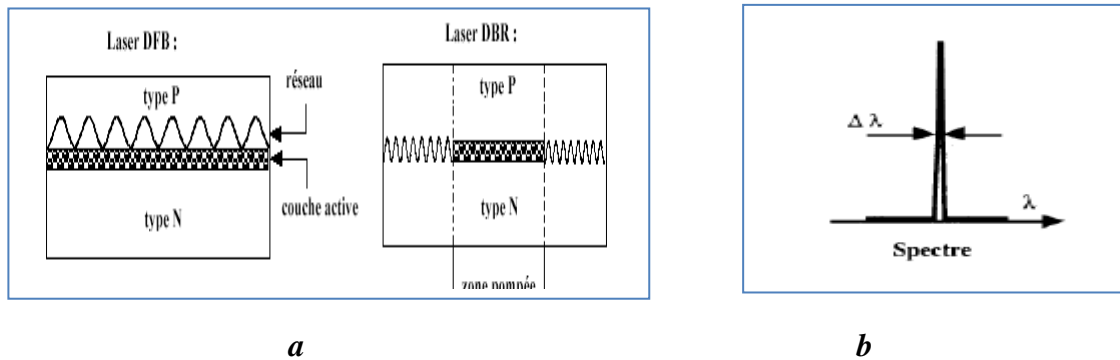


Fig. I.14 : *a- Présentation d'un laser DFB et d'un laser DBR, b- spectre d'émission.*

Le spectre du laser DFB est alors monomode longitudinal. Pour garder une longueur d'onde précise et stable, il faut asservir le courant et la température du laser.

➤ **VCSELs (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers):**

Ce sont des lasers à semi-conducteur qui émettent de la lumière cohérente par la surface contrairement aux lasers à semi conducteur classiques qui émettent par la tranche. Ces lasers comportent une zone active à puits quantiques, de faibles épaisseurs insérées entre deux miroirs de Bragg.

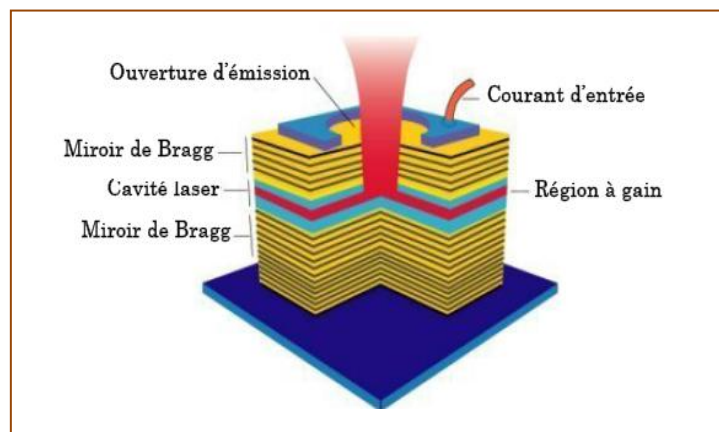


Fig.II5. : *Diode laser à émission par la surface et à cavité verticale.*

Les premiers VCSELs ont été développés à 850 nm et les composants pour 1300 et 1550 nm sont toujours en cours de développement dans les laboratoires. Le problème de ces lasers c'est que pour des fréquences de modulation très élevées (à partir de 5 à 10GHz), on doit utiliser

une modulation externe, en amplitude, par un modulateur en optique intégrée qui suit le laser. Le tableau suivant résume les différentes caractéristiques des émetteurs optoélectroniques.

Tableau (I2) : Comparaison de différents types de laser :

Composant	Fabry-Pérot	DFB	VCSEL
Spectre d'émission (nm)	Plusieurs raies	Une raie finie <0.1	Une raie fine < 0.1
Courant de seuil (mA)	10 à 30	10 à 30	5 à 10
Bruit	Faible	Faible	Très faible
Principales longueurs d'onde (µm)	1.3	1.3 et 1.5 à 1.6	0.78 à 0.9
Coût	Moyen	Elevé	Assez faible
Applications	Transmission longue distance à 1300 nm	Transmission longue distance à 1550 nm	Transmission courte distance (fibre onomode et multimode).

1.9. 2. La modulation

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les imprimer sur le signal à envoyer dans la fibre, c'est ce que l'on appelle une modulation, qui est une fonction essentielle de tout système de transmission. Pour réaliser la modulation d'émission, on a deux possibilités :

a. La modulation directe:

La fonction de modulation optique est intégrée dans les systèmes de télécommunications optiques et a pour rôle de modifier les caractéristiques de la lumière en fonction d'un signal de commande [1]. La modulation directe consiste à moduler en intensité directement le courant injecté dans un laser à semi-conducteur. Il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser, c'est-à-dire sur le courant injecté pour moduler en amplitude le signal émis. L'inconvénient majeur avec cette méthode réside dans le fait que la modulation d'amplitude du courant d'injection d'un laser s'accompagne d'une modulation de fréquence parasite appelée conversion AM/FM ou « chirp » en anglais. Ce phénomène provoque un élargissement temporel des impulsions qui, au bout d'une certaine distance, conduit à une dégradation du signal transmis d'autant plus importante que la longueur de la fibre est grande.

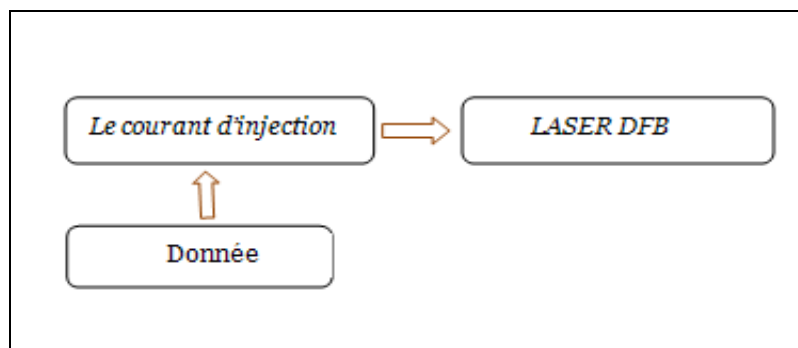


Fig. I16 : Schéma simplifié d'une modulation directe de données.

La modulation directe, plus simple et moins coûteuse est encore très utilisée si les données sont transmises à un débit de quelques gigabits/s, mais au delà de 5 Gbits /s, la modulation externe est indispensable pour maintenir une bonne qualité de transmission.

b. La modulation externe :

Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du laser et non plus le courant d'alimentation à l'entrée du laser, le module d'émission est composé dans ce cas, d'une diode laser émettant un signal continu suivie d'un modulateur externe, le modulateur externe introduit beaucoup moins de conversion amplitude/fréquence [13].

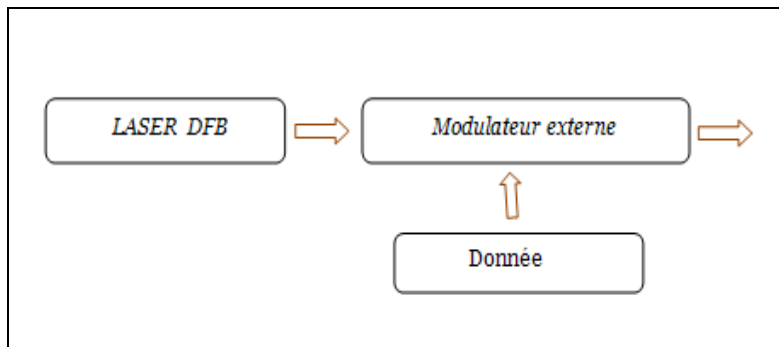


Fig.L17 : Schéma synoptique de la modulation externe. .

Deux types principaux de modulateurs externes sont employés aujourd’hui : les modulateurs de Mach- Zehnder « MZ » sur Niobate de Lithium (LiNbO3) et les modulateurs électro - absorbants « MEA».

➤ **Modulateur électro-absorbant (MEA) :**

Le principe de fonctionnement des modulateurs à électro-absorption repose sur les modifications du spectre d'absorption d'un matériau semi-conducteur soumis à un champ électrique [1]. Cet effet est connu sous le nom d'effet Franz-Keldysh dans un matériau massif et d'effet Stark confiné dans un matériau quantique. Une caractéristique particulièrement intéressante des modulateurs à électro-absorption est qu'ils peuvent être facilement intégrés avec les diodes lasers pour créer des sources optiques compactes et à très large bande de modulation [4 ,13].

➤ **Modulateur de Mach- Zehnder (MMZ) :**

Les modulateurs de Mach-Zehnder sont des modulateurs électro-optiques que l'on place directement en sortie du laser. Ils sont fréquemment utilisés pour les applications de télécommunications larges bandes. En réalité, les effets électro-optiques sont à la base de ce type de modulateurs, à savoir que l'indice de réfraction de certains matériaux peut être modifié par l'application d'un champ électrique. Ce phénomène est appelé effet Pockels si les effets électro-optiques sont linéaires, c'est-à-dire que la variation d'indice est proportionnelle au champ appliqué, et effet Kerr quand elle est proportionnelle au carré du champ. Un des

principaux impératifs est d'utiliser des matériaux transparents à la longueur d'onde de fonctionnement et présentant des coefficients électro-optiques aussi élevés que possible. Grâce à ce modulateur on peut obtenir une modulation d'amplitude à travers une modulation de phase à l'intérieur du composant [24].

c. Les formats de modulation:

Les formats de modulation d'amplitude ont gagné du terrain sur les autres, pour le réseau d'accès, grâce à leur simplicité et leur coût réduit au niveau de l'émetteur et du récepteur. De ce fait, les formats NRZ (Non Return To Zero), RZ (Return To Zero) se sont imposés comme les principaux formats de base de toutes les générations de systèmes WDM [25]. Pour le format NRZ, l'amplitude du signal optique est maintenue pendant tout le temps bit et ne retourne pas à zéro entre deux bits '1' successifs. Par contre, pour le format RZ, l'amplitude n'est pas maintenue pendant tout le temps bit '1' et retourne à zéro avant que le temps bit ne se termine. L'avantage du format NRZ est sa largeur spectrale plus faible que celle du format RZ, puisque la transition d'amplitude apparaît moins fréquemment. Grâce à cette efficacité spectrale, le format NRZ est plus utilisé dans les systèmes de transmissions optiques actuels.

D'autres formats existent et peuvent être utilisés pour transmettre une information binaire. Ils sont dérivés des formats NRZ ou RZ et sont le plus souvent obtenus grâce à l'ajout d'une nouvelle sur-modulation de phase. Des formats tels que le AP-RZ (Alternate-Phase RZ), (Chirped-RZ), le RZ à bande latérale unique (SSB-RZ Single Side Band RZ), le RZ sur-modulé en polarisation [25,26], ces formats ont été introduits afin d'améliorer l'efficacité spectrale et d'augmenter la tolérance aux effets non linéaires et à la dispersion chromatique qui pénalisent considérablement les performances du système.

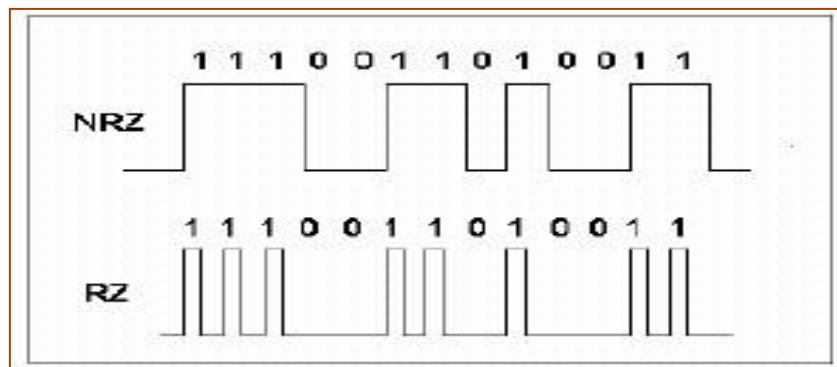


Figure (I18) : Schéma synoptique du format de modulation NRZ et RZ.

19.3. Le récepteur [4,27] :

Le rôle du récepteur est de convertir au mieux le signal optique en signal électrique. Ce module est composé de trois blocs fonctionnels selon la figure ci-dessous :

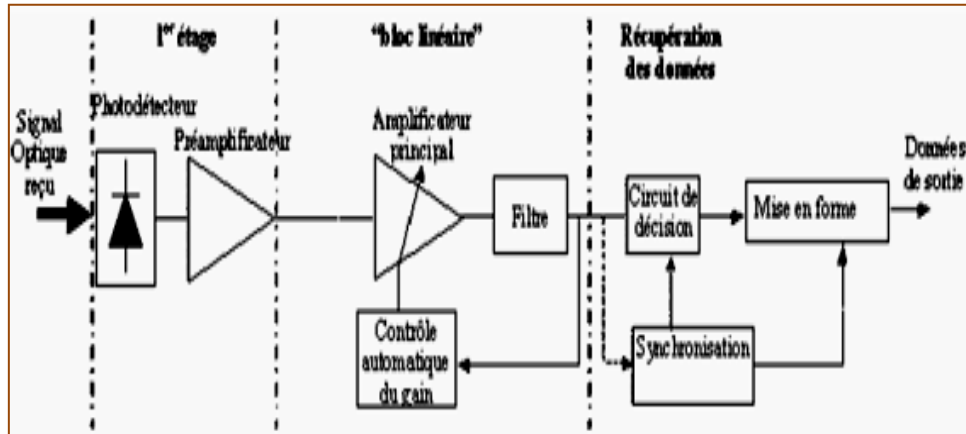


Figure (I19) : Schéma synoptique du module de réception.

Le premier étage est composé du photo détecteur qui peut être suivi par un préamplificateur afin d'augmenter le photo-courant généré malgré le faible signal optique reçu ou la faible sensibilité de la photodiode. Ensuite le deuxième étage, composé d'un amplificateur électrique à gain élevé, et d'un filtre réducteur de bruit. Enfin le bloc « récupération des données » correspond au dernier étage du récepteur, sa tâche est de comparer le signal de données à un certain seuil d'amplitude, puis de décider du niveau correspondant du signal (« bit 1 » ou « bit 0 »), et ceci à chaque front d'horloge.

a. Principe de la photodétection :

Les photodiodes sont des composants à semi conducteurs ayant la capacité de détecter un signal du domaine optique et de le transformer en signal électrique. Elles absorbent des photons et génèrent un flux de courant proportionnel à la puissance optique incidente. La télécommunication nécessite la réalisation de photodétecteur dont les principales spécifications sont les suivantes [4,9]:

- ✓ Une sensibilité importante pour la longueur d'onde utilisée ;

-
- ✓ La rapidité de réponse, car il doit être utilisé dans des systèmes fonctionnant à haut débit à 10 Gbits/s voire même 40 Gbits/s ;
 - ✓ Apporter le minimum de bruit au signal lors du processus de détection.

On distingue deux types de photodiodes à semi-conducteur qui sont réalisées à partir d'une jonction polarisée en inverse et qui satisfont à la plupart de ces conditions : la photodiode « PIN » et la photodiode à avalanches « APD ».

b. Paramètres d'une photodiode :

Les paramètres importants, dépendant du matériau et de la structure, qui caractérisent une photodiode sont la sensibilité, le courant d'obscurité et le rendement quantique. Le photocourant I_{ph} est directement proportionnel à la puissance optique incidente P_{opt} selon la relation suivante :

$$I_{ph} = S \cdot P_{opt} + I_{obs} \quad \mathbf{I.11}$$

Où

I_{obs} : Représente le courant d'obscurité.

➤ **Courant d'obscurité :**

Le courant d'obscurité « I_{obs} » correspond au courant permanent délivré par le dispositif photo-sensible en l'absence de flux lumineux (obscurité) et lorsque le capteur est polarisé dans les conditions d'utilisation. La photodiode doit être choisie de telle manière que le courant d'obscurité soit très inférieur au courant photoélectrique correspondant au signal lumineux minimum reçu. Ce dernier peut avoir des origines multiples : génération thermique dans la zone intrinsèque, courants de surface, ou courants de fuite. Dans la plupart des applications ce courant est négligeable ($I_{obs} < 10 \text{ nA}$). En ce qui concerne le temps de réponse, les meilleurs photodétecteurs actuels sont utilisables jusqu'à plus de 100 GHz.

➤ **La sensibilité (S) :**

Une des caractéristiques principales des photodétecteurs est appelée responsivité ou sensibilité. Elle caractérise la conversion optique-électrique du photodétecteur et elle est

définie comme le rapport du courant photo-généré I_{ph} sur la puissance optique incidente P_{opt} et elle est exprimée en Ampère par Watt [5, 28].

$$S(\lambda) = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} \quad \text{en } A/W \quad \mathbf{I.12}$$

➤ **Rendement quantique (η_q) :**

Le rendement quantique représente le rapport du nombre de paires de porteurs « photo-crées et collectées » au nombre de photons incidents. Il ne peut être supérieur à 1 et croît avec l'épaisseur de la zone absorbante. Il est souvent compris entre 0,5 et 0,9 et pour une photodiode idéale il est égal à 1.

$$\eta_q = \frac{I_{ph}/e}{P_{opt}/h\nu} \quad \mathbf{I.13}$$

Le rendement quantique et la sensibilité sont reliés par les relations suivantes, avec e représentant la charge élémentaire de l'électron, h la constante de Planck, λ la longueur d'onde et c la vitesse de la lumière :

$$S(\lambda) = \eta_q \cdot \frac{e \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad \mathbf{I.14}$$

➤ **Bruit du photo-détecteur :**

Le signal électrique émis par la photodiode n'est pas parfait, il est plutôt affecté par des bruits qui contribuent à la dégradation des performances des systèmes de communication [18]. Deux mécanismes fondamentaux de bruit, dont le bruit de grenaille et le bruit thermique, conduisent à des fluctuations dans le courant même lorsque le signal optique incident a une puissance constante.

c. Les photodiodes PIN :

Une photodiode PIN est composée d'une superposition de trois zones de semi-conducteurs : une zone P de porteurs positifs (trous) majoritaires, une zone I intrinsèque non chargées (trous et électrons en même nombre), une zone N de porteurs négatifs (électrons) majoritaires. Entre les zones P et N apparaît sous l'application d'un champ électrique une zone de transition, appelée aussi zone de charge d'espace, qui permet la création et la séparation des paires électron-trou. Une photodiode peut être utilisée en mode photovoltaïque ou en mode photoconducteur.

d. Photodiode à avalanche APD :

Dans la photodiode à avalanche *APD* les électrons créés dans la zone intrinsèque I sont multipliés par l'effet d'avalanche afin que le rapport signal sur bruit soit suffisamment important, l'idée d'utiliser ce phénomène de multiplication interne a été soulevée pour qu'un photon incident n'engendre plus un seul photoélectron mais plusieurs, ceci pour augmenter la puissance du signal électrique correspondant à la puissance optique incidente donnée [29,30].

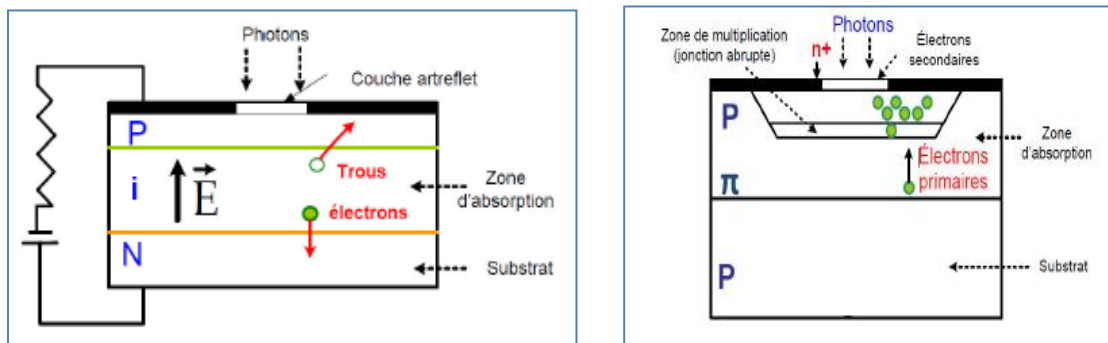


Fig. I20 : Schéma synoptique d'une photodiode PIN, et d'une photodiode APD.

La photodiode APD présente un temps de réponse plus long par rapport à celui de photodiodes PIN, car, un délai supplémentaire est dû au phénomène d'ionisation. Par contre elle est caractérisée par un rendement quantique élevé dans le proche infrarouge mais avec un bruit et une instabilité temporelle élevés [29,31]. Aujourd'hui, les photodiodes PIN et APD utilisées dans les communications par fibres optiques ont une bande passante électrique supérieure à 60 GHz et couvrent toutes les fenêtres de longueurs d'onde [5,32].

I.10. Capacité de transmission d'une fibre optique :

Actuellement les transmissions transocéaniques se font à un débit maximal de 10 Gbits/s par canal. Cependant, la quantité d'information transmise ne cesse de croître et il faudra donc augmenter les débits transmis dans un avenir proche afin d'éviter une saturation. Il y a encore une quinzaine d'année, l'accroissement de la capacité de transmission d'une liaison passait par la multiplication des lignes de transmission (jusqu'à des centaines de fibre optique par câble) ce qui induisait des coûts énormes de fonctionnement et de maintenance. La seule solution afin de réduire ces coûts et d'obtenir une meilleure flexibilité est donc d'augmenter la capacité de transmission par fibre optique. Cette croissance en capacité peut s'obtenir actuellement par l'augmentation du nombre de canaux dans la fibre et par l'accroissement du débit par canal.

I10.1. Techniques de multiplexage en optique [9,12] :

Afin d'améliorer la quantité d'informations transmises par fibres optiques, une voie étudiée est le multiplexage optique. Cela consiste à envoyer simultanément dans une même fibre optique des faisceaux lumineux de longueurs d'onde différentes. Tandis que la fonction réciproque, le démultiplexage permet de séparer des signaux occupant 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).

a. Multiplexage Temporelle TDM :

La technologie du multiplexage temporelle (ou TDM pour Time Division Multiplexing) consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant, ceci à tour de rôle pour chaque utilisateur. L'allocation de cette bande passante se fait en divisant l'axe du temps en périodes de durée fixe, et chaque utilisateur ne va transmettre que pendant une de ces périodes déterminée. Le multiplexage temporel permet typiquement de passer d'un débit de 10 Gbit/s à 40 Gbit/s ou même à 160 Gbit/s. Il peut être réalisé de manière électrique (ETDM pour Electrical Time Domain Multiplexing) ou optique (OTDM pour Optical Time Domain Multiplexing).

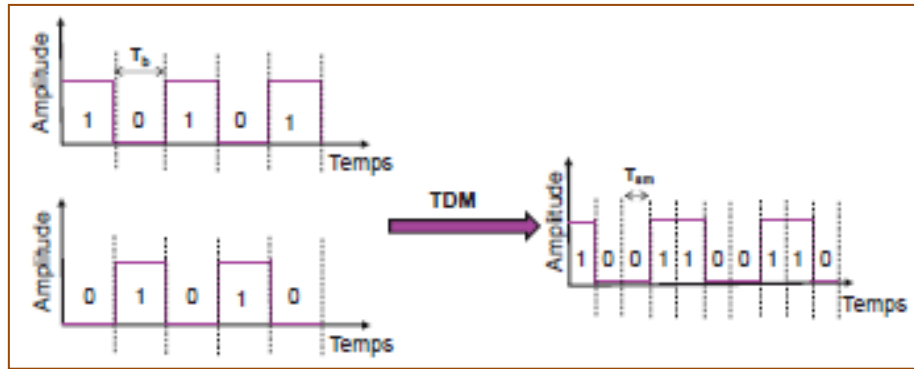


Fig.I22: Schéma synoptique du multiplexage TDM pour deux séquence binaire

b. Multiplexage en longueur d'onde WDM

La technique qui consiste à augmenter le nombre de canaux par fibre est plus communément appelée 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 même fibre optique [31]. Cette technique n'introduit aucune conversion optoélectronique. L'utilisation de la bande passante de la fibre optique est donc maximisée.

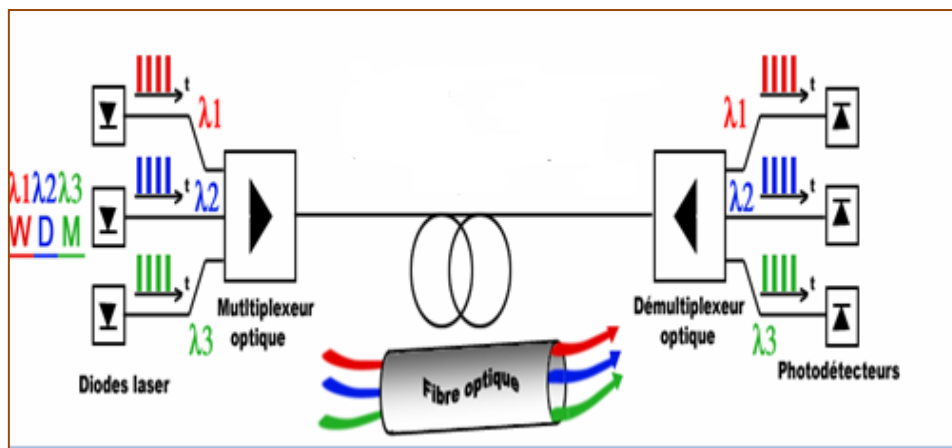


Fig.I23 : Schéma synoptique du multiplexage WDM.

Les systèmes WDM commercialisés aujourd'hui comportent 4, 8, 16, 32, 80 voire même 160 canaux optiques, ce qui permet d'atteindre des capacités de 10, 20, 40, 80, 200 voire jusqu'à 400 Gb/s en prenant un débit nominal de 2,5 Gb/s et de quatre fois plus avec un débit nominal de 10 Gbps. Ainsi, on obtient 3200 Gb/s ou 3,2 Tb/s (Térabits par seconde) avec 80 canaux

optiques à 40 Gb/s. Il existe plusieurs types de WDM en fonction des longueurs d'ondes utilisées [33] :

- Le CWDM pour Coarse Wavelength Division Multiplexing
- Le DWDM pour Dense Wavelength Division Multiplexing

Les deux technologies fonctionnent de manière identique, la seule différence est le nombre de canaux (i.e. de longueurs d'onde) utilisables. La DWDM décrit par la recommandation (ITU-T G.694.1.) utilise un espacement entre deux longueurs d'ondes égal ou inférieur à 0,8 nm contre 20 nanomètres pour le CWDM ce qui permet d'avoir un nombre de canaux normalisés beaucoup plus important (de 96 à 160 théoriques contre 18). L'autre différence notable entre ces deux technologies est la distance maximale et le débit que l'on peut atteindre. Le fonctionnement de ces liaisons est dû à la découverte de l'amplificateur à fibre dopé à l'erbium EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), ce qui permet de compenser les pertes d'insertions dues au multiplexage et au démultiplexage des longueurs d'ondes, et de limiter le bruit qui parasite les liaisons. Cependant, cette technologie nécessite pour l'instant des relais tous les 50 à 100 km.

Tableau (I3) : Comparaison de différents types de multiplexage.

Types	Fenêtres	Espacements (nm)	Canaux	Débits potentiels
C-WDM	2 ^{ème}	1,6 - 0,8	8 - 16	2,5 à 5 GHz
WDM	3 ^{ème}	0,6	32	320G à 1.28T
D-WDM	3 ^{ème}	0,4 - 0,2	80 - 160	3T à 12T
U-WDM	3 ^{ème}	0,08	400	10T à 40T

III. Conclusion :

Dans cette partie nous avons commencé par rappeler les principaux phénomènes physiques qui permettent de décrire une fibre optique, puis nous avons présenté les deux principaux types de fibre optique (multimode et monomode) en expliquant leurs avantages physiques qui

justifient leurs débits. Donc pour les télécommunications à grande distance, on utilise exclusivement des fibres monomodes, en raison de leurs caractéristiques favorables: plus petit affaiblissement et plus grand pouvoir de transmission. La fibre optique monomode la plus couramment employée dans le domaine des télécommunications demeure la fibre G.652, d'autres types de fibres ont été développés en référence à celle-ci. Nous avons vu aussi que le principal facteur de limitation technologique de débit est la dispersion c'est pourquoi le contrôle de la dispersion chromatique tout au long d'une liaison par fibre optique est indispensable. Il faut concevoir des fibres spécifiques qui présentent une dispersion faible dans toute la fenêtre de transmission utilisée.

Références Chapitre I :

[1] Irène et Michel Joindot, “ Les télécommunications par fibres optiques,” Dunod, Paris, 1996.

[2] Gourmala Ouassila, “ Étude et Réalisation des Réseaux de Bragg pour des Applications Photoniques , ” Mémoire de magister de l'université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2006.

[3] Stéphane Dellier, “ Contribution à la conception des circuits micro-ondes , ” Thèse de doctorat de l'université de Limoges, 2005.

[4] Nassima Boudrioua, “ Étude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD, ” Thèse de doctorat de l'université Paul Verlaine – Metz, 2007.

[5] E. Cassan, “ Une introduction aux télécommunications optiques pour la simulation de systèmes simple, ” site web J3eA-BibSciences.org, 2(2003) 1-29.

[6] ARCEP , “ La montée vers les hauts débits, ” Site web : <http://www.arcep.fr/>, Septembre 2010

[7] Bendriham Abdelaziz, «Etude des phénomènes liés à la propagation dans les fibres optiques», Mémoire de magister de l'Université de Batna, 2009.

[8] Sébastien Forget, “ Cours d'Optique Instrumentale.” Site web: www.ucam.ac.ma/fssm/optima, 2007- 2008.

[9] 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.

[10] Pierre-André Bélanger, “Les fibres optiques: Supplément électromagnétisme appliqué, ” Université de Laval, Canada.2002.

[11] Yoann Jestin, “ Verres fluorés à base de fluoroindate et fluorogallate pour l'amplification optique : fibres à forte ouverture numérique, guides d'onde planaires et spectroscopie des ions de terre rare, ” Université du Maine, France, 2002.

[12] Julien Maury, “ Étude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique , ” Thèse de doctorat de l'université de Limoges, France, 2003.

[13] Jean-Louis Verneuil, “ Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s, ” . Thèse de doctorat de l'université de Limoges, France, 2003.

[14] Romain Maciejko, “ optoélectronique , ” <http://www.books.google.fr>

[15] Christian-Cyril CORDAT “ La fibre optique compensatrices de dispersion chromatique pour application aux liaisons optiques WDM » christian.caleca.free.fr/fibre.html, 2003.

[16] Younes Zouine , “ Contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant la technique CDMA , ” Thèse de doctorat de l'université de Limoges, France 2005.

[17] Mehdi Haïtami, “Optimisation multicouche heuristiques WDM tabou pour la résolution à moindre cout du problème de groupage de routage et d'affectation d'ondes, ” Thèse de doctorat, université de Sherbrooke (Québec) , Canada, 2014.

-
- [18] MEDJDOUB Fadila, “Optimisation par la simulation système d’une chaîne de transmission numérique par fibre optique haut débit,” Mémoire de magister Tlemcen, 2010.
- [19] Hervé Gouraud, “ Filtrage opto-microonde par synthèse optique de réponse impulsionnelle , ” Thèse de doctorat de l’université de Limoges, France, 2004.
- [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] 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
- [22] 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.
- [23] Ali Guermache, “ Étude et réalisation de lasers de pompe à 1480nm pour l’amplification Raman, ” Thèse de doctorat de l’école nationale supérieure des télécommunications, 2005.
- [24] 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.
- [25] Farouk KHECIB, “ Etude et mise au point de la migration d'une liaison optique WDM en exploitation vers des hauts débits , ” 2010.
- [26] Winzer, P.J., Essiambre, R.J., “ Advanced optical modulation formats, ” Proceedings of the IEEE 94(5), pp. 952–985 (2006).
- [27] Daniel Hardy, Guy Malleus, Jean-Noël Méreur, “ Réseaux » .Site web: <http://www.books.google.fr>.
- [28] S. O. KASAP, “ Optoelectronics and photonics,” Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001.
-

[29] 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.

[30] 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.

[31] M. Thual, “ Télécommunications optiques 2. Composants actifs, télécoms optiques , ” Université de Rennes 1, France, 2004-2005.

[32] A. Boudkhil, A. Ouzzani, B. Soudini, “ Evaluation des Performances des Photodiodes PIN et APD dans une Chaîne de Communication Optique à Haut Débit via Optisystem, ” Revue Méditerranéenne des Télécommunication Vol 5, Issue 2, pp 53-62, March 2015.

[33] Agrawal, G.P, “Fiber Optics Systems, ” 2nd Ed., John Wiley & Sons 1992.

CHAPITRE II:

Réseaux d'accès optiques

Ce deuxième chapitre présente le réseau d'accès optique. Un intérêt particulier est porté à l'architecture G-PON (Gigabit Passive Optical Network) normalisée par l'ITU (International Télécommunication Union). Le principe de fonctionnement, les caractéristiques et les limites de cette technologie seront exposés. Nous entamons dans notre étude des technologies pour les nouvelles architectures de réseau d'accès par les techniques de multiplexage les plus répandues, à savoir le multiplexage temporel et/ou le multiplexage en longueurs d'onde avec leurs points forts et leurs limites. Ainsi la migration du G-PON actuel vers les nouvelles technologies pour le réseau d'accès appelés NG-PON sera explicitée.

II.1. Introduction :

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 [1]. Les techniques d'accès numérique fleurissent dans tous les domaines qu'autorise la transmission : sur les câbles de cuivre (réseau téléphonique pour l'ADSL) ou des ondes radio (Wi-Fi, WiMAX...). Ces techniques sont assez peu coûteuses car elles ne nécessitent pas de travaux lourds, elles offrent cependant des performances limitées, avec des portées de quelques kilomètres et des débits de quelques Mbit/s au mieux. Or les abonnés, que ce soit les particuliers, les professionnels ou les acteurs publics, ont besoin aujourd'hui de débits toujours plus élevés, voire symétriques, avec une meilleure réactivité du réseau, pour des usages comme la vidéo haute définition, le partage de fichiers volumineux. Ceci amène les opérateurs à envisager des solutions plus performantes avec la fibre optique [1].

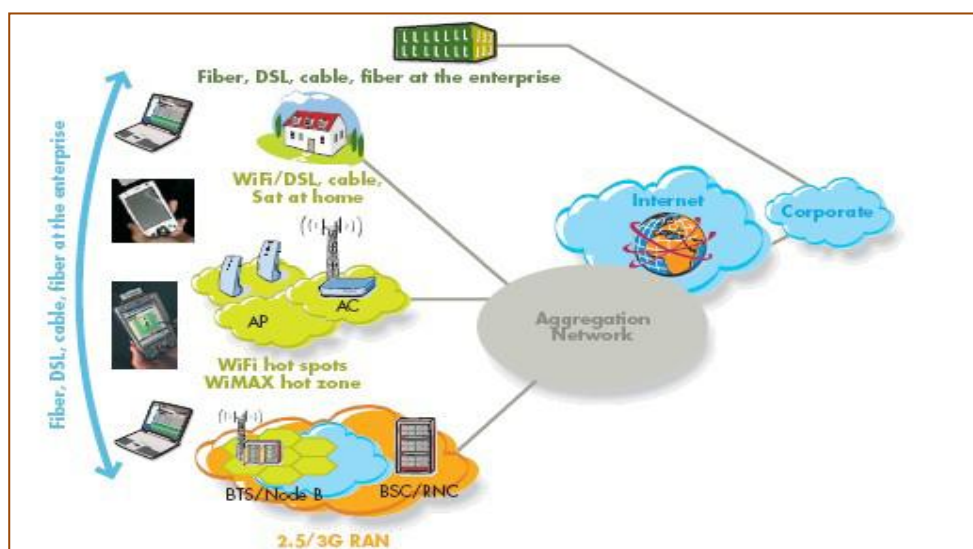


Fig. II.1 : Schématisation d'architecture d'un réseau d'accès.

L'introduction de la fibre optique dans les réseaux d'accès présente de nombreux avantages comparativement aux autres médias de transmission tels que la paire torsadée, les câbles coaxiaux ou encore la voie hertzienne [2,3]:

- ◆ la bande passante quasi illimitée des fibres optiques permet d'obtenir une plus grande capacité de transmission de données jusqu'à l'abonné final ;
- ◆ la distribution sur fibre optique permet de réduire les coûts de gestion et de maintenance du réseau.
- ◆ La pénétration progressive de la fibre optique dans les réseaux d'accès nous amène chaque jour un peu plus près du concept du réseau tout optique.

En outre, les fibres optiques offrent aujourd'hui les débits conformes au très haut débit aussi bien dans le sens descendant que montant, ainsi les problèmes d'éloignement sont abolis et tous les usagers ont la possibilité de bénéficier du même niveau de service.

II. 2. Réseaux d'accès optique :

Le réseau d'accès optique est souvent constitué par une partie en fibre optique suivie d'une partie en conducteur métallique qui va jusqu'au terminal de l'abonné. Selon la localisation de la terminaison du réseau optique les fibres optiques peuvent être déployées selon diverses topologies FTTx où la variable « x » décline le niveau plus ou moins profond de déploiement de la fibre vers l'utilisateur final. Les technologies FTTx (Fiber To The x) consistent à remplacer le support téléphonique classique en cuivre par la fibre optique, sur une partie de la boucle locale de l'utilisateur. Comme la fibre optique présente un bien meilleur affaiblissement que le cuivre, elle permet de proposer des offres d'accès à des débits supérieurs et avec une couverture plus large que les technologies xDSL utilisées seules [4].

La fibre optique est amenée jusque chez l'abonné et apporte le 1Gbit/s par utilisateur avec FTTH mais pour des raisons de coût, l'arrivée de la fibre peut s'arrêter de façon plus proche vers l'abonné (au trottoir) avec FTTC (Fiber to the Curb) ou à l'entrée dans le bâtiment avec FTTB (Fiber to the Building). Dans ces deux derniers cas, la continuité s'effectue par le biais de câbles métalliques jusqu'à la porte de l'utilisateur. La figure ci-dessous illustre les différentes architectures FTTx [5].

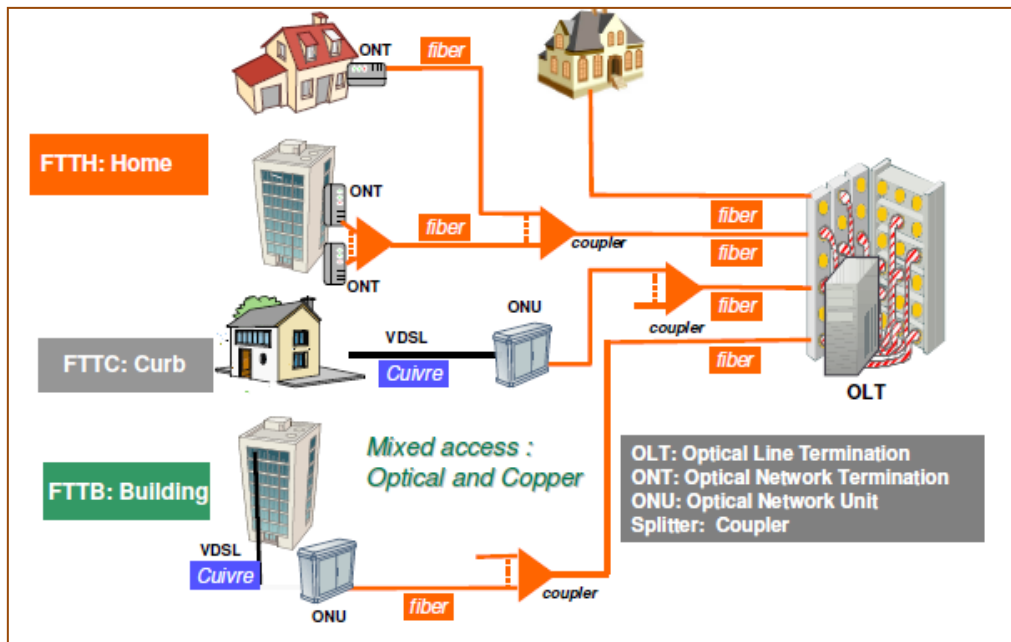


Fig. II.2: Technologie de la FTTX.

II.3. La technologie FTTH :

FTTH est l'acronyme de Fiber To The Home qui signifie « fibre optique jusqu'à l'abonné » en français. C'est un réseau de télécommunications qui se termine en fibre optique au domicile de l'abonné et offre des débits qui peuvent atteindre 2 Gbit/s, il est largement reconnu comme la solution optimale pour la diffusion du haut débit dans les communautés nouvelles et existantes. Comparable au câble dans son installation, puisqu'il nécessite la pose de fibres optiques jusque chez l'abonné, le FTTH est principalement utilisé dans les zones urbanisées en raison de son coût élevé de déploiement. Il est toutefois bien adapté aux zones rurales car la fibre optique offre l'avantage de pouvoir transporter le signal sans dégradation sur de longues distances, contrairement à la paire de cuivre. Cette technologie est déjà utilisée en milieux urbains en Asie du Sud - Est et aux États-Unis, ainsi que dans quelques agglomérations européennes. D'après un rapport publié par l'IDATE « Institut pour le Développement et l'Aménagement des Télécommunications et de l'Économie », l'Asie domine toujours très largement le classement des continents les plus fibrés [6, 7, 20]. L'inconvénient principal de FTTH pour les opérateurs est le coût de l'installation. En effet, il faut déployer de nouveaux câbles dans le sol ou dans les airs afin de raccorder chaque habitation à ce nouveau réseau. C'est d'ailleurs pour cette raison que le nouveau réseau de fibre optique se développe surtout dans les zones très urbanisées pour l'instant.

II.4. Déploiement des réseaux d'accès optique :

Le déploiement des réseaux d'accès optique était très limité jusqu'en 2003. Il était cantonné à quelques liaisons point-à-point « P2P » pour connecter des entreprises ayant besoin d'une bande passante importante. Le premier véritable déploiement a eu lieu au Japon et son essor accroît actuellement à très grande vitesse. La liaison point-à-multipoint « P2P » est l'architecture très majoritairement choisie dans ce type de réseau, cette technologie offre une large bande passante à l'utilisateur. Ainsi la technologie FTTH remplace progressivement le xDSL.



Fig. II.3: Différentes architectures de la technologie FTTH a) Point-à-Point, b) Point-à-multipoints.

- Liaison point à point ou « P2P » est l'architecture physique la plus simple à envisager. En effet, il s'agit de remplacer les paires de cuivre, dédiées par une fibre optique dans le cas d'un réseau FTTH. Elle consiste de disposer à chaque abonné sa propre fibre de chez lui jusqu'au nœud de raccordement optique (NRO). C'est une solution très coûteuse mais avantageuse au niveau de la sécurité de transfert puisque les données des différents utilisateurs sont séparées.
- Contrairement à un réseau de type FTTH-P2P, le FTTH partagé (point à multipoints ou P2MP) permet de mutualiser une partie du réseau entre différents usagers. La fibre optique entre l'abonné et le NRO est partagée grâce à un répartiteur supplémentaire installé en amont. Cette solution est moins coûteuse à mettre en œuvre mais elle ne permet pas d'ajuster facilement le débit, en plus d'employer des composants passifs ce qui diminue énormément les coûts de chaque connexion [8,9].

II.5. Description des réseaux optiques passifs :

Le réseau optique passif PON (Passive Optical Network) est un réseau point-multipoint (P2MP) dans lequel le médium est la fibre optique qui se présente sous la forme illustrée à la figure (II.4). Il est composé d'éléments optiques passifs, car les distances à parcourir ne

nécessitent pas de régénération du signal ; ceci évite le besoin de courant électrique entre le nœud central de distribution et l'abonné, et réduit les coûts de matériel, d'installation, d'opération, et d'entretien du réseau [10].

Il se caractérise d'une manière générale par les entités suivantes : un système de terminaison de ligne optique l'OLT (Optical Line Terminal) situé dans le site technique de l'opérateur , une unité de réseau optique ONU (Optical Network Unit) qui dessert directement le domicile de l'utilisateur si elle est partagée entre plusieurs clients et suivie d'une transmission secondaire (cas des FTT Cab / FTTC / FTTB) ou une terminaison de réseau optique ONT (Optical Network Termination) si elle est mono client cas de FTTH et des éléments passifs (fibre et splitter ou coupleur) situés dans la partie du réseau de distribution assurant l'interconnexion entre un OLT et plusieurs ONT [3, 11,21].

Cette solution est moins coûteuse à mettre en œuvre mais elle ne permet pas d'ajuster facilement le débit [11]. En revanche elle offre l'avantage de limiter le nombre de fibres à déployer grâce à l'utilisation du répartiteur optique (splitter) fonctionnant comme un hub.

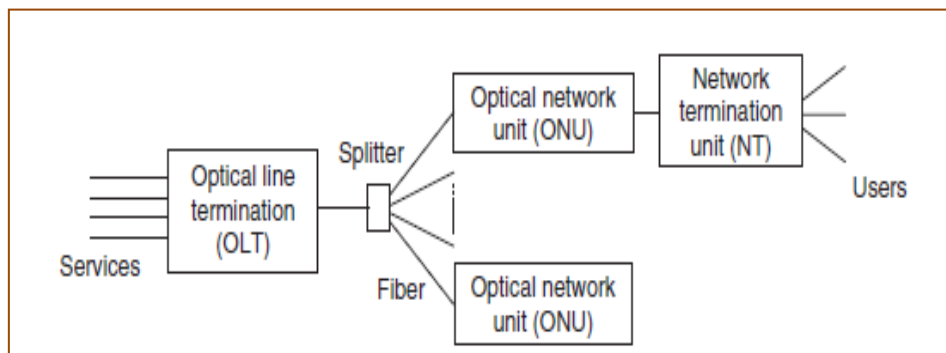


Fig. II.4 : Schéma simplifié d'un réseau d'accès optique point à multipoint.

Les architectures PON peuvent être organisées en étoile (un coupleur en sortie de chaque port PON de l'OLT dessert plusieurs ONT), en arbre (en cascade des coupleurs, un coupleur pouvant desservir plusieurs sous-branches) et/ou en bus (sérialisation des coupleurs). C'est l'architecture en arbre qui est la plus souvent déployée.

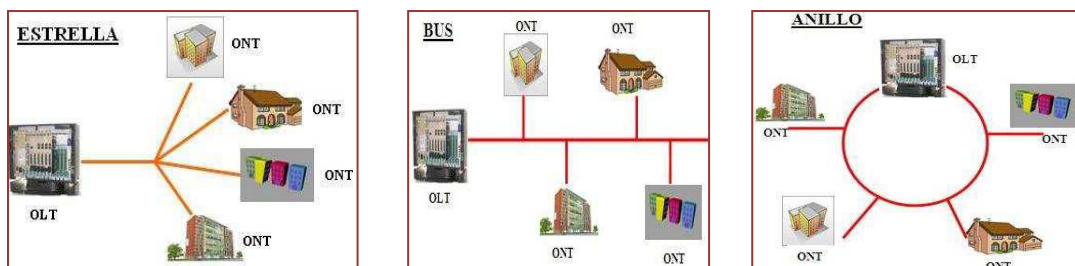


Fig. II.5: Topologies de base: (a) arbre; (b) bus; (c) anneau.

II.6. Standardisations du PON :

Les technologies associées aux PON (Passive Optical Network) sont de type ATM, Ethernet ou Gigabit (UIT-T), ce qui donne naissance aux G.983 Broadband Passive Optical Network UIT-T (BPON) [12], le UIT-T G.803.2ah Ethernet Passive Optical Network (de EPON) [13] et de l'UIT-T G.984 Réseau Gigabit-capable Passive Optical GPON [14].

Le G-PON utilise l'ATM pour la voix, l'Ethernet pour les données et une encapsulation propriétaire pour d'autres services. Par contre l'EPON utilise l'IP pour transporter les données, la voix et la vidéo [10,15,38]. Tous ces PON utilisent le multiplexage temporel (TDM) dans le sens descendant, où les données sont envoyées sur une seule et même porteuse optique, et Time Division Multiple Access (TDMA) pour le sens montant [16,17]. Le tableau ci-dessous reprend les principales caractéristiques des normes portant sur les technologies PONs définies à l'ITU-T [10, 18,38].

Table II.1 : Récapitulatif des performances des PON normalisés.

Caractéristiques	<i>EPON</i>	<i>BPON</i>	<i>GPON</i>
Standard	IEEE.802.3ah	ITU G983	ITU G984
Débit des données (Mbps)	Descendant : 2500 Montant : 1250	Descendant : 1244, 622, 155 Montant 622, 155	Descendant : 2488, 1244 Montant : 2488, 1244 ,622, 155
Longueur d'onde (nm)	Descendant : 1490 Montant : 1310	Descendant : 1490 Montant : 1310	Descendant 1490, 1550 Montant : 1310
Abonnés par port OLT	32 max	64 max	128 max
Distance logique OLT-ONT	10 Km, 20km	20 km	60km au max, 20 Km différentiel

II.7. Réseau GPON :

GPON est l'acronyme 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 dans la voie descendante et 1,25 Gbit/s dans la voie montante pour 32 ou 64 utilisateurs. La distance de fonctionnement de 20

km est fixée entre le central et le client le plus éloigné. Cette distance correspond à une portée typique avec un taux de partage 1 : 64. Mais si on raisonne en termes de portée logique, cette distance serait de 60 km avec un taux de partage de [14, 19,20].

Le GPON utilise une longueur d'onde porteuse de 1,31 (bande O) dans le sens montant avec une atténuation typique de 0.31dB/ Km et 1,49 (bande S) avec une atténuation de 0.25 dB/Km dans le sens descendant. Néanmoins, pour séparer les deux longueurs d'onde, les ONTs utilisent des duplexeurs optiques. Optionnellement, le réseau GPON permet la diffusion de télévision TV, pour cela une troisième longueur d'onde est nécessaire. En fait, la longueur d'onde retenue par le réseau est de l'ordre de 1,55µm (bande C) avec une atténuation 0.2 dB/Km. Dans ce cas, un système WDM est nécessaire pour multiplexer les longueurs.

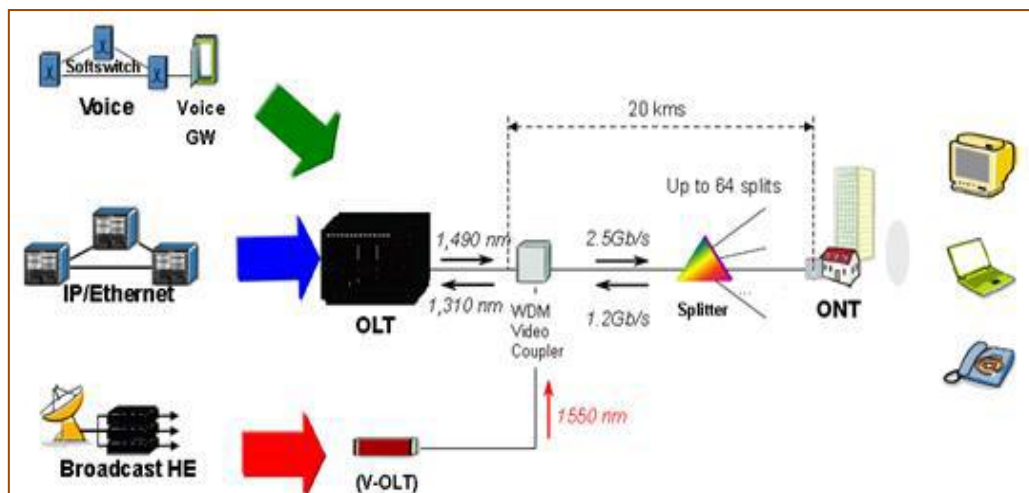


Fig. II.6: Architecture du réseau d'accès GPON.

Les dispositifs GPON offrent 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) (figure II.6) à tous les abonnés privés et aux entreprises. Cette technique est la solution qui a été choisie par l'équipe France Télécom « FT » pour le déploiement de la FTTH (Fiber To The Home), elle exploite la puissante bande passante et offre une connexion fiable longue portée jusqu'au dernier kilomètre [20 ,21].

II.7.1. 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 fibre de transmission unique qui part du central est raccordée à un groupe

de liaisons fibres distributions au niveau d'un point de partage afin de desservir plusieurs habitations. Un coupleur (ou splitter) qui permette la transmission des longueurs d'ondes [18,22].

a. Optical Line Terminal «OLT» :

C'est l'équipement actif qui transforme le signal électrique venant du réseau de l'opérateur, en signal optique en direction des usagers « ONT » [20,21]. Il peut être considéré comme un DSLAM optique. Un gestionnaire propre à chaque fournisseur permet d'implémenter à chaque ONT son identification, sa position dans le réseau, la déclaration des services qui lui sont attribués, leur priorité, ...etc... Ce gestionnaire permet également d'observer le fonctionnement du GPON par l'intermédiaire d'alarmes provenant de l'ONT



Optical Line Terminal "OLT"

b. Optical Network Unit « ONU »:

L'ONU ou « Termination de Réseau Optique » (également appelée ONT Optical Network Termination) est l'équipement actif installé chez l'abonné qui permet de transformer le signal optique venant de l'OLT en signal électrique, il peut être considéré comme un modem optique auquel le client vient connecter sa passerelle d'accès au haut débit.



Optical Network Unit « ONU »

c. Coupleur optique « splitter »:

La distribution du signal vers chaque unité de réseau est effectuée à l'aide d'un composant appelé splitter qui divise le signal en provenance de l'OLT ; dans le sens montant, il combine

par addition les signaux optiques en provenance des abonnés (ONUs). Les pertes qui affectent de façon très importante le budget de liaison sont l'inconvénient majeur du coupleur. Ces pertes s'élèvent à $10 \times \log N$ pour un coupleur $1 \times N$, ce qui donne environ 15 dB pour un partage entre 32 utilisateurs. Le passage à des taux de partage plus importants est donc très limité [21, 24,38].



Coupleur optique « splitter »

II.7.2. Modes de transmission d'un réseau GPON :

L'architecture GPON consiste en un partage de la fibre principale le plus possible entre les utilisateurs avec un multiplexage entre la voie descendante et la voie montante (figure II.7).

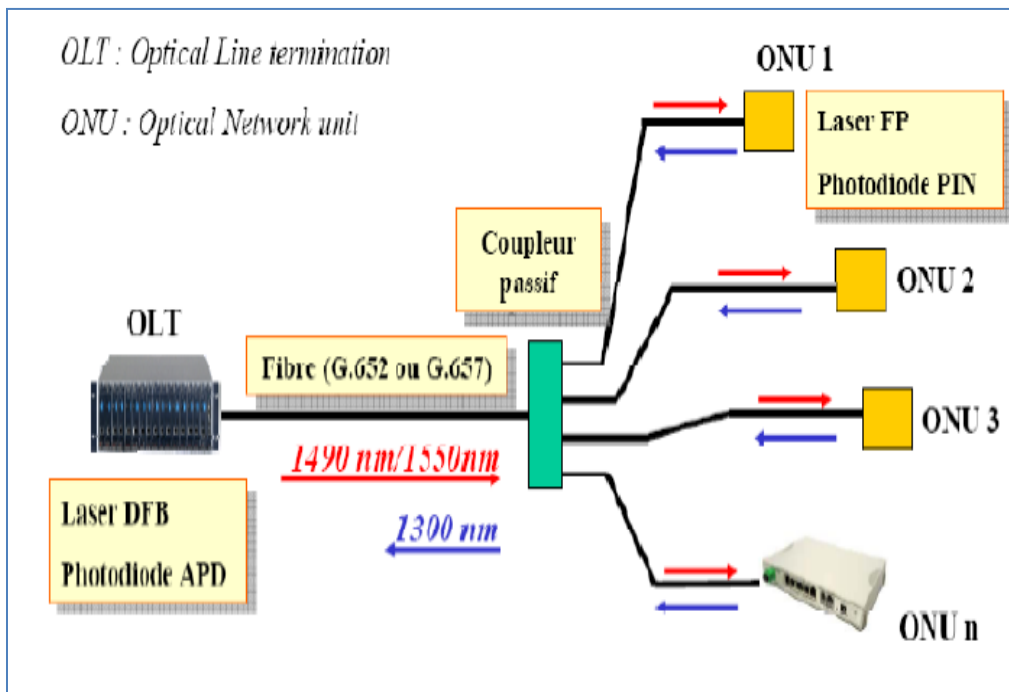


Fig. II.7: Principe de fonctionnement de l'architecture G-PON

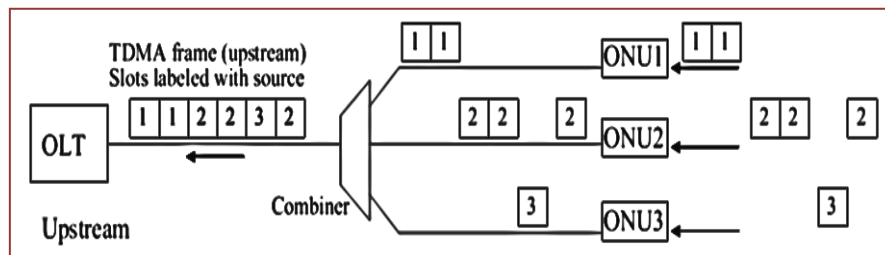


Fig. II.9 : Principe de fonctionnement de G-PON (sens montant).

II.7.3. 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 est définie comme étant la distance entre l'OLT et les ONTs qui peut être achevée sous les bonnes conditions en tenant compte juste 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 peuvent atteindre une valeur de 1: 64 .

II.7.4. Avantages et limites d'un réseau GPON :

La technologie GPON présente des avantages et des inconvénients :

✓ Avantages du G-PON

- La structure est passive car elle est à base de coupleurs optiques
- Le génie civil est optimisé et le coût réduit
- Infrastructure partiellement partagée (économie sur la fibre)

✓ Inconvénients du G-PON :

- En raison de leur taux de partage, le GPON assure un débit moyen par usager d'environ 30 Mb/s.
- Nécessité de composants à bas coût en raison du faible taux de mutualisation aux extrémités.
- Le budget optique est limité par le coupleur dont les pertes sont proportionnelles au nombre de ports.
- La sécurité des données en réception n'est pas optimale car l'ensemble des utilisateurs reçoit l'ensemble du flux émis par le central.

✓ Les prochaines générations de PON tendent à s'orienter autour trois axes :

- Accroître le nombre de longueur d'onde sur le PON en utilisant la technique du multiplexage en longueur d'onde (WDM),
- Augmenter le débit final afin d'atteindre une capacité de 10 Gbits/s.
- Etendre le nombre d'ONT par PON à 128 ou plus.
- Augmenter la portée entre ONT et OLT en utilisant par exemple des amplificateurs optiques, permettant ainsi de relier plus d'abonnés.

II.8. Classes de la norme GPON :

Le budget optique (ou gamme d'affaiblissement optique tolérée) détermine la classe de réseau. Il existe plusieurs classes de budget selon les performances de l'OLT et des ONU. Les classes A, B, B+, C, C+ sont définies par la norme GPON [28,29,31].

Table II.2. : Normes de GPON

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

La notion de budget optique prend de l'importance pour le GPON. Elle constitue la principale limite dans la réalisation d'architecture d'accès optique sur une longue portée. La performance réelle, en termes de portée et de taux de partage, se quantifie par le nombre de coupleurs

(splitters) partageant le signal optique sur l'arborescence. Aujourd'hui, la solution GPON déployée se situant dans la classe B+ est ainsi définie avec un minimum de 13dB de pertes depuis l'OLT pour le client le plus proche et un maximum de 28dB pour le client le plus éloigné. Ce budget est consommé par le taux de partage, la connectivité et la portée [30,32]. La figure ci-dessous illustre un schéma justifiant le budget défini pour la classe B+.

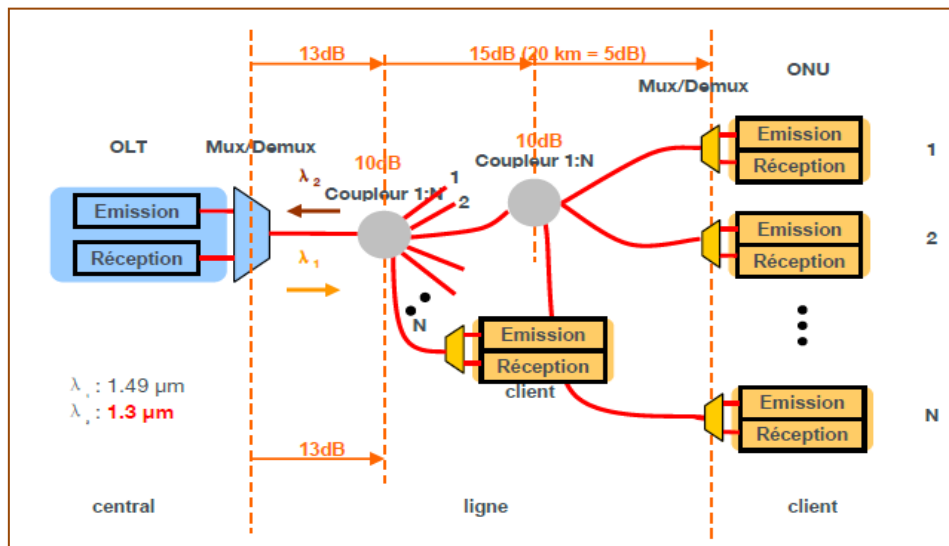


Fig. II.10: Schéma justifiant le budget du G-PON de classe B+

II.9. Limitations du budget optique du GPON:

Dans le système GPON actuel, la portée est limitée en raison de l'utilisation d'un budget optique de Classe B+ (13-28 dB) qui est restreint. Il utilise un multiplexage temporel (TDM) pour partager un débit de 2488 Mb/s dans le sens descendant et de 1244 Mb/s dans le sens montant entre un maximum de 64 abonnés, sur une distance pouvant atteindre 60 km entre le central et le client le plus éloigné. Si cette portée des GPON est suffisante dans les zones urbaines où les abonnés sont situés à des distances relativement faibles des centraux optiques, de l'ordre de 5 à 10 km, ce n'est pas le cas des abonnés situés dans les zones rurales. Dans ces zones, les abonnés sont souvent dispersés géographiquement et sont donc le plus souvent situés à une distance des centraux optiques supérieure à la portée classique du réseau. Ces abonnés ne peuvent donc pas bénéficier des services offerts par la transmission haut débit. Il existe donc un besoin d'augmenter la portée de ce réseau pour pouvoir desservir les abonnés situés dans ces zones rurales.

En pratique, cette limite n'est pas gênante aujourd'hui. Mais dans un futur proche, pour fournir un accès FTTH à tout type de client, il est nécessaire de développer une solution

économique adaptée à tout type de démographie. Autrement dit, pour couvrir une zone plus large et un plus grand nombre de client, un système PON amplifié est nécessaire [33].

II.10. Extension de la portée des réseaux GPON :

Pour augmenter le budget optique, des technologies *d'extension de portée* apparaissent. Deux technologies sont alors envisageables comme :

- ◆ L'utilisation d'amplificateurs optiques (OA) [34].
- ◆ La technique de régénération optique-électrique-optique (OEO) [35].

Les longueurs d'onde peuvent être amplifiées pour compenser les pertes dues à la longue distance de transmission des fibres ou /et les pertes passives élevées (pertes du coupleur, du multiplexeur, etc...) [20, 23,33]. Une recommandation sur l'architecture PON à extension de budget a été approuvée à l'ITU en 2008. L'aspect extension de portée ou Reach Extender en anglais se voit comme une solution basée sur un boîtier actif positionné dans l'infrastructure qui permet l'augmentation du budget optique. Le principe du GPON avec un Reach Extender (ou RE) est illustré dans la figure II.11, on voit que le système peut fournir une portée physique de 60 km avec un taux de partage de 1 : 128 en raison de l'augmentation de la puissance optique dans la ligne principale [23].

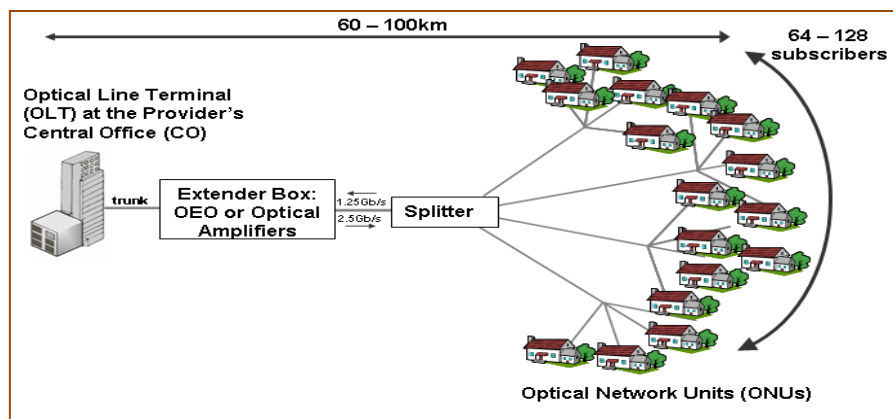


Fig. II.11: Principe de fonctionnement de G-PON intégrant un Reach Extender (sens descendant).

II.11. Amplificateurs optiques pour les réseaux d'accès

Plusieurs études ont été faites sur l'introduction de l'amplification dans le réseau d'accès. Les candidats retenus sont le SOA, le RSOA pour Reflective Semiconductor Optical Amplifier, l'EDWA pour Erbium Doped Waveguide Amplifier et le ROPA pour Remote Optical Pumped Amplifier [23].

L'amplificateur à fibre le plus utilisé dans une architecture PON est l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium dit EDFA pour Erbium Doped Fiber Amplifier aux alentours de 1550 nm pour la composante vidéo. Celui-ci possède de meilleures performances en gain et en NF par rapport au SOA. De plus, il n'introduit pas de diaphonie pour l'amplification de signaux WDM. L'inconvénient de l'introduction des EDFAs dans un réseau PON reste le coût de revient du système par rapport à une solution avec des SOAs. De plus, les budgets optiques atteints pour ces deux types d'amplification sont respectivement de l'ordre de 46.5dB pour l'EDFA [36] et 54dB pour SOA [37]. Pour l'amplification d'un signal dans la bande O aux alentours de 1300 nm, il existe des amplificateurs à fibre dopée au praseodymium dit PDFA. Toutefois, ces longueurs d'onde n'ont pas connu un usage commercial significatif dans les réseaux longs distances et n'ont pas permis un développement de ces amplificateurs comme les amplificateurs dopés à l'erbium.

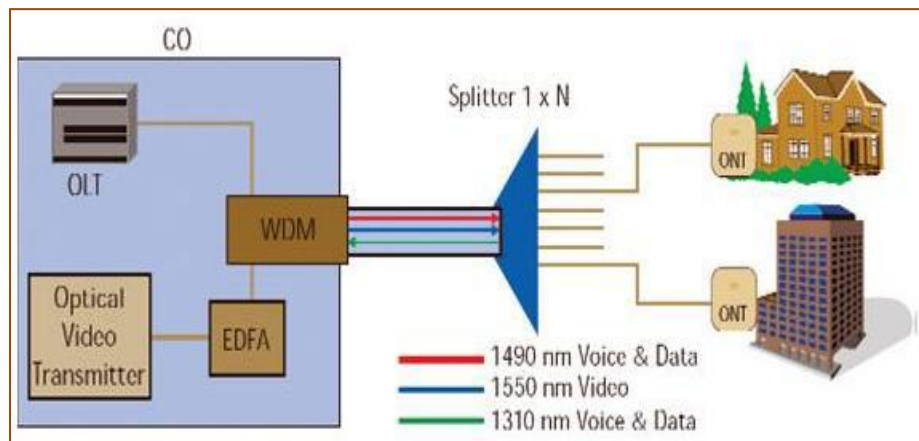


Fig. II.12: Principe de fonctionnement de G-PON amplifié (sens descendant)

II.12. 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 nombreuses recherches pour trouver et normaliser les composants, les architectures et les protocoles du réseau d'accès de demain, dénommé "projet NGA" (Next Génération Access), toujours en fibre optique. Le débit et la portée peuvent être augmentés tout en gardant le même nombre d'abonnés desservis par réseau [20,38].

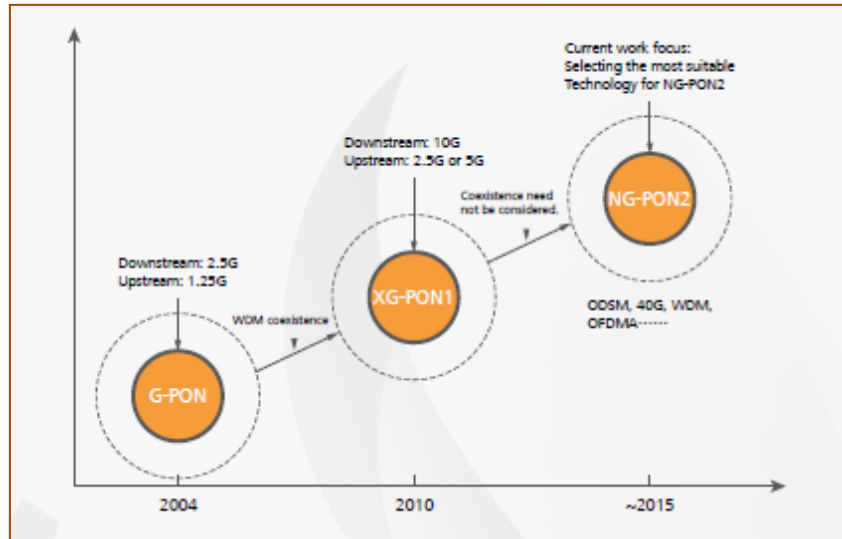


Fig. II.13: Nouvelles normes G-PON

Les offres commerciales pour le très haut débit, actuellement basées sur le GPON, proposent au client un débit de 2.5 Gbit/s descendant et de 1.25 Gbit/s dans le sens montant. Pour proposer d'avantage et aller vers le ultra haut débit, les opérateurs effectuent de nombreuses recherches pour trouver et normaliser les composants, les architectures et les protocoles du réseau d'accès de demain. La figure 1.8 schématise la montée en débit au cours des années en fonction des différents types de réseaux existants ou futurs.

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 descendant et 2,5 Gbit/s montant. Ils y a quelques temps l'ITU et le FSAN envisageaient une deuxième sous-étape de migration nommée XG-PON2 permettant entre autres d'augmenter le débit montant et d'offrir ainsi 10 Gb/s symétrique. La seconde, NG-PON2, dont la pré-normalisation a déjà commencé, devrait voir le jour après 2015 [39].

II.12.1. Le standard NG-PON1 :

Le NG-PON1 est caractérisé par son infrastructure passive (fibre, coupleurs, ..etc..) se voudrait calquée sur celle du GPON, en autorisant ainsi la migration progressive des clients vers le NG-PON1 sans perturber les clients restés sur le G-PON. Il existe deux variantes du NG-PON1 : le XG-PON1 et le XG-PON2.

Table II.3. : Normes de XGPON1 et X GPON2.

	XGPON1	XGPON2
Débit Descendant (Gbit/s)	10	
Débit Montant (Gbit/s)	2,5	10
Longueur d'onde voie descendante (nm)	1570-1580	ND*
Longueur d'onde voie montante (nm)	1260-1280	ND*
Budget optique (dB)	Classes N1, N2 et E	ND* (Overlay B+ possible)
Portée (km)	60km avec Δ de 20km	

Selon le tableau (II.3), les XG-PON1 se caractérisent par un débit descendant de 10 Gbit/s associés à un débit montant de 2,5 Gbit/s avec l'émission des signaux à deux longueurs d'ondes (1575 et 1580 nm) et les signaux montants entre 1260 et 1280 nm. Alors que La variante XG-PON2 se distingue du XG-PON1 par un débit descendant et montant de 10 Gbit/s avec des longueurs d'onde qui n'ont pas encore été spécifiées. La portée maximale pour les deux variantes est définie comme étant la même que celle du G-PON, à savoir 60 km avec une différence maximale de 20 km entre le client le plus proche et celui le plus éloigné du central.

II.12.2. Le standard NG-PON2 :

D'après les pré-spécifications, le NG-PON2 se concentre sur des technologies bas-coûts et évolutives comme par exemple des PON TDM très haut débits, des PON WDM, des solutions hybrides de PON WDM-TDM, ou encore des solutions de multiplexage fréquentiel OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), ..etc.. Il devrait offrir un débit dans le sens descendant de 40 Gb/s et de 10 Gb/s ou plus dans le sens montant. La portée nominale devrait être de 20 km et une distance maximale de 60 km sans répéteur est envisagée [40].

II.13. La technique de multiplexage dans le réseau PON

La technique de multiplexage utilisée pour concevoir les futurs réseaux d'accès optiques est influencée par le nombre d'utilisateurs, le débit par utilisateur, la distance de fonctionnement et le coût de l'architecture : par conséquent de nouvelles techniques de multiplexage seront peut-être alors nécessaires.

En effet, le multiplexage temporel « TDM-PON » permet de partager de manière flexible et dynamique la bande passante totale disponible entre plusieurs abonnés. Cependant, pour un débit très élevé (quelques Gb/s par abonné), la TDM-PON rencontre des limites au niveau de la synchronisation et des modules de réceptions à l'OLT. Donc cette technologie ne serait plus certainement une solution aussi attractive et compatible pour des débits supérieurs à 10 Gbit /s. Alors que la technologie WDM-PON est une excellente solution pour répondre à la demande d'un débit très élevé. La potentialité du WDM pour la future génération PON est pertinente grâce à sa forte capacité de montée en débit et au développement rapide des technologies de composants WDM.

II.13.1. PON avec multiplexage en longueur d'onde « PON-WDM»

La Wavelength Division Multiplexing « WDM-PON » est la prochaine génération en matière de développement des réseaux d'accès, ils peuvent offrir la plus grande bande passante à moindre coût. En principe, l'architecture de réseau PON-WDM est similaire à l'architecture de la PON-TDM, la principale différence est que la capacité totale de la bande passante du système d'accès est multipliée par le nombre de longueurs d'onde multiplexées sur la fibre. Les ONUs peuvent fonctionner à différentes longueurs d'onde, ce qui permet d'atteindre des taux de transmission et un débit plus élevé de transmission. L'exemple illustratif de cette architecture est représenté sur la figure II.14

Le choix des longueurs d'onde montante et descendante est donc ouvert. Il est par exemple possible de travailler uniquement dans la bande C (1530–1565 nm) sur la grille DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), car cette bande présente les pertes minimales (0.20 dB/km). Le DWDM requiert des émetteurs optiques onéreux, de fréquence stable et avec un contrôle de température sur la longueur d'onde. Mais un des avantages du DWDM est le gain dans la région de l'EDFA (Amplificateur à Fibre dopée Erbium) qui correspond à la bande C. Le déploiement des réseaux PON-WDM est fortement envisagé afin d'améliorer le bilan de liaisons optiques des réseaux PONs traditionnels, mais reste encore limité malgré leurs avantages car les technologies utilisées sont encore immatures (émetteurs et récepteurs dans les ONUs desservis) et leur coût élevé [17].

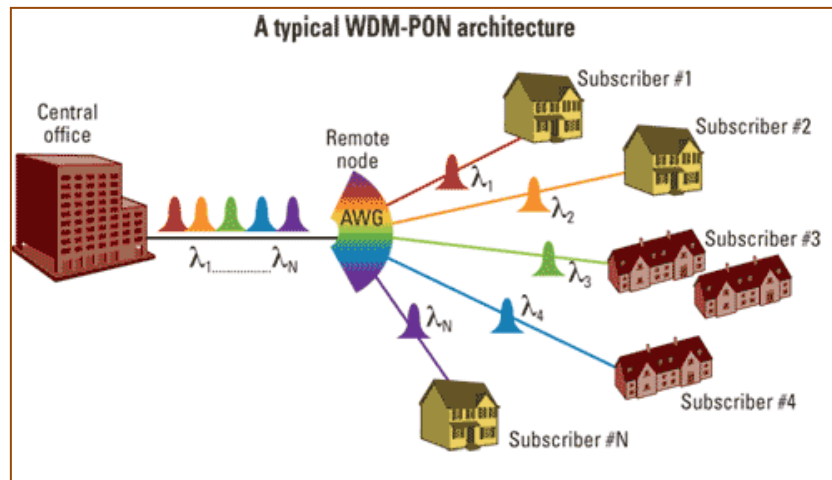


Fig. II.14: Principe de fonctionnement de l'architecture WDM-PON.

II.13.2. PON avec multiplexage hybride « WDM/ TDM-PON» :

L'inconvénient de WDM-PON est le coût élevé de l'équipement. Beaucoup de recherches ont été axées sur l'amélioration de la capacité de WDM-PON afin de servir un plus grand nombre de clients. En conséquence, certaines structures hybrides ont été proposées à la fois où WDM et modes sont utilisés pour augmenter le nombre d'utilisateurs potentiels. L'architecture typique d'un tel réseau est présentée sur la figure III.15.

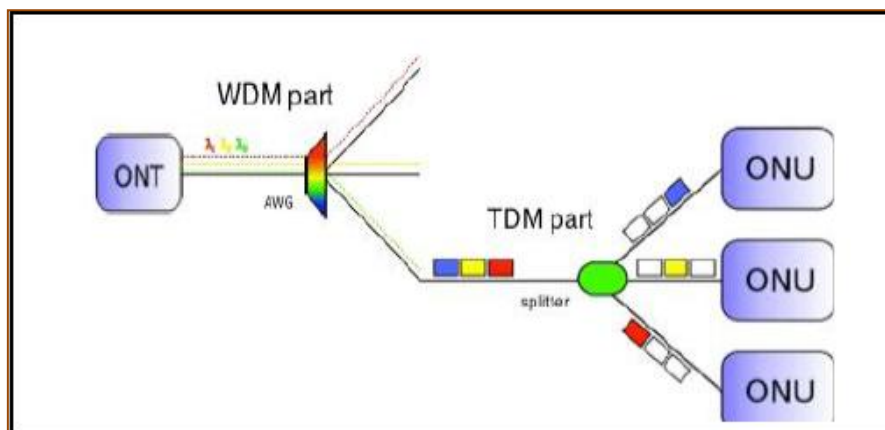


Fig. II.15: Principe de fonctionnement de l'architecture WDM/TDM-PON.

La WDM-PON hybride est une technologie qui combine les deux technologies TDM-PON et WDM-PON, elle consiste à superposer plusieurs TDM-PON grâce au WDM, ce qu'on appellera WDM-TDM PON. L'avantage de cette technologie hybride ou PON WDM-TDM est d'utiliser à la fois les avantages de l'allocation dynamique de la bande passante totale disponible très élevée grâce à la technologie TDM d'une part, et la possibilité de partager de

manière efficace le débit porté par une longueur d'onde entre plusieurs abonnés grâce à la technologie WDM d'autre part. L'inconvénient majeur pour ce système hybride. C'est le coût global qui est bien plus important que celui du TDM-PON [18,27].

II.14. Conclusion :

Les réseaux d'accès optique sont appelés désormais à combler les limites des réseaux sur paires de cuivres à cause de l'émergence de nouveaux services toujours aussi demandeur en bande passante. Les premiers réseaux devront utiliser la technique d'accès multiples à division dans le temps avant l'avènement d'autres techniques qui permettront d'augmenter non seulement la portée des réseaux mais aussi leur capacité. En effet, l'augmentation des débits de communication sur le réseau internet est une tendance de fond qui est rendue possible par le déploiement d'un réseau d'accès en fibre optique (FTTH, Fiber To The Home). Ce réseau d'accès optique de première génération utilise l'architecture PON (Passive Optical Network) mais à moyen terme, l'augmentation des débits nécessitera le passage vers une architecture WDM (Wavelength Division Multiplexing). Dans cette optique, on cherche à concevoir des composants accordables à faible coût. Ce travail est une contribution à la conception d'un amplificateur optique EDFA qui permet d'augmenter la puissance dédiée aux abonnés.

Références chapitre II :

- [1] : Irène et Michel Joindot, « Les télécommunications par fibres optiques », Dunod, Paris, 1996.
- [2] : Gourmala Ouassila, « Étude et Réalisation des Réseaux de Bragg pour des Applications Photoniques », Mémoire de magister de l'université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2006.
- [3] : Stéphane Dellier, « Contribution à la conception des circuits micro-ondes », Thèse de doctorat de l'université de Limoges, 2005.
- [4] : Nassima Boudrioua, « Étude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD », Thèse de doctorat de l'université Paul Verlaine – Metz, 2007.
- [5] : E. Cassan, « Une introduction aux télécommunications optiques pour la simulation de systèmes simple », site web J3eA-BibSciences.org, 2(2003) 1-29.
- [6] : ARCEP, « La montée vers les hauts débits », site web : <http://www.arcep.fr/>, Septembre 2010 .
- [7] : Bendriham Abdelaziz, « Étude des phénomènes liés à la propagation dans les fibres optiques », Mémoire de magister de l'Université de Batna, 2009.
- [8] : Sébastien Forget, « Cours d'Optique Instrumentale ». Site web: www.ucam.ac.ma/fssm/optima, 2007- 2008.
- [9] : 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.
- [10]: Pierre-André Bélanger, « Les fibres optiques: Supplément électromagnétisme appliqué », Université Laval, Canada.2002.
- [11] : Yoann Jestin, « Verres fluorés à base de fluorindate et fluorogallate pour l'amplification optique : fibres à forte ouverture numérique, guides d'onde planaires et spectroscopie des ions de terre rare », l'université du Maine, France, 2002.
- [12] : Julien Maury, « Étude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique », Thèse de doctorat de l'université de Limoges, France, 2003.
- [13] : Jean-Louis Verneuil, « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s ». Thèse de doctorat de l'université de Limoges, France, 2003.
- [14] : Romain Maciejko, « optoélectronique », . <http://www.books.google.fr>
- [15] : Christian-Cyril CORDAT « La fibre optique compensatrice de dispersion chromatique pour application aux liaisons optiques WDM » christian.caleca.free.fr/fibre.html, 2003.
- [16]: Younes Zouine , « Contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant la technique CDMA », Thèse de doctorat de l'université de Limoges, France 2005.
- [17] : Mehdi Haïtami, « Optimisation multicouche heuristiques WDM tabou pour la résolution à moindre cout du problème de groupage de routage et d'affectation d'ondes », Thèse de doctorat, université de Sherbrooke (Québec) , Canada, 2014.
- [18] : MEDJDOUB Fadila, « Optimisation par la simulation système d'une chaîne de transmission numérique par fibre optique haut débit », mémoire de magister Tlemcen, 2010.
-

-
- [19] : Hervé Gouraud, « Filtrage opto-microonde par synthèse optique de réponse impulsionnelle », Thèse de doctorat de l'université de Limoges, France, 2004.
- [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] : 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
- [22] : 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.
- [23] : Ali Guermache, « Étude et réalisation de lasers de pompe à 1480nm pour l'amplification Raman», Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des télécommunications, 2005.
- [24] : 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.
- [25] : Farouk KHECIB, « Etude et mise au point de la migration d'une liaison optique WDM en exploitation vers des hauts débits », 2010.
- [26]: Winzer, P.J., Essiambre, R.J., « Advanced optical modulation formats». Proceedings of the IEEE 94(5), pp. 952–985 (2006).
- [27] : Daniel Hardy, Guy Malléus, Jean-Noël Méreur « Réseaux » .Site web: <http://www.books.google.fr>.
- [28] S. O. KASAP, «Optoelectronics and photonics» , Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] M. Thual, « Télécommunications optiques 2. Composants actifs, télécoms optiques », Université de Rennes 1, France, 2004-2005.
- [32] A. Boudkhil, A. Ouzzani, B. Soudini, « Evaluation des Performances des Photodiodes PIN et APD dans une Chaîne de Communication Optique à Haut Débit via Optisystem, Revue Méditerranéenne des Télécommunication Vol 5, Issue 2, pp 53-62, March 2015.
- [33]: Agrawal, G.P., «Fiber Optics Systems», 2nd Ed., John Wiley & Sons 1992.
-

CHAPITRE III:

Amplificateur à fibre dopée erbium EDFA

III.1. Introduction :

L'évolution des systèmes de télécommunications optiques a connu une révolution avec la mise au point et le développement industriel des amplificateurs optiques à la fin des années 80. Ils sont devenus alors une alternative aux complexes répéteurs-régénérateurs optoélectroniques. Ces composants devant fonctionner à grands débits sont chers, complexes, délicats à réaliser et à interfacer [1]. L'amplification optique est ainsi à l'origine d'une véritable révolution dans le domaine des télécommunications, vu les avantages que cette technologie procure en association avec le multiplexage en longueur d'onde (WDM). En effet, cette amplification peut intervenir sur l'ensemble des N longueurs d'onde d'un multiplexeur, sans distorsion du signal utile en comparant avec la régénération qui nécessite autant de régénérateurs que de longueurs d'onde [2].

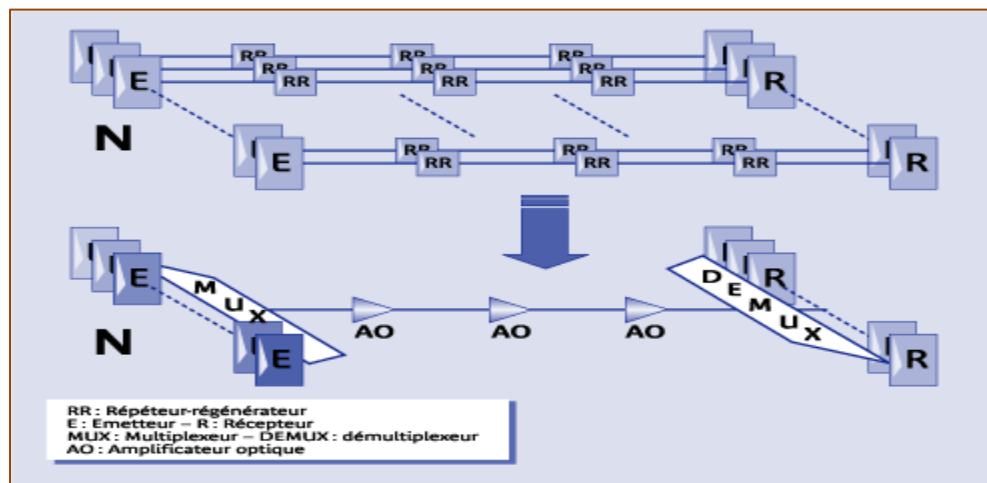


Fig. III.1 : Utilisation du multiplexage en longueur d'onde couplé avec l'amplification optique.

III.2. Intérêt de l'amplification optique :

L'amplificateur optique présente de nombreux avantages par rapport au répéteur régénérateur qui doit être conçu pour un débit bien spécifique. En effet, dans un amplificateur optique, la bande passante n'est plus limitée par l'électronique et peut atteindre plusieurs centaines de Giga Hertz [1]. Il offre l'avantage d'amplifier les signaux dont la longueur d'onde correspond à leur plage de sensibilité sans tenir compte du débit de transmission et du format de modulation utilisé. Cependant, il présente l'inconvénient d'introduire du bruit dans le signal optique lorsque celui-ci le traverse, figure III.2.

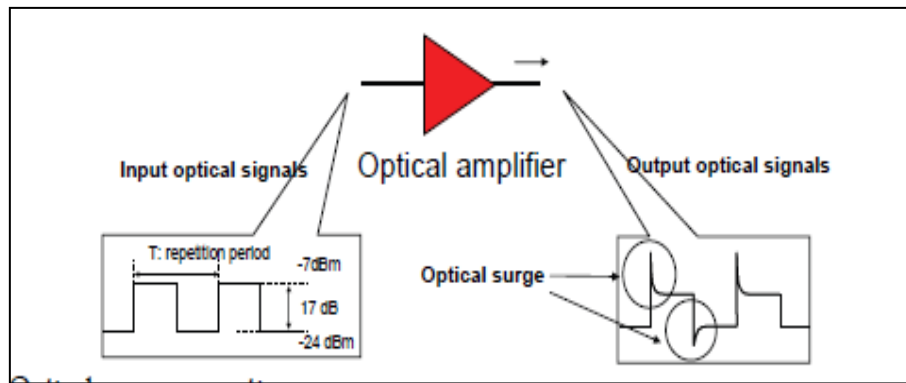


Fig. III.2 : Principe de l'amplificateur optique

Plusieurs types d'amplificateurs optiques ont été développés au cours des années 1980, et l'utilisation des amplificateurs optiques pour les systèmes de transmission long-courriers s'est répandue au cours des années 1990, 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*).

L'EDFA est actuellement l'amplificateur optique de choix dans les applications long distances à 1,55 μm . Les amplificateurs à fibre sont en effet particulièrement attrayants en raison de leur gain et de leur puissance de saturation élevés ainsi que leur faible bruit. Les SOAs ont de moins bonnes performances en gain et en puissance de saturation, mais ils possèdent une plus large bande-passante optique en plus de leur petite taille et de leur capacité à être intégrés avec d'autres dispositifs optiques. Ils sont en outre pompés électriquement. Ils peuvent également être utilisés pour réaliser certaines fonctions tout-optiques comme des portes logiques tout-optiques et des convertisseurs de longueur d'onde , et ce, grâce à leur dynamique de gain rapide et, par conséquent, leurs non-linéarités élevées.

III.3. Principe physique d'un amplificateur optique:

L'amplification optique est basée sur les phénomènes d'interaction entre les électrons de la matière et les photons. Cette interaction donnera naissance à des transitions entre les différents niveaux d'énergie. Les transitions entre les niveaux peuvent être soit radiatives, c'est-à-dire avec émission de photons, soit non radiatives, c'est-à-dire sans émission de photons mais avec émission de phonons ou de vibrations localisées. On peut donc décrire le principe de l'amplification optique en s'appuyant sur les phénomènes d'excitation des

électrons et d'émission stimulée. Ces phénomènes radiatifs ont été décrits théoriquement par Einstein en 1917 [2,3], qui les a classés en trois catégories : l'absorption, l'émission stimulée et l'émission spontanée, figure III.3.

III .3.a. L'absorption :

Dans le cas d'une absorption, un photon d'énergie $h \cdot \nu$ est absorbé, il induit une transition de niveau fondamental E_1 vers un niveau excité E_2 laissant un trou en bande de valence. L'écart énergétique $E_2 - E_1$ correspondant à l'énergie E du photon.

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

Où h est la constante de Planck, ν est la fréquence de l'onde émise et c est la vitesse de la lumière dans le vide.

E_1 et E_2 : Représentent le niveau d'énergie fondamental, et le niveau d'énergie excité, respectivement.

III .3.b. Emission stimulée et spontanée [4,13]:

Dans cette émission induite qui constitue la réciproque du processus d'absorption, le passage d'un photon incident peut provoquer l'ion excité à créer un nouveau photon, dont la fréquence, la direction, la phase et la polarisation sont strictement identiques à celles du photon ayant déclenché l'émission. Cette interaction est de ce fait dénommée émission stimulée, Ce phénomène, qui permet d'amplifier une onde lumineuse, est à la base du fonctionnement des amplificateurs à fibres dopées aux terres rares. De la même manière, un électron sur 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 on ne peut pas prévoir quand et comment la transition se fera, et le photon est émis selon une direction aléatoire.

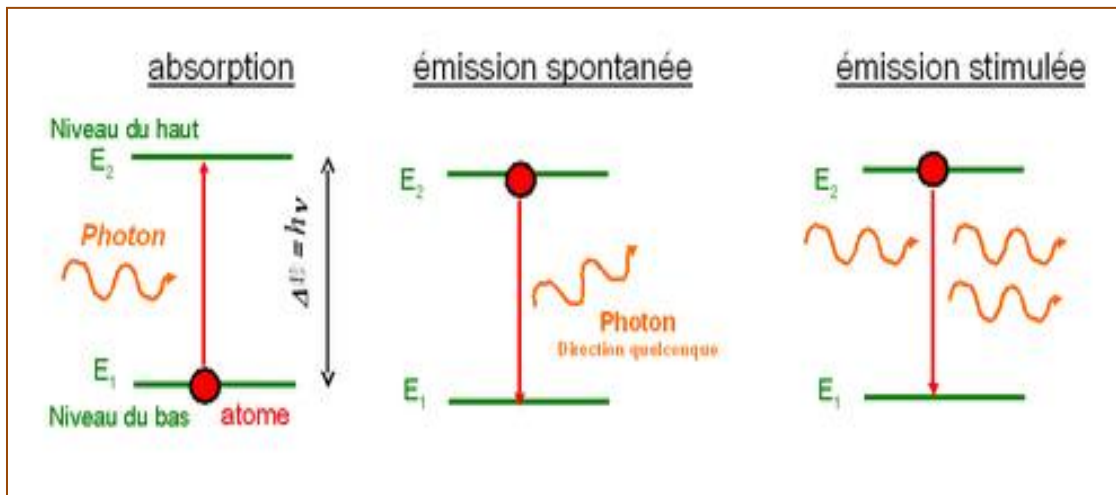


Fig. III.3: Mécanisme d'interaction entre un atome et un photon.

III.3.c. L'inversion de population :

Pour obtenir l'émission stimulée d'atomes, la population N_2 du niveau d'énergie E_2 doit être supérieure à celle du niveau fondamental N_1 . Ceci est obtenu en peuplant le niveau supérieur par une excitation extérieure, appelée pompage, conduisant à un phénomène d'inversion de population. Avoir une population plus élevée dans le niveau du haut (N_2) que dans le niveau du bas (N_1) n'est pas une situation d'équilibre. En effet, à l'équilibre thermodynamique, la répartition des populations sur les niveaux est donnée par la loi de Boltzmann [2] :

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

Où k est la constante de Boltzmann, T est la température. N_2 est toujours inférieure à N_1 , il faut donc créer une situation hors équilibre en apportant de l'énergie au système des atomes via un « pompage » dont l'objectif est d'amener suffisamment d'atomes sur le niveau du haut.

III.3.d. L'amplification optique :

Une fois obtenu un milieu en inversion de population, il est possible d'y amplifier la lumière par émission de photons au cours de la traversée unique de ce milieu. Un amplificateur se présente donc comme un laser sans contre réaction optique permettant d'augmenter, dans le domaine optique, la puissance d'un signal dans un certain rapport qui définit le gain. La figure III.4 explique ce phénomène, une onde incidente de fréquence ν , et de puissance d'entrée P_e , pénètre dans le milieu rendu amplificateur par inversion de population et ressort avec une puissance de sortie P_s après un trajet de longueur L [4].

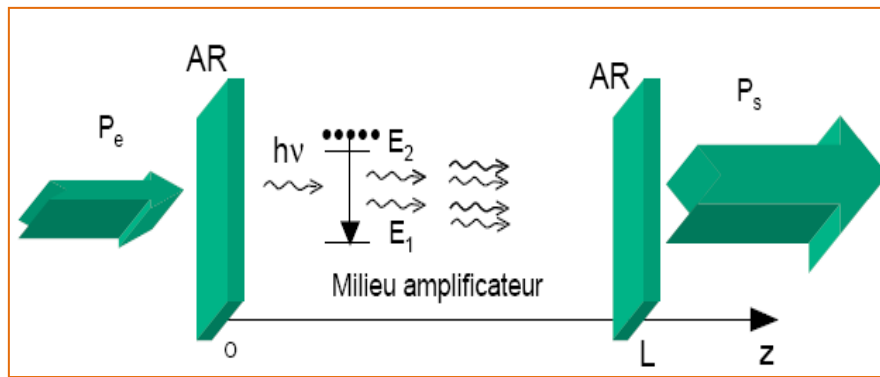


Fig. III.4: Principe de l'amplificateur optique.

La puissance croît à la traversée du milieu amplificateur selon :

$$P_s = P_e \cdot \exp^G \quad (\text{III.3})$$

Où G est le gain de l'amplificateur.

Les paramètres qui déterminent la qualité d'un amplificateur optique sont [9]:

- ◆ Le gain G en décibels, qui exprime le rapport entre la puissance du signal de sortie et la puissance du signal d'entrée,
- ◆ La largeur de bande $\Delta\lambda$ des fréquences amplifiables,
- ◆ L'efficacité du gain, qui exprime le rapport entre le gain et la puissance de pompe (en dB/mW),
- ◆ La puissance de saturation P_{sat} (puissance maximum de sortie de l'amplificateur),
- ◆ Le facteur de bruit.

III.4. Caractéristique de l'erbium dans la silice:

Les amplificateurs optiques à fibre dopée terre-rare se sont imposés ces dernières années comme des éléments indispensables dans les systèmes de transmissions optiques longues distances. Pour obtenir une fibre optique amplificatrice, c'est à dire permettant d'amplifier un signal d'entrée par un certain coefficient de gain, il faut ajouter un dopant lors de la fabrication de la préforme de la fibre de silice [5]. Les terres rares sont une famille de 15 éléments représentant le groupe des lanthanides. Le choix de ces ions pour les amplificateurs est du à leurs configuration électronique, en effet la sous couche 4f interne est responsable des propriétés optiques des ions terres rares. Les principaux ions terre-rares permettant la génération et l'amplification d'impulsions courtes dans des fibres optiques sont : le néodyme

(Nd³⁺), l'erbium (Er³⁺), l'ytterbium (Yb³⁺), le thulium (Tm³⁺), l'holmium (Ho³⁺), le samarium (Sm³⁺) et le praséodyme (Pr³⁺) [6,7]. Cette gamme de dopant permet aux lasers à fibre de couvrir un large éventail de longueurs d'onde d'émission, comme l'indique la figure III.5.

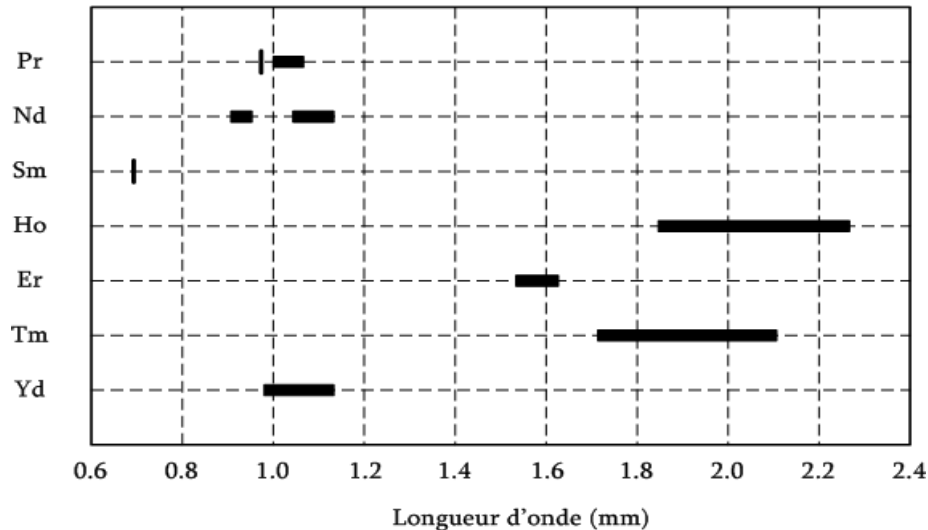


Fig.III.5 : Longueurs d'onde d'émission obtenues avec différents ions de terre rare.

Parmi les critères de choix, qui ont été utilisés pour déterminer le meilleur dopant capable d'amplifier les signaux optiques, on cite [8] :

- La longueur de transition du laser doit être proche de 1,31 ou 1,55 μm , ce qui correspond à la bande ayant le moins d'atténuation possible, longueur est utilisée dans les communications optiques.
- La longueur d'onde de la pompe correspond à la transition débutant du niveau fondamental doit être proche de la région infrarouge (800 à 1500 nm).
- Les transitions des signaux et de la pompe doivent être libres de l'effet de l'état d'absorption excité.

Toutefois, seul l'erbium permet à la fois de générer des impulsions courtes, et d'émettre dans la bande 1,5 - 1,7 μm . C'est donc sur la technologie des fibres dopées erbium que va se baser notre étude.

III.4.a Intérêt de l'Erbium :

L'Erbium est un composant chimique de symbole Er et de numéro atomique 68 qui peut exister en contact d'une source lumineuse d'une longueur d'onde spécifique. Ce sont les signaux de longueur d'onde de 810, 980, 1480 nm qui font réagir les ions et vont dégager une

énergie nécessaire à l'amplification des signaux lumineux. L'intérêt majeur de l'ion erbium réside dans l'existence de transitions radiatives qui permettent d'amplifier des signaux dans la fenêtre 1550 nm des télécommunications avec des performances remarquables [6]. L'Erbium possède principalement 5 niveaux de transitions qui interviennent dans l'amplification entre les niveaux $4I_{15/2}$ et $4I_{13/2}$. Les transitions de l'ion Er^{+3} qui nous intéressent sont essentiellement : $4I_{15/2}$, $4I_{13/2}$ et $4I_{11/2}$, comme le montre le schéma des niveaux d'énergie (dans la silice) de la figure ci-dessous :

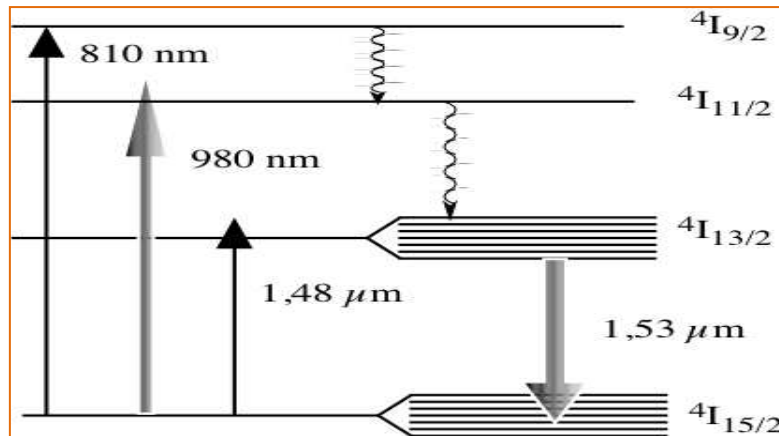


Fig.III.6: Niveaux d'énergie (dans la silice).

III.4.b Élargissement spectral des transitions électroniques de l'erbium :

Lorsqu'un rayonnement électromagnétique est résonnant avec les niveaux électroniques d'un ion terre rare, ils peuvent interagir. Cette interaction conduit à une transition électronique entre les niveaux qui peut être élargie par différents mécanismes. On retrouve principalement deux contributions liées à l'élargissement spectral des transitions énergétiques: les contributions homogènes et les contributions inhomogènes décrites à la figure III. 7.

◆ Élargissement homogène :

La largeur homogène d'une transition électronique d'un ion dans un matériau peut provenir de l'interaction entre deux ions erbium voisins, d'un ion erbium et un ion voisin non erbium si le couplage des niveaux d'énergie est possible. Cette augmentation est homogène car tous les atomes du milieu subissent les mêmes effets. Par conséquent, leurs fréquences de résonance sont identiques. Tout se passe comme si on avait un seul ion. En revanche cet élargissement dépend de la matrice hôte, des ions terres rares et est d'autant plus important que la

température est élevée. Les raies élargies par ce phénomène ont la forme d'une fonction lorentzienne [18,20].

◆ *Élargissement inhomogène :*

Dans le cas inhomogène, chaque ion occupe un site particulier dans la matrice hôte, leur répartition spatiale étant irrégulière. Cette situation implique donc que chaque ion possède un champ cristallin qui lui est propre. En conséquence chaque ion subit l'effet Stark de manière différente, et donc chaque ion possède des raies de fréquences qui diffèrent les unes des autres, donc les ions ne « voient » pas le même champ cristallin, ce qui entraîne une dispersion de leurs fréquences de résonance. L'élargissement inhomogène se caractérise par des raies de forme gaussienne [18,20].

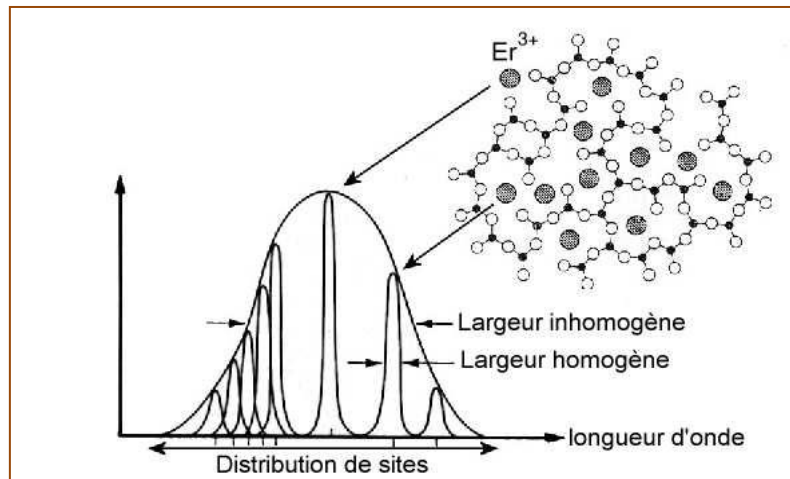


Fig. III.7 : Représentation en deux dimensions de la répartition des ions Erbium dans une matrice de silice.

La dépendance spectrale de saturation du gain dans un EDFA est étudiée. Les spectres de sortie obtenus dans le cas d'élargissement homogène et inhomogènes sont illustrés à la figure III.8. On observe que la forte dépendance spectrale de saturation du gain est bien décrite par le modèle homogène, de plus il est possible de voir le comportement des courbes qui deviennent différentes lorsque la puissance d'entrée augmente. De plus, pour l'effet de saturation il semble que le spectre est uniforme dans le cas de l'élargissement spectral homogène tandis que l'effet de saturation est plus fort à proximité du signal saturant dans le cas d'élargissement inhomogène.

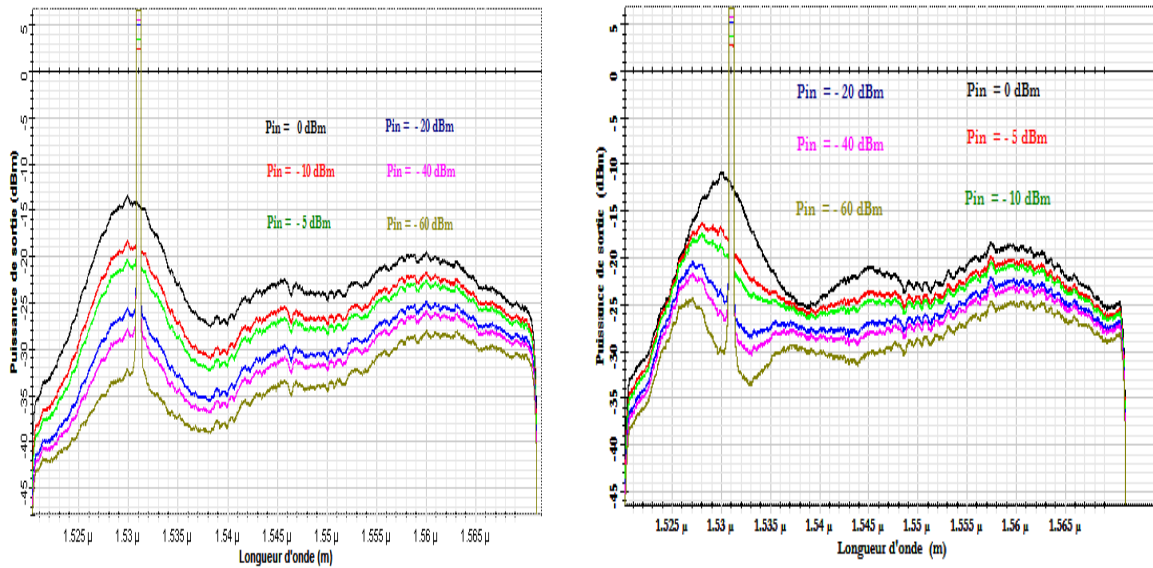


Fig. III.8: Spectre des puissances de sortie à 1530 nm pour différentes puissances d'entrées : -60 , -40 , -20 , -10 , -5 , et 0 dBm : a) cas d'élargissement homogène, (b) cas d'élargissement inhomogène.

III.5. Amplificateur à fibre dopée Erbium « EDFA » [12, 18,20]:

Les amplificateurs à fibre dopée erbium ou les EDFAs sont les dispositifs les plus utilisés pour l'amplification des signaux optiques, ils furent les premiers à utiliser un pompage optique. Cette technologie n'a pas seulement résolu l'atténuation du taux de transmission optique et les limitations de distance et, plus important encore, elle a permis le multiplexage en longueur d'onde 1550 nm bande (WDM), ce qui permettra à haute vitesse, de grande capacité. La grande maturité des technologies liées à l'EDFA permet de bénéficier d'un grand nombre de composants optimisés pour un fonctionnement entre 1550 et 1600 nm, et ceci à bas coût.

III.5.1. Structure de l'EDFA :

Les deux éléments de base de l'EDFA sont la fibre dopée à l'ion de terre rare (l'erbium pour l'amplification autour de 1,55 μ m) et le dispositif de pompage qui est en général fournie par une diode laser. Pour coupler la pompe optique et le signal à l'intérieur de la fibre, il faut un multiplexeur qui doit présenter une perte d'insertion faible afin d'optimiser le rendement optique du système. L'ensemble module de pompe, multiplexeur et fibre dopée forment l'amplificateur optique. Selon les applications, d'autres éléments sont nécessaires, comme par exemple l'isolateur optique (figure III.10).

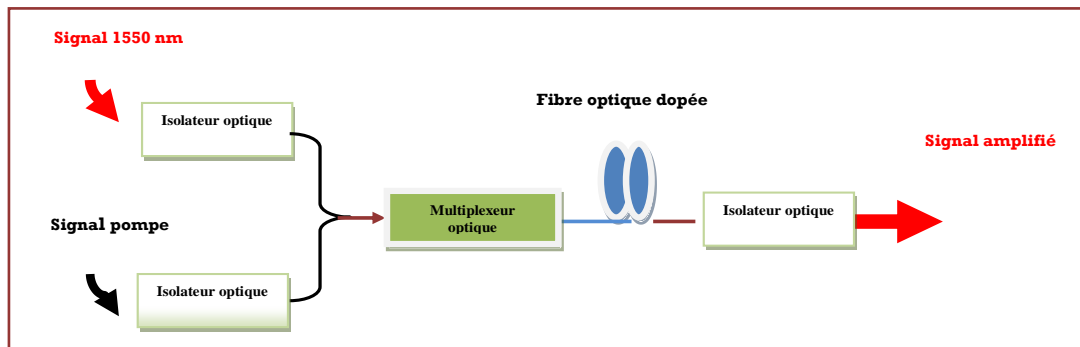


Fig.III.10 : Schéma d'un amplificateur optique à fibre dopée Erbium.

III.5.2. Le pompage optique :

L'excitation des ions est généralement réalisée par pompage optique selon différentes techniques. Elle consiste à utiliser une diode laser InGaAs émettant à 980 nm ou 1480 nm et permet de promouvoir un ion du niveau $^4I_{15/2}$ au niveau $^4I_{11/2}$. L'ion se désexcite ensuite au niveau $^4I_{13/2}$ par une relaxation rapide non-radiative [12]. On distingue deux cas selon que le signal utile et la pompe se propagent dans le même sens : schéma co-propagatif (figure III.11.1) afin de réduire le facteur de bruit ou en sens inverse, schéma contra-propagatif (figure III.11.2) favorisant ainsi une plus forte puissance de saturation. Mais afin d'augmenter et uniformiser dans la fibre dopée l'inversion de population et donc l'amplification du signal, certains amplificateurs utilisent un couplage bidirectionnel (figure III.11.3), c'est-à-dire deux pompes, une dans chacun des deux sens, comme par exemple les liaisons sous-marines, de façon à assurer une sécurité du réseau (en cas de problème, le système peut toujours fonctionner avec une seule pompe).

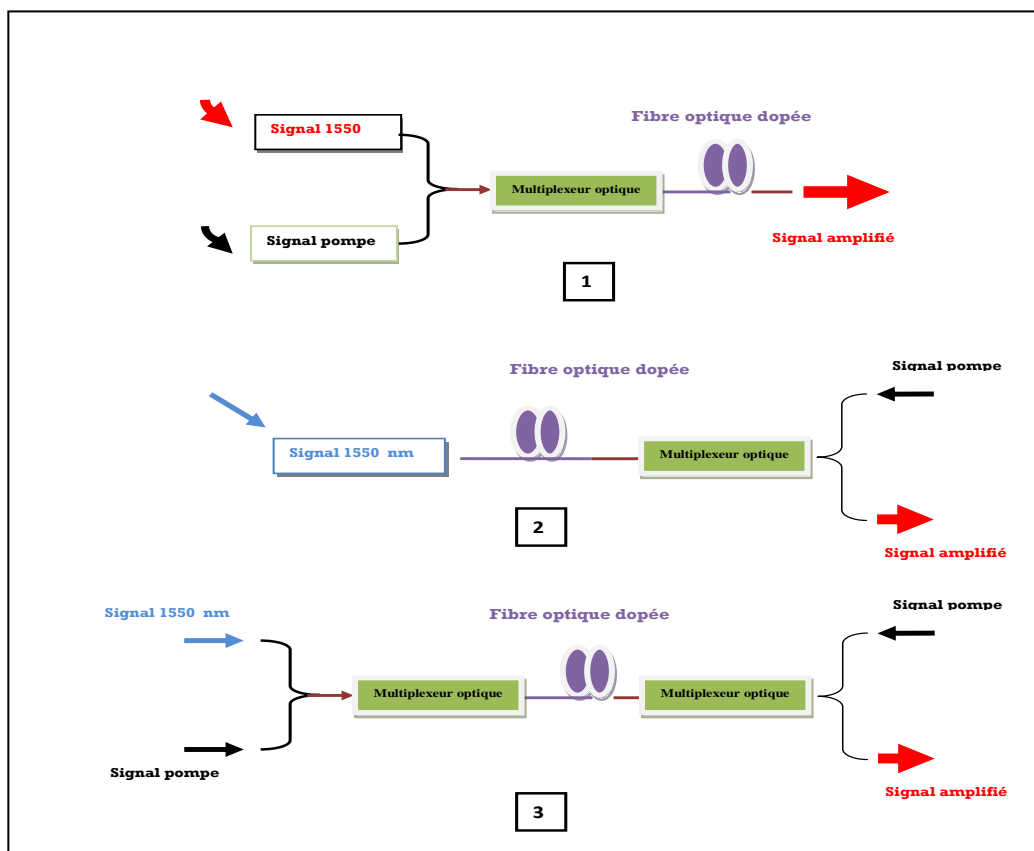


Fig.III.11 : Différents types de pompage (1)- pompage co-propagatif, (2) pompage contra-propagatif, (3) pompage bidirectionnel.

Les caractéristiques de la pompe vont influencer le rendement de l'amplificateur. Il faut donc des dispositifs peu coûteux avec une longueur d'onde de pompe efficace permettant d'obtenir une puissance suffisante. L'EDFA a deux longueurs d'onde de pompe possibles, 980 nm et 1480 nm, la bande à 980 nm est la plus utilisée car les diodes laser existantes à cette longueur d'onde sont plus puissantes et moins onéreuses que celles à 1480 nm [9].

III.6. Principe de l'amplificateur à fibre dopée Erbium [7, 13,25]:

L'amplification optique est basée sur certaines transitions électroniques des ions erbium, elle repose sur le phénomène d'émission stimulée. La figure III.12 montre le principe d'un amplificateur à fibre dopée erbium fonctionne à la manière d'un laser. Une portion de fibre optique est dopée et est pompée optiquement avec un laser afin de placer les ions de dopage dans un état excité. Lorsqu'un signal lumineux passe à travers ce morceau de fibre optique, il

désexcite les ions par effet laser en produisant un photon en tout point identique au photon incident. Le signal lumineux a donc été doublé. Ainsi on obtient une amplification globale qui peut atteindre jusqu'à 40 dB pour des puissances de sorties maximales de l'ordre de 30 dBm. Une partie des ions se désexcitent sous l'effet de l'émission spontanée. Ils libèrent alors un photon dont la longueur d'onde et la polarisation sont aléatoires. Cette émission spontanée parasite le signal et doit être filtrée avant réception.

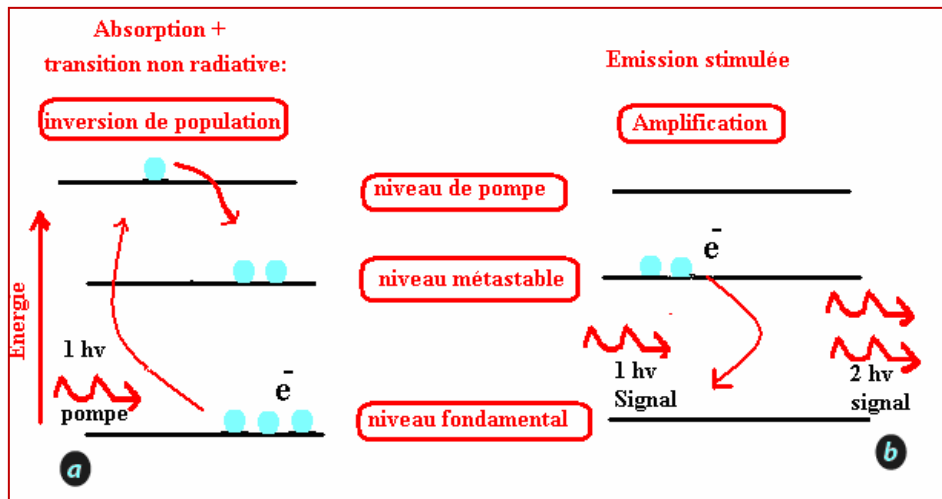


Fig.III.12 : Principe de fonctionnement d'un amplificateur.

Les EDFAs se sont beaucoup développés car leur fenêtre d'amplification située entre 1530 nm et 1560 nm est bien adaptée au minimum d'atténuation des fibres. Cette bande de longueur d'onde s'appelle la bande C. Devant la demande incessante d'accroissement de capacité, des amplificateurs à fibre utilisant d'autres terres rares sont à l'étude pour obtenir de nouvelles fenêtres d'amplification. La figure III.13 illustre ces différentes bandes associées à chaque terre rare. Le Thulium (Tm) est actuellement la terre rare qui semble la plus prometteur [14].

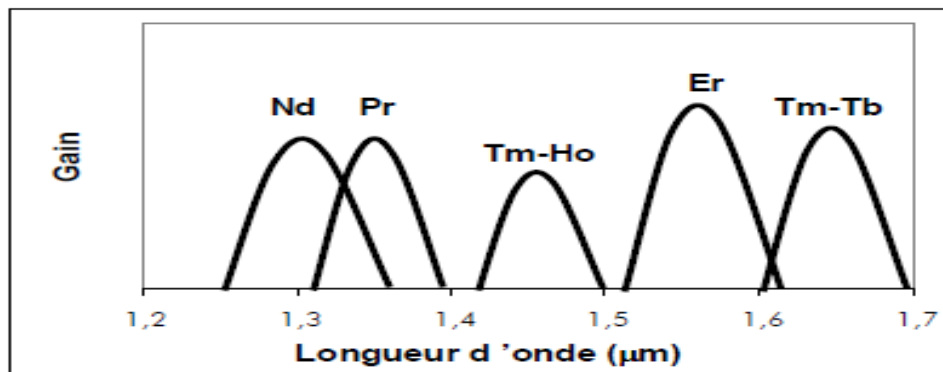


Fig.III.13 : Différentes bandes associées à chaque terre rare.

III.6.1 Modélisation d'un amplificateur EDFA :

De nombreux modèles numériques ont été publiés, qui résolvent exactement les équations différentielles décrivant les variations de populations des différents niveaux d'énergie. Le modèle analytique proposé par Saleh a permis d'évaluer le gain en fonction des différentes grandeurs caractéristiques: longueur d'onde du signal et de la pompe ainsi que la longueur de la fibre. Le modèle analytique de T. Georges et E. Delevaque [5,15.16] lève l'hypothèse restrictive du modèle de Saleh. En effet, il tient compte de l'émission spontanée amplifiée. Pour calculer la puissance d'émission spontanée P_{ASE} , on considère un facteur moyen d'inversion de population sur toute la longueur de la fibre. L'équation de base du modèle est le bilan photonique global de l'amplificateur optique entre les photons entrant et sortant de l'amplificateur [17,19, 26] :

$$A \cdot N \cdot L \frac{dy}{dx} = \sum_{V_i} P_i^{out} - \sum_{V_i} P_i^{in} + P_{ase}(x) + P_{spon}(x) \quad \text{III. 4}$$

A: Surface efficace de dopage,

N : Concentration moyenne en ions Erbium,

L : Longueur de la fibre dopée erbium,

x : Fraction d'ions excités ($x \in [0,1]$),

V_i : Composante spectrale du signal ou de la pompe,

P_i^{in} , P_i^{out} : Nombre de photons par seconde à la sortie et à l'entrée de l'amplificateur,

P_{ase} et P_{spon} : Nombre de photons par seconde à la sortie de l'amplificateur dus respectivement à l'émission spontanée amplifiée et à l'émission spontanée.

Le gain à la fréquence V_i s'écrit :

$$Ln \left[\frac{P_i^{out}}{P_i^{in}} \right] = [\sigma_e(V_i)x - \sigma_a(V_i)] \cdot \Gamma_{V_i} \cdot N \cdot L = Ln(G(V_i)) \quad \text{III. 5}$$

Γ_{V_i} : est le facteur de recouvrement entre les ions excités et la fréquence du signal.

σ_T : est la somme des sections efficaces d'émission σ_e et d'absorption σ_a à la fréquence du signal.

En peut négliger la fraction guidée de l'émission spontanée, la contribution de l'émission spontanée s'écrit [4] :

$$P_{spon}(x) = \frac{A.N.L.X}{\tau} \quad \text{III. 6}$$

Où τ : est la durée de vie du niveau haut.

L'émission spontanée amplifiée est calculée en considérant un facteur moyen d'inversion de population le long de la fibre. Son expression s'intègre sur tout le spectre d'émission spontanée amplifiée [5] :

$$P_{ase}(x) = 4. \int \frac{\sigma_e(v).x}{\sigma_T(v).x\sigma_a(v)} (e^{G(v)} - 1) dv \quad \text{III. 7}$$

III.7. Propagation du pompage et du signal dans la fibre dopée :

L'intérêt de l'erbium dans les télécommunications optiques est qu'une de ses bandes d'émission, vers 1540 nm, correspond au minimum d'atténuation dans les fibres de silice, cette bande peut être pompée à 1480 et 980 nm. Les transitions énergétiques impliquées sont cependant différentes dans les deux schémas de pompage. Dans le cas d'une longueur d'onde de 980 nm, on obtient un système à trois niveaux, tandis qu'à 1480 nm il s'agit d'un système à deux niveaux seulement.

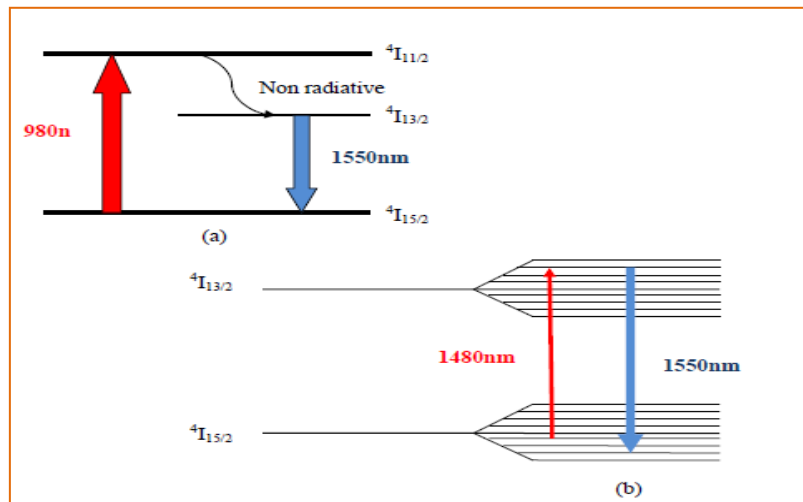


Fig. III.14 : Niveaux d'énergie mis en jeu pour un pompage : (a) 980 nm, (b) 1480nm dans le cas de l'ion Erbium.

Dans un système à trois niveaux, figure III.15, le pompage permet le transfert d'un électron du niveau E_1 à E_3 , puis à l'aide d'une transition non radiative, cet électron peuple le niveau E_2 . La transition radiative s'effectue entre le niveau E_2 et E_1 . Suite à la transition radiative, l'électron est de nouveau disponible pour le pompage. Le passage d'un photon incident de longueur d'onde λ_s provoque alors une recombinaison électron-trou suivant un processus d'émission stimulée, donnant ainsi naissance à un deuxième photon de caractéristiques identiques. Cela conduit donc à une amplification du signal le long de la fibre optique.

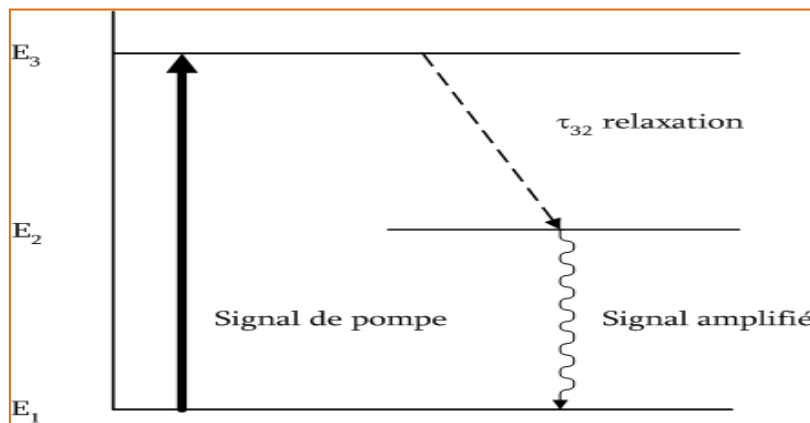


Fig.III.15 : principe de l'amplification.

L'évolution des intensités de pompe et de signal le long de la fibre optique dopée peut être représentées mathématiquement et données par :

$$\frac{dI_p(z)}{dz} = -\alpha_p I_p(z) - I_p(z) \cdot (1 - N_2) \cdot \sigma_p^a \cdot \Gamma_p \cdot N \quad \text{III. 8}$$

Avec,

I_p : est l'intensité de pompe,

α_p : Coefficient de perte de la fibre dopée pour une longueur d'onde de pompe,

σ_p^a : Sections efficaces d'absorption due au pompage,

N_2 : Densité de population, de niveau fondamental,

Γ_p : Facteur de recouvrement entre les ions excités et la fréquence de la pompe,

N : La concentration des ions erbium.

Et pour la longueur d'onde de signal, puisque l'émission stimulée et l'absorption ont lieu, on a

$$: \frac{dI_s(z)}{dz} = -\alpha_s I_s(z) - I_s(z) \cdot (1 - N_2) \cdot \sigma_s^a \cdot \Gamma_s \cdot N + I_s \cdot N_2 \cdot \sigma_s^e \cdot \Gamma_s \cdot N \quad \text{III.9}$$

Avec :

I_s : est l'intensité du signal injecté

σ_s^a, σ_s^e : Sections efficaces d'absorption et d'émission due au signal injecté.

Γ_s : Facteur de recouvrement entre les ions excités et la fréquence du signal.

On peut exprimer l'équation précédente en termes d'intensité normalisée de signal $A(z)$,

$$\text{Où} \quad A(z) = \frac{I(z)}{I(z=0)}$$

Le gain $G(z) = \ln.[A(z)]$ le long de la fibre peut être donné par :

$$\frac{dG(z)}{dz} = -\alpha_s - (1 - N_2) \cdot \sigma_s^a \cdot \Gamma_s \cdot N + N_2 \cdot \sigma_s^e \cdot \Gamma_s \cdot N \quad \text{III.10}$$

$$\frac{dG(z)}{dz} = -\alpha_s - (1 - N_2) \cdot \sigma_s^a \cdot \Gamma_s \cdot N + N_2 \cdot \sigma_s^e \cdot \Gamma_s \cdot N \quad \text{III.11}$$

$$G(z) = \int_0^1 (-\alpha_s - (1 - N_2) \cdot \sigma_s^a \cdot \Gamma_s \cdot N + N_2 \cdot \sigma_s^e \cdot \Gamma_s \cdot N) \cdot dz \quad \text{III.12}$$

$$G(z) = \exp \left\{ \Gamma_s \int_0^1 (-\alpha_s - (1 - N_2) \cdot \sigma_s^a \cdot N + N_2 \cdot \sigma_s^e \cdot N) \cdot dz \right\} \quad \text{III.13}$$

On remarque que le gain augmente exponentiellement avec $L = z$ dès que l'inversion de population compense les pertes non résonnantes du milieu. De plus, à partir de la formule précédente (III.13) on peut constater que le gain est influencé par deux types de paramètres : les paramètres spectroscopiques, caractéristiques de la matrice hôte et les paramètres opto-géométriques qui dépendent de la fibre dopée. Ces équations seront résolues numériquement afin d'obtenir le meilleur compromis entre tous les paramètres influençant le gain.

◆ Paramètres spectroscopiques :

Nous pouvons aussi remarquer toujours à partir de la formule III.13 que le gain dépend du la section d'émission « σ_e », qui représente la capacité d'émission de l'erbium, et qui doit être la plus grande possible. Ainsi, le phénomène d'absorption limite le gain à travers le terme

$\sigma_a \cdot N \cdot L$. On constate aussi que le gain obtenu semble d'autant meilleur que le facteur de recouvrement à la longueur d'onde du signal λ_s est élevé. Il faut cependant noter que la densité de population N_2 dépend elle aussi du recouvrement aux longueurs d'onde de signal. Donc la dépendance spectrale du gain d'un EDFA dépend fortement de sa conception (longueur et concentration d'ions erbium de la fibre dopée) et de son point de fonctionnement (puissance de pompe et la puissance du signal).

◆ **Paramètres opto -géométriques :**

Toujours la formule III.13 montre que le gain G est directement relié à la concentration en ions actifs N et à la longueur de propagation dans le milieu amplificateur. En ce qui concerne la longueur de la fibre dopée erbium L , nous devons prendre en compte deux effets contraires : d'une part, il est nécessaire d'utiliser des fibres suffisamment longs pour absorber efficacement la puissance de pompe, et d'autre part si la longueur est trop grande, l'inverse de population n'est plus réalisée complètement et le gain diminue. La modélisation du phénomène d'amplification permet de choisir la longueur la plus courte qui nécessite de minimiser les pertes de propagations α_s .

Tableau III.1 : Paramètres influant sur le gain

Paramètres	Symbole	Variation avec le gain
Les pertes de propagations	α_s	α_s augmente \Rightarrow Gain diminue
Pompe absorbée	P_p	P_p augmente \Rightarrow Gain augmente
Section efficace d'émission	σ_e	σ_e augmente \Rightarrow Gain augmente
Facteur de recouvrement à la longueur d'onde du signal	Γ_s	Γ_s augmente \Rightarrow Gain augmente
Pertes de propagation	α_s	α_s augmente \Rightarrow Gain diminue
Concentration d'ions erbium	N	N augmente \Rightarrow Gain augmente

III.8. Caractéristiques de l'amplificateur à fibre dopée erbium

Les critères les plus courants qui caractérisent un EDFA sont : le gain (G), la puissance de saturation (P_{sat}), le facteur de bruit (Noise Factor NF) et le rendement (η). Il faut cependant

noter que ces valeurs dépendent de la longueur de la fibre, de la longueur d'onde du signal et des puissances de signal et de pompe.

III.8.1. Le gain optique :

Le gain d'un amplificateur optique traduit l'augmentation du signal dans la fibre, il est habituellement mesuré en décibels. Il est défini par Derickson comme:

$$G = \frac{P_s - P_{ASE}}{P_e} \quad \text{III. 14}$$

Où P_s est la puissance optique à la longueur d'onde du signal à la sortie de l'amplificateur, P_{ase} est la puissance de l'émission spontanée amplifiée dans la même bande de fréquence que le signal et P_e est la puissance du signal à l'entrée de l'amplificateur optique.

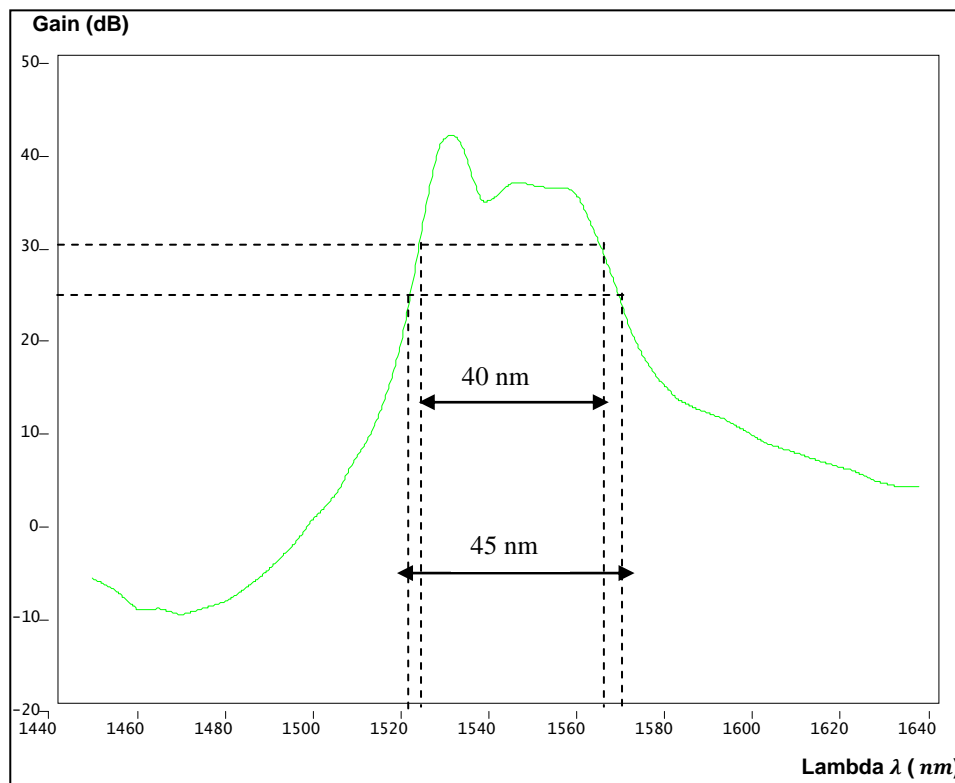


Fig. III.16: Spectre de gain en fonction de la longueur d'onde

La figure (III.16) montre la variation du gain en fonction de la longueur d'onde. Le gain de l'amplificateur est exprimé en dB. La courbe est tracée pour une puissance de pompe fixée à 35 dBm et une puissance du signal d'entrée fixée à -25 dBm. Deux paramètres sont très importants sur ce spectre de gain. Un paramètre en abscisse, qui définira la bande passante de notre amplificateur, et un paramètre en ordonnée qui définira la platitude de notre amplificateur. On remarque bien que la

valeur optimale obtenue du gain est de 30 dB, avec une importante bande passante de 40 nm. Nous pouvons atteindre des gains allant jusqu'à 40 dB au détriment de la platitude du gain (présence de fluctuations).

III.8.2. L'émission spontanée amplifiée (ESA) [22,23, 26]:

L'amplificateur optique ne régénère pas le signal et n'effectue pas non plus la mise en forme du signal à amplifier. Il amplifie le signal au même titre que le bruit associé. Le bruit optique considéré dans le cadre de cette recherche est celui induit par l'amplification par émission spontanée (ESA). Cette émission spontanée dépeuple le niveau métastable, réduisant ainsi l'inversion de population et dégradant les performances de l'amplificateur. La désexcitation spontanée d'atomes du niveau métastable vers le niveau fondamental s'accompagne de l'émission de photons qui ne sont pas corrélés avec les photons « signal ». Ces photons spontanés se propagent dans la fibre et stimulent eux-mêmes l'émission d'autres photons : c'est l'émission spontanée amplifiée (ESA) et qui constitue une source de bruit. L'ESA représente donc, dans un amplificateur optique, un bruit de fond additif au signal utile à la sortie. Il se propage dans les deux sens et s'exprime par sa densité spectrale de puissance (figure III.17), donnée par :

$$P_{ase} = 2n_{sp} \cdot (G - 1) \cdot h\nu B \quad \text{III.15}$$

Avec :

h : Constante de Planck, ν : Fréquence optique, G : Gain de l'amplificateur,

B : La largeur spectrale de bruit,

P_e : Puissance d'entrée.

n_{sp} : est le taux d'émission spontanée, également appelé facteur d'inversion de population :

$$n_{sp} = \frac{\sigma_e(\lambda)N_2}{\sigma_e(\lambda)N_2 - \sigma_a(\lambda)N_1} \quad \text{III.16}$$

$$\text{Où : } \quad \sigma_e(\lambda) = \frac{P_e}{h\nu B} \quad \text{et} \quad \sigma_a(\lambda) = \frac{G \cdot P_e}{h\nu B + 2n_{sp}(G-1)h\nu B} \quad \text{III.17}$$

III.8.3. Facteur de bruit :

Le facteur de bruit permet de quantifier la dégradation relative du rapport signal sur bruit S/N d'un signal amplifié. L'évaluation du bruit se fait en calculant pour chaque fibre optique le rapport signal sur bruit optique (OSNR) du signal de chacune des longueurs d'ondes qui la traversent. Le rapport

signal sur bruit en sortie tient compte du bruit d'émission spontanée amplifiée ajouté à la traversée de l'amplificateur, il s'écrit donc :

$$\text{Facteur de bruit} = NF = \frac{\frac{\text{signal}}{\text{bruit}}(\text{entrée})}{\frac{\text{signal}}{\text{bruit}}(\text{sortie})} \quad \text{III.18}$$

Si on considère le cas où le rapport signal/bruit en entrée de l'amplificateur est fort, alors NF pouvait s'écrire sous la forme :

$$NF = \frac{\sigma_e}{\sigma_a} = 2n_{sp} \cdot \frac{G-1}{G} + \frac{1}{G} \quad \text{III.19}$$

Si le gain G est grand, il est pratiquement égal à $2n_{sp}$. On vérifie que dans un amplificateur idéal dont le paramètre d'inversion de population serait égal à l'unité, le facteur de bruit serait égal à 1.

$$NF = 2n_{sp} \quad \text{III.20}$$

La figure (III.17) : montre le spectre de puissance de bruit de l'émission spontanée amplifiée (ESA) et le spectre du gain. Le niveau de bruit est très faible (-110 dBm/Hz) par rapport à celui du signal. On remarque que le spectre de l'ESA à la même allure que celui du gain, ceci s'explique par le fait que le bruit de l'ESA accompagne inévitablement le processus de l'amplification.

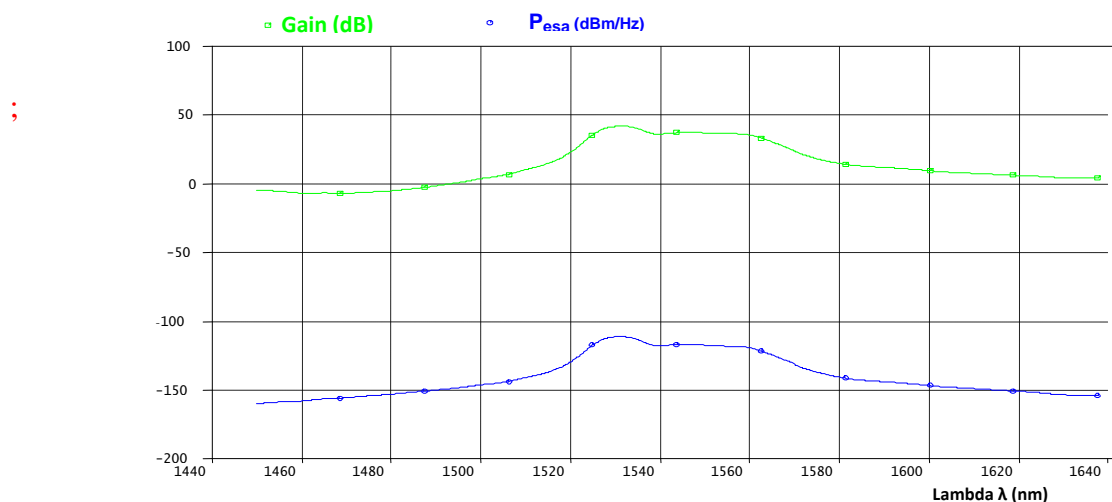


Fig.III.17: Spectre de puissance de l'ESA et spectre du gain en fonction de la longueur d'onde.

III.8.4. Type de la fibre amplificatrice :

La figure III.18 représente la variation du gain en fonction de la longueur d'onde pour deux type de fibre amplificatrice : on remarque que la courbe de gain d'un amplificateur à fibre de verre fluoré a

l'avantage d'être relativement constante sur une large bande de fréquence par rapport à une fibre de verre de silice. Nous comprenons donc l'intérêt des verres fluorés, permettant des taux de dopage avec des terres rares très élevés par rapport aux autres types de matrices.

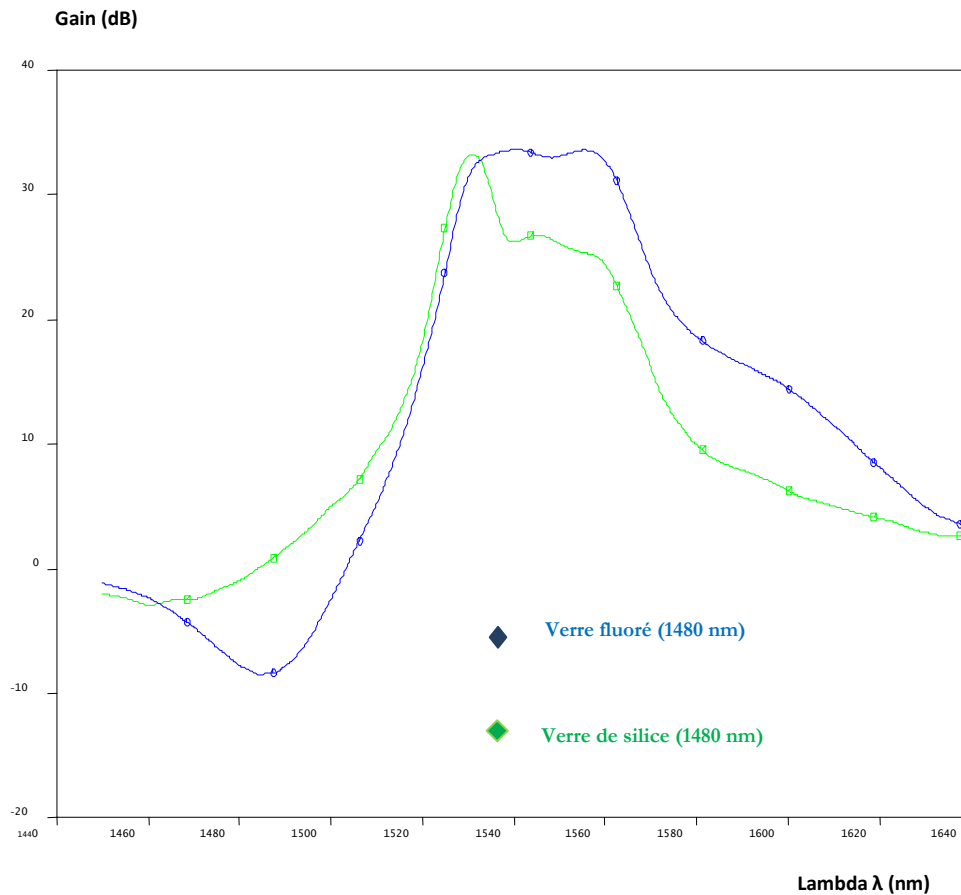


Fig.III.18 : Variation du gain en fonction de la longueur d'onde pour deux types de la fibre amplificatrice

III.8.5. La puissance de saturation :

Par suite du flux de photons entrant et sortant de la fibre, le gain dépend de la puissance d'entrée (figure III.19). Pour les faibles puissances d'entrée, le gain est constant et le régime de fonctionnement est linéaire : on parle alors de gain petit signal. A forte puissance, l'amplificateur commence à saturer, c'est-à-dire que la puissance de sortie augmente de moins en moins avec la puissance d'entrée et tend vers une valeur asymptotique, la saturation d'un amplificateur optique est produite par la diminution de l'inversion de population : il y a de moins en moins d'ions excités. Mais l'originalité de la saturation dans un amplificateur optique vient du fait que c'est un effet à long terme lié à la durée de vie élevée (environ 10 ms) dans l'état métastable [24,26].

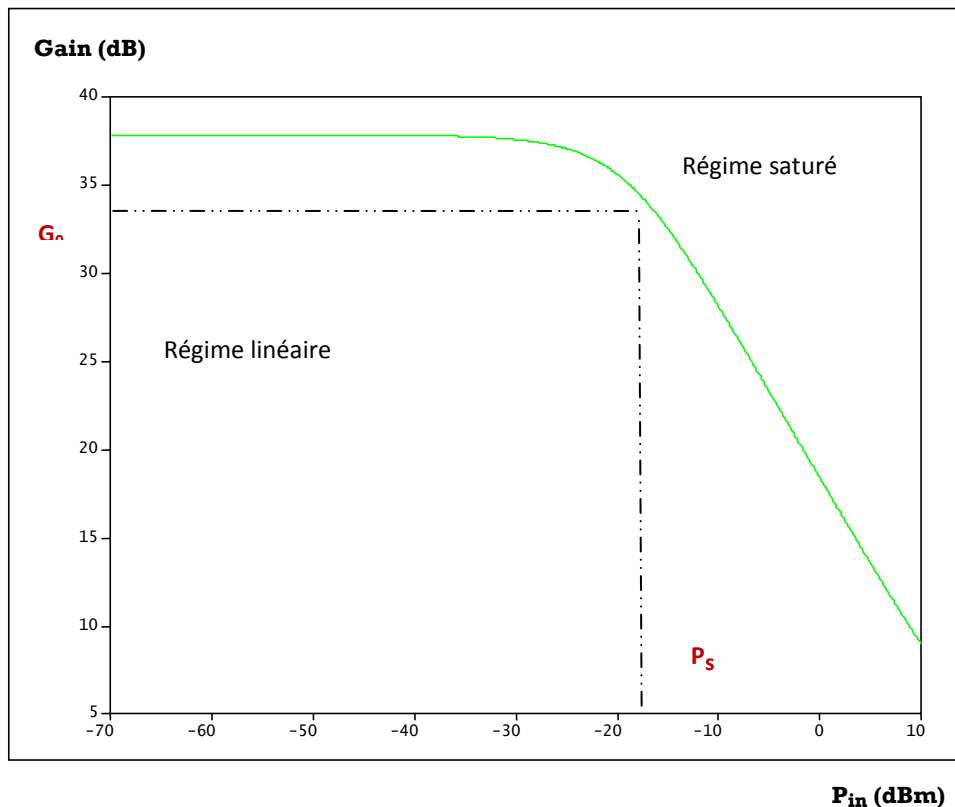


Fig.III.19 : Variation du gain en fonction de la puissance d'entrée.

On définit la puissance de saturation système d'un amplificateur comme la puissance de signal en sortie pour laquelle le gain a chuté de 3 dB par rapport au gain non saturé. La formule caractérisant la puissance de saturation, est donnée par :

$$P_{sat} = I_{sat} \cdot A_{eff} \cdot \ln 2 \quad \text{III.21}$$

Avec :

I_{sat} : Le courant de saturation

A_{eff} : L'aire efficace du mode guidé.

Comme tout amplificateur, le potentiel de gain n'est pas infini et arrive à saturation lorsque le signal à amplifier devient trop puissant. Cette saturation du gain est caractérisée par un paramètre appelé puissance de saturation. On définit d'autre part la puissance de saturation P_{sat} comme étant la puissance de signal en entrée pour laquelle le gain obtenu est égal à la moitié du gain petit signal G_0 .

III.8.6. La bande passante:

L'EDFA à base de silice a une bande passante d'amplification limitée qui va de 1530 à 1565 nm en longueur d'onde, la bande « C », dite conventionnelle, la bande passante est étendue à des longueurs d'onde plus longues (par exemple la bande « L », dite longue, de 1570 à 1610 nm). La largeur de bande du gain dépend de la matrice hôte dans laquelle se trouvent les ions actifs. La puissance d'entrée influe aussi sur la bande de l'amplificateur et, est inversement proportionnelle au gain. Au point de fonctionnement optimal ($G \cong 30$ dB autour de $\lambda=1550$ nm), qui correspond au gain petit signal de l'amplificateur, la bande pour laquelle on a une excursion de moins de 3 dB est d'environ 40 nm. Nous remarquons que cette bande peut augmenter au dépend du gain (25 dB) et dépasser les 45 nm, ce qui est très avantageux dans les systèmes de multiplexage en longueurs d'onde (WDM et DWDM) [27].

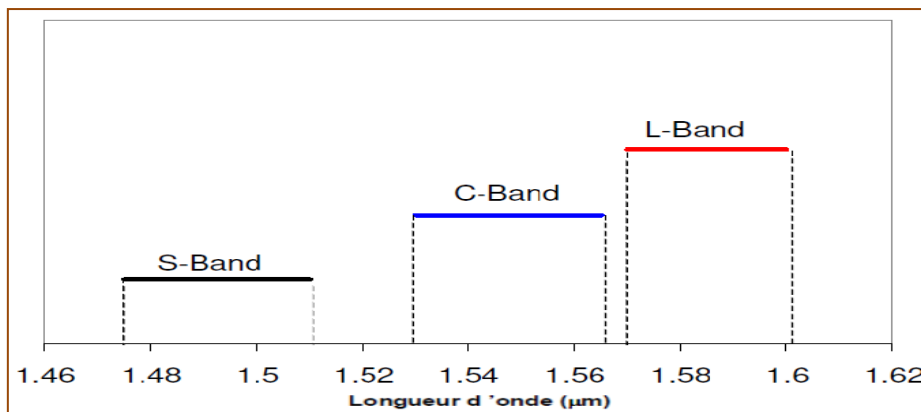


Fig.III.20 : Les bandes spectrales d'amplification de l'EDFA.

III.8.7. La platitude du gain :

La platitude caractérise la constance du gain dans la bande passante avec une excursion ne dépassant guère 3 dB ; on cherche un gain spectralement plat sur une large bande passante. La platitude du gain est un paramètre exigé dans les systèmes de multiplexage en longueurs d'onde (WDM et DWDM), car une faible variation du gain sur la bande d'amplification est suffisante pour augmenter les différences de puissance. Ces différences se traduisent par des écarts en rapport signal sur bruit et donc des différences de qualité entre les multiples canaux du multiplexeur. D'où un besoin d'égaliser le gain de l'amplificateur. Cependant, la méthode d'égalisation de gain par l'introduction des filtres passifs existe [28].

III.8.8. Le rendement d'un EDFA :

Un point important dans l'EDFA est le rendement de l'amplificateur, autour de 50%. Cette limitation du rendement a été pour moitié expliquée par les mécanismes d'up conversion faisant intervenir le couplage entre deux ions excités proches [9]. Le rendement d'un amplificateur est défini comme étant le rapport du gain (en dB) à la puissance de pompe injectée dans la fibre (en mW). Il est donné en (dB/mW) par :

$$\eta = \frac{\lambda_s}{\lambda_p} \cdot \frac{P_s - P_e}{P_p} \quad \text{III.22}$$

Avec :

λ_s : longueur d'onde du signal,

λ_p : longueur d'onde de pompe,

P_s : puissance du signal en sortie,

P_e : puissance du signal à l'entrée,

P_p : puissance du signal de pompe.

La figure III.21 présente les rendements maximaux des différentes longueurs d'onde de pompe. Le meilleur rendement (environ 80%) est obtenu avec une longueur d'onde de pompe de 980 nm.

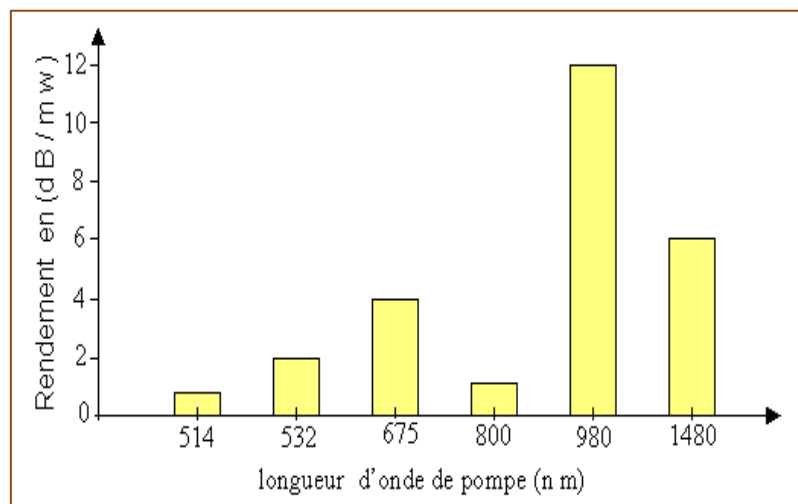


Fig.III.21: Rendements maximaux de pompage des amplificateurs optiques pour différentes longueurs d'onde de pompe.

III.9. Applications des amplificateurs optiques :

L'EDFA est utilisé dans une ligne de télécommunication de trois façons différentes, au début de la ligne, en tant que post-amplificateur, le long de la ligne en tant qu'amplificateur en ligne, et en fin de ligne en tant que pré-amplificateur [18].

III.9.1. Le post-amplificateur optique EDFA :

Les post-amplificateurs ou « booster » placés juste après l'émission, ont pour rôle d'augmenter la puissance de sortie de l'émetteur et donc d'accroître d'autant le budget total de la liaison (figure III.22). Ils peuvent être, soit de type SOA ou EDFA pourvu que leur gain ne soit pas élevé (en général 10 à 20dB) car il y a un risque d'amplification des effets non-linéaires de la fibre [27].

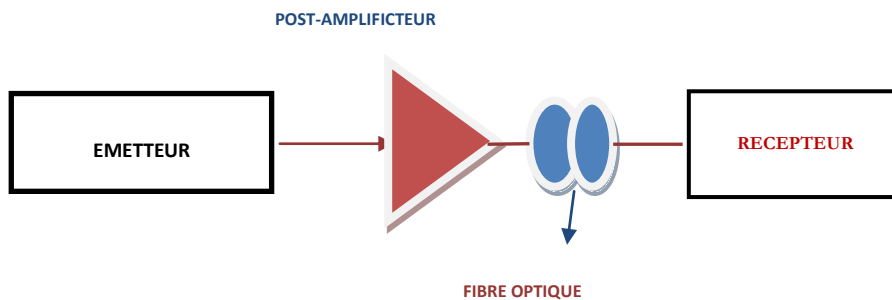


Fig.III.22: Amplificateur optique à l'émission (Booster) .

III.9.2. L 'amplificateur optique de ligne EDFA :

Les amplificateurs en ligne ont pour fonction de compenser l'atténuation du signal par la fibre et les différentes pertes encourues tout en favorisant l'augmentation de la distance de propagation (figure III.23). Ils sont généralement de type EDFA avec des gains allant de 20 à 30dB. Dans la pratique, ils sont généralement accompagnés de fibres à compensation de dispersion négative pour limiter les effets de la dispersion chromatique.

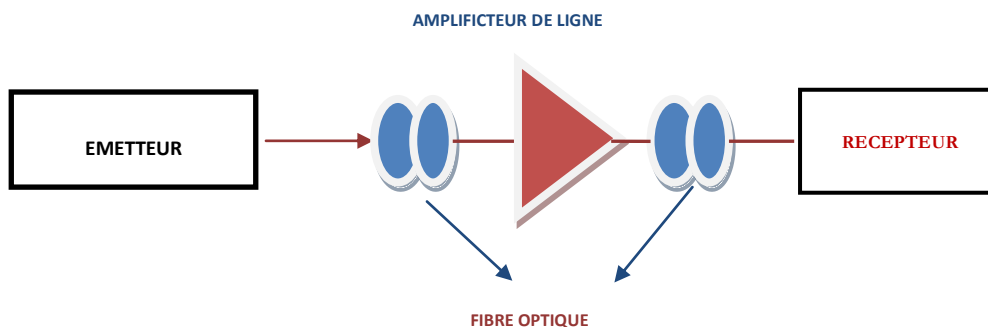


Fig.III.23: Amplificateur optique en ligne.

III.9.3. Le pré- amplificateur optique EDFA :

Les pré- amplificateurs situés à l'entrée du module de réception permettent d'augmenter en même temps la sensibilité du récepteur et le budget de la liaison (figure III.24). Ici, la minimisation du facteur de bruit est très recherchée et le gain optique est entre 20 et 35dB [27].

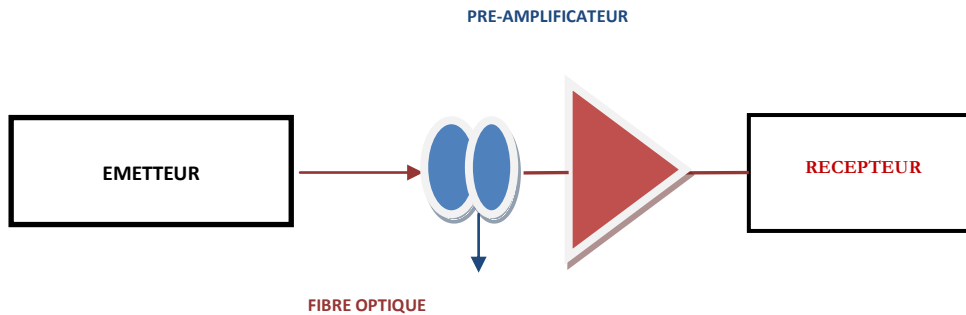


Fig.III.24: Amplificateur optique à la réception (pré-amplificateur).

III.10. Conclusion :

L'amplificateur à fibre dopée Erbium (EDFA pour Erbium Doped Fibre Amplifier) s'est imposé dans le domaine des télécommunications grâce à sa transparence au débit et aux canaux adjacents. L'augmentation de la puissance d'émission grâce à l'emploi du post-amplificateur renforcée par l'utilisation d'un pré- amplificateur engendre un accroissement de la portée des systèmes non régénérés. Ainsi, la présence d'amplificateur de ligne permet de repousser non seulement la limitation due à la dispersion chromatique mais aussi celle de l'atténuation conduisant ainsi à l'augmentation de la distance de propagation. Malgré l'avantage de l'EDFA sur les répéteurs régénérateurs, il présente aussi des contraintes imposées par leurs bruits ainsi que sa puissance de saturation. En effet, le bruit de l'amplificateur optique (émission spontanée amplifiée) dépend de la longueur d'onde et de la puissance injectée dans la fibre.

Références :

- [1] : A. Boyoguéno Bendé, M. A. Duguay, P. Fortier , « Étude sur l'amplification en ligne des systèmes de communication optique », Université Laval, Ste-Foy (Québec) Canada, G1K 7P4, 1997.
- [2] : Yoann Jestin, « Verres fluorés à base de Fluoroindate et Fluorogallate pour l'amplification optique : fibres à forte ouverture numérique, guides d'onde planaires et spectroscopie des ions de terre rare », Thèse de Doctorat de l'Université du Maine, Novembre 2002.
- [3] : Frédéric Gerome, « Conception et caractérisation de fibres compensatrices de dispersion chromatique pour application aux liaisons optiques WDM », Thèse de Doctorat de Limoges, 2005.
- [4]: Sébastien Forget « Cours d'Optique Instrumentale 2007-2008 ». Site web: www.ucam.ac.ma/fssm/optima.
- [5] : Jean-Noël Maran, « Lasers multi-longueurs d'onde à fibre dopee a l'erbium utilisant un decaleur de frequence dans la boucle de contre-reaction », Université de Laval CANADA, Mars 2006.
- [6] : Bernard Dussardier, « Caracterisation d'une fibre dopée terres rares », rapport de stage, Université Nice Sophia-Antipolis, 2013.
- [7] : Iréne et Michel Joindot, « Les télécommunications par fibres optiques », Dunod , Paris, 1996.
- [8] : E.Desurvire , J.R.Simpson, « Amplification of spontaneous emission in erbium-doped single mode fiber» , Journal of Lightwave Technology, vol. 7, n°5, pp.835-845, 1989.
- [9] : Benoit. Viallet, « Conception d'un amplificateur optique a 1.3 um: spectroscopie de couches minces de LaF3 dope Nd3+ et developpement de procedes technologiques innovants », Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier , Toulouse III, 2004.
- [10] : Laurent Badie, «Etude de materiaux amplicateurs a base de nanoparticules et Realisation d'un composant polymere pour les telecommunications optiques», Thèse de Doctorat de l'Ecole normale superieure de Cachan, France , 2005.
- [11] : Jean-Louis Verneuil, « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s », Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges, 2003.
-

-
- [12] : Bendrihem Abdelaziz, « Étude des phénomènes liés à la propagation dans les fibres optiques », Mémoire de Magister de l'Université de Batna, 2007
- [13] : 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.
- [14] : 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.
- [15]: C.Randy.Giles, and Emmanuel Desurvire, « Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers», Journal Of Lightwave Technology, V.LT-9,N°2, p271, 1991.
- [16] : A.A.M.Saleh, R.M.Jopson, J.D.Evankow, and J.Aspell, « Modeling of Gain in Erbium-Doped Fiber Amplifiers», IEEE Photonics Technology Letters. VN°2, p. 714, October 1990.
- [17] : T.Georges and E.Delevaque, «Analytic Modeling of High-Gain Erbium», Doped Fiber Amplifier Optics Letters, Vol.17, N°16, pp.1113-1115, August 1992.
- [18] : 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.
- [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]: Antoine Al Choueiry, « Nanoparticules de silicium et ions erbium pour l'amplification optique », Thèse de doctorat, January 2007.
- [22]: Emmanuel Desurvire, « Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications », April 1994.
- [23] : Burov E, Pastouret A., Boivin D., Gonnet C. et L.Gasca, « Nouvelle génération des fibres dopées Terre-rares-performances et applications », Septembre 2012.
- [24] : Ganye Wora Adeola, « Propriétés de luminescence de films d'oxyde de silicium dopés à l'erbium », Thèse de doctorat, Décembre 2007.
-

[25]: François Auzel, «Up-conversion and anti-stokes processes with f and d ions in solids», Chemical. Reviews., pp.104:139, 2004.

[26]: Mourad Menif, « Études du comportement des amplificateurs optiques fibrés face à un trafic auto-similaire », Thèse de doctorat, Mars 2002.

[27]: Mehdi Haïtami , « Optimisation multicouche heuristiques WDM tabou pour la résolution à moindre cout du problème de groupage de routage et d'affectation d'ondes», Thèse de doctorat, Canada, Décembre 2014.

[28] : Fabienne SALIOU , « Etudes des solutions d'accès optique exploitant Une extensio

Chapitre IV :

Simulations et résultats



IV.1 Introduction :

Nous avons vu, dans le deuxième chapitre, que la distance de transmission de la technologie d'accès optique GPON (Gigabit Passive Optical Network), déployée aujourd'hui, est limitée à 20 Km en raison de l'utilisation d'un budget 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 contexte, l'introduction de l'amplification dans le réseau GPON-TDM représente le principal objectif dans cette thèse. Il s'agit d'une solution d'extension de la portée au-delà de 60 Km grâce à l'utilisation d'amplificateurs optiques à fibre dopée erbium.

Comme premier objectif, nous présentons les paramètres caractérisant l'EDFA pour une seule 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 la longueur de la fibre dopée...etc... L'influence de chaque paramètre sur l'optimisation de la platitude du spectre du gain de l'EDFA multi-longueur d'onde (huit longueurs d'onde à l'entrée) est détaillée. La seconde partie propose une présentation de résultats de simulation concernant l'évaluation des performances d'un système GPON amplifié, avec la configuration booster en premier lieu, en termes de facteur de qualité, diagrammes de l'œil ; et ceci en fonction des paramètres opto-géométriques optimisés de l'EDFA. Dans un second lieu, des simulations ont été menées dans le but d'améliorer les performances d'un EDFA en position de pré-amplification en fonction d'autres paramètres tels que les formats de modulation, le débit ...etc.. Les résultats sont comparés pour les différentes positions de l'EDFA dans le système GPON (amplification post-, pré- et en ligne). Nous avons constaté qu'une configuration d'amplification en ligne pour les transmissions au-delà de 100 km est la meilleure en termes de budget optique et de distance parcourue suivie par la pré-amplification et la post-amplification, respectivement. On pourra utiliser une pré- ou une post-amplification pour des distances inférieures à 80 km.

IV .2 Critères d'évaluations des performances d'un système de transmission:

Lors de la transmission d'un signal optique dans un réseau fibre, le signal subit plusieurs dégradations. Afin de juger la qualité du signal transmis, des critères sont utilisés après la réception du signal. Ces critères représentent des paramètres de tests dans le but d'évaluer la qualité de la transmission. Deux paramètres sont importants à savoir : le facteur de qualité (Q) et le diagramme de l'œil, ces deux critères sont décrits au fur et à mesure des simulations entreprises.

IV.2.1. Diagramme de l'œil :

Le diagramme de l'œil est un outil efficace pour caractériser la qualité d'une transmission, il se forme par superposition de paires de symboles successifs qui fait apparaître des ouvertures en forme d'œil. Ce diagramme représente le degré de discrimination des différents niveaux du signal $x(t)$ et fournit par conséquent de bons renseignements sur l'immunité aux erreurs de la liaison. L'ouverture de l'œil caractérise le bruit et les distorsions apportées par la chaîne de transmission. 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 :

Il est possible aussi de mesurer les performances des transmissions avec le facteur de qualité Q . Une autre approche, plus qualitative, consiste à tracer le diagramme de l'œil du signal, en évaluant les valeurs des états hauts et bas I_1 et I_0 , ainsi que leurs incertitudes σ_1 et σ_0 [2]. On définit le facteur de qualité, dans ce cas par :

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad \text{IV.1}$$

Plus le signal est de mauvaise qualité, plus le diagramme de l'œil est fermé, plus les facteurs de qualité et le taux d'extinction sont faibles et ainsi plus la détection du signal sans erreur est difficile. Le diagramme de l'œil est donc un excellent moyen visuel de juger de la qualité du signal dans la limite de la réponse de la photodiode et de l'oscilloscope utilisé. Cette méthode qui permet de quantifier et d'évaluer le signal sans avoir à compter directement les erreurs s'appuie sur l'hypothèse gaussienne de la distribution de bruit d'amplitude pour chaque symbole.

IV.2.3. Taux d'erreur binaire :

Le Taux d'Erreur Binaire d'une liaison est le rapport entre le nombre d'erreurs et le nombre de bits transmis. Statistiquement il s'agit de la somme de la probabilité qu'un bit 1 soit détecté comme un bit 0 et de la probabilité qu'un bit 0 soit détecté comme un bit 1. En pratique il est courant d'extrapoler la mesure de BER pour la mesure d'un nombre d'erreurs très faibles car si l'on veut un BER de 10^{-12} il faut pouvoir compter une erreur sur un téra-bit transmis [3,4].

Le TEB habituellement accepté pour une transmission de bonne qualité est inférieur à 10^{-9} .

$$\text{TEB} = \frac{\text{Nombre d'erreurs}}{\text{Nombre de Bits transmis}}$$

IV.2

IV .3 Présentation de l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium :

L'amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium, que nous avons utilisé tout au long de cette thèse, consiste en une courte section de fibre optique (typiquement quelques dizaines de mètres) dont le cœur est dopé avec des atomes ionisés de l'élément rare Erbium, et un multiplexeur WDM qui permet de coupler dans la fibre le signal à amplifier ainsi que le laser de pompe de 980 nm afin de minimiser les pertes. Et puisque la fibre amplificatrice est de nature bidirectionnelle, alors les isolateurs empêchent d'une part l'amplification du signal arrivant en sens inverse de la fibre, et d'autre part l'émission spontanée amplifiée.

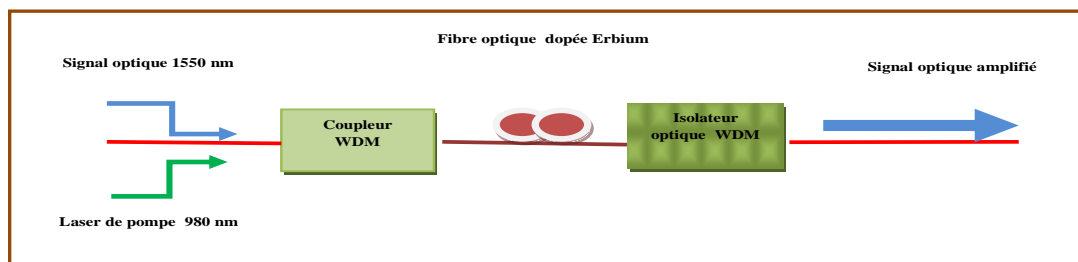


Fig. IV.1 : Schéma synoptique de l'amplificateur EDFA.

Les caractéristiques de l'amplificateur optique EDFA, sont rapportées sur le tableau (IV.1) :



Table IV.1 : Description de l'amplificateur par ses paramètres.

Paramètre	Description	Symbole
<i>Puissance du signal d'entrée</i>	-30 dBm à 5 dBm	P_{in}
<i>Plage de longueur d'onde du signal d'entrée</i>	1520 nm à 1600 nm	λ_s
<i>Longueur d'onde de pompage</i>	980 nm où 1480 nm	λ_p
<i>Puissance de pompage</i>	100 mW à 300 mW	P_p
<i>Longueur de la fibre dopée � l'erbium</i>	5m � 30 m	L
<i>Rayon du c�eur de la fibre dopée � l'erbium</i>	1 μm � 8 μm	R
<i>Concentration en ions erbium dans la fibre</i>	$3.10+24/m^3$ � $2.10+25/m^3$	N
<i>Ouverture numérique</i>	0.1 � 0.9	NA

IV. 4 Optimisation du gain et du facteur de bruit de l'EDFA :

Le gain de l'EDFA dépend fortement de ses paramètres opto-géométriques tels que la puissance de pompe, la concentration, la longueur de la fibre dop e erbium...etc... En général, la formule III.13 (chapitre III) montre qu'un compromis est à faire entre les principaux critères de performance (le gain, le rendement, et le facteur de bruit). Dans cette partie, notre simulation concerne l'influence de ces différents paramètres sur l'optimisation des performances de l'EDFA en particulier son gain G et son facteur de bruit NF .

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

L'effet de la puissance du signal d'entrée (P_{in}) sur la réponse du gain (G) en fonction de la longueur d'onde du signal d'entrée pour un rayon de c eur de la fibre dop e de 2 μm . , est illustré par la figure IV.2.a. Le gain reste au maximum entre $\lambda_s = 1530$ nm et $\lambda_s = 1560$ nm, pour de faibles puissances d'entrée (-30 et -10 dBm). Ce même gain diminue lorsque λ_s et P_{in} augmentent. L'évolution du facteur de bruit NF , pour différentes valeurs de puissance de signal d'entrée P_{in} est donn e par la figure IV.2.b. On observe à partir de cette courbe, que le facteur de bruit augmente lorsque la puissance d'entrée augmente.

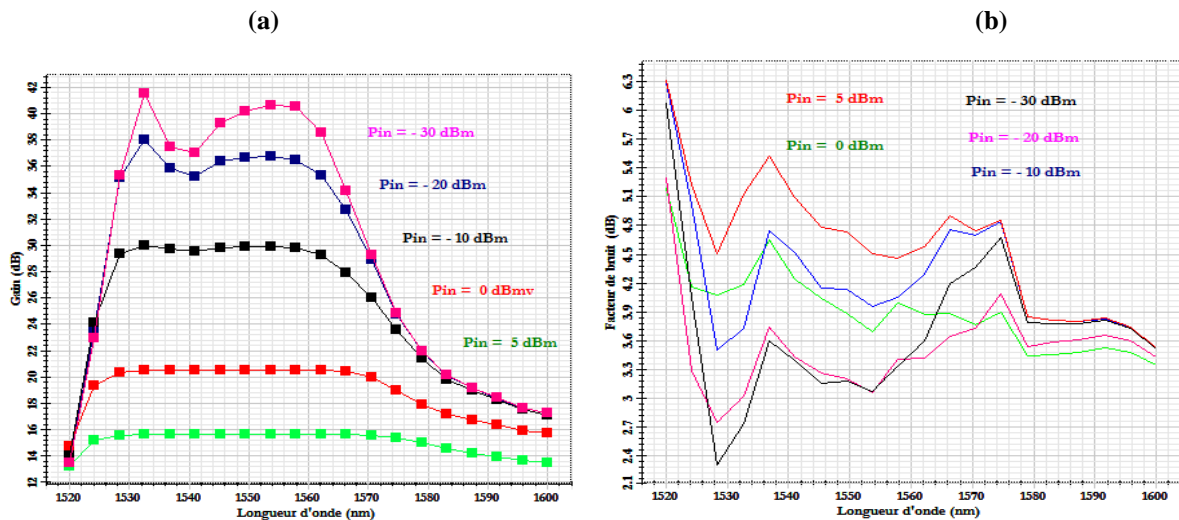


Fig. IV.2 Variation du gain (a) et du facteur de bruit (b) en fonction de la longueur d'onde du signal d'entrée, pour les puissances $P_{in} = -30$ dBm à 5dBm.

IV.4.2. L'influence du diamètre du cœur de la fibre dopée à l'Erbium :

Lors de cette étude, nous nous sommes attachés aussi à étudier l'impact du rayon du cœur de la fibre optique dopée et de la puissance d'entrée utilisée sur le gain et le facteur de bruit. Dans ce cas, pour les simulations, la longueur de la fibre optique amplificatrice a été établie à 10 m, la concentration en ions erbium a été fixée à $1e+025/m^3$ (ou bien $1.10^{25}/m^3$), et on relève la réponse du gain en fonction de la longueur d'onde et de la puissance du signal d'entrée, en faisant varier le rayon R du cœur de la fibre dopée.

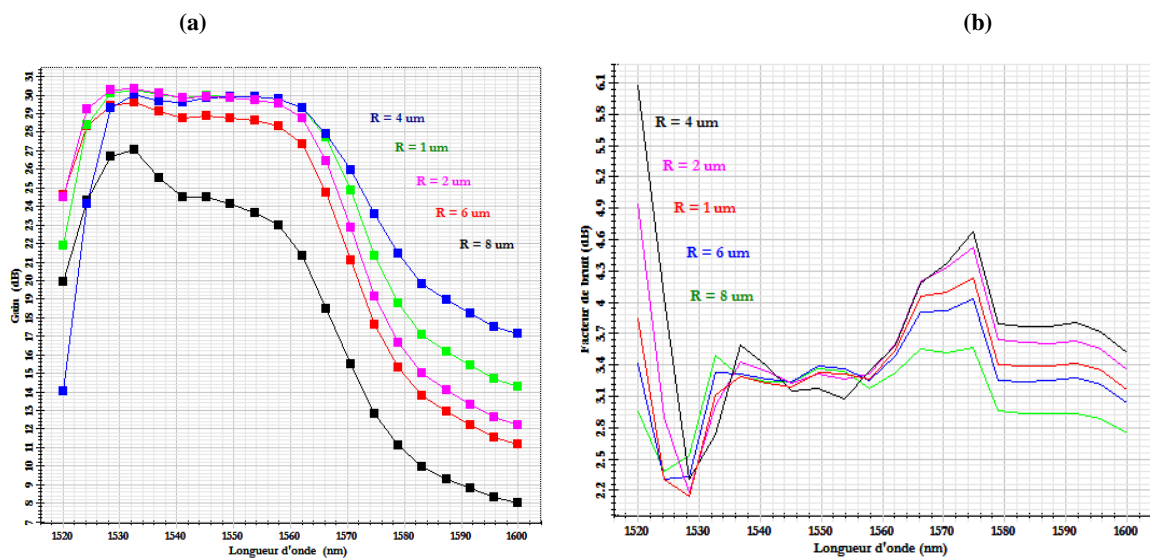


Fig. IV.3. Variation du gain (a) et du facteur de bruit (b) en fonction de la longueur d'onde du signal d'entrée, pour $R = 1\mu m$ à $8\mu m$.

Les courbes dans les figures IV.3 (a) et IV.3 (b), montrent bien comment les spectres présentent une augmentation du gain et une diminution de facteur de bruit quand le diamètre du cœur augmente. On relève, autour de $\lambda_s = 1530$ nm, un maximum de gain pour une valeur du rayon variant entre $2\mu\text{m}$ à $4\mu\text{m}$, puis le gain commence à diminuer lorsque le diamètre passe de $4\mu\text{m}$ à $8\mu\text{m}$. On note pour une puissance de signal d'entrée de -10 dBm, un optimum du gain ($G = 30$ dB) qui correspond à un facteur de bruit minimum ($NF = 3.2$ dB), pour un diamètre de cœur de $2\mu\text{m}$ autour d'une longueur d'onde $\lambda_s = 1550$ nm.

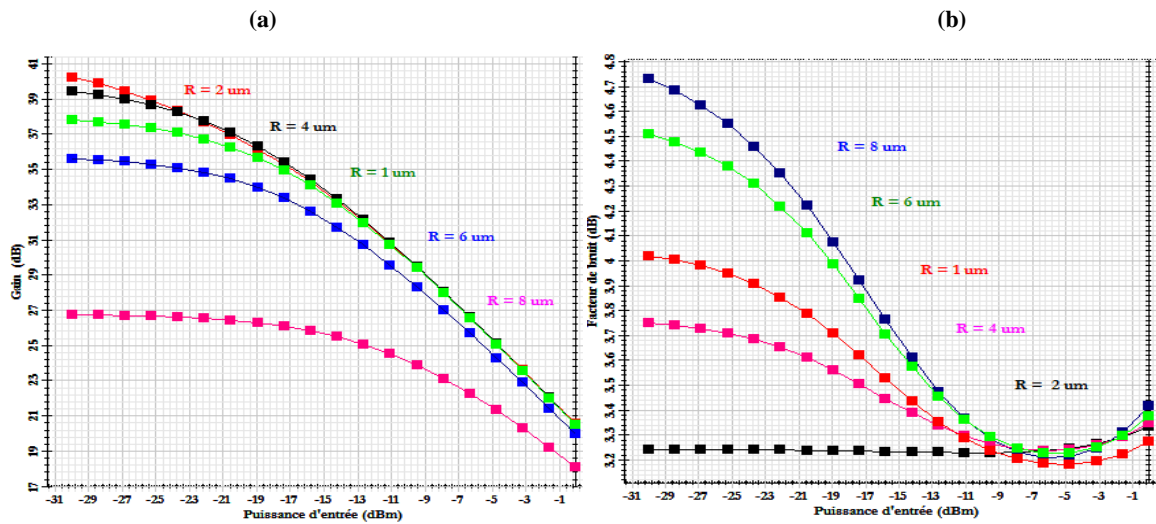


Fig. IV.4 Variation du gain (a) et du facteur de bruit (b) en fonction de la puissance du signal d'entrée pour $R = 1\mu\text{m}$ à $8\mu\text{m}$.

IV.4.3. L'influence de la puissance de pompe :

On va examiner dans ce qui suit l'effet de la puissance de la pompe sur l'augmentation du gain de l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium. Pour cela, on va considérer le cas d'un EDFA de 10 m de longueur de la fibre dopée pompée à 980 avec un rayon de cœur de $2\mu\text{m}$. A l'entrée de cet ensemble, on injecte un signal de longueur d'onde 1550 nm et une puissance de -10 dBm. La figure IV.5 présente le gain en fonction de la longueur d'onde pour différentes puissances de pompe. Les résultats des simulations, montrent qu'un gain au delà de 30 dB et un facteur de bruit au dessus de 2.2 dB sont atteints avec une puissance de pompe supérieure à 200 mW autour de la longueur d'onde 1530 nm. On peut aussi remarquer un pic du facteur de bruit centré à 1575 nm est observable, le niveau de ce pic augmentant avec la puissance de pompe.

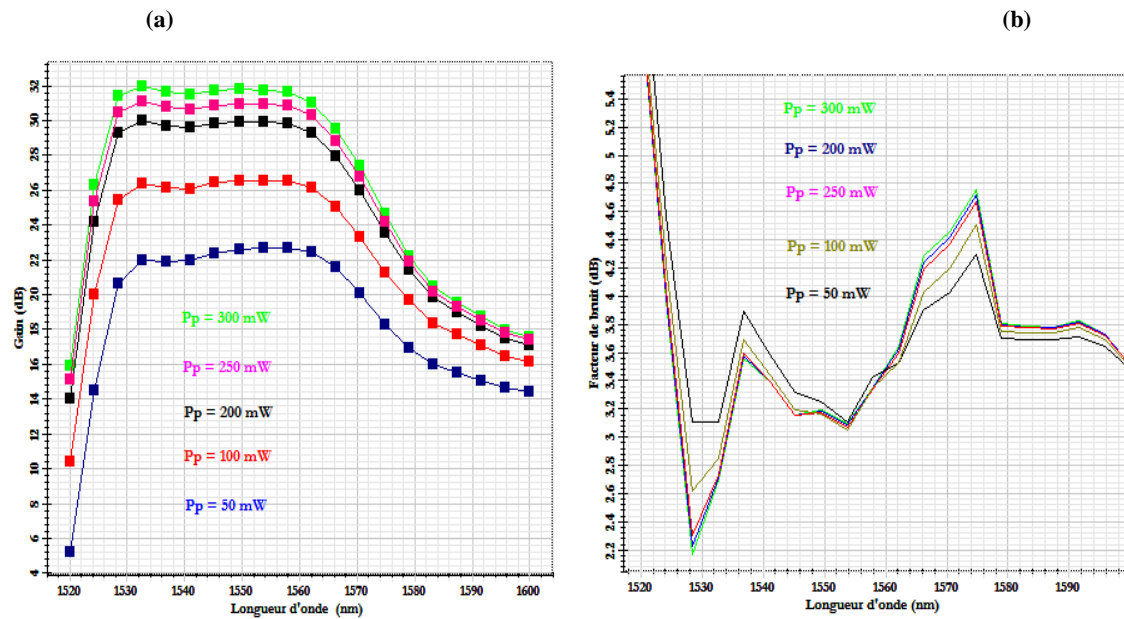


Fig. (IV.5) : Variation du gain (a) et du facteur de bruit (b) en fonction de la longueur d'onde pour différentes puissances de pompe.

IV.4.4. L'influence de la longueur d'onde de pompage :

Il y a deux types de pompage pour atteindre l'inversion de population d'ions erbium: un pompage direct à 1480 nm en longueur d'onde ou indirect à 980 nm. Des simulations ont également été menées dans le but de comparer le pompage à deux longueurs d'onde (980 nm et 1480 nm) dans la bande 1520 nm - 1600 nm. Les courbes des figures IV.6 montrent que le pompage à 1480 nm permet d'atteindre un meilleur gain au delà de 31 dB et un NF en dessous de 4.4 dB sont remarquables à 1550 nm dans notre fibre dopée erbium, tandis qu'à 980 nm on obtient un gain de 30 dB et un NF autour de 3.2 dB, chose qui est logique, car en pompant à 1480 nm on comprend bien que le rendement sera meilleur à cause de l'écart entre l'énergie du photon et celle du photon signal qui est plus faible que lorsque l'on pompe à 980 nm.

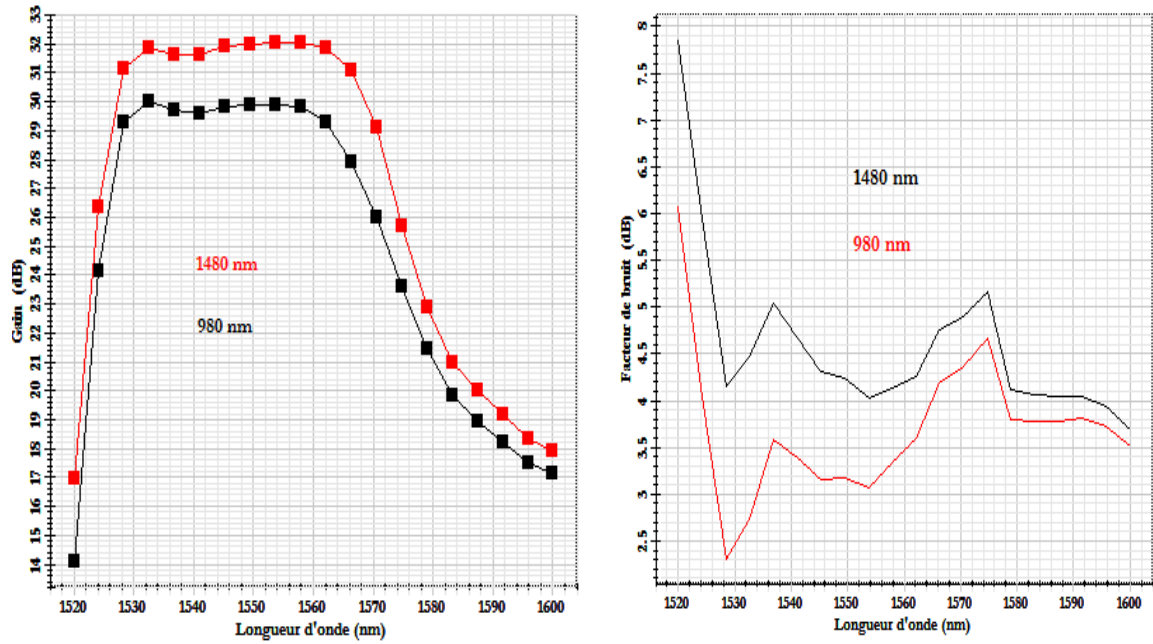


Fig. (IV.6) : Variation du gain (a) et du facteur de bruit (b) en fonction de la longueur d'onde pour deux longueurs d'onde de pompage (980 nm et 1480 nm).

IV.4.5. L'influence de la configuration de pompage :

Une autre information pertinente à tirer de ces résultats est l'influence de la configuration de pompage qui affecte sérieusement le profil du gain obtenu. Comme le montre la figure IV.7 trois cas ont été étudiés : pompage co-propagatif (Co- Pump or Forward - Pump), contra-propagatif (Backward-pump) et pompage bidirectionnel (co-propagatif et contra-propagatif). Il est à remarquer que la configuration contra -propagative procure un gain plus élevé que la configuration co-propagative mais elle est en pratique assez peu utilisée car elle produit encore plus de bruit (on note une différence de gain approximativement de 1 dB et un écart du facteur de bruit non négligeable). Par contre, pour un pompage bidirectionnel, Il est clair d'après les courbes, que le déploiement des deux pompes a contribué à l'obtention d'un gain supplémentaire de 2 dB et d'un écart du NF élevé environs de 3.5 autour de la longueur d'onde 1550 nm.

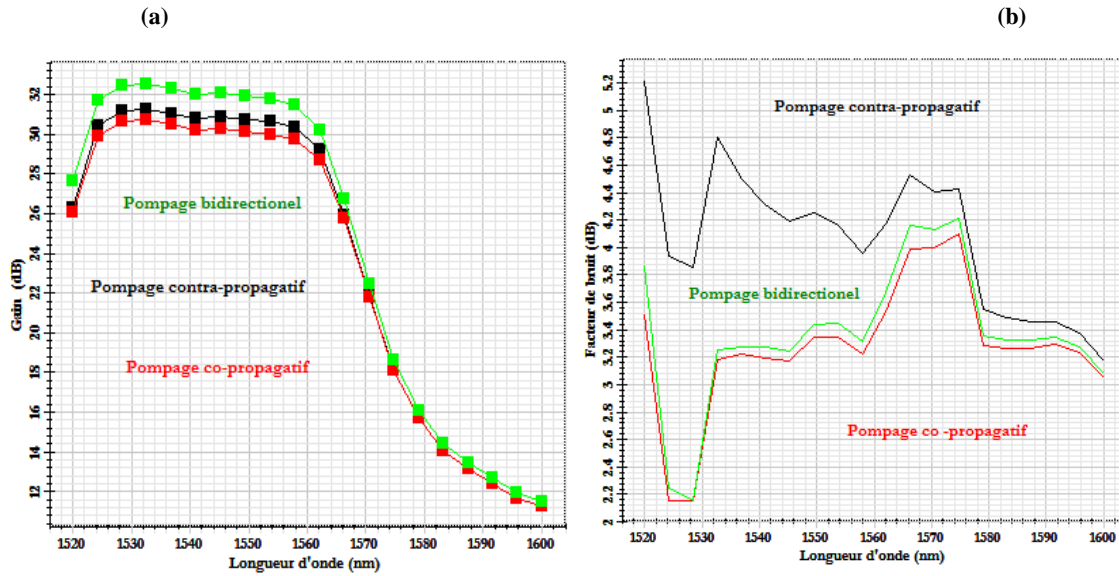


Fig. (IV.7) : Variation du gain (a) et du facteur de bruit (b) en fonction de différents types de pompage pour la fibre dopée ($\lambda_p = 980\text{nm}$).

IV. 5. Modélisation de la fibre optique dopée Erbium :

L'élément central de l'amplificateur EDFA est la fibre amplificatrice, c'est une fibre en silice monomode qui a été dopée avec l'erbium. Donc cette partie est consacrée à la modélisation et à l'optimisation de cette dernière directement pompée par une longueur d'onde 980 nm en termes de sa longueur et sa concentration d'ions erbium. Ces deux paramètres ont été modélisés et leurs influences sur le spectre des signaux ont été mises en évidence.

En ce qui concerne la longueur de la fibre, nous devons prendre en compte deux effets contraires: d'une part, il est nécessaire d'utiliser des fibres suffisamment longues pour absorber efficacement la puissance de pompe, et d'autre part si la longueur est trop grande, l'inversion de population n'est plus réalisée sur la dernière portion de la fibre et par conséquent le gain diminue. La modélisation du phénomène d'amplification nous permettra d'optimiser ce paramètre et de choisir la longueur adéquate, compatible avec les performances que nous voulons atteindre.

IV.5.1. La longueur optimale de la fibre dopée à l'erbium :

Soit un amplificateur EDFA dont tous les paramètres sont ceux précisés dans le tableau IV.1 et sont fixés à l'exception de la longueur L. Les courbes des figures ci-dessous présentent l'effet de la longueur de la fibre dopée à l'erbium (variant de 5 m à 25 m) sur la réponse du gain et du facteur de bruit NF en fonction de la puissance d'entrée P_{in} et en fonction de la

longueur d'onde λ_s . Les résultats obtenus montrent que le gain reste au maximum et constant avant de décroître entre $\lambda_s=1520$ nm et $\lambda_s=1560$ nm, pour des courtes longueurs de la fibre dopée autour de 5 m et 10 m (figure IV.8), et pour des faibles puissances d'entrée. On note un gain d'approximativement 30 dB et un facteur de bruit de 3.2 dB pour une longueur optimale de fibre environ 10 m, et pour une puissance d'entrée de -10 dBm (figure IV.9).

Cependant, la variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la longueur de la fibre dopée L est causée par deux facteurs différents avant et après la longueur optimale (dans notre cas : $L = 10$ m). Avant le point optimal, bien que le gain augmente, l'ASE générée augmente aussi détériorant ainsi le facteur de bruit NF. Après la longueur optimale, bien que l'ASE générée diminue, la détérioration du gain domine et donc le facteur de bruit NF continue d'augmenter.

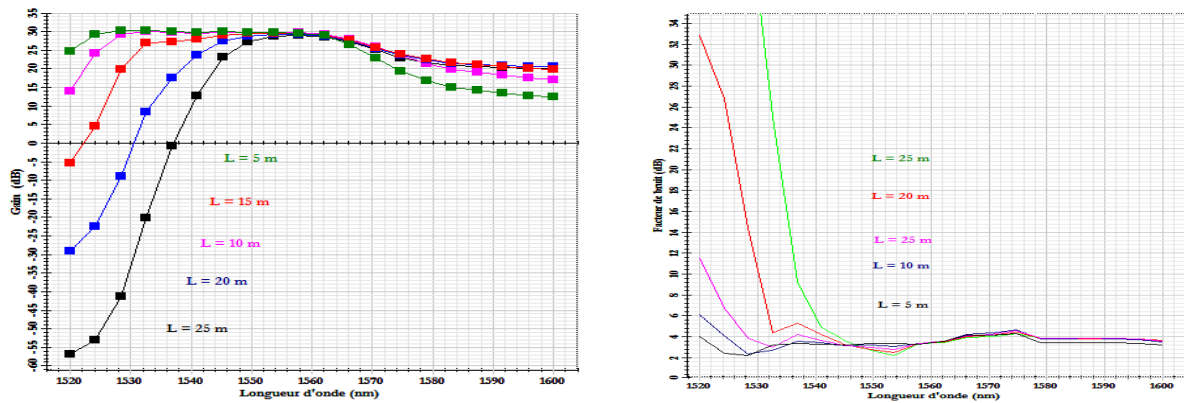


Fig. (IV.8) : Variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la longueur d'onde pour la fibre dopée pompée à $\lambda_p = 980$ nm

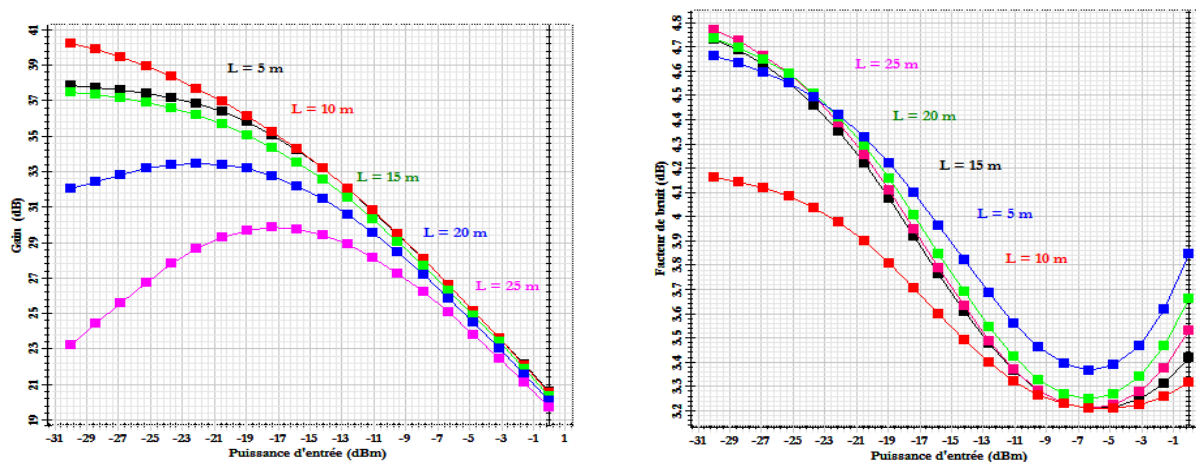


Fig. (IV.9) : Variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la puissance d'entrée pour la fibre amplificatrice pompée à $\lambda_p = 980$ nm.

De plus, pour une fibre dopée longue (supérieure à 10 m) et pour les deux cas de pompage (980 nm et 1480 nm), il apparaît clairement que le gain est moins important, et qu'il y a une forte génération d'ASE pour les longueurs d'onde basses autour de 1530 nm si on compare avec la longueur d'onde de 1550 nm (figure IV. 10 et figure IV. 11).

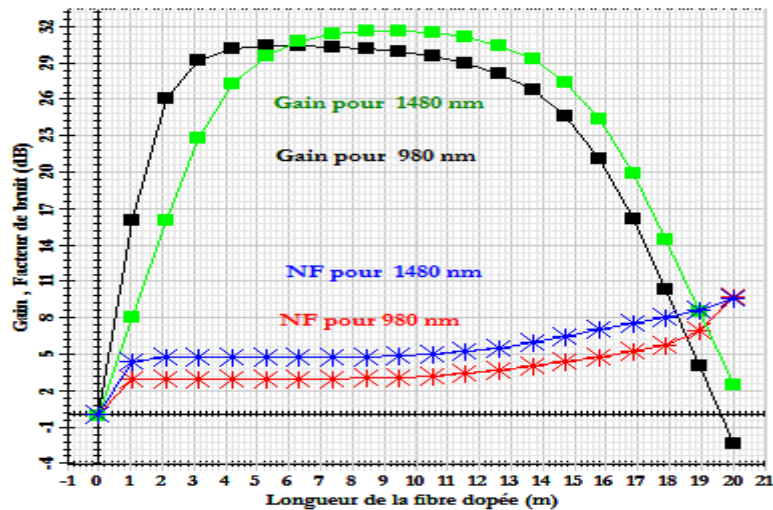


Fig. (IV.10) : Variation du gain et facteur de bruit en fonction de la longueur de la fibre à $\lambda_s=1530$ nm et pour deux longueurs d'onde de pompage de la fibre amplificatrice ($\lambda_p=980$ nm et 1480 nm).

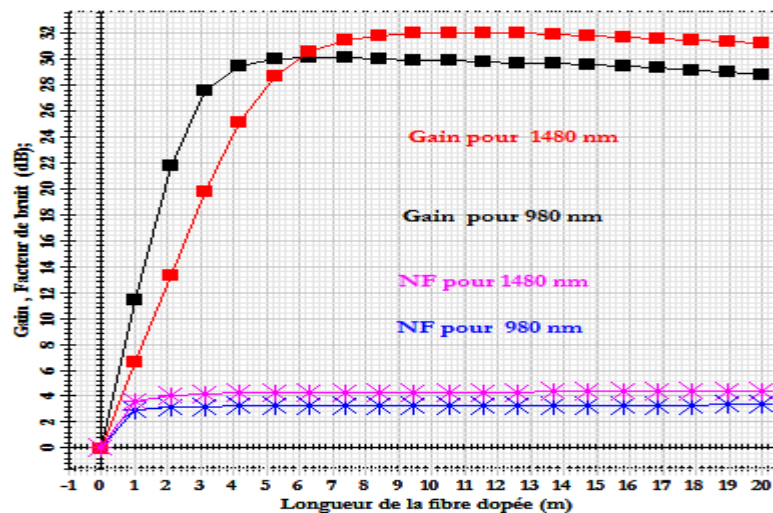


Fig. (IV.11) : Variation du gain et facteur de bruit en fonction de la longueur de la fibre à $\lambda_s=1550$ nm et pour deux longueurs d'onde de pompage de la fibre amplificatrice ($\lambda_p=980$ nm et 1480 nm).

IV.5.2. La concentration des ions erbium dans la fibre dopée à l'erbium

Afin d'optimiser l'émission des nanoparticules dans la fibre, une seconde voie s'est portée sur l'étude de l'influence de leur concentration. La première étape consiste à regarder l'effet sur le gain et le facteur de bruit en négligeant les effets de l'auto - extinction de la concentration « Concentration Quenching ».

Pour cela, nous avons utilisé une fibre de diamètre de cœur 2 μm pompée à 200 mW et on fait varier sa longueur d'onde entre 1520 et 1600 nm. Les spectres obtenus pour différentes concentrations d'erbium variant de $3.10^{24}/\text{m}^3$ à $1,5.10^{25}/\text{m}^3$, nous remarquons que pour une concentration inférieure à $1,5.10^{25}/\text{m}^3$ et supérieure à $3.10^{24}/\text{m}^3$, le gain est assez constant sur la plage spectrale entre 1545 nm et 1560 nm. Ainsi pour chaque concentration N, les courbes du gain et du facteur de bruit présentent des pics à environ 1530 nm (figure IV.12.a et IV.12.b), telle que le maximum gain ($G= 30$ dB) est obtenu pour une concentration de $6.10^{24}/\text{m}^3$ autour de la longueur d'onde 1550 nm. On peut voir aussi que le facteur de bruit descend à 2.3 dB autour de 1530nm de longueur d'onde pour la même concentration.

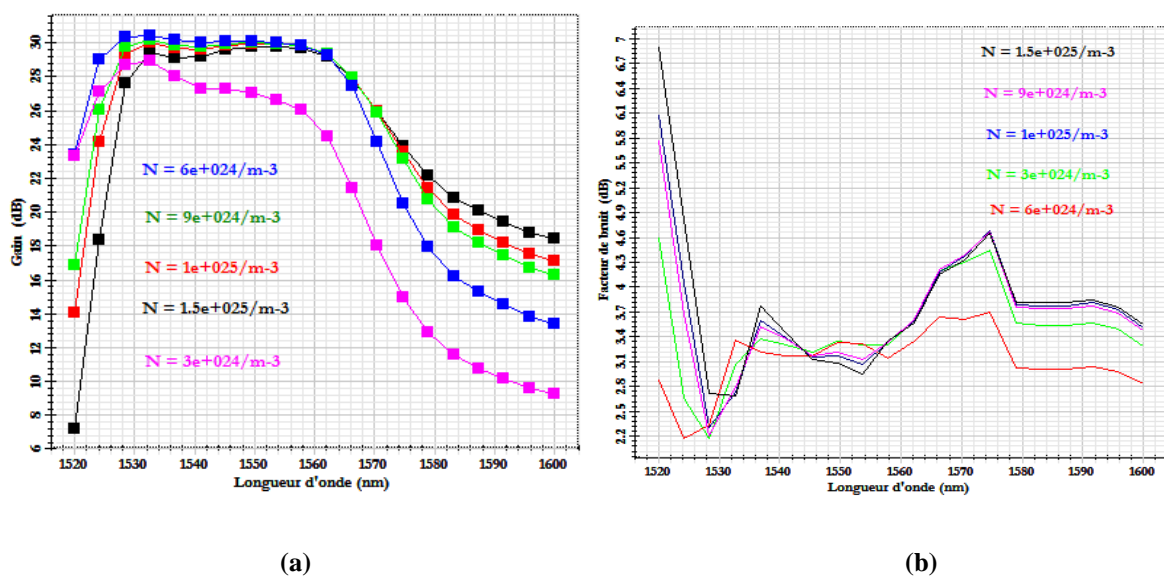


Fig. (IV.12) : Variation du gain, et du facteur de bruit (b) en fonction de la longueur d'onde pour différentes concentrations d'ions erbium.

Les figures ci-dessous montrent une autre façon d'analyser le gain et le facteur de bruit à 1550 nm en fonction de la longueur de la fibre dopée, et pour différentes concentrations d'ions erbium. Ces figures nous permettent de constater que lorsqu'on dépasse une certaine concentration, le gain diminue en raison d'une trop forte absorption de la pompe. Cette concentration optimale dépend de la longueur de la fibre dopée erbium. On peut voir que pour un amplificateur très court (de longueur de fibre $L = 2$ m), la concentration d'erbium doit être très élevée ($N = 1,5.10^{25}/\text{m}^3$) pour atteindre le gain optimal. Par contre quand la concentration diminue ($N = 3.10^{24}/\text{m}^3$), le maximum de gain est obtenu à partir d'une distance plus importante (autour de 9 m).

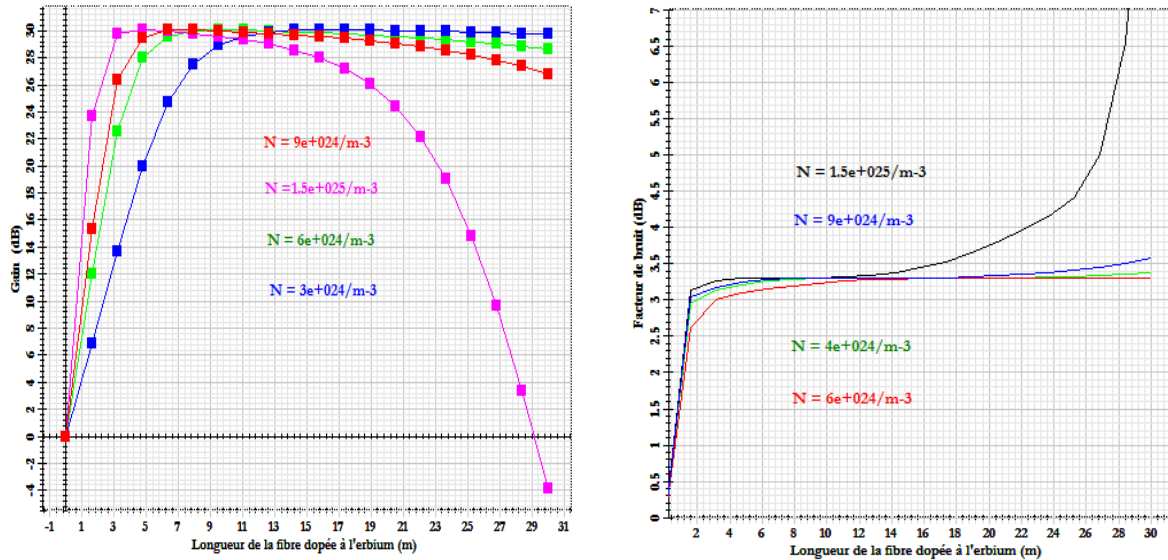


Fig. (IV.13) : Variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la longueur de la fibre dopée à l'erbium pour différentes concentrations d'ions Erbium.

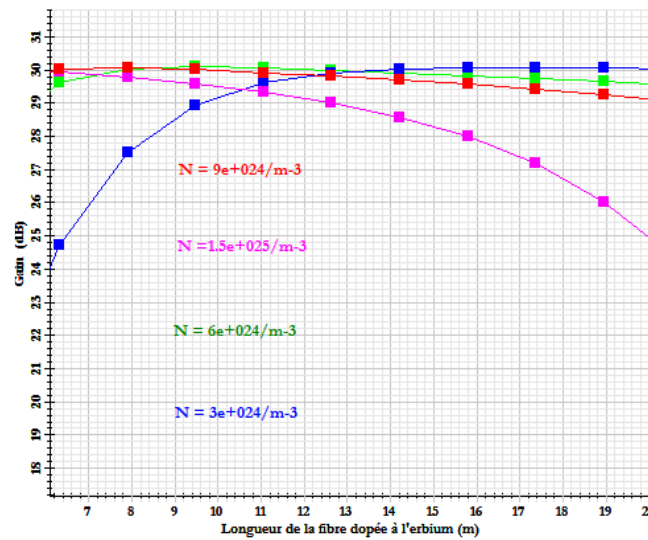


Fig. (IV.14) : Zoom de variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la longueur de la fibre dopée à l'erbium pour différentes concentrations d'ions erbium.

Les simulations montrent aussi que pour une puissance de pompe donnée (200 mW) à 1550 nm de longueur d'onde, une forte concentration crée des agrégats d'ions ce qui entraîne une dégradation des performances de l'EDFA, ainsi qu'un changement de la dépendance du gain et du facteur de bruit en fonction de la concentration d'ions Erbium. Les figures IV.15.a et IV.15.b, présentent, respectivement, le gain et le facteur de bruit en fonction de la concentration d'ions erbium mais sans négliger les effets de la concentration Quenching.

Ce phénomène se présente dans notre simulation par deux types des effets d'interaction entre les ions erbium. L'effet homogène appelé HUC « **H**omogeneous **U**p- **C**onversion » avec un coefficient $HUC = 5.10^{23} \text{ m}^3/\text{s}$, et l'effet inhomogène appelé PIQ « **P**air- **I**nduced **Q**uenching » avec un taux de cluster $K = 10 \%$. D'après les courbes ci-dessous, on a constaté que pour une concentration supérieure à $6.10^{24}/\text{m}^3$, les meilleurs résultats (en termes de gain $G = 30 \text{ dB}$, et de facteur de bruit $NF = 3.2 \text{ dB}$) sont obtenus dans le cas idéal (sans concentration Quenching), alors qu'une diminution prononcée du gain est observée dans les autres cas, et spécialement avec l'effet inhomogène PIQ qui est particulièrement pénalisant lorsque beaucoup de photons de pompe sont absorbés par des ions en paires. On a dénoté un gain G de 29 dB et son facteur de bruit NF de 3.3 dB pour l'effet homogène, et un gain de 25 dB et son facteur de bruit de 3.5 dB pour le cas inhomogène.

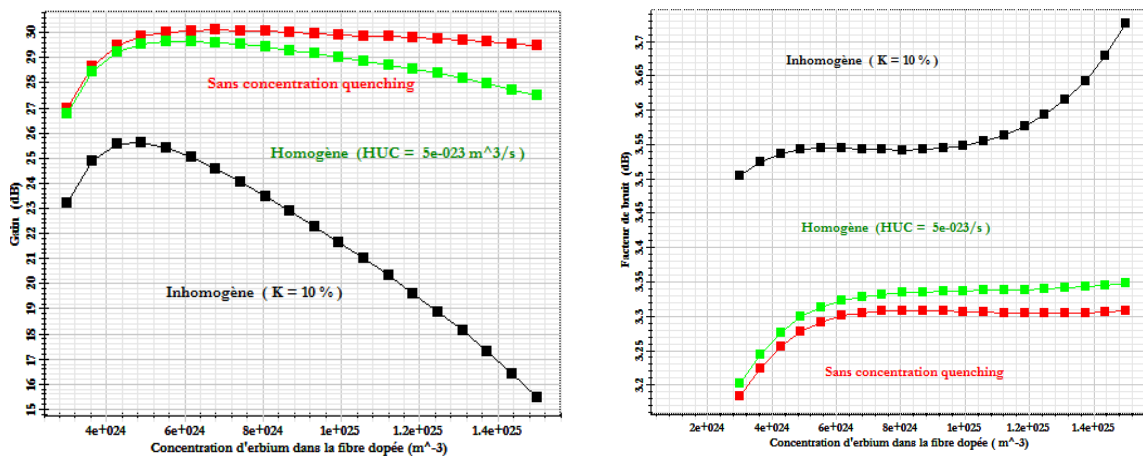


Fig. (IV.15) : Variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la concentration d'ions Erbium pour différents cas de transfert d'énergies HUC et PIQ.

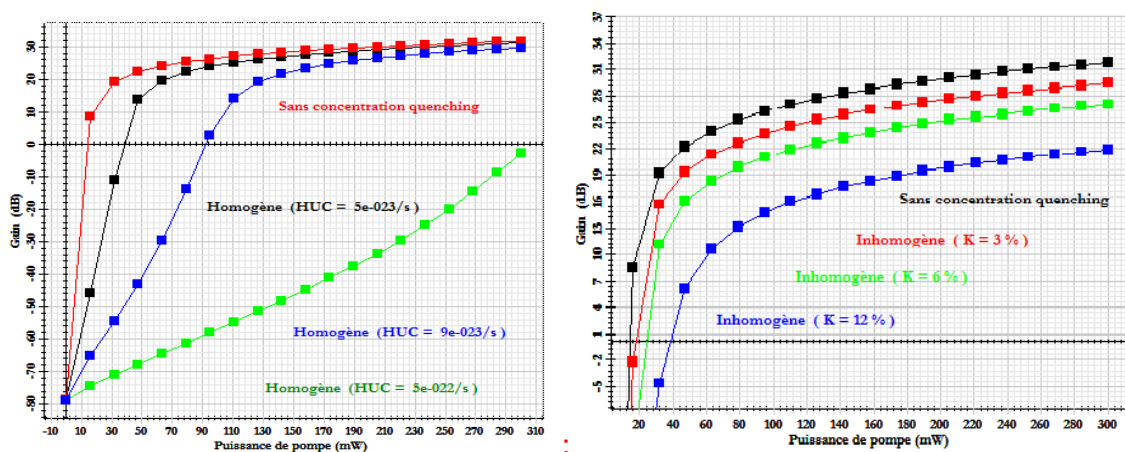


Fig. (IV.16) : Variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la puissance de pompe pour différents cas de transfert d'énergies HUC et PIQ.

IV. 6. Optimisation du gain et du facteur de bruit pour un système WDM :

L'EDFA possède une bande passante importante, qui est normalement de plusieurs dizaines de nanomètres et est plus que suffisante pour amplifier des canaux de données avec les débits de données plus élevés. L'introduction du WDM dans les lignes de télécommunications exige d'amplifier non plus une seule longueur d'onde du signal mais un peigne de longueurs d'onde. Cependant, la variation du spectre de gain de l'EDFA en fonction de la longueur d'onde du signal à amplifier limite la mise en œuvre de cette technique. Il y a plusieurs méthodes pour la conception d'un gain spectral plat de l'EDFA. Ces méthodes nécessitent soit des composants externes supplémentaires comme les filtres qui sont compliquées [5], ou bien un procédé prometteur est proposé qui repose sur l'optimisation des paramètres internes de l'amplificateur lui-même en réglant la longueur de la fibre et la puissance de pompage pour une puissance d'entrée donnée et une puissance de sortie désirée [6]. Dans ce contexte, nous présentons les résultats de simulation permettant d'aplatir le gain d'un amplificateur EDFA pour une entrée WDM à l'aide de cette technique mais par l'optimisation de la concentration d'ions Erbium et la longueur de la fibre dopée.

IV. 6.1. Description du système simulé :

La figure ci-dessous montre la conception d'un EDFA avec 8 signaux d'entrée, le système est principalement composé d'un transmetteur WDM configuré en modulation externe générant huit signaux NRZ au débit de 2.5 G bit /s avec une puissance d'entrée de -10 dBm, les 8 canaux sont multiplexés avec un espacement fixé à 0.8 nm dans la plage de longueur d'onde 1526 à 1538 nm. Deux isolateurs, un laser de pompe avec une longueur d'onde de 980 nm et une fibre dopée Erbium dont sa longueur et sa concentration sont les deux paramètres d'étude qui sont choisis pour l'optimisation de telle manière à obtenir une platitude du spectre du gain souhaitée avec une puissance de sortie acceptable. Dans la chaîne, nous remarquons la présence d'un analyseur double port WDM qui permet de mesurer : le gain, le facteur de bruit NF et la platitude du gain qui se traduit par le paramètre R_G (rapport entre le gain maximal et le gain minimal).

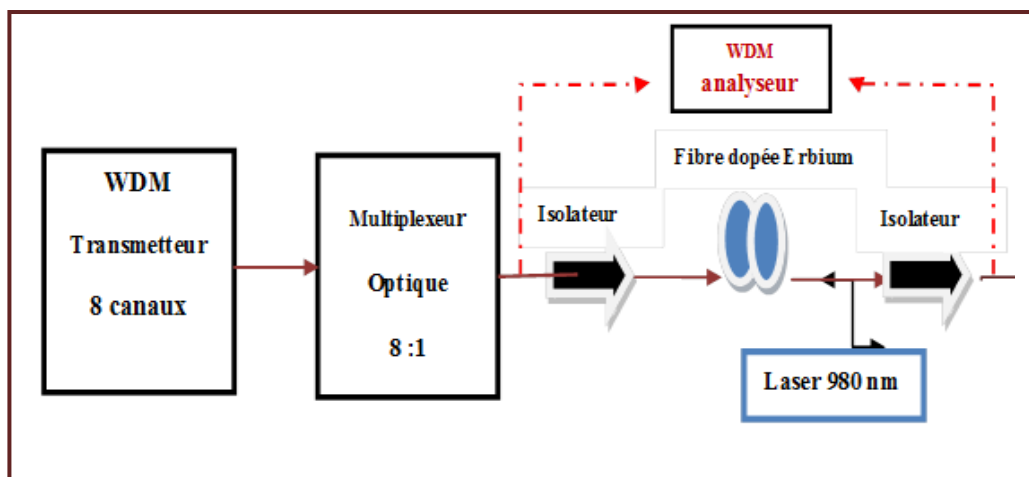


Fig. (IV.17) : Schéma de principe d'un EDFA utilisant une entrée multi-longueurs d'onde.

Le spectre optique du signal issu du multiplexeur permet d'illustrer la superposition qui est opérée par multiplexage en longueur d'onde du signal optique (figure. IV.18). La largeur spectrale des huit signaux optiques est visible sur le spectre de ce signal multiplexé. Nous pouvons détecter le changement qui a lieu dans la puissance de sortie de l'amplificateur à chaque signal d'entrée, le niveau de puissance en sortie est effectivement relevé il passe de -25 dBm en entrée à 10 dBm en sortie de l'amplificateur, mais la forme des impulsions est très altérée à cause de l'émission spontanée (ASE). On peut remarquer aussi une déviation de 10 dBm entre la puissance reçue maximale et la puissance reçue minimale en sortie de l'EDFA avec une puissance du signal d'entrée de l'ordre de -10 dBm.

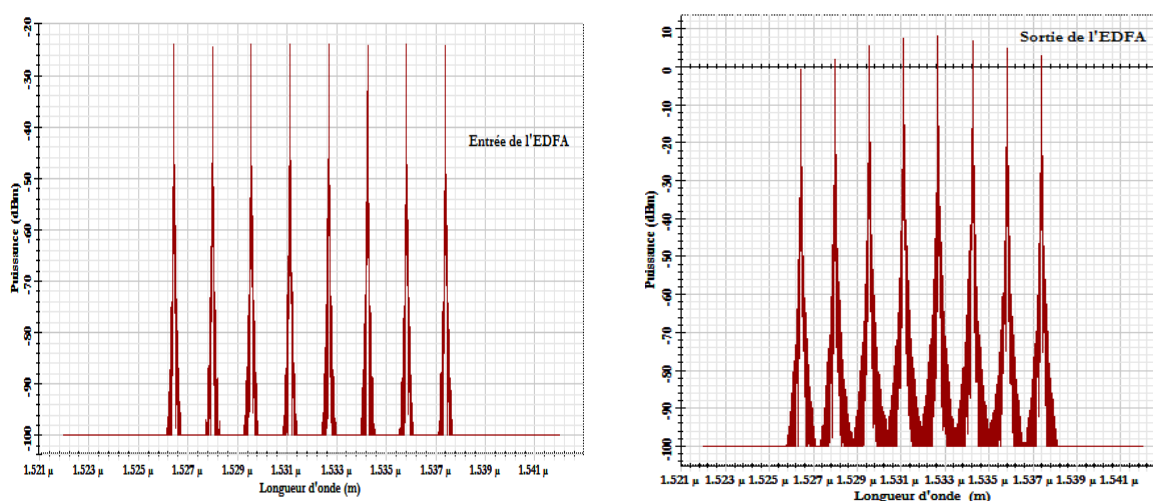


Fig. (IV.18) : Spectre de puissance d'un système WDM de 8 longueurs d'onde (a) à l'entrée de l'EDFA, (b) et en sortie de l'EDFA .

Les courbes dans la figure IV.19 illustrent le gain ainsi que le facteur de bruit en fonction de la longueur d'onde pour différentes puissances du signal d'entrée. A partir des résultats de la simulation, il est clair que lorsque la puissance du signal d'entrée augmente, le gain diminue tandis que le bruit chiffré baisse. Cependant, la plus basse puissance injectée dans le système (-10 dBm) donne un gain maximum de 38 dB et figure un bruit autour 3.1 dB avec une longueur de fibre de l'amplificateur de 10 m et à une longueur d'onde de $\lambda_s=1550$ nm.

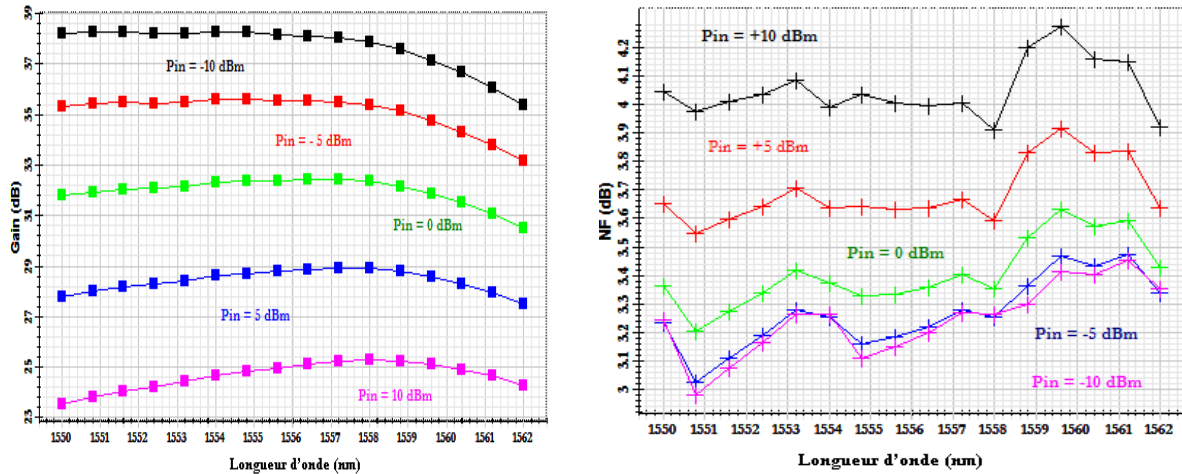


Fig. (IV.19) : Variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la longueur d'onde pour différentes puissances de signal d'entrée.

IV. 6.2. Optimisation de la platitude du gain en fonction de la concentration et de la longueur de la fibre dopée

Dans notre étude, le système est simulé avec une puissance d'entrée de 10 dBm pour obtenir une platitude du gain de l'EDFA par l'optimisation de la longueur et la concentration d'ions erbium de la fibre dopée. Les gains sont aplatis dans la bande 1537 nm à 1545 nm de longueur d'onde autour d'un gain de 26.6 dB avec un facteur de bruit (NF) à moins de 3.5 dB pour 8 canaux de transmission simultanée à base de l'EDFA. La figure IV.20 présente, les spectres de puissance et du bruit pour les différentes concentrations d'ions erbium (de $1.10 \cdot 10^{24} /m^3$ à $1.10 \cdot 10^{25}/m^3$) et différentes longueurs (de 2.5m à 12.5 m) de la fibre dopée à l'erbium.

La vague grise dans les courbes représente le bruit qui diminue lorsque la longueur et la concentration de la fibre dopée diminuent, alors que le symbole rouge dans les graphes indique l'échantillon de longueur d'onde (huit longueurs d'onde). La comparaison des cinq graphes permet de conclure que pour un gain maximum (Gain = 26.6 dB) et de platitude (minimum $R_G = 0.70$) nous avons une concentration de $5,5 \cdot 10^{24} /m^3$ et une longueur de la

fibres dopées de 7.5 m ; le pire des cas (gain moins égalisée avec un $R_G = 1.54$) est obtenu avec une longueur de fibre de 12.5 m .

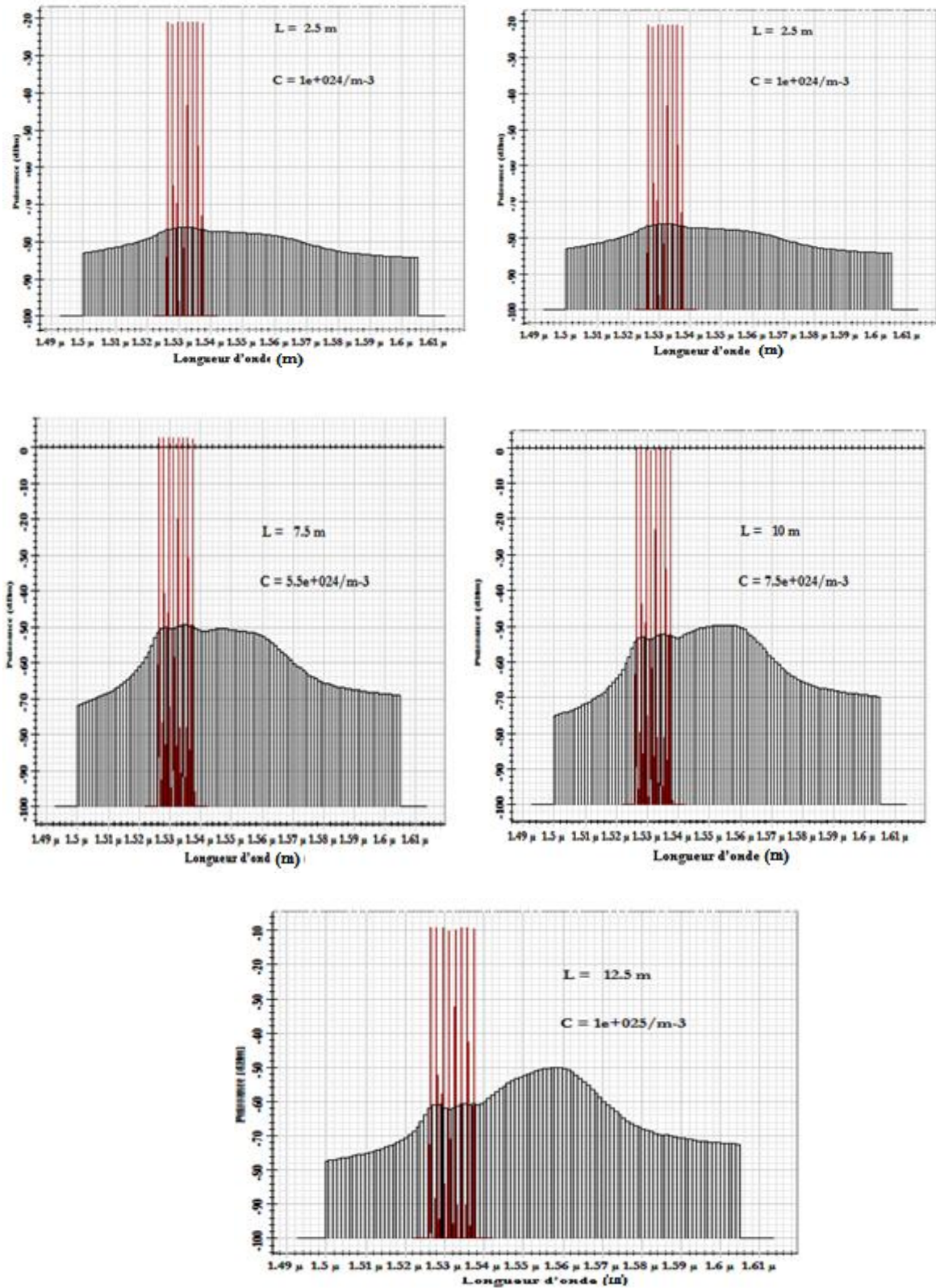


Fig. (IV.20) : Spectre de puissance et spectre de bruit en sortie de l'EDFA pour différentes valeurs de la concentration et de la longueur de la fibre dopée à l'erbium.

Le tableau ci-dessous résume les résultats de la simulation pour différentes valeurs de la concentration d'ions erbium et de la longueur de la fibre dopée, où le terme R_G représente la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale du gain de l'EDFA, alors que R_{NF} indique la variation du facteur de bruit.

Table IV.2 : Résultats de l'optimisation.

Gain	NF	$R_G = G_{max} - G_{min}$	$R_{NF} = NF_{max} - NF_{min}$	Concentration "N"	L
2.95 dB	1.95 dB	0.08 dB	0.46 dB	$1.10^{24} / m^3$	2.5 m
19.44 dB	3.43 dB	0.47 dB	1.63 dB	$3.5.10^{24} / m^3$	5 m
26.63 dB	3.65 dB	0.70 dB	2.15 dB	$5.5.10^{24} / m^3$	7.5 m
23.59 dB	4.47 dB	0.98 dB	2.04 dB	$7.5.10^{24} / m^3$	10 m
14.71 dB	4.66 dB	1.54 dB	2.06 dB	$1.10^{25} / m^3$	12.5 m

IV. 7. Introduction de l'EDFA dans le réseau optique GPON :

L'introduction de l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium dans le réseau GPON semble être nécessaire pour couvrir une zone géographique plus large et plus dense en nombre de clients desservis. Grâce à ce type d'amplificateurs, on va chercher à augmenter le budget optique total. Cette variation de budget optique va induire une variation de la puissance reçue par les photodiodes d'une part, et d'autre part elle induit un changement de point de fonctionnement des amplificateurs selon la puissance injectée.

Dans cette partie, notre étude porte sur l'introduction d'un EDFA dans une architecture GPON-TDM pour trois configurations d'amplification ; les simulations sont focalisées sur la voie descendante. Le signal descendant est à $\lambda_s=1550$ nm, modulé à 2.5 G bit/s pour un taux de partage de 64 et sur une distance de transmission de l'ordre de 80 Km. Les trois sortes d'amplification selon le placement de l'amplificateur EDFA dans une liaison optique sont possibles, la pré-, la post- et l'amplification de ligne.

La première méthode consiste à mettre l'amplificateur optique au central (dans l'OLT) avant la fibre de transmission et donc à compenser l'atténuation avant que le signal ne se propage dans la fibre optique. Dans la deuxième méthode, c'est l'inverse, le pré- amplificateur EDFA

est placé avant la photodiode, tandis que la dernière configuration c'est l'amplification de ligne où l'amplificateur est placé entre deux fibres de transmission (fibre L_1 et fibre L_2), figure IV.21.

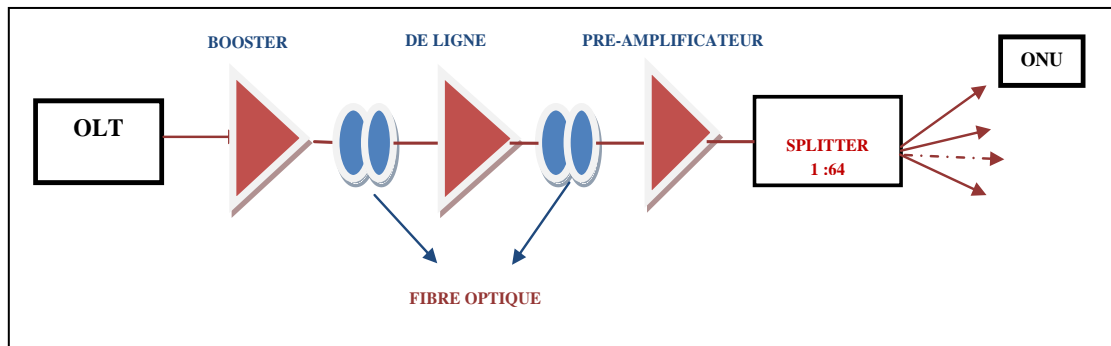


Fig. IV.21 : Différents placements de l'EDFA dans un réseau GPON

IV. 7.1. Schéma bloc de la liaison simulée :

Le schéma bloc de la liaison de base que nous allons simuler est représenté dans la figure ci-dessus, le bloc PRBS (Pseudo Random Binary Sequence) et le codeur NRZ (Non Return to Zero) génèrent des données pseudo aléatoires au débit de 2.5Gb/s. Les lasers présents à l'OLT sont des DFBs (Distributed Feed Back) avec un taux d'extinction de 10 dB modulé en continu, émettant à 1550 nm délivrant une puissance de sortie de 10 dBm. Typiquement, la longueur de la fibre G.652 entre l'OLT et le point d'éclatement est comprise entre 80 km et avec une atténuation linéaire de 0.2 dB/km, tandis que la longueur de fibre entre le point d'éclatement et l'ONT est d'au plus 300 m. Nous avons donc négligé cette dernière portion. Le module ONT comprend la conversion du signal par une photodiode APD avec une sensibilité de 0.9 A/W, un filtre et des modules d'évaluation des performances permettent de déterminer le diagramme de l'œil et la puissance reçue. La première configuration d'amplification simulée est celle où on insère l'EDFA au central donc le signal descendant est ainsi amplifié avant d'être envoyé sur le réseau, l'amplificateur est alors en fonctionnement post-amplification ou "booster".

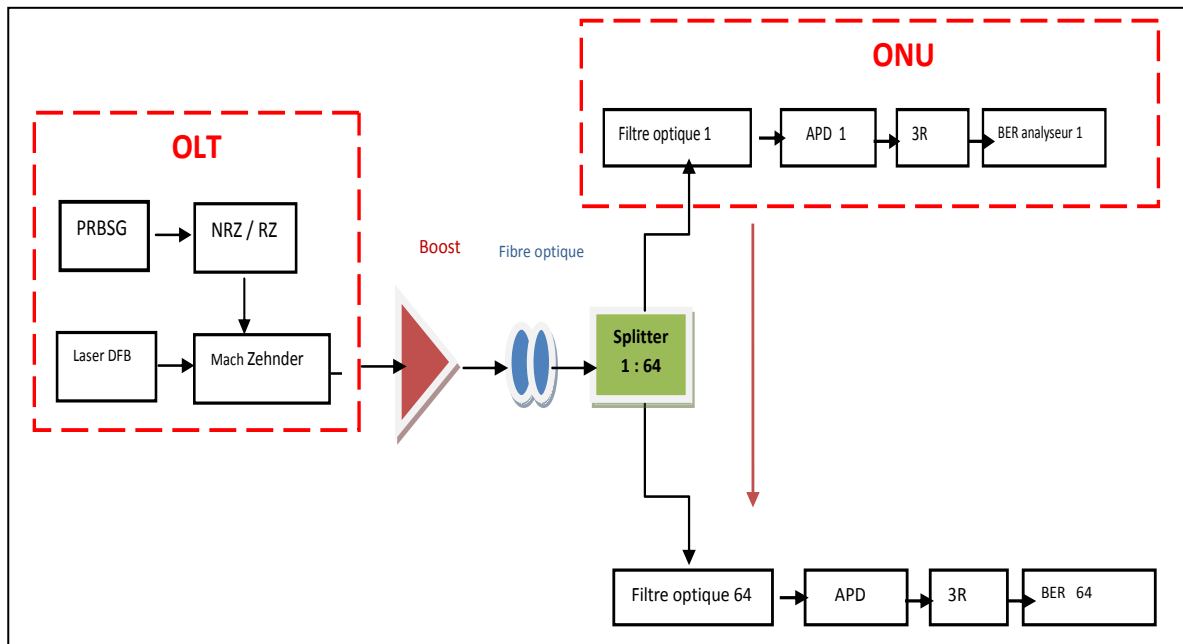
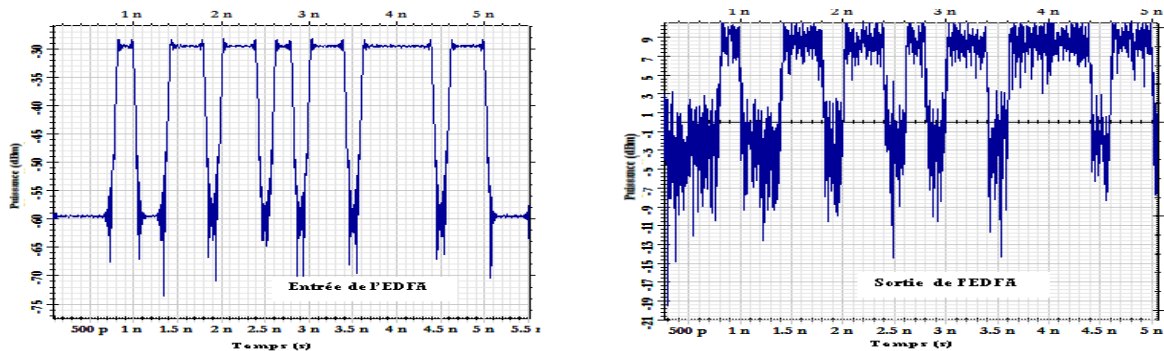


Fig. (IV.22) : Schéma synoptique de la liaison GPON utilisant l'EDFA en position "booster".

Afin de voir le comportement et l'influence de l'amplificateur, on compare l'allure du signal transmis à l'entrée et en sortie de l'EDFA. D'après les résultats de simulation (figure IV.23) nous voyons que, l'apport de l'amplification dans une chaîne de transmission améliore significativement l'amplitude du signal qui contribue à la diminution de l'atténuation, et par conséquent une augmentation 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 EDFA. On remarque aussi que la valeur de la puissance diminue au fur et à mesure que la longueur de la fibre augmente ce qui implique la croissance de l'atténuation.

Pour $L_T = 10 \text{ Km}$



Pour $L_T = 60 \text{ Km}$

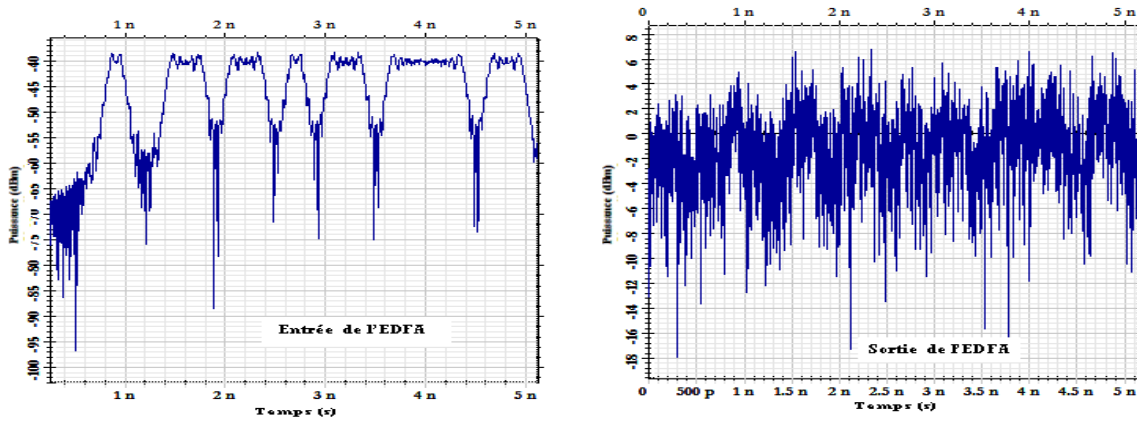


Fig. (IV.23) : Allure des signaux avant et après l'amplification pour une liaison de longueur $L_T = 10 \text{ Km}$ et $L_T = 60 \text{ Km}$.

Pour une puissance d'entrée fixée à 10 dBm, la comparaison en fonction de la longueur de la fibre de transmission entre un système GPON insérant un EDFA booster et un autre système sans l'EDFA, montrent que l'introduction de l'amplification fournit de meilleures performances pour le système, chose qui est bien vérifiée par l'augmentation du facteur de qualité (figure VI.24). En outre, nous avons obtenu pour 60 Km, et 64 utilisateurs un bon facteur de qualité Q autour 7.6, mais cette distance doit être réduite à 20 Km afin d'obtenir un facteur de Q autour de 6 sans l'amplificateur optique EDFA. Les résultats obtenus nous donnent une idée claire sur les améliorations apportées par l'introduction de ce composant, qui permet d'étendre la distance de propagation du GPON au delà de 60 Km.

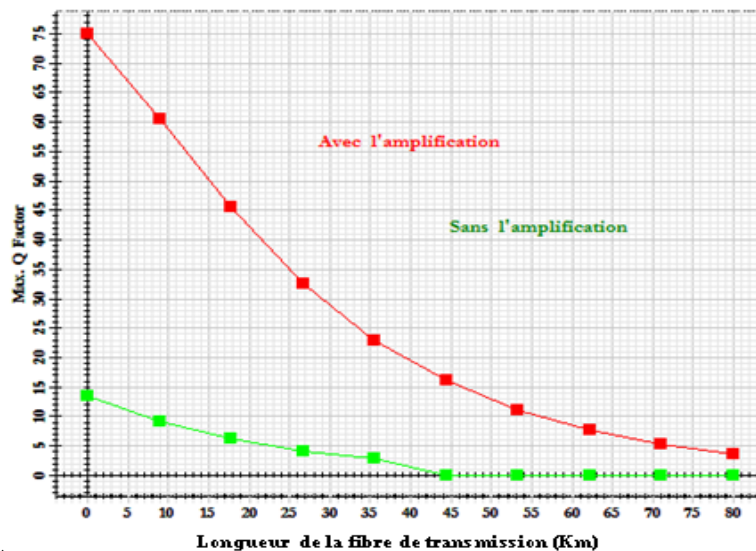


Fig. (IV.24) : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la distance de transmission du GPON sans et avec un EDFA en position "booster".

D'autre part, on remarque sur les figures ci-dessous, que le diagramme de l'œil d'une liaison avec l'EDFA présente une ouverture satisfaisante avec un facteur de qualité acceptable au-delà de 60 Km, mais il est déjà fermé sans l'EDFA: donc les performances de la liaison sont limitées par l'atténuation dans la fibre.

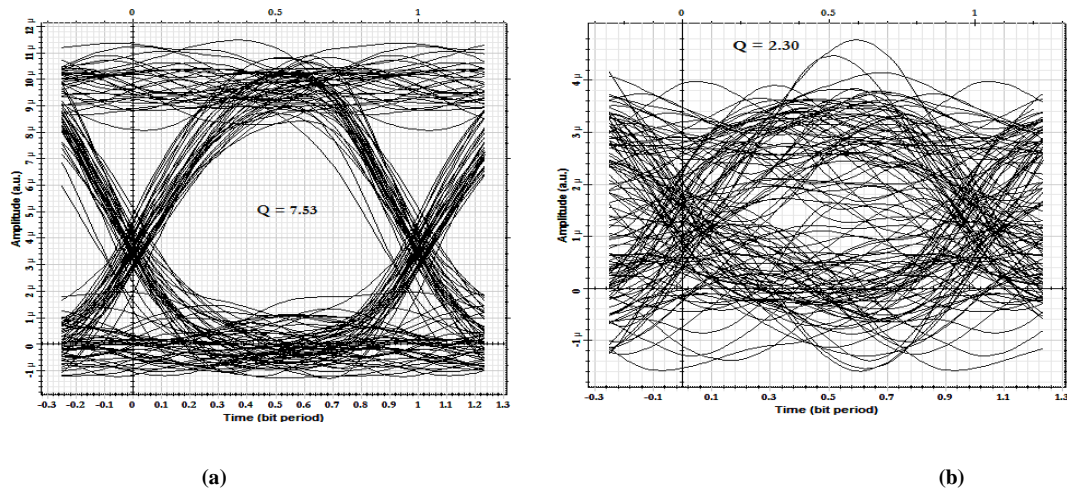


Fig. (IV.25) : Diagramme de l'œil d'une liaison (a) avec et (b) sans l'amplificateur optique EDFA

IV. 7.2. Le choix des paramètres opto-géométriques de l'EDFA :

L'objectif dans cette partie est donc d'étudier les différentes caractéristiques de l'EDFA en position post- amplification (booster) à partir des paramètres opto-géométriques. Cette caractérisation, basée sur des simulations, va nous permettre de donner un aperçu sur le choix de ces paramètres afin d'optimiser les performances du système simulé en termes de facteur de qualité et de diagramme de l'œil. Nous avons choisi d'attribuer au système étudié un débit binaire égal à 2.5 Gbits/s pour trois valeurs de la puissance du signal injecté en entrée (5,10 et 15 dBm), on fixe la valeur de la puissance de pompe à 100 mW, le rayon de cœur de la fibre amplificatrice est de $2\mu\text{m}$: on relève la réponse du gain, on calcule ainsi le facteur de qualité en fonction de la longueur d'onde du signal d'entrée, et à chaque fois bien sûr nous ne faisons varier que l'un des trois paramètres ; la longueur de la fibre amplificatrice , ou la concentration d'ions Erbium ou la longueur d'onde de pompage .

a) Le choix de la longueur optimale de la fibre dopée

Le premier paramètre que l'on va examiner dans ce qui suit, est la longueur de la fibre dopée à l'erbium L et son influence sur les performances de l'EDFA (en termes de gain et de facteur de bruit) d'une part, et d'autre part sur l'augmentation de la portée du système simulé.

Pour cette fin, on va considérer le cas de l'EDFA décrit précédemment mais en faisant varier la longueur de la fibre dopée L de 0 m à 21 m. Selon la figure IV.26, nous constatons que le gain augmente jusqu'à atteindre son maximum noté G_{\max} autour de 19.2dB pour une longueur de fibre optimale notée L_{opt} autour de 9 m et pour une faible puissance du signal d'entrée (5 dBm). Au-delà de cette longueur, l'inversion de population n'est plus réalisée et il ya réabsorption du signal, et donc décroissance de la puissance signal de sortie et par conséquent diminution du gain.

Nous relevons aussi que le facteur de qualité augmente avec la puissance injectée, et atteint un pic de 7.6 pour une puissance d'entrée $P_{\text{in}} = 10$ dBm, et une longueur de fibre dopée $L = 9$ m autour 1550 nm (figure IV.27). Au-delà de cette longueur, le facteur de qualité diminue. On note aussi que la meilleure ouverture de l'œil se trouve autour cette longueur optimale de la fibre dopée (figure IV.28).

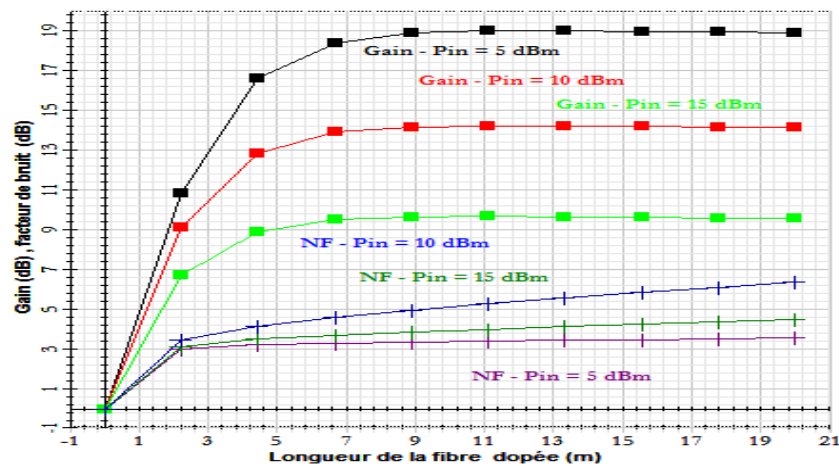


Fig. (IV.26) : Variation du gain et du facteur de bruit NF en fonction de la longueur de la fibre dopée pour trois puissances de signal d'entrée

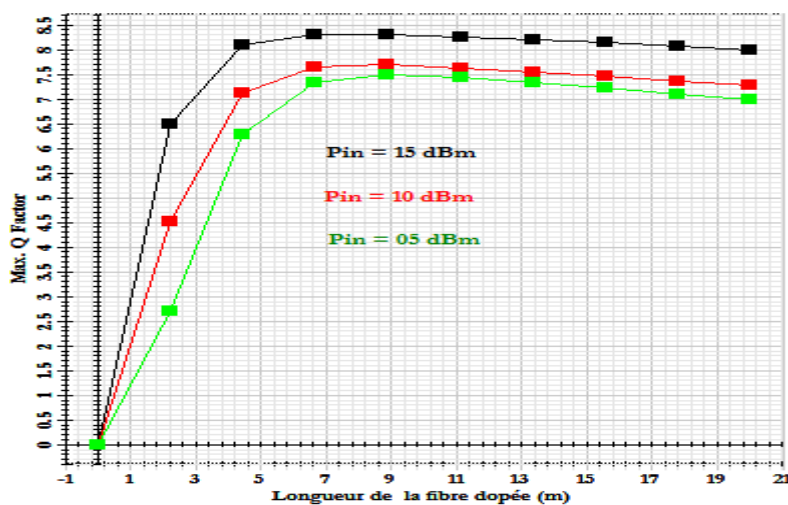


Fig. (IV.27) : Variation du facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre dopée pour trois puissances de signal d'entrée.

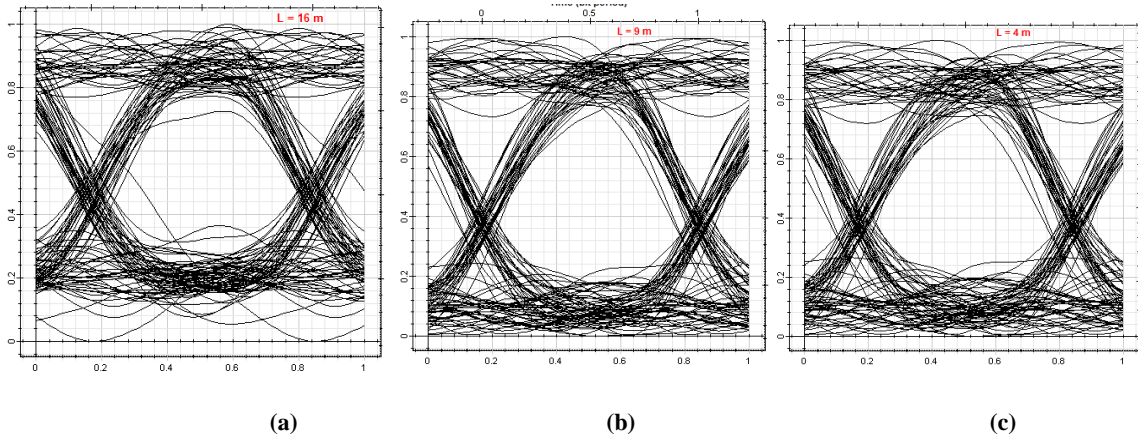


Fig. (IV.28) : Diagrammes de l'œil à $P_{in} = 10$ dBm pour trois longueurs de la fibre dopée :

(a) $L = 16$ m, (b) $L = 9$ m, (c) $L = 4$ m.

b) Le choix de la concentration d'Erbium

Maintenant, en fixant la longueur de la fibre dopée L à 9 m, et on fait varier la concentration d'ions erbium. Les figures ci-dessous présentent le gain (figure IV.29) et le facteur de qualité (figure IV.30) en fonction de la longueur d'onde pour différentes concentration N . Les résultats des simulations montrent que le maximum du gain et du facteur de qualité pour les trois puissances d'entrée (5, 10 et 15 dBm) est obtenu quand la concentration d'ions erbium de la fibre dopée $N = 6.10^{+24}/m^3$.

On remarque les facteurs de qualité égaux à : 7.4, 7.6 et 8.4 pour les puissances 5 dBm, 10 dBm et 15 dBm, respectivement, toujours pour cette même concentration : ce qui nous amène à la choisir comme paramètre optimal de notre simulation.

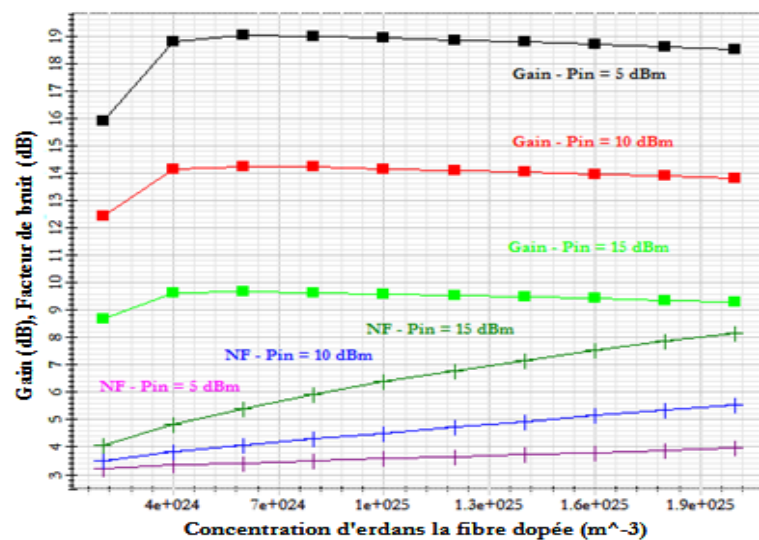


Fig. (IV.29) : Variation du gain et du facteur de bruit NF en fonction de la concentration de la fibre dopée pour trois puissances de signal d'entrée.

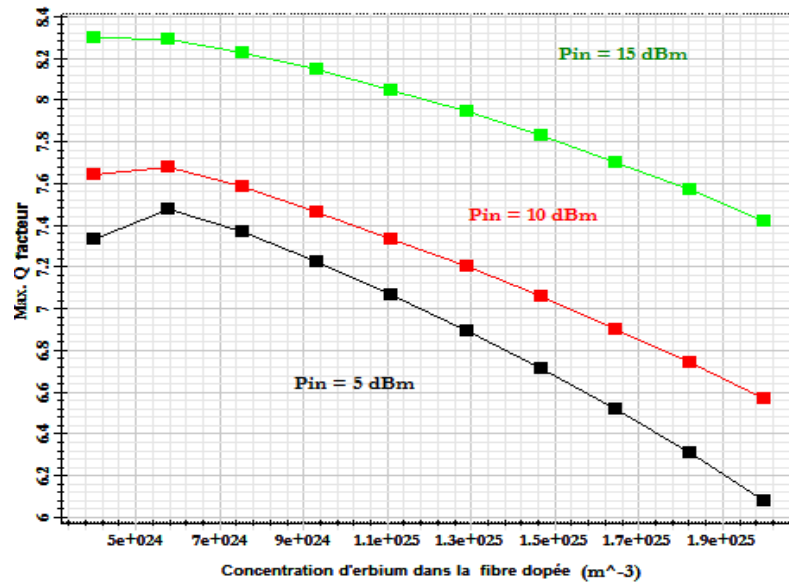


Fig. (IV.30) : Variation du facteur de qualité en fonction de la concentration de la fibre dopée pour trois puissances de signal d'entrée.

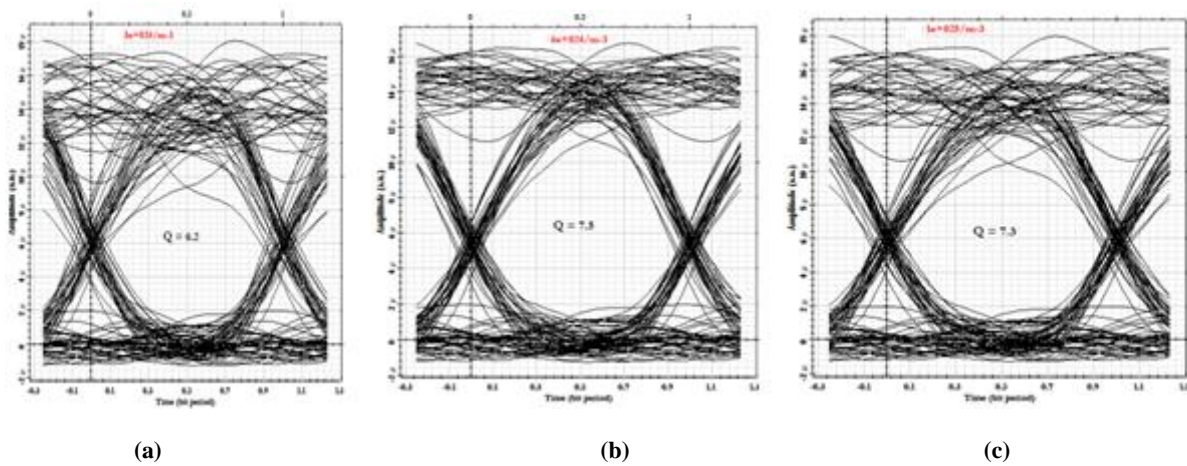


Fig. (IV.31) : Diagrammes de l'œil à 10 dBm pour trois concentrations de la fibre dopée :

(a) $N = 1.10^{25}/m^3$, (b), $N = 6.10^{24}/m^3$, (c), $N = 3.10^{24}/m^3$.

c) Le choix de la longueur d'onde de pompage

Pour les mêmes paramètres cités ci-dessus, l'effet de la longueur d'onde de pompage sur la réponse du gain (G) et sur les performances du GPON, en fonction de puissance du signal d'entrée, est illustré par les figures IV.32 et IV.33. Les courbes montrent qu'on a un fort gain mais avec un grand facteur de bruit pour le pompage à $\lambda_p = 1480$ nm que celui à $\lambda_p = 980$ nm, chose qui est logique, car lorsque l'on pompe à 1480 nm les atomes (ions) s'excitent directement vers le deuxième niveau ($4I_{13/2}$), cependant cela entraîne l'encombrement du niveau, on a alors plus de possibilité de désexcitation où d'émission spontanée.

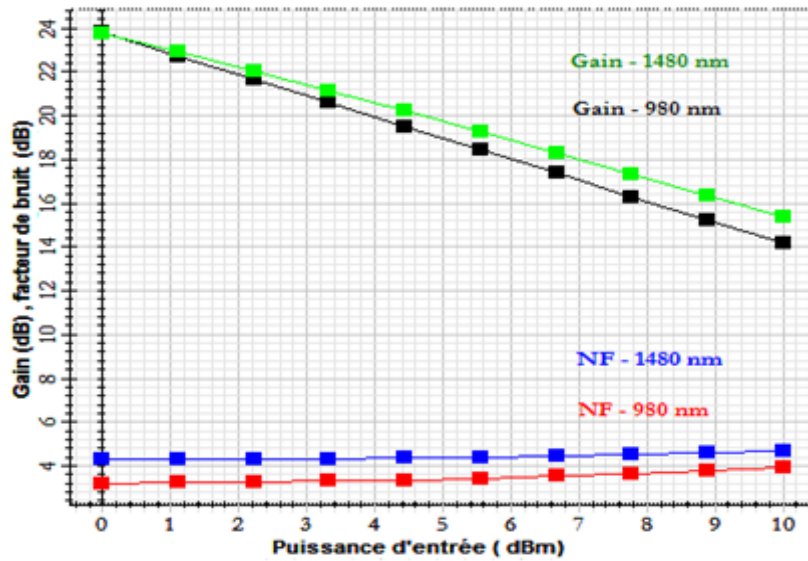


Fig. (IV.32) : Variation du gain et du facteur de bruit NF en fonction de la puissance d'entrée pour $\lambda_p = 980$ et $\lambda_p = 1480$ nm.

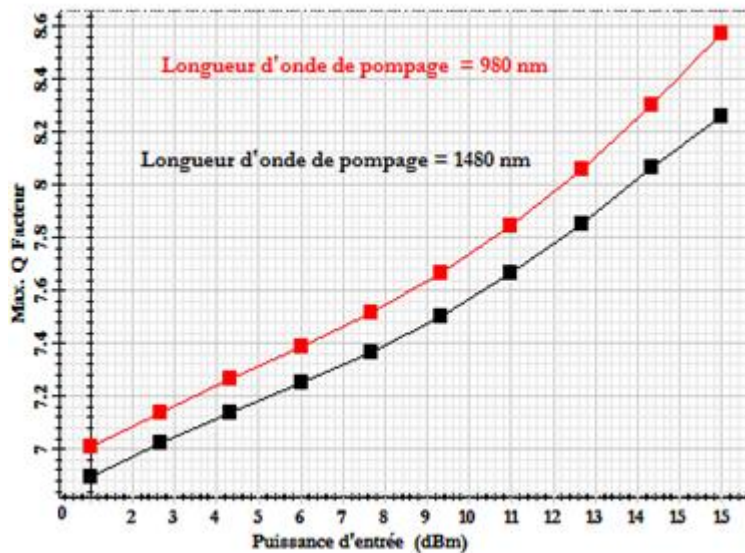


Fig. (IV.33) : Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance d'entrée : $\lambda_p = 980$ nm et $\lambda_p = 1480$ nm.

A l'inverse, le pompage à $\lambda_p = 980$ nm présente un faible bruit, cela est dû à la présence du troisième niveau ($4I_{15/2}$), ce dernier permet au niveau métastable ($4I_{13/2}$) d'avoir un temps de relaxation. Il peut donc être clair que $\lambda_p = 980$ nm fournira plus de gain stabilisé par rapport à $\lambda_p = 1480$ nm (minimum de bruit introduit) et donne de meilleures performances du système en terme facteur de qualité Q et d'ouverture de l'œil par rapport à 1480 nm. Nous pouvons obtenir un facteur de qualité Q de 7.45 et 7.6 pour $\lambda_p = 1480$ nm, $\lambda_p = 980$ nm, respectivement (figure IV.34).

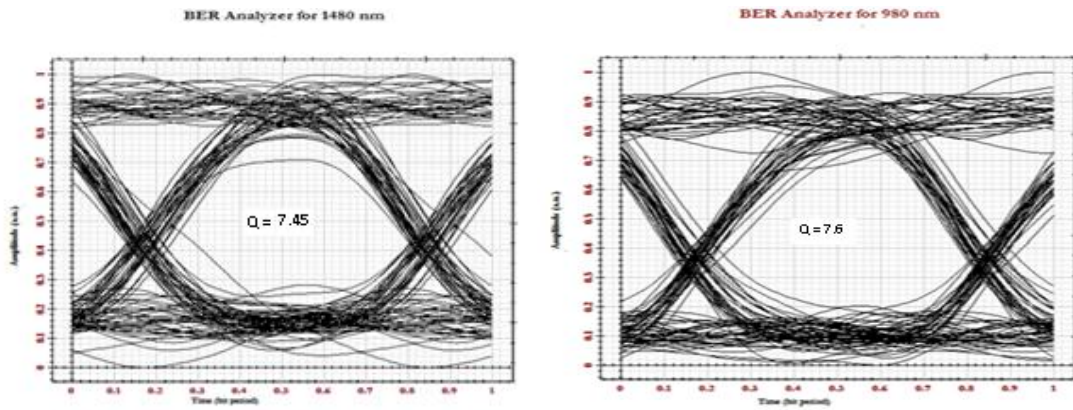


Fig. (IV.34) : Diagrammes de l'œil à 10 dBm pour les longueurs d'onde de pompage :

$$\lambda_p = 980 \text{ nm}, \quad \lambda_p = 1480 \text{ nm}.$$

En conclusion de cette partie basée sur les différentes simulations d'optimisation, nous avons mis en évidence l'apport de chaque paramètre sur le gain de l'amplificateur à fibre optique dopée par des ions Erbium. Le tableau IV.2 résume les paramètres utilisés dans notre simulation, et qui nous permettent la post-amplification d'une liaison GPON avec un bon facteur de qualité autour de 7.6 jusqu'à 60 Km pour 64 utilisateurs.

Tableau IV.2 : Les résultats obtenus par simulation

Paramètre	Valeur	symbole
Puissance de pompe	100 mW	P_p
Rayon du cœur	2 μm	R
Concentration d'erbium	$6.10^{24} / \text{m}^3$	N
Longueur d'onde de pompage	980 nm	λ_p
Longueur de l'amplificateur	9 m	L
Puissance du signal d'entrée	10 dBm	P_{in}
Gain optique	14.2 dB	G
Facteur de bruit	3.6 dB	NF

La figure IV.35 a pour but d'estimer la distance maximale de propagation que le GPON est capable d'atteindre avec l'EDFA en position booster. L'interprétation des courbes obtenues nous permet de dire que cette liaison permet d'atteindre une distance maximale de 65 km de fibre avec un bon facteur de qualité ($Q \approx 6.6$) qui correspond à un taux d'erreur binaire ($TEB > 10^{-9}$).

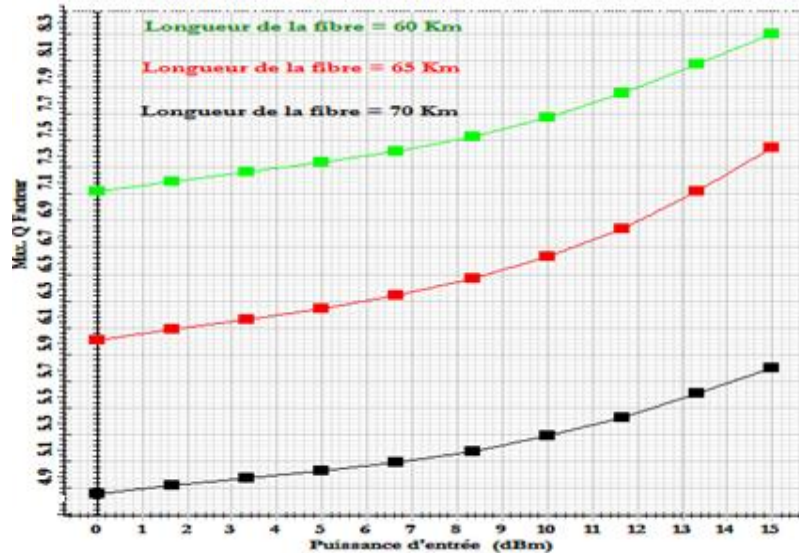


Fig. (IV.35) : Les facteurs de qualité Q obtenus en post-amplification (booster) en fonction de la puissance d'entrée après 60, 65 et 70 km de distance de transmission.

La figure ci-après, présente le diagramme de l'œil observé après 60, 65 et 70 Km de longueur de fibre dans la configuration "booster" de l'amplificateur, pour une puissance d'entrée de 10 dBm : une dégradation notable de l'œil à 70 Km est à souligner.

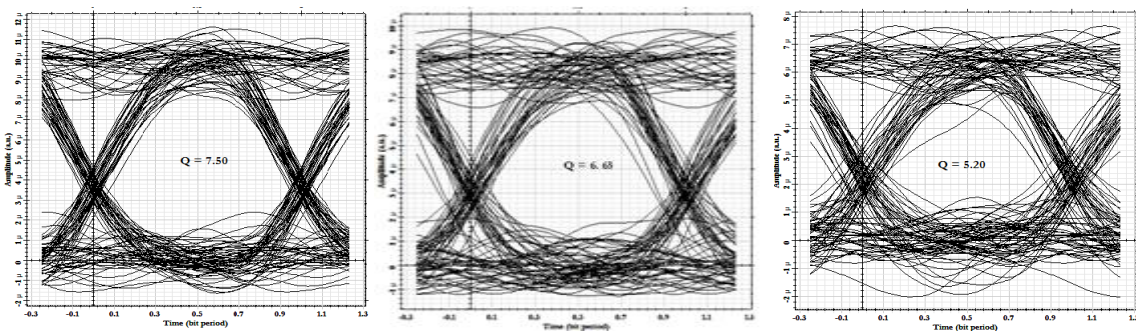


Fig. (IV.36) : Diagrammes de l'œil obtenus en post-amplification après 60, 65 et 70 Km de longueur de fibre optique, respectivement.

IV. 8. Optimisation du GPON avec l'EDFA en position de pré-amplification :

our présenter l'impact de la transparence de l'amplificateur EDFA sur la qualité de réception du GPON-TDM, nous avons effectué les mêmes simulations que précédemment mais avec la configuration pré-amplification. On insère l'EDFA avant le récepteur, donc le signal descendant est ainsi amplifié après être propagé dans la fibre de transmission. Cette configuration permet d'augmenter en même temps la sensibilité du récepteur et le budget de la liaison. Plusieurs simulations ont été effectuées en utilisant une fibre de transmission de 80 Km de longueur. L'évaluation du système est basée sur la mesure de la puissance du signal détecté, du facteur de qualité Q et du diagramme de l'œil en termes des paramètres tels que le débit binaire, le type de photo-détecteur et le type de format de modulation...etc..

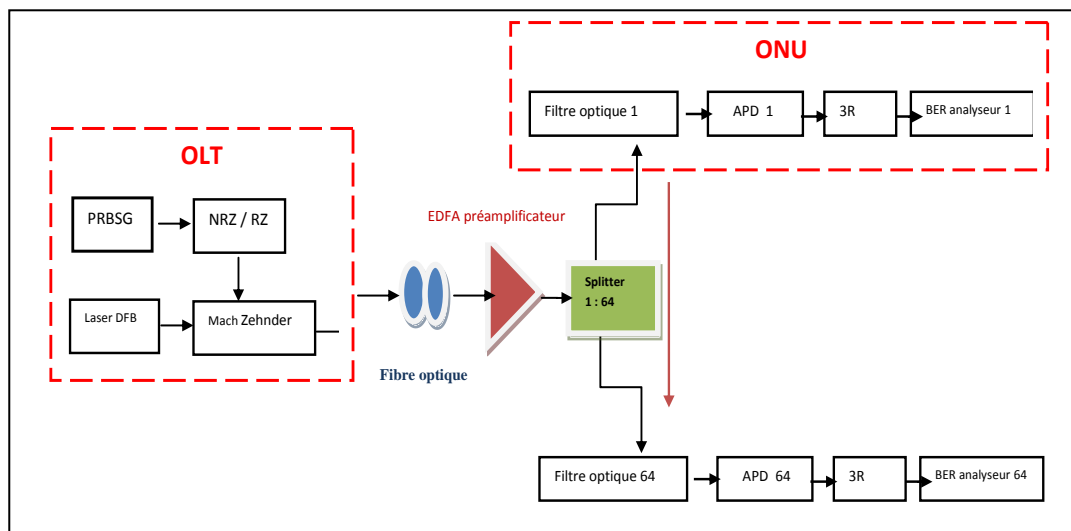


Fig. (IV.37) : Schéma synoptique de la liaison GPON utilisant l'EDFA en position "préamplificateur"

La figure IV.38 présente l'évolution du facteur de qualité Q en fonction de la puissance optique injectée, pour trois longueurs de transmission 80,90 et 100 Km. On a constaté une amélioration de la qualité de la transmission en augmentant la puissance. Ainsi, pour une puissance injectée de 10 dBm, on note un gain de 27dB et un facteur de bruit NF de 3.5dB. Ce système simulé permet d'atteindre une distance de propagation maximale d'environ 100 km avec une puissance optique reçue par le détecteur d'environ -14,50 dBm, et un facteur de qualité autour 6.7

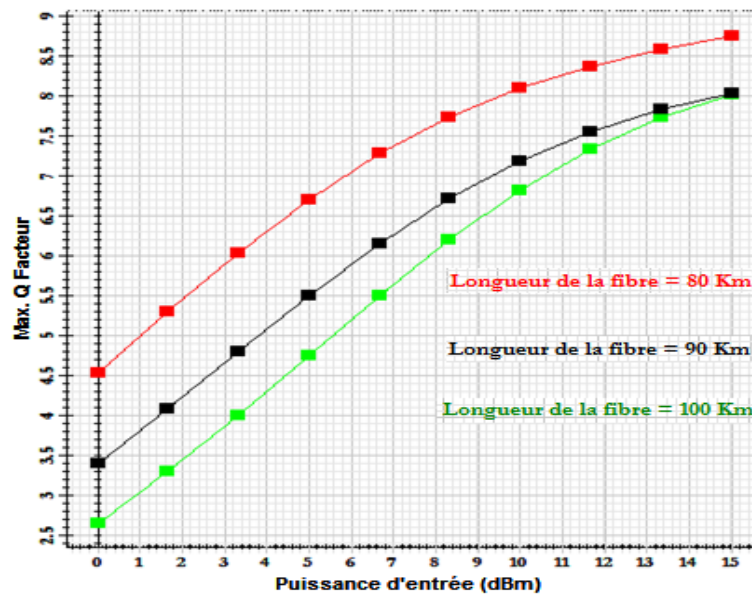


Fig. (IV.38) : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la puissance d'entrée pour trois longueurs de fibre optique.

IV. 8.1. L'influence du format de modulation et du nombre d'utilisateurs :

Le module d'émission du système GPON contient le terminal de ligne optique (OLT), dans laquelle les deux formats de modulation NRZ et RZ sont utilisés. Dans cette section, une comparaison est faite du système simulé pour différents nombre d'utilisateurs (32, 64 et 128 clients) en envisageant les deux types de techniques de codage: NRZ et RZ. Cette comparaison est effectuée en fonction de deux paramètres qui sont le maximum du facteur de qualité et le diagramme de l'œil. D'après la figure IV.39 ci-dessous, le facteur de qualité Q diminue avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs et la distance de transmission. Les courbes obtenues nous renseignent sur l'amélioration des performances du GPON/TDM apporté par le format de modulation NRZ par rapport au format RZ pour les différents nombre d'utilisateurs.

Le système simulé utilisant le format de modulation NRZ peut achever une distance de 120 Km avec un facteur de qualité autour de 6 pour 32 utilisateurs, mais avec le format de modulation RZ le facteur de qualité est moindre. Tandis que, les 64 utilisateurs peuvent transmettre leurs données jusqu'à 93 km signalant une performance acceptable pour les deux formats NRZ et RZ avec un $Q \approx 6.5$ et $Q = 5.4$, respectivement.

Cette distance diminue jusqu'à 45 km en augmentant le nombre des utilisateurs jusqu'à 128 utilisateurs : On obtient toujours le meilleur facteur de qualité ($Q = 6,2$) pour le format de modulation NRZ suivi par le RZ ($Q = 5$). Toutefois, un bruit est perceptible au-delà de ces distances en raison de la chute de la puissance.

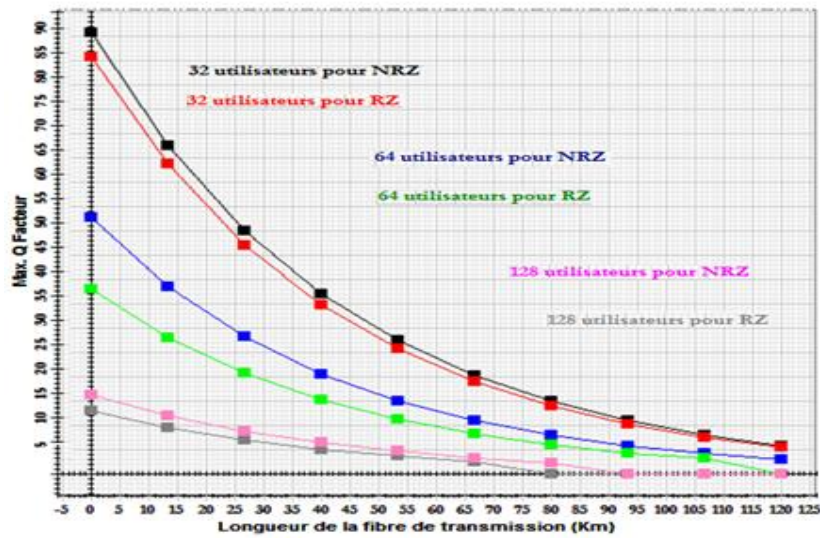


Fig. (IV.39) : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la longueur de la fibre optique pour les formats de modulation NRZ et RZ, et pour différents nombres d'utilisateurs.

L'étude des diagrammes de l'œil montre que le signal reçu à travers l'architecture GPON insérant un préamplificateur EDFA et modulé directement en format NRZ est acceptable jusqu'à 45 Km avec 128 utilisateurs, cependant, à partir de 50 Km, l'œil est complètement fermé. On note aussi une bonne ouverture de l'œil avec les 64 utilisateurs à 93 Km de longueur de la fibre de transmission.

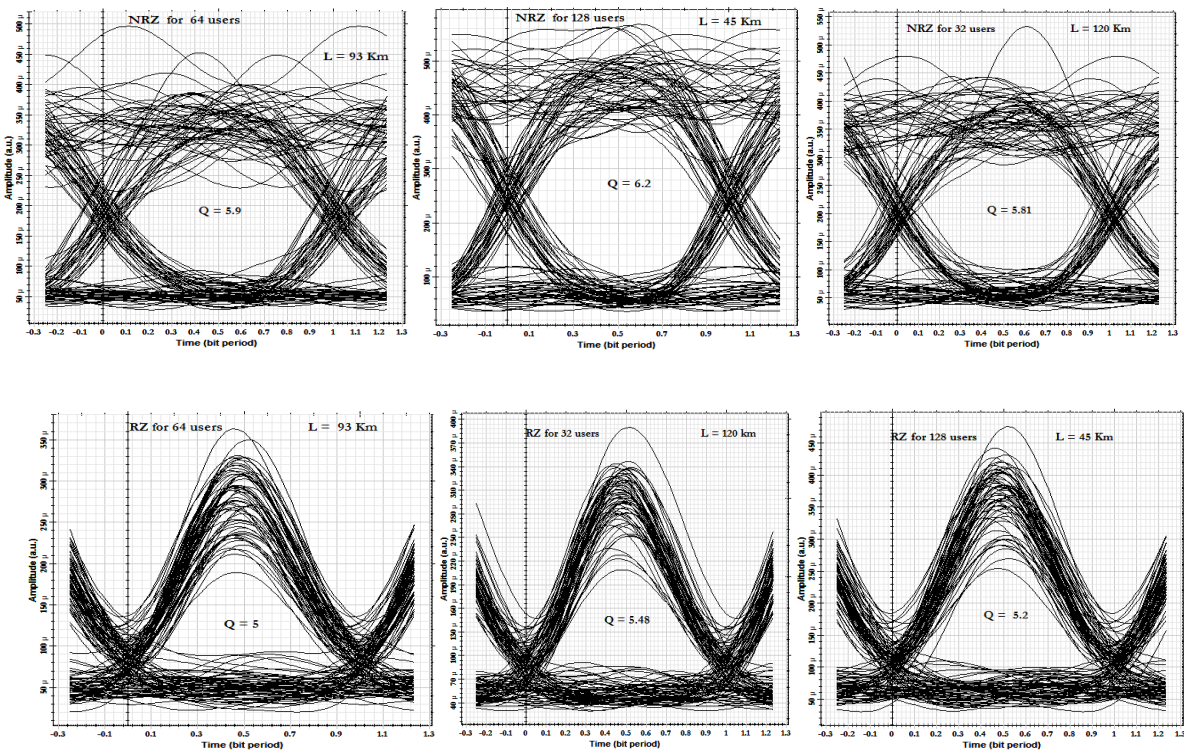


Fig. (IV.40) : Diagrammes de l'œil pour différents nombres d'utilisateurs pour le format de modulation NRZ et pour le format RZ, respectivement.

IV. 8.2. Influence du type de la modulation :

Il s'agit de comprendre l'intérêt d'une modulation externe au niveau de l'OLT. A puissance d'émission égale à 10 dBm et à 80 Km de distance, on remarque (figure IV.41, figure IV.42) qu'avec une modulation externe, on obtient un facteur de qualité élevé (autour de 8), et une puissance reçue légèrement élevée par rapport à la modulation directe (autour de 7.4). Le diagramme de l'œil est bien plus ouvert avec un seuil de détection plus élevé dans le cas d'une modulation externe (figure IV. 43). Le signal généré étant donc fort de puissance et de meilleure qualité.

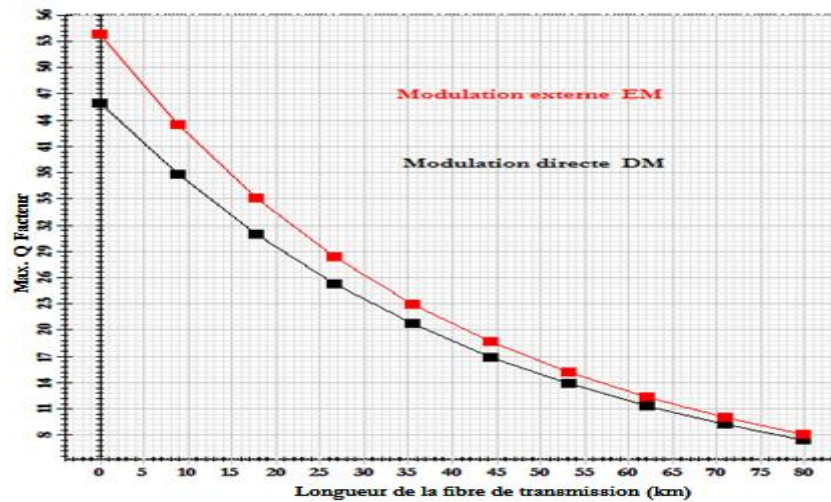


Fig. (IV.41) : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la longueur de transmission pour la modulation directe (DM) et la modulation externe (EM).

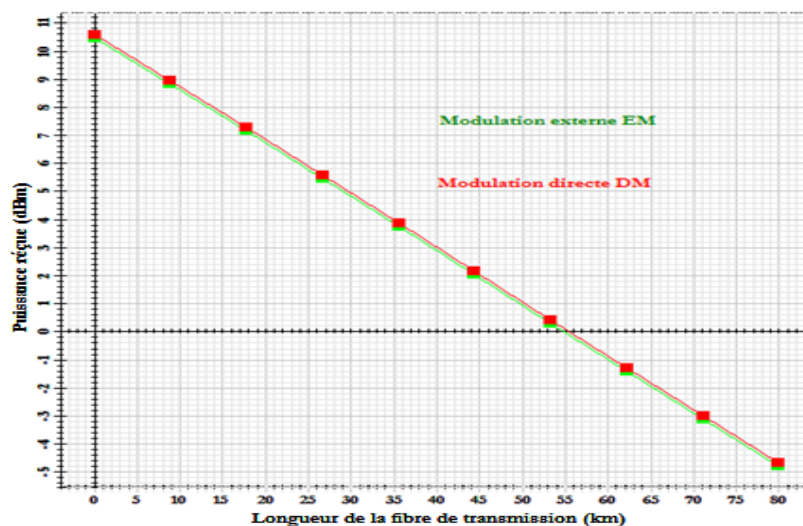


Fig. (IV.42) : Variation de la puissance reçue en fonction de la longueur de transmission pour la modulation directe (DM) et la modulation externe (EM).

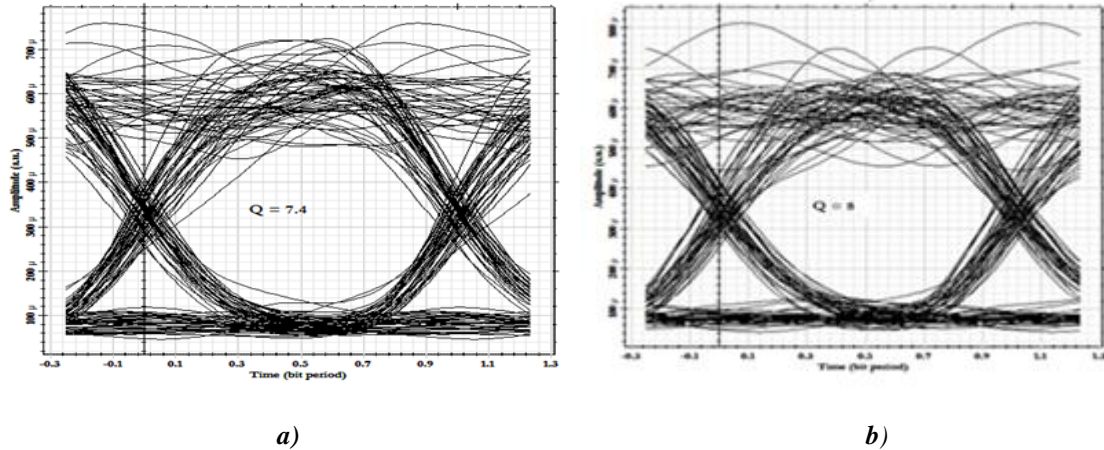


Fig. (IV.43) : Diagrammes de l'œil : a)- La modulation directe (DM), b)- La modulation externe (EM).

IV. 8.3. L'influence du débit binaire :

Ici, nous avons repris la même simulation précédente, mais nous avons choisis de travailler avec la modulation externe pour trois valeurs de débit d'entrée D (2.5 Gbits/s, 5 Gbits/s et 10 Gbits/s). Nous avons constaté qu'augmenter le débit binaire des données à envoyer fait diminuer la qualité du signal reçu en termes de facteurs de qualité et puissances reçues par la photodiode (figures : IV.44 et IV.45), et par conséquent la performance de la transmission se détériore. On a dénoté qu'à 80 km de distance, le meilleur résultat est obtenu avec un débit de 2.5 Gbits/s (Q = 8 et bonne ouverture du diagramme de l'œil). Donc, si nous voulons garder le bon fonctionnement du système étudié, il ne faudrait pas dépasser les 2.5 Gbits/s, car, au dessus de cette valeur (10 Gbits/s), l'ouverture de l'œil commence à chuter et n'est plus acceptable (figure. IV.47).

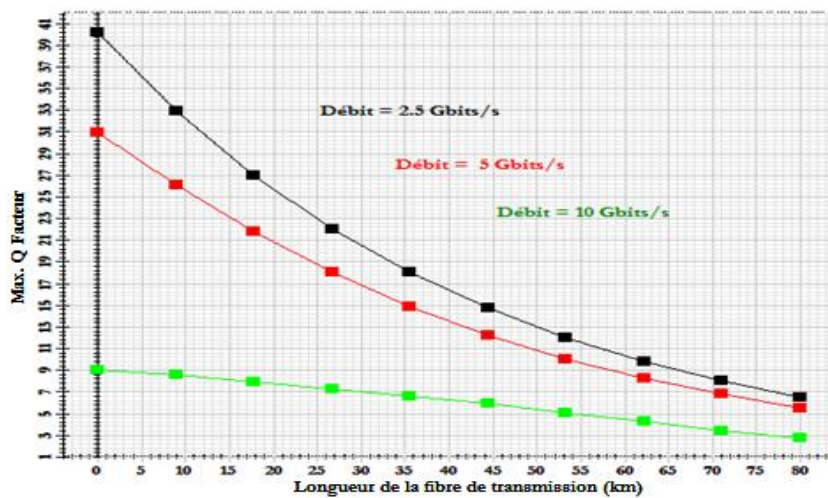


Fig. (IV.44) : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la longueur de transmission pour trois débits binaires

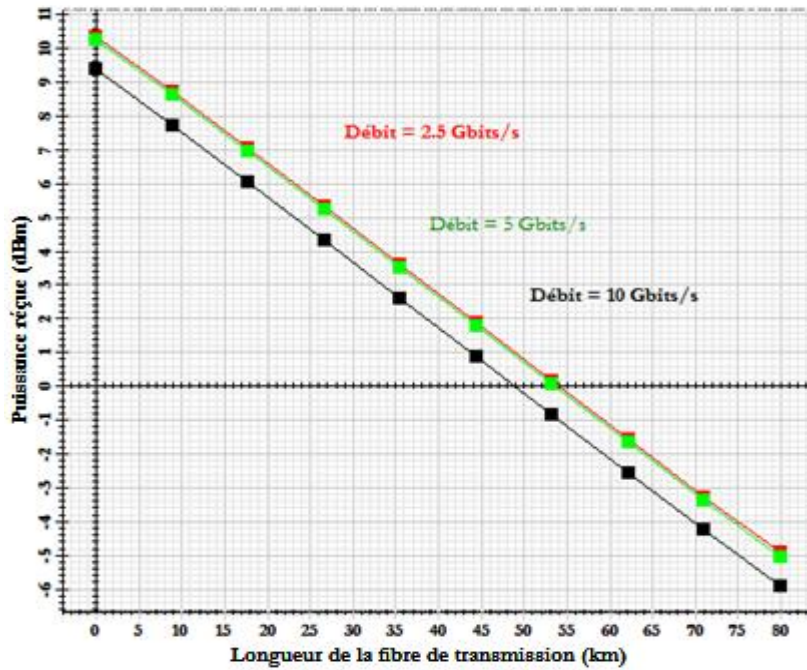


Fig. (IV.45) : Variation de la puissance reçue en fonction de la longueur de transmission pour trois débits binaires

Nous avons pu tracer une courbe de la variation du Min log de TEB (minimum log of BER) en fonction de la longueur de la fibre optique, pour trois débits, il en ressort qu'avec 2,5 Gbits/s, nous pouvons maintenir des meilleurs résultats, pour une longueur de fibre achevée dépassant les 80 Km.

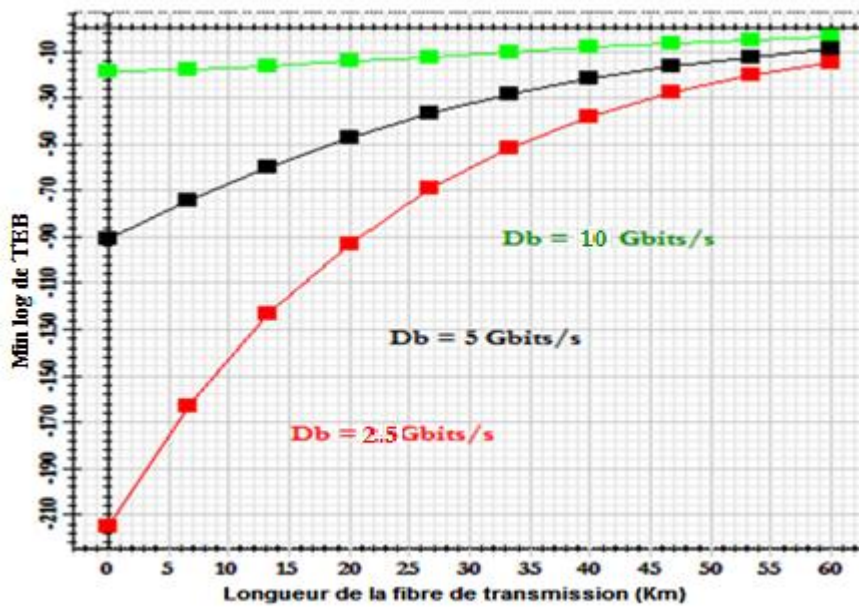


Fig. (IV.46) : Variation de Min log de TEB en fonction de la longueur de transmission pour trois débits binaires.

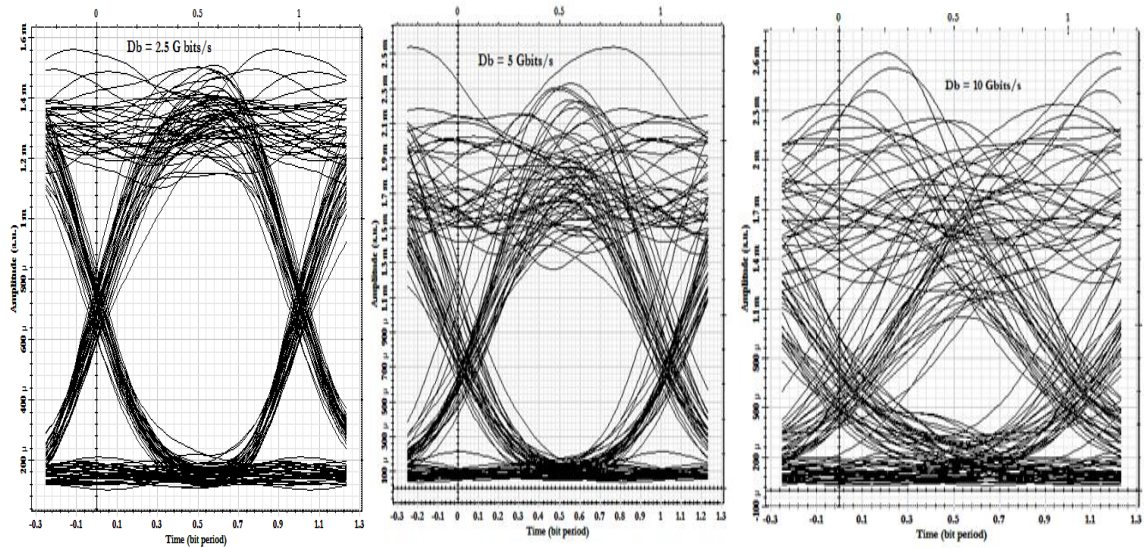


Fig. (IV.47) : Diagrammes de l'œil : a)- $D = 2.5 \text{ Gbits/s}$, b)- $D = 5 \text{ Gbits/s}$.c). $D = 10 \text{ Gbits/s}$.

IV. 8.4. L'influence du type de photodiode :

Nous avons fait varier la longueur de la fibre de transmission (de 0 à 80 Km) pour deux types de photodiode (PIN et APD), nous avons remarqué clairement que les performances de la photodiode APD étaient meilleures que celles de la photodiode PIN en termes de facteur de qualité de transmission (figure IV.48), de puissances reçues (figure IV.49), ainsi que d'ouverture de digramme de l'œil (figure IV.50) : l'APD présente donc une bande passante élevée par rapport à la PIN et peut supporter sans problème les transmissions à haut débit dans le GPON simulé.

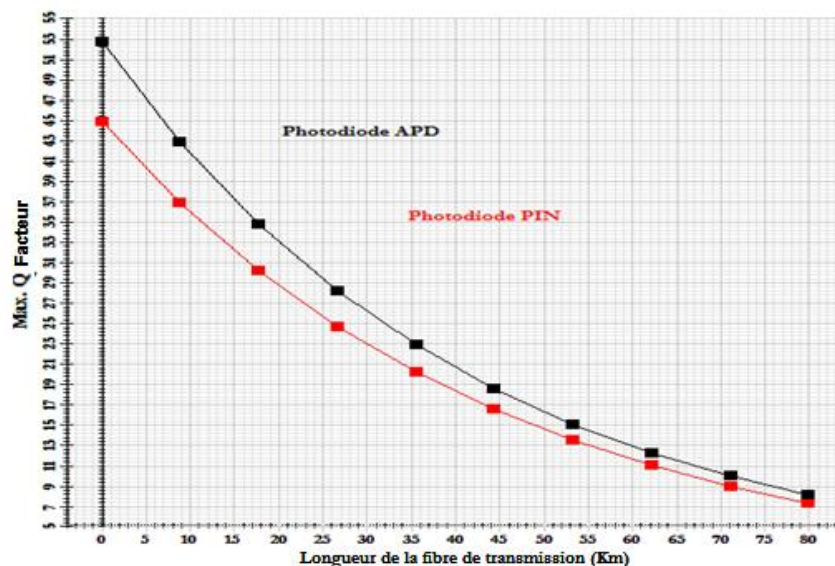


Fig. (IV.48) : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la longueur de transmission pour la photodiode PIN et la photodiode APD.

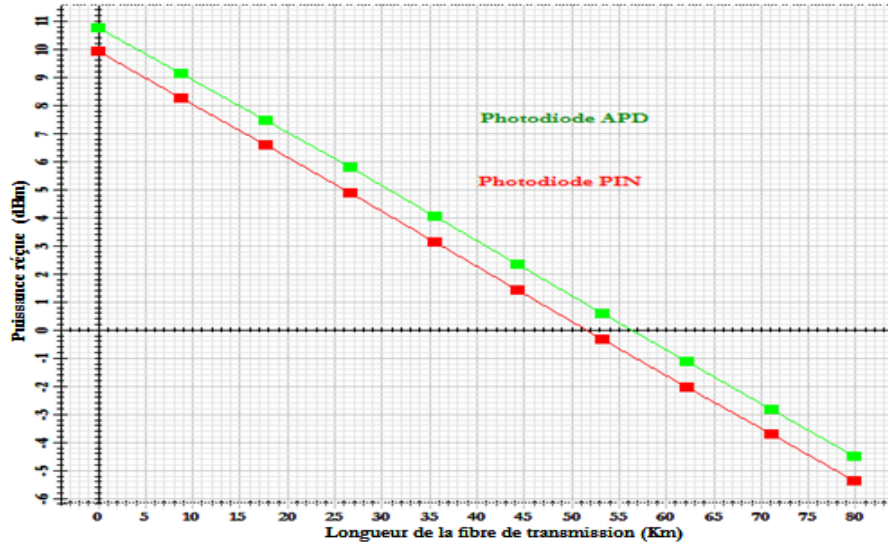


Fig. (IV.49) : Variation de la puissance reçue en fonction de la longueur de la fibre pour la photodiode PIN et la photodiode APD.

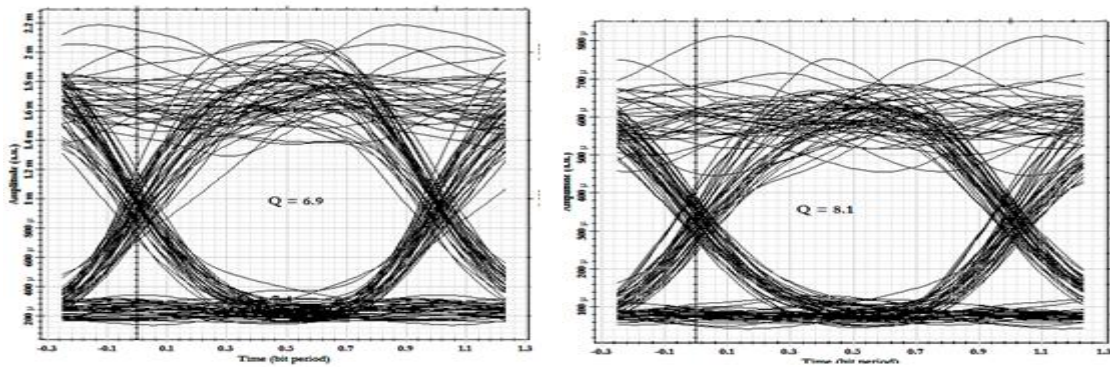


Fig. (IV.50) : Diagrammes de l'œil à 80 Km : a)- photodiode PIN, b)- photodiode APD

La figure ci-dessous présente la variation du facteur de qualité Q en fonction de la sensibilité S pour les deux photodiodes APD et PIN. On a remarqué que plus la sensibilité augmente plus le facteur de qualité augmente rapidement pour les faibles sensibilités allant de 0 à 0.1 A/W, au-delà de cette valeur, le facteur de qualité reste constant pour les deux. Le maximum facteur de qualité est obtenu par la photodiode APD avec une bonne ouverture de diagramme de l'œil ($Q = 8.5$) suivi par la photodiode PIN ($Q = 7.4$), figure. IV.51.

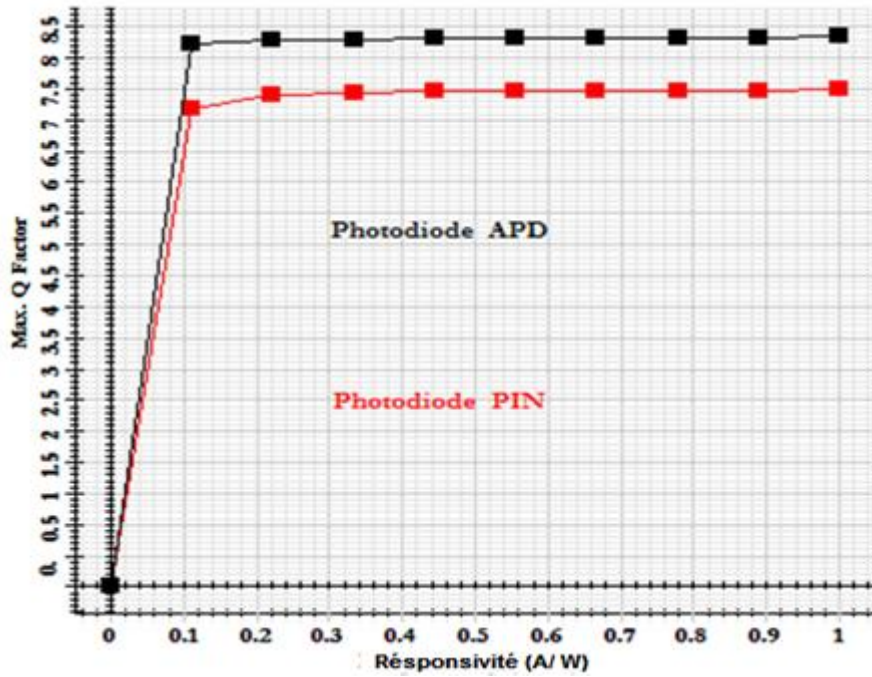


Fig. (IV.51) : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la sensibilité S pour la photodiode APD et la photodiode PIN.

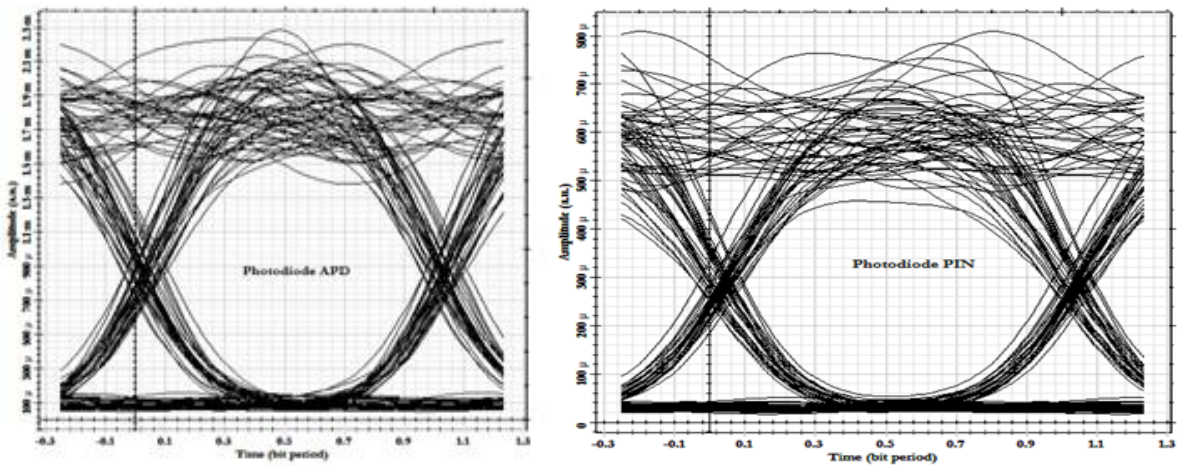


Fig. (IV.52) : Diagrammes de l'œil à la sensibilité 0.9 A/W : a)- photodiode PIN, b)- photodiode APD

IV.9. Comparaison du GPON selon la position de l'EDFA :

L'objectif que nous poursuivons dans cette partie de la simulation est l'évaluation de l'impact de l'emplacement de l'amplificateur optique EDFA sur les performances du système simulé GPON, en fonction de longueur de la fibre de transmission, de la puissance optique d'entrée et des pertes du répartiteur optique passif (splitter), pour les trois configurations de pré-amplification, post-amplification et d'amplification en ligne.

Pour ce faire, nous avons simulé, sur un même graphe, le facteur de qualité de chacune des trois (03) liaisons à amplificateurs sur 80 Km de fibre de transmission. Une comparaison des trois liaisons amplificatrices a été faite pour déterminer la meilleure configuration pour la performance visée $Q = 6$ qui correspond à un taux d'erreur binaire $TEB = 10^{-9}$. Pour les trois configurations, l'amplificateur utilisé est caractérisé par les paramètres opto-géométriques cités dans le tableau IV.2.

IV.9.1. L'impact de la longueur de la fibre avant et après l'EDFA de ligne :

Avant de faire la comparaison entre les trois configurations, on commence par la caractérisation de l'EDFA de ligne. L'amplificateur utilisé possède les mêmes paramètres que pour les cas simulé précédemment. Dans un premier temps, on va étudier l'impact de la distance de propagation avant et après amplification en ligne sur la qualité du signal optique amplifié et sur la puissance reçue par la photodiode, différents points de fonctionnement de l'EDFA sont considérés en variant la longueur de la fibre optique pour trois cas de propagation sachant que la longueur totale est de 80Km :

- Premier cas : 60 Km de fibre + amplification de ligne + 20 Km de fibre .
- Deuxième cas : 20 Km de fibre + amplification de ligne + 60 Km de fibre.
- Troisième cas : 40 Km de fibre + amplification de ligne + 40 Km de fibre.

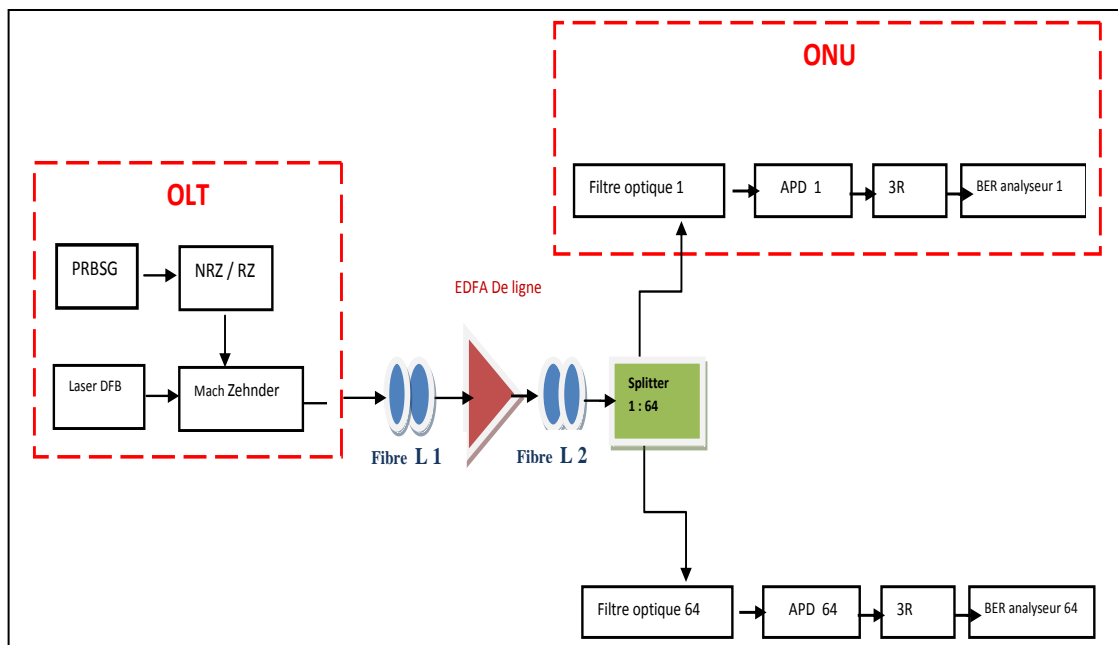


Fig. (IV.53) Architecture du réseau GPON utilisant l'amplificateur EDFA en ligne.

Les résultats de simulation donnés par la figure IV.54, montrent que la configuration du premier cas (la longueur de la fibre positionnée avant l'amplificateur est de 60 km) permet d'atteindre un facteur de qualité maximum de 11.81, correspondant à un taux d'erreurs binaires TEB égal à $1.3.10^{-32}$ et une puissance optique reçue de -22.54 dBm .

Dans le deuxième cas (20 Km de fibre + amplification de ligne + 60 Km de fibre), nous avons un facteur de qualité $Q = 7$, un TEB = 3.10^{-13} et une puissance reçue de -28.39 dBm. Tandis que le troisième cas, où les deux fibres (avant et après l'EDFA) ont la même longueur de 40 Km, on obtient un facteur de qualité $Q = 8$, avec un taux d'erreurs binaires TEB = 3.10^{-16} et une puissance optique reçue de -24.78 dBm.

Ces résultats se justifient par le fait que plus la distance de propagation en amont de l'amplificateur optique est grande, plus il y a d'atténuation et de défauts engendrés par la dispersion et les effets non linéaires, et de ce fait, l'amplification compense la plus grande partie de l'atténuation de la liaison: ce qui fait qu'en sortie de l'amplificateur, on obtient un rapport signal à bruit plus faible que dans le cas où la distance en amont est petite.

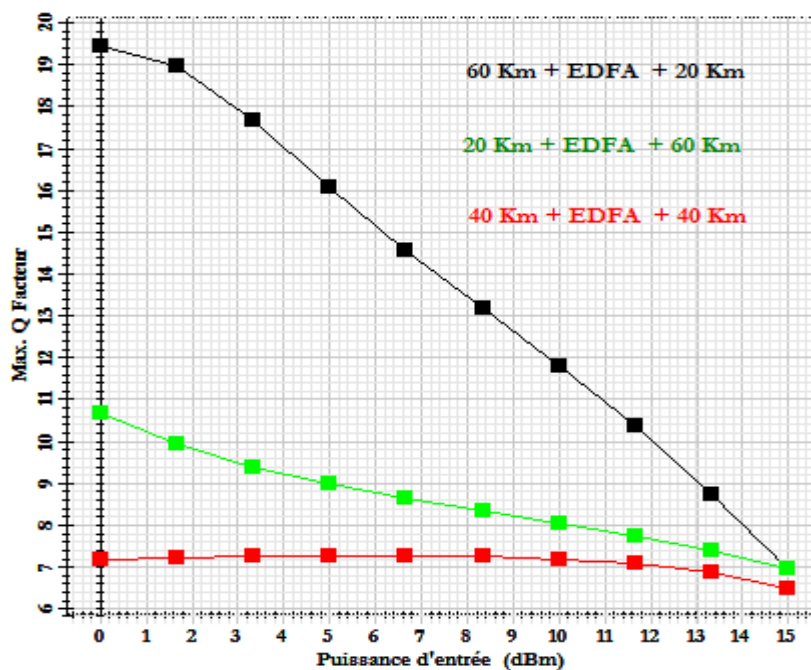


Fig. IV.54: Variation du facteur de qualité Q en fonction de la puissance d'entrée pour les trois cas de l'amplification de ligne.

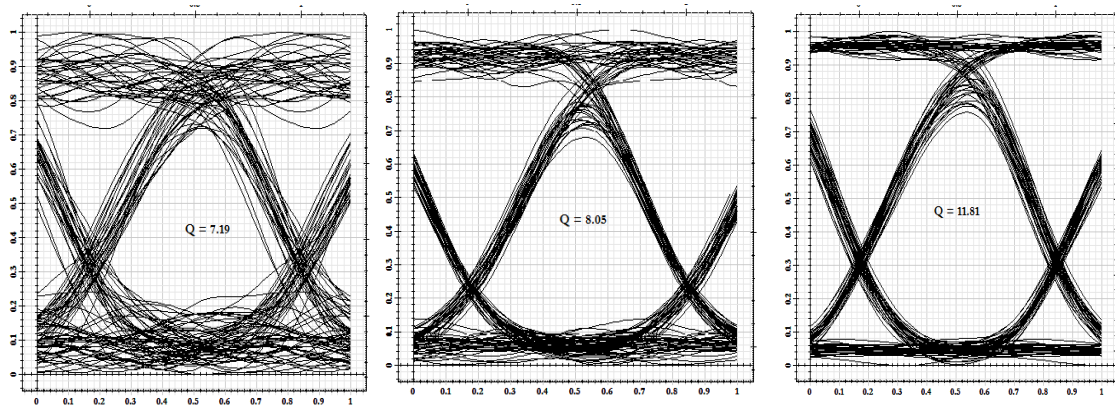


Fig. IV.55. Diagrammes de l'œil à 10 dBm de puissance de signal d'entrée pour les trois cas de l'amplification de ligne.

Pour la suite des simulations, nous allons adopter comme configuration d'amplification de ligne, celle où la distance de fibre avant l'amplificateur L_1 est de 60 Km et l'autre située en aval L_2 supposée variable pour trois longueurs (20,30 et 40 Km). La figure IV.56 présente sur un même graphe le tracé du facteur de qualité en fonction de la puissance de signal d'entrée pour trois distances de transmission (80, 90 et 100 Km). L'analyse de cette figure nous permet d'affirmer que l'EDFA de ligne permet d'atteindre une distance maximale de 100 km de fibre avec un taux d'erreurs binaires TEB de 10^{-9} et un facteur de qualité $Q \approx 6$, et, le photo-détecteur reste sensible jusqu'à une puissance reçue de -26.15 dBm avec une acceptable ouverture de diagramme de l'œil (figure IV.57).

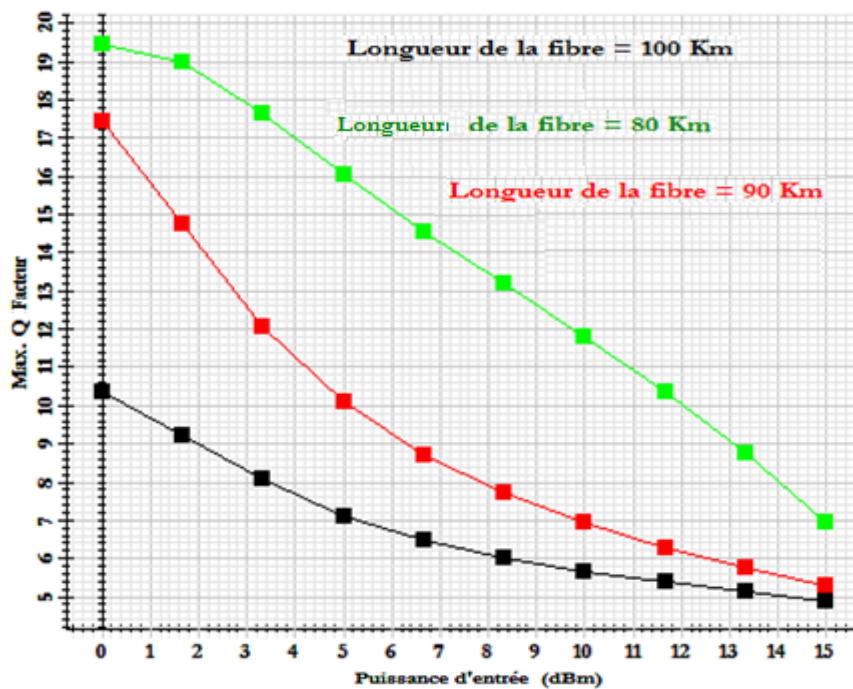


Fig. IV.56: Variation du facteur de qualité Q en fonction de la puissance d'entrée pour les trois longueurs de l'amplification de ligne 80, 90 et 100 km.

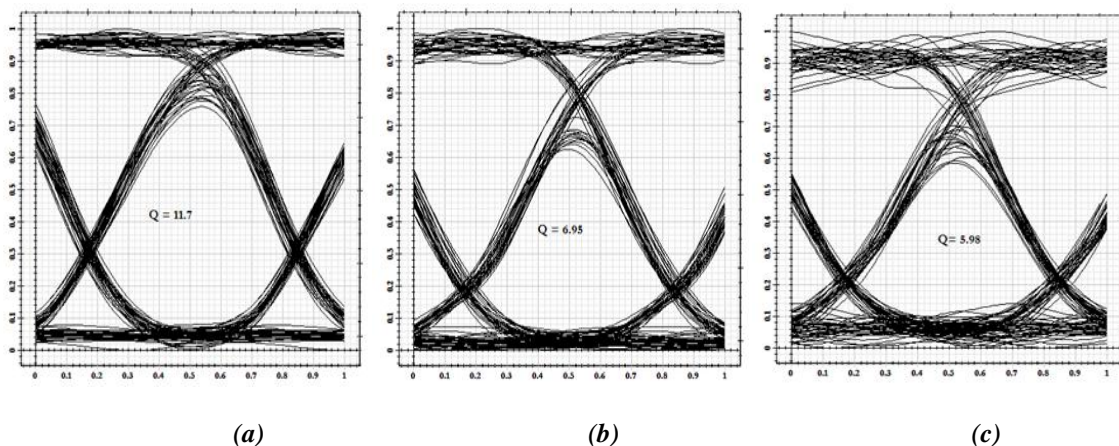


Fig. IV.57 : Diagrammes de l'œil à 10 dBm de puissance de signal d'entrée pour les trois longueurs de l'amplification de ligne : a) 80 Km, b) 90 Km , c) 100 km.

IV.9.2. Comparaison entre les trois configurations d'amplification en fonction de la longueur de la fibre de transmission :

A présent, nous envisageons d'analyser l'impact de la longueur de la fibre de transmission sur l'amplification optique, ici on compare les performances en faisant varier la longueur de 0 à 80 Km pour les trois configurations de l'amplification annoncées dès le début (post-amplification, pré-amplification et l'amplification de ligne).

La figure IV.58 illustre de manière simple l'effet de la longueur de la fibre sur la qualité du signal, de ce fait nous pouvons maintenir avec la pré-amplification et l'amplification de ligne de bons facteurs de qualité (environs de 8 et 11.7, respectivement) pour des distances environs de 80 km, mais cette distance est limitée à 68 Km pour la post-amplification avec un facteur de qualité autour de 6,2. Si on compare les trois valeurs calculées du facteur de qualité, on remarque encore que l'amplification de ligne et la pré-amplification sont les meilleures méthodes d'amplification présentant de bonnes performances malgré l'augmentation des pertes optiques.

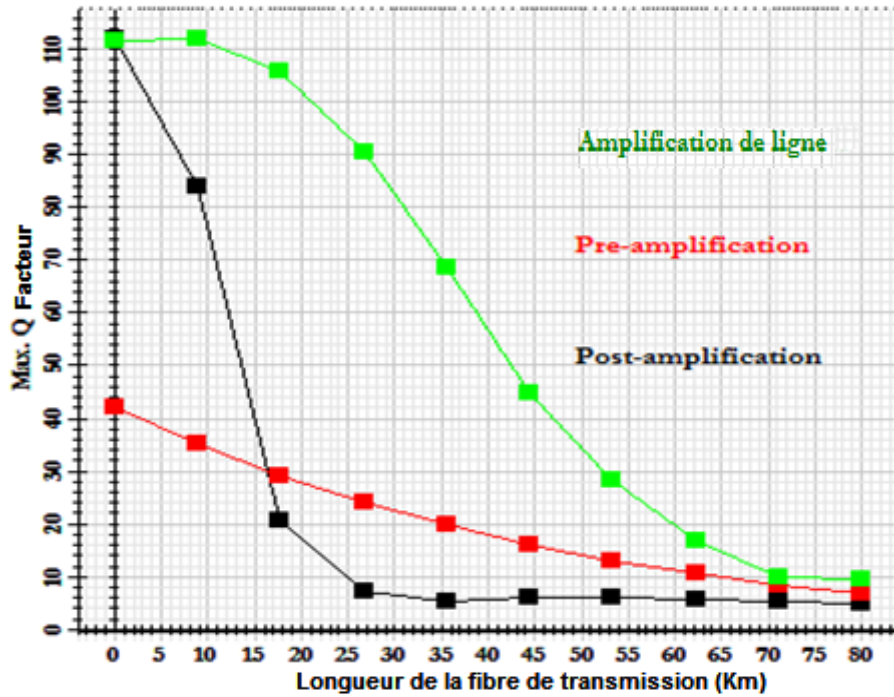


Fig. IV.58: Variation du facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre de transmission pour les trois configurations post-amplification, pré-amplification et l'amplification de ligne .

De même, les diagrammes de l'œil sont capturés pour les trois configurations d'amplification à 80 Km de transmission. Nous pouvons dénoter, une ouverture de l'œil claire et plus large dans le cas de l'amplification de ligne (figure IV.59.a). Cependant, un plus épais diagramme de l'œil est obtenu en configuration post-amplificateur (figure IV.59.c) en raison du bruit élevé généré qui déforme la qualité du signal en particulier pour la longueur des fibres (au-delà de 60 Km).

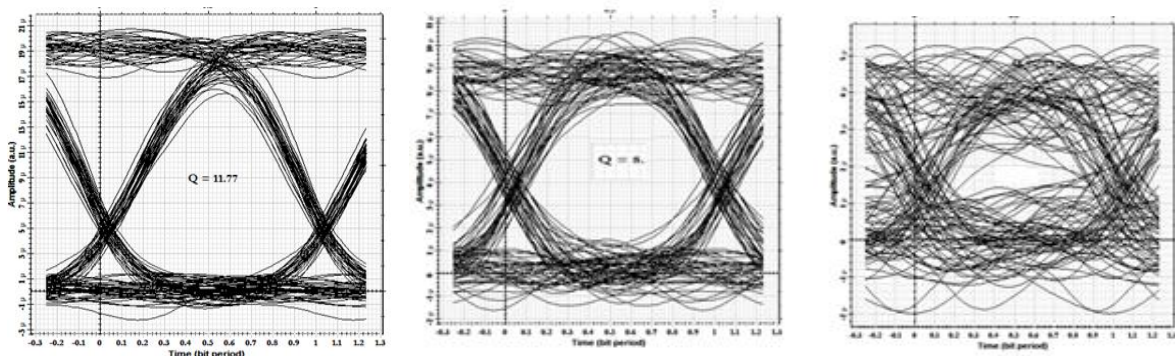


Fig. IV.59 : Diagrammes de l'œil en 10 dBm de puissance de signal d'entrée pour les trois configurations a) En ligne amplification b) Pré-amplification, c) Post- amplification à 80 Km de transmission.

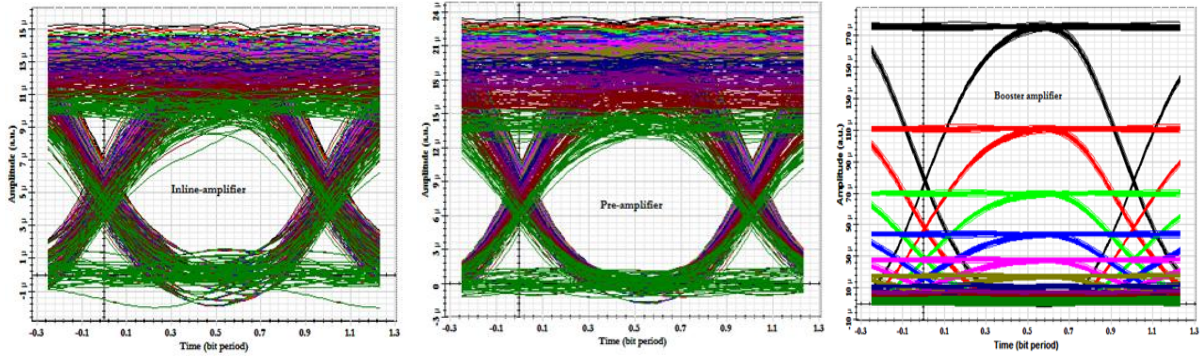


Fig. IV.60: La superposition de diagrammes de l'œil à différentes longueurs de la fibre de transmission pour les trois configurations : a) Amplification en ligne, b) Pré-amplification et, c) Post-amplification,

La figure IV.61 montre la représentation graphique à trois dimensions 3D du taux d'erreurs binaires TEB en fonction de la longueur de la fibre de transmission pour trois configurations d'amplification. Le résultat optimal avec un minimum de taux d'erreur (Min log of BER) est obtenu avec l'amplification de ligne suivi par la pré-amplification après une distance de transmission de 80 Km (figure IV.61.a et IV.61.b), tandis que le plus haut taux d'erreurs binaires a été obtenu avec l'EDFA en post-amplification (figure IV.61.c).

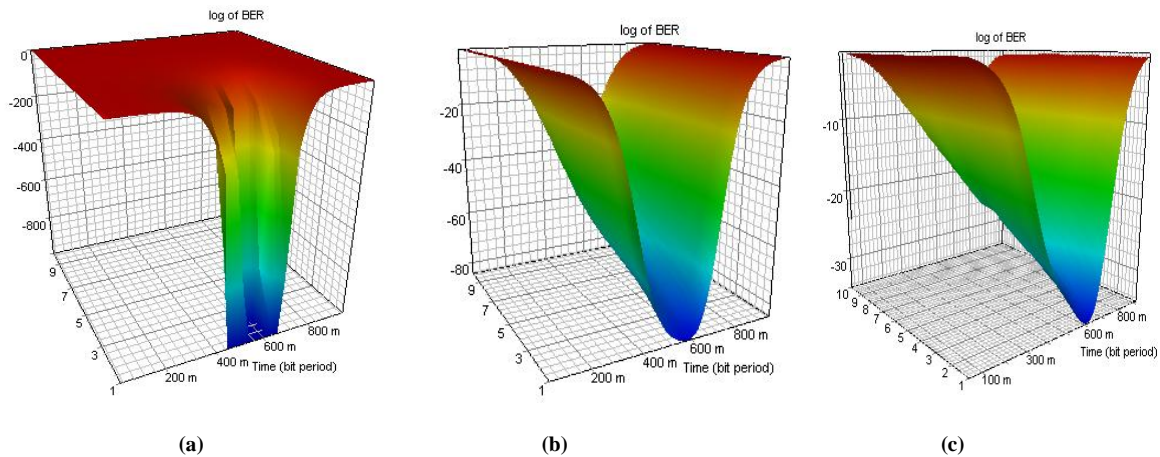


Fig. IV.61: Graphiques en 3D du TEB à 10 dBm en fonction de la longueur de la fibre pour les trois configurations ; a)- Amplification en ligne, b)- Pré amplification, c)- Post - amplification.

IV.9.3. Comparaison entre les trois configurations d'amplification en fonction de la puissance incidente :

Dans cette partie, nous comparons les performances des trois configurations (la pré-amplification, l'amplification de ligne, et la post-amplification) en fonction de la puissance du signal d'entrée, à 1550 nm de longueur d'onde et à 80 Km de longueur de la fibre de transmission. Les figures IV.62

et IV.63 montrent que pour les trois cas, nous constatons une dégradation du gain et du facteur de bruit lorsque la puissance augmente. Pour une puissance du signal d'entrée autour de 10 dBm on note :

- La liaison « amplificateur de ligne » permet un gain optique de 26 dB avec un facteur de bruit environ 3,2 dB. Alors que la liaison « préamplificateur » permet un gain optique de 22 dB avec un facteur de bruit environ 3,3 dB. Finalement, la configuration avec « post-amplificateur » permet un minimum de gain de 14.2 dB et un fort facteur de bruit 3,6.
- Ainsi, l'EDFA en position booster présente de mauvaises performances par rapport aux autres amplificateurs et, le meilleur facteur de qualité est obtenu pour l'amplification de ligne. On relève, un facteur de qualité autour de 11.7 qui correspond à un TEB = 10^{-37} pour l'amplificateur en ligne, et pour la pré- et post-amplificateur (booster) les facteurs de qualité 8 et 7.6 qui correspondent à des taux d'erreurs binaires TEB de 10^{-17} et 10^{-13} , respectivement.

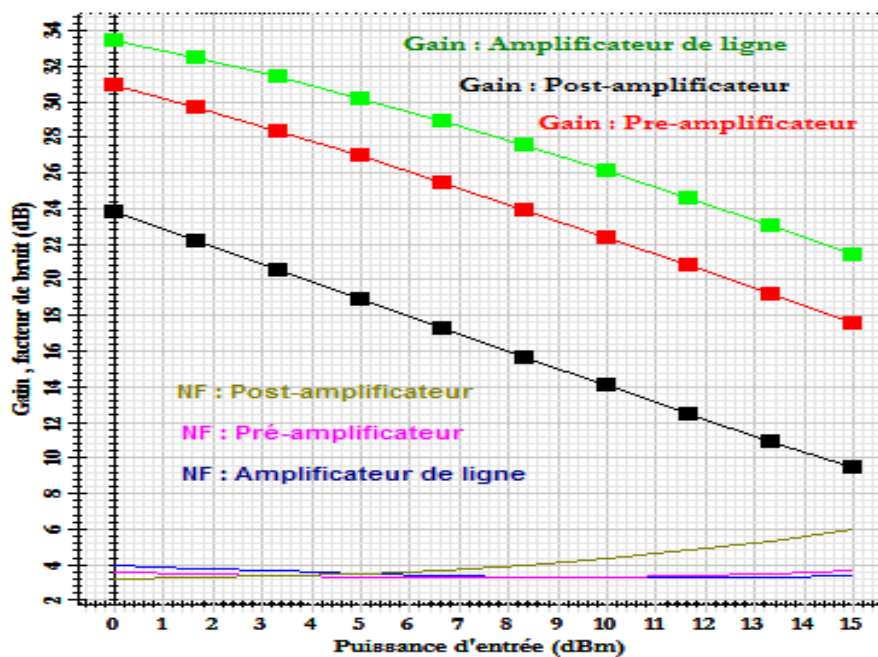


Fig. (IV.62) : Variation du gain et du facteur de bruit en fonction de la puissance d'entrée pour les trois configurations

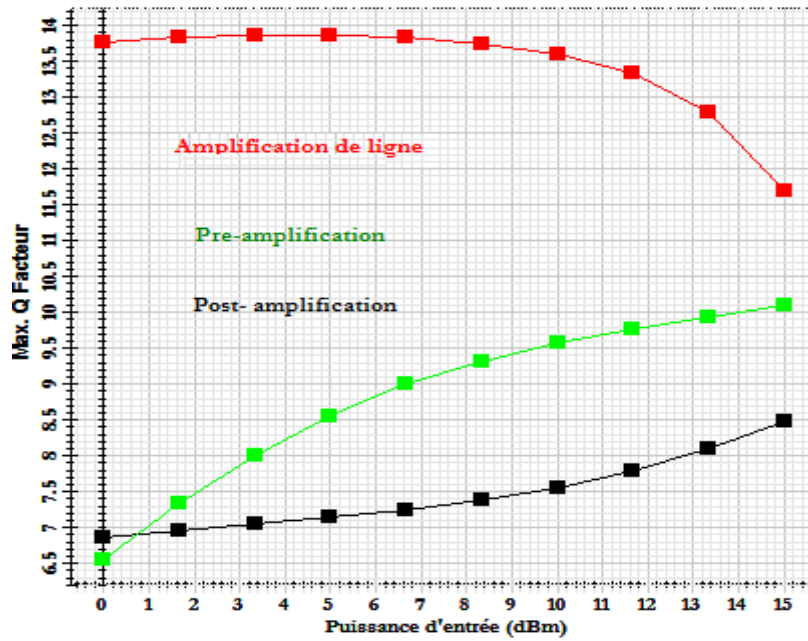


Fig. (IV.63) : Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance d'entrée pour les trois configurations.

La comparaison des résultats obtenus (figure IV.64, et figure IV.66) montre que, le diagramme de l'œil dans le cas de l'amplification en ligne donne une grande ouverture ce qui signifie que l'interférence inter-symbole (ISI) est faible. Par conséquent, le logarithme du taux d'erreur binaire (Min log of BER) est bien meilleur par rapport aux autres méthodes d'amplification (booster et pré-amplification). Donc la meilleure position de l'amplificateur optique EDFA dans notre liaison GPON simulée est l'amplification de ligne.

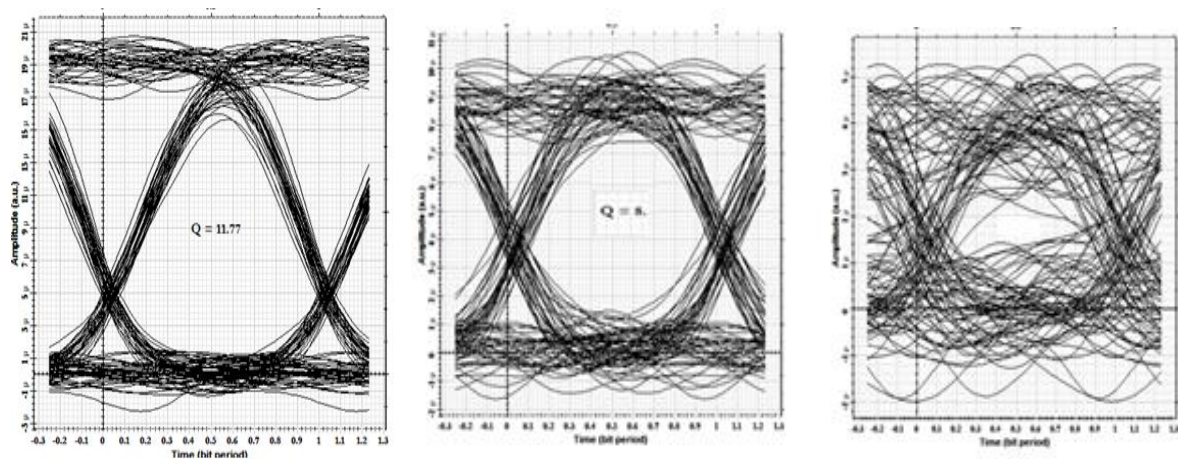


Fig. (IV.64) : Diagrammes de l'œil en 10 dBm de puissance de signal d'entrée, et à 80 Km de distance pour les trois configurations a) Amplification de ligne, et b) Pré-amplification, c) Post-amplification

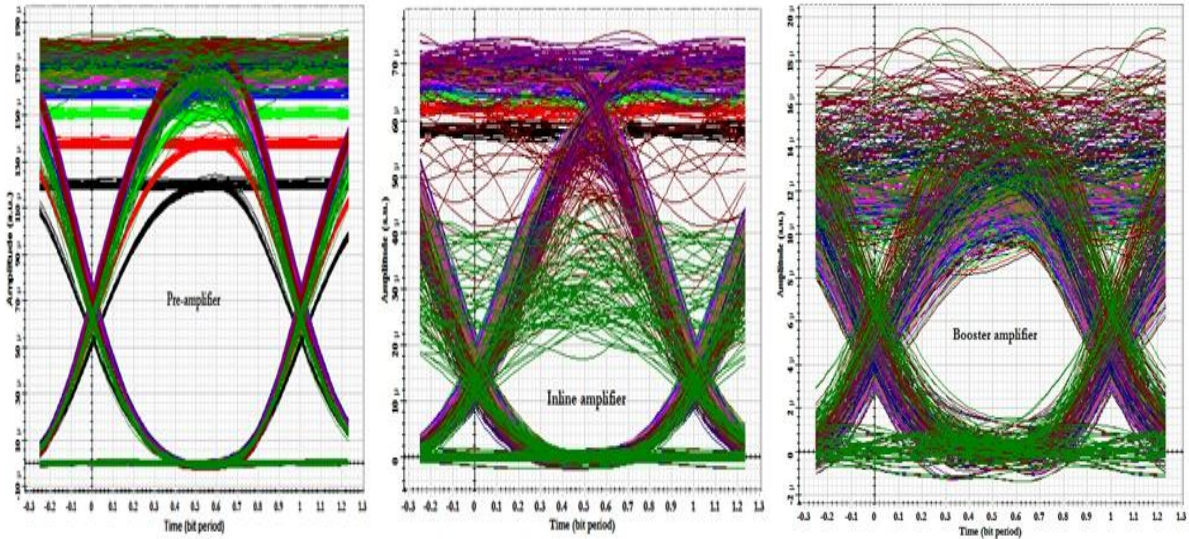


Fig. IV.65: La superposition de diagrammes de l'œil pour différentes puissances de signal d'entrée pour les trois configurations (a) Pré-amplification, (b) Amplification de ligne et (c) Post – amplification.

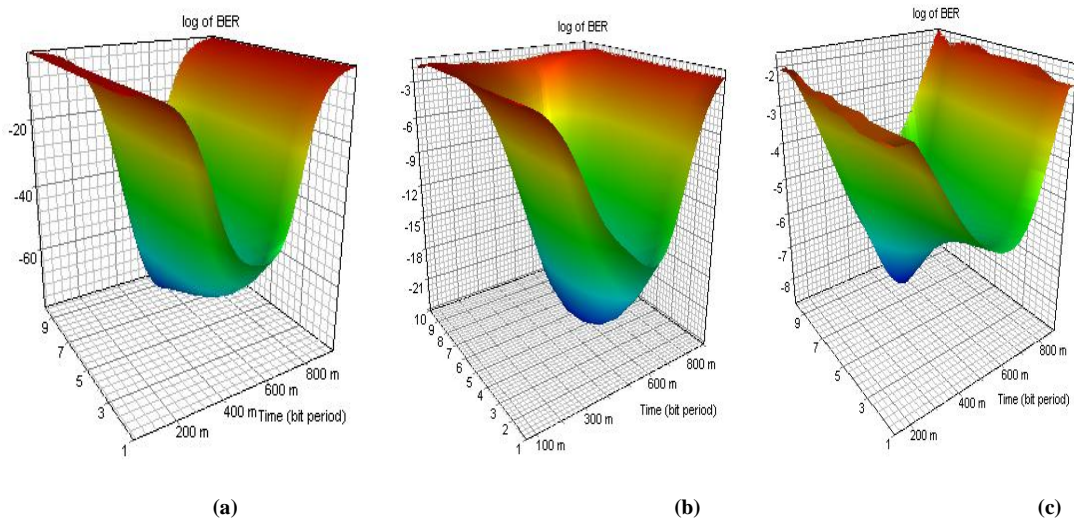


Fig. IV.66: Graphiques en 3D du TEB (Log of BER) pour différentes puissances du signal d'entrée à 80 Km de distance : (a) Amplification de ligne, (b) Pré-amplification et (c) Post – amplification.

IV.9.4. Comparaison entre les trois configurations d'amplification en fonction des pertes de splitter :

Dans ce cas de figure, nous simulerons notre système en fixant la longueur de la fibre à 80 Km, la puissance du signal d'entrée à 10 dBm pour les trois configurations, et en faisant varier les pertes du répartiteur passif (splitter) de 0 à 25 dB. Nous constatons une forte dégradation du facteur de qualité ($Q < 6$) avec les deux configurations post- et pré-amplification pour des pertes au-delà de 21 dB. Ainsi, l'interprétation de ces figures nous permet de dire que l'amplification de ligne présente encore une fois de meilleurs résultats en termes d'ouverture de diagramme de l'œil et de facteur de qualité que ceux des autres méthodes d'amplification malgré les pertes de splitter (figure IV.67 et IV.68).

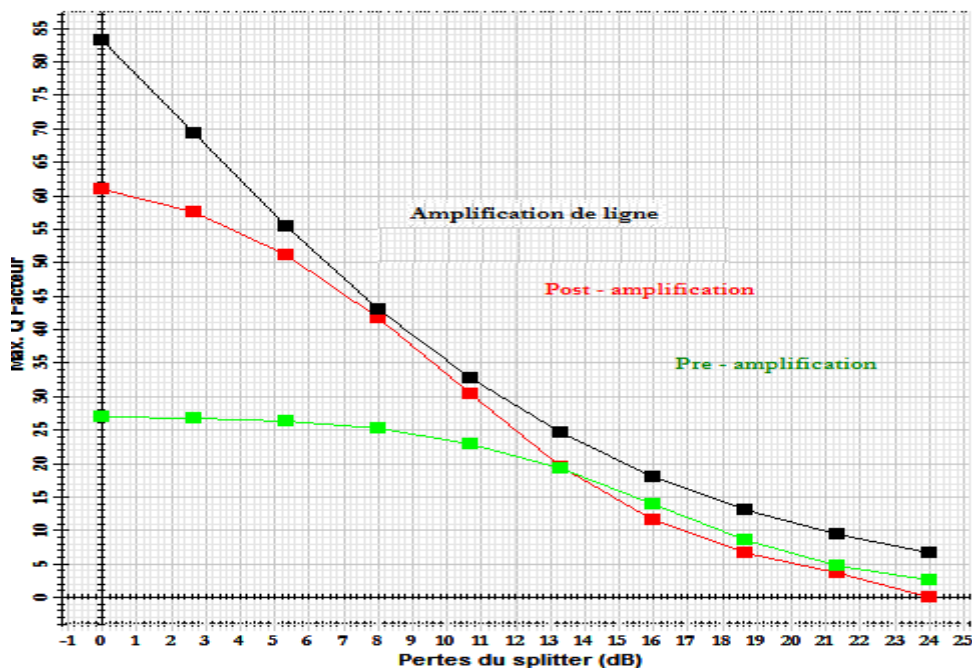


Fig. IV.67: La variation du facteur de qualité en fonction des pertes de splitter pour les trois configurations
 a) Pré-amplification, b) Post-amplification et c) Amplification de ligne .

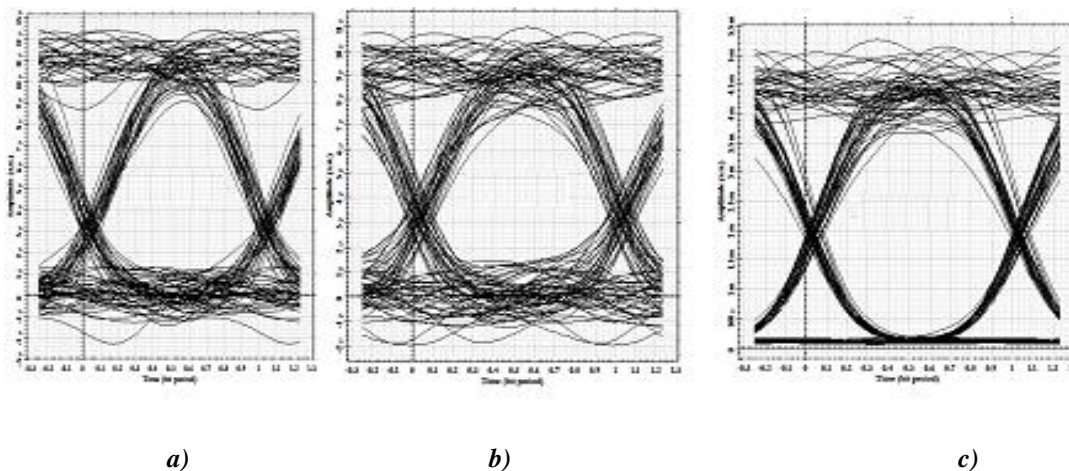


Fig. IV.68: Diagrammes de l'œil à 10 dBm de puissance de signal d'entrée pour les trois configurations
 a) Pré-amplification , b) Post-amplification et c) Amplification de ligne .

Finalement, et au vu des simulations effectuées et de ce qui précède, le tableau ci-dessous résume les distances atteintes et les puissances reçues par la photodiode selon la configuration simulée, les pertes de splitter sont fixées 20 dB pour les trois configurations. On observe que la configuration amplification en ligne est celle qui permet d'atteindre les plus grandes distances.

En effet, c'est la configuration pour laquelle les effets non linéaires, et l'impact de la dispersion sont les plus minimisés. Ainsi, notre comparaison des trois méthodes d'amplification nous amène à conclure que : les trois configurations permettent l'extension de la portée de système GPON simulé

au-delà de 60 Km avec de bonnes performances, d'autres part la pré-amplification et l'amplification de ligne sont capables d'augmenter la portée du GPON au-delà de 80 Km avec de bons facteurs de qualité 8 et 11.8, respectivement.


Tableau IV.3. Résultats selon la configuration d'amplification à 10 dBm

Comparaison des resultants	Post- amplification ou "Booster "	Amplification en ligne	Pré-amplification
Max Q factor	6.20	5.96	6.23
Min de TEB	$7,12.10^{-9}$	$1,04.10^{-9}$	$9.78.10^{-9}$
Gain (dB)	14.2	26	22
Facteur de bruit (dB)	3.6	3.2	3.3
Distance maximale	65 Km	100 Km	93 Km

IV.10. Conclusion

Ce chapitre résume les résultats de la simulation et leurs interprétations. Dans un premier lieu, il s'agissait de déterminer les principaux paramètres caractérisant l'EDFA, à savoir : le gain, la saturation, le bruit. Le travail de simulation nous a donné un bon aperçu sur le choix des paramètres opto-géométrique à utiliser pour l'optimisation de l'EDFA, en occurrence la puissance de la pompe et la concentration des ions Erbium, la longueur de la fibre dopée ainsi que le gain. Pour cela, on doit choisir les paramètres de l'amplificateur (L , N , P_p , P_{in}) qui permettent à la fois un gain élevé et un faible facteur de bruit. Ces paramètres sont très importants dans le système de transmission par fibre optique. En effet, pour une longueur de fibre dopée $L= 9$ m, une concentration $N= 6.10^{24}/m^3$, et une longueur de pompe $\lambda_p= 980$ nm

On relève un gain maximum égal à 14.2 dB, et son facteur de bruit de 3.6 dB pour l'amplificateur optique EDFA en position booster avec un facteur de qualité optimum d'environ 7.6 pour le système GPON simulé.



On a analysé aussi l'influence de quelques paramètres tels que, le débit, le format de modulation, le type de photodiode, et le nombre d'utilisateurs sur les performances d'un amplificateur à fibre dopée à l'erbium en position préamplificateur, en terme de gain et de facteur de bruit d'une part et d'autre part en terme de facteur de qualité. A l'entrée du système simulé, on injecte un signal de 1550 nm et une puissance de lancement de -10dBm. Cet EDFA, décrit précédemment, est capable de fournir un gain de 22 dB et un facteur de bruit de 3.3 dB. Ceci permet d'assurer une propagation à travers une fibre de 80 Km ayant une atténuation de 0.2dB/Km avec un bon facteur de qualité Q autour de 8.

Enfinement, nous avons montré dans cette étude qu'une configuration d'amplification en ligne pour les transmissions au-delà de 80 Km est la meilleure en termes de budget optique et de distance parcourue. En effet, outre les explications données auparavant, il s'avère que les amplificateurs ne fournissent pas le même gain en fonction de la configuration choisie. On pourra utiliser une post-amplification pour des configurations particulières et des distances inférieures à 70 Km.



Références :

[1] : Gwenaëlle Girault, «Contribution à l'étude de portes optiques à base d'amplificateurs optiques à semi-conducteurs pour le traitement tout-optique de signaux de télécommunication

à très hauts débits», Thèse de doctorat de l'Université de Rennes I, 2007.

[2] : Mathieu Le François, « Etude de technologies avancées pour l'optimisation des systèmes de transmission optique multiplexés en longueur d'onde au débit de 40 Gbit/s », Thèse de doctorat de l'Université Paris-Sud 2007.

[3] : Frédéric Gérôme, «Conception et caractérisation de fibres compensatrices de dispersion chromatique pour application aux liaisons optiques WDM » , Thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 2005.

[4] : Jean- Louis Verneuil, « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbit/s », Université de LIMOGES 2003.


[5]: S. F. Su, et al., « Flattening of Erbium-doped fiber amplifier gain spectrum using an acousto-optic tunable filter », Electron. Letter. 29, 477 (1993).

[6]: M. A. Ali, et al., « Performance of erbium-doped fiber amplifier cascades in WDM multiple access light wave networks », IEEE Photon. Tech. Lett. 6, 1142 (1994).



CONCLUSION GENERALE







L'amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium demeure actuellement un élément important dans l'amélioration des performances d'un système à transmission à fibre optique. Il est inséré dans la ligne dans le but de contrer les pertes en régénérant les signaux dans la bande spectrale allant de 1530 à 1565 nm appelée bande C (dans la norme recommandée par l'Union Internationale des Télécommunications UIT). L'intérêt de cette plage réside dans le fait qu'elle correspond au minimum d'atténuation des fibres optiques utilisées. L'objectif principal de cette étude est de montrer l'efficacité d'un amplificateur optique à fibre dopée Erbium (EDFA) en vue de sa faisabilité et son déploiement sur un réseau d'accès optique passif GPON étendu (Gigabit Passive Optical Network) qui permettrait d'augmenter le nombre de clients finaux bénéficiant de tous les avantages que peut leur offrir un tel réseau. Dans ce contexte les travaux de simulations consistaient à étudier et analyser ce GPON en mode TDM (Time Division Multiplexing) afin de constater ses capacités vis-à-vis des exigences en bande passante et en longueur ou distance. Ce réseau est orienté vers l'accès au service triple-play (voix, données et vidéo).

Comme premier objectif, il nous a paru important de commencer cette thèse par une description approfondie des différents modules de la chaîne, ainsi que les diverses limitations rencontrées au cours de la propagation du signal. Cette description nous a permis de maîtriser le concept théorique d'un tel système et simplifier sa conception qui devient de plus en plus complexe avec l'apparition de nouveaux composants et donc de nouveaux paramètres influant sur les performances de transmission.

Ensuite, nous avons présenté au deuxième chapitre le réseau d'accès optique et son évolution en dressant un panorama du type de réseau d'accès et des technologies déployées tel que la FTTH (la fibre jusqu'à la maison), la technologie GPON a été particulièrement développée. Elle propose un réseau d'accès optique asymétrique à 2,5Gbit/s, basé sur un multiplexage temporel. Ainsi, une bande passante de 100Mbit/s est offerte à un nombre maximum de 64 abonnés pour une portée de 20km.

Ainsi, l'extension du budget optique entre le central et les utilisateurs du réseau d'accès est utile pour obtenir une marge supplémentaire d'atténuation du signal optique. Ce budget optique additionnel peut s'exprimer par une extension de la portée, du taux de remplissage et d'atteindre un plus grand nombre d'utilisateurs, dont des clients plus éloignés d'un central optique. Parmi les solutions à base d'amplification optique, l'amplificateur optique à fibre dopée Erbium s'est révélé être un bon candidat. Il permet d'étendre le budget optique du GPON et présente des avantages en termes de transparence en débit et une bonne compatibilité avec un multiplexage en longueur





d'onde. C'est pour cette raison que le troisième chapitre traite en détail l'amplification optique; nous avons passé en revue les principes de transitions électroniques, ainsi que les transitions non radiatives et radiatives telles que : l'émission spontanée et l'émission stimulée sur laquelle est basé le principe d'amplification optique d'un système à trois niveaux utilisés dans notre étude. Les principes de fonctionnement de l'EDFA, ses différentes caractéristiques en termes de gain et son facteur de bruit, ainsi que son utilisation dans l'amplification optique pour différentes positions des signaux se propageant dans une fibre à silicate ont été exposés.

Le quatrième chapitre concerne l'essentiel de nos simulations sur l'amplificateur à fibre optique dopée à l'erbium (Er). Tout d'abord, les premières simulations ont été entamées dans le but de justifier et de cerner les paramètres essentiels tels que la concentration, la longueur de la fibre dopée et la puissance de la pompe, paramètres nécessaires à l'optimisation du gain de l'amplificateur. Ainsi, dans l'objectif d'étendre le budget optique l'amplificateur optique EDFA a été introduit dans le réseau GPON.

Suite à cela, nous avons présenté les résultats de simulation concernant l'évaluation des performances du GPON amplifié avec la configuration booster en termes de facteur de qualité et de diagrammes de l'œil et ceci en fonction des paramètres opto-géométriques optimisés caractérisant l'EDFA. L'objectif de ce travail est de connaître les valeurs de ces grandeurs en fonctions des plusieurs paramètres tels que la longueur de la fibre, la concentration en ions dopants, la géométrie de la fibre..etc. Une fois ces paramètres définis, il a été possible d'accéder au gain de l'amplificateur. Ensuite, afin d'améliorer les performances d'un EDFA en position de pré-amplification, différentes simulations ont été menées en fonction des paramètres tels que le débit de transmission, les types de modulation, les formats de modulation et les types de photodiodes à la réception afin d'avoir de meilleurs performances en terme de facteur de qualité et de diagrammes de l'œil. Les résultats obtenus pour les différentes simulations en fonction des positions de l'EDFA dans le système GPON (post-, pré- et en ligne amplification) ont été comparés. Nous avons constaté qu'une configuration d'amplification en ligne pour les transmissions au-delà de 100 km est la meilleure en termes de budget optique et de distance parcourue suivi par la pré- amplification et la post-amplification, respectivement. On pourra utiliser une post-amplification pour des configurations particulières et des distances inférieures à 70 km.

.





Annexe Chapitre II



Budget optique d'un GPON :

C'est un paramètre qui permet de quantifier les réseaux PON en termes de distance accessible et de taux de partage. Le budget optique comptabilise la perte ou l'atténuation optique possible entre un émetteur et un récepteur reliés par des composants optiques passifs tels que fibres, coupleurs, atténuateurs ou encore multiplexeurs [29. Chap II].

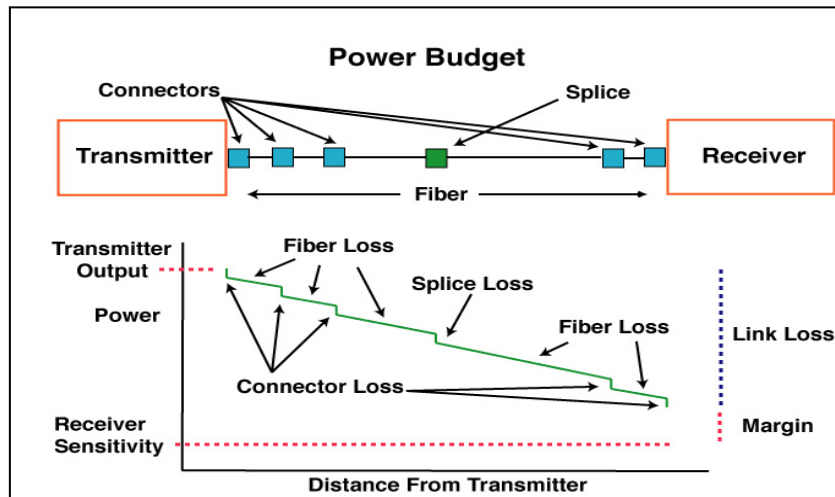


Fig. II.1: Budget optique dans un système de transmission à fibre.

Le bilan d'énergie ou le budget optique dans un système de transmission à fibre, demande le calcul des pertes dans les composantes du système afin d'avoir à la réception une énergie au niveau de sensibilité de la photodiode. Le flux à l'entrée du récepteur doit être suffisant pour que le rapport signal/ bruit du récepteur assume un taux d'erreur minimum. Dans le calcul de ce bilan on doit prévoir une marge de sécurité.

▪ *Exemple de calcul du budget optique d'un GPON :*

Pour faire la conception d'une liaison GPON à un débit donné, et connaissant les performances des composants disponibles, on calcule le budget optique B_{op} en ajoutant toutes les pertes rencontrées entre l'OLT et l'ONU et la marge M [30 chapII].

$$B_{op} = m.S\mu + k.C\mu + L.F\mu + S_L + M$$

II.1

M : nombre d'épissures.

k : nombre de connecteurs.

L : longueur de fibre.

S_{μ} : pertes moyennes par épissure (dB).

C_{μ} : pertes moyennes par connecteur (dB).

F_{μ} : pertes moyennes dans la fibre au km (dB.km^{-1}).

M : marge due à la dérive des composants.

S_L : pertes liées au coupleur passif.

Pour une liaison optique GPON de la classe B⁺, on dispose d'un budget optique d'environ 28 dBm entre la terminaison OLT et les ONU : faut donc que la somme de toutes les pertes induites par les éléments du réseau optique (fibres, splitters, soudures, etc.) ne dépasse pas cette valeur de budget optique selon la formule suivante :

$$28 \text{ dBm} > m.S_{\mu} + k.C_{\mu} + L.F_{\mu} + S_L + M \quad \text{II.2}$$

Pour calculer la portée d'une liaison par fibre optique, il faudra déterminer le budget optique, puis déduire toutes les pertes. En connaissant la valeur de l'atténuation du câble utilisé et la nouvelle valeur du budget optique, la formule qui permet de calculer la portée maximale de la liaison qui est :

$$\text{Portée max(km)} = \frac{\text{Budget optique} - \text{Pertes totales} - \text{Marge}}{\text{Atténuation de la fibre en dB/km}} \quad \text{II.3}$$





Annexe Chapitre III :



1. Auto - extinction de la «concentration Quenching »:

L'amplification d'un signal autour de 1550 nm dans une fibre dopée erbium ne fait en principe intervenir que les trois niveaux de plus basse énergie : $4I_{15/2}$, $4I_{13/2}$ et $4I_{11/2}$. Néanmoins, dans le cas de fibres ayant une forte concentration de dopant, ou lorsque d'importantes intensités laser de pompe ou de signal sont mises en jeu, il devient nécessaire de prendre en compte certains effets parasites faisant intervenir des niveaux de plus grande énergie, ainsi que les transferts d'énergie entre les ions. Plusieurs effets qui réduisent l'efficacité de la luminescence sont connus sous le nom de « Auto-extinction de la concentration » (concentration Quenching), effet qui intervient à forte concentration en erbium où un ion erbium dans l'état $4I_{13/2}$ se désexcite en transférant son énergie à un autre ion erbium voisin qui se trouvait dans l'état fondamental. Ces effets diminuent principalement la durée de vie de l'état excité à cause de l'interaction ion-ion [22chp.III].

Le phénomène de « Quenching » a été interprété dans notre travail de thèse par la conversion homogène des basses fréquences vers les hautes fréquences ou « Homogène Up-Conversion (HUC) et de « Quenching Induced Paire (PIQ) en anglais», modèles, qui comptent pour pénalité de puissance de la pompe et l'absorption insaturable respectivement [23, 24 chp.III]. En effet, si la distance qui sépare les deux ions erbium est supérieure au diamètre d'un ion erbium particulier (de l'ordre de ≈ 1 nm), le processus de conversion est appelé " ou « Homogène Up- Conversion (HUC) ». Mais avec l'augmentation de la concentration la distance inter-ionique entre deux ions erbium devient plus faible (de l'ordre de ≈ 0.1 nm) et ils se rapprochent beaucoup plus les uns aux autres de manière à former des «amas » et constituent le plus souvent des paires. Ce phénomène s'appelle « Quenching induit par paire » ou PIQ [25chp.III].

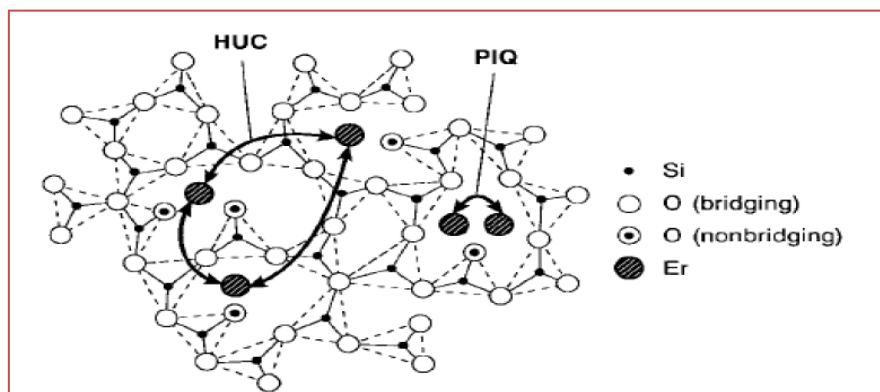


Fig. A.III.11 : Schéma représentant le processus HUC et PIQ.

2. Système à trois niveaux [17,19, 26 chp.III] :

Dans le cadre de notre étude, nous considérons le cas de fibres optiques dopées aux ions Er^{3+} destinées à l'amplification autour de 1550 nm pour les télécommunications optiques. Nous allons maintenant déterminer les équations qui régissent l'évolution des puissances de pompe, de signal et de bruit (ASE). Sur la figure A.III.2, nous rappelons les niveaux et les différentes transitions mis en jeu pour l'amplification de signaux à 1550 nm par l'ion Erbium pompé à 980 nm.

Il n'est pas possible d'avoir en réalité un système à deux niveaux d'énergie car cela nécessite que l'égalité des sections efficaces d'absorption et d'émission. Pour cela il faut introduire un système à 3 niveaux d'énergie. Prenons le cas de l'ion Erbium.

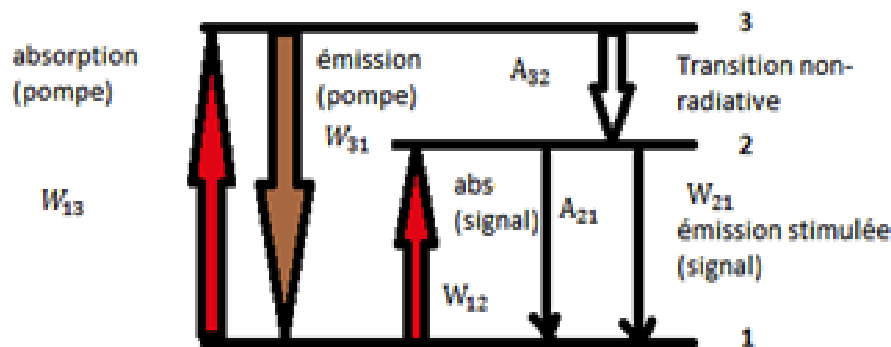


Fig.A.III.2 : Système à 3 niveaux.

On peut observer sur la figure ci-dessus:

- l'état (1) représente le niveau fondamental
- l'état (2) le niveau métastable
- l'état (3) le niveau excité (ou niveau de pompe)

Pour amener les électrons d'un niveau fondamental à un niveau d'énergie haut (3) il faut effectuer un pompage optique par l'intermédiaire d'une diode laser de pompe à 980nm ce qui va induire un phénomène d'absorption et permettre d'apporter suffisamment d'énergie. Ainsi les électrons se trouvent dans un niveau excité pendant une période extrêmement courte pendant laquelle ils vont subir une transition non radiative très rapide (sans émission de photon) vers un niveau (2) métastable. Étant donné que ce niveau à une grande durée de vie par rapport au niveau (3), un grand nombre d'électrons vont pouvoir s'accumuler sur cet état et si la pompe est suffisamment intense, il y aura d'avantage d'électrons dans le niveau (2) que dans le niveau fondamental (1). C'est par ce processus que s'effectue l'inversion de population. Donc à l'arrivée d'un photon incident (photon provenant du signal) le phénomène de l'émission stimulée se produira ce qui donnera naissance à un second photon, identique au premier, et ainsi de suite, dès lors notre signal est amplifié.

a) Equation d'évolution en régime stationnaire:

Comme nous l'avons mentionné précédemment, plusieurs mécanismes se produisent lorsqu'un rayonnement vient interagir avec les ions erbium (absorption, transition non-radiative, émission, ..etc..). Ces phénomènes vont influencer la population d'électrons issue de chaque niveau d'énergie ce qui génère des équations de populations:

Soient N_1 , N_2 et N_3 les populations des niveaux 1 (resp 2 et 3) et N_t la population totale. Alors, pour ce système donné, nous pouvons définir l'évolution des populations atomiques (N_i) avec une équation différentielle pour chaque niveau :

$$N_t = N_1 + N_2 + N_3 \quad (\text{III.1})$$

$$\frac{dN_1}{dt} = W_{31}N_3 - W_{13}N_1 + W_{21}N_2 - W_{12}N_1 + \frac{1}{\tau_{21}} \cdot N_2 \quad (\text{III.2})$$

$$\frac{dN_2}{dt} = N_1 W_{12} - N_2 \cdot W_{21} - N_2 \cdot A_{21} + N_3 \cdot A_{32} \quad (\text{III.3})$$

$$\frac{dN_3}{dt} = W_{13}N_1 - W_{31}N_3 - W_{32}N_3 \quad (\text{III.4})$$

Dans un amplificateur, l'évolution des populations dans les niveaux d'énergie atteignent un régime stationnaire ($W_{13} \neq 0$ pour $t < 0$), donc les dérivées temporelles de N_2 et N_3 sont nulles. En faisant les approximations $A_{32} \gg W_{13}$, $W_{13} \approx W_{31}$ on obtient:

$$\frac{dN_3}{dt} = 0 \Leftrightarrow W_{13}N_1 - W_{32}N_3 = 0 \Leftrightarrow N_3 = N_1 \cdot \frac{W_{13}}{A_{32}} \quad (\text{III.5})$$

$$\text{Donc : } N_1 \gg N_3 \Leftrightarrow N_t \approx N_1 + N_2 \quad (\text{III.6})$$

On peut négliger N_3 dans l'expression de N_t car la durée de vie du niveau 3 de l'erbium (de l'ordre de 10 μ s) est très petite devant la durée de vie des autres niveaux.

$$\frac{dN_2}{dt} = N_1W_{12} - N_2 \cdot W_{21} - N_2 \cdot A_{21} + N_3 \cdot A_{32} \quad (\text{III.7})$$

$$\frac{dN_2}{dt} = 0 \Leftrightarrow N_2 = \frac{N_t \cdot (W_{12} + W_{13})}{W_{21} + W_{12} + A_{21} + W_{13}} \quad (\text{III.8})$$

Si nous posons comme grandeurs adimensionnées:

- $S_a = W_{12}/A_{21}$, le signal absorbé.
- $S_e = W_{21}/A_{21}$, le signal normalisé émis.
- $p = W_{13}/A_{21}$, ou encore $p = P_p/P_{\text{sat}}$ la puissance de pompe normalisée.
- $n_2 = N_2/N_t$, la population N_2 normalisée.

L'expression de n_2 sous sa forme générale s'écrit donc:

$$n_2 = \frac{S_a + p}{1 + p + S_a + S_e} \quad (\text{III.9})$$

Dans la suite, nous ferons l'hypothèse que le signal est négligeable devant p ($S_a, S_e \ll p$). Ainsi pour décrire la fluorescence, on écrit:

$$n_2 = \frac{p}{1+p} \quad (\text{III.10})$$

Expérimentalement nous n'avons pas de moyen pour mesurer directement n_2 , donc pour cela nous mesurerons la puissance de la fluorescence qui est proportionnelle à n_2 .

b .Evolution en régime non-stationnaire:

Pour mesurer la durée de vie nous devons exciter les électrons puis couper la diode laser à l'instant $t=0$ afin d'observer la désexcitation des électrons du niveau 2 vers le niveau fondamental, le taux d'absorption $W_{13} \neq 0$ pour $t < 0$. Nous reprendrons les approximations

faites dans la section précédente. L'état du niveau 2 est non stationnaire donc la population du niveau 2 dépend du temps.

Récrivons l'équation (III.7) en absence du signal :

$$\frac{dN_2}{dt} = -N_2 \cdot A_{21} + N_1 \cdot W_{13} \quad (\text{III.11})$$

D'où l'évolution du niveau 2 après coupure de la pompe s'écrit:

$$\frac{dN_2}{dt} = -N_2 \cdot A_{21} \quad (\text{III.12})$$

Si à l'instant $t=0$ la population du niveau 2 vaut $N_2(0)$ et comme $A_{21} = 1/\tau$, elle vaut à l'instant t :

$$N_2 = N_2(0) \cdot \exp(-t/\tau) \quad (\text{III.13})$$

Ou encore

$$n_2 = n_2(0) \cdot \exp(-t/\tau) \quad (\text{III.14})$$

Cette expression nous informe que la population du niveau suit une loi de décroissance exponentielle, elle nous permettra de vérifier expérimentalement si ce modèle correspond à la réalité.



Résumé



Résumé

L'amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium demeure actuellement un élément important dans l'amélioration des performances d'un système à transmission à fibre optique. Il est inséré dans la ligne dans le but de contrer les pertes en régénérant les signaux dans la bande spectrale allant de 1530 à 1565 nm appelée bande C (dans la norme recommandée par l'Union Internationale des Télécommunications). L'intérêt de cette plage réside dans le fait qu'elle correspond au minimum d'atténuation des fibres utilisées. L'objectif principal de cette étude est de montrer l'efficacité d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium EDFA en vue de sa faisabilité et son déploiement sur un réseau d'accès optique passif de norme GPON (Gigabit Passive Optical Network) étendu qui permettrait d'augmenter le nombre d'utilisateurs à bénéficier de tous les avantages que peut leur offrir un tel réseau).

Dans ce contexte les travaux de simulations consistaient à étudier et analyser ce GPON amplifié (avec l'utilisation de l'EDFA à différentes positions de la liaison) en mode TDM (Time Division Multiplexing) afin de constater ses capacités vis-à-vis des exigences en bande passante et en distance. Ce réseau est orienté vers l'accès au service triple play (voix, données et vidéo). La partie simulation de ce mémoire de thèse fait appel au logiciel système qui nous donne la possibilité de concevoir des chaînes comparables à celles existantes dans la « réalité », avec visualisation des performances en termes de gain, du facteur de qualité, du facteur de bruit et du diagramme de l'œil.

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

Abstract

The fiber optical amplifier doped with erbium currently remains an important element in improving the performance of an optical fiber transmission system. It 's inserted in to the line in order to counter the loss by regenerating the signals in the spectral band from 1530 to 1565 nm band called C (the standard recommended by the International Telecommunications Union). The value of this range lies in the fact that it corresponds with the minimum attenuation of the used fibers. The main objective of this study is to demonstrate the effectiveness of an optical fiber amplifier EDFA erbium doped for feasibility and deployment of a passive optical access network (Gigabit Passive Optical Network) GPON extended which would increase the number of users to benefit from all the advantages that can offer such a network). In this context the simulation work is to study and analyze this amplified GPON (with the use of EDFA in different positions) in TDM fashion (Time Division Multiplexing) to see his vis-à-vis band capacity requirements bandwidth and distance. This network oriented access to triple play service (voice, data and video). The simulation part of this thesis uses the software system that gives us the opportunity to design comparable to those channels existing in "reality", with visualization performances in terms of the gain, quality factor, noise factor and the eye diagram.

Keywords: Optical fiber, Optical amplifier, EDFA, Optical access network, GPON, Gain, Quality Factor, Noise Factor, Eye Diagram.

يبقى مكبر للصوت الألياف البصرية مخدر مع الإرييوم حاليا عنصرا هاما في تحسين أداء نظام انتقال الألياف البصرية. يتم (المعيار **C** إدراجها في خط لمواجهة الخسائر عن طريق تجديد الإشارات في النطاق الطيفي 1530-1565 نانوميتر يسمى الموصى به من قبل الاتحاد الدولي للاتصالات). قيمة هذا النطاق تكمن في حقيقة أنه يتوافق مع الحد الأدنى للتخفيف من الإرييوم **EDFA** الألياف المستخدمة. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إثبات فعالية من الألياف الضوئية مكبر للصوت تمديد التي من شأنها زيادة عدد **GPON** مخدر لجدوى ونشر شبكة النفاذ الضوئية السلبية (جيجابت سلبية الشبكة البصرية) المستخدمين من الاستفادة من جميع المزايا التي يمكن أن تقدم مثل هذه الشبكة). في هذا السياق تضمنت محاكاة لعمل دراسة الأزياء (الوقت بالتقسيم) لنرى له **TDM** في المواقف المختلفة) في **EDFA** تضخيم (مع استخدام **GPON** وتحليل هذه وجها لوجه متطلبات القدرة الفرقة عرض النطاق الترددي والمسافة. هذه الشبكة الموجهة الوصول إلى خدمة التشغيل الثلاثي الجزء محاكاة لهذه الأطروحة يستخدم البرنامج نظام يعطينا القدرة على تصميم سلاسل مشابهة. ((الصوت والبيانات والفيديو لتلك الموجودة في الواقع، مع التصور من الأداء من حيث الربح، عامل الجودة، وعامل الضوضاء و الرسم البياني للعين

كلمات البحث : الألياف البصرية، والتضخيم البصري ،

، كسب، عامل الجودة، الضوضاء، مخطط العين **GPON**، شبكات النفاذ، **EDFA**



Production scientifique



Publications:

1. Bentahar Attaouia , Kandouci Malika; “Evaluation of Gain and Quality Factor of an Erbium Doped Fiber Post-, Pre- and in-line Amplifier for GPON”, International Journal of Computer Applications (IJCA), Vol:94, Numéro 6, , ISSN 0975-8887, ijcaonline.org , May 2014.
2. Bentahar Attaouia , Kandouci Malika, “Analysis Of GPON Downstream With 128 Users Using EDFA In-Line Amplifier For Extended Reach To 80” , American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering and Mathematics (AIJRSTEM) Vol:1, N°6, , ISSN 2328-3580, <http://www.iasir.net>, juin 2014.
3. Bentahar Attaouia , Kandouci Malika, “ Analysis of concentration quenching on Erbium Doped Fibers using 8-Channel WDM /TDM PON Optical Communication System”, American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering and Mathematics International Journal of advanced studies in Computer Science and Engineering(IJASCSE), Volume 3, Issue 9, ISSN (Online): 2328-3580, www.IJASCSE.org.2014.
4. Bentahar Attaouia, Kandouci Malika, “ Optimized of Erbium-Doped-Fiber Amplifiers (EDFA) Parameters in Hybrid Passive Optical Network (WDM/TDM-PON) Systems with 512 users ” , World Applied Sciences Journal , Volume 33, Issue 6, ISSN (Online): 1042-1051 www.wasj.org 2015.
5. 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.meecs-press.org>. 2016

Communications internationales :

1. Bentahar Attaouia , Kandouci Malika ,“ Simulation of System PON using EDFA amplifier in position Booster ” The 2015 International Conference on Advanced Communication Systems and Signal Processing (ICOSIP 2015), 08-09 November, Tlemcen, Algeria.
 2. Bentahar Attaouia ,Kandouci Malika “, The Effects of Concentration quenching and the Position of EDFA Amplifier on WDM/TDM -Based Long- Reach Passive Optical Networks ” ,Fourth international conference on Electrical Engineering 2015 (ICEE'2015), 13th to 15th December 2015, Boumerdes, Algeria.
 3. Bentahar Attaouia ,Kandouci Malika, “Erbium doped fiber amplifiers in booster position for access networks”, Conference on Electrical Engineering and Control Applications (ICEECA'2014),18 -20 Novembre 2014, Constantine, Algérie.
-