

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث

العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par : Mehtari Choukri

Sujet

**Conception et analyse d'amplificateurs optiques pour
Applications 5G**

Soutenu publiquement, le 27 / 06 / 2022 , devant le jury composé de :

M. Abri Mehadji	Professeur	Université de Tlemcen	Président
M. Abdelmalek Abdelhafid	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
M. Borsali Ahmed Riad	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur
M. Abdennour Fellag Chebra	Doctorant	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Mes plus profonds remerciements vont à mes parents. Tout au long de mon cursus, ils m'ont toujours soutenu, encouragé et aidé. Ils ont su me donner toutes les chances pour réussir.

J'adresse mes sincères remerciements à tous mes enseignants de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, notamment à mon encadreur Mr. Borsali Ahmed Riad, d'avoir proposé le sujet sur lequel j'ai travaillé, et qui a assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire.

Enfin, Je tiens à adresser l'expression de ma sincère reconnaissance aux membres du jury Mr. Abri Mehadji et Mr. Abdelmalek Abdelhafid, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Mes remerciements vont aussi à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents
qui n'ont jamais cessé de croire en moi, ils ont
toujours été présent pour me soutenir et m'encourager.*

A ma sœur

A mon frère

A mes amis

Ainsi qu'à toute ma famille

Résumé

L'amplificateur optique est le composant optoélectronique de base nécessaire pour concevoir une liaison par fibre optique. Dans les transmissions à longue distance, l'atténuation et la distorsion se produisent et pour résoudre ce problème, le besoin d'amplificateurs optiques se fait sentir. Ce travail examine et analyse de manière critique les amplificateurs optiques simples et hybrides pour le système DWDM. La conception est simulée à l'aide du logiciel Optisystem afin d'atteindre un BER minimal, un facteur Q élevés et une grande hauteur d'ouverture du diagramme de l'œil.

Mots clés : DWDM, SOA, EDFA, Raman, Amplificateur optique hybride, Bit error rate BER, Facteur de qualité Q, diagramme de l'œil.

Abstract

The optical amplifier is the basic optoelectronic component needed to design a fiber optic link. In long distance transmissions, attenuation and distortion occur and to solve this problem, the need for optical amplifiers arises. This work critically examines and analyzes single and hybrid optical amplifiers for DWDM system. The design is simulated using Optisystem software to achieve minimum BER, high Q-factor, and high aperture height of the eye diagram.

Keywords: DWDM, SOA, EDFA, Raman, Hybrid optical amplifier, Bit error rate BER, Q factor, eye diagram.

ملخص

مكبر الصوت البصري هو المكون الأساسي للإلكترونيات الضوئية اللازمة لتصميم وصلة ألياف بصرية. في عمليات الإرسال لمسافات طويلة، يحدث التوهين والتشويه ولحل هذه المشكلة، تنشأ الحاجة إلى مكبرات الصوت الضوئية. تمت محاكاة التصميم باستخدام DWDM. يفحص هذا العمل بشكل نقدي ويحلل المضخمات الضوئية المفردة والهجينة لنظام العالي وارتفاع الفتحة العالية Q وعامل (BER) لتحقيق الحد الأدنى من معدل الخطأ في البتات Optisystem برنامج لمخطط العين.

الكلمات المفتاحية: DWDM، SOA، EDFA، Raman، مضخم بصري هجين، معدل خطأ البت BER، عامل Q، مخطط العين.

Table des matières

Listes des figures :	
Listes des acronymes :	
Introduction générale :	1

Chapitre I

Etude d'un système de communications par fibre optique

I.1. Introduction :	4
I.2. Transmetteurs optiques :	4
I.2.1. Physique des lasers à semi-conducteurs :	5
I.2.2. Diode LED (Light-emitting diodes):	6
I.2.3. Diodes laser :	7
I.2.4. Modulateurs optiques :	10
I.2.5. Circuit de commande :	12
I.3. La fibre optique :	13
I.2.6. Fibre à saut d'indice :	15
I.2.7. Fibres monomodes :	16
I.2.8. Dispersion dans les fibres monomodes :	17
I.2.9. Compensation de la dispersion chromatique :	19
I.2.10. L'Atténuation :	20
I.2.11. Effets non linéaires dans les fibres optiques :	20
I.4. Récepteurs optiques :	22
I.2.12. Photodétecteurs :	23
I.5. Conclusion :	26

Chapitre II

Etude des amplificateurs optiques

II.1. Introduction :	28
II.2. Classifications des amplificateurs optiques :	28
II.3. Utilisations générales des amplificateurs optiques :	30
II.4. Amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) :	31
II.5. Amplificateurs à fibre dopée à l'erbium :	33
II.1.1. Principe de base du pompage des amplificateurs à fibre optique :	33
II.1.2. Configuration interne d'un EDFA :	34

II.1.3.	Paramètres de gain de l'EDFA :	35
II.1.4.	Rapport signal/bruit optique (OSNR) de l'EDFA :	36
II.6.	Amplificateurs optiques Raman :	38
II.1.5.	Principe du gain Raman :	38
II.1.6.	Lasers de pompage pour amplificateurs Raman :	39
II.7.	Amplificateur optique hybride (HOA) :	40
II.8.	Applications des Amplificateurs sur les systèmes optiques 5G :	42
II.9.	Conclusion :	43

Chapitre III

Application des amplificateurs optiques

III.1.	Introduction	45
III.2.	Présentation du logiciel de simulation Optisystem :	45
III.3.	Mesures du taux d'erreur binaire (BER) :	46
III.4.	Estimation du Facteur de qualité Q :	47
III.5.	Diagramme de l'œil :	47
III.6.	Modèle de simulation proposé et paramétrages :	49
III.7.	Résultats de simulation :	51
Partie I : espacement de fréquence 100 GHz		51
Partie II : espacement de fréquences 50 GHz		55
III.8.	Conclusion :	59
Conclusion générale :		60
Références.....		61

Listes des figures :

Chapitre I

Figure I. 1 Constitution principale d'une liaison de communication par fibre optique	4
Figure I. 2 Composants d'un émetteur optique.....	5
Figure I. 3 (a) l'absorption ; (b) l'émission spontanée ; et (c) l'émission stimulée.	5
Figure I. 4 Schéma d'un laser à semi-conducteur à large bande.....	6
Figure I. 5 Diode laser Fabry-Pérot	7
Figure I. 6 Diode laser DFB. [7]	8
Figure I. 7 Diode laser DBR à adaptation de longueur d'onde.....	9
Figure I. 8 Diode laser VCSEL	9
Figure I. 9 Modulation directe d'un laser	10
Figure I. 10 Un émetteur utilisant un modulateur externe.....	11
Figure I. 11 Interféromètre Mach-Zehnder	11
Figure I. 12 Circuit de commande d'un émetteur laser.....	13
Figure I. 13 Structure d'une fibre optique.....	14
Figure I. 14 fibres optiques monomodes et multimodes à saut d'indice et à gradient d'indice.....	14
Figure I. 15 mécanisme de propagation dans un guide d'onde optique à saut d'indice	15
Figure I. 16 Propagation d'une impulsion optique dans une fibre à biréfringence constante.....	19
Figure I. 17 Effet SRS dans une fibre de silice.	22
Figure I. 18 . Composants d'un récepteur optique.....	23
Figure I. 19 a Représentation d'un circuit de photodiode PIN avec une polarisation inverse appliquée. b Niveau de puissance en fonction de la profondeur de la région intrinsèque..	24
Figure I. 20 Coefficient d'absorption optique en fonction de la longueur d'onde de plusieurs matériaux photodétecteurs.....	25
Figure I. 21 Photodiode à avalanche et courbe gain-tension.	26

Chapitre II

Figure II. 1. Fonctionnement de base d'un amplificateur optique générique [19].....	29
Figure II. 2 Système à fibre optique typique avec des amplificateurs optiques comme booster, en ligne et préamplificateurs.	31
Figure II. 3 Dépendance typique du gain à un seul passage en fonction de la puissance optique d'entrée	32
Figure II. 4 bande passante optique de 3 dB pour SOA avec un gain de pointe de 25 dB à 1530 nm. 33	
Figure II. 5 Diagrammes de niveau d'énergie d'EDFA.	34

Figure II. 6 Trois configurations possibles d'un EDFA : (a) pompage co-directionnel, (b) pompage contre-directionnel et (c) pompage double.....	35
Figure II. 7 Gain et rendement en fonction de la puissance d'entrée $P(e)$	36
Figure II. 8 Spectre de pompe représentatif à 1480 nm et signal de sortie typique à 1540 nm avec le bruit d'émission spontanée amplifiée (ASE) associé.....	37
Figure II. 9 Déplacement de Stokes et spectre de gain Raman résultant d'un laser de pompe fonctionnant à 1445 nm.....	38
Figure II. 10 Valeurs de gain Raman d'une liaison par fibre à 100 km.....	39
Figure II. 11 Configuration d'un système d'amplification Raman distribué utilisant quatre lasers de pompage.	40
Figure II. 12 Représentation des amplificateurs optiques en bande C et en bande L disposés en parallèle.....	40
Figure II. 13 Représentation des amplificateurs optiques en bande C et en bande L disposés en série.....	40
Figure II. 14 Partitionnement du gain dans un amplificateur hybride Raman- EDFA.	42

Chapitre III

Figure III. 1 Aperçu de l'interface utilisateur du logiciel Optisystem.....	46
Figure III. 2 Configuration générale d'un diagramme de l'œil montrant.....	48
Figure III. 3 Diagramme de l'œil simplifié montrant les principaux paramètres de performance.....	48
Figure III. 4 Schéma fonctionnel du système proposé.....	50
Figure III. 5 Log (BER) en fonction de la distances (espacement entre canaux 100 GHz).....	52
Figure III. 6 Facteur de qualité Q en fonction de la distance (espacement entre canaux 100 GHz)....	52
Figure III. 7 Diagramme de l'œil : (a) EDFA à 84 km, (b) EDFA-EDFA à 84 km, (c) EDFA à 120 km, et (d) EDFA-EDFA à 120 km.....	53
Figure III. 8 Diagramme de l'œil : (a) SOA à 210 km, (b) SOA-EDFA à 210 km.....	54
Figure III. 9 Diagramme de l'œil (a) Raman à 84 km, (b) Raman-EDFA à 84 km, (c) Raman à 102 km, et (d) Raman-EDFA à 120 km.....	55
Figure III. 10 Log (BER) en fonction de la distances (espacement entre canaux 50 GHz).....	56
Figure III. 11 Facteur de qualité Q en fonction de la distance (espacement entre canaux 50 GHz)....	56
Figure III. 12 Diagramme de l'œil (a) EDFA à 84 km, (b) EDFA-EDFA à 84 km, (c) EDFA à 120 km, et (d) EDFA-EDFA à 120 km.....	57
Figure III. 13 Diagramme de l'œil : (a) SOA à 174 km et (b) SOA-EDFA à 174 km.....	58
Figure III. 14 Diagramme de l'œil (a) Raman à 84 km, (b) Raman-EDFA à 84 km, (c) Raman à 102 km, et (d) Raman-EDFA à 102 km.....	59

Listes des acronymes :

5G:	Cinquième génération
APD:	Avalanche photodiode
ASE:	Amplified spontaneous emission
BER:	Bit Error Rate
CFBG:	Chirped Fiber Bragg Grating
DBR:	Distributed Bragg Reflector
DCF:	Dispersion compensating fiber
DFA:	Doped fiber amplifiers,
DFB:	Distributed feedback
DGD:	Differential group delay
DML:	Directly Modulated Laser
DPSK:	Differential Phase Shift Keying
DWDM:	Dense Wavelength Division Multiplexing
EAM:	Electro-absorption modulator
EDFA:	Erbium-Doped Fiber Amplifier
eMbb:	Enhanced mobile broadband
FRA:	Fiber Raman Amplifier
FWM:	Four wave mixing
GFF:	Gain-flattening filter
GVD:	Group velocity dela
HOA:	Hybrid Optical Amplifier
IoT:	Internet of Things
LED:	Light-emitting diode
mMTC:	Massive machine-type communications
MZ:	Mach-Zehnder
MZM:	Mach-Zehnder modulator
NRZ:	Non Return to Zero
NZDSF:	Non-zero dispersion-shifted fiber
OSNR:	Optical signal-to-noise ratio
PMD:	Polarization mode dispersion
QCE:	Quantum conversion efficiency
RZ:	Return to Zero
SMF:	Single-mode fiber
SNR:	Signal-to-noise ratio
SOA:	Semiconductor optical amplifier
SPM:	Self-Phase Modulation
SRS:	Stimulated Raman scattering
SSMF:	Standard Single-mode fiber
TW:	Traveling-wave

uRLLC:	Ultra-reliable low latency communications
VCSEL:	Vertical cavity surface-emitting lasers
WDM:	Wavelength Division Multiplexing
XPM:	Cross-Phase Modulation
PRBS:	Pseudorandom binary sequence

Introduction générale :

Les systèmes de communication optique constituent l'épine dorsale de la société de communication et d'information d'aujourd'hui. En bref, la quasi-totalité des informations que nous consommons aujourd'hui, qu'il s'agisse d'une recherche sur Internet, d'une vidéo diffusée en continu ou d'un appel sur un téléphone portable, passe une partie de sa vie sous la forme d'un photon infrarouge dans une gigantesque infrastructure mondiale de communications optiques[1].

La quantité de données générées, transmises et accumulées dans le monde ne cesse de croître chaque année. L'Internet des objets (IoT), le Big Data, l'intelligence artificielle et d'autres innovations deviennent rapidement des réalités de la vie moderne. Le stockage des données dans le cloud et l'exploitation des applications dans l'environnement du cloud sont utilisés aujourd'hui. Ajoutant à cela, l'avènement de la technologie 5G qui prend en charge des applications telles que les maisons et bâtiments intelligents, les villes intelligentes, la vidéo 3D, le travail et les loisirs dans le cloud, les services médicaux à distance, la réalité virtuelle et augmentée, et les communications massives de machine à machine pour l'automatisation industrielle [2]. Le réseau sans fil de cinquième génération (5G) impose aux réseaux optiques de nouvelles exigences telles qu'une bande passante élevée, une faible latence et une synchronisation précise. Des réseaux de transport puissants sont nécessaires pour transmettre une telle quantité de données en constante augmentation.

En plus de la demande de capacité élevée, les réseaux de transport optique doivent disposer d'une longue distance de transmission optique pour prendre en charge efficacement les applications des réseaux métropolitains, régionaux et nationaux. L'arrivée des amplificateurs optiques, tels que les amplificateurs à semi-conducteurs (SOA), les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA) et les amplificateurs Raman, a rendu l'amplification optique rentable de plusieurs canaux WDM simultanément[3]. Les amplificateurs optiques conventionnels permettent d'aplanir le gain, mais ils sont limités en raison de la largeur des bandes d'énergie rayonnantes, pour améliorer la largeur de bande de gain aplatie, des amplificateurs optiques hybrides sont utilisés. Les amplificateurs hybrides représentent une technologie habilitante pour les systèmes DWDM multi-térabits. Ils combinent des amplificateurs individuels améliorant ainsi des largeurs de bande de gain.[4]

Dans la littérature, de nombreuses configurations WDM utilisant des amplificateurs optiques ont été proposées pour améliorer le facteur Q, le taux d'erreur binaire, le facteur de bruit, la puissance de sortie, l'OSNR (rapport signal sur bruit optique), le diagramme de l'œil, etc.[5].

Dans ce contexte, ce mémoire vise à concevoir et à étudier un système de transmission optique DWDM dans le but d'évaluer ces performances en plaçant un simple amplificateur optique ; puis une combinaison de deux amplificateurs dans le but d'avoir la meilleure configuration possible et d'augmenter la distance.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre permettra de se familiariser avec le système de communication par fibre optique, on détaillera l'ensemble des composants constitutifs d'une liaison optique point à point et on expliquera leurs fonctionnements.

Dans le second chapitre nous allons étudier les trois types d'amplificateurs : amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA), amplificateurs à fibre dopée (DFA) et amplificateurs Raman. On parlera aussi des amplificateurs optiques hybrides (HOA), qui désigne la combinaison de plusieurs amplificateurs optiques, puis on exposera l'importance des amplificateurs optiques dans le réseau 5G.

Le troisième et dernier chapitre sera consacré à la simulation et à l'évaluation des performances d'une liaison DWDM haut débit en termes de taux d'erreur binaire, de facteur Q et de diagramme de l'œil. Le système sera étudié en plaçant divers amplificateurs optiques simple et hybride dans une topologie préamplificateur. Le travail sera divisé en deux parties, dans la première partie on étudiera le système avec un espacement entre canaux de 100 GHz, puis dans la deuxième partie, un espacement de 50 GHz. Ceci dans le but d'optimiser le système afin d'avoir la meilleure qualité de transmission en fonction de la distance de la liaison optique.

Chapitre I

Etude d'un système de communications
par fibre optique

I.1. Introduction :

Comme pour les systèmes de communication électrique, la fonction de base d'une liaison par fibre optique est de transporter un signal d'un équipement de communication situé à un endroit à un équipement correspondant situé à un autre endroit, avec un degré élevé de fiabilité et de précision. La figure I.1 montre les principaux constituants d'une liaison de communication par fibre optique. Les principales sections sont un émetteur composé d'une source lumineuse et de son circuit de commande associé, un câble offrant une protection mécanique et environnementale aux fibres optiques qu'il contient, et un récepteur composé d'un photodétecteur et d'un circuit d'amplification et de restauration du signal. Les autres composants comprennent des amplificateurs optiques, des connecteurs, des épissures, des coupleurs, des régénérateurs (pour restaurer les caractéristiques de forme du signal) et d'autres composants passifs et dispositifs photoniques actifs.

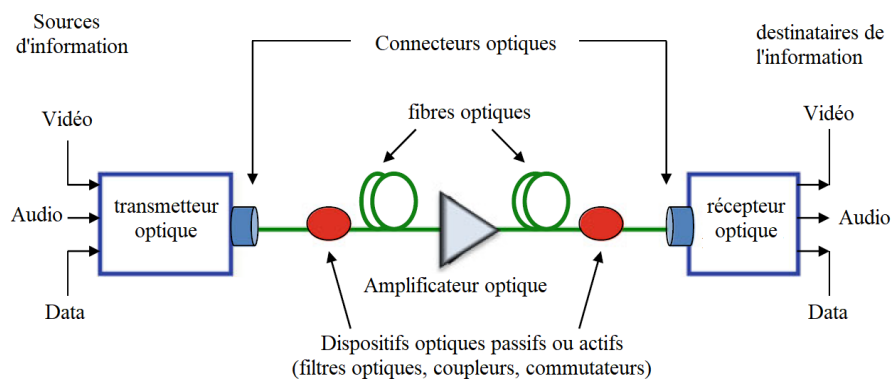


Figure I. 1 Constitution principale d'une liaison de communication par fibre optique

Dans ce chapitre nous allons parler des différents éléments qui constituent une liaison point à point par fibre optique, nous tenterons de décrire leur rôle et leur principal fonctionnement. Nous commencerons par le bloc émission qui concerne les transmetteurs optiques (Source optique, modulateurs optiques, couplage source-fibre, et circuit de commande), on passe en suite au support de transmission qui est la fibre optique, l'élément qui a permis de révolutionner l'ère des télécommunications, puis vient le bloc réception (concept de base de la photodétection, photodétecteurs,).

I.2. Transmetteurs optiques :

Le rôle d'un transmetteur optique est de convertir un signal d'entrée électrique en un signal optique correspondant, puis de le lancer dans un câble à fibres optiques servant de canal de communication. L'un des principaux composants des transmetteurs optiques est la source optique. Les diodes électroluminescentes à semi-conducteurs et les diodes laser sont les deux principaux types de sources lumineuses compatibles avec les dimensions des fibres optiques. Elles offrent de nombreux avantages comprenant une taille compacte, un rendement élevé et une bonne fiabilité. La figure I.2 présente le schéma fonctionnel d'un émetteur optique. Il se compose d'une source optique, d'un modulateur et d'un coupleur de canal.

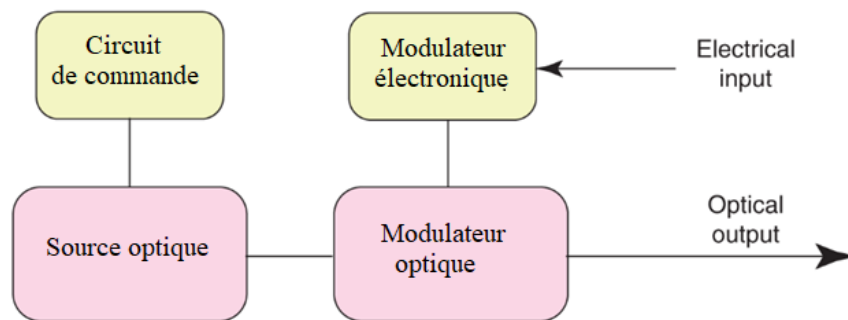


Figure I. 2 Composants d'un émetteur optique [6]

I.2.1. Physique des lasers à semi-conducteurs :

I.2.1.1. Absorption

Le processus d'absorption peut être compris en se référant à la figure I.3 (a), où les niveaux d'énergie E_1 et E_2 correspondent à l'état fondamental et à un état excité des atomes du milieu absorbant. Si l'énergie du photon $h\nu$ de la lumière incidente de fréquence ν est à peu près égale à la différence d'énergie $E_g = E_2 - E_1$, le photon est absorbé par l'atome, qui se retrouve dans l'état excité. La lumière incidente est atténuée en raison des nombreux événements d'absorption de ce type qui se produisent à l'intérieur du milieu.

I.2.1.2. Émissions spontanées et stimulées

Si un atome se trouve dans un état excité, il finit par revenir à son état normal "de base" et émet de la lumière au cours de ce processus. L'émission de lumière peut se produire par deux processus fondamentaux connus sous le nom d'émission spontanée et l'émission stimulée. Ces deux phénomènes sont représentés schématiquement à la figure I.3 (b) et (c).

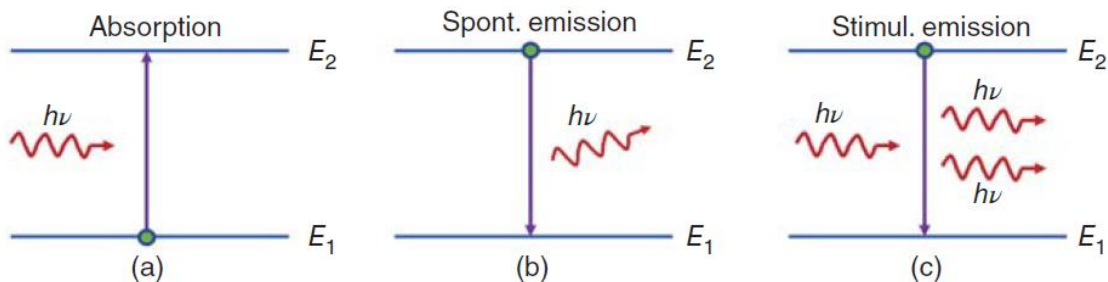


Figure I. 3 (a) l'absorption ; (b) l'émission spontanée ; et (c) l'émission stimulée.[6]

Dans le cas de l'émission spontanée, les photons sont émis dans des directions aléatoires, sans relation de phase entre eux. L'émission stimulée, en revanche, est initiée par un photon existant. La caractéristique remarquable de l'émission stimulée est que le photon émis correspond au photon d'origine non seulement en énergie (ou en fréquence), mais aussi dans ses autres caractéristiques telles que la direction de propagation. Tous les lasers, y compris les lasers à semi-conducteurs, émettent de la lumière par le processus d'émission stimulée et on dit qu'ils émettent de la lumière cohérente. En revanche, les LEDs émettent de la lumière par le processus incohérent de l'émission spontanée.

I.2.1.3. Gain optique :

Les lasers à semi-conducteurs sont pompés électriquement à l'aide d'une jonction p-n. Un tel pompage peut être réalisé en pratique en utilisant une structure à trois couches dans laquelle une couche centrale est prise en sandwich entre les couches de gaine de type p et de type n. La figure I.4 montre la structure à trois couches d'un laser à semi-conducteur typique ainsi que ses dimensions physiques.

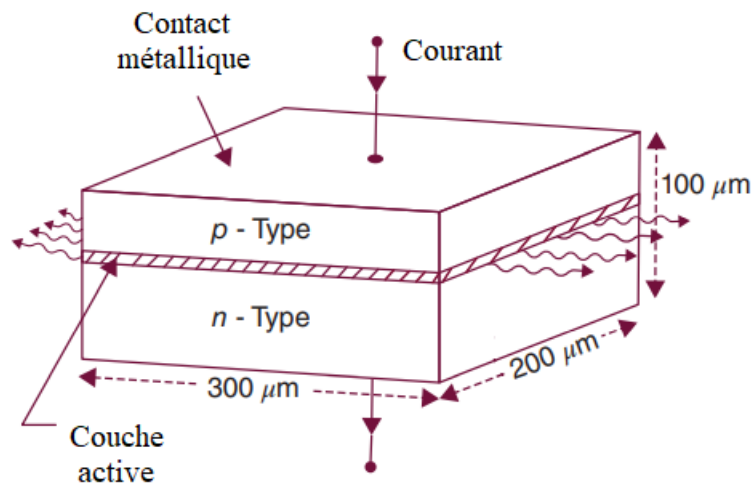


Figure I. 4 Schéma d'un laser à semi-conducteur à large bande

Lorsque la densité de porteurs injectés dans la couche active dépasse une certaine valeur, une inversion de population est réalisée et la région active présente un gain optique. Un signal d'entrée se propageant à l'intérieur de la couche active est alors amplifié par un facteur de $\exp(gL)$, où g est le *coefficient de gain* et L est la longueur de la couche active. Le calcul de g nécessite les taux auxquels les photons sont absorbés et émis par émission stimulée et dépend des détails de la structure de bande associée au matériau actif. En général, g est calculé numériquement.

I.2.2. Diode LED (Light-emitting diodes):

Dans certains réseaux locaux, une source cohérente n'est pas nécessaire et l'on peut utiliser une diode électroluminescente (DEL), une source optique moins coûteuse et plus durable avec un spectre optique relativement large. La structure de base d'une LED est similaire à celle des lasers à semi-conducteurs dans le sens où tous deux utilisent une couche active prise en sandwich entre deux couches de revêtement et pompée à l'aide d'une jonction p-n polarisée dans le sens direct. La principale différence réside dans le fait qu'il n'y a pas d'émission de stimulation car une inversion de population n'est pas réalisée. Au contraire, la recombinaison radiative des paires électron-trou dans la région active génère de la lumière par émission spontanée, dont une partie s'échappe du dispositif et peut être couplée à une fibre optique. La lumière émise est incohérente, avec une largeur spectrale relativement large (30-60 nm) et une dispersion angulaire relativement importante.

I.2.3. Diodes laser :

Les diodes laser doivent remplir les deux fonctions de l'oscillateur optique qu'est un laser : l'amplification et la résonance. L'amplification de la lumière est obtenue par l'émission stimulée (I.2.1.2). L'inversion de population (I.2.1.3) est obtenue par l'injection d'une très forte densité de courant dans la jonction (de l'ordre du kA/cm²). La résonance est obtenue par la structure de la cavité, pour la sélection de la ou des fréquences amplifiées.

I.2.3.1. Diodes laser à structure Fabry-Pérot :

Il s'agit de la structure classique (Figure I.6a), utilisant une "cavité" Fabry-Pérot (solide) constituée par le guide et la réflexion partielle ($R =$ environ 30%, en raison de la forte différence entre l'indice du semi-conducteur avec l'air) aux bords clivés aux extrémités. La résonance se produit lorsque la longueur L du guide est un nombre entier de la demi-longueur d'onde (ou $/2n$ dans le matériau d'indice n), ce qui sélectionne les modes longitudinaux des longueurs d'onde :

$$\lambda_p = \frac{2Ln}{p} \quad (\text{I.1})$$

Avec un nombre entier p , d'où l'espacement entre les lignes :

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2LN} \quad (\text{I.2})$$

Avec $N = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}$ indice de groupe, très proche de n .

En général, lorsque p est grand, plusieurs longueurs d'onde capables d'être amplifiées (car contenues dans la courbe de gain) vérifient cette relation. Le spectre du laser contient alors plusieurs raies (figure I.5) ; ce spectre est dit multimode longitudinal. Bien que plus faible que pour une LED, la largeur spectrale est importante, ce qui est acceptable à 1,3 μm mais pas à 1,55 μm , en raison de la dispersion chromatique.

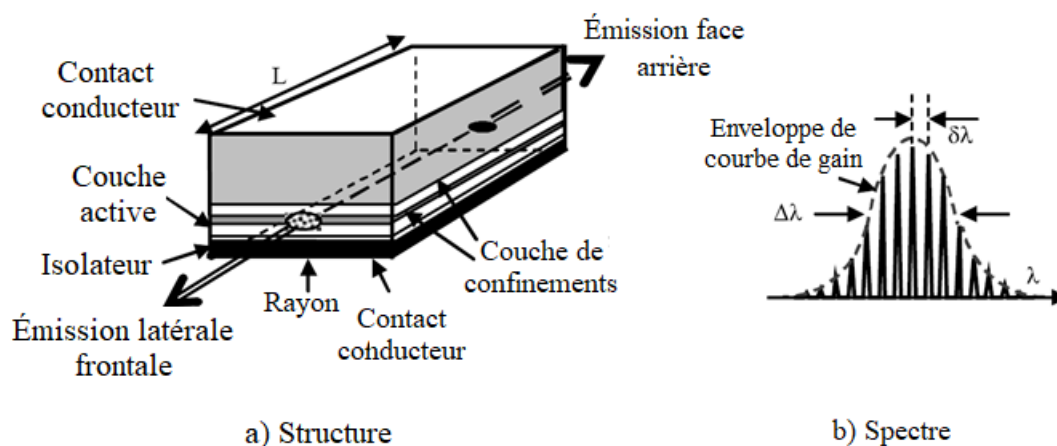


Figure I. 5 Diode laser Fabry-Pérot [7]

I.2.3.2. Diodes laser DFB :

Afin d'obtenir un spectre monomode, il est possible d'utiliser une structure à "rétroaction distribuée (Distributed feedback)" (DFB), en intégrant un réseau de Bragg de période Λ le long du guide (figure I.7). Cette perturbation périodique conduira à une réflexion distribuée de la longueur d'onde vérifiant : $\lambda_B = 2\Lambda.n$.

Le spectre est normalement monomode longitudinalement (figure I.6). Pour assurer la correspondance de phase à λ_B entre les deux directions de propagation, une section de déphasage de longueur $\lambda_B/4$ est insérée au milieu du guide, sinon deux modes symétriques autour de λ_B apparaissent. Afin d'éviter les résidus du spectre de la cavité de Fabry-Pérot, les bords doivent avoir des traitements anti-reflets. Le coût de ce composant est plutôt plus élevé que pour les diodes laser de type Fabry-Pérot.

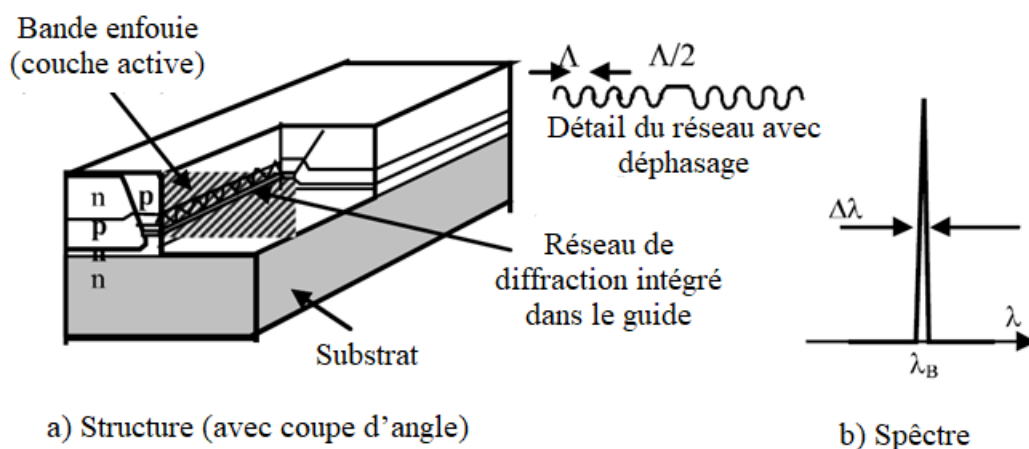


Figure I. 6 Diode laser DFB. [7]

Par contre, la raie unique du spectre s'élargit (effet chirp), lorsque le laser est modulé à cause de l'effet électro-optique (variation de l'indice du courant, qui fera varier la fréquence optique de typiquement plusieurs centaines de MHz par mA). Pour éviter cet élargissement spectral, il faut faire fonctionner le laser à courant constant et utiliser une modulation externe de la lumière, en amplitude ou en phase, avec des optiques intégrées ou un modulateur à électro-absorption.

I.2.3.3. Diode laser DBR :

Le développement des réseaux optiques utilisant le multiplexage dense en longueur d'onde (DWDM) entre de nombreuses porteuses optiques a nécessité le développement de diodes laser accordables complètement intégrées et rapidement accordables.

La structure la plus utilisée actuellement est la diode laser DBR (Distributed Bragg Reflector) comprenant trois sections alignées dans une structure monolithique (Figure I.7) :

- La "section de gain" qui est la diode laser proprement dite, le courant I_1 contrôlant la puissance émise ; elle comprend la couche active, proche de la couche de guidage qui est plus large;
- La "section de Bragg" qui, sous la couche de guidage, comprend un réseau de Bragg, qui

sélectionne la longueur d'onde réfléchi (d'où le nom de la structure). Cette longueur d'onde est contrôlée par le courant I_2 , par l'effet électro-optique qui modifie l'indice, avec une pente d'environ $-0,1\text{nm/mA}$. Cet effet existe aussi dans les lasers DFB, mais il est provoqué par le courant de commande, alors que dans la structure DBR, l'intensité et la longueur d'onde peuvent être contrôlées séparément, et l'accord est réalisé sur une plus grande plage ;

- Entre les deux, la "section de phase", où le courant I_3 réalise l'adaptation de phase entre la lumière réfléchi par le réseau et celle réfléchi par l'autre bord clivé en faisant varier l'indice de guidage ; il assure également le découplage entre les deux autres sections.

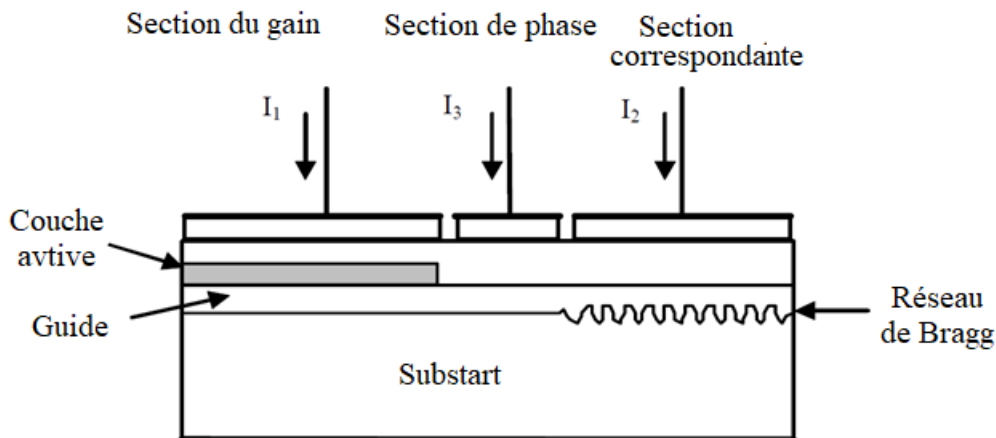


Figure I. 7 Diode laser DBR à adaptation de longueur d'onde [7]

I.2.3.4. Diode laser VCSEL

Les lasers à émission de surface à cavité verticale (Vertical cavity surface-emitting lasers VCSEL) sont des composants plus récents dont la structure est différente des autres diodes laser. La "cavité" est verticale, perpendiculaire au substrat, la lumière est émise verticalement par la surface du composant. Cette propriété en fait des composants économiques à produire et à tester en grande quantité sur une seule plaquette, ainsi qu'à intégrer dans des dispositifs monolithiques de communication ou de traitement du signal.

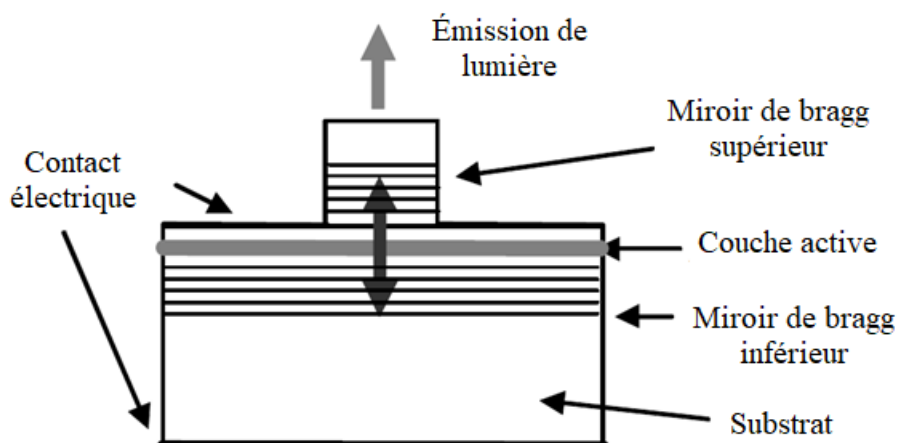


Figure I. 8 Diode laser VCSEL[7]

Les premiers VCSEL (en GaAlAs/GaAs) ont été développés à $0,85\ \mu\text{m}$ avec de très bonnes performances commerciales. En raison de leur faible coût et de leur facilité d'intégration, ils ont rapidement trouvé plusieurs applications, même sur des fibres multimodes. Les diodes VCSEL qui peuvent être directement modulées à $10\ \text{Gbit/s}$ sont apparues.

I.2.4. Modulateurs optiques :

Les transmetteurs optiques sont conçus pour émettre un signal optique codé en données et ont donc besoin d'un modulateur qui transfère un flux de bits électriques dans le domaine optique. Dans le cas des systèmes à détection directe, ce modulateur génère un train d'impulsions optiques (au format RZ ou NRZ) représentant une séquence codée de bits 0 et 1. Deux techniques, connues sous le nom de (a) modulation directe et (b) modulation externe, peuvent être utilisées pour générer un tel train de bits optique.[6]

I.2.4.1. Modulation directe : [3]

Le courant de commande du laser peut être modulé par un signal de message, comme le montre la figure I.9. Par exemple, lorsque le signal de message est un bit "0" (bit "1"), le laser est éteint (allumé) et, par conséquent, l'information du domaine électrique est codée dans le domaine optique. Les lasers à modulation directe (DML) présentent quelques inconvénients majeurs.

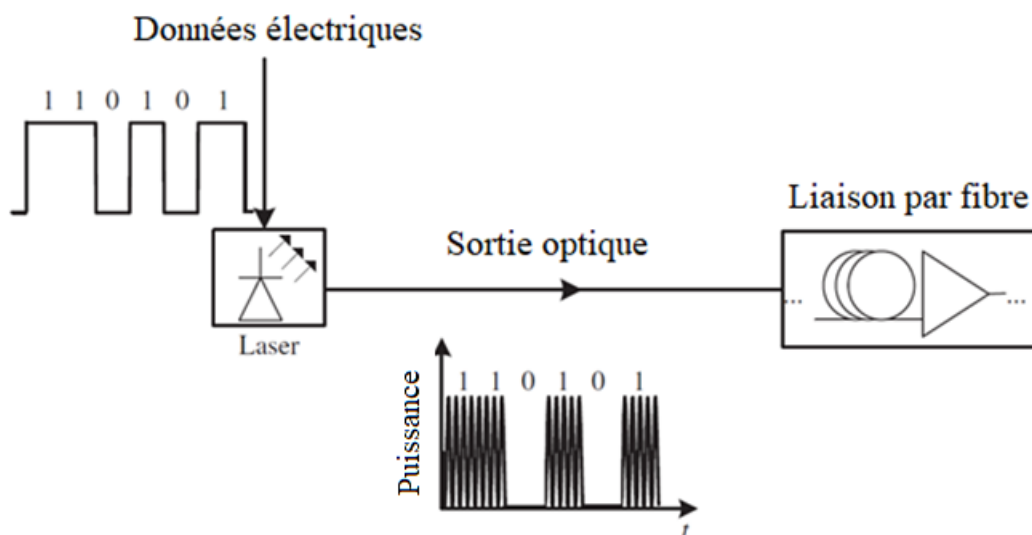


Figure I. 9 Modulation directe d'un laser

Les lasers à modulation directe sont généralement utilisés pour les systèmes de transmission fonctionnant à des débits binaires faibles (≤ 10 Gb/s) et pour les applications à courte distance (< 100 km). La distorsion des impulsions et le chirp en fréquence empêchent l'utilisation des lasers à modulation directe pour les applications à haut débit binaire.

I.2.4.2. Modulation externe[8]

La Figure I.10 présente le schéma d'un émetteur utilisant des modulateurs externes. Les modulateurs externes les plus couramment utilisés sont : (i) le modulateur de phase, (ii) le modulateur à interféromètre Mach-Zehnder (MZ), et (iii) le modulateur à électroabsorption (EAM).

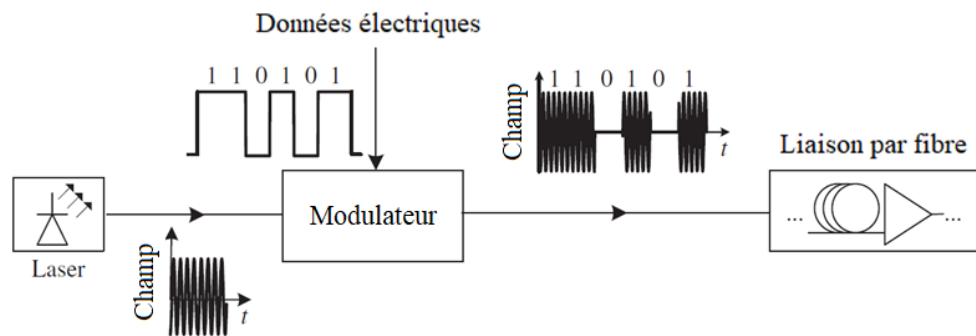


Figure I. 10 Un émetteur utilisant un modulateur externe

I.2.4.3. Modulateur de phase :[8]

La modulation de phase d'une porteuse optique peut être réalisée de plusieurs manières. Lorsqu'un champ électrique est appliqué à un cristal électro-optique, l'indice de réfraction du cristal change et, par conséquent, la phase (\propto indice de réfraction) d'une porteuse optique se propageant dans le cristal change également. Le changement d'indice de réfraction est directement proportionnel à l'intensité du champ électrique appliqué [9],[10]. Cet effet est connu sous le nom d'effet Pockels ou effet électro-optique linéaire.

I.2.4.4. Modulateur Mach-Zehnder (MZM) :[7]

L'interféromètre de Mach-Zehnder (figure I.11) dans lequel les deux électrodes, placées sur les deux bras, commandent un déphasage ϕ qui se traduit par une modulation de l'intensité de la sortie lumineuse par $\cos^2\phi$. Il est principalement utilisé dans les dispositifs de modulation externe tout ou rien, commandés par une tension V_0 donnant $\phi = \pi/2$, utilisés à 10 et à 40 Gbit/s (en dessous, une modulation laser interne est possible et beaucoup plus économique).

C'est un composant très efficace mais délicat à réaliser, car il faut assurer l'adaptation d'impédance sur une large bande, l'adaptation de phase entre les signaux micro-ondes et optiques (c'est pourquoi la disposition coplanaire des électrodes est également utilisée) et l'amplification du signal électrique, dont la tension crête à crête est d'environ 5V.

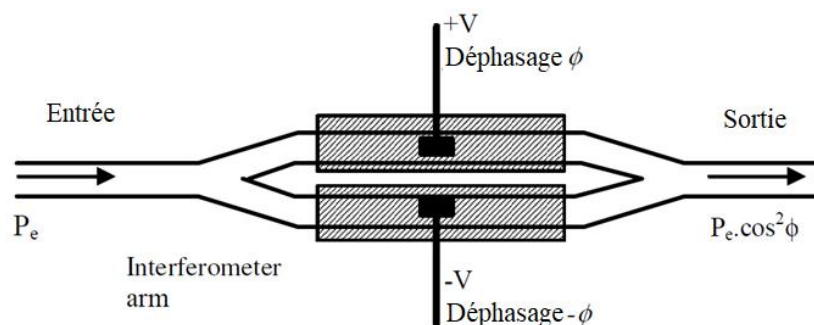


Figure I. 11 Interféromètre Mach-Zehnder

Une utilisation plus récente de ces modulateurs est la modulation duobinaire ou bipolaire, dans laquelle le 0 est codé par 0 et le 1 est codé alternativement par +1 et -1, ce qui signifie inversion de phase en optique. Dans le modulateur interférométrique de Mach-Zehnder, si l'on applique une tension $2V_0$ double de celle fournissant une puissance nulle, alors $\Phi = \pi$, $\cos \phi = -1$ ce qui donne

une puissance maximale (la démodulation ne change pas) mais une phase inversée sur la lumière. Ce procédé est plus résistant à la dispersion chromatique. Le même composant, mais avec un signal de commande différent, peut réaliser une modulation par déplacement de phase binaire avec 2 états (0 et π) et une modulation par déplacement de phase différentielle (DPSK) qui sont plus faciles à démoduler.

I.2.4.5. Modulateur à électro-absorption (EAM) :[7]

L'électro-absorption implique une absorption complexe par un phénomène d'exciton, c'est-à-dire la création d'une paire électron-trou où l'électron est en orbite autour du trou. Cette absorption est très sélective et s'observe par un pic dans la courbe d'absorption.

Elle est généralement observée à très basse température, mais peut être obtenue à température ambiante dans des dispositifs à puits quantiques. Les dispositifs réalisés utilisent des structures à puits quantiques multiples. Dans ces structures, l'application d'un champ électrique perpendiculaire aux couches déplace le pic de résonance de l'absorption excitonique, tout en restant très sélective, en raison de la quantification imposée par la structure. En revanche, un champ électrique parallèle élargit ce pic en utilisant l'effet Stark, comme dans les matériaux massifs.

Cela permet de contrôler le modulateur avec de faibles tensions (environ un volt) et d'obtenir des fréquences de modulation très élevées : de 20 à 40 GHz en fonction des tensions de commande, soit beaucoup plus qu'avec la modulation par diode laser interne. Ces modulateurs sont donc utilisés pour atteindre des débits très élevés (10 à 40 Gbit/s) en transmission numérique, avec des profondeurs de modulation de 10 à 20 dB. Cependant, ils peuvent être utilisés en modulation analogique, pour générer des solitons ou pour le transport par fibre optique micro-ondes, en transposant la porteuse de modulation de la fréquence radio à la fréquence optique. Ils sont légèrement moins efficaces et plus limités en longueur d'onde que les modulateurs Mach-Zehnder, mais ils sont plus faciles à intégrer aux diodes laser.

I.2.5. Circuit de commande :

L'objectif des circuits de commande est de fournir une alimentation électrique à la source optique et de moduler la sortie de lumière en fonction du signal à transmettre. Les circuits de commande sont relativement simples pour les émetteurs à LED mais deviennent de plus en plus compliqués pour les émetteurs optiques à haut débit utilisant des lasers à semi-conducteurs comme source optique. Dans le cas de la modulation directe, les lasers à semi-conducteurs sont polarisés au voisinage du seuil, puis modulés par un signal électrique dépendant du temps. Dans ce cas, le circuit de commande est conçu pour fournir un courant de polarisation constant ainsi qu'un signal électrique modulé. En outre, une boucle d'asservissement est souvent utilisée pour maintenir constante la puissance optique moyenne.

La figure I.12 montre un circuit de commande simple qui contrôle la puissance optique moyenne par un mécanisme de rétroaction. Une photodiode surveille la sortie du laser et génère le signal de commande qui est utilisé pour ajuster le niveau de polarisation du laser.

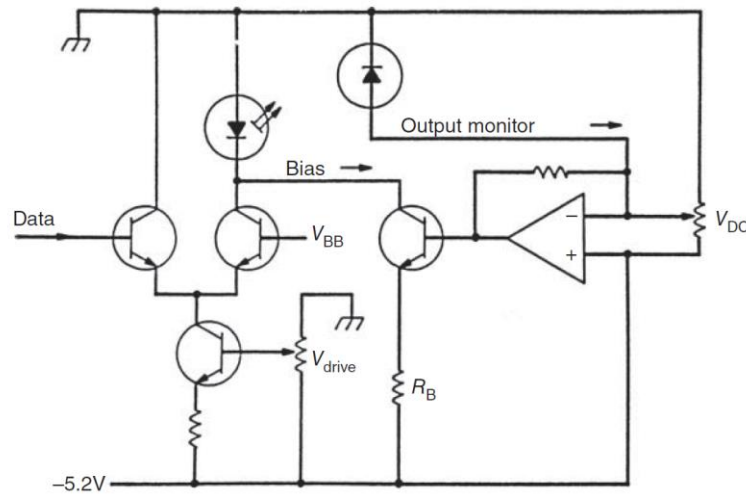


Figure I. 12 Circuit de commande d'un émetteur laser.[11]

I.3. La fibre optique :

La disponibilité de fibres optiques à faible perte à raison de 0,2 dB/km près de la région spectrale de 1,55- μm , a entraîné une révolution dans le domaine de la technologie des ondes lumineuses et a marqué le début de l'ère des communications par fibre optique. Plusieurs ouvrages entièrement consacrés aux fibres optiques couvrent les nombreuses avancées réalisées dans leur conception et leur compréhension.[6]. Les fibres optiques présentent les avantages suivants :

- Bande passante : Typiquement, la bande passante est de l'ordre de la fréquence porteuse. Dans le cas des signaux optiques, la fréquence porteuse est de 200 THz et la bande passante de la fibre est de plusieurs THz,
- Atténuation : La perte d'une fibre optique en silice est d'environ 0,2 dB/km. En raison de Faible pertes, les signaux optiques peuvent se propager sur une plus longue distance sans nécessiter de répéteurs.
- Interférence électromagnétique : les fibres optiques ne sont pas affectées par les Interférences électromagnétiques. En effet, les fibres optiques sont des guides d'ondes purement diélectriques sans pièces métalliques.[8]

La structure la plus largement acceptée est le cylindre diélectrique solide unique de rayon a et d'indice de réfraction n_1 représenté sur la figure I.13. Ce cylindre est connu comme le cœur de la fibre. Le cœur est entouré d'une gaine diélectrique solide, dont l'indice de réfraction n_2 est inférieur à n_1 . Dans les fibres optiques standard, le matériau du cœur est un composé de verre de silice (SiO_2) très pur et est entouré d'une gaine de verre. Les tailles courantes du cœur sont d'environ 9 et 50 μm (micromètres). Le diamètre standard de la gaine est de 125 μm . En outre, la plupart des fibres sont encapsulées dans un revêtement tampon en plastique élastique et résistant à l'abrasion et une gaine de renforcement extérieure qui ont des diamètres de 250 μm et 900 μm , respectivement.

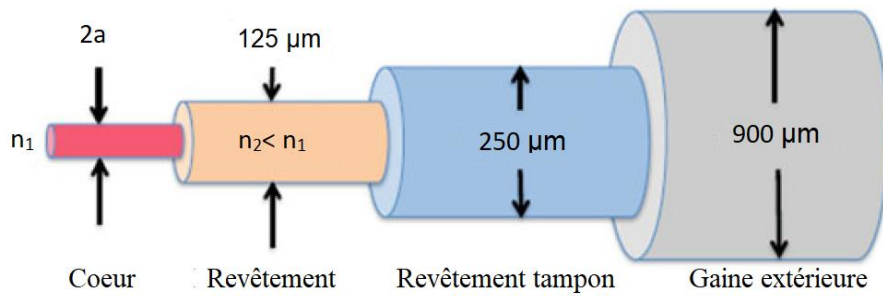


Figure I. 13 Structure d'une fibre optique

Les variations de la composition du matériau du cœur donnent lieu aux deux types de fibres les plus couramment utilisés, illustrés à la figure I.13. Dans la fibre à saut d'indice, l'indice de réfraction du cœur est uniforme partout et subit un changement brusque (ou saut) à la limite de la gaine. Dans le cas de la fibre à gradient d'indice, on fait varier l'indice de réfraction du cœur en fonction de la distance radiale au centre de la fibre.

Les fibres à saut d'indice et à gradient d'indice peuvent être divisées en classes monomodes et multimodes. Comme son nom l'indique, une fibre monomode ne supporte qu'un seul mode de propagation, alors que les fibres multimodes contiennent plusieurs centaines de modes. Quelques tailles typiques de fibres monomodes et multimodes sont données à la figure. I.14 pour donner une idée de l'échelle dimensionnelle.

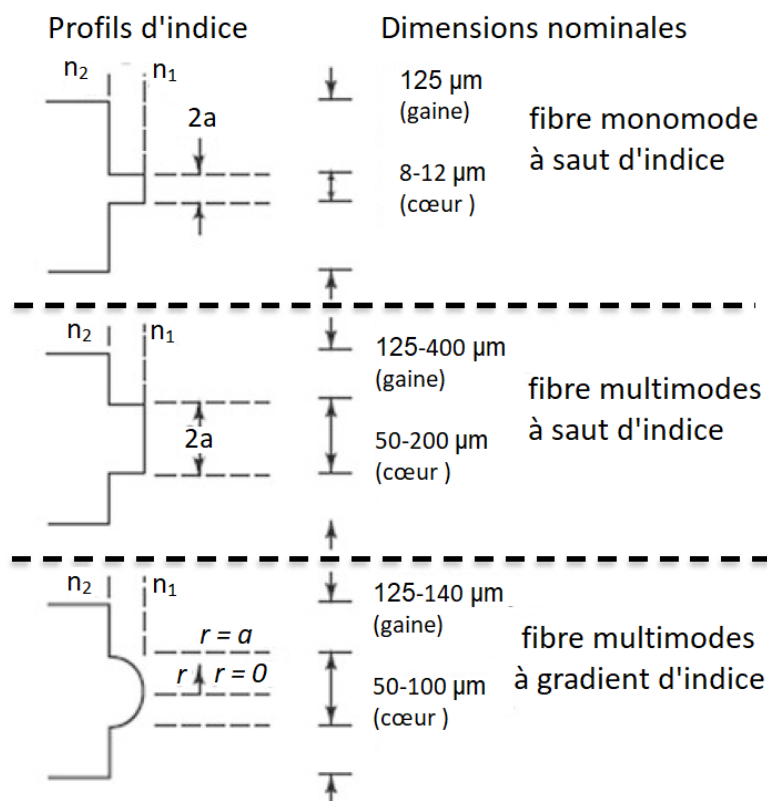


Figure I. 14 fibres optiques monomodes et multimodes à saut d'indice et à gradient d'indice

Dans notre cas on va utiliser la fibre monomode à saut d'indice.

I.3.1. Fibre à saut d'indice :

La propagation de la lumière dans un guide d'ondes optique tel que la fibre à saut d'indice illustrée à la figure I.13, obéit aux lois de réflexion et de réfraction, avec un paramètre Δ , appelé la différence d'indice

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (I.3)$$

Où n_1 l'indice de réfraction du cœur de rayon a , n_2 l'indice de la gaine légèrement inférieur (Δ de 1 à 3% pour les fibres multimodes et de 0,2 à 1,0% pour les fibres monomodes).

Le rayon méridien est représenté sur la figure I.15 pour une fibre à saut d'indice. Le rayon lumineux pénètre dans le cœur de la fibre à partir d'un milieu d'indice de réfraction n sous un angle θ_0 par rapport à l'axe de la fibre et frappe l'interface cœur-gaine sous un angle normal ϕ . S'il frappe cette interface avec un angle tel qu'il est totalement réfléchi intérieurement, alors le rayon méridien suit un chemin en zigzag le long du cœur de la fibre en passant par l'axe du guide après chaque réflexion.

D'après la loi de Snell, l'angle minimum ou critique ϕ_c qui supporte la réflexion interne totale pour le rayon méridien est donné par

$$\sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (I.4)$$

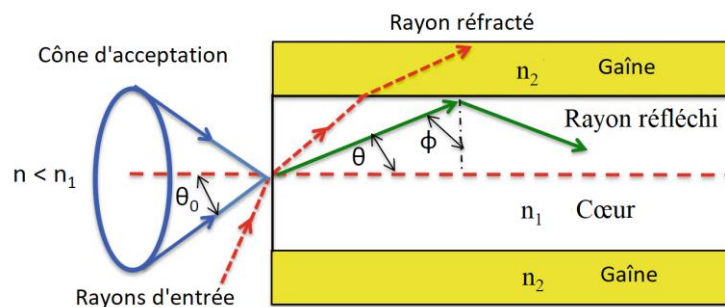


Figure I. 15 mécanisme de propagation dans un guide d'onde optique à saut d'indice

Les rayons à des angles inférieurs à ϕ_c se réfractent hors du noyau et seront perdus dans la gaine. En appliquant la loi de Snell, la condition de l'équation (I.4) peut être reliée à l'angle d'entrée maximum $\theta_{0,max}$, qui est appelé angle d'acceptation θ_A , par la relation suivante

$$n \sin \theta_{0,max} = n \sin \theta_A = n_1 \sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (I.5)$$

Où $\theta_c = \pi/2 - \phi_c$. L'équation (I.5) définit également l'ouverture numérique (ON) d'une fibre à saut d'indice pour les rayons méridiens :

$$ON = n \sin \theta_A = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (I.6)$$

I.3.2. Fibres monomodes :

Le guidage monomode est activé dans les longueurs d'onde supérieures à un seuil, appelé longueur d'onde de coupure. Dans l'industrie, deux définitions de la longueur d'onde de coupure sont couramment utilisées. L'une est la longueur d'onde de coupure de la fibre, souvent désignée par c , et l'autre est la longueur d'onde de coupure du câble, souvent désignée par cc . Dans les deux cas, la longueur d'onde de coupure est définie comme la longueur d'onde minimale à laquelle tout mode autre que le mode fondamental est atténué de plus de 19,3 dB par le support de transmission désigné.

Par conséquent, le terme "monomode" signifie que pour chaque longueur d'onde (supérieure à λ_c) un seul mode se propage, et ne signifie pas que la fibre ne guide qu'une seule longueur d'onde : au contraire, les fibres monomodes sont très bien adaptées au multiplexage par répartition en longueur d'onde. Dans ce cas, les différentes longueurs d'onde se superposent sans interférer, du moins dans la mesure où les effets non linéaires sont insignifiants.

- **Fibres optiques standard pour la transmission**

La fibre monomode standard (SSMF) est la fibre la plus souvent utilisée et souvent appelée simplement fibre monomode (SMF). La SSMF est généralement composée d'un cœur en SiO_2 dopé au GeO_2 et d'une gaine en SiO_2 pur. Les caractéristiques optiques et mécaniques des SSMF sont normalisées par les recommandations UIT-T G.652.D[12]. Cette fibre, la plus couramment déployée dans les systèmes de communication optique, présente une structure simple à indice échelonné avec un diamètre de cœur de 9- μm et un diamètre de gaine de 125- μm , avec une longueur d'onde à dispersion nulle autour de $\lambda_0=1310\text{nm}$. La valeur de dispersion chromatique typique à 1550nm est d'environ 17 ps/nm-km. Le paramètre d'atténuation pour la fibre G.652 est typiquement de 0,5dB/km à 1310nm et 0,2dB/km à 1550nm. Ils peuvent généralement être utilisés pour la transmission sur une large gamme de longueurs d'onde allant de 1270 à 1625 nm.

Pour réduire la dispersion chromatique tout en maintenant une diaphonie non linéaire raisonnablement faible dans les systèmes WDM, des fibres à dispersion décalée non nulle (NZDSF) ont été développées. La fibre optique monomode G.655 (NZDSF) dont la valeur absolue du coefficient de dispersion chromatique est supérieure à une certaine valeur non nulle sur toute la gamme de longueurs d'onde de 1530 nm à 1565 nm. Cette dispersion réduit la croissance des effets non linéaires qui sont particulièrement néfastes dans les systèmes DWDM. (G.652.D et G.652.E) ces catégories limitent le coefficient de dispersion chromatique par une paire de courbes limites en fonction de la longueur d'onde pour la gamme de 1460 nm à 1625 nm.

G.652.D		G.655.D	
λ (nm)	Atténuation max (dB/km)	λ (nm)	Atténuation max (dB/km)
1310	≤ 0.35	1310	
1550	≤ 0.20	1550	≤ 0.19
1625	≤ 0.23	1625	≤ 0.21
PMD max (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)		PMD max (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)	
≤ 0.1		≤ 0.1	
λ (nm)	Coefficient de dispersion chromatique (ps/nm-km)	λ (nm)	Coefficient de dispersion chromatique (ps/nm-km)
1550	≤ 18	1550	4
1625	≤ 22	1625	10

Tableau I. 1 Caractéristiques des fibres G652.D SMF-28e+ et G.655D LEAF [13], [14]

I.3.3. Dispersion dans les fibres monomodes :

La dispersion du signal est une conséquence de facteurs tels que la dispersion intramodale (dispersion chromatique), la dispersion du mode de polarisation (PMD) et les effets de dispersion d'ordre supérieur. Ces distorsions peuvent être expliquées en examinant le comportement des vitesses de groupe des modes guidés (GVD), où la vitesse de groupe est la vitesse à laquelle l'énergie dans un mode particulier se déplace le long de la fibre.

I.3.3.1. Group-Velocity Dispersion (GVD) :[6]

Considérons une impulsion optique lancée dans une fibre monomode de longueur L . Une composante spectrale spécifique à la fréquence ω arriverait à l'extrémité de sortie de la fibre après un délai $T = L/v_g$, où la vitesse de groupe v_g est définie comme

$$v_g = (d\beta/d\omega)^{-1} \quad (I.7)$$

En utilisant $\beta(\omega) = \bar{n}k_0 = \bar{n}(\omega)\omega/c$ dans l'éq. (I.7), on peut montrer que $v_g = c/\bar{n}_g$ où \bar{n}_g est l'indice de groupe donné par

$$\bar{n}_g = \bar{n} + \omega \left(\frac{d\bar{n}}{d\omega} \right) \quad (I.8)$$

La dépendance en fréquence de la vitesse de groupe conduit à un élargissement de l'impulsion car les différentes composantes spectrales d'une impulsion n'arrivent pas simultanément à l'extrémité de sortie de la fibre. Si $\Delta\omega$ est la largeur spectrale de l'impulsion, l'étendue de l'élargissement de l'impulsion pour une fibre de longueur L est régie par

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta\omega = \frac{L d^2\beta}{d\omega^2} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega \quad (I.9)$$

Où Éq. (I.7) a été utilisé. Le paramètre $\beta_2 = d^2\beta/d\omega^2$ est appelé paramètre GVD. Il détermine de combien une impulsion optique s'élargirait lors de la propagation à l'intérieur d'une fibre monomode.

I.3.3.2. La dispersion chromatique

Dans certains systèmes de communication optique, l'étalement de fréquence $\Delta\omega$ est fixé par la gamme de longueurs d'onde $\Delta\lambda$ émises par une source optique. En utilisant $\omega = 2\pi c/\lambda$ et $\Delta\omega = (-2\pi c/\lambda^2)\Delta\lambda$, pour une longueur de fibre L , Eq. (I.9) peut être écrite comme

$$\Delta T_c = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta\lambda = D_c L \Delta\lambda \quad (I.10)$$

Avec :

- $\Delta\lambda$ la largeur spectrale de la source ; l'élargissement des impulsions lui est proportionnel.
- D_c coefficient de dispersion chromatique, qui dépend des paramètres de la fibre et de la longueur d'onde. On peut le calculer par : [unités : $ps/(km.nm)$]

$$D_c = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 = D_M + D_W \quad (I.11)$$

L'effet de la dispersion sur le débit binaire B peut être estimé en utilisant le critère $B\Delta T < 1$. En utilisant ΔT_c de l'équation (I.10) cette condition devient

$$\beta L |D_c| \Delta\lambda < 1 \quad (I.12)$$

La dispersion chromatique est la somme de la dispersion par le matériau et la dispersion du guide d'ondes ;

- La dispersion matériau est due à la dépendance de la fréquence de l'indice de réfraction du verre. Tout comme un prisme diffuse la lumière blanche en un arc-en-ciel de couleurs, les différentes composantes de fréquence se déplacent à des vitesses différentes dans le verre, ce qui entraîne la diffusion des impulsions.
- La dispersion du guide d'ondes entraîne l'étalement des impulsions car seule une partie de la puissance optique qui se propage le long d'une fibre est confinée au cœur. Dans un même mode de propagation, la distribution de la section transversale de la lumière dans la fibre optique varie en fonction de la longueur d'onde. Les longueurs d'onde plus courtes sont beaucoup plus confinées au cœur de la fibre, tandis qu'une plus grande partie de la puissance optique aux longueurs d'onde plus longues se propage dans la gaine, comme le montre la figure. I.16.

I.3.3.3. Dispersion modale de polarisation (PMD) [15], [16]

La PMD résulte du fait que l'énergie du signal lumineux à une longueur d'onde donnée dans une fibre monomode occupe en fait deux états ou modes de polarisation orthogonaux. Au début de la fibre, les deux états de polarisation sont alignés. Cependant, étant donné que la fibre n'est pas parfaitement uniforme sur toute sa longueur, chaque mode de polarisation rencontrera un indice de réfraction légèrement différent. Par conséquent, chaque mode se déplacera à une vitesse légèrement différente. Une biréfringence variable sur sa longueur amènera chaque mode de polarisation à se déplacer à une vitesse légèrement différente. La différence de temps de propagation $\Delta\tau_{PMD}$ (differential group delay (DGD)) qui en résulte entre les deux modes de polarisation orthogonaux se traduira par un étalement des impulsions :

$$\Delta\tau_{PMD} = D_{PMD} \sqrt{L} \quad (I.13)$$

Où D_{PMD} , qui est mesuré en $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, est le paramètre moyen de PMD.

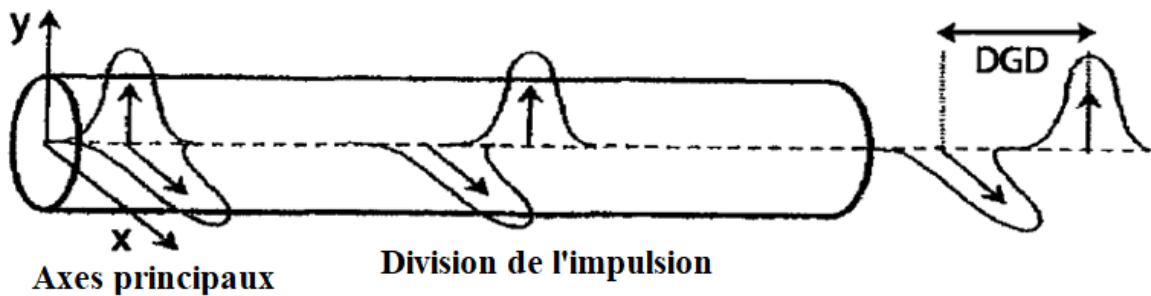


Figure I. 16 Propagation d'une impulsion optique dans une fibre à biréfringence constante [16]

L'impulsion se divise en ses composants polarisés orthogonalement qui se séparent les uns des autres en raison de la DGD induite par la biréfringence.

I.3.4. Compensation de la dispersion chromatique : [17], [18]

La dispersion chromatique peut être compensée de manière quasi-statique dans le domaine optique. Les techniques les plus importantes sont basées sur (Agrawal, 1992, 1995) :

I.3.4.1. Fibres à compensation de dispersion : (DCF)

L'une des premières techniques de compensation de la dispersion consistait à déployer des sections de fibre spécialement conçues avec une dispersion chromatique négative. La dispersion totale peut être donnée comme suit :

$$D_T = D_{SMF}D_{SMF} + D_{DCF}D_{DCF} \quad (I.14)$$

La longueur du DCF (L_{DCF}) doit être choisie de telle sorte que $D_T = 0$ pour une compensation complète de la dispersion. Cependant, une compensation complète de la dispersion ne se produit jamais à cause d'effets non linéaires.

Généralement, des modules de compensation de dispersion basés sur le DCF sont situés sur les sites des amplificateurs. Cela répond à plusieurs objectifs. Premièrement, les sites d'amplificateurs offrent un accès relativement facile à la fibre, sans nécessiter de creuser ou de défaire le câble. Deuxièmement, la fibre DCF a une perte élevée (généralement au moins le double de celle de la fibre SMF standard), de sorte qu'un étage de gain est nécessaire avant le module DCF pour éviter des niveaux de signal trop bas.

I.3.4.2. Les réseaux de Bragg en fibre chirpé (CFBG) :

Les réseaux de Bragg en fibre sont devenus des composants majeurs pour la compensation de la dispersion en raison de leur faible perte, de leur faible encombrement et de leur faible non-

linéarité optique. Les réseaux de Bragg sont des sections de fibre monomode dans lesquelles l'indice de réfraction du cœur est modulé de façon périodique, en fonction de la coordonnée spatiale sur la longueur de la fibre. Lorsque la périodicité spatiale de la modulation correspond à ce que l'on appelle une condition de Bragg par rapport à la longueur d'onde de la lumière qui se propage à travers le réseau, la structure périodique agit comme un miroir, réfléchissant le rayonnement optique qui se déplace à travers le cœur de la fibre. Un circulateur optique est traditionnellement utilisé pour séparer le faisceau de sortie réfléchi du faisceau d'entrée. Lorsque l'on fait varier la périodicité du réseau sur sa longueur, on obtient un réseau chirpé qui peut être utilisé pour compenser la dispersion chromatique. Le chirp est compris comme le taux de changement de la fréquence spatiale en fonction de la position le long du réseau.

La dispersion du FBG en ps/(nm km) est donnée par Agrawal :

$$D_g = 2 \frac{n}{c \Delta \lambda_{chirp}} \quad (I.15)$$

I.3.5. L'Atténuation :[6], [19]

Le degré d'atténuation joue un rôle majeur dans la détermination de la distance maximale de transmission entre un émetteur et un récepteur ou un amplificateur en ligne. Les mécanismes d'atténuation de base dans une fibre sont l'absorption, la diffusion et les pertes radiatives de l'énergie optique. L'absorption est liée au matériau de la fibre, tandis que la diffusion est associée à la fois au matériau de la fibre et aux imperfections structurales du guide d'ondes optique. L'atténuation due aux effets radiatifs provient des perturbations (à la fois microscopiques et macroscopiques) de la géométrie de la fibre.

Lorsque la lumière se déplace le long d'une fibre, sa puissance diminue de manière exponentielle avec la distance. Si $P(0)$ est la puissance optique dans une fibre à l'origine (à $L = 0$), alors la puissance $P(L)$ à une distance L plus loin dans la fibre est de

$$P(L) = P(0) e^{-\alpha L} \quad (I.16)$$

Où

$$\alpha (dB/km) = -\frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P(0)}{P(L)} \right) \quad (I.17)$$

où α est le coefficient d'atténuation. Ce paramètre est généralement appelé "perte de fibre" ou "atténuation de la fibre". Il dépend de plusieurs variables et il est fonction de la longueur d'onde.

I.3.6. Effets non linéaires dans les fibres optiques : [1], [6]–[8], [11], [15]

I.3.6.1. L'effet Kerr :

Tous les matériaux optiques transparents sont sujets à la variation de l'indice de réfraction avec l'intensité des ondes optiques, l'effet Kerr optique. Ce phénomène physique est dû aux réponses anharmoniques des électrons des champs optiques, qui entraînent une modification de la susceptibilité du matériau. L'indice de réfraction modifié $n_{1,2}^k$ des régions du cœur et de la gaine du matériau à base de silice peut être écrit comme suit :

$$n_{1,2}^k = n_{1,2} + \bar{n}_2 \frac{P}{A_{eff}} \quad (\text{I.18})$$

Où \bar{n}_2 est le coefficient de Kerr (coefficient d'indice non linéaire du milieu guidé), la valeur typique moyenne de \bar{n}_2 est d'environ $2,6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$

P est la puissance optique moyenne de l'impulsion

A_{eff} est la surface effective du mode guidé

L'effet Kerr conduit à plusieurs phénomènes :

- **Auto-modulation de phase (*Self-Phase Modulation SPM*) :**

La modulation de phase non linéaire d'une impulsion optique causée par sa propre intensité est appelée SPM. La SPM est due à des changements temporels de l'indice de réfraction et se manifeste par un chirp dans le signal optique. Le chirp désigne la variation de la fréquence d'une impulsion dans le temps. Le chirp entraîne une modification de la largeur de l'impulsion et, dans la plupart des cas, provoque une dispersion. La SPM est la dégradation non linéaire la plus grave pour les systèmes WDM avec des espacements de longueur d'onde relativement importants, par exemple 100 GHz.

- **Modulation de phase croisée (*Cross-Phase Modulation XPM*) :**

La XPM se produit par un mélange non linéaire entre les différentes porteuses d'un système multiplexé en longueur d'onde ; cet effet limite le nombre de porteuses utilisables simultanément mais a permis des expérimentations de conversion de longueur d'onde (transfert d'un signal d'une longueur d'onde à une autre en fait) . La modulation de phase croisée est négligeable dans les systèmes où les longueurs d'onde sont très espacées, par exemple 100 GHz, mais elle devient importante lorsque les débits binaires dépassent 10 Gb/s et que les longueurs d'onde sont espacées de 50 ou 25 GHz.

- **Mélange à quatre ondes (*four wave mixing FWM*) :**

Dans un système WDM utilisant des fréquences porteuses f_1, f_2, \dots, f_w , la dépendance de l'indice de réfraction par rapport à l'intensité induit non seulement des déphasages mais aussi de nouvelles composantes de fréquence. Ces composantes apparaissent aux fréquences $f_i \pm f_j \pm f_k$, c'est-à-dire que trois fréquences quelconques se combinent pour produire une quatrième fréquence, d'où son nom. Le FWM peut avoir un impact important sur les systèmes WDM si les fréquences générées coïncident avec les fréquences du système ou en sont proches. Malheureusement, les effets de la FWM sont pires lorsque la dispersion est nulle. Par conséquent, les systèmes pratiques ont de petites quantités de dispersion pour atténuer les effets de la FWM.

- **Autofocalisant :**

Dans une fibre monomode, l'indice va augmenter proportionnellement à l'intensité lumineuse locale, qui n'est pas constante (elle est approximativement gaussienne). Il se créera alors un gradient d'indice qui, si l'intensité est élevée, focalisera l'onde qui sera « autoguidée » avec un très petit diamètre de mode (ce phénomène peut même exister en milieu homogène). Une solution

stationnaire peut être atteinte, appelée le soliton spatial (l'effet non linéaire compense exactement la diffraction) par analogie avec le soliton temporel où l'effet non linéaire compense exactement la dispersion. L'autofocalisation constitue une limite à la très forte transmission de puissance dans une fibre optique monomode.

I.3.6.2. Effets de diffusion stimulés Brillouin et Raman :[11],[15]

- La diffusion Raman stimulée (SRS) est une interaction entre les ondes lumineuses et les modes vibratoires des molécules de silice. Si un photon d'énergie $h\nu_1$ est incident sur une molécule ayant une fréquence vibratoire ν_m , la molécule peut absorber une partie de l'énergie du photon. Dans cette interaction, le photon est diffusé, atteignant ainsi une fréquence plus basse ν_2 et une énergie correspondante plus basse $h\nu_2$. Le photon modifié est appelé photon de Stokes. L'onde de signal optique injectée dans un foyer étant la source des photons en interaction, elle est souvent appelée onde de pompage car elle alimente l'onde générée.

Ce processus génère une lumière diffusée à une longueur d'onde supérieure à celle de la lumière incidente. Si un autre signal est présent à cette longueur d'onde plus longue, la lumière SRS l'amplifie et le signal de la longueur d'onde de pompage perd de sa puissance ; la Fig. I.17 illustre cet effet. Par conséquent, le SRS peut sérieusement limiter les performances d'un système de communication optique multicanal en transférant l'énergie des canaux à courte longueur d'onde vers les canaux voisins à plus grande longueur d'onde. Il s'agit d'un effet à large bande qui peut se produire dans les deux sens.

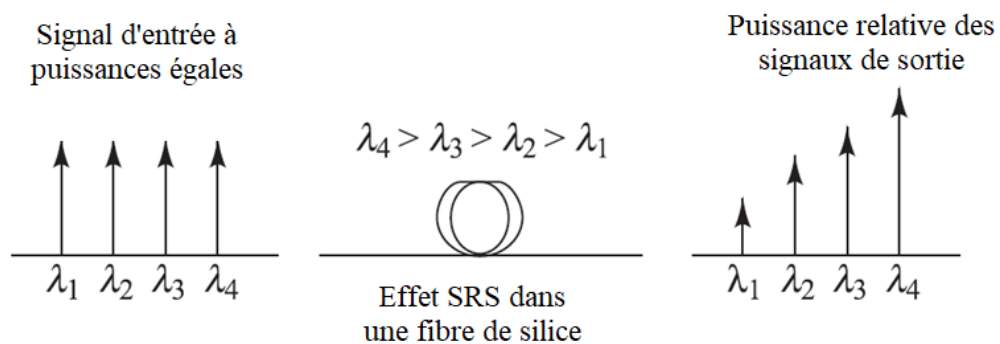


Figure I. 17 Effet SRS dans une fibre de silice.[15]

- La diffusion Brillouin stimulée survient lorsqu'un signal optique fort génère une onde acoustique qui produit des variations de l'indice de réfraction. Ces variations d'indice provoquent la diffusion des ondes lumineuses vers l'arrière en direction de l'émetteur. Cette lumière rétrodiffusée subit un gain des signaux se propageant vers l'avant, ce qui conduit à l'épuisement de la puissance du signal.

I.4. Récepteurs optiques :

Un récepteur optique reconvertit le signal optique reçu à l'extrémité de sortie de la fibre optique en signal électrique d'origine. La figure I.18 présente le schéma fonctionnel d'un récepteur optique. Il se compose d'un coupleur, d'un photodétecteur et d'un démodulateur. Le coupleur

concentre le signal optique reçu sur le photodétecteur. Les photodiodes à semi-conducteurs sont utilisées comme photodétecteurs pour les raisons suivantes de leur compatibilité avec l'ensemble du système ; La plupart des systèmes à ondes lumineuses utilisent un schéma appelé "modulation d'intensité avec détection directe". Dans ce cas, la démodulation est effectuée par un circuit de décision qui identifie les bits comme 1 ou 0, en fonction de l'amplitude du signal électrique. La précision du circuit de décision dépend du SNR du signal électrique généré au niveau du photodétecteur.

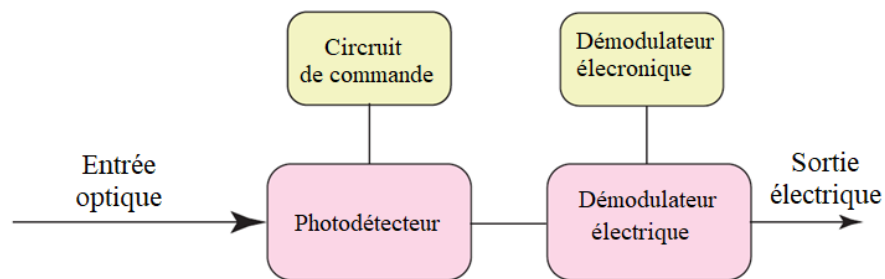


Figure I. 18 . Composants d'un récepteur optique

I.4.1. Photodétecteurs : [7],[19]

Les deux principaux dispositifs de photodétection utilisés dans les communications par fibre optique sont les photodiodes PIN à base de semi-conducteurs et les photodiodes à avalanche APD. Les principaux avantages de ces dispositifs sont leur compatibilité de taille avec les fibres optiques, leurs hautes sensibilités aux longueurs d'onde opérationnelles souhaitées et leurs temps de réponse rapides qui permettent un suivi précis du signal.

I.4.1.1. Photodiode PIN

Le photodétecteur à semi-conducteurs de base est la photodiode PIN, représentée schématiquement à la figure I.19.a. La structure du dispositif se compose de régions p et n séparées par une région intrinsèque (i) très légèrement dopée n. En fonctionnement normal, une tension de polarisation inverse suffisamment importante est appliquée aux bornes du dispositif par l'intermédiaire d'une résistance de charge R_L , de sorte que la région intrinsèque est totalement dépourvue de porteurs. En d'autres termes, les concentrations intrinsèques de porteurs n et p sont négligeables par rapport à la concentration d'impuretés dans cette région.

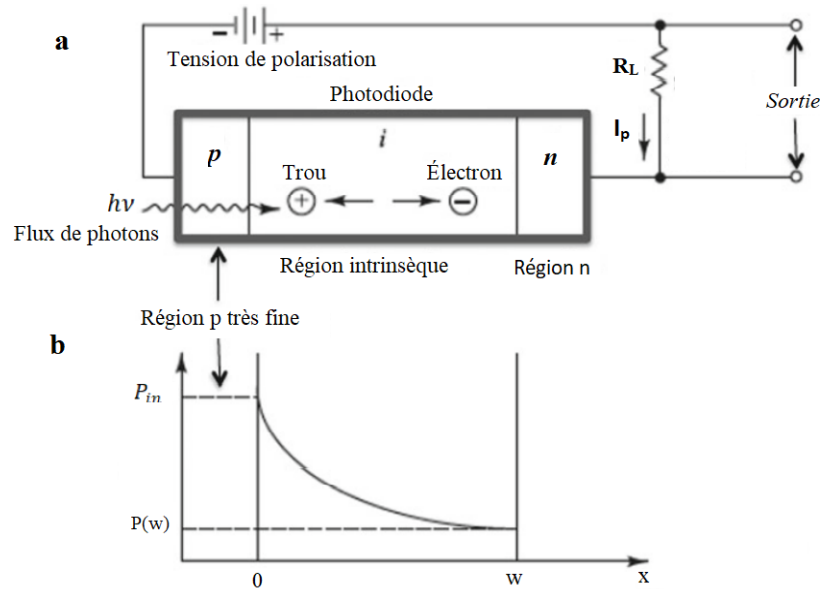


Figure I. 19 a Représentation d'un circuit de photodiode PIN avec une polarisation inverse appliquée. b Niveau de puissance en fonction de la profondeur de la région intrinsèque..[19]

Lorsqu'un flux de photons pénètre dans un semi-conducteur, les photons sont absorbés et convertis en porteurs de charge au fur et à mesure de leur progression dans le matériau. Supposons que P_{in} soit le niveau de puissance optique tombant sur le photodétecteur à $x = 0$ et que $P(x)$ soit le niveau de puissance à une distance x dans le matériau. Alors la variation incrémentale $dP(x)$ du niveau de puissance optique lorsque ce flux de photons traverse une distance incrémentale dx dans le semi-conducteur est donnée par $dP(x) = -\alpha_s(\lambda)P(x)dx$, où $\alpha_s(\lambda)$ est le coefficient d'absorption des photons à une longueur d'onde λ . L'intégration de cette relation donne le niveau de puissance à une distance x dans le matériau comme suit

$$P(x) = P_{in} \exp(-\alpha_s x) \tag{I.19}$$

La figure I.19.b donne un exemple du niveau de puissance en fonction de la profondeur de pénétration dans la région intrinsèque, qui a une largeur w . La largeur de la région p est généralement très faible, de sorte que peu de rayonnement y est absorbé. Le niveau de puissance optique incident décroît exponentiellement à l'intérieur du dispositif

La dépendance du coefficient d'absorption optique en fonction de la longueur d'onde est présentée à la figure I.20 pour plusieurs matériaux de photodiodes. Comme les courbes le montrent clairement, α_s dépend fortement de la longueur d'onde.

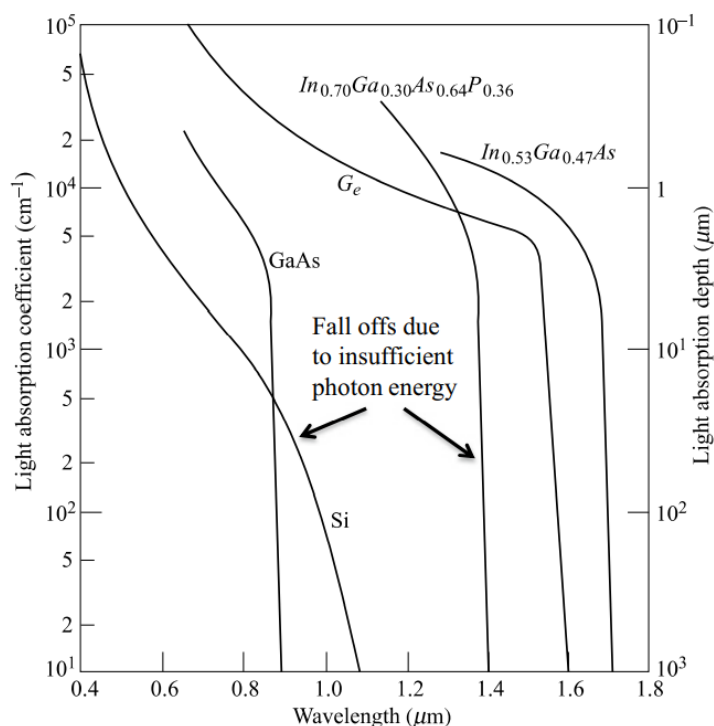


Figure I. 20 Coefficient d'absorption optique en fonction de la longueur d'onde de plusieurs matériaux photodétecteurs[19]

Ainsi, un matériau semi-conducteur particulier ne peut être utilisé que sur une plage de longueur d'onde limitée. La coupure supérieure de la longueur d'onde λ_c est déterminée par l'énergie de la bande interdite E_g du matériau. Si E_g est exprimé en unités d'électronvolts (eV), alors λ_c est donné en unités de micromètres (μm) par

$$\lambda_c(\mu m) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.2406}{E_g(eV)} \tag{I.20}$$

La longueur d'onde de coupure est d'environ 1,06 μm pour « Si », 1,6 μm pour « Ge » et 1,7 μm pour « InGaAs ». Pour des longueurs d'onde plus importantes, l'énergie des photons n'est pas suffisante pour exciter un électron de la bande de valence à la bande de conduction.

I.4.1.2. Photodiode à avalanche[7]

Le photocourant doit être amplifié car le signal reçu est souvent très faible. Comme le bruit du préamplificateur peut être prédominant, il peut être intéressant d'utiliser un composant à gain interne appelé photodiode à avalanche (APD).

Son principe est l'ionisation en chaîne par l'impact des porteurs sous l'effet d'un champ électrique très intense. L'effet d'avalanche, s'il n'est pas contrôlé, conduit au claquage de la jonction pour une tension inverse V_B . Chaque porteur primaire va produit m porteurs secondaires.

Ce champ électrique est obtenu avec une tension de polarisation inverse élevée, dans une jonction abrupte pn, généralement séparée de la zone d'absorption, épaisse et légèrement dopée ; c'est le principe de la structure $\pi p \pi n$ (figure I.21), majoritairement utilisée dans les APD en silicium (π correspond à p^-). On obtient alors des coefficients de multiplication M élevés : M est le nombre moyen de porteurs secondaires créés (c'est-à-dire la valeur moyenne de m).

Le photocourant devient alors :

$$i'_s = M.R_d.P \quad (\text{I.22.1})$$

Le courant d'obscurité est multiplié par un facteur légèrement inférieur à M . Il augmente simultanément avec la tension de polarisation et la température.

Grâce à la résistivité élevée de la zone π , le gain peut être contrôlé. Pour des raisons dues au matériau, les APD en germanium adoptent généralement une structure pn simple ; le gain est plus faible mais obtenu sous une tension plus basse. Dans ce cas, on utilise une loi du type suivant :

$$M = \frac{1}{1 - (V/V_b)^{m'}} \quad (\text{I.22.2})$$

dans laquelle m' a une valeur typique de 3 à 6.

Les coefficients d'ionisation des électrons, α_n , et des trous, α_p , qui sont la probabilité pour chaque porteur de créer un second porteur par ionisation, qui est égal à αdx dans une profondeur de matériau dx . Les porteurs ayant le facteur d'ionisation le plus élevé doivent être injectés (c'est le cas des électrons dans le silicium).

L'utilisation de photodiodes à avalanche diminue en raison du développement de préamplificateurs à fibres optiques dopées à l'erbium.

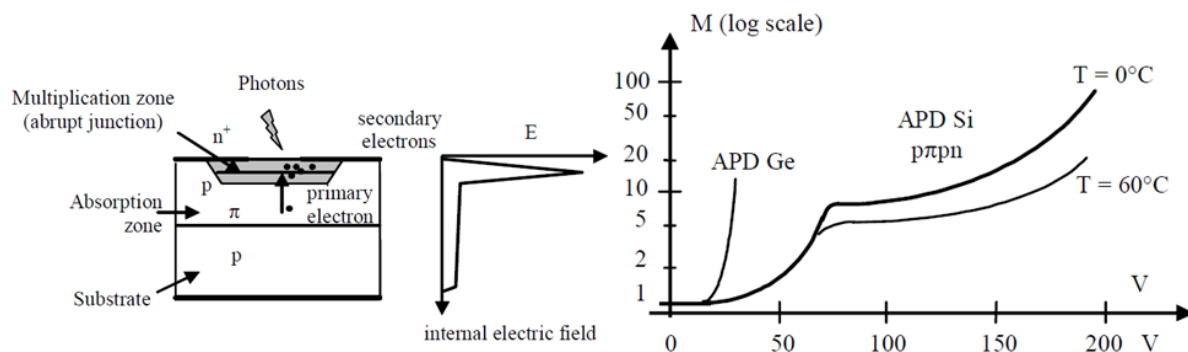


Figure I. 21 Photodiode à avalanche et courbe gain-tension. [7]

I.5. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre le fonctionnement d'une liaison optique point à point qui se compose de la partie émission, une partie pour le support de transmission qui est la fibre optique et la dernière partie sur les récepteurs optiques en détaillant chaque bloc de la chaîne de transmission avec leurs rôles et fonctionnements.

Dans le chapitre suivant, on va étudier les différents amplificateurs optiques : SOA, EDFA, Raman, et les amplificateurs hybrides, en parlant de leurs applications dans les systèmes optiques 5g.

Chapitre II

Etude des amplificateurs optiques

II.1. Introduction :

Jusqu'en 1990, la seule technique de gestion des pertes dont disposait un concepteur de système consistait à insérer un régénérateur optoélectronique (appelé répéteur) tous les 80 km environ. Un répéteur n'est rien d'autre qu'une paire récepteur-émetteur. Dans un tel dispositif, un signal optique entrant est d'abord converti dans le domaine électrique, puis régénéré à l'aide d'un émetteur optique. Cette technique est devenue impraticable pour les systèmes WDM car elle nécessite le démultiplexage des canaux individuels à chaque répéteur. Une meilleure solution au problème de perte de fibre est d'utiliser des amplificateurs optiques car ils peuvent amplifier tous les canaux WDM simultanément. Ces dispositifs fonctionnent entièrement dans le domaine optique pour augmenter les niveaux de puissance de plusieurs signaux d'ondes lumineuses sur des bandes spectrales de 30 nm et plus.

Dans ce chapitre nous allons étudier les trois types d'amplificateurs fondamentaux : les amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA), les amplificateurs à fibre dopée (DFA), les amplificateurs Raman. Et les amplificateurs optiques hybrides (HOA), qui désigne la combinaison de plus d'un amplificateur optique dans n'importe quel type de configuration.

II.2. Classifications des amplificateurs optiques :

Les trois principaux types d'amplificateurs optiques peuvent être classés en amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA), amplificateurs à fibre active ou à fibre dopée (DFA) et amplificateurs Raman. Tous les amplificateurs optiques augmentent le niveau de puissance de la lumière incidente par le biais d'une émission stimulée ou d'un processus de transfert de puissance optique. Dans les SOA et les DFA, le mécanisme permettant de créer l'inversion de population nécessaire à l'émission stimulée est le même que celui utilisé dans les diodes laser. Bien que la structure d'un tel amplificateur optique soit similaire à celle d'un laser, il ne possède pas le mécanisme de rétroaction optique nécessaire pour que l'effet laser se produise. Ainsi, un amplificateur optique peut augmenter le niveau des signaux entrants, mais il ne peut pas générer une sortie optique cohérente par lui-même.

Le fonctionnement de base d'un amplificateur optique générique est illustré à la figure. II.1. Ici, le dispositif absorbe l'énergie fournie par une source externe appelée la pompe. La pompe fournit de l'énergie aux électrons dans un milieu actif, ce qui les porte à des niveaux d'énergie plus élevés pour produire une inversion de population. Un signal sous forme de photon reçu déclenche la chute de ces électrons excités à des niveaux inférieurs par un processus d'émission stimulée. Étant donné qu'un photon déclencheur reçu à l'entrée stimule un effet de cascade dans lequel de nombreux électrons excités émettent des photons d'énergie égale lorsqu'ils tombent à l'état fondamental, le résultat est un signal optique amplifié.

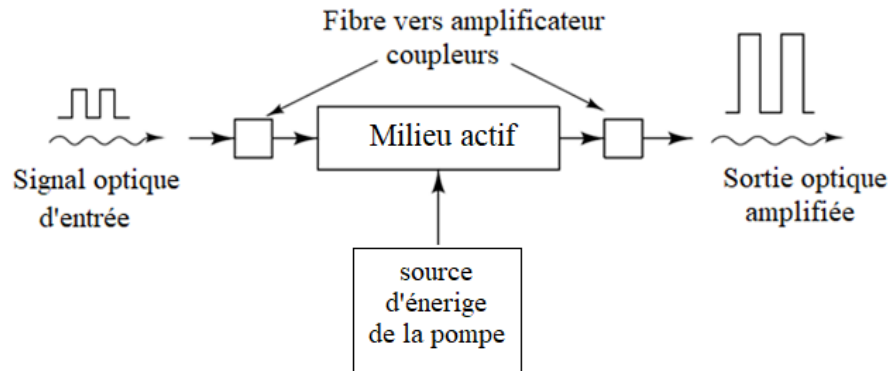


Figure II. 1. Fonctionnement de base d'un amplificateur optique générique [19]

Contrairement aux mécanismes d'amplification utilisés dans un SOA ou un DFA, dans l'amplification Raman, il y a un transfert de puissance optique d'une longueur d'onde de pompage à haute puissance (par exemple, 500 mW à 1480 nm) vers des signaux d'ondes lumineuses à des longueurs d'onde plus grandes (par exemple, un signal de -25 dBm autour de 1550 nm). Ce mécanisme d'amplification Raman se fait sans avoir recours à un processus d'inversion de population.

Les alliages de matériaux semi-conducteurs des groupes III et V (par exemple, phosphore, gallium, indium et arsenic) constituent le milieu actif des SOA. L'attrait des SOA réside dans le fait que ces dispositifs peuvent fonctionner aussi bien dans la bande O (autour de 1310 nm) que dans la bande C. Ils peuvent être intégrés facilement sur le même substrat que d'autres dispositifs et circuits optiques (p. ex. coupleurs, isolateurs optiques et circuits de réception) et, par rapport aux DFA, ils consomment moins d'énergie électrique, ont moins de composants et sont plus compacts. Les SOA ont une réponse de gain plus rapide, qui est de l'ordre de 1-100 ps. Cette réponse rapide présente à la fois des avantages et des limites. L'avantage est que les SOA peuvent être mis en œuvre lorsque des fonctions de commutation et de traitement du signal sont requises dans les réseaux optiques. La limite est que la réponse rapide de la porteuse fait que le gain à une longueur d'onde particulière fluctue avec le débit du signal pour des vitesses allant jusqu'à plusieurs Gb/s. Comme cette fluctuation affecte le gain global, le gain du signal à d'autres longueurs d'onde fluctue également. Ainsi, la réponse rapide du gain donne lieu à des effets de diaphonie lorsqu'un large spectre de longueurs d'onde doit être amplifié simultanément.

Dans les DFA, le milieu actif pour le fonctionnement dans les bandes S, C et L est créé en dopant légèrement un cœur de fibre en silice (dioxyde de silicium) ou en tellurite (oxyde de tellure) avec des éléments de terres rares tels que le thulium (Tm), l'erbium (Er) ou l'ytterbium (Yb). Les caractéristiques importantes des DFAs incluent la possibilité de pomper les dispositifs simultanément à plusieurs longueurs d'onde différentes, une faible perte de couplage au milieu de transmission de la fibre de taille compatible, et une très faible dépendance du gain à la polarisation de la lumière. En outre, les DFA sont très transparents au format du signal et au débit binaire, car ils présentent une dynamique de gain lente, avec des durées de vie des porteurs de l'ordre de 0,1 à 10 ms. Il en résulte que, contrairement aux SOA, les réponses de gain des DFA sont fondamentalement constantes pour les modulations de signal supérieures à quelques kilohertz. Par

conséquent, ils sont à l'abri des effets d'interférence (tels que la diaphonie et la distorsion d'intermodulation) entre différents canaux optiques lorsque les canaux de longueur d'onde se trouvent dans un large spectre (par exemple, dans une bande spectrale de 30 nm allant de 1530 à 1560 nm) sont injectés simultanément dans l'amplificateur.

Un amplificateur optique Raman est basé sur un effet non linéaire appelé diffusion Raman stimulée (SRS), qui se produit dans les fibres à des puissances optiques élevées. Alors qu'un DFA nécessite une fibre optique spécialement construite pour son fonctionnement, l'amplification Raman a lieu dans une fibre de transmission standard. Le mécanisme de gain Raman peut être réalisé par un amplificateur localisé (ou discret) ou un amplificateur distribué. Dans la configuration de l'amplificateur Raman localisé, une bobine d'environ 80 m de fibre à petit noyau et les lasers de pompage appropriés sont insérés dans le trajet de transmission comme une unité distincte. Pour l'application d'amplificateur Raman distribué, un ou plusieurs lasers de pompage Raman convertissent les 20 à 40 derniers kilomètres de la fibre de transmission en un préamplificateur. Étant donné que le gain Raman dans une gamme spectrale particulière est dérivé du transfert de puissance optique induit par le SRS depuis des longueurs d'onde de pompage plus courtes vers des longueurs d'onde de signal plus longues, ces amplificateurs peuvent être conçus pour être utilisés dans n'importe quelle bande de longueur d'onde.

Le tableau II.1 énumère quelques structures d'amplificateurs optiques possibles et leurs plages de fonctionnement.

Acronyme	Structure	Bande de fonctionnement
GC-SOA	Gain-clamped semiconductor optical amplifier	O- or C-band
PDFFA	Praseodymium-doped fluoride fiber amplifier	O-band 1260–1360 nm
TDFA	Thulium-doped fiber amplifier	S-band 1460–1530 nm
EDFA	Erbium-doped fiber amplifier	C-band 1530–1565 nm
GS-EDFA	Gain-shifted EDFA	L-band 1565–1625 nm
ETDFA	Er/Tm-doped tellurite (tellurium oxide) glass fiber	C- and L-bands
RFA	Raman fiber amplifier	1260–1650 nm

Tableau II. 1 Différentes structures d'amplificateurs optiques et leurs zones de fonctionnement.[19]

II.3. Utilisations générales des amplificateurs optiques :

Lors de la conception d'une liaison par fibre optique qui nécessite des amplificateurs optiques, il existe trois emplacements possibles pour les amplificateurs, la figure II.2 présente les applications générales des trois classes d'amplificateurs optiques suivantes :

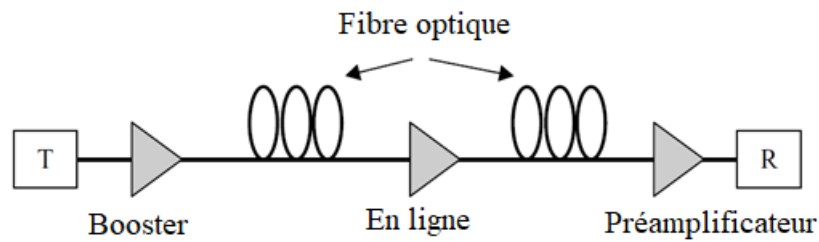


Figure II. 2 Système à fibre optique typique avec des amplificateurs optiques comme booster, en ligne et préamplificateurs.[20]

Amplificateurs optiques en ligne : dans une liaison monomode, les effets de la dispersion de la fibre peuvent être faibles, de sorte que la principale limitation de l'espacement des répéteurs est l'atténuation de la fibre. Comme une telle liaison ne nécessite pas nécessairement une régénération complète du signal, une simple amplification du signal optique est suffisante. Ainsi, un amplificateur optique en ligne peut être utilisé pour compenser la perte de transmission et augmenter la distance entre les répéteurs régénératifs.

Préamplificateur : l'amplificateur optique utilisé comme préamplificateur frontal pour un récepteur optique. Ainsi, un faible signal optique reçu est amplifié avant la photodétection afin de supprimer la dégradation du rapport signal/bruit causée par le bruit thermique dans l'électronique du récepteur. Par rapport à d'autres dispositifs frontaux tels que les photodiodes à avalanche ou les détecteurs hétérodynes optiques, un préamplificateur optique offre un facteur de gain plus important et une bande passante plus large.

Amplificateur de puissance (Booster) : Les applications des boosters consistent à placer le dispositif immédiatement après un émetteur optique pour augmenter la puissance transmise, cela permet d'augmenter la distance de transmission de 10 à 100 km en fonction du gain de l'amplificateur et de la perte de la fibre. Par exemple, l'utilisation de cette technique avec un préamplificateur optique à l'extrémité réceptrice peut permettre des distances de transmission sous-marine sans répéteur de 200 à 250 km.

II.4. Amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) :

Un amplificateur optique à semi-conducteurs est essentiellement un laser InGaAsP qui fonctionne en dessous de son seuil d'effet laser. Comme pour la construction d'une diode laser, le pic de gain d'un SOA peut être sélectionné dans n'importe quelle bande de longueur d'onde étroite allant de 1280 nm dans la bande O à 1650 nm dans la bande U en faisant varier la composition du matériau actif InGaAsP. La plupart des SOA appartiennent à la catégorie des amplificateurs à ondes progressives (*traveling-wave* TW). Cela signifie que, contrairement au mécanisme de rétroaction laser où le signal optique effectue de nombreux allers-retours à travers la cavité à effet laser du SOA, dans un amplificateur TW, le signal optique ne traverse le dispositif qu'une seule fois. Au cours de ce passage unique, le signal optique gagne en énergie et ressort intensifié à l'autre extrémité de l'amplificateur.

La construction du SOA est similaire à la structure d'une cavité résonante d'une diode laser. La SOA possède une région active de longueur L , de largeur w et de hauteur d . Les facettes d'extrémité ont des réflectivités R_1 et R_2 . Cependant, contrairement à une diode laser à semi-conducteur dans laquelle les réflectivités sont d'environ 0,3, les paramètres R_1 et R_2 d'une SOA sont considérablement plus faibles afin que le signal optique ne traverse la cavité d'amplification qu'une seule fois. De faibles réflectivités, de l'ordre de 10^{-4} , sont obtenues en déposant de fines couches d'oxyde de silicium, de nitrure de silicium ou d'oxyde de titane sur les facettes des extrémités des SOA.

Le gain à un seul passage en l'absence de lumière pour être $G_0 = \exp(g_0L)$,

La figure II.3 illustre la dépendance du gain par rapport à la puissance d'entrée. Ici, le gain en signal nul (ou gain en signal faible) est $G_0 = 30$ dB. La courbe montre que lorsque la puissance du signal d'entrée augmente, le gain reste d'abord proche du niveau de petit signal, puis commence à diminuer. Après avoir diminué linéairement dans la région de saturation du gain, il s'approche finalement d'une valeur asymptotique de 0 dB (gain unitaire) pour les puissances d'entrée élevées. La puissance de saturation de sortie $P_{amp, sat}$, qui est le point auquel le gain est réduit de 3 dB, est également représentée.

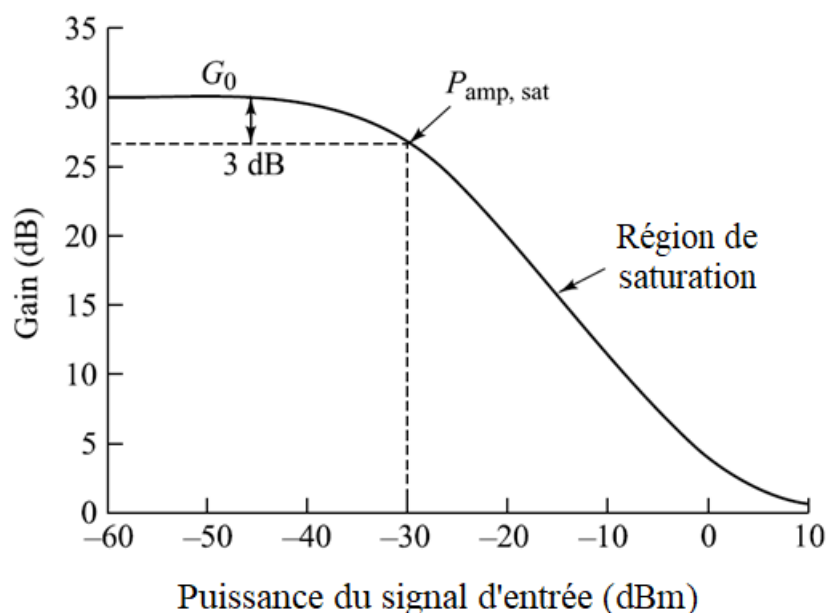


Figure II. 3 Dépendance typique du gain à un seul passage en fonction de la puissance optique d'entrée[19]

La longueur d'onde à laquelle la SOA présente un gain maximal peut être adaptée pour se situer entre 1200 et 1700 nm environ en modifiant la composition du matériau actif InGaAsP. À titre d'exemple, la figure II.4 montre une caractéristique typique du gain en fonction de la longueur d'onde pour un dispositif présentant un gain maximal de 25 dB à 1530 nm. La plage de longueur d'onde sur laquelle le gain diminue de moins de 3 dB par rapport au gain maximal est appelée le gain de la bande passante ou la bande passante optique de 3 dB. Dans l'exemple illustré à la figure II.4, la largeur de bande optique à 3 dB est de 85 nm. Des valeurs allant jusqu'à 100 nm peuvent être obtenues.

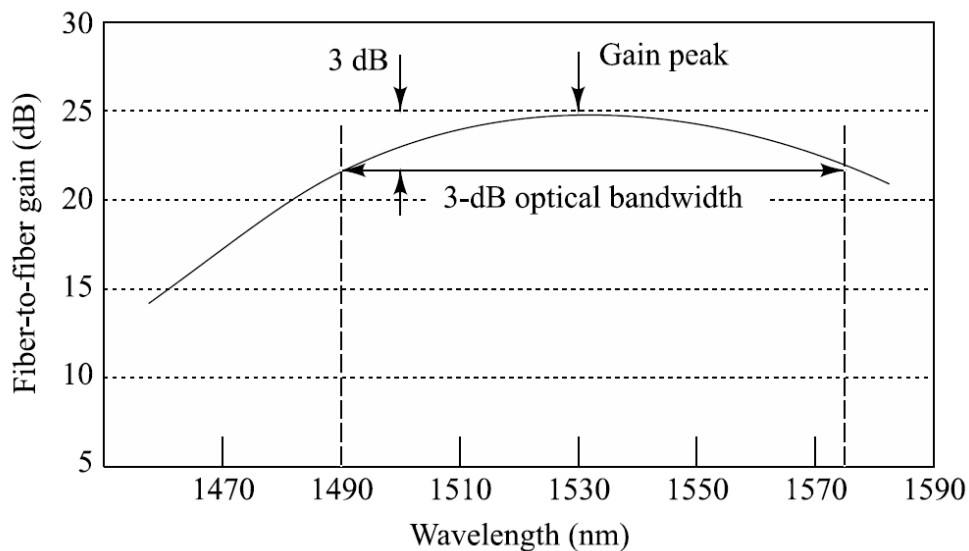


Figure II. 4 bande passante optique de 3 dB pour SOA avec un gain de pointe de 25 dB à 1530 nm[19]

II.5. Amplificateurs à fibre dopée à l'erbium :

Le milieu actif d'un amplificateur à fibre optique consiste en une longueur nominale de 10 à 30 m de fibre optique légèrement dopée (par exemple, 1000 parties par million en poids) avec un élément de terre rare, tel que l'erbium (Er), l'ytterbium (Yb), le thulium (Tm) ou le praséodyme (Pr). Le matériau de la fibre hôte peut être de la silice standard, un verre à base de fluorure ou un verre de tellurite.

Les zones de fonctionnement de ces dispositifs dépendent du matériau hôte et des éléments de dopage. Un matériau populaire pour les applications de télécommunication à longue distance est une fibre de silice dopée à l'erbium, appelée amplificateur à fibre dopée à l'erbium ou EDFA. Dans certains cas, de l'Yb est ajouté pour augmenter l'efficacité du pompage et le gain de l'amplificateur. Le fonctionnement d'un EDFA standard est normalement limité à la région 1530-1565 nm. En fait, le fait qu'un EDFA fonctionne dans cette bande spectrale est à l'origine du terme bande C ou bande conventionnelle. Cependant, différentes techniques ont été proposées et utilisées pour étendre le fonctionnement à la bande S et à la bande L.

II.5.1. Principe de base du pompage des amplificateurs à fibre optique :

Le principe de base peut être bien compris par le diagramme de niveau d'énergie des ions Er^{3+} donné dans la figure II.5. Les trois niveaux du système énergétique sont le niveau du sol (E1), le niveau métastable (E2) et le niveau de la pompe (E3). Comme le montre la figure 1, N_1 , N_2 et N_3 sont les conditions de la population d'ions erbium. En l'absence de pompe ou de signal, $N_1 > N_2 > N_3$, c'est l'état d'équilibre. Lorsque la lumière pompée apparaît, il y aura un mouvement des ions entre les niveaux d'énergie, qui sera accompagné de l'émission ou de l'absorption de photons causés par les différences de niveau d'énergie. Deux longueurs d'onde de pompage couramment utilisées pour les EDFA sont 980 nm et 1480 nm. Une pompe laser émettant une longueur d'onde de 980 nm est utilisée pour exciter les ions du niveau de l'état fondamental (E1) au niveau de l'état

excité (E3). Les ions excités au niveau excité (E3) ne peuvent pas rester plus longtemps et se désintègrent spontanément au niveau métastable (E2), puis retombent au niveau de base (E1), ce qui entraîne un signal lumineux plus important. Le taux de transition entre E1 et E3 dépend de la puissance de la pompe, tandis que le taux de transition entre E2 et E1 est beaucoup plus rapide que le taux de E1 à E3 ; cela implique qu'il devrait y avoir plus d'ions dans le niveau d'état excité que dans le niveau d'état fondamental. Ce phénomène de décroissance des ions entre E2 et E1 est appelé inversion de population, qui présente deux types d'émission, à savoir l'émission spontanée et l'émission stimulée.

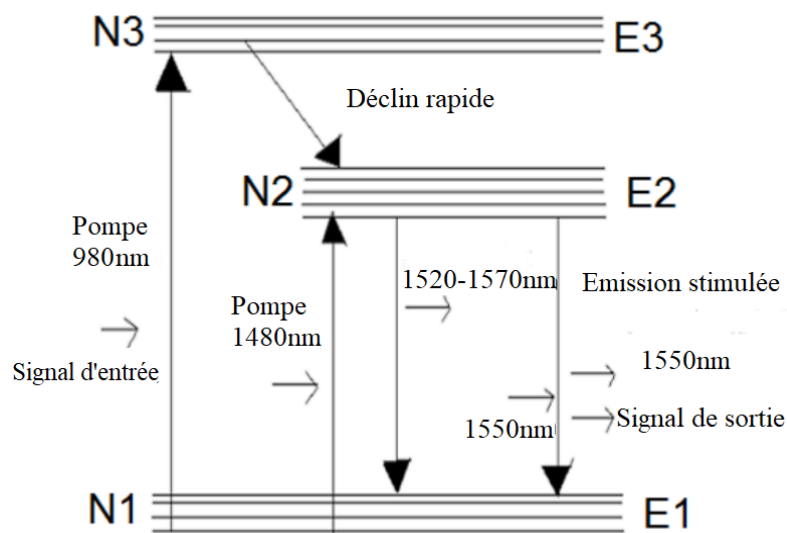
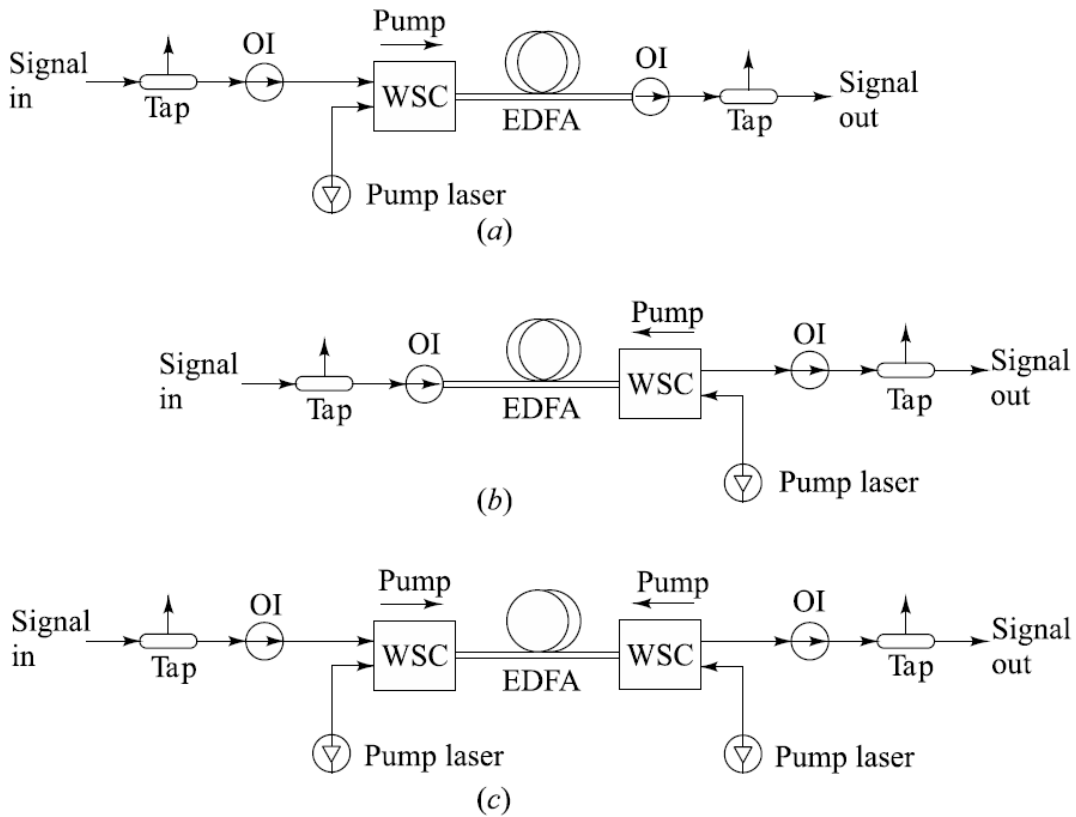


Figure II. 5 Diagrammes de niveau d'énergie d'EDFA.[21]

Dans le cas de l'émission stimulée, l'émission d'un photon donne deux photons à la sortie, puisque la sortie accélère l'intensité lumineuse que nous appelons gain. En revanche, dans le cas de l'émission spontanée, le photon émis apparaît comme un bruit additif appelé émission spontanée amplifiée (ASE).

II.5.2. Configuration interne d'un EDFA :

Un amplificateur à fibre optique se compose d'une fibre dopée, d'un ou plusieurs lasers de pompage, d'un coupleur de longueur d'onde passif, d'isolateurs optiques et de coupleurs de prise, comme le montre la figure II.6. Le coupleur dichroïque (à deux longueurs d'onde) gère les combinaisons de longueurs d'onde 980/1550 nm ou 1480/1550 nm pour coupler efficacement les puissances optiques de la pompe et du signal dans l'amplificateur à fibre. Les coupleurs de prise sont insensibles à la longueur d'onde, ils sont généralement utilisés des deux côtés de l'amplificateur pour comparer le signal entrant avec la sortie amplifiée. Les isolateurs optiques empêchent le signal amplifié de se réfléchir dans le dispositif, où il pourrait augmenter le bruit de l'amplificateur et diminuer son efficacité.



OI: Optical isolator
 WSC: Wavelength-selective coupler

Figure II. 6 Trois configurations possibles d'un EDFA : (a) pompage co-directionnel, (b) pompage contre-directionnel et (c) pompage double.[19]

La lumière de pompage est généralement injectée dans la même direction que le flux du signal. C'est ce qu'on appelle le pompage codirectionnel. Il est également possible d'injecter la puissance de pompage dans la direction opposée au flux du signal, ce que l'on appelle le pompage contredirectionnel. Comme le montre la figure II.6, on peut utiliser soit une source de pompage unique, soit des schémas à double pompe, les gains résultants étant généralement de +17 dB et +35 dB, respectivement. Le pompage contre-directionnel permet des gains plus élevés, mais le pompage codirectionnel offre de meilleures performances en termes de bruit. En outre, le pompage à 980 nm est préférable, car il produit moins de bruit et permet d'obtenir des inversions de population plus importantes que le pompage à 1480 nm.

II.5.3. Paramètres de gain de l'EDFA :

Un amplificateur à fibre dopée à l'erbium est caractérisé par :

- Son gain en petit signal ; il est de l'ordre de 20 à 30 dB pour un pompage à 1 480 nm, de 30 à 40 dB pour un pompage à 980 nm ; un amplificateur pourrait théoriquement compenser l'atténuation de 150 à 200 km de fibre optique, mais en pratique cette valeur est diminuée à cause du bruit ;
- Sa puissance de saturation, définie comme en électronique par la puissance du signal de sortie lorsque le gain est réduit de 3 dB : en sortie, elle atteint maintenant entre 20 et 30 dBm pour un pompage à 980 nm. En se rapprochant de la saturation, l'efficacité quantique se rapproche de son maximum (figure II.7). Cette puissance se rapproche de la puissance provoquant des effets non

linéaires dans la fibre optique (et l'atteint même avec les amplificateurs les plus puissants dépassant 30 dBm, ce qui nécessite des précautions en matière de sécurité laser) ;

– Son efficacité de conversion quantique (QCE) définie par :

$$QCE = \frac{\lambda_s}{\lambda_p} \frac{P_{s,in} - P_{s,out}}{P_{p,in}} \quad (II.1)$$

où $P_{s,in}$, $P_{s,out}$ sont les puissances des signaux d'entrée et de sortie, $P_{p,in}$ est la puissance de pompe d'entrée, et λ_p et λ_s sont les longueurs d'onde de pompe et de signal, respectivement.

– Son rapport gain/puissance de pompage : ce rapport est relativement constant et passe par un maximum d'environ 4 dB/mW pour un pompage à 1 480 nm, et atteint 10 dB/mW pour un pompage à 980 nm. Le gain de l'amplificateur peut alors être facilement contrôlé en utilisant la puissance de la pompe.

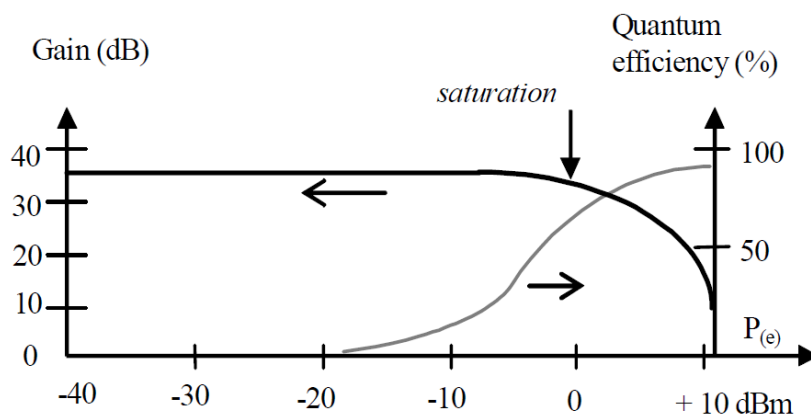


Figure II. 7 Gain et rendement en fonction de la puissance d'entrée $P(e)$ [7]

II.5.4. Rapport signal/bruit optique (OSNR) de l'EDFA :

Le bruit dominant généré dans un amplificateur optique est appelé bruit d'émission spontanée amplifiée (ASE). L'origine de ce bruit est la recombinaison spontanée des électrons et des trous dans le milieu de l'amplificateur. Cette recombinaison se produit sur une large gamme de différences d'énergie entre les électrons et les trous et donne donc lieu à un large fond spectral de photons de bruit qui sont amplifiés avec le signal optique lorsqu'ils traversent l'EDFA. La figure II.8 illustre ce phénomène pour un EDFA amplifiant un signal à 1540 nm.

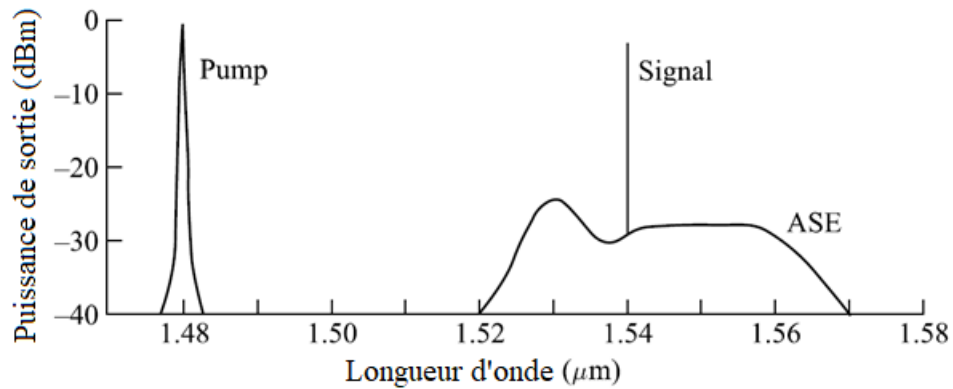


Figure II. 8 Spectre de pompe représentatif à 1480 nm et signal de sortie typique à 1540 nm avec le bruit d'émission spontanée amplifiée (ASE) associé.[19]

Lors de l'analyse d'une liaison de transmission comportant une série d'amplificateurs optiques, il est important de se rappeler que le signal lumineux entrant dans un amplificateur optique particulier comprend un certain bruit ASE provenant des amplificateurs précédents dans la liaison. Ainsi, le récepteur optique peut contenir un niveau significatif de bruit ASE qui a été ajouté par la cascade d'amplificateurs optiques. Dans ce cas, il faut évaluer le rapport signal/bruit optique (OSNR). Ce paramètre est défini comme le rapport entre la puissance de sortie moyenne du signal optique EDFA P_{ave} et la puissance du bruit optique ASE non polarisé P_{ASE} . L'OSNR est donné par

$$OSNR(dB) = \log \frac{P_{ave}}{P_{ase}} \quad (II.2)$$

En pratique, l'OSNR peut être mesuré avec un analyseur de spectre optique (OSA). Parfois, un filtre optique est utilisé pour réduire de manière significative le bruit ASE total vu par le récepteur. En général, un tel filtre a une largeur de bande optique qui est grande par rapport au signal, de sorte qu'il n'affecte pas le signal, mais qui est étroite par rapport à la largeur de bande associée au bruit de fond ASE. Cependant, il réduit la puissance totale du bruit ASE pour éviter de surcharger le frontal du récepteur.

Afin d'avoir une évaluation significative de ce que l'OSNR indique sur les performances du système, il est nécessaire d'établir un lien entre l'OSNR et le taux d'erreur binaire (BER). Un certain nombre de relations différentes ont été proposées à cet effet dans la littérature. En outre, il existe différentes approches pour interpréter les résultats d'une mesure de l'OSNR, ce qui peut entraîner une différence de plusieurs décibels dans les résultats. On peut déduire la relation suivante entre Q et OSNR

$$OSNR = \frac{1}{2} Q(Q + \sqrt{2}) \quad (II.3)$$

II.6. Amplificateurs optiques Raman :

II.6.1. Principe du gain Raman :

Un amplificateur optique Raman est basé sur un effet non linéaire appelé diffusion Raman stimulée (SRS), qui se produit dans les fibres à des puissances optiques élevées (voir chapitre 1). Le transfert de puissance vers des longueurs d'onde plus élevées se produit sur une large gamme spectrale de 80 à 100 nm. Le déplacement vers une longueur d'onde plus élevée particulière est appelé déplacement de Stokes pour cette longueur d'onde. La figure II.9 montre le spectre de gain Raman pour un laser de pompe fonctionnant à 1445 nm et illustre le transfert de puissance induit par le SRS vers un signal à 1535 nm, soit à 90 nm de la longueur d'onde de la pompe. Selon l'architecture de la liaison, le signal généré par le SRS peut agir soit comme une amplification intentionnelle d'une longueur d'onde de données particulière, soit comme un signal d'interférence indésirable à cette longueur d'onde. La courbe de gain est donnée en termes de coefficient de gain Raman g_R en unités de 10^{-14} m/W.

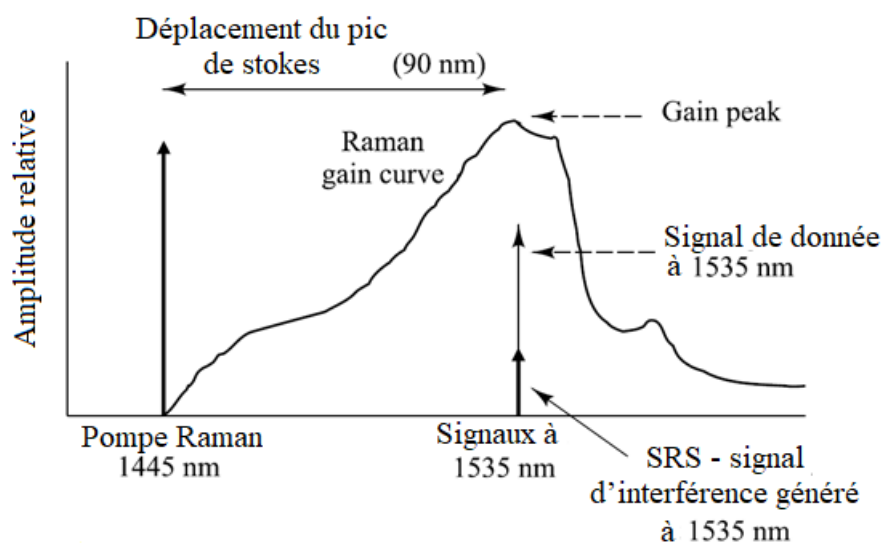


Figure II. 9 Déplacement de Stokes et spectre de gain Raman résultant d'un laser de pompe fonctionnant à 1445 nm

Alors qu'un EDFA nécessite une fibre optique spécialement construite pour son fonctionnement, un amplificateur Raman utilise la fibre de transmission standard elle-même comme moyen d'amplification. Le mécanisme de gain Raman peut être obtenu par un amplificateur localisé (ou discret) ou un amplificateur distribué. Dans la configuration de l'amplificateur Raman en bloc, une bobine d'environ 80 m de fibre à petit noyau et des lasers de pompage appropriés sont insérés dans le trajet de transmission comme une unité distincte.

Pour l'application d'amplificateur Raman distribué, la puissance optique d'un ou plusieurs lasers de pompage Raman est insérée à l'extrémité de réception de la fibre de transmission. Ce processus convertit les 20 à 40 derniers kilomètres de la fibre de transmission en un préamplificateur. D'où l'utilisation du mot distribué car le gain est réparti sur une grande distance. La figure II.10 illustre cet effet sur une seule longueur d'onde pour plusieurs niveaux de pompe différents. La figure montre l'augmentation de la puissance du signal à la sortie de l'amplificateur

de réception lorsque les lasers de pompage Raman sont allumés. Au fur et à mesure que la puissance optique des pompes se déplace vers l'amont (du récepteur vers l'émetteur), l'effet SRS transfère progressivement la puissance des longueurs d'onde de pompe plus courtes vers les longueurs d'onde de signal plus longues. Cela se produit sur la longueur de gain Raman caractéristique $L_G = g_R P / A_{eff}$, où P est la puissance du laser de pompe et A_{eff} est la surface effective de la fibre de transmission, qui est approximativement égale à la surface réelle de la section transversale de la fibre. En général, les facteurs de bruit limitent le gain pratique d'un amplificateur Raman distribué à moins de 20 dB.

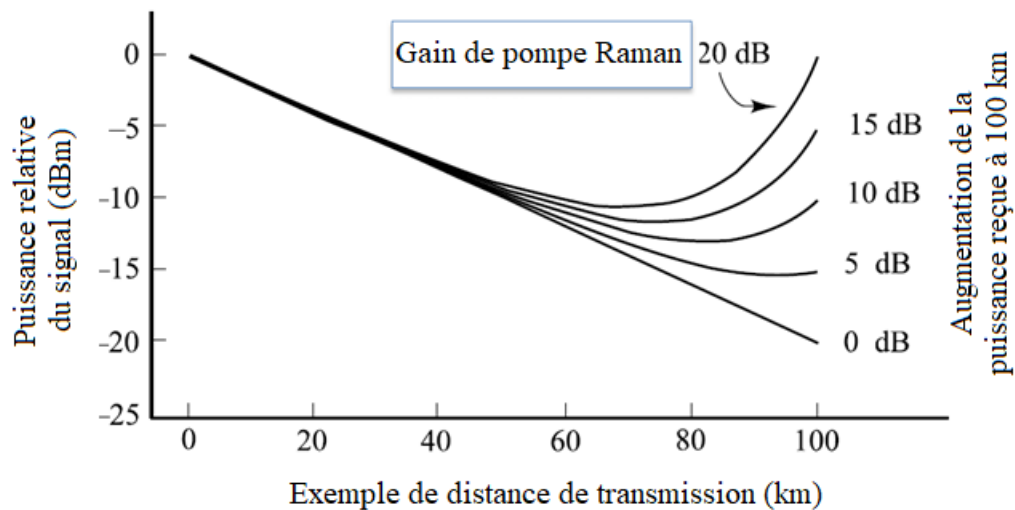


Figure II. 10 Valeurs de gain Raman d'une liaison par fibre à 100 km[19]

II.6.2. Lasers de pompage pour amplificateurs Raman :

Des lasers de pompage avec des puissances de sortie élevées dans la région de 1400 à 1500 nm sont nécessaires pour l'amplification Raman des signaux en bande C et en bande L. Les lasers qui fournissent des puissances de lancement de fibre allant jusqu'à 3000 mW sont disponibles dans des boîtiers papillon standard à 14 broches. La figure II.11 montre la configuration d'un système d'amplification Raman typique. Ici, un combineur de pompe multiplexe les sorties de quatre lasers de pompe fonctionnant à différentes longueurs d'onde (par exemple, 1425, 1445, 1465 et 1485 nm) sur une seule fibre. Ces coupleurs pompe-puissance sont communément appelés combineurs pompe-puissance 14xx-nm. Cette puissance de pompage combinée est ensuite couplée dans la fibre de transmission dans un sens de contre-propagation par le biais d'un coupleur WDM à large bande. Les différences entre les niveaux de puissance mesurés entre les deux photodiodes de contrôle illustrées à la Fig. II.10 donnent le gain d'amplification. Le filtre d'aplatissement du gain (*gain-flattening filter* GFF) est utilisé pour égaliser les gains à différentes longueurs d'onde. Des modules amplificateurs Raman commerciaux sont capables de fonctionner dans des configurations de pompage vers l'arrière ou vers l'avant.

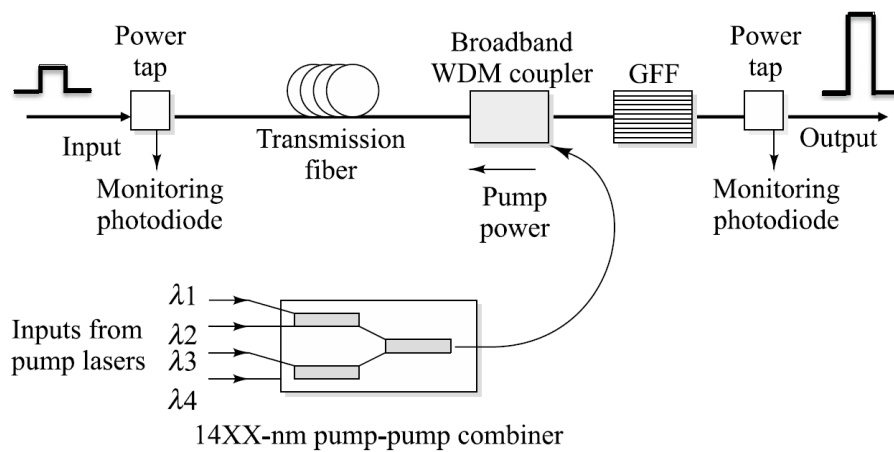


Figure II. 11 Configuration d'un système d'amplification Raman distribuée utilisant quatre lasers de pompage.[19]

II.7. Amplificateur optique hybride (HOA) :

La demande sans cesse croissante pour plus de bande passante a créé un intérêt pour le développement d'amplificateurs optiques à large bande qui fonctionnent sur plusieurs bandes de longueurs d'onde pour gérer simultanément un grand nombre de canaux WDM. En général, la combinaison de plusieurs amplificateurs optiques dans n'importe quelle configuration est appelée HOA. Par exemple, une combinaison de deux types d'amplificateurs peut fournir une amplification efficace à la fois dans les bandes C et L ou dans les bandes S et C. En étendant davantage ce concept, l'utilisation de trois types d'amplificateurs peut fournir des gains de signal dans les bandes S, C et L, dans les bandes C, L et U, ou une autre combinaison. Les amplificateurs individuels pourraient être basés sur des fibres de silice dopées au thulium pour la bande S, des EDFA standard pour la bande C, des EDFA à gain décalé pour la bande L et différentes versions d'amplificateurs Raman.

Les combinaisons d'amplificateurs peuvent être en parallèle ou en série, comme le montrent les Figures II.12 et II.13, respectivement.

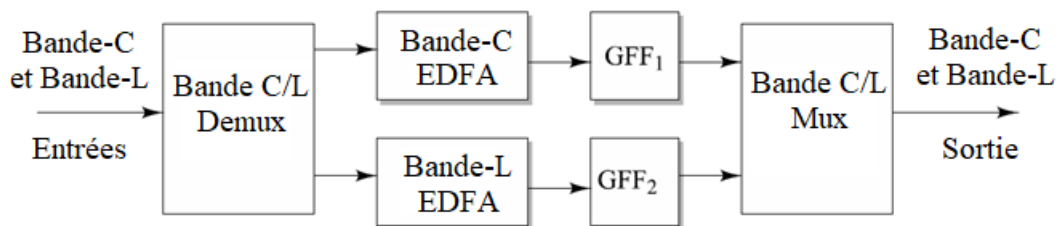


Figure II. 12 Représentation des amplificateurs optiques en bande C et en bande L disposés en parallèle

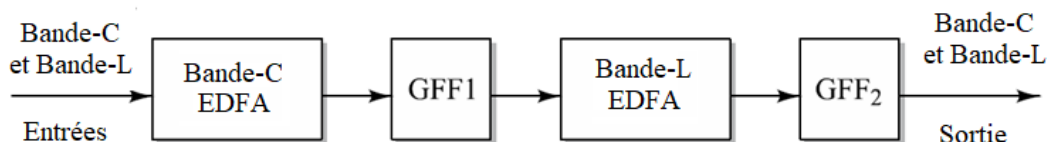


Figure II. 13 Représentation des amplificateurs optiques en bande C et en bande L disposés en série

Dans la conception parallèle, un démultiplexeur à large bande divise le spectre du signal entrant en deux bandes de longueur d'onde. Les deux bandes traversent ensuite des amplificateurs optiques correspondants après quoi un multiplexeur large bande recombine les deux bandes

spectrales. Cette configuration nécessite l'utilisation d'une bande de garde couvrant plusieurs nanomètres entre les deux régions spectrales. Cette bande de garde empêche l'amplification chevauchement entre les différents trajets et empêche la puissance de bruit provenant d'un amplificateur d'interférer avec l'amplification du signal dans un amplificateur adjacent. En plus d'avoir cette bande de longueur d'onde inutilisable, un autre inconvénient de la configuration parallèle est que les deux dispositifs WDM nécessaires avant et après chaque amplificateur ajoutent à la perte d'insertion du système.

La configuration en série ne nécessite pas de diviser les signaux en chemins séparés. Il évite également les dégradations du facteur de bruit des coupleurs de longueur d'onde et les surcoûts des coupleurs eux-mêmes. Ces amplificateurs peuvent être construits soit à partir d'une concaténation de deux ou plusieurs amplificateurs à fibre dopée, soit à partir d'une combinaison d'un amplificateur à fibre et d'un amplificateur Raman. Cependant, l'impact sur la conception de l'amplificateur dû aux effets non linéaires et à l'amplification de la diffusion Rayleigh doit être pris en compte pour les amplificateurs à fibre hybride constitués d'une combinaison d'un EDFA et d'un amplificateur Raman. Ces effets ne sont pas aussi forts pour un amplificateur optique hybride constitué d'une série d'amplificateurs à fibre dopée concaténés, mais dans ce cas, les caractéristiques de gain des différents segments d'amplificateur doivent être soigneusement adaptées.

À l'heure actuelle, les HOA sont une technologie prometteuse et largement utilisée pour les applications à large bande à haut débit afin d'améliorer les performances du système. Comme la plupart des technologies, les HOA présentent également certains inconvénients dont il faut tenir compte. Il s'agit notamment de la réponse transitoire, de la diaphonie induite, ainsi que d'autres sources de bruit propres aux amplificateurs Raman à fibre (FRA), telles que la double rétrodiffusion de Rayleigh, le transfert de bruit d'intensité relative par pompage et les problèmes de non-linéarité, dus à une puissance moyenne élevée dans les fibres. L'objectif derrière la proposition de l'HOA est de : (1) d'augmenter la largeur de bande de gain d'un système WDM avec la moindre variation de gain sur la largeur de bande effective, (2) de réduire les pertes dues aux non-linéarités induites, et (3) d'éviter la contrainte des filtres d'aplatissement de gain et des multipompes à coût élevé pour une grande planéité de gain.

Le gain net de l'amplificateur hybride Raman-EDFA G_{Hybrid} a été décrit comme la somme des deux gains individuels (en dB) de Raman et EDFA, respectivement[22]. La répartition du gain dans un amplificateur hybride est illustrée à la figure II.14. Par conséquent, dans le cas d'un HOA Raman-EDFA, le gain net est de

$$G_{Hybride} = G_{EDFA} + G_{Raman}. \quad (II.4)$$

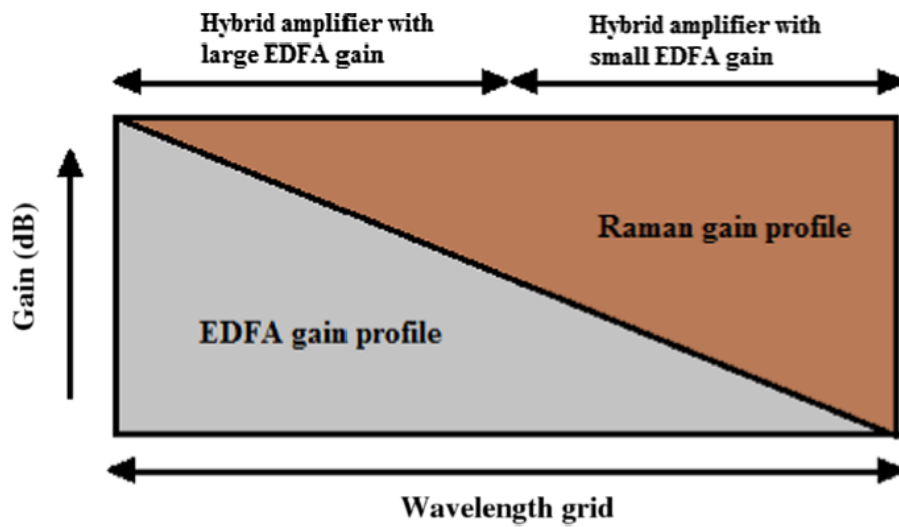


Figure II. 14 Partitionnement du gain dans un amplificateur hybride Raman- EDFA.[23]

Sur la figure II.14, on peut voir qu'une partie de la bande de longueur d'onde est efficacement amplifiée par l'EDFA avec un gain élevé et que l'autre est amplifiée par le Raman, ce qui signifie que sur toute la grille de longueur d'onde, un seul amplificateur présente une grande variation. Mais si l'amplificateur Raman est combiné avec un EDFA dans n'importe quelle configuration (en cascade ou en parallèle), alors la grande planéité du gain peut être obtenue même avec le gain le plus élevé possible.

II.8. Applications des Amplificateurs sur les systèmes optiques 5G :

Les réseaux de fibres optiques offrent une large bande passante, une grande capacité et une vitesse élevée d'environ gigabits par seconde ou plus. Cette capacité répond aux exigences des trois principales caractéristiques de la 5G, à savoir services à large bande mobile amélioré eMbb (enhanced mobile broadband), communications ultra fiables et à faible latence uRLLC (ultra-reliable low latency communications) et communications massives de type machine mMTC (massive machine-type communications). Par conséquent, les réseaux mobiles 5G, ainsi qu'un réseau à fibre optique, sont des candidats potentiels pour supporter les volumes de trafic de données. En outre, le réseau à fibre optique prend en charge les applications de réseaux métropolitains, régionaux et nationaux qui nécessitent une longue distance de transmission optique. Cependant, dans l'étude précédente, la distance de transmission optique qui répondait aux exigences du système ne pouvait atteindre que 80 km [24]. L'atténuation de la fibre est l'un des facteurs qui diminuent la qualité du signal.[21]

Pour remédier à ce problème, des amplificateurs optiques sont nécessaires pour maintenir les performances du système. Les amplificateurs optiques maintiennent la bande passante et le niveau requis du système en augmentant la puissance du signal. Les amplificateurs optiques sont les plus efficaces, les plus stables avec des pertes minimales pour la transmission longue distance, mais leurs existences dans une application particulière dépend des caractéristiques et des contraintes du système.

Les amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) sont les meilleures alternatives en raison de leur taille compacte et de leur moindre besoin de compensation de puissance par rapport aux Raman et EDFA. Les EDFA, Raman et HOA (amplificateurs optiques hybrides) rendent le système coûteux car ils nécessitent une puissance de pompage élevée pour fonctionner, tandis que les SOA n'ont besoin que d'une alimentation de polarisation électrique à des niveaux d'environ 50 mA. En outre, la diaphonie non linéaire et la distorsion d'intermodulation dans les systèmes DWDM sont négligeables dans les amplificateurs à fibre par rapport aux SOA. Selon les différentes caractéristiques d'un amplificateur optique, le HOA peut être recommandé pour un système DWDM à haute capacité où le gain élevé et/ou la largeur de bande de gain avec moins de variation sont requis. En outre, pour des utilisateurs limités et un système de communication DWDM à courte distance, un EDFA ou un Raman unique peut être utilisé avec une longueur d'onde et une puissance de pompage appropriées, respectivement.[23]

II.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié les principaux amplificateurs optiques existant dans les systèmes de transmission optiques, en abordant leurs principes de fonctionnement, leurs emplacements dans une liaison par fibre optique et leurs principales caractéristiques avec les avantages et inconvénients de chaque amplificateur. Nous avons montré leur importance sur les systèmes optiques 5G. le chapitre suivant sera consacré à la simulation et l'interprétation des résultats avec une partie qui parle du logiciel de simulation, le taux d'erreurs binaire, le facteur de qualité Q et le diagramme de l'œil

Chapitre III

Application des amplificateurs optiques

III.1. Introduction

Les amplificateurs semblent être une petite partie de la conception du réseau WDM, mais ils sont probablement l'un des sous-systèmes les plus importants. Les amplificateurs agissent comme des régénérateurs de données ; par conséquent, ils peuvent augmenter la longueur d'une ligne de transmission optique. Un régénérateur optoélectronique serait en effet capable d'améliorer le niveau de puissance du signal, mais un tel régénérateur est nécessaire pour chaque canal. Cependant, les amplificateurs optiques peuvent amplifier l'intégralité du signal WDM composite à la fois sans démultiplexer chaque canal. C'est précisément la raison pour laquelle la mise en réseau WDM devient si populaire. Les amplificateurs deviennent un moyen peu coûteux et efficace de régénérer un signal WDM optique entièrement dans le domaine optique sans le resynchroniser ni le remodeler.

Durant ce chapitre, on va commencer par présenter le logiciel de simulation qu'on va utiliser, on expliquera ensuite ce qu'est un taux d'erreur binaire, un facteur de qualité Q et un diagramme de l'œil, puis on entamera la simulation et l'interprétation des résultats.

III.2. Présentation du logiciel de simulation Optisystem :[25]

Le logiciel Optisystem a été créé pour répondre aux besoins des chercheurs, des ingénieurs en télécommunications optiques, des intégrateurs de systèmes, des étudiants et d'une grande variété d'autres utilisateurs, OptiSystem satisfait la demande du marché de la photonique en pleine évolution pour un outil de conception de systèmes optiques puissant mais facile à utiliser.

OptiSystem permet aux utilisateurs de planifier, tester et simuler (dans le domaine temporel et fréquentiel) :

- Conceptions de réseaux optiques, y compris OTDM, anneaux SONET/ SDH, CWDM, DWDM, PON, Cable, OCDMA.
- Transmission monomode/multimode
- Optique en espace libre (FSO), radio sur fibre (ROF), OFDM (direct, cohérent).
- Amplificateurs et lasers (EDFA, SOA, Raman, hybride, optimisation GFF, lasers à fibre)
- Traitement du signal (électrique, numérique, tout-optique)
- Conception de sous-systèmes émetteurs et récepteurs (directs/cohérents)
- Formats de modulation (RZ, NRZ, CSRZ, DB, DPSK, QPSK, DP-QPSK, PM-QPSK, QAM-16, QAM-64)
- Analyse des performances du système (diagramme en œil/facteur Q/BER, puissance du signal/OSNR, états de polarisation, diagrammes de constellation, pénalités linéaires et non linéaires).

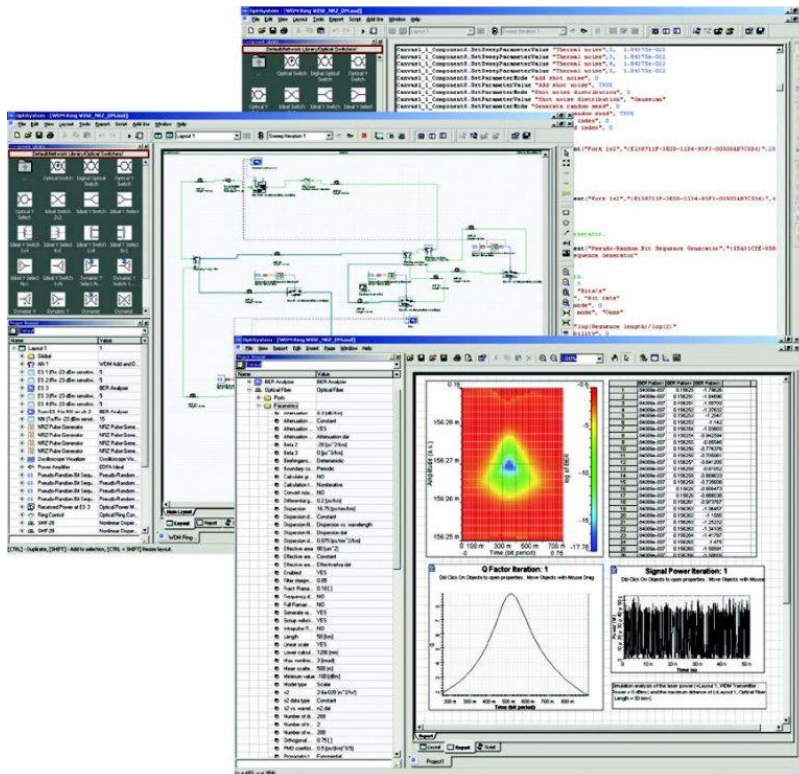


Figure III. 1 Aperçu de l'interface utilisateur du logiciel Optisystem

III.3. Mesures du taux d'erreur binaire (BER) :

Le taux d'erreur binaire BER définit par une approche simple consiste à diviser le nombre d'erreurs N_e survenues pendant un certain intervalle de temps t par le nombre N_t d'impulsions (uns et zéros) transmises pendant cet intervalle.

$$BER = \frac{N_e}{N_t} = \frac{N_e}{\beta t} \tag{III. 1}$$

où $\beta = 1/T_b$ est le débit binaire (c'est-à-dire le taux de transmission des impulsions).

Le BER est un important indicateur de qualité de performance d'une liaison de communication numérique. Comme le BER est un paramètre statistique, sa valeur dépend du temps de mesure et des facteurs qui provoquent les erreurs, tels que la dispersion du signal, l'excès de bruit accumulé et la gigue temporelle. Lors des mesures du BER, le nombre de bits mal interprétés et le nombre total de bits reçus sont comptés dans une fenêtre de temps spécifique ΔT , appelée temps de déclenchement. Si les erreurs sont dues à un bruit gaussien dans une liaison de transmission relativement stable, le BER ne fluctue pas de manière significative dans le temps. Dans ce cas, une fenêtre de temps de déclenchement dans laquelle environ 100 erreurs se produisent est nécessaire pour garantir un BER statistiquement valide. Lorsque des rafales d'erreurs se produisent, des temps de mesure plus longs peuvent être nécessaires pour accumuler 100 erreurs afin que le test soit statistiquement précis.

Pour les communications à haut débit supérieures à 1 Gb/s, le BER requis doit généralement être de 10^{-12} ou moins. Toutefois, un niveau de BER de 10^{-12} peut être inacceptable pour un débit de 10 Gb/s, de sorte que des taux d'erreur binaire encore plus bas, comme 10^{-15} , peuvent être nécessaires pour garantir aux clients une qualité de service élevée. [19], [26]

III.4. Estimation du Facteur de qualité Q :

La probabilité d'erreur P_e dans une liaison de communication numérique est liée au facteur Q par l'expression :

$$P_e(Q) = BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{Q} \exp \left(-\frac{Q^2}{2} \right) \quad (III.2)$$

où Q est donné par :

$$Q = \frac{b_{on} - b_{off}}{\sigma_{on} + \sigma_{of}} \quad (III.3)$$

I_1 et I_0 sont les valeurs moyennes des photo-courants des symboles "1" et "0" et σ_1 et σ_0 , les racines carrées des variances des densités de probabilité des symboles "1" et "0".

Le facteur Q est largement utilisé pour spécifier les performances des récepteurs, car il est lié au rapport signal/bruit nécessaire pour atteindre un taux d'erreur binaire spécifique. En particulier, il prend en compte le fait que dans les systèmes à fibres optiques, les variances des puissances de bruit sont généralement différentes pour les impulsions logiques 0 et 1 reçues. L'approximation de P_e donnée par l'équation (III.2) est précise à 1 % pour $Q \approx 3$ et s'améliore à mesure que Q augmente. Une valeur Q couramment citée est 6, car elle correspond à un $BER = 10^{-9}$.

III.5. Diagramme de l'œil :[19]

Les mesures du motif d'œil sont effectuées dans le domaine temporel et permettent de montrer immédiatement les effets de la distorsion de la forme d'onde. La figure III.3 montre un motif d'affichage typique, appelé diagramme d'œil. Les niveaux logiques 1 et 0, représentés respectivement par b_{on} et b_{off} , déterminent les limites supérieure et inférieure de base.

Pour interpréter le diagramme en œil, considérez la figure III.3 et le dessin simplifié présenté à la Figure III.2. On peut en déduire les informations suivantes concernant la distorsion d'amplitude du signal, la gigue temporelle et le temps de montée du système :

- La largeur de l'ouverture de l'œil définit l'intervalle de temps sur lequel le signal reçu peut être échantillonné sans erreur due à l'interférence des impulsions adjacentes (appelée interférence inter-symbole).
- Le meilleur moment pour échantillonner la forme d'onde reçue est celui où la hauteur de l'ouverture de l'œil est la plus grande. Cette hauteur est réduite en raison de la distorsion d'amplitude du signal de données. La distance verticale entre le sommet de l'ouverture de l'œil et le niveau maximal du signal donne le degré de distorsion. Plus l'œil se ferme, plus il est difficile de distinguer les uns des zéros dans le signal.
- La hauteur de l'ouverture de l'œil au temps d'échantillonnage spécifié indique la marge de bruit ou l'immunité au bruit. La marge de bruit est le rapport en pourcentage entre la tension de crête du signal V_1 pour une séquence de bits alternatifs (définie par la hauteur de l'ouverture de l'œil) et la tension maximale du signal V_2 , mesurée à partir du niveau de seuil, comme le montre la figure II.2. C'est-à-dire :

$$\text{Marge de bruit}(\%) = \frac{V_1}{V_2} \times 100\% \quad (\text{III.4})$$

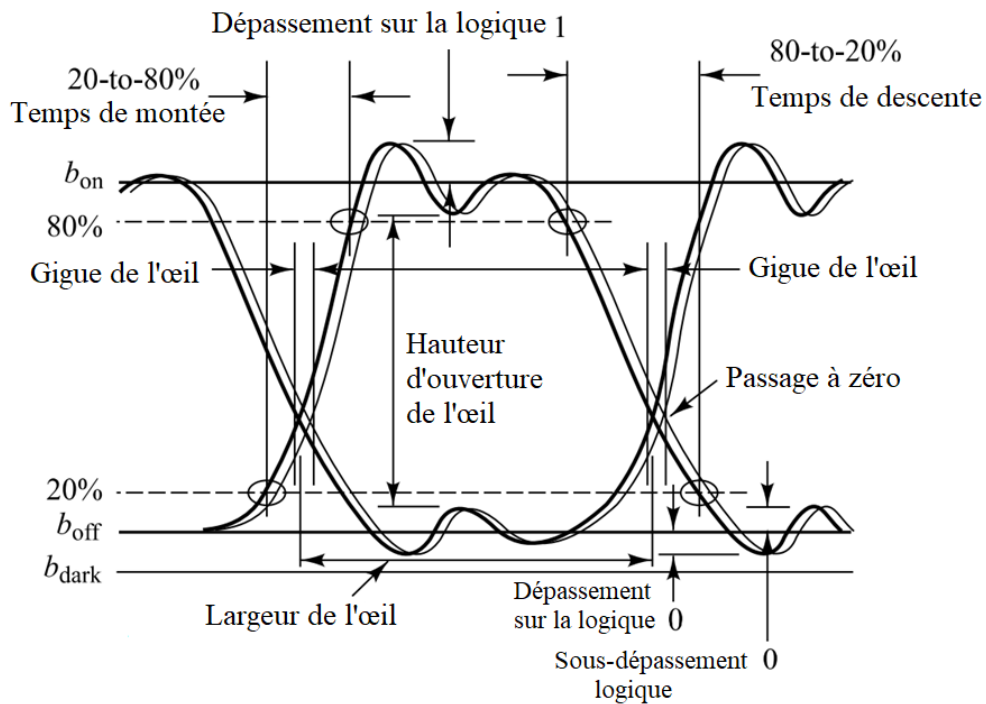


Figure III. 2 Configuration générale d'un diagramme de l'œil montrant[19]

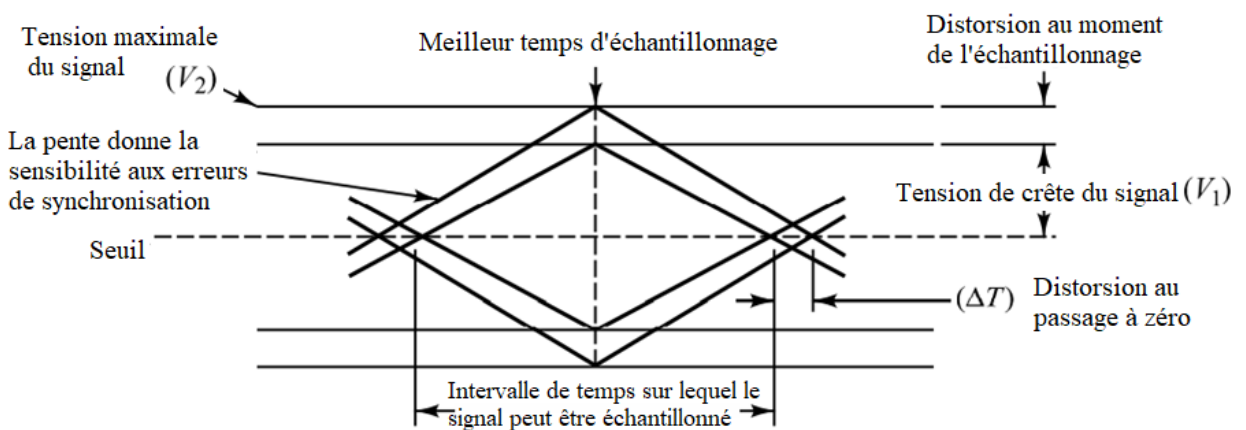


Figure III. 3 Diagramme de l'œil simplifié montrant les principaux paramètres de performance[19]

- La vitesse à laquelle l'œil se ferme lorsque le temps d'échantillonnage varie (c'est-à-dire la pente des côtés du motif de l'œil) détermine la sensibilité du système aux erreurs de synchronisation. La possibilité d'erreurs de synchronisation augmente à mesure que la pente devient plus horizontale.
- La gigue temporelle (également appelée gigue de bord ou distorsion de phase) dans un système à fibre optique provient du bruit dans le récepteur et de la distorsion des impulsions dans la fibre optique. Une gigue excessive peut entraîner des erreurs de bit, car elle peut produire des incertitudes dans la synchronisation de l'horloge. Cette incertitude temporelle fait qu'un récepteur perd la synchronisation avec le flux binaire entrant, ce qui entraîne une interprétation incorrecte des impulsions logiques 1 et 0. Si le signal est échantillonné au milieu de l'intervalle de temps (c'est-à-dire à mi-chemin entre les moments où le signal franchit le niveau seuil), la

quantité de distorsion ΔT au niveau seuil indique la quantité de gigue. La gigue temporelle est donc donnée par :

$$Gigue\ temporelle(\%) = \frac{\Delta T}{T_b} \times 100\% \quad (III.5)$$

où T_b est un intervalle d'un bit.

- Traditionnellement, le temps de montée est défini comme l'intervalle de temps entre les points où le front montant du signal atteint 10% de son amplitude finale et le moment où il atteint 90% de son amplitude finale. Cependant, lors de la mesure de signaux optiques, ces points sont souvent obscurcis par le bruit et les effets de gigue. Ainsi, on mesure normalement les valeurs plus distinctes aux points de seuil de 20 et 80 %. Pour convertir le temps de montée de 20 à 80 % en un temps de montée de 10 à 90 %, on peut utiliser la relation approximative suivante :

$$T_{10-90} = 1.25 \times T_{20-80} \quad (III.6)$$

Une approche similaire est utilisée pour déterminer le temps de chute.

- Tout effet non linéaire dans les caractéristiques de transfert du canal créera une asymétrie dans le motif de l'œil. Si un flux de données purement aléatoire passe par un système purement linéaire, toutes les ouvertures de l'œil seront identiques et symétriques.

III.6. Modèle de simulation proposé et paramétrages :

Le modèle de simulation proposé est un système de transmission optique DWDM à 16 canaux avec un débit de données binaires de 10 Gbps par canal, on va étudier le modèle avec un espacement entre canaux de 100 GHz puis de 50 GHz pour différents modèles d'amplificateurs optiques simples et hybrides. Le schéma fonctionnel du système proposé est illustré sur la figure III.4. Un transmetteur DWDM à 16 canaux relié à un multiplexeur DWDM est utilisé pour l'émission, l'émetteur comprend une source de données PRBS pour produire une séquence de bits pseudo aléatoire, un générateur d'impulsions avec codage NRZ pour convertir les données binaires en impulsions électriques, une source laser à onde continue CW et un modulateur Mach-Zehnder externe dans chaque section d'émetteur. Les 16 faisceaux laser sont générés dans la Bande-C (Bande conventionnelle 1530nm-1565nm), la bande de fréquence pour l'espacement entre canaux de 100 GHz est de 192.7 THz à 194.2 THz, et de 193 THz à 193.75 THz pour l'espacement entre canaux de 50 GHz.

La fibre monomode (SMF-28e+) et la fibre compensatrice de dispersion DCF sont utilisées comme support de transmission, la distance L_{DCF} est calculées à partir de l'équation suivante :

$$D_{SMF}L_{SMF} + D_{DCF}L_{DCF} = 0 \quad (III.7)$$

avec L_{SMF} et D_{SMF} sont la longueur et le coefficient de dispersion respectivement de SMF, L_{DCF} et D_{DCF} sont la longueur et le coefficient de dispersion de la fibre de compensation de dispersion (DCF).

Un récepteur DWDM pour démultiplexer les 16 canaux, qui comprend une photodiode PIN, un filtre Bessel passe bas et un 3R régénérateur pour le connecter avec le BER Analyser.

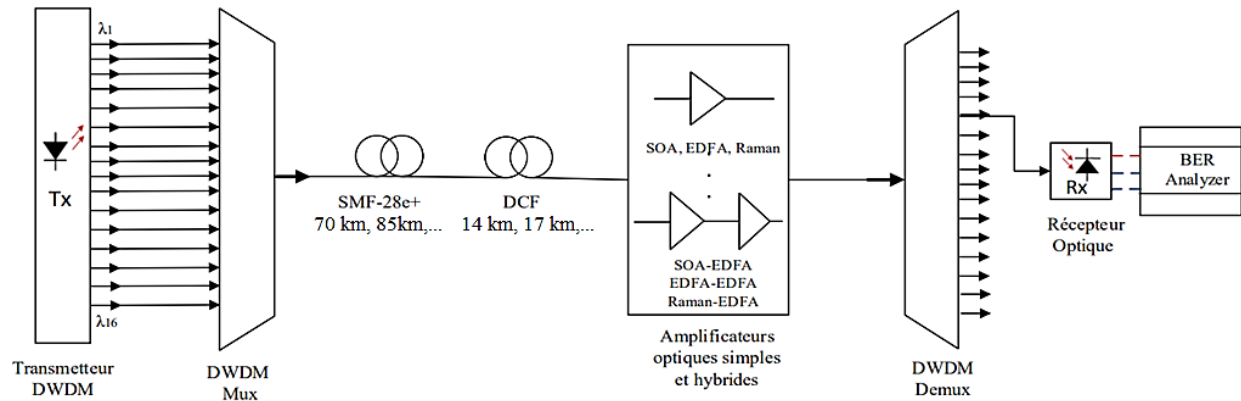


Figure III. 4 Schéma fonctionnel du système proposé

La simulation est effectuée avec le logiciel Optisystem 15.2 en faisant varier la distance du support optique L (avec $L=L_{SMF}+L_{DCF}$), afin d'évaluer les performances des amplificateurs optiques individuels (SOA, EDFA et Raman) puis hybrides (EDFA-EDFA, Raman-EDFA et SOA-EDFA) basés sur une topologies préamplificateur, le BER Analyser est utilisé pour mesurer le BER, le facteur de qualité et le diagramme l'œil à la fréquence de réception 193.1Thz.

Composants	Paramètres et Valeurs
Source des données	Longueur de la séquence 128 Bits Echantillon par bit 64 Taux de rafraîchissement 10^9 symboles/s
DWDM Transmitter	Espacement des fréquences 100 GHz / Fréquence 192,7 THz Espacement des fréquences 50 GHz / Fréquence 193 THz Ports de sortie 16 Débit binaire PRBS 10 Gbit/s Modulation de codage NRZ 0 dBm Type de transmetteur EML
DWDM Mux / Demux	Ports d'entrée / sortie 16 Espacement des fréquences 100 GHz / Bp 100 GHz Espacement des fréquences 50 GHz Bp 50 GHz Type de filtre Gaussien
Smf-28e+	Longueur d'onde de référence 1550 nm Atténuation 0,19 dB/km Dispersion 17 ps/(nm.km) Pente de dispersion 0,09 ps/(nm ² .km) Surface effective 85 μm^2 PMD 0,1 ps/km ^{0,5} Effet non linéaire activé
DCF	Atténuation 0,5 dB/km -85 ps/(nm.km)

	-0,3 ps/(nm ² .km) PMD 0,5 ps/km ^{0,5} Surface effective 22 um ²
SOA	Courant injection 0.1A Longueur 0.0003
EDFA	Longueur 7m Puissance de la pompe avant 100 mW Longueur d'onde de la pompe avant 980 nm
Raman	Longueur 10 km Nombre de Pompe 4 Longueur d'onde [0]1430 nm, [1]1440 nm, [2]1450nm, [3]1460 nm Puissance [0]410 mW, [1]440 mW, [2]470 mW, [3]440 mW

Tableau III. 1 Composants et leurs valeurs de paramètres optimisés du modèle de simulation

III.7. Résultats de simulation :

Les performances sont évaluées et comparées pour un système DWDM 16×10 Gbps en utilisant soit un simple amplificateur ; SOA, EDFA, Raman, soit un système hybride qui désigne la combinaison de deux amplificateurs ; SOA-EDFA, EDFA-EDFA et Raman-EDFA. En termes de facteur Q, de hauteur d'œil et de BER minimum avec effets de non-linéarités avec différentes distances de transmission.

Nous avons considéré une longueur de fibre optique variable entre 70 à 280 km avec un pas de 15 km. En ajoutant la longueur de la fibre compensatrice de dispersion qui correspond à 20% de la longueur de la fibre. Nous obtenons une distance globale variable entre 84 et 336 km.

III.8. Partie I : espacement de fréquence 100 GHz

La figure III.5 illustre la représentation graphique du BER en fonction de la distance pour un espacement entre canaux de 100 GHz. On remarque que le BER diminue au fur et à mesure que la distance augmente en raison des effets non linéaires qui dégradent les performances du système.

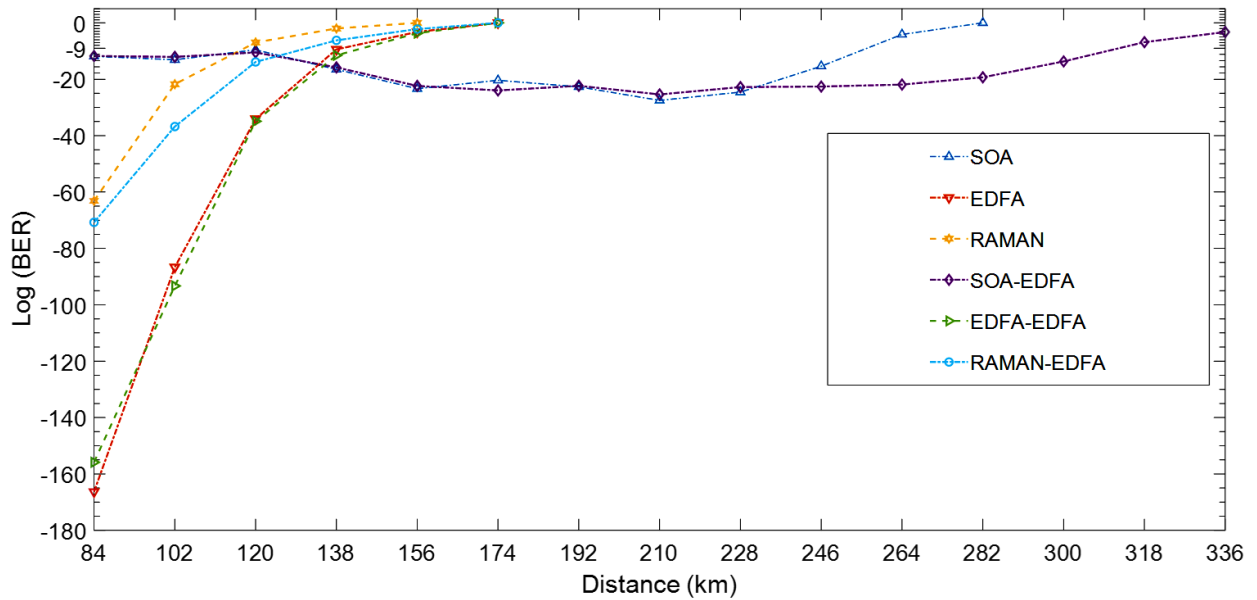


Figure III. 5 Log (BER) en fonction de la distances (espacement entre canaux 100 GHz).

Les amplificateur EDFA simple et EDFA-EDFA hybride fournissent le meilleur BER jusqu'à 120 km avec d'excellentes valeurs comprises entre 10^{-35} et 10^{-167} pour l'EDFA, et entre 10^{-35} et 10^{-156} pour l'EDFA-EDFA. L'amplificateur Raman-EDFA présente aussi un très bon BER jusqu'à la distance de 120 km et l'amplificateur Raman jusqu'à 102 km.

Par contre, Les amplificateurs SOA et SOA-EDFA sont les seul à fournir un bon BER à partir de 138 Km, avec une valeur maximale de 10^{-28} à 210 km pour le SOA. Le SOA-EDFA hybride atteint la plus grande distance jusqu'à 300 km avec une valeur maximale de 10^{-26} à 210 km

La Fig.III.6 montre le graphique du facteur de qualité Q en fonction de la distance pour un espacement entre canaux de 100 GHz. On constate que la qualité du signal décroît lorsque la distance de transmission augmente. Cela est dû à l'atténuation des fibres, aux non-linéarités des fibres et à l'augmentation de l'ASE lorsque la distance de transmission augmente.

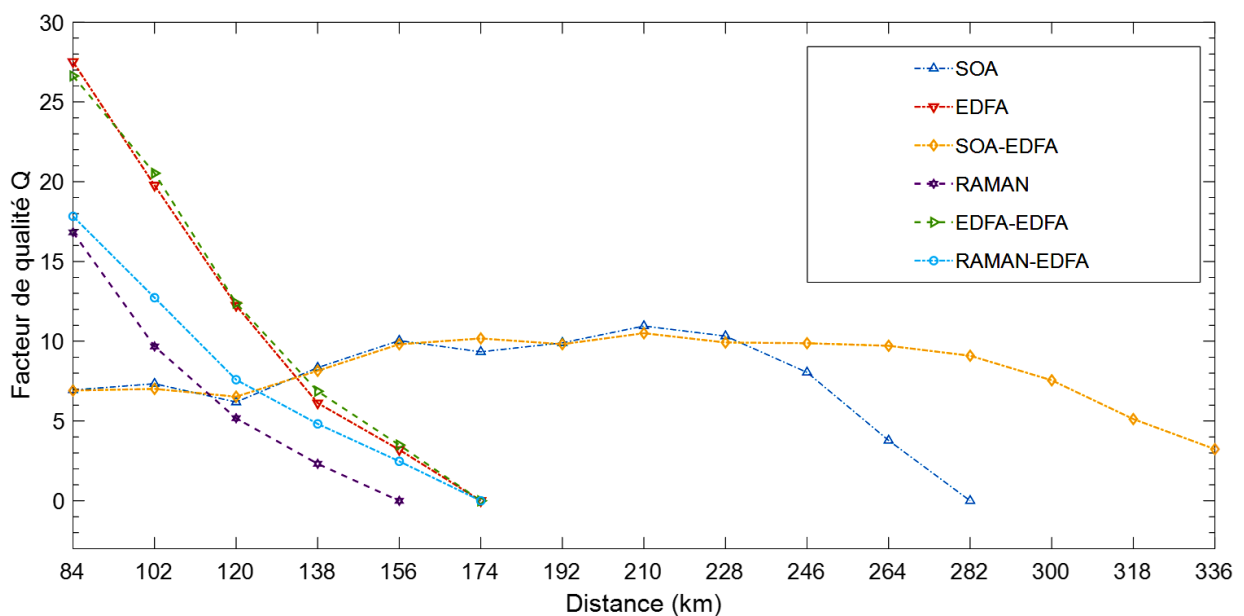


Figure III. 6 Facteur de qualité Q en fonction de la distance (espacement entre canaux 100 GHz).

Les amplificateurs EDFA simple et EDFA-EDFA hybride présentent le facteur de qualité Q le plus élevé pour la distance allant jusqu'à 120 km avec des valeurs allant de 12 à 27 pour l'EDFA et 12 à 26 pour l'EDFA-EDFA, suivit de Raman-EDFA entre 7 et 17, puis Raman simple jusqu'à 102 km. Mais au-delà de 120 km, l'amplificateurs hybride SOA-EDFA fournit un bon facteur Q avec des valeurs entre 8 et 10 pour une distance allant jusqu'à 300 km

La figure III.7 montre la représentation du digramme de l'œil des amplificateurs EDFA simple et EDFA-EDFA hybride pour 84 km et pour 120 km. (Espacement 100 GHz)

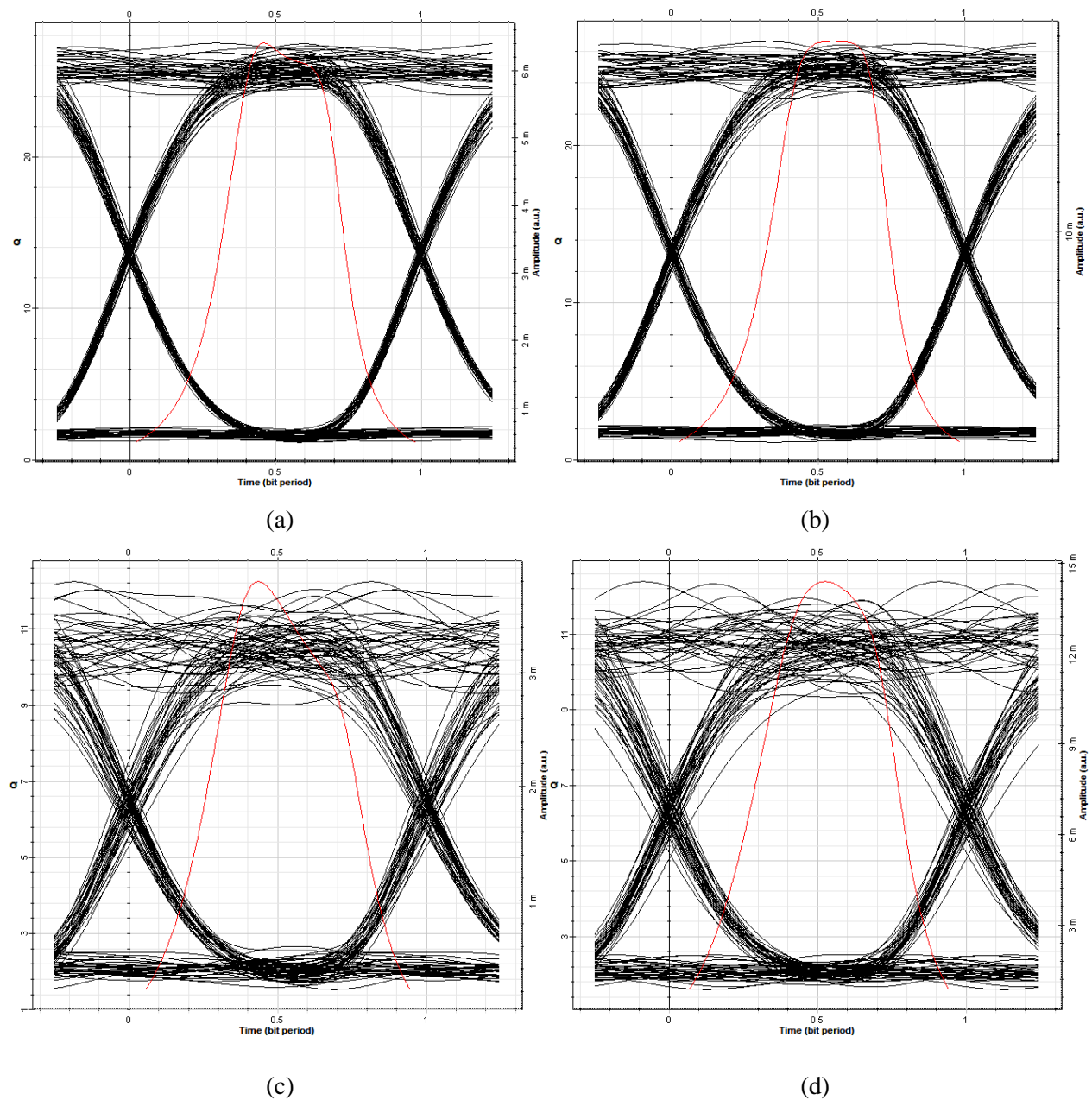


Figure III. 7 Diagramme de l'œil : (a) EDFA à 84 km, (b) EDFA-EDFA à 84 km, (c) EDFA à 120 km, et (d) EDFA-EDFA à 120 km

La figure III.8 montre la représentation du digramme de l'œil des amplificateurs SOA simple et SOA-EDFA hybride à 210 km. (Espaceur 100 GHz)

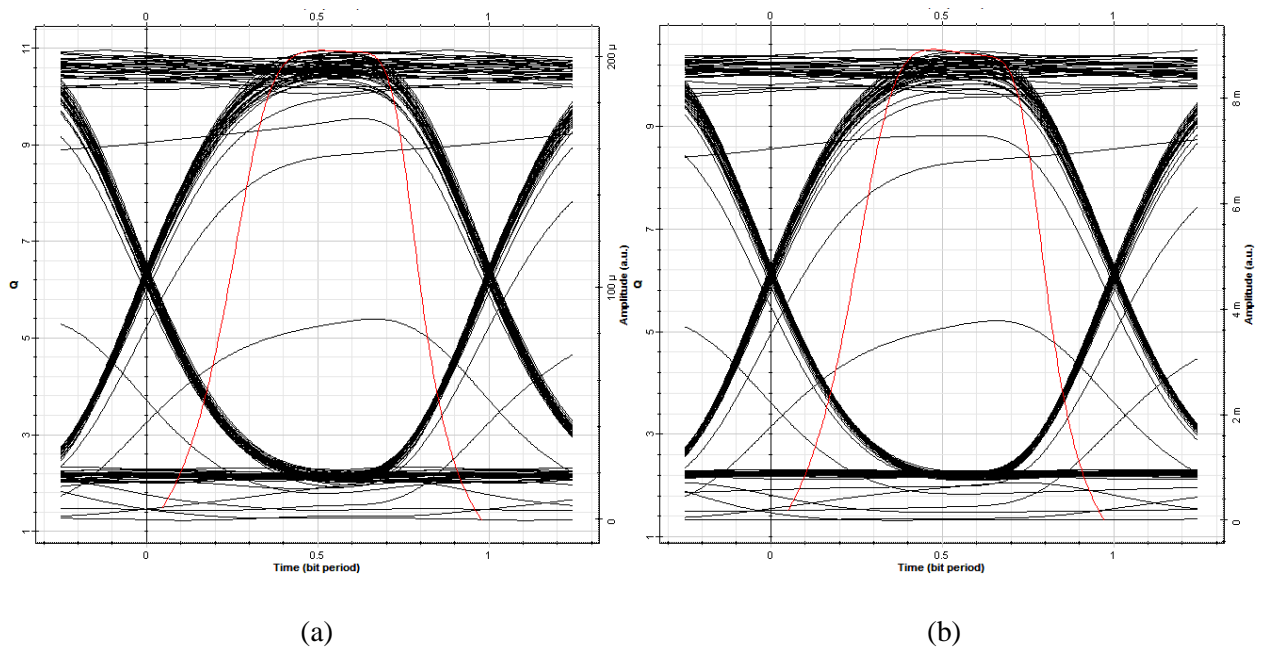
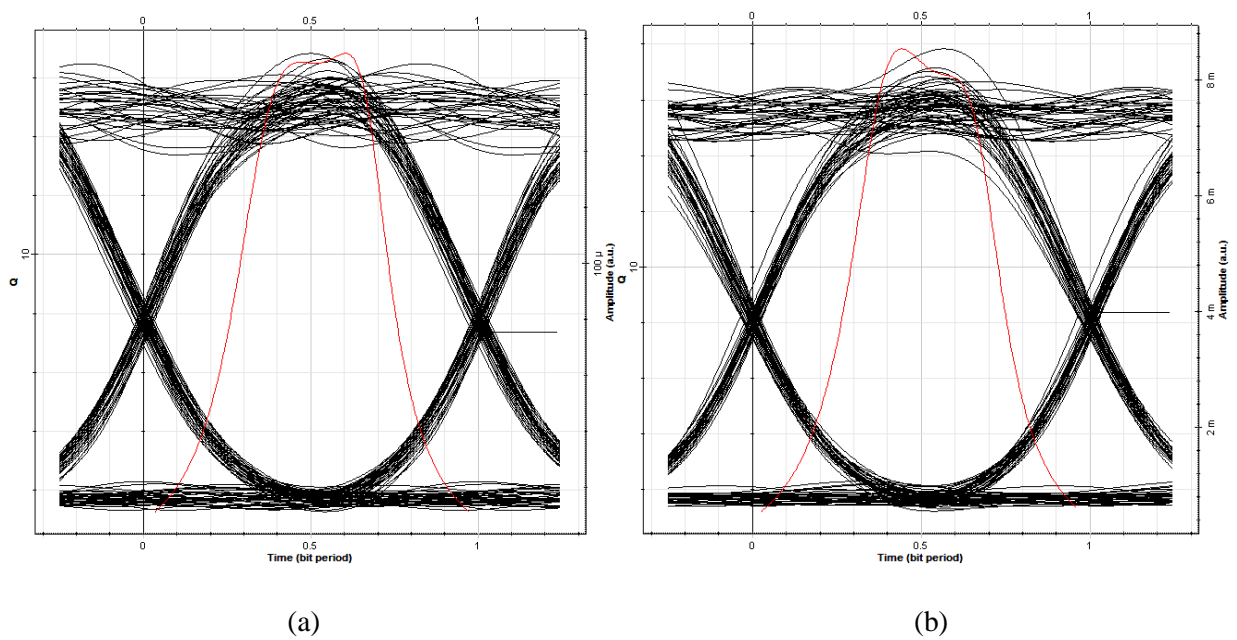


Figure III. 8 Diagramme de l'œil : (a) SOA à 210 km, (b) SOA-EDFA à 210 km

La figure III.19 montre la représentation du digramme de l'œil des amplificateurs Raman simple et Raman-EDFA hybride pour 84 km et pour 102 km. (Espaceur 100 GHz)



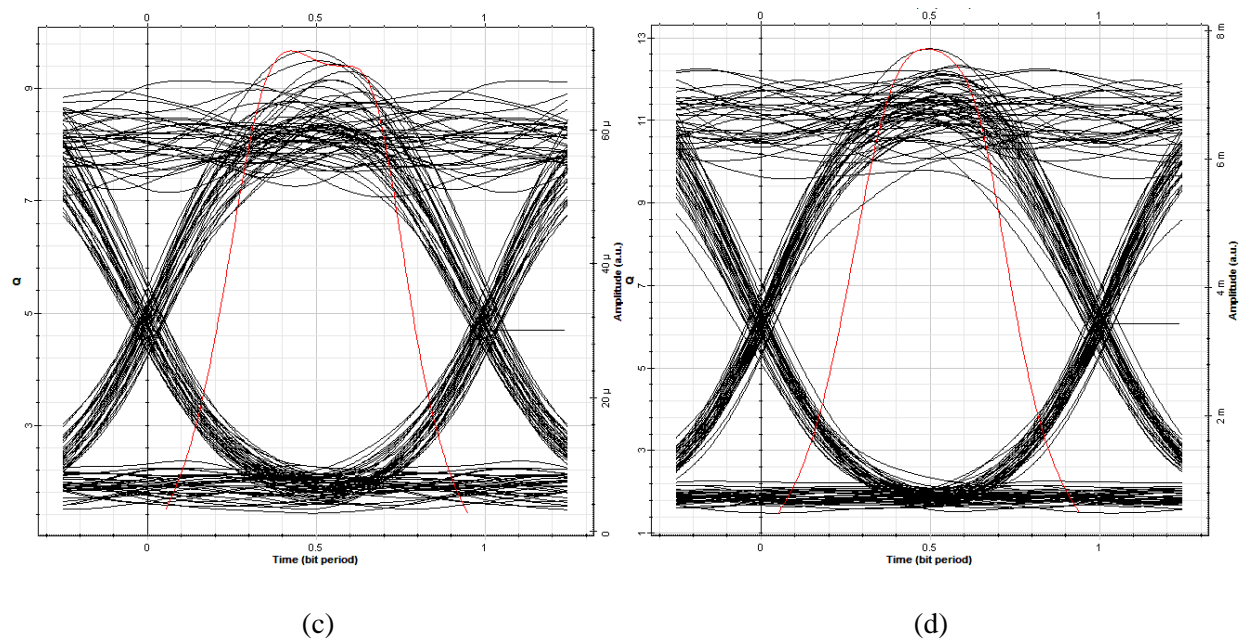


Figure III. 9 Diagramme de l'œil (a) Raman à 84 km, (b) Raman-EDFA à 84 km, (c) Raman à 102 km, et (d) Raman-EDFA à 120 km

Sur les figures III. 7,8 et 9 on distingue que l'ouverture de l'œil est plus élevée pour les systèmes hybride par rapport aux systèmes utilisant un simple amplificateur que pour toutes les différentes distances, la hauteur d'ouverture de l'œil pour tous les amplificateurs hybrides (EDFA-EDFA, Raman-EDFA et SOA-EDFA) est plus grande que celle des amplificateurs simples (SOA, EDFA et Raman), ce qui implique une meilleure qualité de transmission pour les amplificateurs hybrides avec moins de bruit.

III.9. Partie II : espacement de fréquences 50 GHz

La figure III.10 illustre le graphique du BER en fonction de la distance pour un espacement entre canaux de 50 GHz. On voit clairement que le BER diminue au fur et à mesure que la distance augmente en raison de l'atténuation et des effets non linéaires qui dégradent les performances du système.

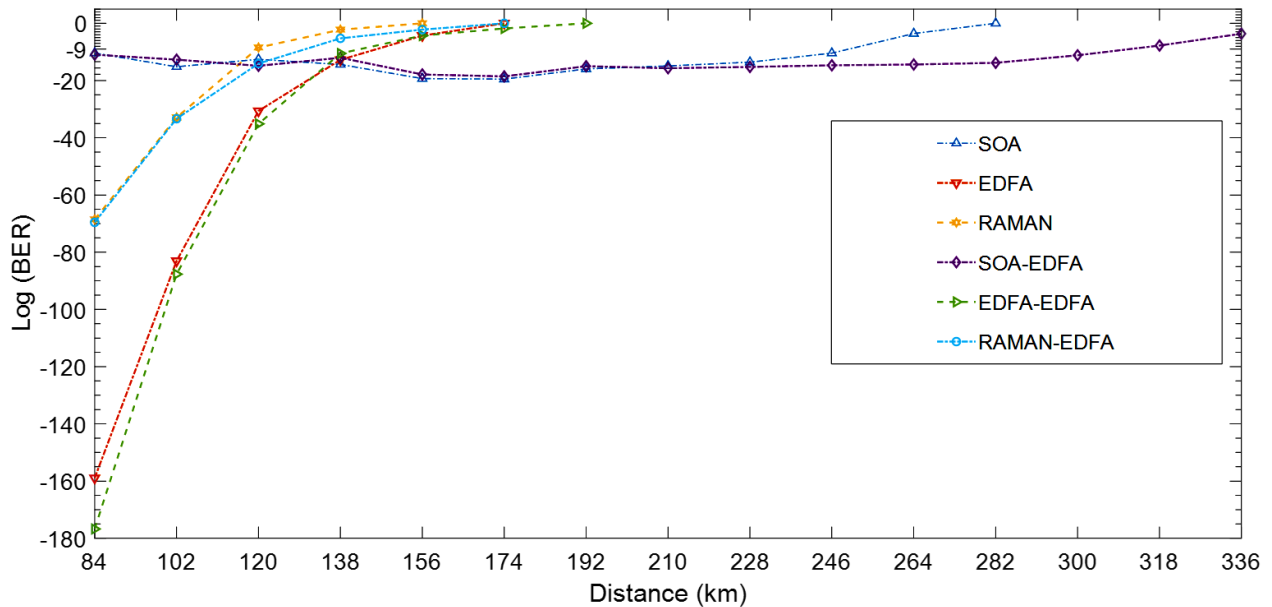


Figure III. 10 Log (BER) en fonction de la distances (espacement entre canaux 50 GHz).

L'amplificateur hybride EDFA-EDFA fournit le meilleur taux d'erreur binaire pour une distance de 120 km avec d'excellentes valeurs comprises entre 10^{-36} et 10^{-177} , suivit par l'EDFA simple avec des valeurs allant de 10^{-31} à 10^{-159} . La combinaison Raman-EDFA donne aussi un très bon BER ; avec des valeurs allant de 10^{-15} et 10^{-70} , enfin, l'amplificateur Raman simple entre 10^{-9} et 10^{-69} .

L'amplificateur SOA-EDFA hybride présente un meilleur BER au-delà de 120 km pour une distance jusqu'à 300 km.

La Fig.III.11 montre la variation du facteur de qualité Q en fonction de la distance avec un espacement entre canaux de 100 GHz. On s'aperçoit que la qualité du signal s'affaiblit en fonction que la distance de transmission augmente. Cela est dû à l'atténuation des fibres, aux non-linéarités des fibres et à l'augmentation du bruit lorsque la distance de transmission augmente.

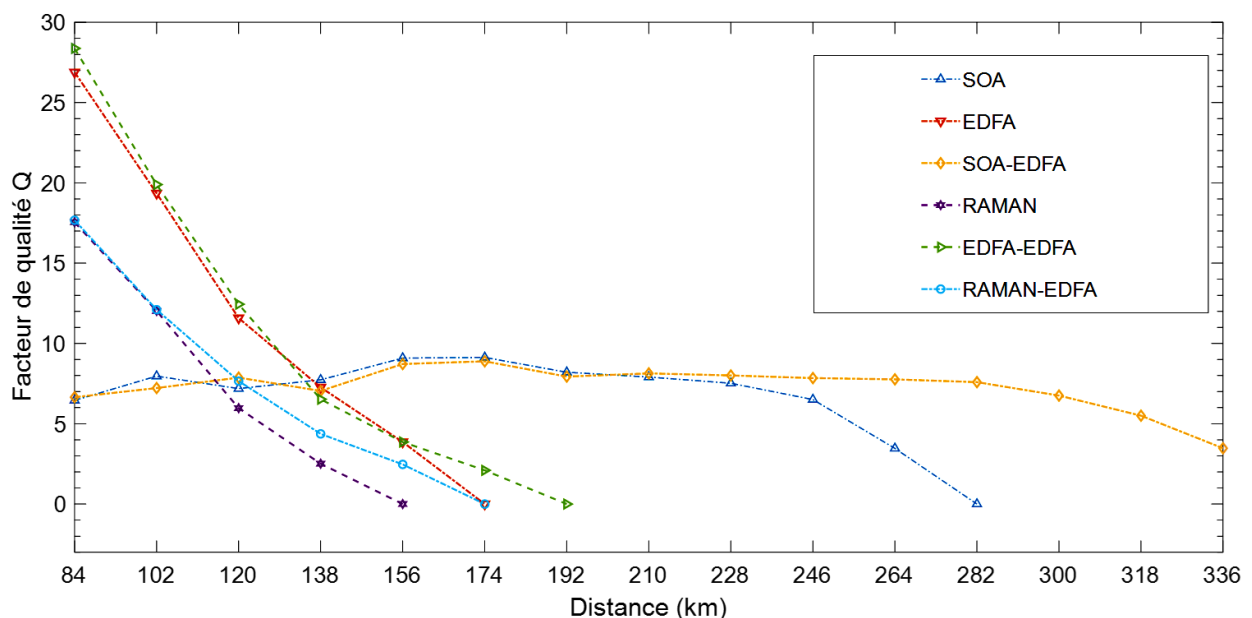


Figure III. 11 Facteur de qualité Q en fonction de la distance (espacement entre canaux 50 GHz).

L'amplificateur hybride EDFA-EDFA offre le meilleur facteur de qualité Q pour la distance allant jusqu'à 120 km avec des valeurs entre 12 et 28, suivit de l'EDFA simple entre 11 et 26, puis vient Raman-EDFA entre 7 et 17, et Raman simple jusqu'à 102 km. Mais au-delà de 120 km, seul les amplificateurs SOA et SOA-EDFA fournissent un bon facteur Q avec des valeurs autour de 7 et 9, mais le SOA-EDFA hybride a permis au système d'atteindre une distance de 300 km

La figure III.12 montre la représentation du digramme de l'œil des amplificateurs EDFA simple et EDFA-EDFA hybride à 84 km et 120 km. (Espacement 50 GHz)

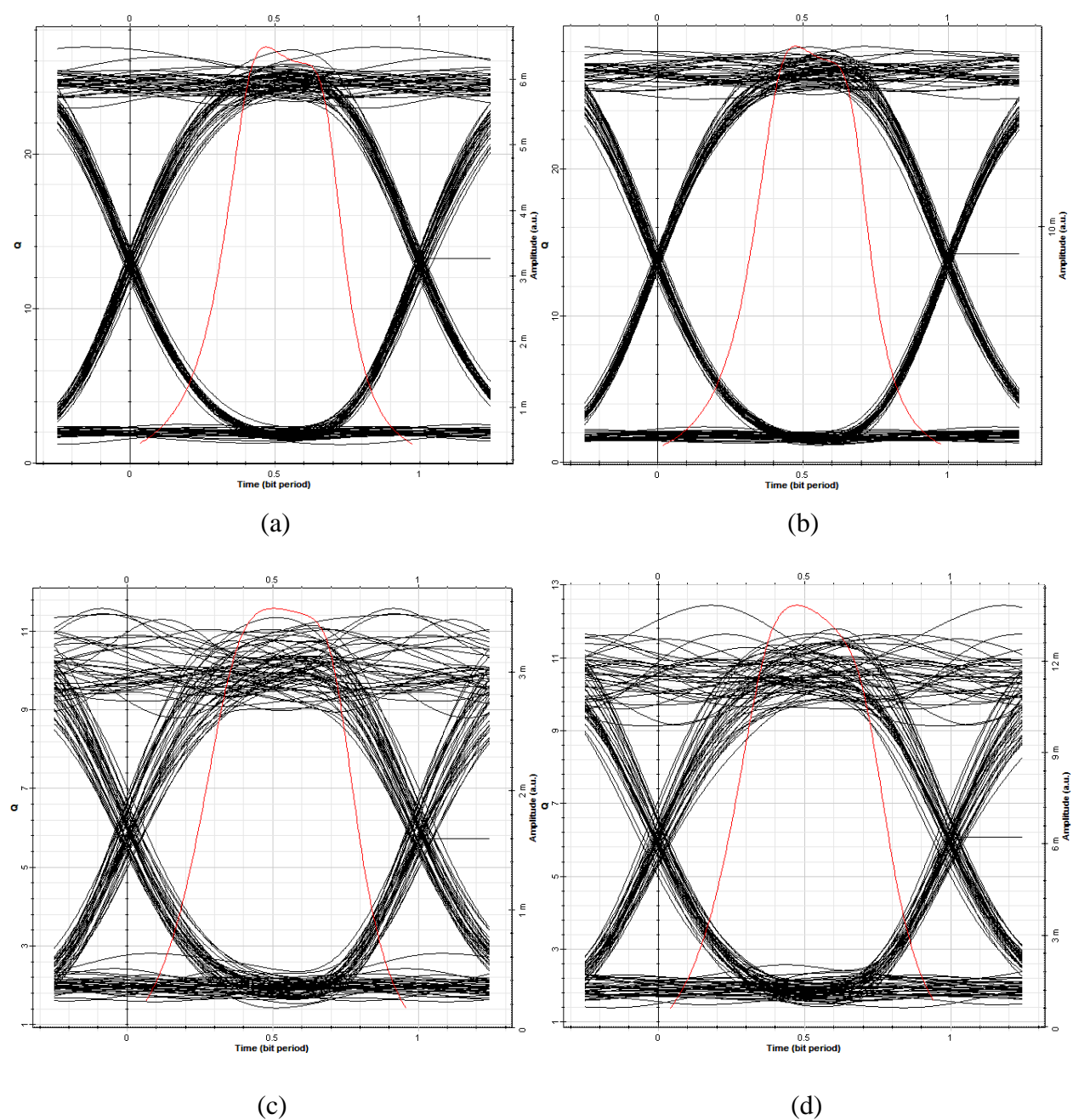


Figure III. 12 Diagramme de l'œil (a) EDFA à 84 km, (b) EDFA-EDFA à 84 km, (c) EDFA à 120 km, et (d) EDFA-EDFA à 120 km

La figure III.13 montre la représentation du digramme de l'œil des amplificateurs SOA simple et SOA-EDFA hybride à 174 km. (Espacement 50 GHz)

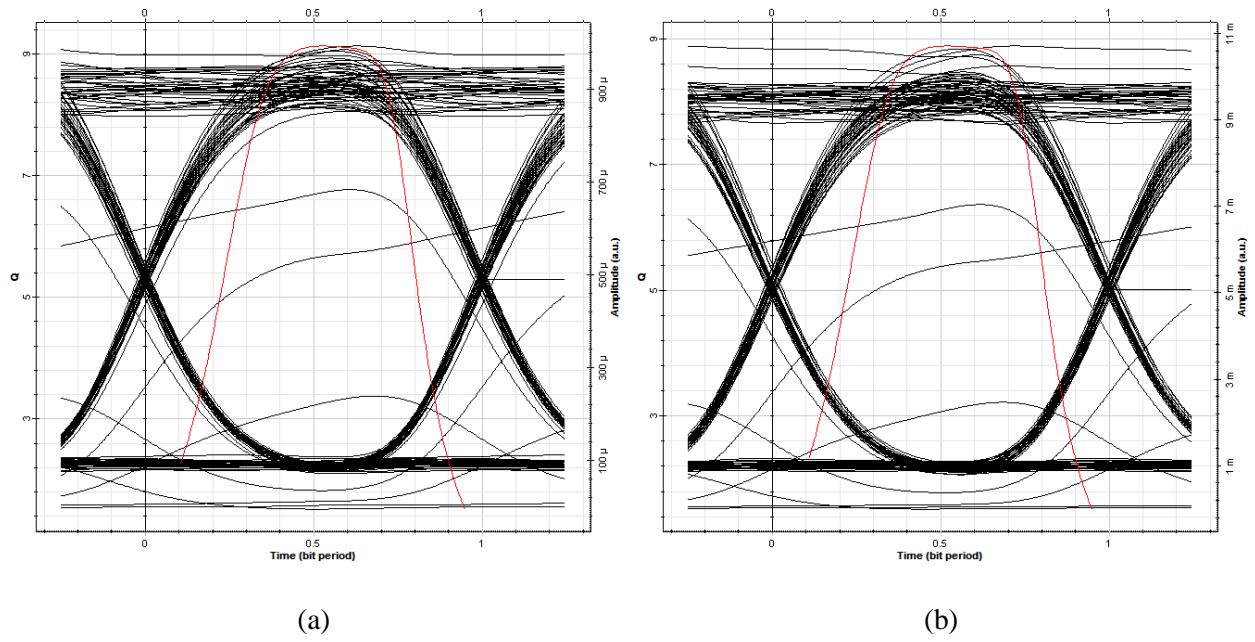
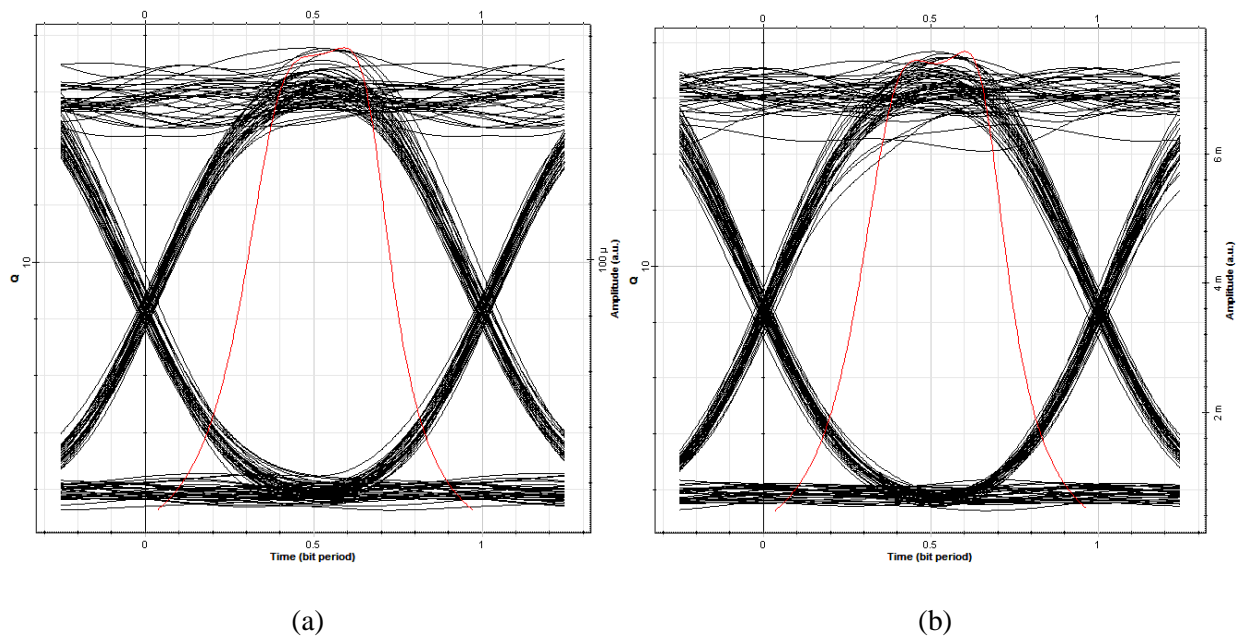


Figure III. 13 Diagramme de l'œil : (a) SOA à 174 km et (b) SOA-EDFA à 174 km

La figure III.14 montre la représentation du digramme de l'œil des amplificateurs RAMAN simple et RAMAN-EDFA hybride pour 84 km et pour 102 km. (Espacement 50 GHz)



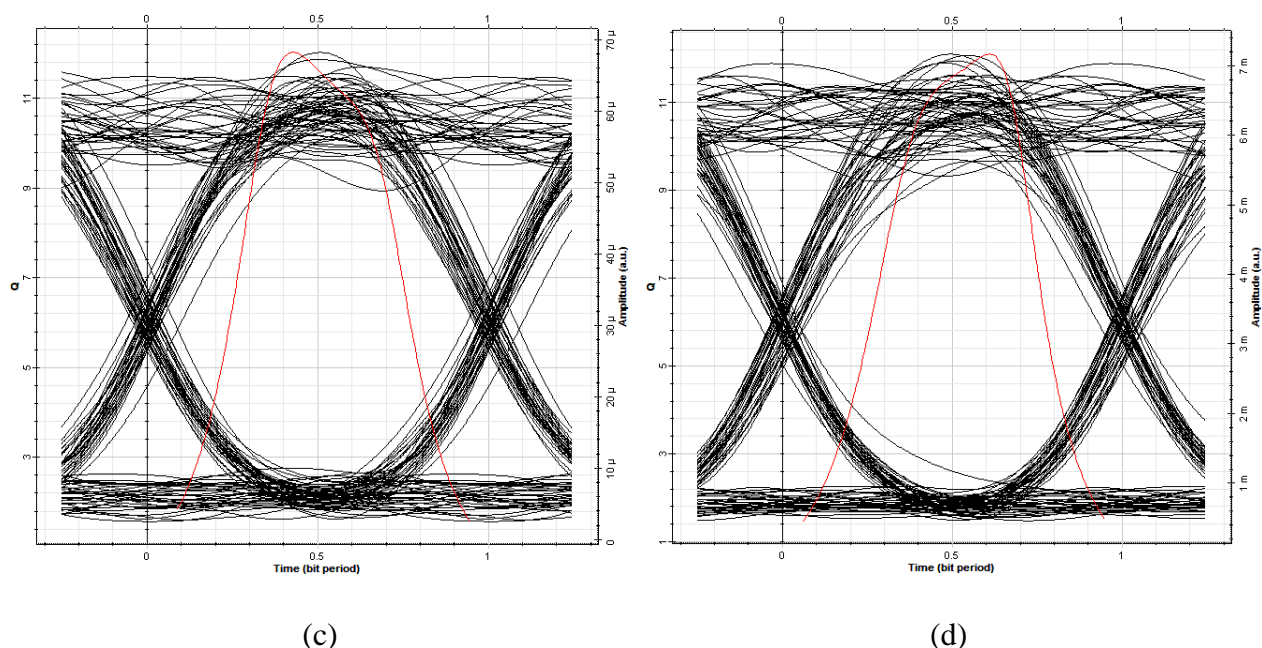


Figure III. 14 Diagramme de l'œil (a) Raman à 84 km, (b) Raman-EDFA à 84 km, (c) Raman à 102 km, et (d) Raman-EDFA à 102 km

Dans les figures III.12, 13 et 14 on remarque que pour toutes les distances, la hauteur d'ouverture de l'œil pour tous les amplificateurs hybrides (EDFA-EDFA, Raman-EDFA et SOA-EDFA) est plus importante que celle des amplificateurs simples (SOA, EDFA et Raman), ce qui implique une meilleure qualité pour les amplificateurs hybrides avec moins de bruit.

III.10. Conclusion :

Le présent travail a mis en évidence les performances du système de transmission optique DWDM 16×10 Gbps dans la Bande-C en présence des effets non linéaires, avec différentes configurations des amplificateurs optiques dans une topologie préamplificateur.

Nous avons étudié au cours de ce chapitre le système à un espacement de fréquence de 100 GHz puis de 50 GHz, et il a été démontré que la configuration hybride EDFA-EDFA est la mieux adaptée au système de transmission optique DWDM 16x10 Gbps, avec une meilleure qualité et moins de bruit pour une distance allant jusqu'à 120 km. Le SOA-EDFA hybride est de bien meilleure qualité que le SOA simple pour la distance dépassant les 120 km.

Conclusion générale :

L'objectif principal de ce mémoire était de concevoir un système de transmission optique et d'étudier les amplificateurs optiques pour une application 5G. A cet effet, nous avons commencé par décrire un système de communication par fibre optique. Puis on a défini le rôle et le principe de fonctionnement pour chacun de ces éléments constitutifs d'une liaison sur fibre optique.

Dans le second chapitre, nous avons étudié les différents amplificateurs optiques, le processus de leurs fonctionnements, leurs utilités et leur importance primordiale pour garantir une transmission de qualité et aboutir à une distance de transmission souhaité.

Dans le troisième chapitre, nous avons conçu et étudié un système DWDM 16x10 Gbps en utilisant différentes configurations d'amplificateurs optiques dans une topologie préamplificateurs, afin d'avoir la meilleure qualité de transmission en fonction de la distance. Pour cela, nous avons commencé par choisir un bon paramétrage des amplificateurs qui correspond au mieux pour le système présenté dans le tableau III.1.

Nous avons étudié les performances du système dans la bande-C avec un espacement entre canaux de 100 Hz et 50 GHz. Il a été démontré que l'amplificateur hybride EDFA-EDFA est la meilleure configuration pour le système de transmission haut débit 10 Gbps, en présentant d'excellents résultats jusqu'à 120 km par rapport aux autres amplificateurs. La configuration de l'amplificateur hybride SOA-EDFA a permis d'atteindre une grande distance jusqu'à 300 km avec une bonne qualité de transmission.

On peut déduire par ce travail, que la combinaison de deux amplificateurs en série (SOA-EDFA, EDFA-EDFA ou Raman-EDFA) dans une topologie préamplificateur, permet de réduire d'une façon significative le bruit optique induit par le premier amplificateur.

Références

- [1] B. Mukherjee, I. Tomkos, M. Tornatore, Peter Wi, « Springer Handbook of Optical Networks », Springer International Publishing_Springer, 2020.
- [2] « 5G - Fifth generation of mobile technologies », *ITU*.
<https://www.itu.int:443/en/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>.
- [3] X. Liu, « Evolution of Fiber-Optic Transmission and Networking toward the 5G Era », *iScience*, vol. 22, p. 489-506, déc. 2019.
- [4] H. M. Obaid et H. Shahid, « Performance evaluation of hybrid optical amplifiers for a 100 × 10 Gbps DWDM system with ultrasmall channel spacing », *Optik*, vol. 200, p. 163404, janv. 2020.
- [5] Choudhary et K. Garg, « Design and Analysis of Optical Amplifiers for 5G A.pdf », 2020.
- [6] G. P. Agrawal, « Fiber-Optic Communication Systems », Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, 2021.
- [7] P. Lecoy, « Fibre-Optic Communications », Wiley-ISTE, 2008.
- [8] S. Kumar, M. Jamal Deen, « Fiber Optic Communications_ Fundamentals and Applications », Wiley, 2014.
- [9] A. Yariv and P. Yeh, « Photonics_Optical Electronics in Modern Communications », 6th edn, Oxford University Press, 2007.
- [10] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, « Fundamentals of Photonics », Wiley-Interscience, 2007.
- [11] Govind P. Agrawal, « Fiber-Optic Communication Systems », Fourth Edition, 2010.
- [12] « T-REC-G.652-201611-I!!PDF-E.pdf ».
- [13] « SMF-28e+® fibre optique G.652.D ».
- [14] « Corning® LEAF® Optical Fiber G.655.D ».
- [15] G. Keiser, « Optical Fiber Communications », McGraw-Hill Education, 2010.
- [16] Govind P. Agrawal, « Lightwave Technology Telecommunication Systems », Wiley, 2005.
- [17] B. D. Guenther and D. G. Steel, « Encyclopedia of modern optics », V.1-5, Elsevier, 2018.
- [18] A. B. Dar et R. K. Jha, « Chromatic dispersion compensation techniques and characterization of fiber Bragg grating for dispersion compensation », *Opt Quant Electron*, vol. 49, n° 3, p. 108, févr. 2017.
- [19] G. Keiser, « Fiber Optic Communications », Springer, 2021.
- [20] K. Thyagarajan, Ajoy Ghatak, « Fiber Optic Essentials », John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [21] N. S. Effendi, Y. Natali, et C. Apriono, « Study of EDFA Placement in 10 Gbps Single-Mode Fiber Link to Support 5G Networks », in *2020 FORTEI-International Conference on Electrical Engineering (FORTEI-ICEE)*, sept. 2020, p. 134-139.
- [22] M. N. Islam, « Raman amplifiers for telecommunications: physical principles to systems », in *Active and Passive Optical Components for WDM Communications IV*, oct. 2004.
- [23] S. Singh et R. S. Kaler, « Review on recent developments in hybrid optical amplifier for dense wavelength division multiplexed system », *OE*, vol. 54, n° 10, p. 100901, oct. 2015.

- [24] N. S. Effendi, Y. Natali, et C. Apriono, « Quality Signal Degradation in Single-Channel Fiber Using 10 Gbps Bit Rate », *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, vol. 11, n° 1, p. 105-112, 2021.
- [25] « OptiSystem Overview », *Optiwave*. <https://optiwave.com/optisystem-overview/> (2022).
- [26] C. C. K. Chan, « *Optical Performance Monitoring: Advanced Techniques for Next-Generation Photonic Networks* », Academic Press, 2010.
- [27] M.A. Ali, A.F. Elrefaie, R.E. Wagner, S.A. Ahmed, « A detailed comparison of the overall performance of 980 and 1480 nm pumped EDFA cascades in WDM multiple-access light-wave networks ». *J. Lightw. Technol.* 14, 1996.