



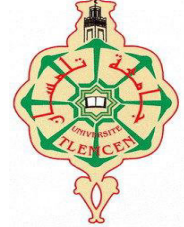
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen

Faculté de Technologie



Département de Génie Electrique et Electronique (GEE)

Mémoire pour l'obtention du diplôme de

Master en Télécommunication

Option : Réseaux et Systèmes de Télécommunication(RST)

Institut Mines Télécom/Télécom SudParis

Département Electronique et Physique (EPH)

Projet ANR DIQDOT

*« Etude d'une transmission d'un signal modulé
directement par une source optique laser
à un débit de 10 Gbit/s »*

présenté par

Melle Imane CHIALI

Soutenu le 12 Septembre 2013 devant le jury composé de :

Mr Riad-Ahmed.BORSALI	Président	M.C.A Université de Tlemcen
Mr Fethallah.KARIM	Examineur	M.C.B Université de Tlemcen
Mr Badr-Eddine BENKELFAT	Professeur	Institut Mines-Telecom, TelecomSudParis (Evry, France)
Mr Yann.FRIGNAC	Encadreur	M.C Institut Mines-Telecom, , Telecom SudParis (Evry, France)
Mr Omar SEDDIKI	Encadreur	Professeur Université de Tlemcen
Mr Djalal-Falih.BENDIMERAD	Co Encadreur	Invité C Institut Mines-Telecom, , Telecom SudParis (Evry, France)

Dédicaces et Remerciements

Le stage de formation de fin d'études, que j'ai effectué au sein de l'Institut de Télécom SudParis est une expérience remarquable qui m'a été bénéfique sur le plan scientifique et sur le plan relations humaines.

Je commencerai à m'exprimer et à écrire ces quelques lignes en dédiant ce manuscrit à mon très cher et regretté grand-père «Hadj Fethi BELKHODJA » auteur du livre «Mémoires d'un résistant», qui donnait beaucoup d'importance aux études, il m'a toujours encouragé à aller très loin, c'était un grand père exemplaire qui a laissé un grand vide derrière lui, que nul ne peut combler, je lui adresse toute ma gratitude , «Baba, que Dieu t'accorde sa miséricorde et t'accueille dans son vaste paradis »

Je n'oublie pas aussi ma très chère grand-mère qui avec sa sagesse, sa tendresse, son savoir vivre m'a soutenu énormément durant ce parcours.

Je passe maintenant à mes chers parents papa et maman qui sans eux ce parcours n'aurait pas eu lieu, qui m'ont donné une éducation exemplaire qui m'a permis de m'intégrer facilement dans une société autre que la notre, d'avoir été toujours à mes côtés et m'ont donné le réconfort nécessaire durant les moments difficiles, afin de surmonter toutes les difficultés que j'ai rencontrées, je les remercie en dédiant ce manuscrit. Je continue à remercier mon très cher et unique frère Anes qui était toujours à mes côtés par ses conseils et sa précieuse attention de même que mes chères petites sœurs Ghizlene et Rania qui m'ont soutenu de leur tendresse et leur gentillesse.

Je continue en citant Mr Omar SEDDIKI de m'avoir donné la chance de poursuivre une formation en cotutelle entre l'Université de Tlemcen et l'Institut Télécom SudParis, je le remercie pour sa modestie, sa générosité et sa gentillesse il m'a été d'une grande aide durant ce stage. Je remercie aussi une deuxième personne qui m'a accueilli chaleureusement dans son département Mr Badr-Eddine BENKELFAT, je lui exprime toute ma gratitude et ma reconnaissance. Je passe maintenant à mes deux encadreurs Yann FRIGNAC et Djalal Falih BENDIMERAD, en commençant par Yann FRIGNAC : un encadreur exceptionnel , qui m'a donné des conseils, m'a appris beaucoup de choses durant ce stage, entre autres une sortie au niveau du laboratoire «Alcatel III-V lab » sur le site de Marcoussis, ou j'ai vu le côté pratique , cette visite m'a permis aussi de faire une présentation sur mon travail, je le remercie pour sa compréhension, son encadrement et son sens de l'humeur. Je passe à mon deuxième encadreur Mr Djalal Falih BENDIMERAD qui m'a été d'une aide précieuse, il m'a permis de m'intégrer facilement sachant qu'il est passé par le même chemin, je lui exprime toute ma reconnaissance et ma gratitude, parmi les membres du groupe qui m'ont accueilli Mr Yaneck GOTTESMAN qui par ses connaissances scientifiques m'a donné une vision sur les filtres optique, je le remercie de sa gentillesse.

Je bascule sur le groupe de travail en citant François LAMARE, Bruno, Abdoulaye FALL et Aida SECK, je les remercie pour tout ce qu'ils ont fait pour moi, sans oublier Mme Patricia FIXOT qui m'a aidé sur le plan administratif. Je cite aussi Mme Ydalia GARCIA qui s'est

Dédicaces et Remerciements

chargée de s'occuper de la procédure administrative au niveau d'Ery et NANO-ENNOV, là où j'ai fait mon stage en alternance. Je me retourne à ma famille et mes amis qui m'ont apporté une aide pendant les moments difficiles de mon stage que je remercie beaucoup, notamment mon oncle Mr Omar BELKHODJA chef de service de l'hôpital Compiègne ainsi que sa petite famille qui m'ont été d'un grand soutien en comblant le vide de la séparation par leur chaleur familiale. De même que mes amis de la promotion RST, plus particulièrement Sarah FEROUÏ qui occupe plutôt la place d'une sœur.

Je remercie par ailleurs les membres du jury, Mr Riad-Ahmed BORSALI d'avoir accepté de présider le jury, Mr Fehallah KARIM d'avoir examiné ce travail.

En fin je tiens à remercier tous ce que j'ai oublié de près ou de loin et m'ont aidé durant mon travail. et je remercie le bon Dieu de m'avoir donné la force et le courage d'achever ce travail.

Merci à tous.

Imane CHIALI



Table des Matières

Liste des acronymes

Liste des figures

Introduction Générale.....	1
1. Historique de la télécommunication optique.....	1
2. Différents types de réseaux.....	2
3. Contexte du projet.....	3

Chapitre 1 : Emetteur

1.1.Introduction	6
1.2.Description d'un système de transmission optique.....	6
1.3.Emetteur optique.....	6
1.4.Echantillonnage d'un signal analogique.....	7
1.5.Source laser.....	9
1.5.1. La Cavité Fabry Pérot.....	12
1.6.Techniques de modulation de la source laser.....	12
1.6.1. Modulation directe.....	14
1.6.2. Modulation externe.....	15
1.7.Format de modulation.....	15
1.7.1. Format NRZ (Non Return-to-Zero).....	16
1.7.2. Format RZ (Return-to-Zero).....	17
1.8.Conclusion.....	17

Chapitre 2 : Ligne de transmission

2.1. Introduction.....	19
2.2. La fibre optique.....	19
2.2.1. Définition de la fibre optique.....	19
2.2.2. Fonctionnement de la fibre optique.....	20
2.2.3. La fibre monomode (SMF).....	21
2.3. La propagation de l'impulsion dans une fibre monomode.....	21
2.3.1. Les effets linéaires de propagation.....	22
2.3.1.1. Les pertes de la fibre optique.....	22
2.3.1.2. La dispersion chromatique.....	24
2.3.2. Compensation des effets linéaires de la ligne de transmission.....	27
2.3.2.1. Les amplificateurs optiques dopés à l'erbium (EDFA).....	27

2.3.2.2. Compensation de la dispersion chromatique.....	31
2.4. Conclusion.....	31

Chapitre 3 : Récepteur

3.1. Introduction.....	33
3.2. Le récepteur optique.....	33
3.2.1. Détection directe.....	33
3.2.2. Photodiode.....	33
3.2.3. La décision.....	34
3.3. Les critères d'évaluation de la qualité des systèmes de transmission optique.....	35
3.3.1. Diagramme de l'œil.....	36
3.3.2. Taux d'erreur binaire (BER).....	37
3.3.3. Le facteur de qualité (Q).....	37
3.4. Conclusion.....	38

Chapitre 4 : Modèle théorique DML, mise en place numérique, résultats de validation du modèle

4.1. Introduction.....	40
4.2. Modulation directe de la diode laser.....	40
4.2.1. Le chirp du laser.....	44
4.2.1.1. Le chirp transitoire.....	44
4.2.1.2. Le chirp adiabatique.....	45
4.3. Conclusion.....	46

Chapitre 5 : Résultats de simulation

5.1. Introduction.....	48
5.2. Intérêt de la simulation.....	48
5.3. Description du système de transmission optique utilisant une diode laser modulée directement.....	48
5.4. Description de l'interface d'émission.....	49
5.4.1. Les données électriques.....	49

5.4.2. Le filtre à l'émission.....	50
5.5. Résultats de la simulation à la sortie du laser DML	51
5.6. Ligne de transmission optique.....	53
5.6.1. Fibre optique (SMF) dispersive.....	53
5.6.2. Rajout de bruit (Noise Loading).....	55
5.7. Description de l'interface de réception	56
5.7.1. L'intérêt du filtrage optique à la réception.....	56
5.7.2. Bloc de décision et comptage d'erreur.....	57
5.7.3. Evaluation de la qualité de transmission d'une liaison optique.....	58
5.8. Conclusion.....	61
Conclusion Générale et perspectives.....	63
Bibliographie.....	65

Liste des Acronymes

ASK	Amplitude Shift Keying
ASE	Amplified Spontaneous Emission
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber line
BER	Binary Error Rate
DML	Direct Modulation Laser
DSF	Dispersion Shift Fiber
DCF	Dispersion Compensating Fiber
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
ER	Extinction Ratio
FTTH	Fiber To The Home
FEC	Forward Error Correction
GVD	Group Velocity Dispersion
LAN	Local Area Network
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MAN	Metropolitan Area Network
MZM	Mach-Zehnder Modulator
NRZ	Non Return-to-Zero
NSE	Nonlinear Schrödinger Equation
NF	Noise Figure
OOK	On/Off Keying
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio
PSK	Phase Shift Keying
PIN	positive Intrinsic Negative
RZ	Return-to-Zero
RBS	Random Bit Sequence

Liste des Acronymes

SMF	Single Mode Fiber
TDM	Time Division Multiplexing
UIT	Union International des Télécommunications
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WAN	Wide Area Network

Liste des figures

Introduction Générale

Figure 1 : Besoin en bande passante par type d'application.....1

Figure 2 : Evolution de la capacité des systèmes de transmission sur fibre optique pour un seul canal, en utilisant le multiplexage temporel TDM (ronds bleus) et le multiplexage en longueur d'onde WDM (carrés rouges).....2

Figure 3 : Les différents types des réseaux de télécommunication.....3

Chapitre 1

Figure 1.1 : Schéma de principe d'un système de transmission optique à une seule longueur d'onde.....6

Figure 1.2 : Schéma d'un émetteur optique.....7

Figure 1.3 : Représentation (a) d'un signal analogique, (b) d'un signal numérique.....8

Figure 1.4 : Numérisation d'un signal analogique (a) échantillonnage, (b) quantification, (c) codage.....9

Figure 1.5 : (a) schéma de principe de la diode laser, (b) apparence extérieure de la diode laser.....10

Figure 1.6 : Structure de bande d'un semi-conducteur, (BC) bande de conduction, (BV) bande de valence.....10

Figure 1.7 : Schéma des processus fondamentaux (a) d'émission spontanée, (b) d'émission stimulée, (c) absorption.....11

Figure 1.8 : Cavité de Fabry Pérot.....12

Figure 1.9 : (a) Caractéristique puissance-courant d'une diode laser, (b) Spectre au-dessus du seuil : émission stimulée, (c) spectre sous le seuil : émission spontanée.....13

Figure 1.10 : Onde lumineuse modulée en amplitude ASK, (a) Représentation temporelle, (b) spectre.....14

Figure 1.11 : Schéma de principe de la modulation directe.....15

Figure 1.12 : Schéma de principe de la modulation externe.....16

Figure 1.13 : Format de modulation de type NRZ-OOK, (a) Trace temporelle, (b) Densité spectrale de puissance et diagramme de l'œil, (c) Constellation.....16

Figure 1.14 : Format de modulation de type RZ-OOK, (a) Trace temporelle, (b) Densité spectrale de puissance et diagramme de l'œil (c) Constellation.....17

Chapitre 2

Figure 2.1 : Structure de la fibre optique.....	20
Figure 2.2 : Principe de guidage de la lumière par réflexion totale interne.....	21
Figure 2.3 : Structure de la fibre monomode.....	21
Figure 2.4 : L'évolution de la puissance optique, (a) en échelle linéaire (mW) et (b) en échelle logarithmique (dBm) en fonction de la distance de propagation dans une fibre de 100 Km, présentant des pertes de 0.2 dB/Km.....	22
Figure 2.5 : Courbure de variation de l'atténuation en fonction de la longueur d'onde pour les fibres monomodes standard (SMF).....	23
Figure 2.6 : L'effet de la dispersion chromatique sur une impulsion.....	24
Figure 2.7 La dispersion totale et les deux contributions (dispersion du matériel et la dispersion du guide) dans une fibre standard SMF.....	26
Figure 2.8 : Effet de la dispersion chromatique sur la variation de la fréquence de la porteuse optique en fonction du signe de la dispersion de la fibre.....	27
Figure 2.9 La variation de la dispersion en fonction de la longueur d'onde pour la fibre standard (SMF) et à dispersion décalée (DSF).....	27
Figure 2.10 : Schéma principal d'un amplificateur dopé à l'erbium EDFA.....	28
Figure 2.11 : Schéma d'une ligne de transmission séparée par des amplificateurs optiques..	30
Figure 2.12 : La compensation de la dispersion chromatique par le biais d'une DCF.....	31

Chapitre 3

Figure 3.1 : Schéma de principe d'un récepteur optique.....	33
Figure 3.2 : Courant généré par la photodiode associé à un bruit quantique.....	34
Figure 3.3 : Photodiode PIN.....	34
Figure 3.4 : Principe de la décision basé sur le diagramme de l'œil.....	35
Figure 3.5 : La construction du diagramme de l'œil à partir de la séquence temporelle.....	36
Figure 3.6 : Diagramme de l'œil d'un signal de bonne qualité (a) et d'un signal bruité (b)...	36
Figure 3.7 : Principe d'évaluation du taux d'erreur par le facteur Q : à gauche l'évolution temporel du signal avec des fluctuations des niveaux « 1 » et « 0 », à droite la distribution supposée gaussienne des deux niveaux avec leur écart type associé σ_1 et σ_0 . Le niveau I_D correspond au seuil de décision.....	37
Figure 3.8 : Correspondance entre le facteur Q et le taux d'erreur binaire	38

Chapitre 4

Figure 4.1 : Caractérisation de la modulation directe d'un petit signal.....	43
Figure 4.2 : Réponse petit signal d'un laser DML.....	44
Figure 4.3 : L'influence du chirp transitoire sur la largeur de l'impulsion.....	45
Figure 4.4 Rapport de la largeur d'impulsion sur la largeur initiale en fonction de la distance mesurée en x fois la longueur de la dispersion L_D pour trois valeurs de facteur de Henry	46

Chapitre 5

Figure 5.1 : Schéma de simulation d'un système de transmission optique.....	49
Figure 5.2 : Schéma de simulation de l'interface d'émission.....	49
Figure 5.3 : Le modèle de simulation des données NRZ.....	50
Figure 5.4 : Tracé (a) temporel du signal NRZ, (b) spectre du signal NRZ, (c) constellation du signal NRZ.....	50
Figure 5.5 : Le modèle de simulation du filtre gaussien.....	50
Figure 5.6 : (a) allure temporelle du signal NRZ filtré, (b) diagramme de l'œil du signal NRZ filtré.....	51
Figure 5.7 : Illustration de la fréquence de sortie du laser en prenant en compte le chirp (a) transitoire, (b) adiabatique, et (c) transitoire et adiabatique.....	51
Figure 5.8 : (a) tracé temporel du signal NRZ après filtrage, (b) tracé temporel de l'amplitude algébrique du signal réel après DML, (c) le spectre du signal après DML.....	52
Figure 5.9 : Allure spectrale du signal après DML (a) avec variation du facteur d'Henry (α), (b) avec variation du coefficient du chirp adiabatique K (GHz/mW).....	52
Figure 5.10 : Modèle de simulation de la ligne de transmission	53
Figure 5.11 : L'effet de la dispersion.....	54
Figure 5.12 : Illustration du phénomène de la dispersion sur la forme de l'impulsion au cours d'une propagation de 60 Km.....	54
Figure 5.13 : La représentation temporelle du signal après DML propagé sur une distance de 60 Km.....	55
Figure 5.14 : Signal bruité.....	56
Figure 5.15 : Schéma de simulation de l'interface de réception.....	56
Figure 5.16 : Allure des fonctions de transfert en puissance des différents filtres utilisés dans les simulations.....	57

Figure 5.17 : Représentation temporelle (a) signal bruité, (b) signal filtré.....	57
Figure 5.18 : Illustre la méthode de détection du signal reçu au niveau de la réception.....	58
Figure 5.19. Comparaison du facteur de qualité en fonction de la dispersion cumulée (ou la longueur de la fibre) avec et sans DML.....	58
Figure 5.20. Comparaison du facteur de qualité en fonction de la dispersion cumulée avec DML (seulement le chirp transitoire) et sans DML.....	59
Figure 5.21. Comparaison du facteur de qualité en fonction de la dispersion cumulée avec DML (seulement le chirp adiabatique) et sans DML.....	60

Introduction Générale

Introduction Générale

1. Historique de la télécommunication optique :

Au cours du 20^{ème} siècle, les moyens de communication à distance se sont largement développés et évolués grâce aux câbles coaxiaux et aux liaisons hertziennes (satellite) [4]. Ces câbles coaxiaux remplissaient parfaitement le rôle de support de transmission capable de transmettre des données à un débit atteignant 270 Mbit/s [3]. Cependant, l'apparition de la téléphonie mobile, d'internet, ou encore plus récemment de la visioconférence et de la télévision haute définition, ajoutée à la croissance démographique, résultent en une demande en termes de capacité que les anciens supports de transmission ne peuvent plus supporter. La solution la plus simple et la plus convoitée pour répondre à cette demande est l'utilisation de la fibre optique comme support de transmission. [4]. La figure 1 illustre un exemple d'applications actuellement proposées au niveau de l'utilisateur, et la capacité nécessaire pour assurer leur fonctionnement.

L'intérêt majeur de l'utilisation de la fibre optique est de transmettre l'information sous forme d'un signal lumineux sur de grandes distances et avec un débit très élevé. Le choix de ce support de transmission est désormais courant dans les réseaux de télécommunication. Par exemple, un système de transmission optique terrestre offre une bande passante de 4 ou 8 THz autour de $\lambda=1.5 \mu\text{m}$. La fibre optique offre également une bonne immunité aux perturbations électromagnétiques, et une très faible atténuation (de l'ordre de 0.2 dB/Km) [10].

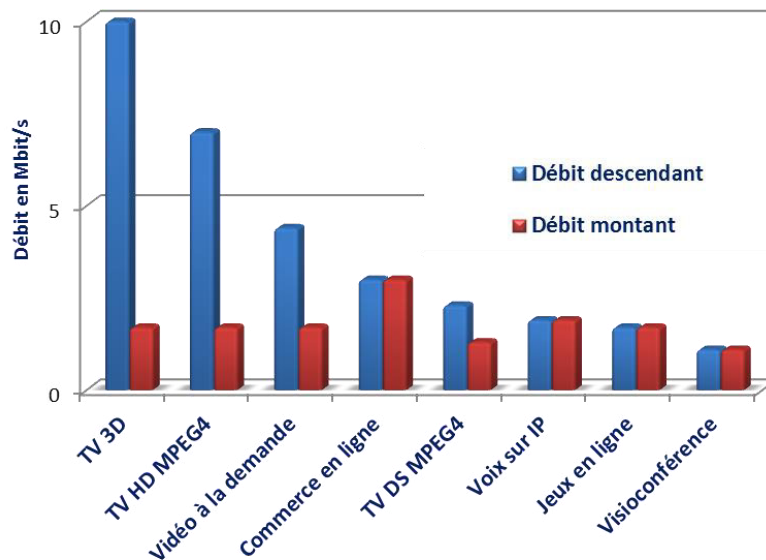


Figure 1. Besoin en bande passante par type d'application [6]

La communication optique a subi une révolution importante dans les années 1990 avec l'apparition de deux éléments importants dans un réseau optique : le premier élément représente une technique qui consiste à coupler plusieurs longueurs d'ondes dans une même fibre optique, et ainsi multiplier la capacité de transmission par le nombre de longueurs

d'onde utilisées. Cette technique est appelée multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing). Pour pouvoir transmettre ces longueurs d'onde sur une longue distance, un amplificateur large bande était nécessaire. Ainsi le second élément est l'apparition des amplificateurs à fibre dopée à l'erbium EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), qui a permis notamment une amplification tout optique, ce qui représentait un progrès évident par rapport aux répéteurs optoélectroniques [7]. Ceci est illustré par la figure 2.

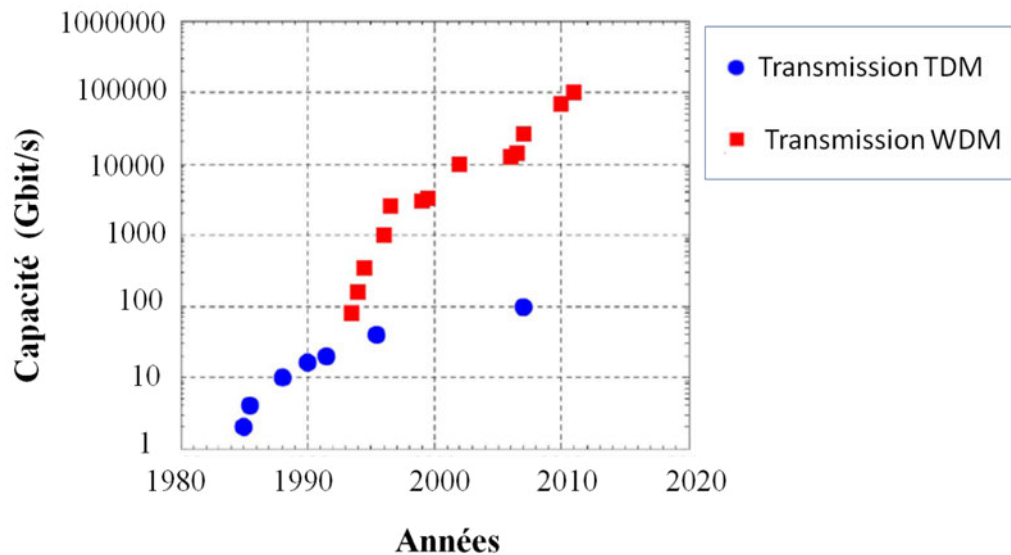


Figure 2. Evolution de la capacité des systèmes de transmission sur fibre optique pour un seul canal en utilisant le multiplexage temporel TDM (ronds bleus), et le multiplexage en longueur d'onde WDM (carrés rouges) [7].

2. Différents types de réseaux :

Les réseaux optiques sont subdivisés selon les distances de transport de l'information considérée. On distingue ainsi trois catégories : le réseau à longue distance, le réseau métropolitain et le réseau d'accès.

- **Les réseaux sous-marins (Submarine Networks) :** ce sont des réseaux déployés entre les continents. Par exemple les réseaux transatlantique (6000 Km) et transpacifique (9000 Km). Les débits atteignent en pratique environ 2 Tbit/s par fibre optique.
- **Les réseaux terrestres longues distances (long haul) WAN (Wide Area Network) :** ce sont des réseaux déployés à l'échelle d'un pays ou d'un continent (200-6000 Km). Les débits peuvent atteindre environ 1 Tbit/s par fibre optique.
- **Les réseaux métropolitains MAN (Metropolitan Area Network) :** ce sont des réseaux à l'échelle d'une ville, qui sont généralement constitués d'anneaux de 80 à 150 Km de circonférence avec 6 à 8 nœuds. Les débits dans ce type de réseaux peuvent aller de 100 Mbit/s à 10 Gbit/s.
- **Les réseaux locaux LAN (Local Area Network) :** ce sont des réseaux de distribution ou d'accès de courte distance, très proches des utilisateurs (entreprise,

bâtiment). Les distances de transmission peuvent aller de quelques mètres à 50 Km, et les débits sont de l'ordre de 10 Mbit/s, et peuvent monter jusqu'à quelques Gbit/s [3].

Système de transmission optique	Distance (Km)
Ultra long haul	>3000
Very long haul	1000-3000
WAN (Wide Area Network)	300-1000
MAN (Metropolitan Area Network)	<300
LAN (Local Area Network)	<100

Tableau 1. Classification des différents réseaux de transmission terrestre [5].

Aujourd'hui, les services proposés aux abonnés impliquent l'installation de la fibre jusqu'aux utilisateurs (technologie FTTH, Fibre To The Home). Ces réseaux d'accès doivent aujourd'hui supporter un débit d'environ 100 Mbit/s dans le sens descendant du réseau vers l'abonné (download) et d'environ 40 Mbit/s dans le sens ascendant de l'abonné vers le réseau (upload) [9]. Dans certains nouveaux réseaux professionnels, le débit atteint même 1 Gbit/s. Ces développements récents impliquent la conception de nouveaux composants qui devront être produits à grande échelle et par conséquent à faible coût.

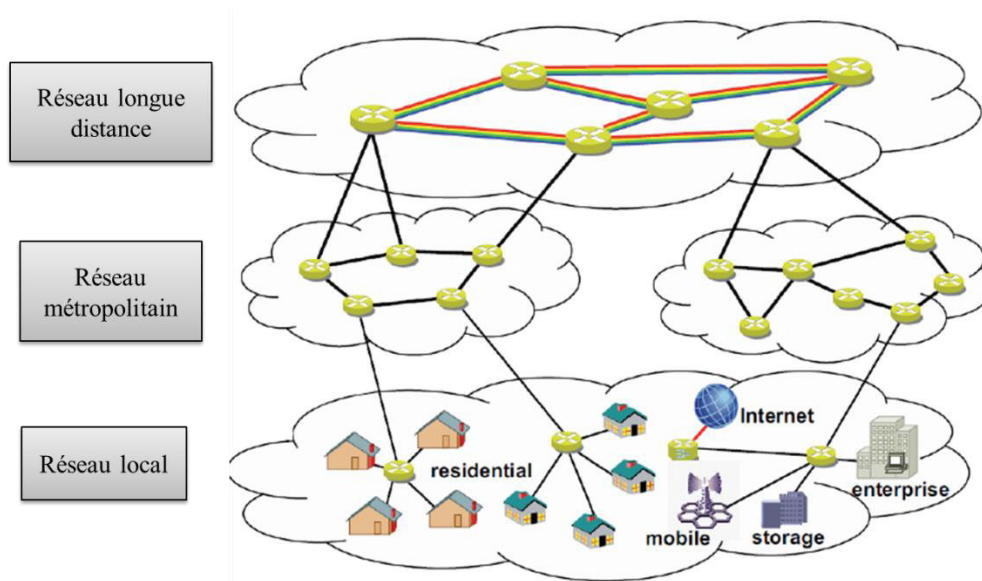


Figure 3. Les différents types des réseaux de télécommunication [5].

3. Contexte du projet :

Dans le contexte décrit précédemment, les équipementiers s'intéressent à la conception de lasers modulés directement (DML, Direct Modulation Laser), compte tenu de leur compacité et de leur faible coût.

Notre travail consiste ici à modéliser un système de transmission optique de courte distance ayant un débit de 10 Gbit/s, avec une modulation en intensité et une détection directe, dont l'émetteur inclut ce type de composant, et à en optimiser ses caractéristiques.

Ce rapport est divisé en cinq chapitres. Dans le premier chapitre nous décrivons un émetteur optique, dans le second, la ligne de transmission courte distance, et dans le troisième, le récepteur. Nous nous attarderons dans le quatrième chapitre sur le DML, en détaillant ses caractéristiques et son fonctionnement. Nous mettrons aussi en évidence dans ce même chapitre les points qui nous intéressent dans le cadre de notre étude. Le cinquième et dernier chapitre sera dédié aux résultats de nos simulations et différentes discussions autour de ces résultats.

Chapitre 1

Emetteur

1.1.Introduction :

Nous allons dans un premier temps décrire d'une manière générale les systèmes de transmission par fibre optique, en nous focalisons sur la partie émission.

1.2.Description d'un système de transmission optique :

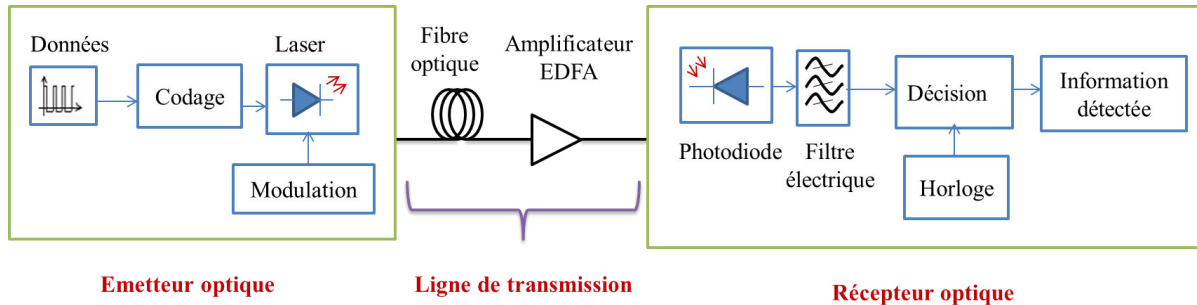


Figure 1.1.Schéma de principe d'un système de transmission optique à une seule longueur d'onde

La figure 1.1 montre un schéma de principe d'un système de transmission optique qui est composé d'un bloc d'émission, une ligne de transmission et un bloc de réception.

Le bloc d'émission a pour rôle de convertir le signal électrique portant l'information en un signal optique. Pour ce faire, une diode laser génère un signal optique qui peut être modulé directement par modulation du courant à son entrée (cas du DML), ou de manière externe en utilisant des modulateurs à sa sortie (cas de la modulation externe). Le signal est ensuite injecté dans la ligne de transmission qui est composée d'une succession de fibres optiques suivies d'amplificateurs optiques EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) afin de transmettre des informations sur de longues distances. Dans le cas des systèmes d'accès, un seul tronçon de fibre sera employé, sans amplificateur. Dans le bloc de réception, le signal optique est reçu, puis converti en un signal électrique par le biais d'une photodiode [4]. Ensuite, après filtrage, le signal électrique est séparé en deux voies : la première est utilisée à la récupération d'horloge, et la seconde au circuit de décision. Ce dernier compare l'amplitude du signal reçu avec un seuil à chaque instant de décision fourni par l'horloge. A la sortie du circuit de décision, le signal électrique est ainsi remis en forme et contient l'information reçue. Une correction éventuelle des erreurs est effectuée par les codes correcteurs d'erreurs (FEC, Forward Error Correction). Les opérateurs demandent aux équipementiers de fournir un système de télécommunication présentant un taux d'erreur binaire environ inférieur à 10^{-12} suivant la norme de l'UIT (Union International des Télécommunication) [10].

1.3.Emetteur optique :

La figure 1.2 montre un schéma simplifié d'un émetteur [11]. La source optique est ici une diode laser à semi-conducteurs émettant en continu à une certaine longueur (autour de 1550 nm) d'onde et une puissance pouvant aller jusqu'à 10 dBm (décibels milliwatts). Pour rappel, la puissance en dBm est définie suivant la formule 1.1.

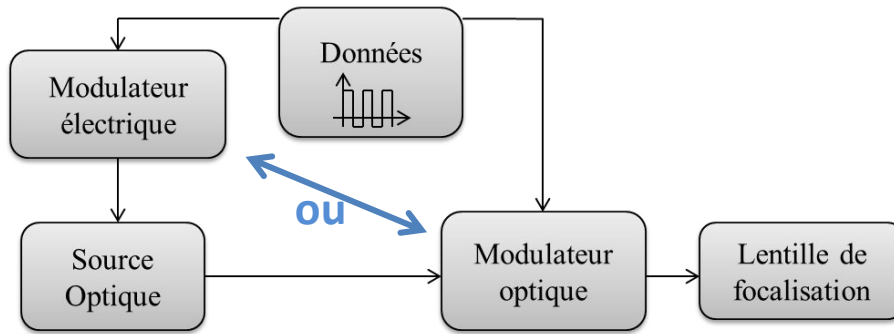


Figure 1.2. Schéma d'un émetteur optique

L'échelle en décibel est dotée d'une référence absolue à 1 mW.

$$P_{dBm} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{mW}}{1 \text{ mW}} \right) \quad (1.1)$$

Les données contenant l'information dans un signal électrique vont être utilisées pour moduler la lumière de la source optique soit par modulation directe du courant de la diode laser, soit par l'utilisation d'un modulateur optique externe, comme indiqué sur la figure 1.2. Dans ce travail, nous utilisons la modulation directe du DML. Le nombre de niveaux d'intensité du courant d'entrée par seconde aussi appelé la rapidité de modulation $R = \frac{1}{T}$, exprimée en bauds, où T représente la durée d'un symbole en seconde.

1.4. Echantillonnage d'un signal analogique :

Dans tous les systèmes de communication, l'information à transmettre est un signal électrique qui peut être sous forme analogique ou numérique. Dans le cas analogique le signal est un courant électrique variant continuellement avec le temps, comme le montre la figure 1.3 (a). Nous pouvons par exemple citer la conversion des signaux audio (voix), vidéo (image) en un champ électrique respectivement par le microphone et la caméra vidéo. Par contre dans le cas d'un signal numérique simple son courant électrique est soit allumé (correspondant au bit 1), soit éteint (correspondant au bit 0), comme le montre la figure 1.3 (b).

Le mot bit est une forme contracté de (Binary Digit), chaque bit dure une certaine période de temps appelé période de bit ou bit slot. Un débit d'information est quantifié par le nombre de bits transmis par seconde (bit/s) [11].

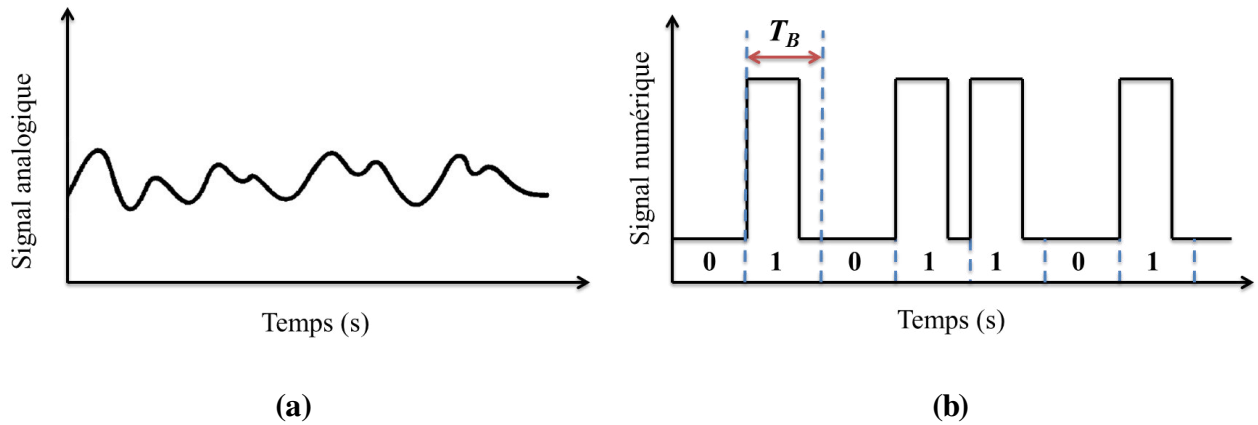


Figure 1.3. Représentation (a) d'un signal analogique, (b) d'un signal numérique

Le passage de la représentation temporelle-fréquentielle d'un signal est déterminé mathématiquement par la transformée de Fourier.

Les signaux analogiques et numériques sont généralement caractérisés par une bande spectrale occupée par le signal. Cette bande est définie par un ensemble de composantes spectrales (fréquences),

Le signal analogique peut être converti en un signal numérique par échantillonnage à des intervalles de temps réguliers (période d'échantillonnage). La figure 1.4 montre la méthode de conversion, cette opération consiste dans un premier temps à remplacer le signal par des échantillons à des instants périodiques (échantillonnage), puis dans un deuxième temps correspondre une amplitude à chaque échantillon (quantification), en fin le signal quantifié devient un signal numérique représenté par une suite binaire. La fréquence d'échantillonnage est déterminée par la largeur de bande du signal analogique Δf selon le théorème d'échantillonnage : pour éviter tout recouvrement du spectre, la fréquence d'échantillonnage doit satisfaire le critère de Nyquist $F_e > 2\Delta f$ [11].

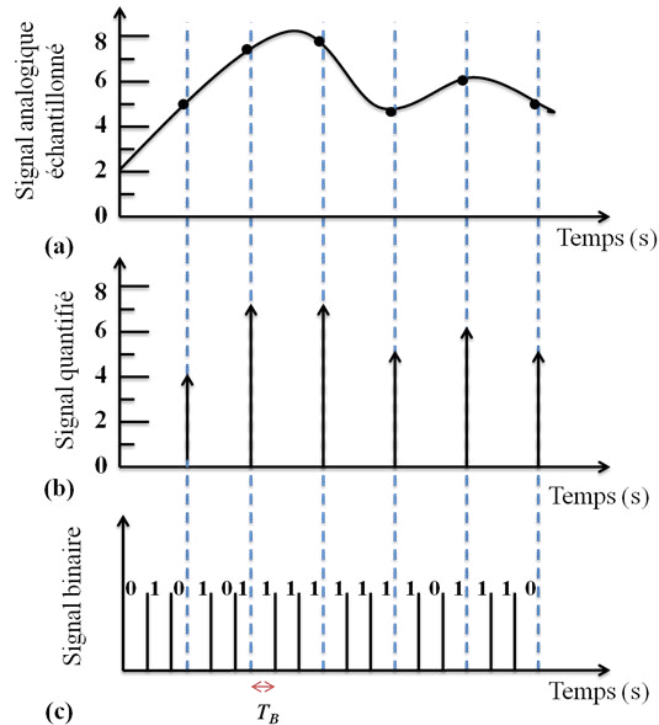


Figure 1.4. Numérisation d'un signal analogique (a) échantillonnage, (b) quantification, (c) codage

La représentation numérique d'un signal analogique contribue à une augmentation considérable de la bande ainsi que le débit. Par exemple un signal audio généré par un téléphone est caractérisé par un débit minimal égal à 31 Kbit/s. Un canal audio numérique fonctionne à 64 Kbit/s. Un autre exemple est celui d'un signal de télévision analogique, ayant un débit minimal égal à 66 Mbit/s, alors que le signal vidéo numérique peut atteindre un débit de 100 Mbit/s [11]. Malgré cette augmentation de bande spectrale, les signaux numériques ont un énorme avantage concernant leur résistance aux bruits et dégradations de la ligne de transmission. De plus, ils offrent une manière de coder de manière physique qui est universelle, et avec laquelle nous pouvons coder n'importe quel type de signaux à transmettre (audio, video, etc.).

1.5. Source laser :

Une diode laser est un composant optoélectronique à base de matériaux semi-conducteurs. Le principe de fonctionnement d'un laser se base sur l'amplification de la lumière par émission stimulée (LASER, Ligth Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Son rôle dans un système de transmission consiste à générer un signal optique continu, que nous pourrions ensuite moduler. Il existe plusieurs types de lasers : les lasers à gaz, les lasers liquides, les lasers solides, les lasers à électrons libres, les lasers à guidage par le gain, les lasers à guidage par l'indice, les lasers VCSEL (cavité vertical émettant par la surface) ou encore les lasers à semi-conducteurs [12]. La figure 1.5 (a) montre la structure typique d'une diode laser.

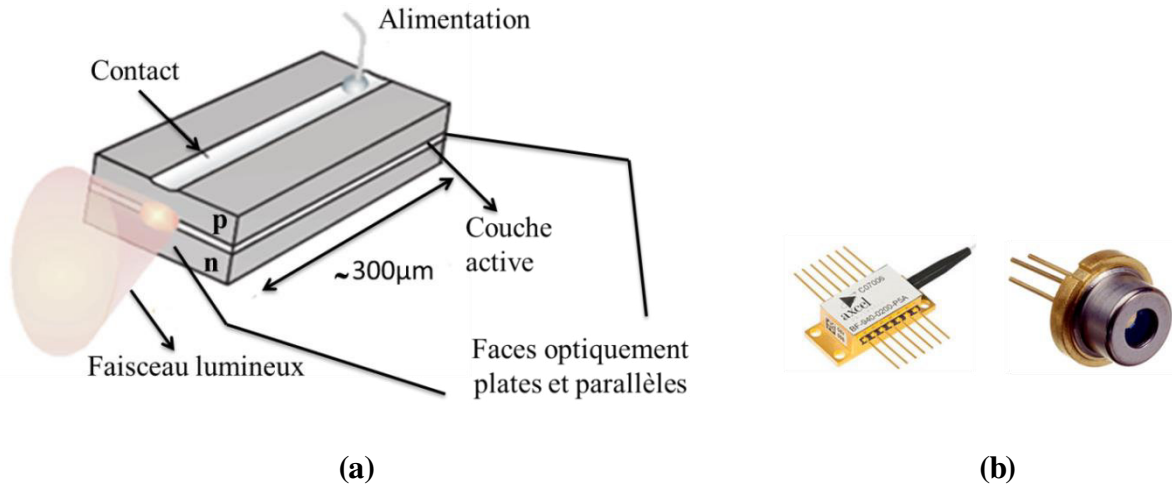


Figure 1.5. (a) schéma de principe de la diode laser, (b) apparence extérieure de la diode laser

Un semi-conducteur est composé d'une couche de conduction dopée par des électrons et une couche de valences dopée par des trous. Ces deux couches sont séparées par une couche d'énergie appelée couche active. En équilibre thermique, les électrons occupent principalement le bas de la bande de conduction tandis que les trous sont au sommet de la bande de valence. La figure 1.6 illustre la recombinaison radiative de la paire électron-trou afin de générer des photons d'énergie $E_g = h\nu$ [13].

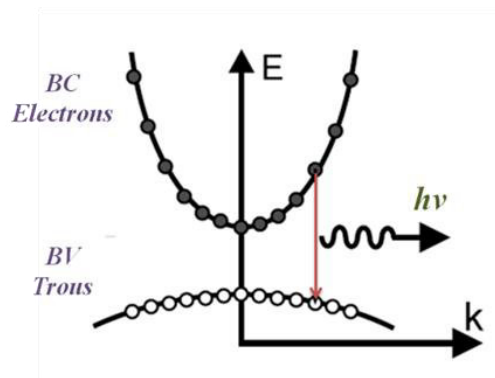


Figure 1.6. Structure de bande d'un semi-conducteur, (BC) bande de conduction, (BV) bande de valence

Dans un semi-conducteur, un électron peut passer d'un état à un autre de trois manières différentes :

- **L'émission spontanée** (figure 1.7.a) :
L'électron passe de la couche de conduction définie par une énergie E_c vers la couche de valence définie par une énergie E_v . La recombinaison entre ces deux charges génère un photon sous forme de $E_g = E_c - E_v = h\nu$. Les photons sont émis d'une manière aléatoire par rapport à l'onde incidente, et les ondes émises ne sont pas en phase.

- **L'émission stimulée** (figure 1.7.b) :

C'est un processus provoqué par un photon incident (ΔE), qui force la désexcitation de l'électron et passe de la couche supérieure vers la couche inférieure.

Les diodes lasers émettent de la lumière à travers le processus d'émission stimulée, on dit qu'elle émet de la lumière cohérente et fonctionne à l'aide d'un milieu amplificateur d'une structure résonnante et d'un processus de pompage.

- **L'absorption** (figure 1.7.c):

Ce processus est l'inverse du phénomène précédent : l'électron passe de la couche de valence vers la couche de conduction avec absorption d'un photon. La lumière est atténuée en raison du phénomène d'absorption se produisant à l'intérieur du milieu [11].

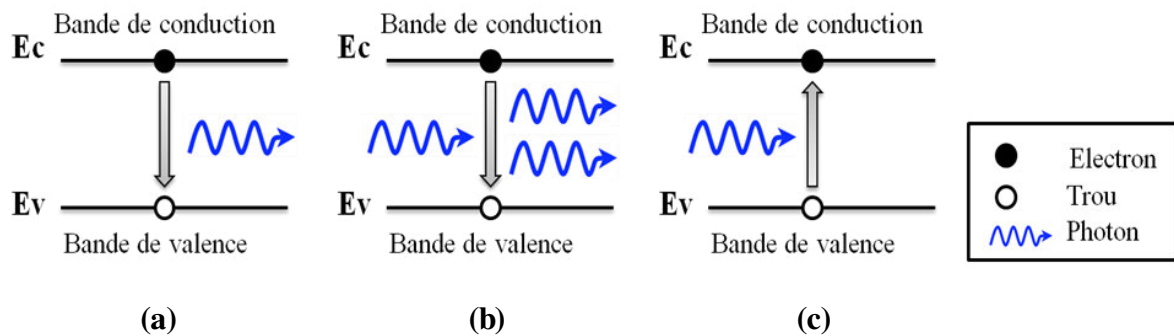


Figure 1.7. Schéma des processus fondamentaux (a) d'émission spontanée, (b) d'émission stimulée, (c) d'absorption

- **La recombinaison non radiative :**

La recombinaison des porteurs électron-trou peut se faire d'une manière radiative (émission spontanée, émission stimulée) comme elle peut se faire d'une manière non radiative. Un de ces mécanismes est connu par le processus « Auger » pour lequel l'énergie libérée par la recombinaison électron trou est sous forme de chaleur à l'intérieur du semi-conducteur (recombinaison thermique). Ces processus non-radiatifs sont généralement nuisibles, car ils réduisent le nombre de paires électron-trou qui émettent de la lumière [11].

Tous les types de lasers sont constitués de trois éléments essentiels : une zone active où l'amplification de la lumière se fait par émission stimulée, une cavité résonnante effectuant une sélection de longueur d'onde, et un processus de pompage produisant une inversion de population des porteurs de la zone active et permettant une plus grande amplification [14].

A l'équilibre thermique, un photon émis peut de nouveau être absorbé par un électron. Dans ce cas, l'absorption l'emporte sur l'émission stimulée. Pour avoir l'effet laser, il faut rendre l'émission stimulée prépondérante par rapport à l'absorption. Ainsi, deux conditions doivent être respectées :

- Il faut qu'il y ait suffisamment d'électrons dans la bande supérieure. De ce fait, l'inversion de population, qui nécessite l'excitation des électrons par l'opération de pompage afin de passer à la bande de conduction, est réalisée.
- Il faut qu'il y ait aussi suffisamment d'électrons excitateurs. Pour cela, nous obligeons la lumière à s'accumuler dans une cavité résonante constituée par un résonateur de type Fabry Pérot, que nous allons définir [3].

1.5.1. La cavité Fabry Pérot :

Un résonateur optique de type Fabry Pérot est constitué de deux miroirs plans parallèles et semi-réfléchissants qui sont séparés d'une distance L , entre lesquels les ondes lumineuses effectuent des allers-retours. Ceci est illustré sur la figure 1.8. La valeur de l'indice du semi-conducteur est de l'ordre de 3,5, ce qui permet d'obtenir des coefficients de réflexions à l'interface semi-conducteur/air d'environ 30%. Ceci permet d'avoir une amplification dans le résonateur plus accrue, et ainsi de compenser les pertes dues à l'absorption. De cette manière, les pertes intra-cavités peuvent être compensées par le milieu amplificateur et ainsi, nous pouvons obtenir l'effet Laser [14].

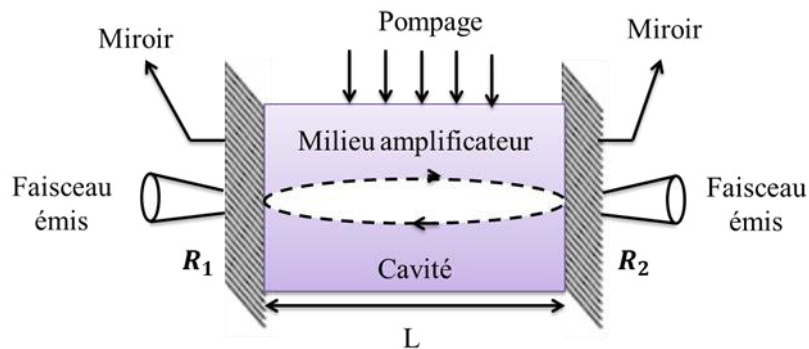


Figure 1.8. Cavité de Fabry Pérot

Les deux miroirs d'un résonateur sont caractérisés par un coefficient de réflexion en intensité R_1 et R_2 . De plus, la zone active possède des pertes α_{int} liées à l'absorption, la diffusion, la diffraction et un gain g [14].

$$P(x) = P_o \exp [(g - \alpha_{int}) x]$$

Après aller-retour, pour que le gain puisse compenser les pertes, la condition $P_o = P_1$ doit être respectée. Pour un trajet $x = 2L$:

$$1 = R_1 R_2 \exp [(g - \alpha_{int}) 2L]$$

$$g = \alpha_{int} + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (1.2)$$

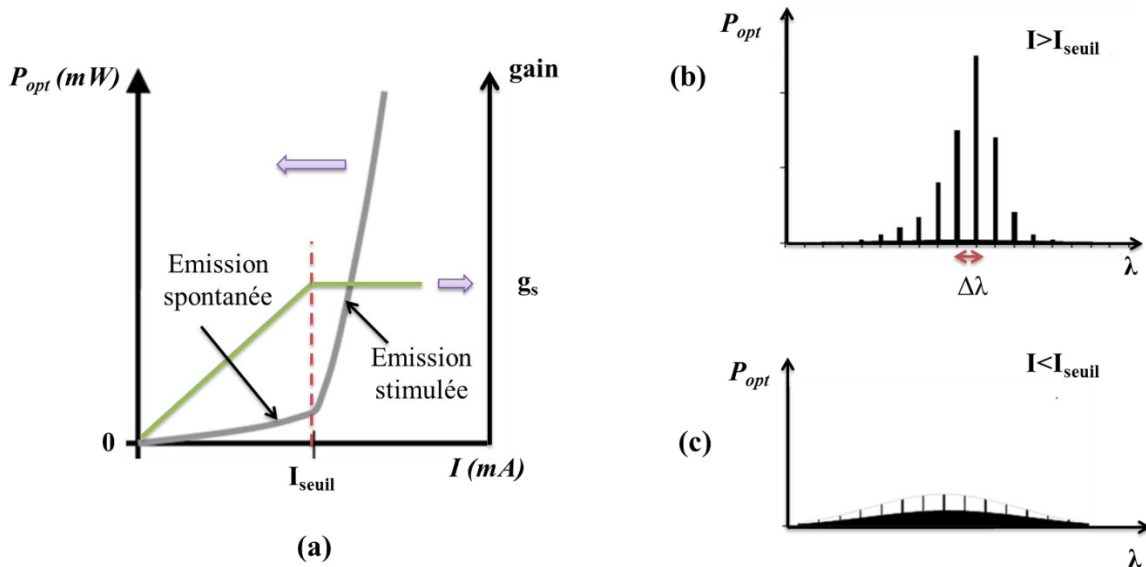


Figure 1.9. (a) Caractéristique puissance-courant d'une diode laser, (b) Spectre au-dessus du seuil : émission stimulée, (c) spectre sous le seuil : émission spontanée.

La polarisation directe de la diode laser laisse passer un fort courant qui peuple la bande de conduction et réalise une inversion de population. Cette dernière conduit à une émission stimulée. La figure 1.9 (a) montre les variations du gain et de la puissance optique d'émission en fonction du courant de pompe. Les figures 1.9 (b) et (c) indiquent le spectre d'émission du laser, pour des courants de pompe respectivement au-dessus et en-dessous du courant de seuil.

- Pour $I < I_{seuil}$, seule l'émission spontanée est présente. La puissance optique varie avec le courant et l'augmentation du courant augmente l'inversion de la population.
- Pour $I > I_{seuil}$, l'émission stimulée est prépondérante. Dès que l'inversion de population atteint la valeur de seuil $g = g_s$, la puissance optique émise par émission stimulée augmente très rapidement [14].

Ce petit paragraphe a pour but d'introduire les notions nécessaires pour la compréhension du modèle de laser exposé au chapitre 4.

1.6. Techniques de modulation de la source laser :

La transmission d'une séquence de données binaires se fait par transcription de cette séquence sur un signal optique. Nous avons vu plus haut que la source laser émet un signal optique, ayant une amplitude et une phase particulière. Ainsi, la source laser est pilotée par un signal électrique déduit de la séquence d'information que nous voulons transmettre. Cette technique est appelée modulation.

Le signal optique émis par la source laser est sous forme d'une onde continue monochromatique, dite longueur d'onde porteuse, et caractérisée par sa fréquence de résonance λ_0 . Cette onde est donc modulée par un signal contenant l'information. La figure 1.10 illustre le cas d'une onde lumineuse modulée en amplitude. Il s'agit d'une onde oscillant rapidement et dont la modulation a une variation plus lente. Cette variation constitue

l'enveloppe de l'onde lumineuse contenant l'information à transmettre. Notre intérêt porte ainsi sur l'évolution de cette enveloppe, que nous cherchons à caractériser, puisque ses dégradations permettent d'évaluer la qualité de la transmission [1].

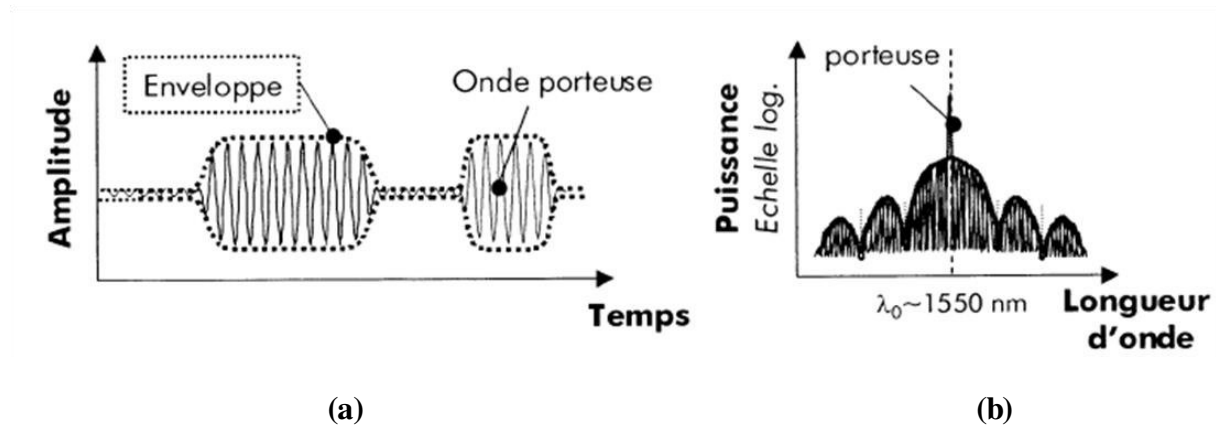


Figure 1.10. Onde lumineuse modulée en amplitude ASK, (a) Représentation temporelle, (b) spectre.

Une onde lumineuse possède quatre propriétés : son amplitude d'oscillation, sa fréquence, sa phase et sa direction de propagation (polarisation). Les informations peuvent être inscrites dans un signal lumineux en modulant l'une de ses quatre propriétés [1].

Il existe principalement deux types de modulation : la modulation d'amplitude (ASK pour Amplitude Shift Keying), où la lumière est modulée telle qu'un maximum d'intensité signifie un symbole 1 et un minimum d'intensité signifie un symbole 0. Pour la modulation de phase (PSK pour phase Shift Keying), la lumière est présente dans les deux symboles, par contre avec une différence de phase de π [8].

Par ailleurs, il est important de noter que le débit d'information dépend de la rapidité de modulation du signal optique, et par conséquent, de la rapidité des composants électroniques utilisés dans l'émetteur.

Pour réaliser une modulation de type ASK, il existe principalement deux techniques : la modulation directe et la modulation externe [1].

1.6.1. Modulation directe :

La modulation directe consiste à moduler directement l'intensité de la lumière émise par la diode laser en fonction de la variation du courant d'alimentation du laser contenant de l'information. Dans ce cas, le laser se comporte comme un interrupteur, s'allumant pour transmettre un bit « 1 » et s'éteignant pour transmettre un bit « 0 ».

La figure 1.11 illustre le principe d'un modulateur direct. Il est composé d'un générateur binaire causant une séquence binaire qui définit l'information et d'un driver qui a pour rôle de commander la source optique en niveaux de puissance émise (en fixant les valeurs du courant d'alimentation) [3].

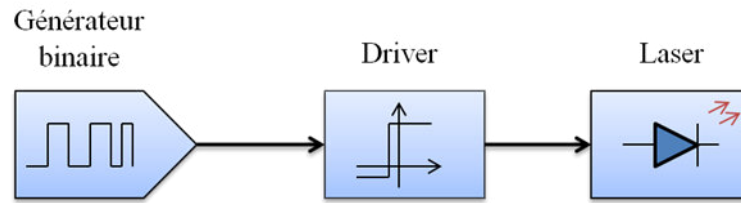


Figure 1.11. Schéma de principe de la modulation directe

Cette technique offre quelques avantages tels que la simplicité ou le faible coût de mise en œuvre. Cependant, elle présente aussi quelques limitations qui détériorent le signal optique émis. La modulation directe s'accompagne ainsi d'une modulation de fréquence parasite appelée chirp, qui conjugué à la dispersion chromatique de la fibre, provoque un élargissement de l'impulsion d'autant plus importante que la longueur de la fibre est grande. C'est la raison pour laquelle cette modulation est utilisée pour des débits inférieurs ou égaux à 10 Gbit/s [3].

1.6.2. Modulation externe :

La modulation externe consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu déjà émis par une source laser. Elle est obtenue en utilisant un modulateur externe à la source, qui module le faisceau lumineux à sa sortie du laser [3]. La figure 1.12 illustre le principe de la modulation externe [3].

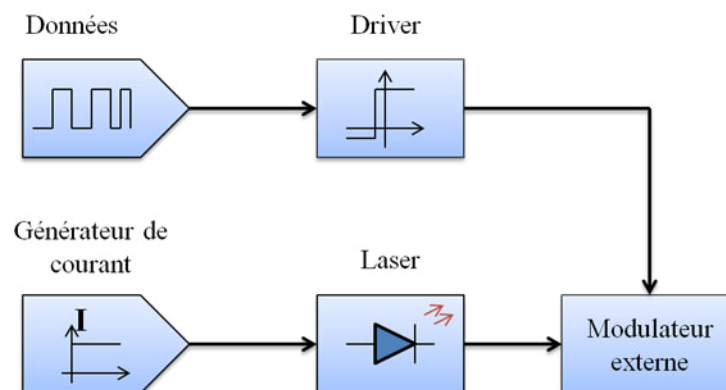


Figure 1.12. Schéma de principe de la modulation externe

Parmi les modulateurs les plus utilisés dans les systèmes de transmission, nous pouvons citer le modulateur de type Mach-Zehnder (MZM, Mach-Zehnder Modulator), dont le principe de fonctionnement se base sur l'interférométrie. Le signal à la sortie de ce type de modulateur est beaucoup moins dégradé que celui issu de la modulation directe, d'où son utilisation dans les systèmes à longues distances.

1.7. Format de modulation :

Les systèmes de transmission par fibre optique sont conçus pour faire propager une séquence de données binaires «1» et «0» par voie optique. Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, cette séquence est d'abord sous la forme d'un signal électrique. La forme de ce dernier, en termes d'amplitude et de phase, est appelée format de modulation [4].

Le format de modulation le plus simple est le format OOK (On/Off Keying), et il repose sur le principe d'une modulation de l'amplitude du signal électrique. Ainsi, un minimum d'amplitude correspond au bit « 0 », et un maximum d'amplitude correspond à un bit « 1 ».

Pour une séquence temporelle donnée, et donc une succession de bits, il existe deux manières de moduler les impulsions d'un format de modulation donné : la technique de retour à zéro (RZ, Return-to-Zero), et la technique de non-retour à zéro (NRZ, Non-Return-to-Zero) [4].

1.7.1. Format NRZ (Non Return-to-Zero):

Le signal optique modulé en NRZ est une copie conforme du signal binaire électrique. Il possède généralement deux états : l'état (haut-1) qui se traduit par le maximum d'intensité du signal optique, et l'état (bas-0) qui se traduit par le minimum d'intensité du signal. Les données binaires « 1 » et « 0 » sont associées à des impulsions optiques de durée égale à un temps bit (inverse du débit). La différence entre un minimum et un maximum d'intensité du signal est appelée taux d'extinction (ER, Extinction Ratio). Il s'exprime de la façon suivante [4] :

$$ER = \frac{P_1}{P_0} \quad \text{où} \quad ER_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (1.3)$$

P_0 et P_1 sont respectivement les puissances moyennes du niveau 0 et du niveau 1. En pratique, pour un minimum d'intensité, l'absence totale du signal optique n'existe pas car le taux d'extinction d'un signal n'est jamais infini.

La figure 1.13 montre le schéma de principe du format de modulation de type NRZ-OOK, mettant en évidence la trace temporelle, la densité spectrale de puissance et le diagramme de l'œil, ainsi que la constellation.

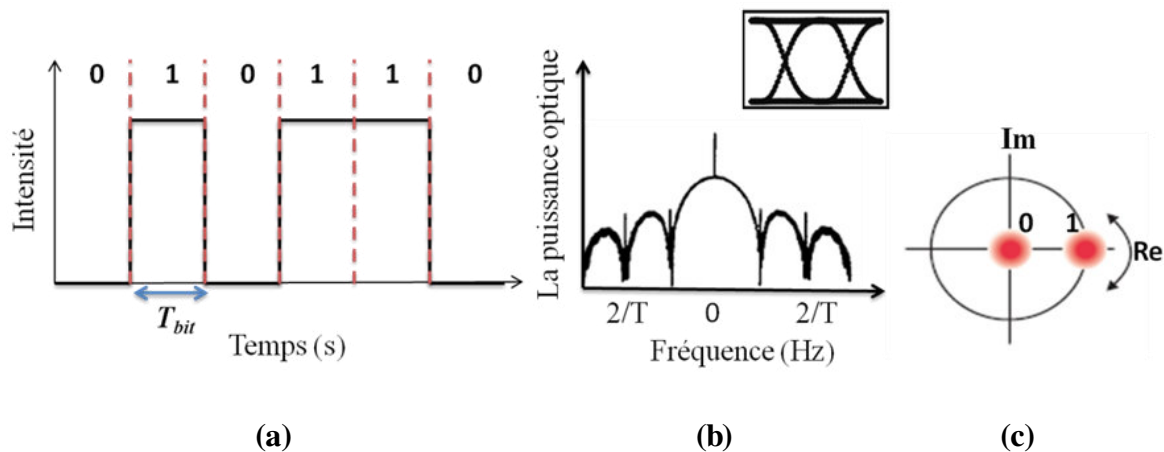


Figure 1.13 Format de modulation de type NRZ-OOK, (a) Trace temporelle, (b) Densité spectrale de puissance et diagramme de l'œil, (c) Constellation.

1.7.2. Format RZ (Return-to-Zero):

Le format RZ quant à lui est différent dans la mesure où une impulsion qui correspond à un maximum d'intensité s'étend sur une durée inférieure au temps bit. Elle revient donc au niveau bas entre deux bits successifs. La figure 1.14 montre le schéma de principe de format de modulation RZ-OOK, mettant en évidence la trace temporelle, la densité spectrale de puissance, le digramme de l'œil et la constellation.

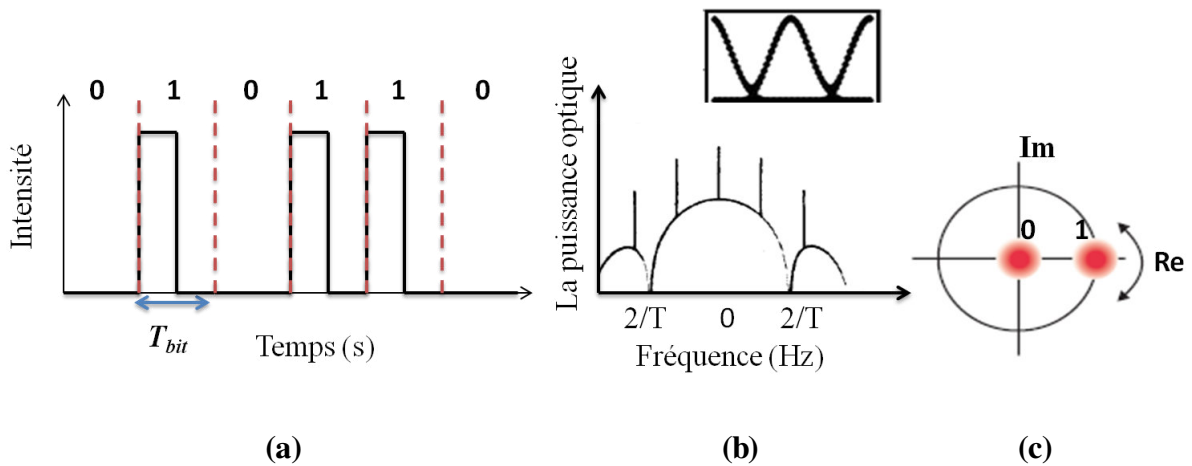


Figure 1.14. Format de modulation de type RZ-OOK, (a) Trace temporelle, (b) Densité spectrale de puissance et diagramme de l'œil (c) Constellation.

1.8. Conclusion :

Nous avons vu principalement dans ce chapitre la partie émission d'un système de transmission. Nous avons ainsi décrit comment est générée une séquence binaire d'information en signal optique, et mis l'accent sur deux différentes méthodes de modulation dans les systèmes : la modulation directe, et la modulation externe. Nous allons voir par la suite que le type de composant que nous étudions dans ce rapport utilise la modulation directe, dans le cadre d'un réseau d'accès ayant un débit de 10 Gbit/s.

Chapitre 2

Ligne de transmission

2.1. Introduction :

Ce deuxième chapitre est consacré à la ligne de transmission, à savoir, la fibre optique. Nous allons notamment présenter ce composant, en se focalisant sur un seul effet linéaire de la fibre qui nous concerne : la dispersion chromatique.

2.2. La fibre optique :

Il existe à ce jour deux types de fibres optique utilisées dans les communications : la fibre monomode, utilisée sur tout type de réseau, et la fibre multi-modes, utilisée à ce jour sur les très courtes distances. En effet cette dernière est encore à l'étude pour son utilisation sur de moyennes ou longues distances.

Par ailleurs, un signal optique qui se propage dans une fibre optique subit plusieurs types de dégradations, dues à différents types d'effets de la fibre. Nous pouvons citer ainsi les effets linéaires (atténuation, dispersion chromatique) ou encore les effets non-linéaires (effet Kerr). Dans ce rapport, nous allons nous focaliser uniquement sur la fibre monomode et l'effet de dispersion chromatique, car à notre échelle, celui-ci est le seul effet qui apparaît.

2.2.1. Définition de la fibre optique :

La fibre optique est un guide d'onde cylindrique qui conduit la lumière entre deux points distants. La fibre optique est principalement composée d'un cœur de silice de haut indice de réfraction et une gaine de silice avec un indice de réfraction plus faible que celui du cœur. L'ensemble est généralement recouvert d'un revêtement protecteur (gaine en plastique). La figure 2.1 illustre ceci.

- **Le cœur :**

Le cœur permet de guider un signal optique et est caractérisé par son indice n_c .

- **La gaine :**

La gaine permet d'éviter que le signal optique sort du cœur. Elle est caractérisée par son indice n_g et un diamètre de $125\mu\text{m}$. Pour que la réflexion soit réalisable, la condition suivante doit être respectée : ($n_c > n_g$).

- **Le revêtement de plastique :**

C'est une couche protectrice qui permet de couvrir la fibre optique et ainsi la protéger des différentes perturbations externes. Elle est caractérisée par un diamètre de $230\mu\text{m}$ [21].

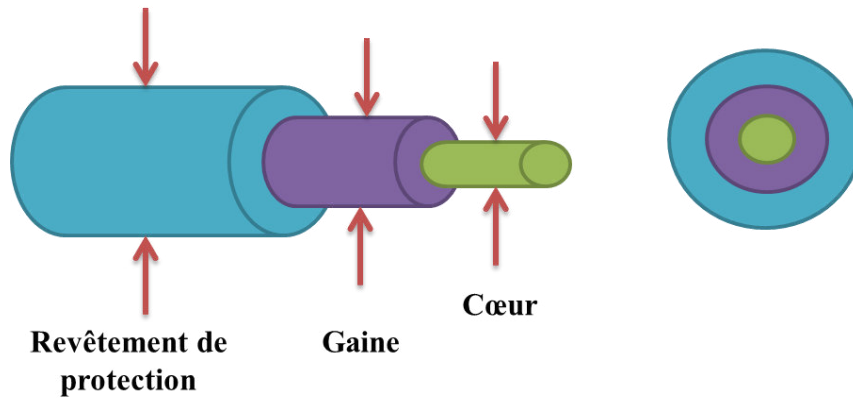


Figure 2.1. Structure de la fibre optique

Dans le domaine des télécommunications optiques, le matériau privilégié est la silice car elle présente des pertes optiques très faibles [20].

2.2.2. Fonctionnement de la fibre optique :

Le guidage du signal optique est basé sur une propriété réfléchissante de la lumière. Lorsqu'un rayon lumineux entre dans la fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit des réflexions totales internes, et se propage jusqu'à l'autre extrémité de la fibre optique en empruntant un parcours de zigzag. Pour que ceci soit possible, deux conditions sont nécessaires. La première condition concerne les indices du cœur et de la gaine et ont été cités plus haut. La seconde condition concerne l'angle d'injection du rayon lumineux dans la fibre. Celui-ci doit être inférieur à l'angle d'acceptance θ_{acc} par rapport à l'axe de la fibre, comme illustré sur la figure 2.2.

La fibre optique est souvent définie par deux paramètres :

- La différence d'indice normalisé, qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine.

$$\Delta = (n_c - n_g) / n_c \quad (2.1)$$

Où n_c est l'indice de réfraction du cœur et n_g celui de la gaine

- L'ouverture numérique (ON) d'une fibre optique qui définit l'ouverture du cône d'acceptance de la fibre. Elle représente la mesure de la quantité maximale qu'une fibre optique peut accepter, et est mesurée par rapport à l'axe de la fibre [20]. L'ouverture numérique est exprimée par :

$$ON = \sin \theta_{acc} = (n_c^2 - n_g^2)^{1/2} \quad (2.2)$$

Où θ_{acc} est l'angle d'acceptance

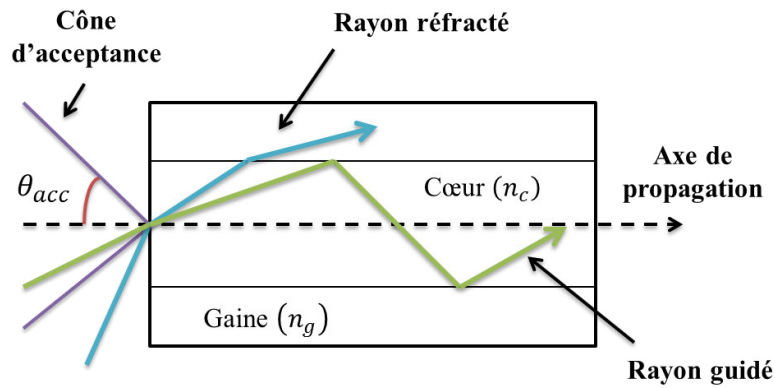


Figure 2.2. Principe de guidage de la lumière par réflexion totale interne

2.2.3. La fibre monomode (SMF) :

Comme décrit précédemment, une fibre optique est constituée entre autres d'un cœur et d'une gaine. Dans le cas de la fibre monomode, le cœur est suffisamment petit par rapport à la gaine, pour qu'il n'y ait qu'un seul mode de propagation dit mode fondamental, d'où son appellation (SMF, Single Mode Fiber). Le diamètre du cœur est ainsi inférieur à $10\mu m$. Ceci est illustré sur la figure 2.3.

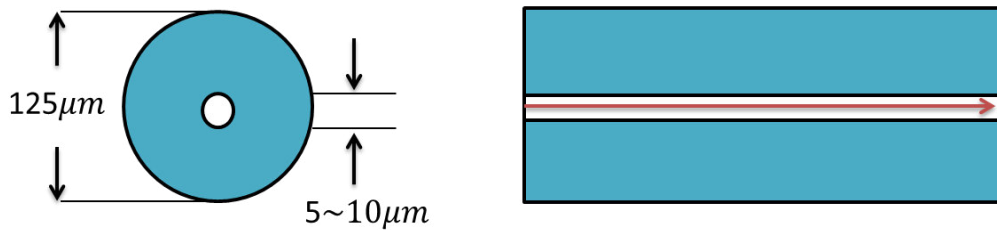


Figure 2.3. Structure de la fibre monomode

Ce type de fibre présente une bande passante très large, un niveau de perte faible (0.5 dB/km pour $1.3\mu m$ et 0.2 dB/Km pour $1,5\mu m$). Pour cette raison, les fibres monomodes sont universellement utilisées pour des transmissions à haut débit et à longue distance [10].

2.3. La propagation de l'impulsion dans une fibre monomode:

Selon la description de Fresnel, une onde lumineuse peut être décrite comme une onde électromagnétique, définie par son vecteur champ électrique et son vecteur champ magnétique. Etant donné que le vecteur champ magnétique peut être déduit à partir des équations de Maxwell, nous modélisons une vibration lumineuse uniquement par son vecteur champ électrique. Si celle-ci se propage suivant une direction z , alors elle s'écrit :

$$E(z, t) = A(z, t) \exp[i(\beta_0 z - \omega_0 t)] \quad (2.3)$$

Où $A(z, t)$ est l'enveloppe du champ optique, ω_0 est la fréquence centrale de la porteuse, et β_0 la constante de propagation [11].

2.3.1. Les effets linéaires de propagation :

La propagation d'une vibration lumineuse dans une fibre optique est décrite selon l'équation de Schrödinger (NSE, Nonlinear Schrödinger Equation), par la relation :

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = i \gamma |A|^2 A - \frac{\alpha}{2} A \quad (2.4)$$

Où $A(t,z)$ est l'enveloppe l'onde optique, α représente les pertes de la fibre optique, β_2 est le coefficient de la vitesse de groupe (GVD, Group Velocity Dispersion) qui est lié au coefficient de dispersion D , et γ représente le coefficient de l'effet Kerr [21]. Rappelons que dans notre étude, nous ne prenons pas en compte ce dernier.

2.3.1.1. Les pertes de la fibre optique :

L'effet de l'affaiblissement ou atténuation dans une fibre optique résulte en un signal optique dont la puissance décroît en fonction de la distance parcourue. Ceci peut être exprimé par :

$$P_z = P_{in} e^{-\alpha z} \quad (2.5)$$

Où P_{in} et P_L sont respectivement la puissance à l'entrée de la fibre et la puissance après une distance de propagation et α est le coefficient d'atténuation exprimé en (Km^{-1}) , mais l'atténuation est généralement exprimé en dB/Km par [10] :

$$\alpha_{(\text{dB/Km})} = 4.34 \cdot \alpha_{(\text{Km}^{-1})} \quad (2.6)$$

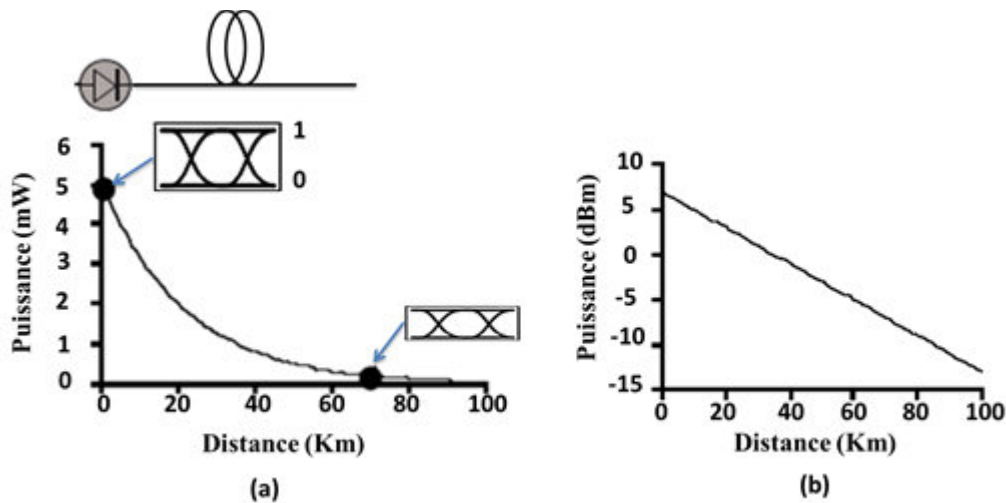


Figure 2.4. L'évolution de la puissance optique, (a) en échelle linéaire (mW) et (b) en échelle logarithmique (dBm) en fonction de la distance de propagation dans une fibre de 100 Km, présentant des pertes de 0.2 dB/Km [1]

L'atténuation de la puissance d'un signal optique traversant une fibre optique est principalement due à des interactions physiques entre l'excitation lumineuse et le matériau qui

constitue la fibre. De plus, cette atténuation dépend aussi de la longueur d'onde du signal optique qui se propage. La figure suivante illustre l'atténuation de la puissance d'une onde lumineuse en fonction de sa longueur d'onde, en mettant en évidence les différents facteurs physiques.

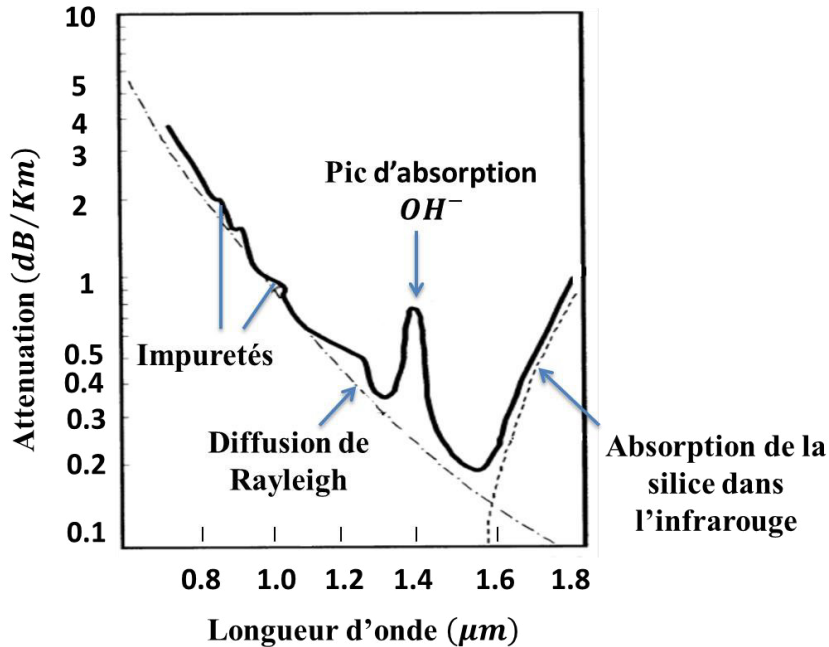


Figure 2.5. Courbe de variation de l'atténuation en fonction de la longueur d'onde pour les fibres monomodes standard (SMF).

Les facteurs d'atténuation sont alors :

- L'absorption intrinsèque de la silice qui provoque une augmentation très rapide des pertes pour des longueurs d'ondes supérieures à 1600 nm.
- La présence d'ions OH^- due au processus de fabrication. Ceci cause des impuretés qui sont responsables du pic d'absorption autour de 1400 nm.
- La diffusion de Rayleigh qui est due aux fluctuations de la composition dans le verre (indice de réfraction) qui diffuse alors la lumière dans toutes les directions. Cet effet limite les performances dans le domaine des courtes longueurs d'onde (domaine visible et proche de l'infrarouge).
- La courbure de la fibre, peut également contribuer à augmenter les pertes par réflexion de la lumière dans la gaine.
- La perte par micro-courbure est soumise aux contraintes mécaniques (allongement, écrasement, torsion...), provoquant des microdéformations du cœur et par conséquent des pertes de la lumière.
- Les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux. Ainsi, chaque jonction provoque une perte de raccordement.

2.3.1.2. La Dispersion chromatique :

Lors d'une propagation, l'interaction de la vibration lumineuse avec la fibre optique résulte à un élargissement de l'impulsion dans le temps. Ce phénomène est connu sous le nom de dispersion chromatique. La figure 2.6 illustre ce phénomène.



Figure 2.6. L'effet de la dispersion chromatique sur une impulsion

La dispersion chromatique dans une fibre monomode provient de la variation de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde $n(\lambda)$. Cette dépendance peut être approximée en utilisant l'équation de Sellmeier donnée par [22] :

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \left(\frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2} \right) = 1 + \sum_{j=1}^m \left(\frac{B_j \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2} \right) \quad (2.7)$$

Où ω_j, λ_j, B_j sont respectivement la pulsation, la longueur d'onde et l'amplitude de $j^{\text{ème}}$ résonance. Dans un milieu dispersif d'indice $n(\omega)$, l'impulsion lumineuse est composée de plusieurs composantes spectrales se propageant à des vitesses différentes $c/n(\omega)$ avec (c : la célérité de la lumière dans le vide).

Considérons une fibre monomode de longueur L . Les composantes spectrales arrivent à l'extrémité de la fibre avec un retard de temps [12] : $T = L/v_g$

Où v_g est la vitesse de groupe définie par

$$v_g = \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right)^{-1} \quad (2.8)$$

On peut également donner la relation entre la constante de propagation β et l'indice de réfraction par :

$$\beta = n k_0 = n \frac{\omega}{c} \quad (2.9)$$

La vitesse de groupe peut être exprimée en fonction de l'indice de réfraction de groupe par :

$$v_g = \frac{c}{n_g} \quad (2.10)$$

Où n_g est l'indice de réfraction du groupe. Il est défini par :

$$n_g = n + \omega \left(\frac{dn}{d\omega} \right) \quad (2.11)$$

Pour comprendre l'effet de la dispersion, nous développons la constante de propagation $\beta(\omega)$ en série de Taylor autour de la pulsation centrale de la porteuse ω_0 . Nous avons alors :

$$\beta(\omega) = \frac{\omega}{c} n(\omega) = \beta_0 + \beta_1 (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2 (\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (2.12)$$

$$\text{Ou } \beta_0 = \beta(\omega_0) \text{ et } \beta_m = \left(\frac{\partial^m \beta}{\partial \omega^m} \right)_{\omega=\omega_0} \quad (m=1,2,\dots)$$

Où β_1 est relié à la vitesse de déplacement de l'enveloppe du signal dite vitesse de groupe par : $v_g = \beta_1^{-1}$. β_2 correspond à la dispersion de la vitesse de groupe traduisant la différence de vitesse de groupe de deux ondes évoluant avec des fréquences voisines. Cette vitesse de groupe est responsable de la déformation temporelle des impulsions. Elle est exprimée en $s^2.m^{-1}$.

β_1 et β_2 peuvent être reliées à l'indice de réfraction effectif de la fibre noté n par les relations suivantes [1] :

$$\beta_1 = \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{1}{v_g} = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{c} \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right) \quad (2.13)$$

$$\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2} = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2} \right) \quad (2.14)$$

La dépendance de la vitesse de groupe et la longueur d'onde entraîne un retard ΔT des composantes spectrales de l'impulsion. Il augmente avec la longueur de la fibre L_{fibre} et la différence de la longueur d'onde $\Delta\lambda$ par :

$$\Delta T = D \cdot L_{fibre} \cdot \Delta\lambda \quad (2.15)$$

Dans la plupart des systèmes de transmission optique, il est commode d'utiliser un paramètre qui exprime le retard de groupe noté D [11]:

$$D = \frac{-2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.16)$$

La valeur de la dispersion d'une fibre optique D est exprimée en $Ps/(Km.nm)$. Cela signifie l'écart temporel en picoseconde de deux longueurs d'ondes séparées de 1 nm, envoyées simultanément dans une fibre optique après une propagation de 1 Km.

Dans ce rapport, nous parlerons de la dispersion chromatique cumulée notée D_{cum} , elle est définie par le cumul de la dispersion après une propagation dans la fibre de longueur L . D_{cum} . Ceci correspond à l'intégrale de la dispersion chromatique sur une distance de propagation L donnée par [4] :

$$D_{cum} = \int_0^L D(z) dz \quad (2.17)$$

D'une manière générale la dispersion chromatique est la somme de deux contributions : la dispersion propre au matériau et la dispersion du guide d'onde.

$$D = D_m + D_g \quad (2.18)$$

La dispersion du matériau D_m résulte de la variation de l'indice de réfraction de la silice en fonction de la fréquence. La dispersion du guide D_g dépend essentiellement de la géométrie de la fibre (le rayon du cœur) [11]. La figure 2.7 montre les contributions de la dispersion chromatique dans une fibre standard (SMF).

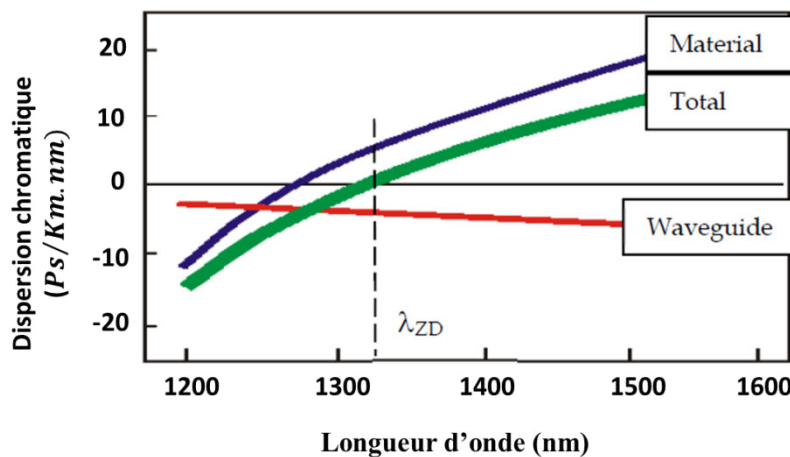
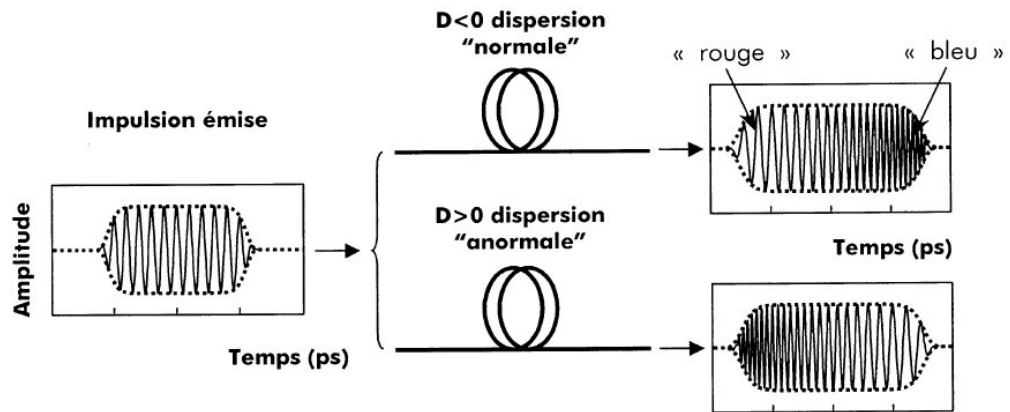


Figure 2.7. La dispersion totale et les deux contributions (dispersion du matériel et la dispersion du guide) dans une fibre standard SMF

Pour les fibres monomodes, la dispersion chromatique s'annule pour une certaine valeur de longueur d'onde $\lambda_{D=0}$, et de part et d'autre, on peut distinguer deux régimes de dispersion :

- Un régime de dispersion dit « anormal », lorsque $\beta_2 > 0$ ($D < 0$), cela veut dire que les paquets d'ondes de longueurs d'ondes courtes se déplacent à une vitesse rapide.
- Un autre régime de dispersion dit « normal », lorsque $\beta_2 < 0$ ($D > 0$), signifie que les paquets d'ondes de longueurs d'ondes centrales courtes se déplacent moins rapidement.

La figure 2.8 illustre les deux régimes de dispersion et leurs effets sur les impulsions optiques [1].



La figure 2.8. Effet de la dispersion chromatique sur la variation de la fréquence de la porteuse optique en fonction du signe de la dispersion de la fibre.

Pour donner un exemple de fibres ayant deux valeurs de dispersions différentes, nous citons la fibre standard (SMF) et la fibre de type DSF (Dispersion Shift Fiber). Celles-ci présentent des valeurs de dispersions de $17 \text{ Ps}/(\text{Km}.\text{nm})$ et de $0 \text{ Ps}/(\text{Km}.\text{nm})$, respectivement, pour une longueur d'onde de 1550 nm . La figure 2.9 illustre la variation de la dispersion en fonction de la longueur d'onde pour ces deux types de fibres. La non utilisation de la fibre DSF est due principalement aux effets non-linéaires, beaucoup plus importants dans ce type de fibre [1].

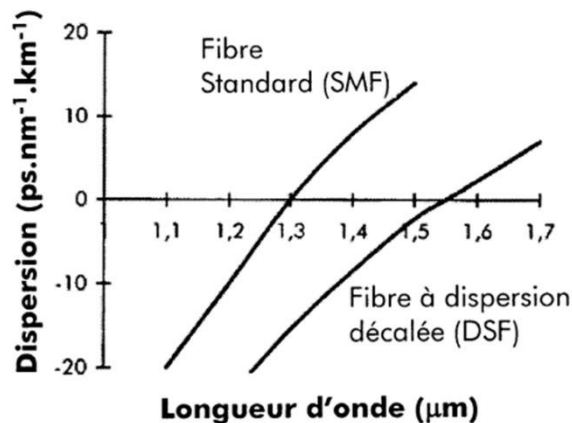


Figure 2.9. La variation de la dispersion en fonction de la longueur d'onde pour la fibre standard (SMF) et à dispersion décalée (DSF) [1].

2.3.2. Compensation des effets linéaires de la ligne de transmission :

Nous avons évoqué jusqu'à présent deux effets linéaires présents dans la fibre : l'atténuation et la dispersion chromatique. Nous allons voir dans ce paragraphe comment contrer ces deux effets, dans le but d'avoir une transmission de bonne qualité.

2.3.2.1. Les amplificateurs optiques dopés à l'Erbium (EDFA) :

En ce qui concerne l'atténuation, la compenser revient tout simplement à ré-amplifier le signal optique. L'amplificateur le plus répandu actuellement dans les transmissions longues

distances est l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier).

Le principe de fonctionnement d'un amplificateur EDFA repose sur l'utilisation d'une fibre dopée avec des ions Erbium Er^{3+} . Un pompage optique par laser conduit à une inversion de population afin de placer les ions dans un état excité. Lorsque le signal lumineux passe dans le morceau de la fibre dopée à l'erbium, il stimule la désexcitation des ions et produit par émission stimulée un autre photon identique au photon incident de même fréquence, de même phase et de même direction. Le signal lumineux a donc été doublé par effet d'amplification.

Un amplificateur optique est un dispositif qui fonctionne dans deux fenêtres de transmission : la bande Conventiennelle (C-band) entre 1525 nm et 1565 nm et la bande Longue (L-band) entre 1570 nm et 1610 nm. La figure 2.10 illustre le principe d'un amplificateur dopé à l'erbium (EDFA).

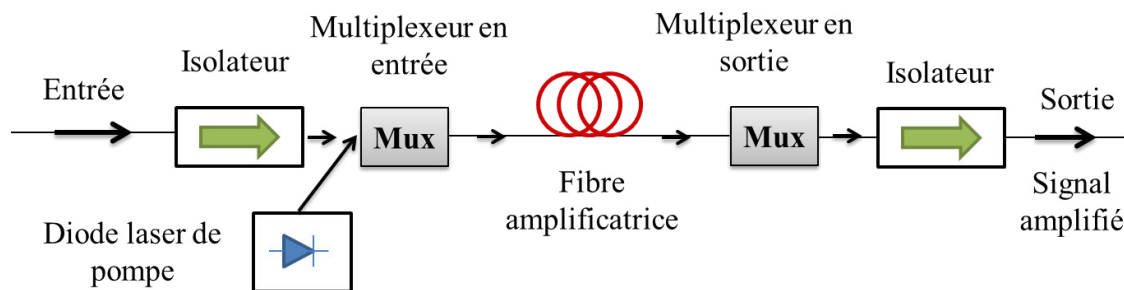


Figure 2.10. Schéma principal d'un amplificateur dopé à l'erbium EDFA

La fibre qui compose cet amplificateur est une fibre monomode de quelques mètres de longueur dont le cœur est dopé par des ions d'erbium. Ensuite, ce dispositif se compose aussi d'une pompe laser à semi-conducteur capable de fournir une forte puissance. Il existe deux longueurs d'ondes de pompage optique 980 nm et 1480 nm qui comme étant les mieux adaptées à l'EDFA. Enfin, un multiplexeur en entrée permet de combiner le signal de pompe et le signal à amplifier, et un autre en sortie permet de récupérer la puissance de pompe non absorbée par la fibre dopée. Les isolateurs (diode optique) quant à eux sont placés pour que le signal optique ne se propage que dans un seul sens, et ainsi éviter toute réflexion parasite, qui pourrait créer une cavité résonante [1,23].

En général un EFDA possède un gain allant de 25 à 45 dB, et une puissance en sortie supérieure à 20 dBm [10].

- **Bruit d'émission spontanée amplifié (ASE) :**

Dans les lignes de transmission par fibre optique, l'utilisation d'amplificateur optique présente une grande source de dégradation de la qualité du signal transmis et une réduction du rendement d'amplification, puisque l'émission stimulée n'est pas le seul phénomène conduisant à la désexcitation des ions. L'autre désexcitation est celle résultante de l'émission spontanée produisant des photons dans des directions aléatoires, qui n'ont aucun lien avec les photons du signal d'entrée. Ces photons émis spontanément sont ensuite amplifiés par

l'émission stimulée, et résultent en un bruit optique dit bruit d'émission spontanée amplifiée (ASE : Amplified Spontaneous Emission) [1].

L'évaluation théorique du bruit d'émission spontanée repose sur une analyse quantique du phénomène, donnant la densité spectrale des photons d'émission spontanée à la sortie de l'amplificateur [1] :

$$2N_{ASE} = 2n_{sp} \cdot hv \cdot (G - 1) \quad (2.19)$$

Où N est la densité spectrale de bruit, G est le gain de l'amplificateur à la fréquence ν

$G = \frac{P_{signal\ sortie}}{P_{signal\ entrée}}$, $h\nu$ est l'énergie d'un photon et n_{sp} caractérise l'inversion de population.

Celle-ci peut être écrite comme suit :

$$n_{sp} = N_2 / N_2 - N_1 \quad (2.20)$$

où N_1 et N_2 sont respectivement les populations atomiques de l'état fondamental et l'état excité. Le facteur de population intervient donc de façon importante dans la génération du bruit. Le pompage de la fibre dopée à 980 nm permet d'assurer une amplification ayant des facteurs d'inversion de population n_{sp} proche de la limite quantique $n_{sp}=1$. Le processus d'émission stimulée pour ce cas est basé sur une répartition énergétique de trois niveaux de populations. Par ailleurs, pour le pompage à 1480 nm, il s'agit d'une répartition énergétique de deux niveaux conduisant à une inversion de population de moins bonne qualité [1].

Un amplificateur est caractérisé par son gain et son facteur de bruit NF (Noise Figure), défini par le rapport signal sur bruit en entrée de l'amplificateur sur le rapport signal sur bruit en sortie par :

$$NF = \frac{(P_{signal}/P_{bruit})_{entrée}}{(P_{signal}/P_{bruit})_{sortie}} \quad (2.21)$$

Ce facteur de bruit peut être exprimé en fonction du gain de la façon suivante :

$$NF = \frac{1}{G} \left(\frac{2N_{ASE}}{hv} + 1 \right) \quad (2.22)$$

Pour un amplificateur EDFA, l'équation (2.21) peut se simplifier lorsque le gain de l'amplificateur est très grand devant 1 :

$$NF \approx 2n_{sp} \quad (2.23)$$

Le facteur de bruit est souvent exprimé en dB par : $NF_{dB} = 10 \log_{10}(NF)$

Pour des amplificateurs utilisant un pompage à 980 nm, le NF est proche de 3 dB, tandis que pour le pompage à 1480 nm, le NF vaut 5.5 dB.

Le rapport signal optique sur bruit (OSNR, Optical Signal-to-Noise Ratio) s'exprime par le rapport de la puissance de sortie du système sur la puissance du bruit ASE accumulé dans le système [1] :

$$OSNR = \frac{P_{sortie,systeme}}{P_{ASE,systeme}} \quad (2.24)$$

Pour évaluer la qualité d'un système, il est donc intéressant de définir le rapport signal sur bruit d'un seul canal que l'on analyse en fin de transmission. Ainsi, l'OSNR d'un canal dans une bande de fréquence $B_{réf}$ donnée est écrit comme suit [1] :

$$OSNR_{B_{réf}} = \frac{P_{sotie,systeme}}{2 N_{ASE,systeme,B_{réf}}} \quad (2.25)$$

Considérons une chaîne de N amplificateurs (EDFA) de même gain G et de même facteur de bruit NF, fournissant la même puissance d'entrée pour N-1 tronçons de fibres identiques comme le montre la figure 2.11.

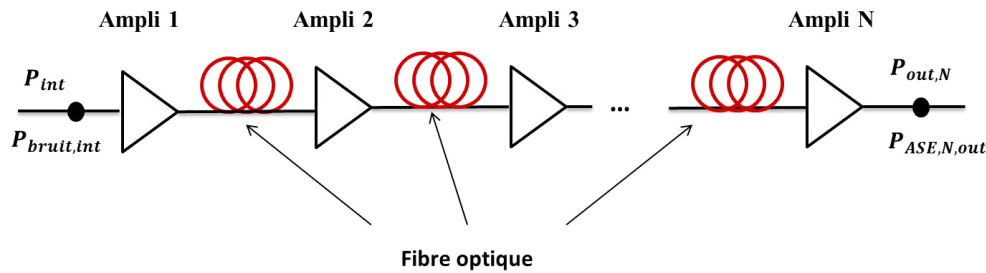


Figure 2.11. Schéma d'une ligne de transmission séparée par des amplificateurs optiques

Dans ce cas, l'expression de l'OSNR est donnée par :

$$(OSNR)_{out,N,B_{ref}} = \frac{G \cdot P_{int,ampli}}{N \cdot 2 N_{ASE} \cdot B_{réf} + N_{bruit} \cdot B_{réf}} \quad (2.26)$$

La relation entre la densité spectrale de bruit optique et le facteur de bruit est exprimée par :

$$2 N_{ASE} = NF \cdot h\nu \cdot G \quad (2.27)$$

A partir de l'équation (2.25) nous exprimons l'OSNR en dB en prenant un gain G égal à 1 et en négligeant le bruit avant le premier EDFA par rapport au bruit ASE accumulé dans le système. Nous avons donc [1] :

$$\left(OSNR_{out,N,B_{réf}} \right)_{dB} = P_{int,ampli}(dBm) - NF_{(dB)} - 10 \log_{10}(N) - 10 \log_{10}(h\nu \cdot B_{réf}) \quad (2.28)$$

Cette relation est d'une importance capitale pour notre étude, car nous l'utiliserons pour définir l'OSNR à l'entrée du récepteur, et ainsi pouvoir évaluer la qualité de notre transmission.

2.3.2.2. Compensation de la dispersion chromatique :

Bien que dans notre cas, nous n'utiliserons pas de compensation de dispersion chromatique, car nous ne traitons que des distances très courtes (< 100 Km), il est intéressant d'avoir une idée sur cette méthode, et la façon dont elle est exécutée dans un système de transmission.

Jusqu'à il y a quelques années, avant l'avènement des récepteurs cohérents, la compensation de dispersion se faisait à l'aide de fibres à compensation de dispersion (DCF, Dispersion Compensating Fiber). Ce principe est très simple, et consiste à introduire des fibres de longueurs adaptées aux fibres de ligne mais avec une dispersion de signe opposé [1]. La figure 2.12 illustre ceci. Cette méthode est toujours utilisée dans les systèmes où la compensation de dispersion se fait en ligne. La condition à remplir pour compenser la dispersion d'une longueur de la fibre L à une longueur d'onde λ est :

$$L_{SMF} \cdot D_{SMF}(\lambda) = L_{DCF} \cdot D_{DCF}(\lambda) \quad (2.29)$$

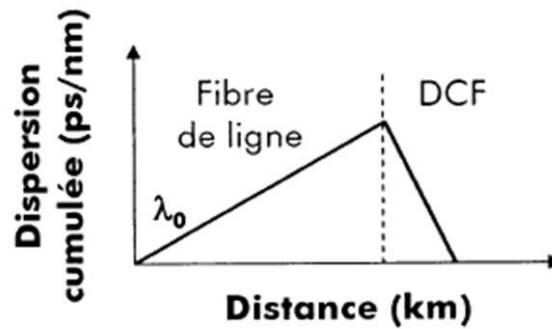


Figure 2.12. La compensation de la dispersion chromatique par le biais d'une DCF [1]

2.4. Conclusion :

Nous avons vu dans ce chapitre la ligne de transmission, et mis en évidence les effets qui nous intéressent dans notre étude. Nous avons ainsi détaillé principalement la dispersion chromatique, car rappelons que les systèmes que nous traitons dans ce rapport concerne le réseau d'accès et donc des distances qui ne dépassent pas 100Km. Les effets non-linéaires de la fibre n'apparaissent donc pas.

Chapitre 3

Récepteur

3.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons aborder la partie réception dans un système de transmission. Etant donné que notre système traite un signal modulé en intensité, la réception adéquate est ce qu'on appelle la détection directe. De plus, dans l'objectif d'évaluer la qualité de la transmission, nous détaillerons aussi dans ce chapitre comment nous procédons pour définir un facteur de qualité.

3.2. Le récepteur optique :

3.2.1. Détection directe :

Un détecteur direct est composé principalement d'un amplificateur, d'un filtre optique et d'une photodiode, servant à convertir le signal optique en un signal électrique [11]. Une fois que le signal électrique est récupéré, un bloc de décision lui est appliqué. Celui-ci nous permet de restituer la séquence binaire, à partir de l'amplitude du signal électrique [4]. La figure suivante représente un schéma synoptique d'un récepteur direct.

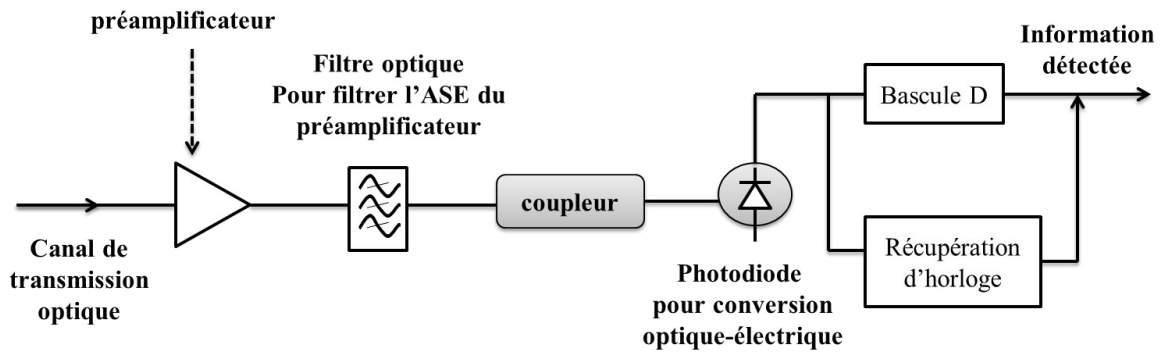


Figure 3.1. Schéma de principe d'un récepteur optique

3.2.2. Photodiode :

La photodiode est un dispositif essentiel du récepteur qui permet de convertir un signal optique en un signal électrique.

Le principe d'une photodiode est de convertir une puissance optique en libérant des électrons dans la jonction P-N de la photodiode. Le nombre d'électrons est proportionnel au nombre de photons par [8]:

$$I_P = \frac{\eta \lambda}{1.24} P_{opt} \quad (3.1)$$

Où η est le rendement de la conversion photon-électron, λ est la longueur d'onde de la lumière.

Le courant généré par la photodiode est constitué d'un courant I_P pur et un bruit $i_s(t)$ ajouté à la photodiode, comme illustré sur la figure 3.2. Ainsi :

$$I(t) = I_P + i_s(t) \quad (3.2)$$

Où $i_s(t)$ est un bruit quantique. Sa variance est décrite comme suit :

$$\sigma_s^2 = 2qI_P\Delta f \quad (3.3)$$

Où q est la charge de l'électron et Δf est la bande passante effective de la photodiode.

En plus du bruit quantique, il existe un autre type de bruit, le bruit thermique interne au récepteur. Dans l'étude que nous menons, les deux types de bruits sont négligés. nous considérons que le bruit de l'ASE [8].

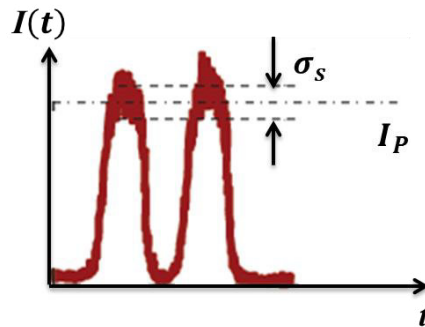


Figure 3.2. Courant généré par la photodiode associé à un bruit quantique

Dans les systèmes de transmission, les photodiodes les plus utilisées sont les photodiodes PIN (Positive Intrinsic Negative), qui assurent la conversion optoélectronique avec un minimum de dégradation. Il s'agit d'un semi-conducteur intrinsèque (non dopé). Sa particularité réside dans sa jonction P-N qui est composée d'une zone intrinsèque intercalée entre une couche fortement dopée P et une couche fortement dopée N [24].

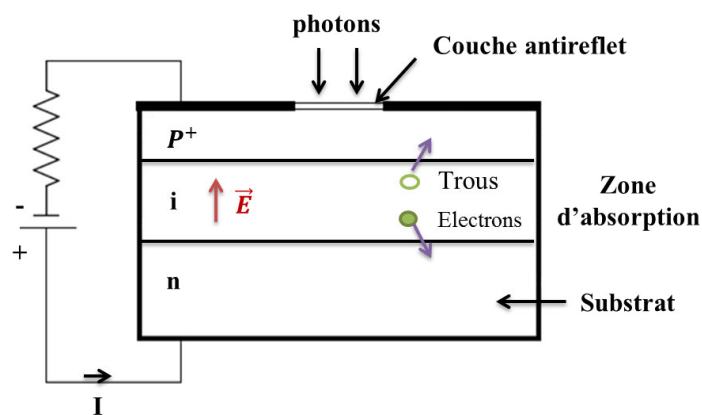


Figure 3.3. Photodiode PIN

3.2.3. La décision :

Une fois que le signal électrique soit récupéré, il nous faut reconstituer la séquence binaire envoyée dans la ligne. Pour ce faire, nous appliquons le bloc de décision. Celui-ci est composé d'un circuit de récupération d'horloge, appelé aussi circuit de synchronisation, et d'un détecteur de seuil. Par ailleurs, dans notre cas, la décision se fait au moyen du

diagramme de l'œil, qui sera décrit dans le paragraphe suivant. La figure suivante illustre ainsi le principe de fonctionnement d'un bloc de décision.

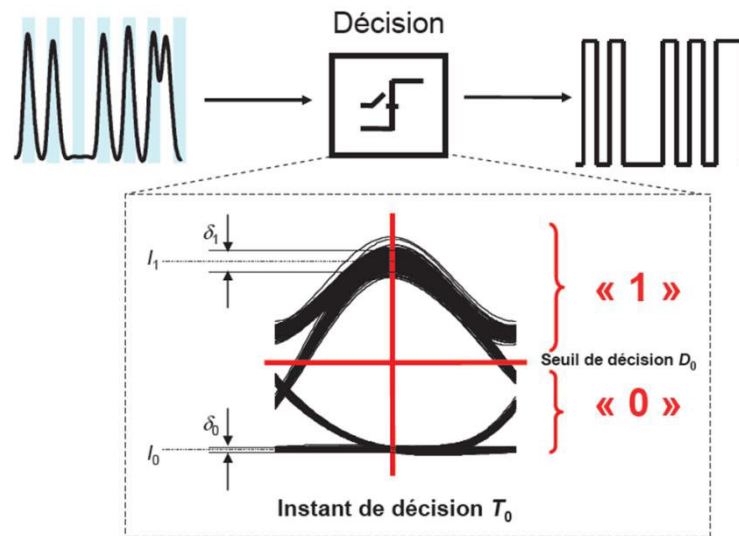


Figure 3.4.Principe de la décision basé sur le diagramme de l'œil

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, le signal électrique est échantillonné. Pour pouvoir reconstituer la séquence binaire, il nous faut donc prélevé un échantillon dans chaque temps symbole. Pour ce faire, deux éléments sont à déterminer : l'instant de décision et le seuil de décision. Le premier paramètre, comme le montre la figure ci-dessus, est déterminé à l'aide du circuit de synchronisation. Le second paramètre quant à lui est déterminé à l'aide du détecteur de seuil.

Ainsi, à l'instant de décision, les niveaux d'un signal détecté sont généralement entre deux valeurs moyennes I_1 et I_0 , la variation autour du niveau haut est appelé le bruit sur les 1, et la racine carré de la variance des densités de probabilité est appelé δ_1 . La variation autour du niveau bas est appelée le bruit sur les 0 et la racine de la variance des densités de probabilité est appelée δ_0 . Les échantillons du signal électrique récupérés, la décision se fait de la façon suivante [8] :

- Si l'intensité détectée à l'instant de décision est supérieure au seuil de décision, alors le symbole est un « 1 ».
- Si l'intensité détectée à l'instant de décision est inférieure au seuil de décision, alors le symbole est un « 0 ».

3.3. Les critères d'évaluation de la qualité des systèmes de transmission optique :

Dans une transmission utilisant la détection directe, la qualité est évaluée à l'aide du taux d'erreur binaire (BER, Bit Error Rate). Celui-ci est calculé en comparant la séquence envoyée à celle reçue, cette dernière étant obtenue grâce notamment au diagramme de l'œil. Par ailleurs, pour pouvoir visualiser la qualité de la transmission sur une courbe, le BER est traduit en un facteur de qualité Q^2 . Nous allons détailler ces trois points.

3.3.1. Diagramme de l'œil:

Le diagramme de l'œil est une méthode de visualisation de la qualité du signal en termes de bruit d'amplitude, d'interférences inter symboles ou de giges temporelles. Il est défini par la superposition d'un grand nombre de symboles binaires dans le domaine temporel, comme le montre la figure 3.5. En laboratoire, il est obtenu après détection de la photodiode, au moyen d'un oscilloscope synchronisé sur la fréquence d'horloge [1].

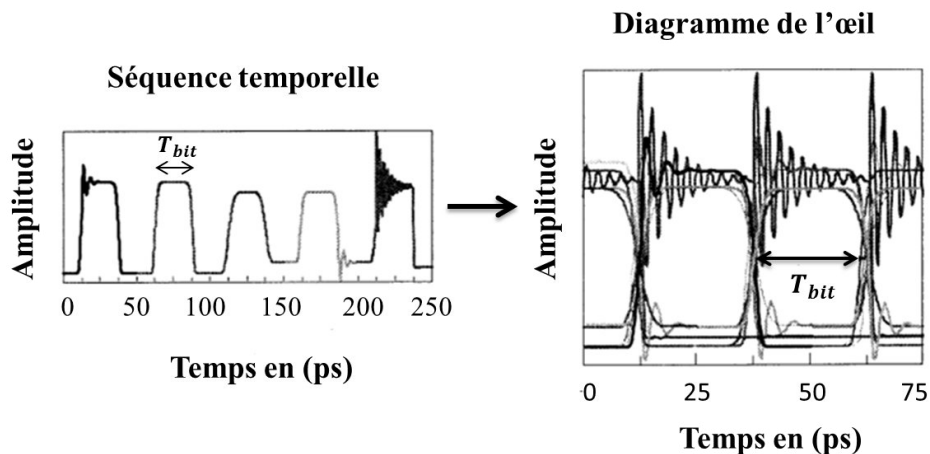


Figure 3.5. La construction du diagramme de l'œil à partir de la séquence temporelle [1].

A partir du diagramme de l'œil, nous pouvons facilement constater la qualité du signal. Si les niveaux des symboles « 1 » sont bien distincts des niveaux des symboles « 0 », nous dirons que l'œil est ouvert. Par contre, si la dégradation est de telle sorte que nous ne pouvons plus distinguer entre les deux niveaux, nous parlerons d'un œil fermé soit horizontalement ou verticalement. La figure 3.6 illustre un exemple d'un diagramme de l'œil pour le cas d'un signal de bonne qualité (a) et d'un signal bruité (b).

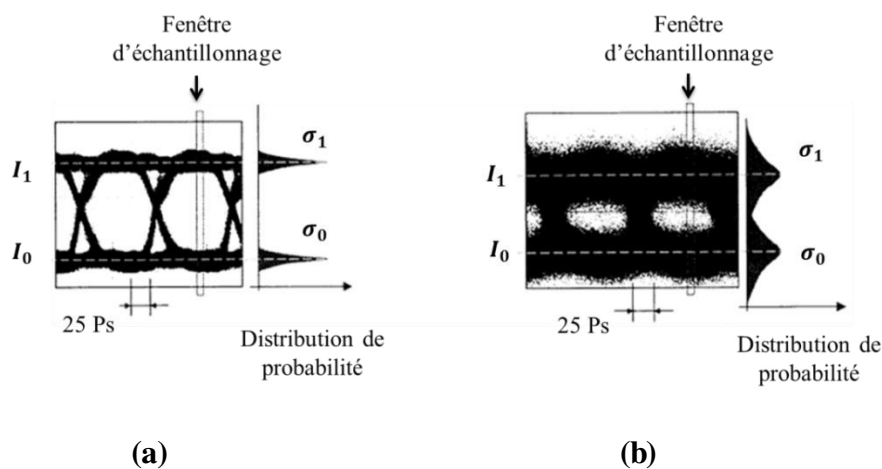


Figure 3.6. Diagramme de l'œil d'un signal de bonne qualité (a) et d'un signal bruité (b)

3.3.2. Taux d'erreur binaire (BER) :

Etant donné que dans les systèmes de transmission, les données sont transmises d'une manière numérique, c'est-à-dire une séquence de données binaires, le critère le plus intuitif permettant d'évaluer la qualité du signal transmis est la comparaison entre la séquence binaire à l'émission et celle à la réception. Nous parlons dans ce cas de taux d'erreur binaire. Il est défini par le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits transmis [4] :

$$BER = \frac{\text{nombre de bits érronés}}{\text{nombre de bits transmis}} \quad (3.4)$$

3.3.3. Le facteur de qualité (Q):

Il existe un autre critère d'évaluation de la qualité de transmission appelé le facteur de qualité (Q). C'est un paramètre permettant d'estimer le taux d'erreur binaire sans avoir à compter les erreurs, mais en considérant tout simplement l'amplitude moyenne des bits « 1 » et « 0 » et la valeur de leur écart type σ_1 et σ_0 , ceci en prenant comme hypothèse que le bruit sur les 1 et 0 suit une loi de probabilité gaussienne et que les bits « 1 » et « 0 » sont équiprobables. Le facteur de qualité est défini par [1] :

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.5)$$

Où I_1 et I_0 sont respectivement les valeurs moyennes des niveaux « 1 » et « 0 », σ_1 et σ_0 les racines carrés des variances des densités de probabilité des symboles « 1 » et « 0 ». Ces grandeurs sont représentées sur la figure 3.7 [1].

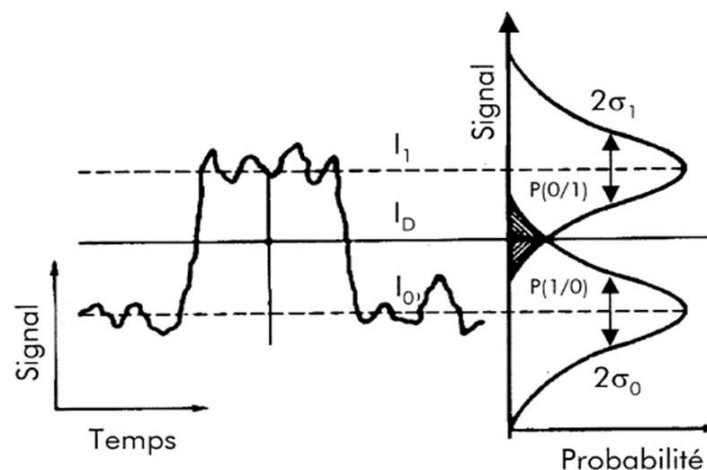


Figure 3.7. Principe d'évaluation du taux d'erreur par le facteur Q : à gauche l'évolution temporel du signal avec des fluctuations des niveaux « 1 » et « 0 », à droite la distribution supposée gaussienne des deux niveaux avec leur écart type associé σ_1 et σ_0 . Le niveau I_D correspond au seuil de décision.

Le BER est simplement relié au facteur de qualité Q par la formule suivante :

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{Q}{\sqrt{2}} \right] \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{Q} \quad (3.6)$$

Où erfc désigne la fonction d'erreur complémentaire définie par :

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-y^2} dy \quad (3.7)$$

La correspondance entre le facteur de qualité et le taux d'erreur binaire est montrée par la figure 3.8 [1].

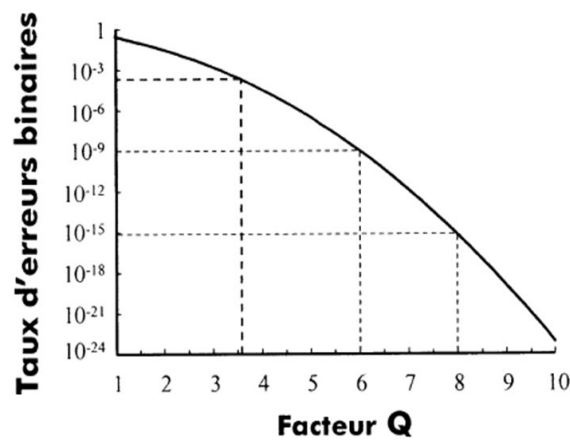


Figure 3.8. Correspondance entre le facteur Q et le taux d'erreur binaire.

Le facteur Q est usuellement exprimé en dB par :

$$Q_{(dB)} = 20 \log_{10}(Q) \quad (3.8)$$

Notons que le facteur Q en dB est la version décibel du carré du facteur Q défini par l'équation (3.5), par abus de langage le facteur Q en dB correspond au facteur Q^2 en dB [1].

3.4. Conclusion :

Nous avons décrit jusqu'à présent un système de transmission optique, en mettant en évidence les points qui nous intéressent pour cette étude. Dans ce qui suivra, nous nous intéresserons au modèle de lasers de type DML, et étudierons un système de transmission dédié aux réseaux d'accès, que nous avons modélisé numériquement. Nous mettrons ainsi en évidence notre contribution.

Chapitre 4

Modèle théorique DML, mise en place
numérique, résultats de validation du modèle

4.1. Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre 4 le modèle théorique du laser DML proposé dans la littérature, et nous montrons également les premiers résultats que nous avons obtenus après codage du modèle en simulation numérique.

4.2. Modulation directe de la diode laser :

Comme nous l'avons déjà vu la modulation directe d'un laser est la méthode la plus simple pour transcrire les données électriques sur une porteuse optique, en modulant directement le courant injecté dans la zone active du laser. Nous indiquons dans la suite un modèle que nous avons repris de la littérature [15] pour la description formelle du comportement d'un laser à semi-conducteur :

Les équations régissant l'évolution du nombre de photons et du nombre de porteurs dans la couche active d'un laser DML sont les suivantes :

$$\frac{dP}{dt} = GP + R_{sp} - \frac{P}{\tau_p} \quad (4.1)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{e} - \frac{N}{\tau_c} - GP \quad (4.2)$$

Où R_{sp} est le taux d'émission spontanée du mode du laser, τ_p est la durée de vie d'un photon, τ_c est la durée de vie des porteurs, G est le taux net d'émission stimulée, I est l'intensité du courant appliqué à la diode laser et e est la charge de l'électron.

La relation entre le gain pic du matériau et la densité des porteurs peut être empiriquement approximée par :

$$g_m = \frac{\sigma_g}{V} (N - N_o) \quad (4.3)$$

Où σ_g est le gain différentiel, v est le volume de la couche active et N_o est le nombre de porteurs à la transparence. Dû à l'étalement du mode optique en sortie de la couche active, le gain en puissance à la fréquence du mode g a besoin d'être corrigé selon $g = \Gamma g_m$, où Γ est le facteur de confinement. Nous déduisons de cela que G peut être déduit comme suit :

$$G = \Gamma v_g g_m = G_N (N - N_o) \quad (4.4)$$

Où $G_N = \Gamma v_g \sigma_g / V$ et v_g est la vitesse de groupe dans la cavité

L'équation (1.2) montre la relation entre le gain g et les pertes à l'intérieur de la cavité Fabry Pérot :

$$g = \alpha_{int} + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) = \alpha_{int} + \alpha_{mir}$$

$$\alpha_{cav} = \alpha_{int} + \alpha_{mir}$$

La durée de vie d'un photon est reliée aux pertes de la cavité (α_{cav}) par :

$$\frac{1}{\tau_p} = \nu_g \alpha_{cav} \quad (4.5)$$

La durée de vie des porteurs est gouvernée par les mécanismes d'émission spontanée et stimulée, et par les recombinaisons non radiatives (défaut dans la cavité, processus Auger)

$$\frac{1}{\tau_c} = A_{nr} + BN + CN^2 \quad (4.6)$$

Où $A_{nr}N$ est le taux de recombinaison dû au défaut dans la cavité, BN^2 est le taux d'émission spontanée, CN^3 est le taux de recombinaison dû au processus Auger. En prenant β comme la fraction d'émission spontanée selon le mode du laser, R_{sp} peut être exprimé en fonction du nombre de porteurs selon :

$$R_{sp} = \beta BN^2 \quad (4.7)$$

- **Régime statique :**

En se plaçant dans un premier temps dans l'hypothèse d'un régime statique, le courant appliqué à la diode laser est constant, et par suite :

$$\frac{dN}{dt} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{dP}{dt} = 0 \quad (4.8)$$

Si l'émission spontanée est négligée, nous avons à partir de l'équation (4.1) :

$$P \left(G - \frac{1}{\tau_p} \right) = 0 \quad (4.9)$$

Et par suite, le taux net d'émission stimulée devient :

$$P = 0, \quad G = 1/\tau_p \quad (4.10)$$

A partir de l'équation (4.2) nous déduisons :

$$N = \tau_c I / e \quad (4.11)$$

En reportant ceci dans l'équation (4.4), nous pouvons dire que le nombre de porteurs est constant et bloqué à une valeur seuil notée N_{th} comme suit :

$$N = N_o + \frac{1}{G_N \tau_p} \equiv N_{th}$$

Ensuite, le nombre de photon est exprimé par :

$$P = \frac{\tau_p}{e} \left(I - \frac{eN_{th}}{\tau_c} \right) = \frac{\tau_p}{e} (I - I_{th}) \quad (4.12)$$

Nous pouvons donc déduire la puissance optique émise par la diode laser, comme suit :

$$P_e = \frac{1}{2} v_g \alpha_{mir} h \omega P \quad (4.13)$$

En ajoutant les hypothèses d'une réflectivité des miroirs de la cavité identiques ($R_1=R_2$), que le rendement quantique interne η_{int} est égal à 1 (ce qui signifie que tous les électrons ont contribué à l'émission stimulée), et que l'efficacité du couplage optique est aussi égale à 1 (ce qui veut dire que l'ensemble de la puissance optique est émise à la sortie du laser), la puissance optique à la sortie du laser peut être exprimée en terme de rendement quantique externe par [15] :

$$P_e = \frac{1}{2} \eta_{ext} \frac{h\nu I}{e} \quad (4.14)$$

L'équation (4.14) peut aussi s'exprimer par :

$$P_e = \frac{1}{2} \eta_d (I - I_{th}) \frac{h\nu}{e} \quad (4.15)$$

Où η_d est le rendement quantique différentiel qui vérifie $\eta_{ext} = \eta_d (1 - I_{th}/I)$ et qui peut être exprimé selon :

$$\eta_d = \frac{\eta_{int} \alpha_{mir}}{\alpha_{mir} + \alpha_{int}} \quad (4.16)$$

- **Modèle dans le cadre d'une modulation petit signal :**

Le laser est maintenant polarisé autour d'un courant de biais I_b au-dessus du courant de seuil, pour lequel nous avons également une quantité de photons P_b associée. Dans l'hypothèse d'une modulation « petit signal », nous avons la variation de courant d'injection due à la modulation $\Delta I(t)$ telle que $|\Delta I(t)| \ll |I_b - I_{th}|$

L'évolution du courant modulé en fonction du temps est donnée par :

$$I(t) = I_b + \Delta I(t) \quad (4.17)$$

Cette modulation du courant d'injection induit une modulation du nombre de photon en sortie qui peut être exprimé de manière équivalente en régime dynamique petit signal selon l'équation (4.18). Nous avons également représenté à la figure 4.1 la modulation de la puissance optique de sortie du DML en fonction de la variation de son courant d'injection.

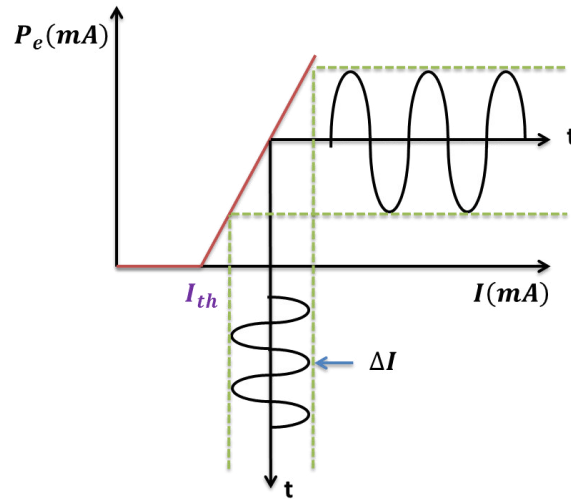


Figure 4.1. Caractérisation de la modulation directe d'un petit signal [15]

$$P(t) = P_o + \Delta P(t) \quad (4.18)$$

Le nombre de porteurs correspondant est :

$$N(t) = N_b + \Delta N(t) \quad (4.19)$$

Et la puissance de sortie, de la même façon, peut être exprimée selon :

$$P_e(t) = P_{eb} + \Delta P_e(t) \quad (4.20)$$

Selon la référence [15], en augmentant la fréquence de la variation du courant d'injection, le rapport de l'amplitude de variation de la puissance de sortie sur l'amplitude de la variation du courant d'injection va varier selon l'équation suivante :

$$H_{DML,ps}(f) = \frac{1}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + 2j\gamma\left(\frac{f}{f_0}\right)} \quad (4.21)$$

Où f_0 est la fréquence de résonance de la réponse « petit signal » et γ est le paramètre d'amortissement. La figure suivante représente $H_{DML,ps}$ en fonction de la pulsation ω .

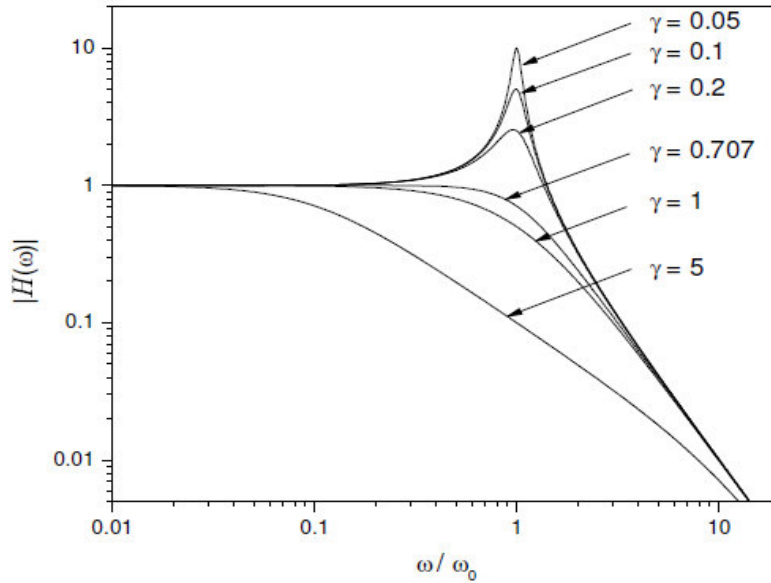


Figure 4.2. Réponse petit signal d'un laser DML [15]

Cette figure indique que la puissance de sortie du laser chute au-delà de la fréquence f_0 (qui actuellement est légèrement supérieur à 10 GHz) avec une éventuelle résonance pour un facteur d'amortissement inférieur à 1. Cette courbe permet aussi d'évaluer la bande passante du laser DML.

4.2.1. Le chirp du laser :

La modulation directe du laser conduit à un changement de la densité des porteurs avec la variation du courant injectée dans la couche active, et qui contribue par la suite à une variation de l'indice de réfraction. Ceci induit une variation de fréquence d'émission du laser, dépendante de sa puissance d'émission. Ce phénomène est appelé le « chirp » en anglais.

La relation entre la variation de la fréquence et la puissance optique émise par laser est détaillée dans la référence [15] et suit l'équation suivante :

$$\Delta\nu(t) = \frac{\alpha}{4\pi} \left(\frac{d}{dt} [\ln P_e(t)] + K P_e(t) \right) \quad (4.39)$$

Avec K étant le paramètre de chirp adiabatique et α le facteur d'Henry.

Le chirp laser est décomposée en deux termes, le premier terme définit le chirp transitoire, ce terme est proportionnel à la dérivée de la puissance optique en mode logarithmique, le second terme définit le chirp adiabatique, il est directement proportionnel à la puissance optique [16].

4.2.1.1. Le chirp transitoire :

$$C_T = \frac{\alpha}{4\pi} \frac{d}{dt} [\ln P_e(t)] \quad (4.40)$$

Le chirp transitoire est la variation de la fréquence instantanée avec la variation de la puissance optique, ce chirp cause aussi une variation de la largeur de l'impulsion lors des

transitions des bits 1 à 0 ou l'inverse. Il est sensible à la variation de la forme d'impulsion [16,17]. La figure 4.3 illustre l'influence du chirp transitoire sur la largeur de l'impulsion.

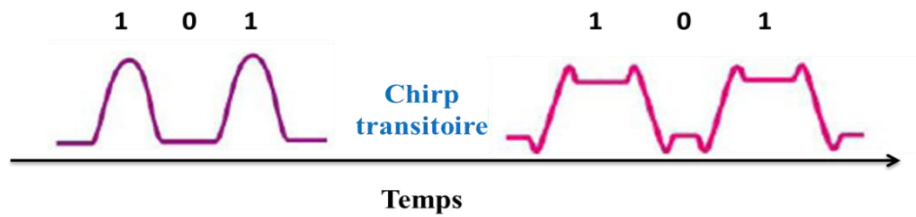


Figure 4.3.L'influence du chirp transitoire sur la largeur de l'impulsion

4.2.1.2. Le chirp adiabatique :

$$C_A = \frac{\alpha}{4\pi} KP_e(t) \quad (4.41)$$

Lors d'une modulation de type OOK, le chirp adiabatique est responsable du décalage fréquentiel des bits 1 et 0, signifiant que la fréquence du signal physique associé au symbole « 1 » et la fréquence de celui associé au symbole « 0 » sont différentes [17].

Le faible coût du DML a récemment attiré l'attention de beaucoup de concepteurs pour les applications sur les systèmes métropolitains. Cette technologie a été rapidement utilisée pour les transmissions Ethernet à 10 Gbit/s, car elle permet de transmettre les données à grande vitesse et faible coût, pour une consommation faible et un encombrement restreint. Cependant la caractéristique du chirp du DML, limite significativement la distance maximale de transmission, en utilisant une fibre monomode (SMF) caractérisée par une dispersion chromatique positive, ce qui veut dire que l'interaction entre le chirp du laser et la dispersion cause des distorsions au signal propagé tout au long d'une fibre optique [18-19].

Le chirp induit par la modulation directe du laser est un élément important à prendre en considération puisqu'il influe sur l'évolution des impulsions soumises à la dispersion chromatique de la fibre ($\approx 17 \text{ ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$). Une impulsion sans chirp est élargie par la dispersion. La figure 4.4 montre l'influence du chirp transitoire sur l'évolution de la largeur de l'impulsion pour des impulsions gaussiennes se propageant sur une fibre à dispersion négative ($D < 0, \beta_2 > 0$), pour des valeurs du facteur de Henry $\alpha = 0, 2, -2$ [1].

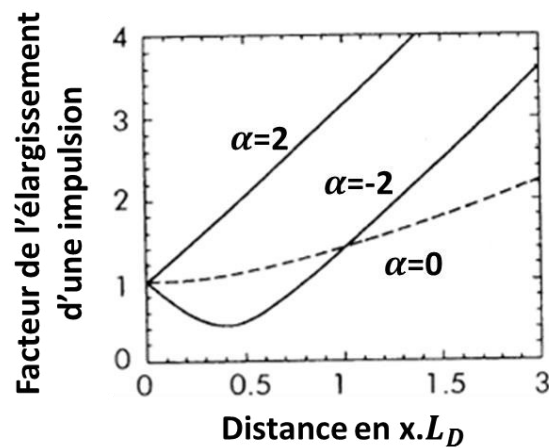


Figure 4.4. Rapport de la largeur d'impulsion sur la largeur initiale en fonction de la distance mesurée en x fois la longueur de la dispersion L_D pour trois valeurs de facteur de Henry [1]

Pour de transmission à très longues distances, compte tenu de la limitation en bande passante du DML montrée à la figure 4.2, et de la présence du phénomène du chirp dans les lasers DMLs, une utilisation d'un modulateur externe est préférée par les équipementiers.

4.3. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de décrire un modèle de laser DML, en détaillant comment dépend sa puissance d'émission en fonction du courant d'injection en régime statique et en régime dynamique petit signal. Nous avons également décrit un élément important des lasers DML qui correspond à une variation des fréquences instantanées des signaux à leur sortie en fonction de leur puissance d'émission appelée chirp. Ce modèle sera utilisé lors du codage de nos outils de simulation dont les principaux résultats seront exposés au chapitre suivant, dans lequel nous présenterons également les résultats d'une transmission d'un signal modulé directement par laser à un débit de 10 Gbit/s.

Chapitre 5

Résultats de Simulation

5.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons étudier la transmission d'un signal modulé directement par laser à un débit de 10 Gbit/s à l'aide de programmes que nous avons codé en utilisant le logiciel « Matlab® ». Ces programmes permettent de simuler tout le système de l'émetteur au récepteur pour une transmission de l'ordre de la centaine de kilomètres et d'évaluer la qualité de cette transmission.

5.2. L'intérêt de la simulation :

Le développement des télécommunications par fibre optique a nettement révolutionné l'architecture des réseaux, la conception des systèmes de transmission optique est devenue de plus en plus complexe vu les méthodes de modulation utilisées, les composants ainsi que le nombre important de leurs paramètres qui influent sur la performance de la liaison. A cause du grand nombre de paramètres des systèmes, les outils de simulation constituent une solution intéressante pour l'optimisation des systèmes avant d'en faire les tests expérimentaux coûteux.

Les logiciels de simulation sont considérés comme étant une aide à la conception, en évitant la multiplication d'essais compliqués et onéreux, ils permettent non seulement d'évaluer la qualité de la transmission mais aussi d'optimiser la performance, parfois de trouver des améliorations des caractéristiques des composants avant qu'ils ne soient disponibles sur le marché.

En plus de l'aide précieuse qu'ils apportent pour le développement des systèmes actuels, les simulateurs du système de transmission optiques peuvent être d'une grande utilité pour la recherche et l'investigation des futurs systèmes, en raison de la possibilité qu'ils offrent à améliorer et introduire de nouveaux modèles au sein des programmes.

5.3. Description du système de transmission optique utilisant une diode laser modulée directement :

Le système de transmission optique simulé est illustré par la figure 5.1. Le rôle principal d'un système de transmission est de véhiculer les données sous forme numérique (format NRZ) à un débit de 10 Gbit/s sur une distance, ici d'environ 100 km. La simulation de l'émetteur est constituée premièrement de la génération d'un signal électrique contenant l'information d'une séquence aléatoire (RBS pour Random Bit Sequence), filtré par un filtre électrique de forme type gaussienne. Ce signal électrique module le courant d'injection d'une diode laser qui convertissant ainsi le signal contenant l'information dans le domaine de l'optique. Comme vu au chapitre IV cette modulation est accompagnée d'une modulation de fréquence parasite appelé chirp. A la sortie du laser on place un filtre optique « filtre en anneau » afin de rendre la transmission plus performante.

Le signal est ensuite propagé sur une fibre optique de type SMF (Single Mode Fiber) éventuellement suivie d'un amplificateur optique EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) permettant d'augmenter le niveau de puissance optique. En fin de liaison, le signal optique entre dans le récepteur. Celui-ci est constitué d'un filtre optique qui permet de diminuer le

niveau de bruit généré par l'amplificateur optique, une photodiode qui assure la conversion d'un signal optique en un signal électrique, ensuite un bloc de décision qui a pour but de récupérer les données binaires «1» et «0». Après décision les données reçues sont comparées à celles de la séquence d'entrée et le taux d'erreur binaire (BER) puis le facteur de qualité (Q^2) sont évalués. Les divers éléments du système sont précisés par la suite et les résultats des programmes de simulation sont présentés.

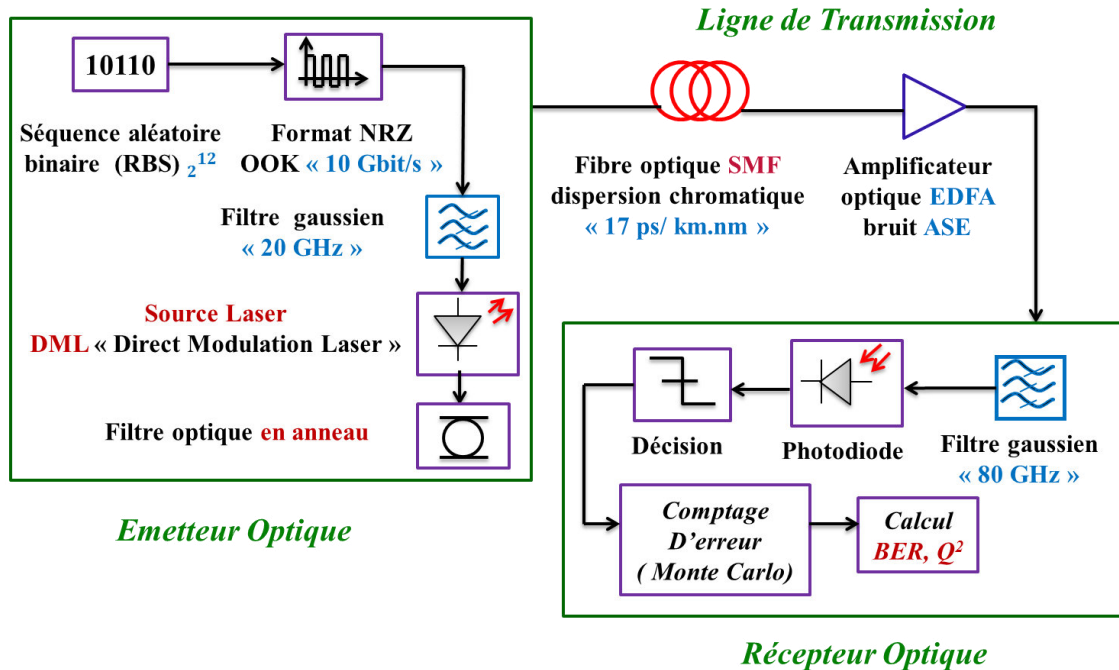


Figure 5.1. Schéma de simulation d'un système de transmission optique

5.4. Description de l'interface d'émission :

Le principe de simulation de l'émetteur est rappelé à la figure 5. Nous montrons dans la suite les résultats de simulation de chacun de ses blocs

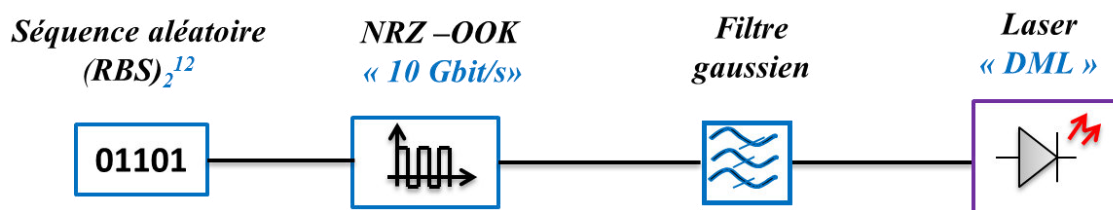


Figure 5.2. Schéma de simulation de l'interface d'émission

5.4.1. Les données électriques :

Les données électriques de format NRZ à un débit de 10 Gbit/s sont générées à partir d'une séquence aléatoire binaire «1» et «0» d'une longueur 2^{12} bits la figure 5.3 montre le modèle de simulation des données NRZ.

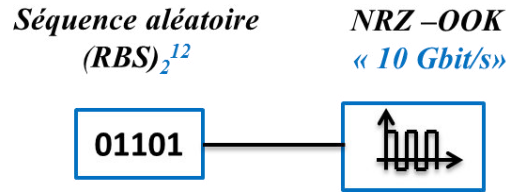


Figure 5.3. Le modèle de simulation des données NRZ

• Résultats de la simulation :

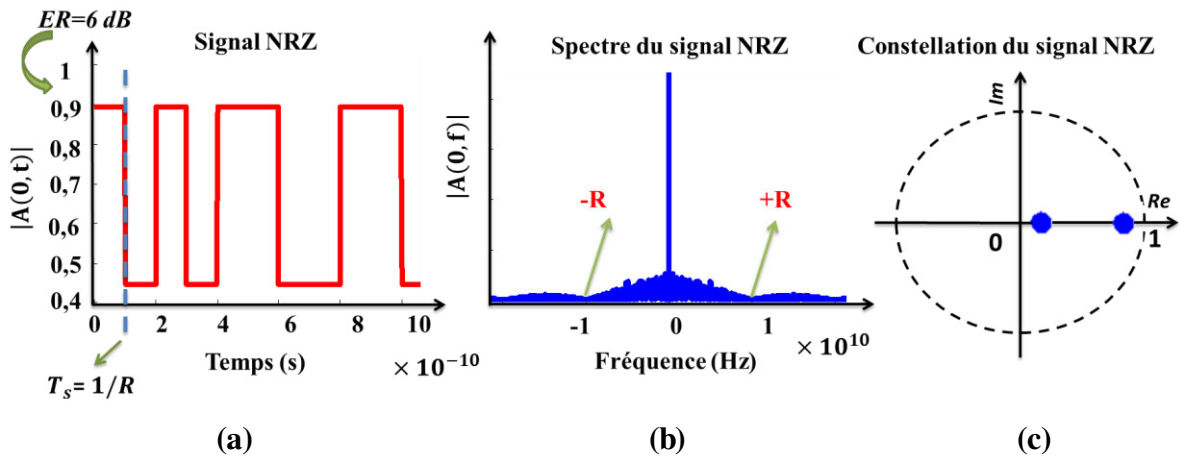


Figure 5.4. Tracé (a) temporel du signal NRZ, (b) spectre du signal NRZ, (c) constellation du signal NRZ

La figure 5.4 (a) montre la représentation temporelle du signal OOK-NRZ à 10 Gbit/s avec un taux d’extinction de 6 dB, et généré à partir d’une séquence aléatoire binaire de 4096 bits. La figure 5.4 (b) illustre le spectre du signal NRZ composé d’une fréquence centrale. La largeur spectrale du lobe spectral principale est de $2R$ comme indiqué sur la figure. La figure 5.4 (c) montre la constellation du signal NRZ représentée dans un plan complexe par des points qui définissent chaque état du signal.

5.4.2. Le filtre à l’émission :

Un filtre est généralement caractérisé par une bande passante plus étroite que l’étendue spectrale du signal, la technique de filtrage qui intervient dans l’émetteur de notre système, consiste à appliquer un filtre électrique avant la modulation directe de la diode laser. La figure 5.5 illustre le modèle de simulation du filtre gaussien.

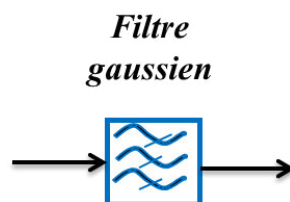


Figure 5.5. Le modèle de simulation du filtre gaussien

• **Résultats de la simulation :**

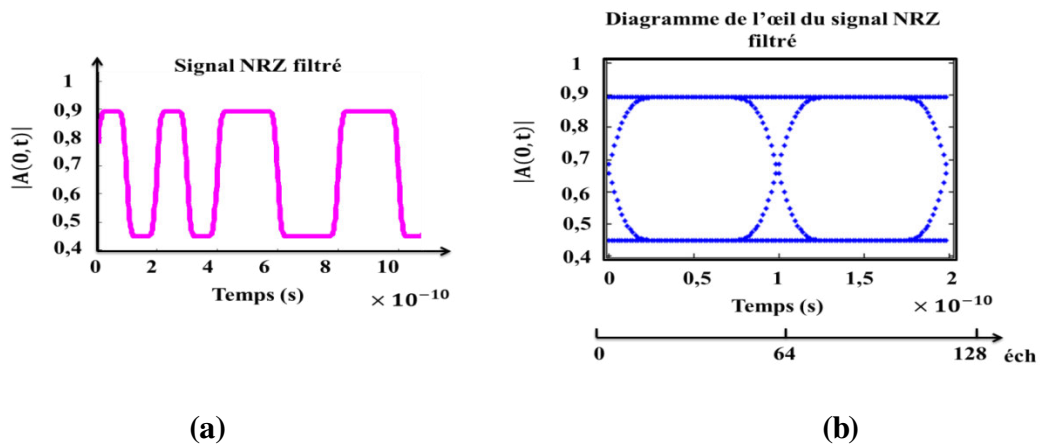


Figure 5.6. (a) allure temporelle du signal NRZ filtré, (b) diagramme de l’œil du signal NRZ filtré

La figure 5.6 montre la représentation temporelle du signal NRZ après filtrage électrique de type gaussien caractérisé par une bande passante de 20 GHz, ainsi que le diagramme de l’œil en fonction du temps et en fonction du nombre d’échantillons.

5.5. Résultats de la simulation à la sortie du laser DML :

Dans cette partie nous commentons les déformations du signal optique en sortie du DML simulé. Les éléments de description du fonctionnement du DML ont été fourni au chapitre IV.

La figure 5.7 représente la variation de la fréquence du laser ($\Delta\nu$) en fonction du temps selon l’équation 4.39, lorsque nous modulons le courant d’injection avec un format de modulation de type OOK. Si seul le chirp transitoire est pris en compte, cette variation de la fréquence est représentée dans la figure 5.7(a), tandis que si seul le chirp adiabatique est considéré, la fréquence d’émission est indiquée en figure 5.7(b). Si maintenant, l’équation 4.39 est complètement simulée, où les deux types de chirp sont pris en compte, la variation de la fréquence est fournie à la figure 5.7(c).

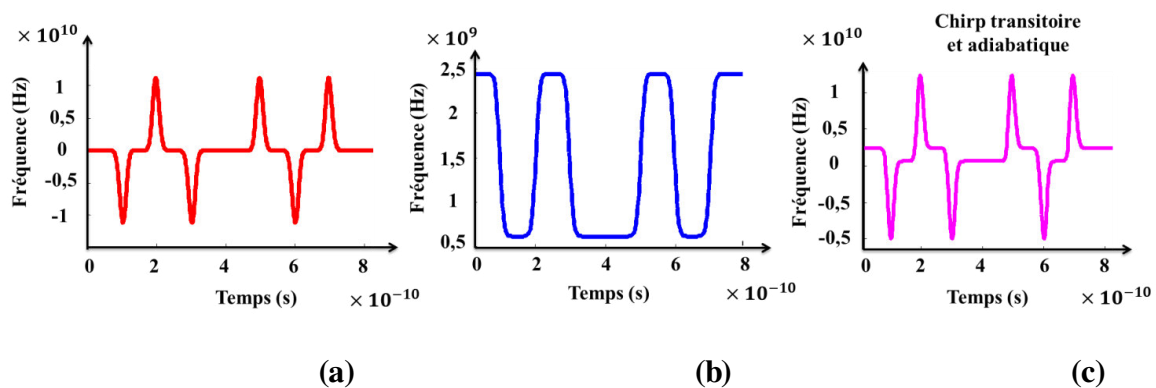


Figure 5.7. Illustration de la fréquence de sortie du laser en prenant en compte le chirp (a) transitoire, (b) adiabatique, et (c) transitoire et adiabatique.

La figure 5.8 illustre la représentation temporelle du signal NRZ après filtrage gaussien et la représentation de l'amplitude de la partie réelle de l'enveloppe complexe du champ électrique à la sortie de la diode laser. Cette dernière est obtenue en considérant les paramètres du DML suivants : $\alpha_H=2.4$, $K=7.9 \cdot 10^{12}$ Hz/W et $E_R=6$ dB. La figure 5.8 (c) fournit la représentation spectrale du signal. Nous pouvons constater que le « chirp » induit une déformation et un décalage du spectre du signal après DML par rapport à la fréquence centrale.

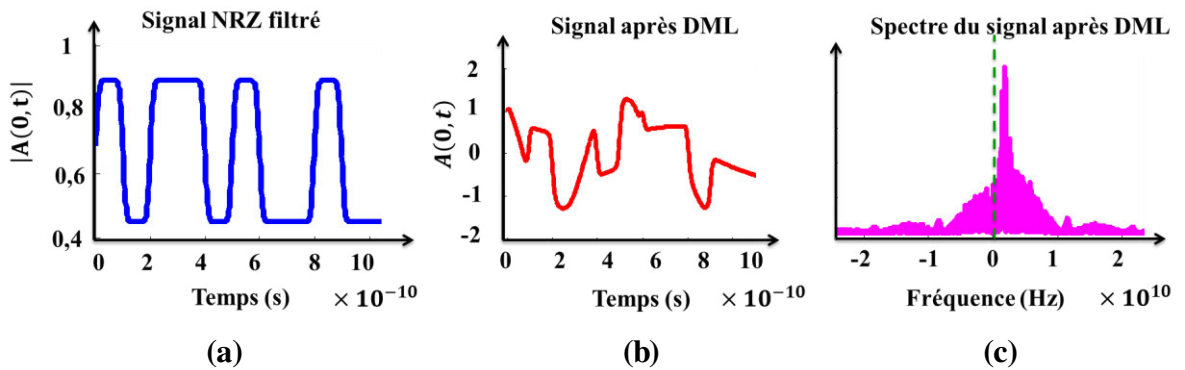


Figure 5.8. (a) tracé temporel du signal NRZ après filtrage, (b) tracé temporel de l'amplitude algébrique du signal réel après DML, (c) le spectre du signal après DML.

Les figures 5.9 (a) et 5.9 (b) représentent les tracés du signal DML dans le domaine fréquentiel. Sur ces deux graphes on constate que l'augmentation du facteur d'henry et le coefficient du chirp adiabatique engendre un décalage du spectre et un élargissement de la largeur de bande spectrale.

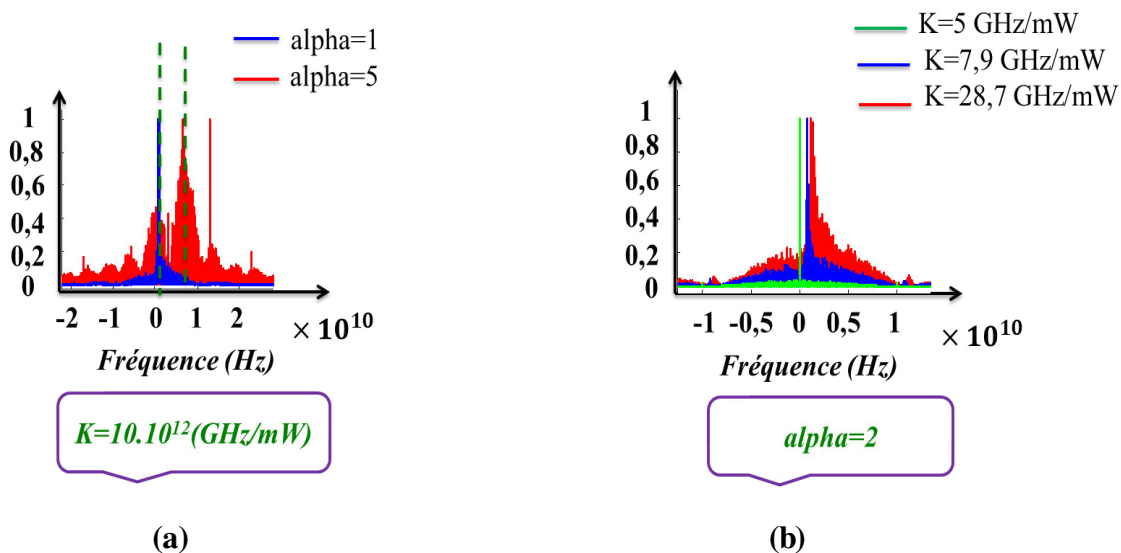


Figure 5.9. Allure spectrale du signal après DML (a) avec variation du facteur d'henry (α), (b) avec variation du coefficient du chirp adiabatique K (GHz/mW).

5.6. Ligne de transmission optique :

Dans notre étude la ligne de transmission est une fibre optique de type fibre monomode (SMF pour Single Mode Fiber), caractérisée par un coefficient de dispersion chromatique positif (17 ps/(km.nm) pour une longueur d'onde de 1550 nm. La fibre (SMF) est généralement suivie d'un amplificateur EDFA qui permet d'amplifier la puissance optique affaiblie par le phénomène d'atténuation au cours d'une certaine propagation. La figure 5.10. montre le schéma d'une fibre dispersée et amplifiée après une distance donnée.

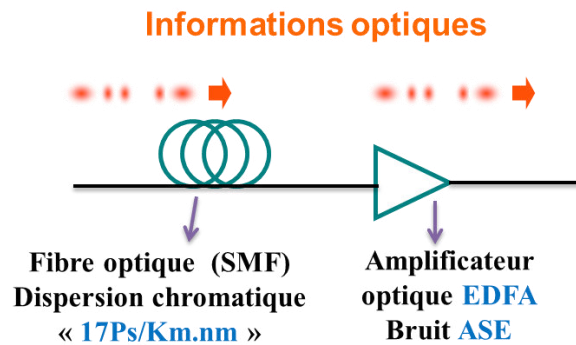


Figure 5.10. Modèle de simulation de la ligne de transmission

Dans les systèmes d'accès, il n'y a généralement pas d'amplificateur en fin de liaison, la ligne de transmission est conçue de telle sorte que le rapport signal sur bruit en fin de liaison permette d'obtenir le taux d'erreur requis par l'opérateur.

5.6.1. Fibre optique (SMF) dispersive :

L'évolution de la propagation du champ électrique dans une fibre optique (SMF) est décrite d'une manière générale par l'équation de Schrödinger (NSE pour Nonlinear Schrödinger Equation) :

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} + i\beta_2 \frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial t^2} = i\gamma |A(z,t)|^2 A(z,t) - \frac{\sigma}{2} A(z,t) \quad (5.1)$$

Où $A(z,t)$ est l'enveloppe complexe du champ électrique, β_2 est le coefficient GVD (Group Velocity Dispersion) lié au paramètre de la dispersion D , σ est le coefficient d'atténuation de la fibre optique et γ est le coefficient non linéaire de type Kerr.

Dans la simulation du système de transmission optique pour des distances inférieures à 100km et des puissances d'entrée dans la fibre proche de 0dBm, on peut négliger les effets non linéaires de type Kerr, et on prend seulement en considération l'effet de dispersion. Les pertes, correspondant juste à une atténuation simple des impulsions, ne sont pas forcément prises en compte dans l'équation, en vue d'analyser uniquement l'effet de déformation des impulsions dues à la dispersion. La figure 5.11 illustre l'impact de la dispersion sur la propagation des impulsions tout au long de la fibre qui engendre des interférences inter symboles causées par l'élargissement de l'impulsion. Ce phénomène dégrade la performance

de la transmission car le récepteur ne distingue plus les symboles « 1 » et « 0 » en fin de liaison.



Figure 5.11.L'effèt de la dispersion

• Résultats de la simulation :

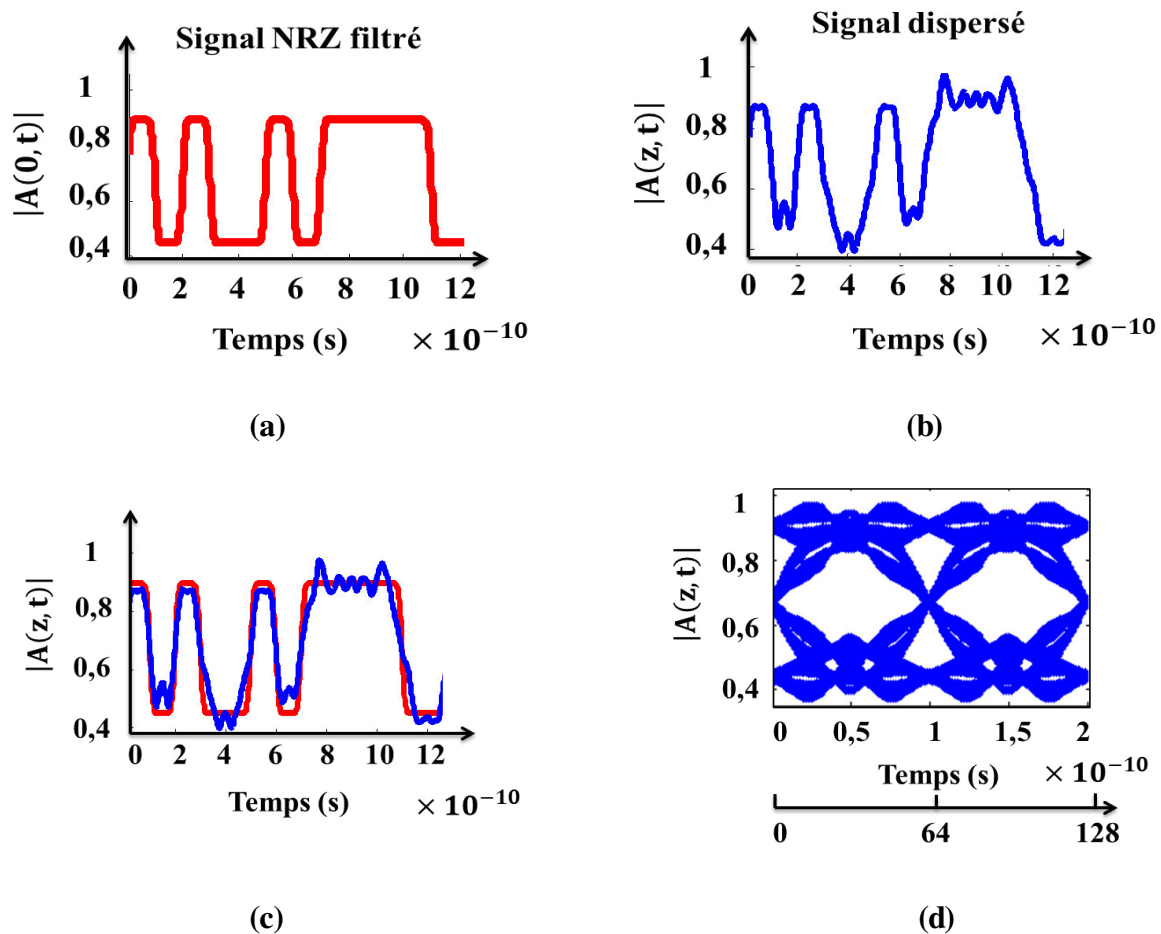


Figure 5.12.Illustration du phénomène de la dispersion sur la forme de l'impulsion au cours d'une propagation de 60 Km.

Les figures 5.12 (b) et 5.12 (c) représente la déformation des signaux causés par l'effet de dispersion après une longueur de fibre optique de 60 Km. La figure 5.12 (d) montre la qualité d'un signal dispersé par la représentation de son diagramme de l'œil.

La figure 5.13 fournit les formes temporelles des signaux après ajout du laser DML (Figure 5.13 b) et application de la dispersion de 60 km de fibre (Figure 5.13 c), le DML ayant les mêmes paramètres donnés à la section 5.5.

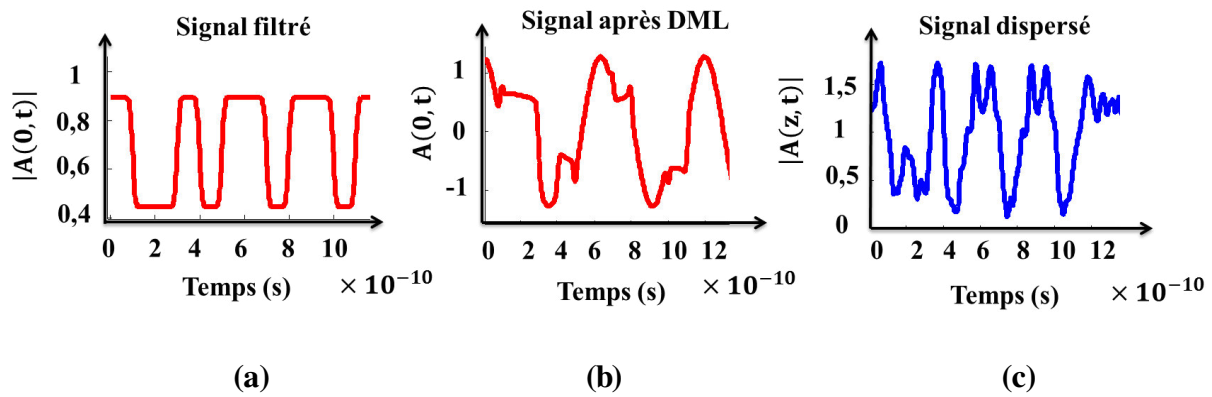


Figure 5.13. La représentation temporelle du signal après DML propagé sur une distance de 60 Km.

D'après la figure 5.13 (b), on remarque que l'enveloppe complexe du champ électrique à la sortie du laser a changé de forme à cause de la variation de la fréquence émise lors de la modulation directe du laser, et on remarque à partir de la figure 5.13 (c) que l'effet de la dispersion chromatique positive compense un peu le chirp associé au signal. On observe aussi d'après les résultats obtenus par la simulation que l'interaction entre la dispersion et le chirp du laser introduit des distorsions au signal qui sont responsables de la dégradation de la performance de la transmission.

5.6.2. Rajout de bruit (Noise loading) :

Le bruit prépondérant dans les systèmes de transmission sur fibre optique est le bruit d'émission spontanée amplifié des EDFAs. Dans les systèmes d'accès il y a généralement un seul amplificateur prévu du côté de l'opérateur i.e. pas dans le domicile des utilisateurs. L'amplificateur est donc en début de liaison ou à la fin selon le sens de la liaison. En simulation numérique et en ne considérant pas les interactions non-linéaires du bruit avec le signal, l'amplificateur est indifféremment placé en début ou fin de liaison. Dans le système de transmission que nous avons considéré en simulation, l'amplificateur est ajouté en fin de liaison et il ajoute un bruit d'ASE (Amplified Spontaneous Emission) considéré comme additif blanc Gaussien. Ce bruit dégrade bien entendu la qualité de transmission et un rapport signal sur bruit (OSNR) peut être évalué.

- **Résultats de la simulation :**

La figure 5.14 donne un exemple de signal optique sur lequel nous avons ajouté un bruit d'ASE d'un amplificateur optique.

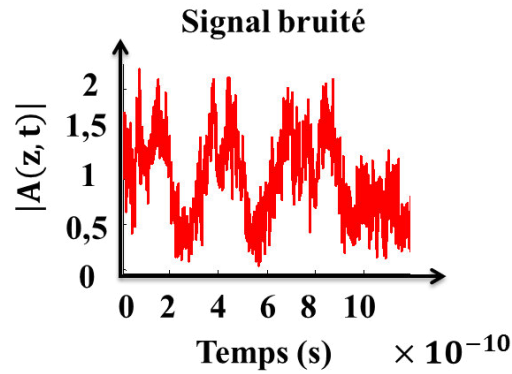


Figure 5.14. Signal bruité.

5.7. Description de l'interface de réception :

Cette partie représente la description de l'interface de réception qui a pour objectif de convertir l'information portée par la modulation du signal lumineux en une impulsion électrique et de décider quels types de symbole sont reçus. Il est composé d'un filtre optique, d'une photodiode, d'un bloc de décision et d'un bloc d'évaluation de la qualité de transmission. La figure 5.15 montre la composition du module de réception.

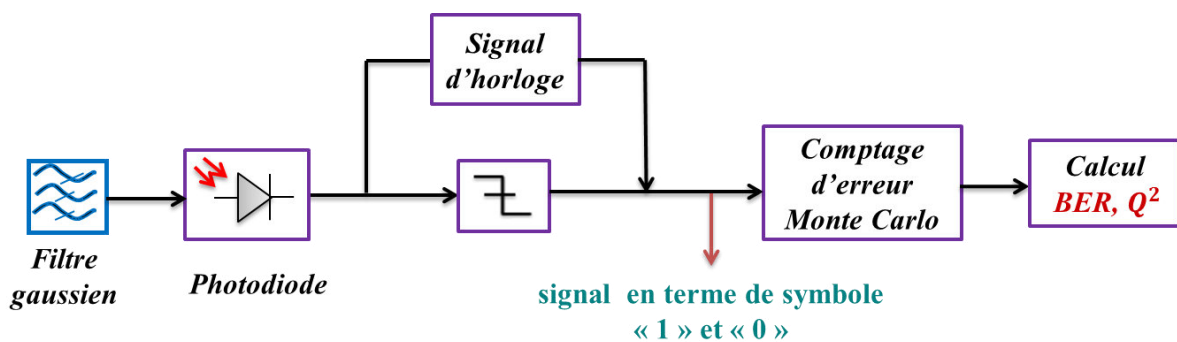


Figure 5.15. Schéma de simulation de l'interface de réception

5.7.1. L'intérêt du filtrage optique à la réception :

Un signal contenant de l'information est souvent défini par une bande passante occupée dans un spectre. Le filtrage optique a pour but de limiter l'occupation spectrale du signal et de réduire la puissance du bruit en dehors de la bande du signal. La séparation spectrale est réalisée en sélectionnant une certaine gamme de composante spectrale et en rejetant totalement les autres. Un filtre optique est donc caractérisé par des paramètres variables telles que la forme, la bande passante à 3 dB (B_0) c'est-à-dire une gamme de fréquence (ou de longueur d'onde). Il existe plusieurs types de filtres, les plus utilisés dans les simulations sont fournis par la figure 5.16.

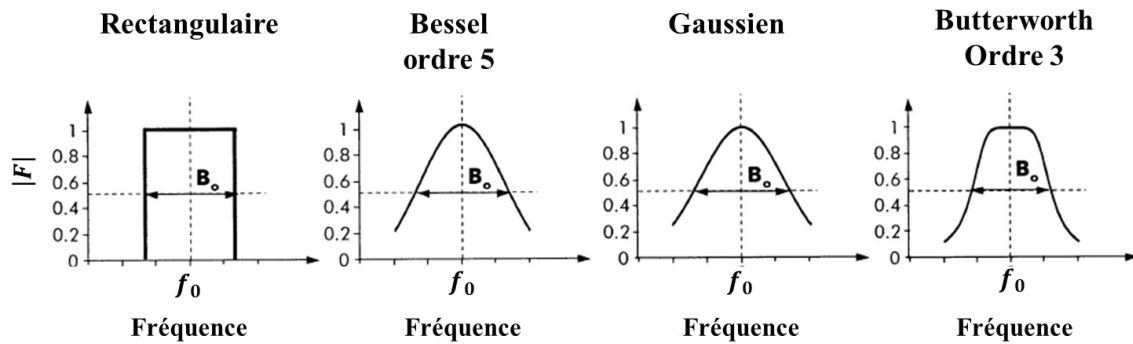


Figure 5.16. Allure des fonctions de transfert en puissance des différents filtres utilisés dans les simulations

Dans notre étude nous nous concentrons à l'implantation du filtre de type gaussien et les autres filtres ne seront pas abordés.

- **Résultats de la simulation :**

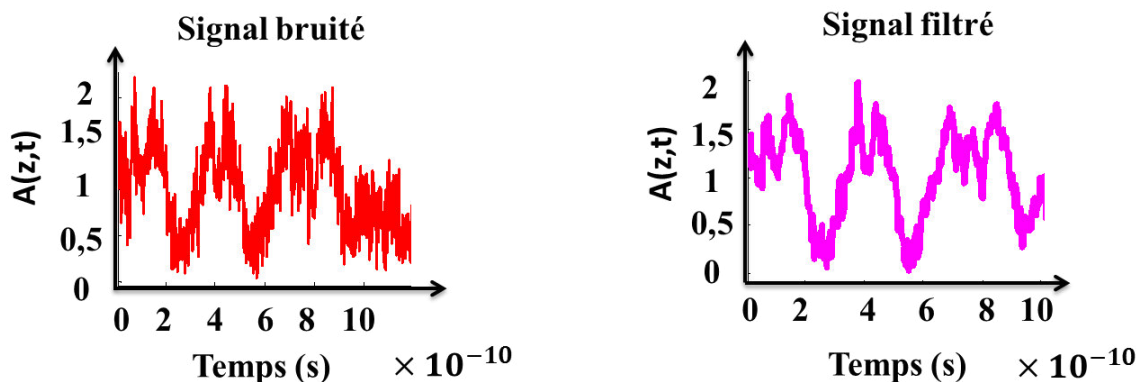


Figure 5.17. Représentation temporelle (a) signal bruité, (b) signal filtré

La figure 5.17 (a) rappelle le rajout de bruit optique généré par l'émission spontanée amplifiée sur le signal après une certaine longueur de fibre déjà présenté en Figure 5.14, tandis que la Figure 5.17 (b) illustre la diminution du niveau de bruit optique en utilisant un filtre gaussien ayant une bande passante à 3dB de 80 GHz.

5.7.2. Bloc de décision et comptage d'erreur :

Au niveau du récepteur et après conversion optique-électronique du signal transmis, le processus de lecture du message transmis par l'émetteur est expliqué par un schéma de principe illustré par la figure 5.18. Le signal à la sortie de la photodiode est divisé en deux parties, la première voie est issue du filtre et la seconde utilise un signal d'horloge synchronisé à la fréquence rythme du signal, sur chaque front d'horloge le niveau du signal filtré est comparé au seuil de décision, s'il est supérieur au seuil on détecte un bit « 1 » et s'il est inférieur on détecte un bit « 0 ». La figure 5.18 montre la procédure de récupération de l'information transmise.

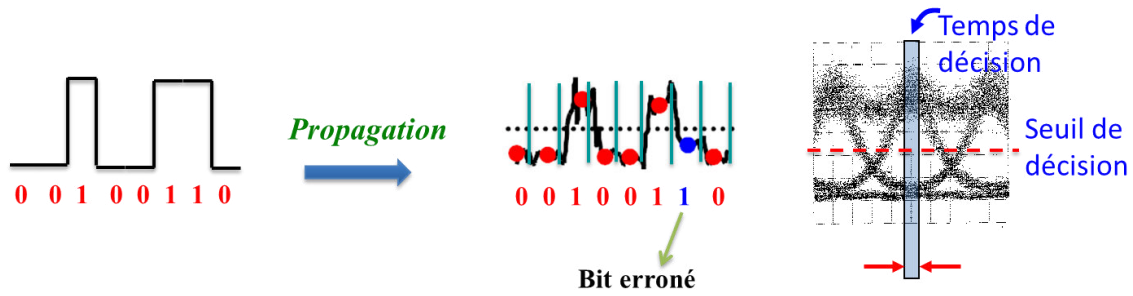


Figure 5.18. Illustre la méthode de détection du signal reçu au niveau de la réception

5.7.3. Evaluation de la qualité de transmission d'une liaison optique:

Afin de connaître le bon fonctionnement d'un système de transmission, il faut mesurer la qualité de transmission, pour cela il y a plusieurs critères, parmi ces critères on a le taux d'erreur binaire et le facteur de qualité. Un autre paramètre permettant de quantifier la qualité du signal présentant un bruit à la réception est le rapport signal sur bruit (OSNR pour Optical Signal to Noise Ratio). Il est défini par le rapport entre la puissance du signal optique et la puissance du bruit. Ce paramètre doit être supérieur à une certaine valeur pour que le signal puisse être détecté correctement.

- **Résultats de la simulation :**

Nous présentons ici les résultats de transmission utilisant un DML comme source optique à l'émission. Les résultats sont présentés en facteur Q^2 en fonction de la distance pour des distances de 0 à 120 km sur fibre SMF. On indique également la dispersion cumulée équivalente à la distance de propagation sur fibre SMF.

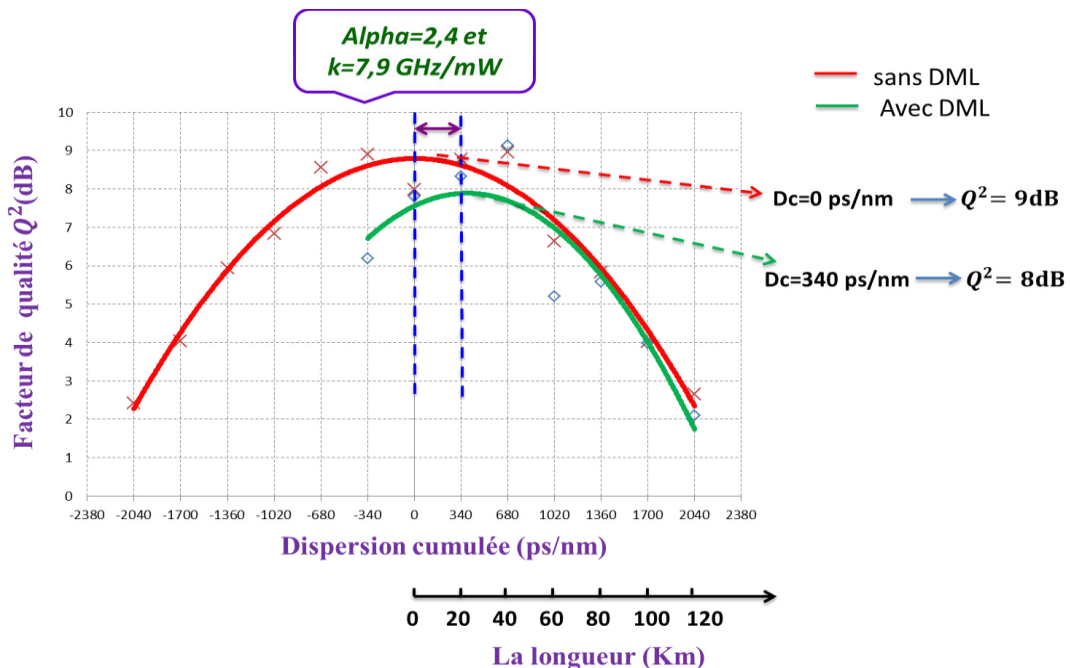


Figure 5.19. Comparaison du facteur de qualité en fonction de la dispersion cumulée (ou la longueur de la fibre) avec et sans DML

D'après la figure 5.19 on remarque que sans l'utilisation du DML (source artificielle idéale) le facteur de qualité est au maximum de 8.8 dB lorsque la dispersion cumulée est nulle. Pour des raisons de commodité nous explorons également les valeurs de dispersion cumulées négatives avec une fibre à dispersion négative employée dans le cadre des simulations numériques, ceci afin de déterminer plus facilement la valeur de dispersion cumulée qui fournit la qualité de transmission maximale. Lorsque le modèle du DML est inclus dans la simulation (courbe inférieure de la Figure 5.19), la qualité de transmission est plus faible, notamment à cause du phénomène de chirp. Dans ce dernier cas, le facteur de qualité est au maximum de 8 dB pour une distance de 20 km, donc on peut conclure que la qualité de transmission est dégradée à cause du phénomène de chirp déduit par la modulation directe de la diode laser. Nous remarquons également que la présence de « chirp » dans le laser à l'émission conduit à une dispersion cumulée optimale non nulle, ici d'environ 20 km, pour laquelle la dispersion cumulée compense l'influence du « chirp » à l'émission. Pour savoir si les « chirp » adiabatique ou transitoire, influe différemment sur cette qualité de transmission, nous traçons une courbe équivalente en ne prenant pas en compte le « chirp » adiabatique du laser. La courbe est présentée à la Figure 5.20.

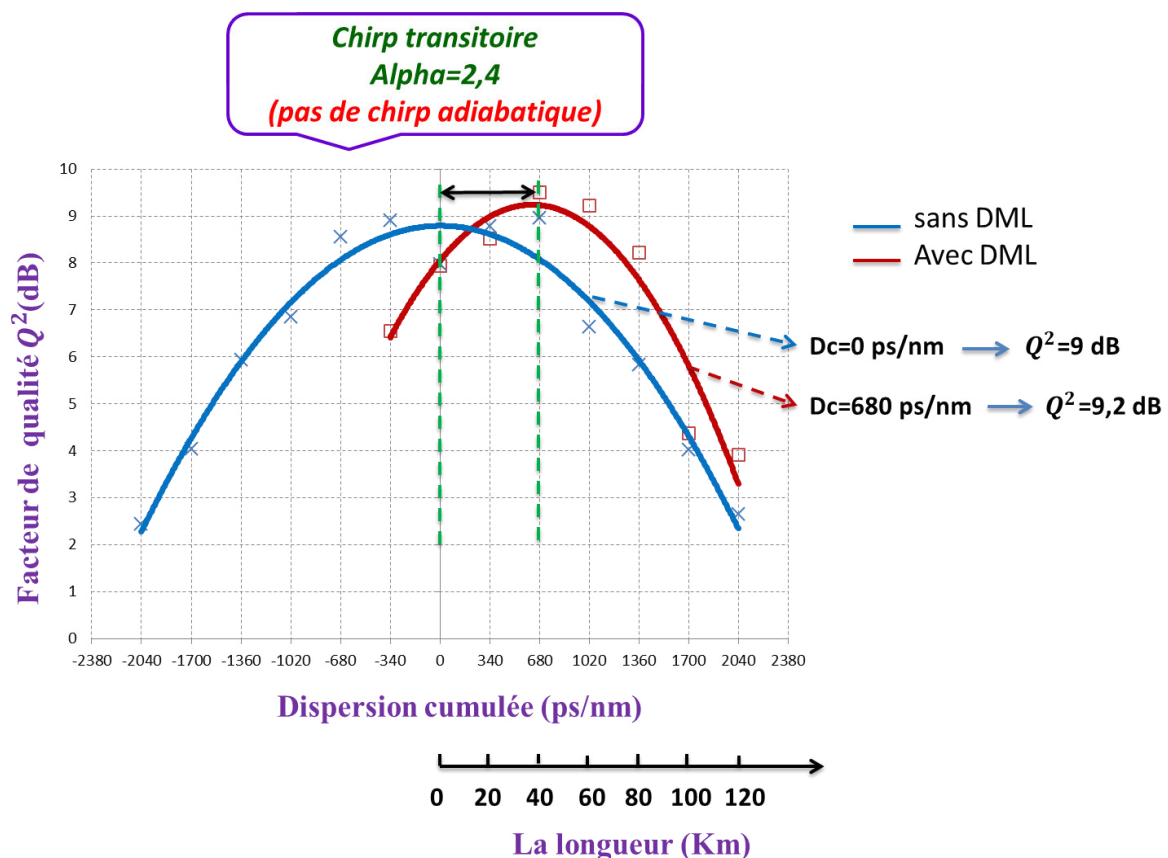


Figure 5.20. Comparaison du facteur de qualité en fonction de la dispersion cumulée avec DML (seulement le chirp transitoire) et sans DML.

La figure 5.20 montre que lorsqu'on utilise un système avec DML en prenant en compte uniquement le chirp transitoire on peut améliorer la qualité de transmission, c'est-à-dire on aura un gain en termes de distance de transmission atteignable. Dans ce cas les variations de fréquence instantanées causées par la dispersion chromatique sur les impulsions peuvent

compenser les variations de fréquence instantanées dues au phénomène de « chirp » transitoire sur les fronts de montée et descente des impulsions.

Si maintenant on se focalise sur l'impact du « chirp » adiabatique, en ne considérant pas cette fois le chirp transitoire, nous obtenons les résultats présentés à la figure 5.21.

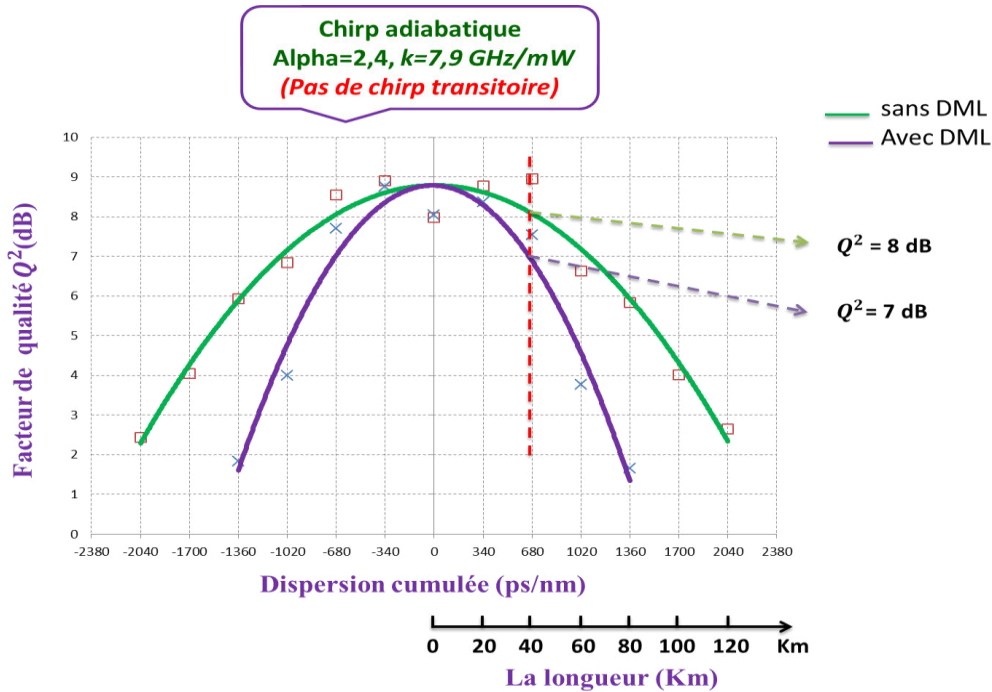


Figure 5.21. Comparaison du facteur de qualité en fonction de la dispersion cumulée avec DML (seulement le chirp adiabatique) et sans DML

Cette fois la courbe avec DML, en ne considérant que le « chirp » adiabatique, conduit à une qualité de transmission équivalente pour une dispersion cumulée nulle. Néanmoins la qualité de transmission diminue plus vite lorsqu'une dispersion cumulée est ajoutée, autrement dit lorsque la distance de transmission augmente. Cette fois la dispersion ne peut contrer les effets du « chirp » adiabatique car celui-ci ajoute une variation de fréquence instantanée constante sur le temps d'une impulsion mais différente pour les symboles « 1 » et « 0 ». Lorsque la dispersion augmente, la différence de fréquence entre les symboles « 1 » et les symboles « 0 » implique une variation de vitesse de propagation différentes suivant les symboles, ce qui a pour conséquence de dégrader encore plus la qualité de transmission. Par exemple, sur la figure 5.21 on remarque que pour une dispersion de 680 ps/nm et pour un système sans DML le facteur de qualité est de 8 dB, par contre le cas d'un système avec DML le facteur de qualité est de 7 dB, soit une dégradation d'1dB sur le facteur de qualité de la transmission.

De ces résultats on conclut que les « chirp » induits par la modulation directe du laser agissent de manière différente sur la qualité de transmission. Le « chirp » transitoire peut être compensé par la dispersion chromatique et dans ce cas la qualité de la transmission est conservée à un niveau acceptable. Par contre le « chirp » adiabatique induit une dégradation plus rapide du signal avec la dispersion cumulée et limite plus rapidement la distance de transmission.

5.8. Conclusion :

Dans le dernier volet de ce manuscrit nous avons modélisé un système de transmission en utilisant la modulation directe du laser (DML), en commençant par décrire chaque élément constituant la partie d'émission avec les différents résultats obtenus lors de la simulation. Ensuite nous avons abordé la partie de transmission qui est indispensable pour une liaison optique, puis nous avons décrit la partie de réception qui porte sur la détection directe du signal. Une fois la liaison construite, nous avons pu effectuer la simulation et visualiser la performance de transmission incluant une source de type laser DML. On conclut de cette étude que les « chirp » transitoire et adiabatique du laser et leur interaction avec la dispersion chromatique influent fortement sur la qualité de transmission. L'influence du « chirp » transitoire peut être contrée par la dispersion chromatique à condition d'optimiser la dispersion cumulée. L'influence du « chirp adiabatique » est ici plus critique dans le sens où elle augmente la bande spectrale du signal et réduit la tolérance à la dispersion chromatique de la ligne.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'évolution des télécommunications optiques a mis en relief l'apparition de nouvelles technologies de transport de l'information telle que les réseaux optiques. Actuellement, l'augmentation de la demande de débit jusqu'aux utilisateurs implique une recherche particulière sur la conception des réseaux d'accès de type FTTH, qui permettent d'atteindre des débits supérieurs à ceux de l'ADSL utilisés aujourd'hui. Les équipementiers doivent notamment concevoir de nouveaux systèmes et composants pour répondre à cette demande.

Dans ce cadre, l'objectif de notre projet repose sur l'analyse et l'optimisation des caractéristiques d'un type de laser, appelé DML, pour lequel la modulation du signal est faite directement par la modulation de son courant d'injection. De plus, nous étudierons la qualité d'une transmission typique d'un réseau optique d'accès à un débit par canal de 10 Gbit/s sur une distance d'environ 100 Km, en utilisant une modulation binaire OOK et une réception directe. Nous nous sommes focalisés sur l'utilisation d'un laser de type DML comme source optique. Ces lasers sont une source d'intérêt aujourd'hui puisqu'ils sont à faible coût, faible consommation et encombrement, ce qui permet un déploiement à grande échelle pour les réseaux d'accès.

La première partie du travail de stage a été de comprendre et modéliser l'ensemble d'un système de transmission d'accès, incluant l'émetteur, la ligne de transmission avec la fibre optique et le récepteur. Cette partie est traduite dans les trois premiers chapitres de ce rapport où nous suivons la chronologie émetteur-ligne-récepteur. Un second aspect du stage, décrit dans le quatrième chapitre, a été de comprendre le fonctionnement d'un laser DML et la façon de le modéliser à partir d'un article de la littérature. Nous avons réalisé le codage numérique sous « Matlab » de l'ensemble de ses aspects. Enfin, nous avons profité de ces développements pour obtenir des résultats de simulation de transmission avec DML que nous avons exposé dans le cinquième chapitre.

Les résultats de simulation mettent en évidence l'influence d'une difficulté propre à ces lasers DML peu coûteux qui est une modulation de fréquence simultanée à la modulation d'intensité désirée. Cette difficulté appelée « chirp » est décomposée en deux catégories : le chirp adiabatique et le chirp transitoire. En évaluant la qualité de transmission en fonction de la longueur de la fibre optique utilisée jusqu'à 100 Km, nous avons constaté la dégradation de cette qualité due aux deux types de chirp. Le chirp transitoire a un impact sur le signal qui peut être compensé par une quantité précise de dispersion cumulée que nous avons quantifié pour un ensemble de paramètres typiques du DML. Il en résulte qu'en choisissant la dispersion de la fibre optique, nous pouvons obtenir une distance de transmission plus élevée. Le chirp adiabatique quant à lui réduit la tolérance à la dispersion cumulée et par suite la distance de transmission possible.

Compte tenu de cette dernière difficulté concernant le chirp adiabatique, et sachant que celui-ci induit une différence de fréquence entre les symboles « 1 » et « 0 », il semble intéressant à l'avenir d'étudier l'influence d'un filtrage optique à la sortie du DML. Les premières études montrent qu'un tel filtre pourrait abaisser le niveau des symboles « 0 » par filtrage de leur

fréquence et ne pas abaisser celui des symboles « 1 ». Cet effet augmenterait le taux d'extinction et par conséquent la qualité de la transmission. A terme, une telle solution intégrée dans l'émetteur pourrait fournir une option peu coûteuse et efficace sur des distances supérieures à 100 Km.

Bibliographie

- [1] Y.Frignac, « contribution à l'ingénierie des systèmes de transmission terrestres sur fibre optique utilisant le multiplexage en longueur d'onde de canaux modules au débit de 40 Gbit/s », Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des télécommunications, spatialité électronique et communication, Avril 2003.
- [2] <http://www.lafibre.info/numericable-espace-technique/attenuation-du-signal-dans-le-coaxial/>
- [3] J.L.VERNEUIL, « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbit/s » Thèse de Doctorat de l'université de Limoges, novembre 2003.
- [4] M. LEFRANÇOIS, « Etude de technologies avancées pour l'optimisation des systèmes de transmission optique multiplexés en longueur d'onde au débit de 40 Gbit/s », Thèse de Doctorat de l'université Paris-Sud, décembre 2007.
- [5] D. CARRARA, « Etude et réalisation de sources photoniques intégrées sur InP pour les applications télécoms à hauts débits et à 1.55mm » Thèse de Doctorat de Télécom et Management SudParis et Université Pierre et Marie Curie, spécialité Electronique et Communications réalisé au III-V Lab (Marcoussis/France) ,2012.
- [6] Idate, rapport mars 2012.
- [7] Essiambre, R.Tkach, R.W, « Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks », Proceedings of the IEEE, vol.100, no.5, pp.1035, 1055, May 2012.
- [8] T.N.NGUYEN, « Etude de composants optiques à base de fibres optiques non-linéaire » Thèse de Doctorat de l'université de Rennes, Ecole Nationale Supérieure de Sciences Appliquées et de Technologie Laboratoire Foton, Octobre 2008.
- [9] http://ec.europa.eu/information_society/policy/ecomms/doc/library/public_consult/nga_i2c_thd.pdf.
- [10] J.LAURENT, « Communication optiques a très haut débit », présenté au Conservatoire Nationale des Arts et Métiers, Centre de Paris, Département STIC, Spécialité Electronique, 2004.
- [11] G.P.AGRAWAL, « Fiber-Optic Communication Systems », Institute of optics University of Rochester New York, April 2010.
- [12] http://fr.wikipedia.org/wiki/Diode_laser.
- [13] José.Mulet Pol, « Semiconductor Laser Dynamics : Compound-cavity, polarization and transverse modes », thèse de l'Université les Illes Balears, December 2002.
- [14] O.BOUCARD, « Etude de diodes laser à cavité planaire entièrement définie par cristal photonique : nouvelle approche pour le contrôle de l'émission », Thèse de

- Doctorat de l'université de Toulouse, Ecole Doctorale : Génie Electrique, Electronique, Télécommunication, Juillet 2008.
- [15] C. PEUCHERET « Direct Current Modulation of Semiconductor Lasers », Lecture notes in 34130 « Introduction to Optical Communication », Department of photonics Engineering, Technical University of Denmark, 2011.
- [16] P.KREHLIK, «Characterisation of Semiconductor Laser Frequency Chirp Based on Signal Distortion in Dispersive Optical Fiber », Institute of Electronics, AGH University of Science and technology , Opto-Electronics Review, vol.14. No.2, 2006.
- [17] Carmina del campos, paloma R, Horche, Alfredo Martin Minguez , « Intraction of Semiconductor Laser Chirp with Fiber Dispersion: Impact on WDM Modulated System Performance » the fourth international conference on advances in circuits, Electronics and Micro-electronics, 2011.
- [18] I.TOMKOS, B.HALLOCK, I.ROUDAS, R.HESSE, A.BOSKOVIC, J.NAKANO, R.VODHANEL, «10-Gb/s Transmission of 1.55- μ m Directly Modulated Signal over 100 Km of Negative Dispersion Fiber», IEEE photonics Technology Letters, Vol.13, No.7, July 2001.
- [19] P.KREHLIK, «Directly Modulated Lasers in Negative Dispersion Fiber links», Institute of Electronics, AGH University of Science and technology , Opto-Electronics Review, vol.14. No.2, 71-77, 2007.
- [20] http://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_optique.
- [21] G.P.Agrawal, « Nonlinear Fiber Optics », LNP 542, pp. 195–211, 2000.
- [22] J.FATOME, «_Propagation d'impulsion ultra-courtes à 160 Gbit/s dans des lignes de fibres optiques gérées en dispersion », thèse de doctorat, Laboratoire de physique de l'Université de Bourgogne, Décembre, 2004.
- [23] http://fr.wikipedia.org/wiki/Amplificateur_optique.
- [24] http://fr.wikipedia.org/wiki/Photodiode_pin.

Résumé

La croissance rapide de la demande de capacité de télécommunications dans les réseaux optiques d'accès implique le développement de nouveaux composants et systèmes pour atteindre à faible coût des transmissions de l'ordre d'une centaine de kilomètres.

Les lasers à semi-conducteur modulés directement attirent aujourd'hui l'attention de beaucoup de concepteurs de systèmes, grâce à sa simplicité et son faible coût. Cependant, il présente une limitation due à une modulation de fréquence simultanée à la modulation d'intensité appelé « chirp ».

Le but de ce travail est d'étudier une liaison optique à 10 Gbit/s en utilisant la technique de modulation directe du laser afin de l'analyser et d'en optimiser les caractéristiques, du point de vue du système de transmission. Dans cette étude on a modélisé une ligne de transmission par une fibre optique standard (SMF) qui utilise conventionnellement une dispersion chromatique positive à une longueur d'onde de 1550 nm.

D'après cette étude on a pu démontrer que la limitation de la performance de transmission de cette liaison dépend forcément des paramètres du laser tels que le chirp adiabatique et transitoire de même que l'interaction de la dispersion chromatique de la fibre et le chirp du laser qui cause des distorsions significatives aux signaux.

Mots clés : réseau optique, fibre optique (SMF), la modulation directe du laser (DML), le chirp du laser, dispersion chromatique de la fibre, chirp adiabatique et transitoire.

Abstract:

The rapid growth of the communication capacity demand in optical access networks forces the development of new low-cost devices for transmissions up to 100 Km.

Recently, system designers have been attracted by the potential use of direct modulated lasers thanks to their simple implementation and cost effectiveness. However, this kind of device presents some limitations as the simultaneous frequency modulation when attempting to an intensity modulation, also called the laser chirp.

Our objective is to study the behavior of the direct modulated laser in a 10Gbit/s optical transmission context, in order to analyze and optimize its characteristics aiming to increase the overall transmission distance. Here, we have modeled the whole transmission system considering a standard single mode fiber (SMF) with conventional positive chromatic dispersion, for a wavelength use of 1550nm.

According to the study, our results indicate and quantify how the transmission performance is mainly limited by the adiabatic and transient chirp parameters of the direct modulated laser, and their interaction with the fiber chromatic dispersion.

Keywords: optical network, direct modulation laser (DML), frequency chirp, standard single mode fiber (SSMF), fiber chromatic dispersion, adiabatic and transient chirp.