TABLES DES MATIERES

Remerciement
Dédicace
Tables des matières
Listes des figures

Introduction générale…… 1

Chapitre 1 : Etude d'une liaison optique

1.1 Introduction 2
1.2 Intérêts des télécommunications optiques..... 2
1.3 Description d'une liaison optique 2
1.4 Fibre optique 3
1.4.1 Structure de la fibre optique..... 3
1.4.2 Principe de fonctionnement de la fibre optique 4
1.4.3 Différents types de fibre..... 5
1.5 L'atténuation 6
1.6 La dispersion 7
1.6.1 Dispersion modale 8
1.6.2 Dispersion chromatique 8
1.7 Partie émission 9
1.7.1 Diode électroluminescente (DEL) 9
1.7.2 Les Sources laser..... 10
1.8 Partie réception..... 11
1.8.1 Photodiode PIN 11
1.8.2 Photodiode à avalanche PDA..... 13
1.9 Effets non linéaire dans les fibres optiques..... 13
1.9.1 Effet Kerr 13
1.9.2 Effet Raman 14
1.9.3 Effet Brillouin 14
1.10 Modulation du signal..... 14
1.10.1 Modulation directe 14

1.10.2 Modulation externe 15
1.11 Conclusion 16

Chapitre 2 : Différentes techniques de multiplexage

2.1 Introduction 18
2.2 Techniques de multiplexage 18
2.2.1 Multiplexage temporel TDM (Time Division Multiplexing) 19
2.2.2 Multiplexage fréquentiel FDM (Frequency Division Multiplexing) 20
2.2.3 Multiplexage à répartition par code CDM (Code Division Multiplexing) 20
2.2.4 Multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing) 21
2.3 Le développement des capacités 22
2.4 Comparaison entre WDM et TDM 23
2.5 Applications de la technologie WDM 24
2.6 Amplificateurs optiques 24
2.6.1 Amplificateur optique à semi-conducteur (SOA) 24
2.6.2 Amplificateur optique à fibre dopée Erbium (EDFA) 24
2.6.3 Amplificateur Raman 25
2.6.4 Comparaison des amplificateurs 26
2.7 Fibres compensatrices DCF (Dispersion Compensating Fiber) 26
2.8 Composants de multiplexage 27
2.9 Convertisseurs optiques 30
2.10 Conclusion 31

Chapitre 3 : Etude d'une liaison WDM

3.1 Introduction 33
3.2 Présentation du logiciel OptiSystem 33
3.2.1 Interface OptiSystem 33
3.2.2 Paramètres caractéristiques 34
3.3 Résultats de la simulation 35
3.4 Partie émission 36

3.5 Partie transmission.....36
3.6 Partie réception 36
3.7 Critères et méthodes d'évaluer la qualité de transmission 36
3.7.1 Taux d'erreurs binaires 37
3.7.2 Facteur de qualité 37
3.7.3 Diagramme de l'œil 37
3.8 Effet de variation d'espacement en longueur d'onde…… 38
3.9 Effet de la variation du nombre de tronçons 50
3.10 Effet du débit et de la distance parcourue.....50
3.11 Comparaison de modulation.....52
3.10.1 Modulation directe 52
3.10.2 Modulation externe 52
3.11 Format de modulation 52
3.11.1 Format NRZ (No Return to-Zero)..... 52
3.11.2 Format RZ (Return-to-Zero) 53
3.12 Conclusion…….... 60
Liste des acronymes
Bibliographie

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Schéma d'une liaison optique…….. 3
Figure 1.2 : Structure d'une fibre optique. ……. 3
Figure 1.3 : Angle d'incidence d'entrée dans une fibre optique. ……... 5
Figure 1.4 : Fibre à saut d'indice. …….. 5
Figure 1.5 : Fibre à gradient d'indice. …… 6
Figure 1.6 : Fibre monomode. …… 6
Figure 1.7 : Effet de l'atténuation. ……. 6
Figure 1.8 : Pertes de propagation de la fibre optique standards. …….. 7
Figure 1.9 : Effet de la dispersion. ……..... 8
Figure 1.10 : Retard des modes. ……. 8
Figure 1.11 : Courbe de la dispersion chromatique. …….. 9
Figure 1.12 : Processus d'émission spontanée. …….. 10
Figure 1.13 : Schéma des processus d'absorption (a) et de l'émission stimulée (b)…….. 10
Figure 1.15 : Structure d'une diode laser à une cavité résonante Fabry-Perot……... 11
Figure 1.16 : Coupe transversale d'une diode PIN. …….. 12
Figure 1.17 : Modulation directe d'une diode laser. …….. 15
Figure 1.18 : structure d'interféromètre Mach-Zehnder. ……... 16
Figure 2.1: Schéma de principe de Multiplexage temporel. …….. 19
Figure 2.2 : Schéma de principe deMultiplexage fréquentiel. …….. 20
Figure 2.3 : Schéma de principe du multiplexage en longueur d'onde. …… 21
Figure 2.4 : Schéma d'un amplificateur optique à fibre dopé erbium. …….. 25
Figure 2.5 : Schéma de principe d'un brasseur optique…….. 28
Figure 2.6 : Schéma de principe d'un multiplexeur d'insertion/extraction…….. 29
Figure 2.7 : Schéma de principe d'un circulateur optique. ……... 30
Figure 2.8 : Schéma d'un réseau de Bragg. …….. 30
Figure 3.1 : Schéma de l'interface OptiSystem. ……..... 34
Figure 3.2 : Schéma d'un photodétecteur. ……..... 34
Figure 3.3 : Interface de définition du photodétecteur. …… 35
Figure 3.4 : Schéma de la liaison optique…….. 35
Figure 3.5 : Diagramme de l'œil d'un signal RZ et d'un autre NRZ. …… 38
Figure 3.6 : Variation du facteur de qualité en fonction du débit. ……. 38
Figure 3.7 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du débit. …… 39
Figure 3.8 : Variation du facteur de qualité en fonction de la distance. …… 39
Figure 3.9 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la distance. ……... 40
Figure 3.10 : Variation du facteur de qualité en fonction du nombre de tronçons……. 41
Figure 3.11 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du nombre de tronçons…… 41
Figure 3.12 : Variation du facteur de qualité en fonction du débit. …….. 42
Figure 3.13 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du débit. ……. 42
Figure 3.14 : Variation du facteur de qualité en fonction de la distance…… 43
Figure 3.15 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la distance. ……. 43
Figure 3.16 : Variation du facteur de qualité en fonction du nombre de tronçons. ……... 44
Figure 3.17 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du nombre de tronçons. ….. 44

Figure 3.18 : Variation du facteur de qualité en fonction du débit. ……... 45
Figure 3.19 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du débit. …….. 46
Figure 3.20 : Variation du facteur de qualité en fonction de la distance. …… 46
Figure 3.21 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la distance. ……. 47
Figure 3.22 : Variation du facteur de qualité en fonction du nombre de tronçons. ……... 47
Figure 3.23 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du nombre de tronçons.…... 48
Figure 3.5 : Diagramme de l'œil d'un signal RZ et d'un autre NRZ. …… 38
Figure 3.6 : Variation du facteur de qualité en fonction du débit. …… 38
Figure 3.7 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du débit. …… 39
Figure 3.8 : Variation du facteur de qualité en fonction de la distance. …… 39
Figure 3.9 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la distance……. 40
Figure 3.10 : Variation du facteur de qualité en fonction du nombre de tronçons. ……... 41
Figure 3.11 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du nombre de tronçons…… 41
Figure 3.12 : Variation du facteur de qualité en fonction du débit…… 42
Figure 3.13 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du débit. …….. 43
Figure 3.14 : Variation du facteur de qualité en fonction de la distance…… 44
Figure 3.15 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la distance…….. 44
Figure 3.16 : Variation du facteur de qualité en fonction du nombre de tronçons……. 45
Figure 3.17 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du nombre de tronçons…… 45
Figure 3.18 : Variation du facteur de qualité en fonction du débit..……... 46
Figure 3.19 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du débit.…….. 47
Figure 3.20 : Variation du facteur de qualité en fonction de la distance. …… 48
Figure 3.21 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la distance. 48
Figure 3.22 : Variation du facteur de qualité en fonction du nombre de tronçons……. 49
Figure 3.23 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du nombre de tronçons…… 49
Figure 3.24 : Variation du facteur de qualité et du taux d'erreur binaire en fonction de nombre de tronçons. …… 50
Figure 3.25 : Variation du facteur de qualité et du taux d'erreur binaire en fonction de la distance. …….. 51
Figure 3.26 : Variation du facteur de qualité et du taux d'erreur binaire en fonction de débit. …… 51
Figure 3.27 : Format NRZ. ……. 53
Figure 3.28 : Format RZ……. 53
Figure 3.29 : Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance…….. 54
Figure 3.30 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance..…….. 54
Figure 3.31 : Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance…...…….. 55
Figure 3.32 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance. …….. 55
Figure 3.33 : Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance..……... 56
Figure 3.34 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance……. 57
Figure 3.35 : Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance…….. 58
Figure 3.36 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance……. 58
Figure 3.37 : Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance…….. 59
Figure 3.38: Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance…….. 59

INTRODUCTION GENERALE

La grande quantité d'informations véhiculées à travers le monde a donné naissance depuis quelques années, à un besoin croissant en débit de transmission dans les systèmes de télécommunications. De nombreux services et applications multimédia se sont développées, et nécessitent aujourd'hui d'importantes capacités de transmission. Un besoin d'autant plus important que les informations échangées grâce à ces applications (données, téléphonie sur voix IP, vidéo,…) ont souvent besoin d'être transmises simultanément.

Deux importantes solutions à base de fibre optique ont alors généré une augmentation considérable des capacités de transmission des liaisons : ce sont d'une part les amplificateurs optiques, et d'autre part, un nouveau principe de multiplexage-démultiplexage en longueur d'onde nommé WDM (pour Wavelength Division Multiplexing). Ce dernier permet de transporter plusieurs signaux sur une seule fibre optique en leur affectant une longueur d'onde (ou fréquence) différente.

Les avantages de la fibre optique en tant que support de transmission (grande bande passante, faibles pertes de propagation, immunité aux ondes électromagnétiques) justifient l'important développement des systèmes de transmission optiques durant la dernière décennie.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres.

Le premier chapitre décrit les principales généralités sur la transmission par fibre optique et détaille l'ensemble des composants d'un système optique, tout en expliquant leur rôle et leurs limites de fonctionnement. Il présente ainsi les divers effets linéaires et non linéaires sur la transmission des données en particulier l'atténuation et la dispersion chromatique considérées comme facteurs majeurs de limitation.

Le second chapitre présente l'ensemble des techniques de multiplexage dans les systèmes de transmissions optiques particulièrement le multiplexage WDM (Wavelength Division Multiplexing) ainsi que les différentes solutions pour augmenter la capacité totale d'un système WDM. Il présente également les différents composants nécessaires pour le multiplexage. On parle aussi d'amplificateurs optiques et des fibres compensatrices de dispersion.

Le dernier chapitre présente les différents critères pour évaluer la qualité de transmission. Des simulations sont ensuite élaborées sous le logiciel « OptiSystem », afin de présenter les différents composants du système utilisés ainsi que leurs caractéristiques. Il aborde ensuite l'étude de l'effet de l'espacement en longueur d'onde sur la qualité de transmission ainsi que l'effet du format du code sur la modulation externe et directe, en prenant en compte certains paramètres de la liaison à savoir : la longueur de la fibre SMF, le nombre de tronçons, la puissance et le débit par canal.

Enfin, une conclusion générale est présentée, avec quelques perspectives de ce travail.

Chapitre 1

Etude d'une liaison optique

Rapport-Gratuit.com

1.1 Introduction

Les systèmes de communication optiques peuvent être classés en deux catégories : systèmes non-guidés tels que les systèmes où le signal optique est envoyé depuis l'émetteur jusqu'au récepteur en se propageant dans l'espace libre, et les systèmes guidés où on utilise un support, principalement la fibre optique, pour transporter le signal optique depuis l'émetteur jusqu'au destinataire.

Comparée aux autres supports de transmission existants, la fibre optique présente une atténuation quasiment constante sur une énorme plage de fréquences (plusieurs milliers de GHz) et offre ainsi l'avantage de bandes passantes gigantesques. Mais son apparition a nécessité la conception et le développement de nouveaux composants optiques ou optoélectroniques performants.

Ce chapitre est consacré à présenter les différents composants optiques et optoélectroniques constituant la liaison optique tout en expliquant leur rôle et leurs limites de fonctionnement et une description des différentes méthodes utilisées pour la modulation du signal.

1.2 Intérêts des télécommunications optiques

Comparée aux autres supports de transmission, la fibre optique présente un certain nombre d'avantages :

- Faibles pertes de transmission,
- Bande passante énorme,
- Isolation électromagnétique,
- Immunité aux interférences et à la diaphonie,
- Sécurité du signal,
- Petites dimensions et faibles poids,
- Flexibilité,
- Systèmes fiables et faciles à entretenir,
- Matière première disponible et faible coût.

1.3 Description d'une liaison optique

L'architecture d'une liaison optique est décrit par la figure 1.1, Dans cette liaison le signal optique est émis, transporté, régénéré (s'il y a lieu) et détecté aux moyens de composants optiques ou optoélectroniques.

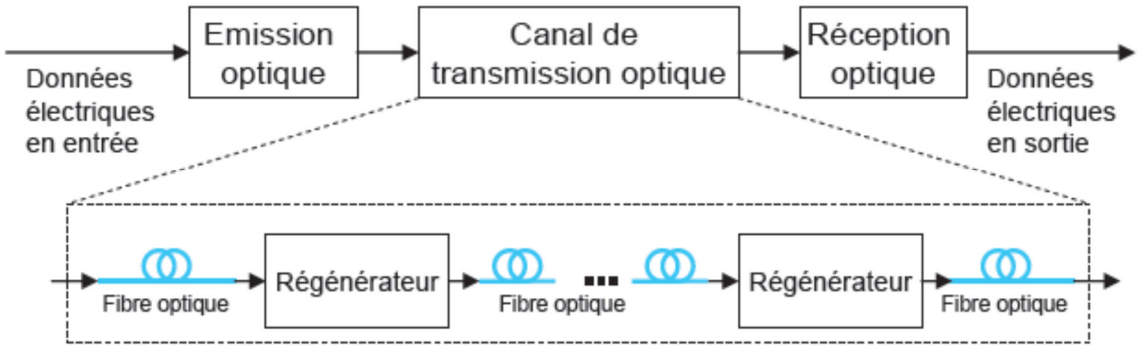


Figure 1.1 : Schéma d'une liaison optique.

La partie émission optique est constituée d'une diode électroluminescente (DEL) ou une diode laser (DL) qui a pour rôle de transformer le signal électrique en signal optique. En suite le canal de transmission (la fibre optique) transporte une porteuse optique modulée contenant l'information. En fin Le récepteur (photodétecteur) convertit le signal optique reçu en signal électrique [1].

1.4 Fibre optique

En 1980, les premiers systèmes de transmission optique apparaissaient. Ce développement commercial est l'aboutissement de plus de deux décennies de recherche de base pour obtenir des composants et dispositifs (en particulier des sources), mais aussi des fibres dont l'atténuation est compatible avec les exigences d'un réseau de télécommunication.

En 1970, la compagnie Corning Glass Works de New York, produit la première fibre optique avec des pertes suffisamment faibles (20 dB/km) pour être utilisée dans les réseaux de télécommunications (actuellement les pertes sont de l'ordre de 0,15 dB/km).

Les premières années de la fibre optique sont marquées par des évolutions importantes. Le passage consécutif de la première fenêtre de transmission autour de 850 nm (fibre multimode) à la deuxième autour de 1310 nm (minimum d'atténuation d'environ 0,3 à 0,4 dB/km), puis à celle autour de 1550 nm (minimum d'atténuation de 0,15 dB/km), qui est la norme aujourd'hui en matière de réseau.

Ces changements de fenêtre de transmission ont été rendus possibles par l'amélioration des techniques de fabrication des préformes et au développement des sources optiques.

1.4.1 Structure de la fibre optique

La fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété d'être un conducteur de la lumière et sert dans la transmission de données.

La fibre optique est composée des éléments de base suivants comme la figure 1.2 :

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- ***Cœur (1) :*** Milieu diélectrique intérieur, conducteur de la lumière ou sera confiner la plus grande partie de l'énergie lumineuse véhiculé dans la fibre d'indice de réfraction n_1.
- ***Gaine (2) :*** Entoure le cœur d'un milieu diélectrique, d'indice de réfraction n_2 plus faible. Les pertes des rayons lumineux se produisent dans la gaine.
- ***Revêtement de protection (3) :*** Assure une protection mécanique de la fibre.

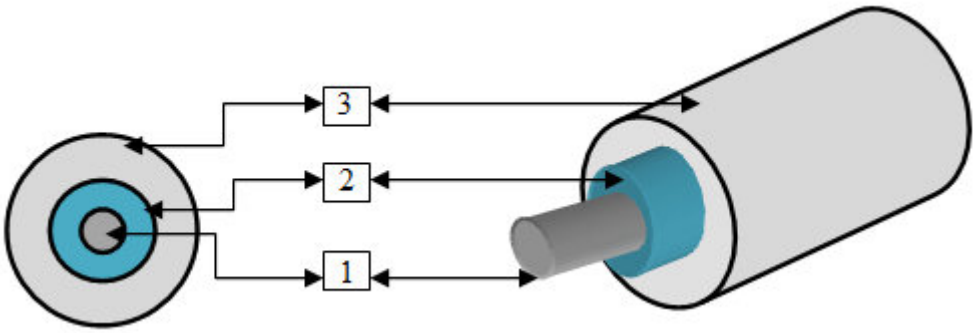


Figure 1.2 : Structure d'une fibre optique.

Le cœur et la gaine optique sont responsables de la propagation du signal lumineux au sein de la fibre. En effet, nous verrons par la suite, que c'est grâce à la différence d'indice de réfraction des deux milieux (cœur + gaine) que la propagation est possible.

1.4.2 Principe de fonctionnement de la fibre optique

Le principe de fonctionnement d'une fibre optique est basé sur multiples réflexions totales internes de la lumière à la surface de séparation des deux milieux [1].

Si $n_2 > n_1$ le rayon s'écarte de la normale et si $\theta_1 >$ arcsin (n_2/n_1), il y a réflexion totale. Ce principe a été démontré par ***Snell-Descartes*** qui a établi la relation suivante :

$$n_1 sin\theta = n_2\ sin\theta \tag{1.1}$$

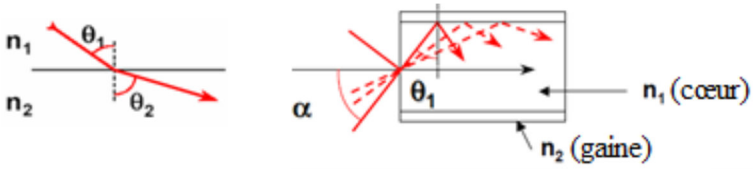


Figure 1.3 : Angle d'incidence d'entrée dans une fibre optique.

L'angle d'incidence maximal (α_{max}) à l'entrée d'une fibre c'est-à-dire l'ouverture numérique est définit par la relation suivante :

$$ON = \sin\alpha_{max} = n_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{lim}\right) = \sqrt{(n_1{}^2 - n_2{}^2)} \tag{1.2}$$

1.4.3 Différents types de fibre

Il existe 2 différents types de fibres: les fibres monomodes et multimodes. Une fibre est dite monomode si un seul chemin optique est envisageable pour la lumière et à l'inverse, une fibre est dite multimode si plusieurs chemins sont possibles.

Les fibres multimodes peuvent, à leur tour, être divisées en :

1.4.3.1 Fibres multimodes à saut d'indice

Dans les fibres à saut d'indice (figure 1.4), un grand nombre de rayons lumineux se propage par réflexion totale. Le nombre de rayons est fonction de l'angle d'incidence de la lumière. La réflexion totale est assurée par les valeurs des indices de réfraction n_1 (cœur) et n_2 (gaine) avec toujours $n_1 > n_2$.

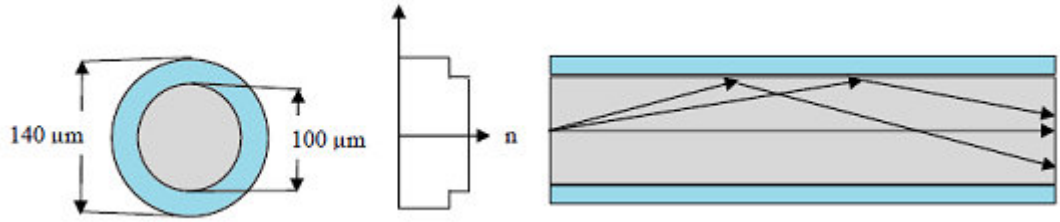


Figure 1.4 : Fibre à saut d'indice.

Les fibres multimodes à saut d'indice sont destinées pour des transmissions courtes distances, elles utilisent les longueurs d'onde 850 nm et 1300 nm.

1.4.3.2 Fibres multimodes à gradient d'indice

Dans les fibres à gradient d'indice (figure 1.5), le cœur est constitué de couches de verre successives ayant un indice de réfraction proche. Ainsi, l'indice décroît de façon continue, depuis le centre du cœur jusqu'à l'interface cœur / gaine.

On s'approche d'une égalisation des temps de propagation, ce qui signifie que l'on a réduit la dispersion modale. Tous les rayons sont refocalisés au centre de la fibre, l'atténuation et l'élargissement du signal sont beaucoup plus faibles que dans la fibre à saut d'indice.

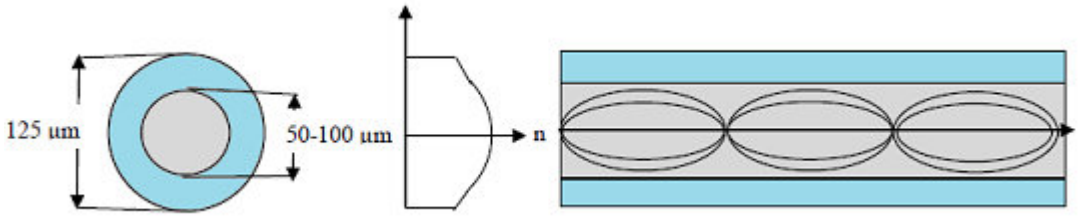


Figure 1.5 : Fibre à gradient d'indice.

Les fibres à gradient d'indice sont les plus utilisées pour les moyennes distances.

1.4.3.3 Fibres monomodes

Les fibres monomodes (figure 1.6), possèdent un cœur très fin, de la taille d'un cheveu. Le fait que le cœur soit si fin va obliger le signal lumineux à se propager en ligne droite, de ce fait, il ne rencontre pas la gaine et n'est donc pas perturbé, et par conséquence une dispersion modale quasiment nulle.

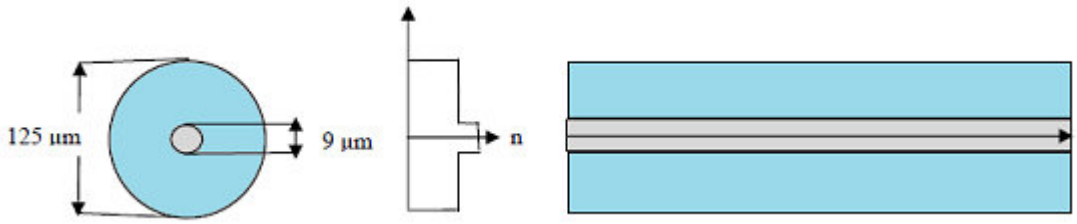


Figure 1.6 : Fibre monomode.

Les fibres monomodes sont destinées pour des transmissions à longue distances, elles sont utilisées à la longueur d'onde 1550 nm possèdent un diamètre de cœur extrêmement fin (8 à 10 µm en général), faible par rapport au diamètre de la gaine (125µm) et proche de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière injectée [2].

1.5 L'atténuation

L'atténuation dans les fibres optiques caractérise l'affaiblissement du signal au cours de sa propagation (figure 1.7).

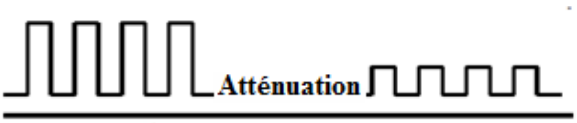


Figure 1.7 : Effet de l'atténuation.

Elle est définit en dB/km par la relation :

$$A = \frac{10}{L}\log\left\{\frac{P_{in}}{P_{out}}\right\} \tag{1.3}$$

Au cours de la propagation la puissance décroit selon la loi suivante :

$$P(z) = P_{in}\, e^{-\alpha z} \tag{1.4}$$

Où **α** est le coefficient d'atténuation (Neper/m).

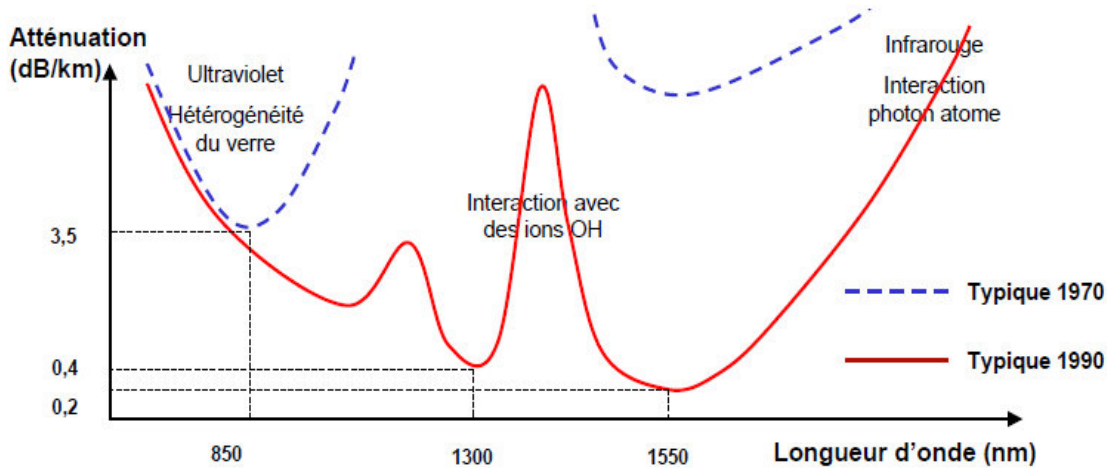


Figure 1.8 : Pertes de propagation de la fibre optique standards.

L'atténuation de la fibre optique (en silice) est liée à plusieurs causes. D'une part, la lumière est partiellement absorbée par la matière dans l'infrarouge et dans l'ultra-violet. Par ailleurs, une quantité résiduelle d'eau, incorporée sous forme d'ions OH^- au cours de la fabrication, peut être responsable d'un pic d'atténuation, bien visible sur la figure 1.8 au voisinage de 1.4 µm.

Par ailleurs, Les inhomogénéités de matière (matrice de silice), sont responsables d'une diffusion partielle de la lumière, appelée diffusion Rayleigh. La courbe de la figure 1.8 fait apparaitre des longueurs d'onde privilégiées. Au voisinage de λ=1.31 µm, on note la présence d'un minimum relatif des pertes de propagation, tandis qu'au voisinage de λ=1.55 µm, les pertes sont les plus faibles.

C'est la raison pour laquelle les télécommunications par fibre optique s'effectuent principalement autour de cette dernière longueur d'onde (1.55 µm). L'atténuation est alors de l'ordre de 0.2 dB/Km, ce qui signifie que la lumière peut parcourir 100 Km avant que son niveau de puissance ne soit divisé par 100 [1].

1.6 La dispersion

La dispersion se manifeste par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation (figure 1.9).

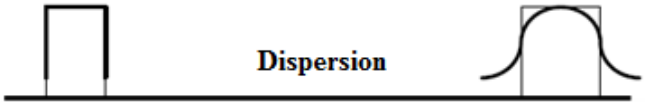


Figure 1.9 : Effet de la dispersion.

Il existe plusieurs causes responsables de l'élargissement des impulsions lumineuses ; on distingue deux types de dispersion : modale et chromatique.

1.6.1 Dispersion modale

Elle provient du fait que les différents modes d'une fibre multimode ont leur vitesse de groupe propre et donc au bout d'un certains temps de propagation, les différents modes seront décalés les uns par rapport aux autres.

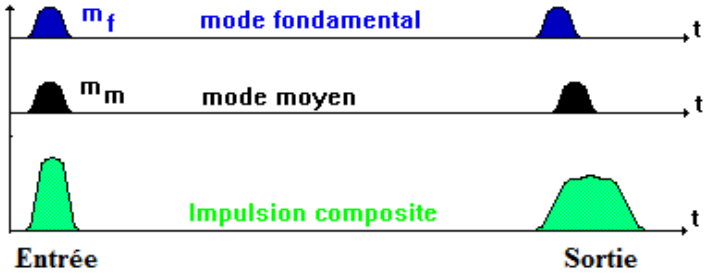


Figure 1.10 : Retard des modes.

Si on considère deux modes (figure 1.10), au bout d'une certaines longueur de la fibre, un mode sera en retard sur l'autre.

1.6.2 Dispersion chromatique

La dispersion chromatique est la somme d'un terme de matériau pur (dispersion matérielle) et d'un terme dû au guidage de l'onde (dispersion de guidage).

a. Dispersion matérielle

L'élargissement est causé par le fait que l'indice de réfraction du verre n'est pas le même pour toutes les longueurs d'onde. Cette dispersion existe dans toutes les fibres optiques qu'elle soit monomode ou multimode, et elle est très petite à la longueur d'onde d'environ 1300 nm.

b. Dispersion de guidage

L'élargissement est causé par le fait que la constante de propagation du guide dépend de la longueur d'onde.

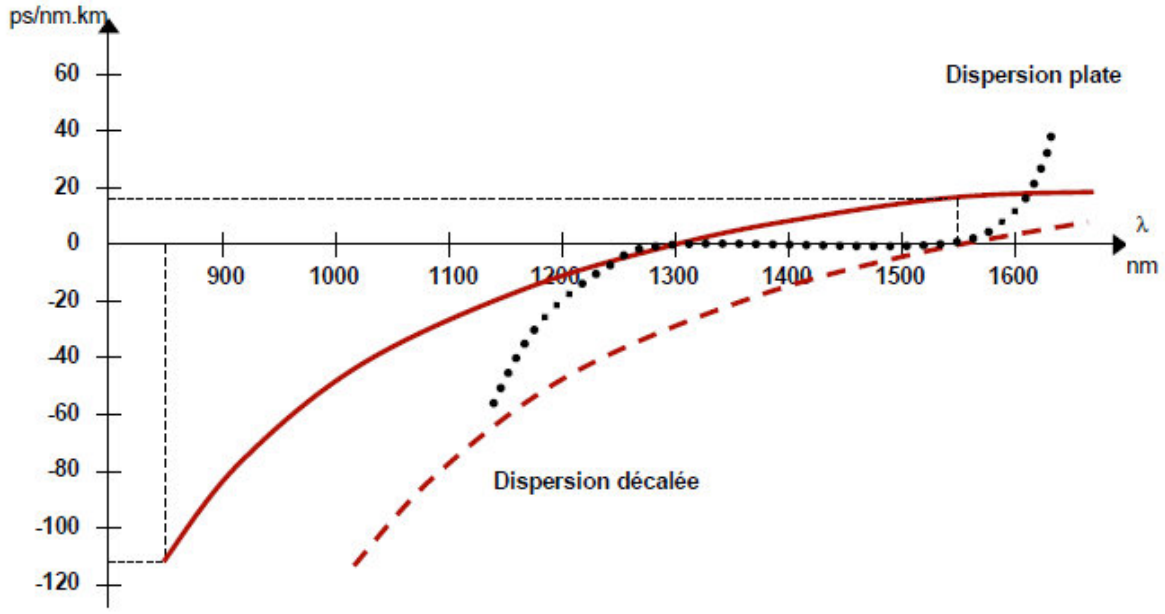


Figure 1.11 : Courbe de la dispersion chromatique.

La Figure 1.11, montre la courbe de la dispersion chromatique (en ps/nm.km), en fonction de la longueur d'onde λ (en nm). Calée sur les fenêtres de transmission actuelles, dans la silice et sur les régions proches de l'infrarouge, la dispersion est : négative aux longueurs d'onde courtes, nulle à la longueur d'onde à peu près de 1.3 µm, et positive aux longueurs d'onde plus larges. Dans une fibre monomode standard, le coefficient de dispersion chromatique est à peu près de ± 4 ps/nm.km à une longueur d'onde de 1,3 µm, et à peu près de 17 ps/nm.km à une longueur d'onde de 1,55 µm.

La dispersion du guidage dépend de la géométrie du matériau de la fibre. Dans la pratique, il est possible d'ajuster ce type de dispersion pour compenser la dispersion du matériau et ainsi obtenir des fibres optiques à dispersion décalée dans lesquelles le zéro de dispersion se trouve à 1,55 µm. Il est également possible d'obtenir des fibres optiques à dispersion plates, qui présentent une dispersion faible dans l'intervalle de longueur d'onde entre 1,3 µm et 1,55 µm [1].

1.7 Partie émission

On distingue classiquement les diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes laser (DL) selon le type de mécanisme mis en jeu pour l'émission de lumière (émission spontanée pour les DEL et émission stimulée pour les DL). Dans le cas des liaisons haut débit, seules les diodes laser, nettement plus performantes, sont utilisées.

1.7.1 Diode électroluminescente (DEL)

On appelle électroluminescence l'émission d'un rayonnement lumineux due à une excitation électronique dans un matériau. Dans le cas d'une diode électroluminescente (LED),

il s'agit de l'émission spontanée de la lumière provoquée par l'injection des électrons à travers une jonction PN particulière polarisé en directe (figure 1.12).

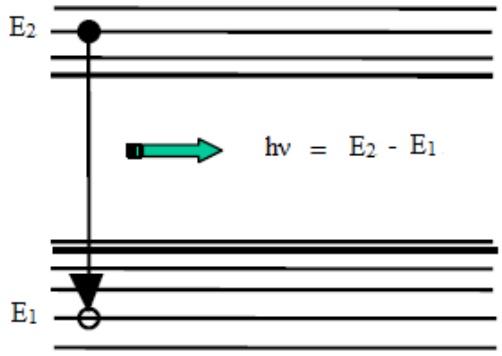


Figure 1.12 : Processus d'émission spontanée.

Les semi-conducteurs utilisés pour réaliser la conversion de l'énergie électrique en énergie lumineuse sont souvent des composés à base de gallium [3].

1.7.2 Les Sources laser

Un laser est un dispositif à semi-conducteur qui génère de la lumière monochromatique et cohérente acronyme de « Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation ».

La diode laser se base sur trois processus fondamentaux pour effectuer la génération de la lumière. Ces processus sont l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée (figure 1.13).

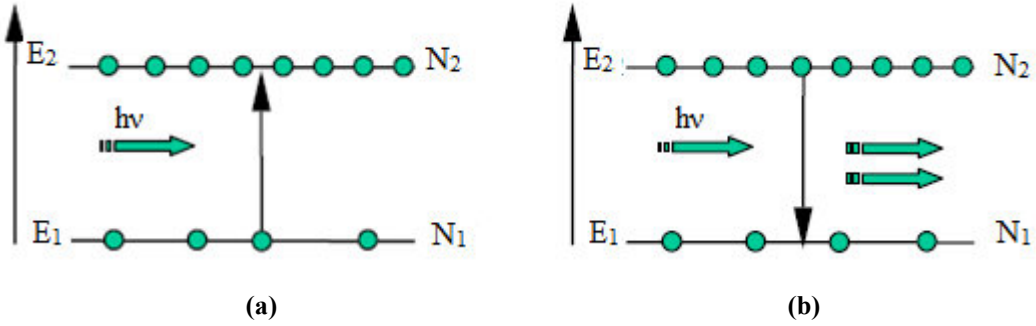


Figure 1.13 : Schéma des processus d'absorption (a) et de l'émission stimulée (b).

Pour obtenir l'effet laser, il est nécessaire de privilégier l'émission stimulée au détriment des deux autres processus. Deux conditions doivent être réalisées pour favoriser cette émission stimulée et ainsi obtenir l'effet laser :

- Il faut avoir suffisamment d'électrons dans l'état d'énergie supérieure. Dans un semi-conducteur, ceci est réalisé par une opération dite de pompage électrique qui consiste à promouvoir un maximum d'électrons dans la bande de conduction : C'est ce qu'on appelle une inversion de population.

- Il faut favoriser l'émission stimulée : il faut donc avoir suffisamment de photons incidents (excitateurs). Pour cela, on enferme le semi-conducteur dans une cavité résonante constituée par exemple par un résonateur du type Fabry-Pérot, obligeant ainsi l'énergie lumineuse à s'accumuler.

1.7.2.1 Principe du laser

Tous les types de laser (y compris les diodes laser) comportent les deux éléments suivants :

- *Un* ***milieu amplificateur*** pour la lumière (amplification par émission stimulée).
- *Une* ***contre-réaction optique*** qui consiste à réinjecter une partie de la lumière dans l'amplificateur : un laser s'apparente donc à un oscillateur. La contre réaction optique est souvent obtenue en plaçant le milieu amplificateur dans une cavité optique (cavité de Fabry-Perot) [4].

1.7.2.3 La contre-réaction optique

La diode laser fait appel à la contre réaction optique qui permet de passer d'un comportement amplificateur en oscillateur. Ceci est obtenu en plaçant le milieu actif à l'intérieur d'une cavité optique. Cette cavité est constituée de deux miroirs partiellement réflectifs avec indice de réflexion R_1 et R_2 comme le montre la figure 1.15.

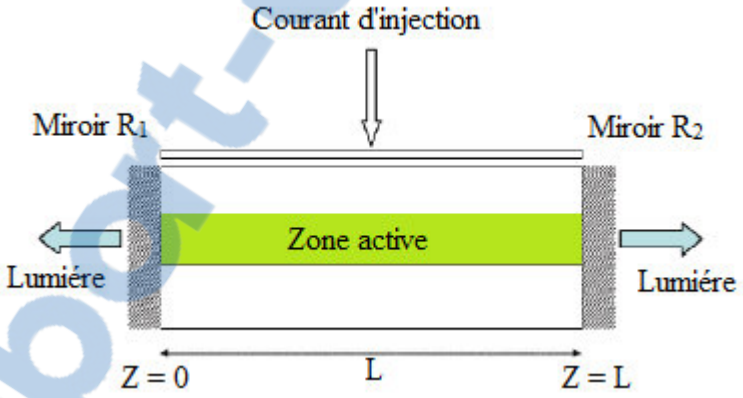


Figure 1.15 : Structure d'une diode laser à une cavité résonante Fabry-Perot.

La contre-réaction positive est déterminée par les réflexions aux extrémités de la cavité. L'onde optique générée à l'intérieur de la zone active effectue autant d'allers retours à l'intérieur de la cavité que de passages dans le milieu amplificateur.

1.8 La partie réception

La partie réception est le dernier étage de la chaîne de transmission, elle a pour rôle de recevoir le signal optique provenant de la fibre et le convertir en un signal électrique pour en extraire les données transmises.

Rapport-Gratuit.com

1.8.1 La photodiode PIN

La principale qualité d'une photodiode *PIN* est que la composante d'entraînement du photocourant domine sur la composante diffusive simplement parce que la plupart de la puissance optique incidente est absorbée à l'intérieur de la zone *I*.

En effet, la zone *I* est placée entre la zone *P* et la zone *N* d'un semi-conducteur différent dont la bande interdite est choisie afin que les photons incidents soient absorbés seulement dans la zone *I* de la photodiode (figure 1.16).

Une photodiode *PIN* utilise généralement du matériau InGaAs pour la région *I* et du matériau InP pour les couches *P* et *N*.

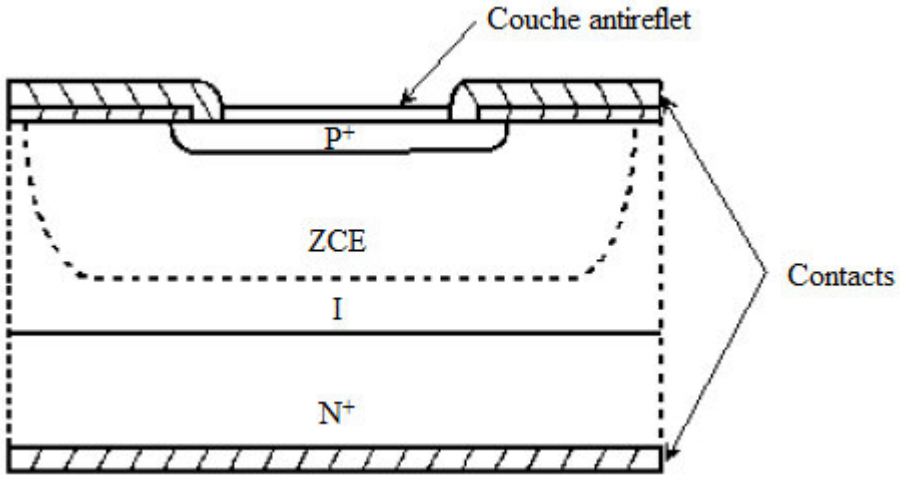


Figure 1.16 : Coupe transversale d'une diode PIN.

Les paramètres importants, dépendant du matériau et de la structure, qui caractérisent une photodiode *PIN* sont la sensibilité, le courant d'obscurité et le temps de réponse.

Le photocourant I_{ph} est directement proportionnel à la puissance optique incidente P_{opt} selon la relation (1.5).

$$I_{ph} = S.P_{opt} + I_{obs} \tag{1.5}$$

Où *S* est la sensibilité de la photodiode en A/W. *S* est typiquement proche de 0,9 A/W, mais peut être un peu plus faible suivant le photodétecteur et la longueur d'onde d'attaque λ.

En effet, *S* s'exprime en fonction du rendement quantique η par la relation (1.6) :

$$S = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q}{hc}\lambda \tag{1.6}$$

I_{obs} est le courant d'obscurité qui circule dans la jonction en l'absence d'éclairement. Ce courant ne provient donc pas des photons transmis par la fibre. Il peut avoir des origines multiples : génération thermique dans la zone intrinsèque, courants de surface, courants de fuite…

Dans la plupart des applications ce courant est négligeable (I_{obs} <10 nA). En ce qui concerne le temps de réponse, les meilleurs photodétecteurs actuels sont utilisables jusqu'à plus de 100 GHz [5].

1.8.2 Photodiode à avalanche PDA

Le signal reçu étant souvent très faible, il est donc nécessaire d'amplifier le photocourant, mais le bruit du préamplificateur est en général prépondérant. On a donc intérêt à utiliser un composant à gain interne, la photodiode à avalanche (PDA). Ce gain de multiplication par ionisation par impact, appelé aussi facteur de multiplication M, est le rapport entre le nombre moyen de porteurs secondaires créés par ionisation et le nombre de porteurs primaires provenant de la photodétection [7].

La valeur du courant relatif au nombre de photons absorbés sera (I_{pda}) :

$$I_{pda} = M.S.P_{opt} \tag{1.7}$$

Où M le facteur de multiplication, S la sensibilité et P_{opt} la puissance optique reçue. Le gain augmente avec la différence de potentiel appliquée, mais est limité à une valeur maximale. Si le champ devient trop fort, il y a risque de claquage. Cette valeur limite de tension dépend du matériau et de la structure utilisés.

Le courant d'obscurité I_{obs}, est plus important dans une photodiode en régime d'avalanche, mais il reste en général inférieur au gain M, multiplié par le courant d'obscurité non multiplié. En effet, toutes les composantes de celui-ci ne subissent pas le phénomène d'avalanche.

Le courant délivré par la PDA vaut :

$$I_{ph} = M.S.P_{opt} + I_{obs} \tag{1.8}$$

Où M est le facteur de multiplication, S la sensibilité, P_{opt} la puissance optique et I_{obs} est le courant d'obscurité.

1.9 Effets non linéaire dans les fibres optiques

Un canal de transmission est dit non linéaire lorsque sa fonction du transfert dépend du signal d'entrée. L'effet Kerr, la diffusion de Raman et l'effet Brillouin sont les principales sources de non linéarité dans les fibres optiques [8].

1.9.1 Effet Kerr

L'effet Kerr en optique géométrique est une extension des lois de réfraction de la lumière lors de la propagation de cette lumière dans des milieux d'indices variables. L'indice de réfraction n_{NL} peut alors s'exprimer d'une fonction non-linéaire de la forme suivante :

$$n_{NL} = n_0 + n_2 I \tag{1.9}$$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Où n_0 est l'indice de réfraction linéaire du matériau (en absence de signal optique), I l'intensité du champ optique appliqué en $W.m^{-2}$, et n_2 le coefficient non-linéaire de réfraction ou coefficient Kerr en m²/W. Sa valeur typique dans la silice est d'environ $2,6.10^{-20}$ m²/W.

1.9.2 Effet Raman

L'effet Raman est le plus connu des effets non linéaires. Il s'agit d'une interaction photon-phonon, c'est-à-dire d'échange d'énergie entre l'onde optique et les vibrations du matériau.

1.9.3 Effet Brillouin

L'effet Brillouin est de même nature que la diffusion de Raman, mais l'interaction se fait avec des phonons acoustiques, c'est-à-dire avec les vibrations de l'ensemble du matériau, qui se propagent à la vitesse des ondes acoustiques.

1.10 Modulation du signal

La modulation du signal au sein de la fibre optique est essentielle, en effet, cela permet deux choses :

- Générer l'information binaire à partir d'un signal physique.
- Traduire l'information binaire en niveau de puissance du signal lumineux.

Le procédé de modulation peut être de 2 types différents, à savoir le type direct, et le type externe.

1.10.1 Modulation directe

Un des principaux avantages de l'utilisation des lasers à semi-conducteur pour les systèmes de télécommunications par fibres optiques réside dans le fait qu'il est possible de les moduler facilement. La modulation du courant qui les traverse entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise. Cette technique est appelée modulation directe (figure 1.17) [5].

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

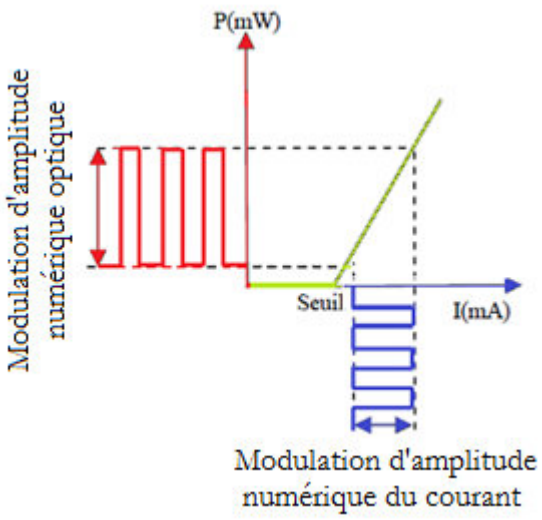


Figure 1.17 : Modulation directe d'une diode laser.

Cette solution de modulation directe requiert assez peu de composants. En dehors du laser, seuls un générateur de courant et un driver sont nécessaires. Le premier va émettre à un débit donné une séquence de données.

Le rôle du driver est de commander la source optique au niveau des puissances émises (en fixant les valeurs du courant d'alimentation). Pour cela, il modifie, transforme les niveaux du courant issu du générateur.

1.10.2 Modulation externe

La modulation externe consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu. Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du laser et non plus le courant d'alimentation à l'entrée du laser. Ainsi les défauts de la modulation directe qui incombent au laser ne seront plus présents sur le signal optique.

Cette modulation consiste à utiliser un modulateur externe. Celui-ci est commandé par une tension externe *v(t)*, modulée et représentative de l'information à transmettre. Cette tension appliquée au modulateur a pour propriété de modifier le facteur de transmission en intensité en sortie.

Le signal optique continu émis par le laser alimenté par un courant constant est donc peu dégradé. En traversant le modulateur, il subit les modifications du facteur de transmission et le signal de sortie se trouve modulé selon *v(t)*. Un driver est souvent présent entre les données et le modulateur afin de fixer les niveaux de *v(t)* et choisir les modifications du facteur de transmission [7].

1.10.2.1 Modulateur Mach-Zehnder

Le modulateur MZ est, dans sa version la plus simple, un interféromètre constitué généralement d'un bras de référence et d'un bras dans lequel une variation de phase est induite par effet électro-optique (figure 1.18). Ces deux bras sont deux guides optiques parallèles et de longueurs égales [9].

Si aucune tension n'est appliquée aux guides d'ondes, la lumière incidente est divisée de manière égale entre les deux bras de l'interféromètre. La recombinaison des ondes provenant des bras conduit à une figure d'interférence. Si une tension est appliquée à l'un des bras de sorte que la différence de phase entre les deux faisceaux de sortie est un multiple impair de π l'interférence est destructif : l'interféromètre a une transmission nulle.

La structure du Mach-Zehnder est décrite sur le schéma de la figure 1.18 :

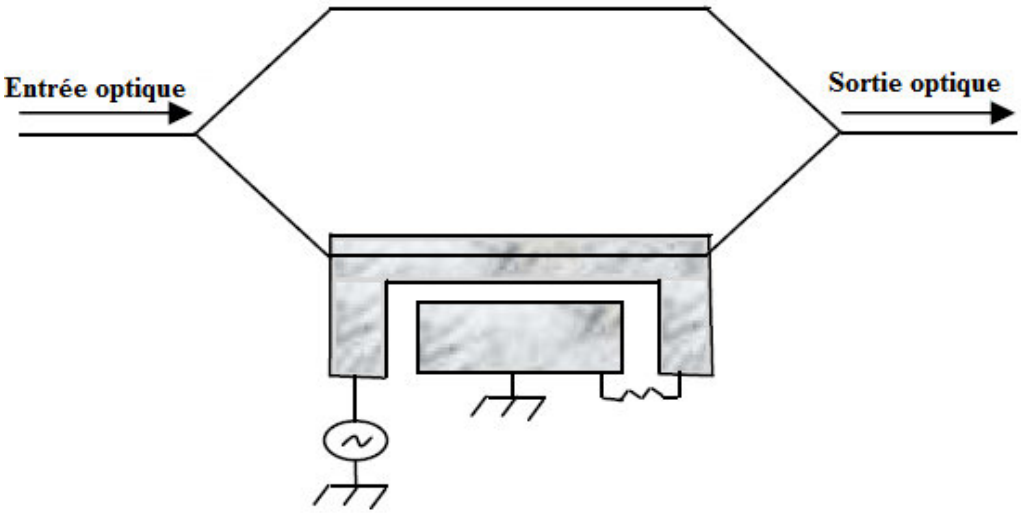


Figure 1.18 : structure d'interféromètre Mach-Zehnder.

1.11 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le principe de fonctionnement des dispositifs qui font partie d'une liaison optique et les caractéristiques fondamentales de la liaison.

Ensuite, nous avons présenté les effets linéaires et les effets non-linéaires qui limitent à la fois les distances de propagation et les débits de transmission.

Dans le chapitre suivant, nous allons surtout l'ensemble des techniques de multiplexages utilisés dans les transmissions optiques avec leurs caractéristiques, avantages et limites.

Chapitre 2
Différentes techniques de multiplexage

2.1 Introduction

Actuellement, l'optique est utilisée dans toutes les transmissions haut-débit, les réseaux de télécommunications, aussi bien pour les transmissions sous-marines que terrestres. Ceci est grâce à la grande capacité de transmission disponible dans la fibre.

Cependant les besoins croissants en débit ont amené à rechercher une technique pour augmenter les capacités de transmission des réseaux optiques. En effet, avec la technique du multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing), on peut transmettre de très grandes quantité d'information sur une seule fibre (800 Gbit/s voire plus dans les systèmes du commerce, 10 Tbit/s pour les records en laboratoires de recherche). De plus, l'amplificateur optique EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) a permis d'allonger les distances de transmission.

Nous allons présenter au cours de ce chapitre l'ensemble des techniques de multiplexage dans les systèmes de Transmissions optiques et leurs performances, avantages, et limitations, nous abordons ensuite les différents composants nécessaires pour le multiplexage.

2.2 Techniques de multiplexage

La bande passante des fibres optiques permet théoriquement l'établissement de systèmes de transmission à des débits très élevés. Cependant, le traitement électronique des données, à l'émission et à la réception, impose des limitations en termes de débits, dues aux composants électroniques dont la bande passante reste bien en deçà de celle accessible par l'optique.

L'augmentation du nombre d'utilisateurs et de la quantité d'informations échangées dans les réseaux de communication a poussé au développement de solutions pour augmenter la capacité des réseaux, et profiter de l'avantage en bande qu'offre la fibre optique. Des techniques de multiplexage ont ainsi été développées, chacune permettant de transmettre N signaux de débit D sur le même canal, ce qui équivaut à la transmission d'un signal global de débit $N \times D$.

Ces techniques de multiplexage doivent néanmoins respecter la condition nécessaire de pouvoir restituer les données propres à chaque utilisateur après leur transmission sans créer d'interférences entre les données des différents utilisateurs. Pour cela, le signal physique représentant les données de chaque utilisateur se distingue des autres signaux par sa bande spectrale, sa propre fenêtre temporelle ou encore son propre code. Ceci permet alors de les séparer finalement avec des techniques de démultiplexage appropriées [10].

2.2.1 Multiplexage temporel TDM (Time Division Multiplexing)

Le multiplexage temporel TDM consiste à offrir à un utilisateur la totalité de la bande passante pendant un court instant. L'allocation de la bande passante se fait en divisant l'axe du

temps en intervalles de temps, et chaque utilisateur ne pourra transmettre que pendant son intervalle (figure 2.1). Ainsi, le multiplexage temporel permet de regrouper plusieurs signaux à faible débit en un seul signal à haut débit.

A la réception, chaque canal temporel est demultiplexé puis acheminé vers sa destination. On peut réaliser électroniquement les fonctions de multiplexage/démultiplexage temporels avec des circuits intégrés ultra-rapides (40 Gbits/s en laboratoire). Toutefois, le coût extrême de ces circuits pour les très hauts débits suggère d'effectuer le multiplexage temporel par des moyens purement optiques [11].

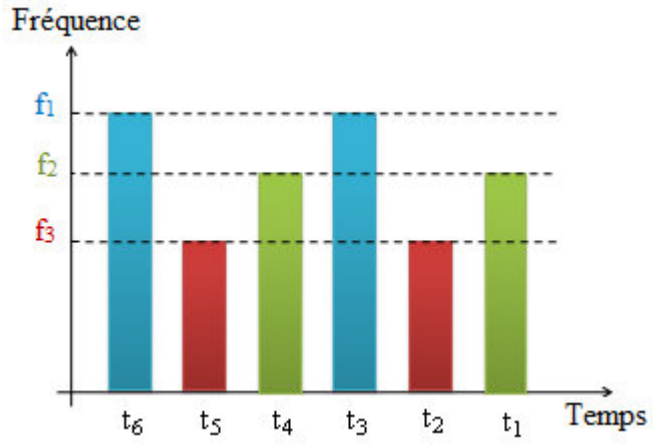


Figure 2.1: Schéma de principe de Multiplexage temporel.

2.2.1.1 Multiplexage temporel optique OTDM (Optical Time Division Multiplexing)

Le multiplexage temporel peut être réalisé optiquement. L'émetteur est constitué de *N* sources optiques en parallèle modulées au débit *Db* bits/s. Cette technique nécessite que les signaux optiques soient ensuite codés de type *RZ* pour que les impulsions codées aient désormais une durée inférieure à *Tb/N* et que le multiplexage optique puisse se faire sans recouvrement optique.

Le multiplexage optique temporel n'est pas utilisé uniquement pour accroître les débits transmis. Il fournit aussi une technique d'accès utilisable dans les réseaux locaux. Le temps est partagé entre les différents utilisateurs : chacun d'eux dispose d'une tranche temporelle pour émettre. Les différents signaux sont « assemblés » pour être transmis sur une porteuse optique unique [12].

2.2.1.2 Multiplexage temporel électronique ETDM (Electronic Time Division Multiplexing)

Le multiplexage temporel optique OTDM à son équivalent en électronique, l'ETDM. Dans le cas de l'ETDM, le codage *RZ* et « l'assemblage » des données se font électriquement .Le haut débit obtenu est ensuite utilisé pour la modulation du courant de polarisation d'une diode laser et il n'y a qu'un seul signal lumineux émis [12].

2.2.2 Multiplexage fréquentiel FDM (Frequency Division Multiplexing)

C'est la technique la plus ancienne qui était la seule lorsque le téléphone était purement analogique. A chaque interlocuteur, ou chaque message, est alloué une bande de fréquence. Cette technique, consiste à Découper la bande passante d'un canal en plusieurs sous-bandes chaque sous-bande est affectée à une voie de transmission (figure2.2) [13].

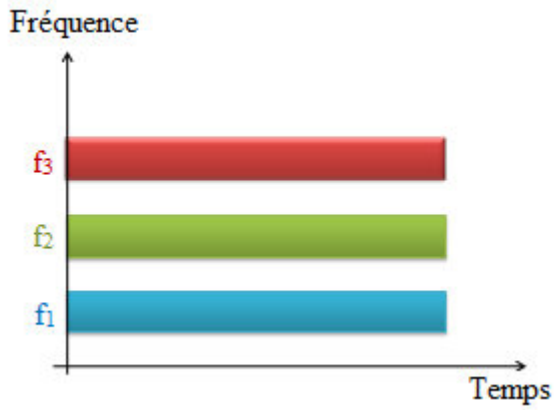


Figure 2.2 : Schéma de principe de Multiplexage fréquentiel.

2.2.3 Multiplexage à répartition par code CDM (Code Division Multiplexing)

Cette technique permet la transmission des données des utilisateurs sur la même bande de fréquence et en même temps. Le principe consiste à attribuer à chaque utilisateur un code, appelé également « signature », constitué d'une suite de bits rapides (appelés « chips » pour les distinguer des bits de données de l'utilisateur). Le débit après codage est celui des données utilisateur multiplié par la longueur de la séquence de codes.

Le multiplexage par répartition de code CDM permet d'étaler spectralement le signal transmis sur une bande *N* fois plus large que celle du signal initial, *N* étant la longueur de la séquence de code. Cependant, tous les utilisateurs exploitent la même bande spectrale, mais leurs données transmises se distinguent par le code propre à chaque utilisateur, ce qui permet d'éviter les interférences d'accès multiples, à condition que les codes utilisés soient orthogonaux [10].

Le CDM se décline en deux catégories de codage : le CDMA direct et le CDMA hybride. Le CDMA hybride consiste à associer la technique du CDMA aux autres techniques de multiplexage. Le CDMA direct se divise en CDMA à séquence directe, ainsi que le CDMA à saut de fréquence et le CDMA à saut temporel. Utilisée initialement dans le domaine de la radiofréquence, le CDMA peut être adapté dans le domaine optique grâce à des dispositifs de codage et de décodage optique, appelé Optical Code Division Multiplexing OCDM a été étudiée à partir de 1986 [14].

2.2.4 Multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing)

Le multiplexage par répartition en longueurs d'onde, développé dans les années 1980 et commercialisé au milieu de l'année 1990, est la technique la plus récente utilisée dans la transmission d'informations sur fibres optiques.

2.2.4.1 Principe

La technique WDM consiste à injecter simultanément plusieurs canaux d'informations de *N* porteuses optiques, à différentes longueurs d'onde transmettant chacune un débit *D*, dans une même fibre optique en partant du principe que les différentes longueurs d'onde d'une impulsion de lumière se propageant sur la fibre optique à des vitesses différentes. En effet la fibre optique possède une atténuation très faible (0.2 dB/km) dans la fenêtre de transmission 1.5-1.6 µm, ce qui représente une bande passante disponible de plus de 15 000 GHz, soit un potentiel de transmission numérique d'au moins 5 Tbit/s par fibre, l'équivalent de 80 millions de voies téléphoniques [15].

2.2.4.2 Fonctionnement

L'utilisation du multiplexage WDM nécessite un ensemble de *diodes lasers* émettant à des longueurs d'ondes différentes mais assez proches (dans le voisinage des 1550 nm).

A la réception un *démultiplexeur optique* pour combiner/séparer les différentes longueurs d'onde qui sont ensuite converties vers le domaine électron qu'au moyen de photodiodes. La Figure 2.3 représente un exemple d'une liaison utilisant le multiplexage WDM [16].

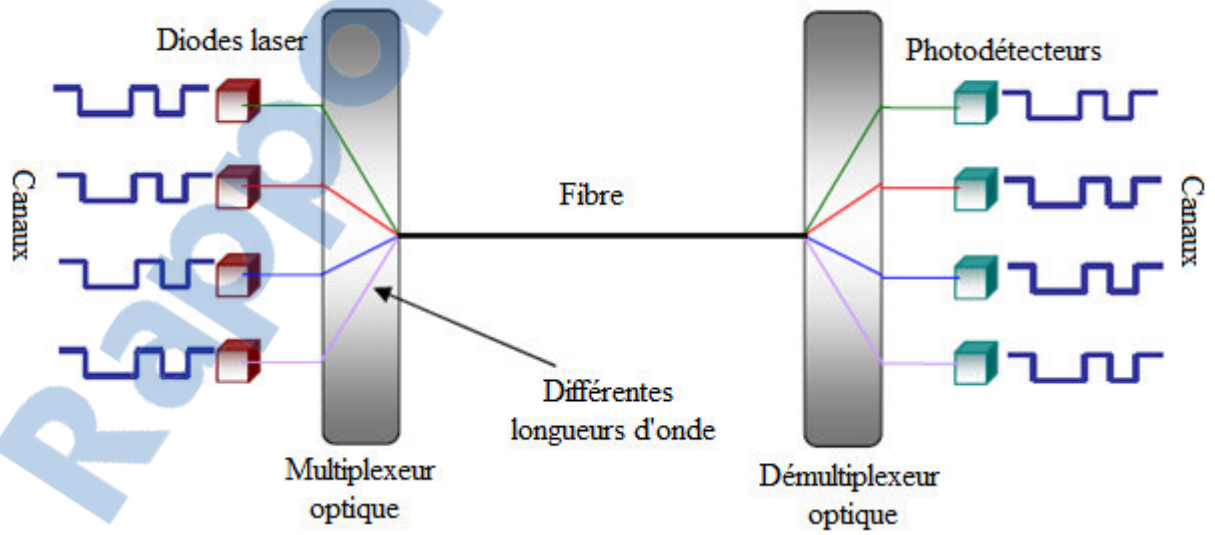


Figure 2.3 : Schéma de principe du multiplexage en longueur d'onde.

Pour assurer une bonne qualité de transmission du signal dans la fibre, il faut déterminer l'espacement minimum à respecter entre les longueurs d'onde émises par chaque

Rapport-Gratuit.com

source pour s'assurer qu'il n'y ait pas de chevauchement. Cet espacement dépend de plusieurs facteurs :

- Qualité de la fibre,
- Qualité des multiplexeurs/démultiplexeurs,
- Longueur de transmission,
- Qualité des sources,
- Débit des données de chaque source ...

La fibre optique transporte alors un débit numérique égal à N * D. Ce débit numérique est souvent définit comme capacité du système [11].

- **DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)**

Le multiplexage DWDM correspond à l'évolution du WDM. Il augmente la densité des signaux optiques transmis en associant jusqu'à 160 longueurs d'onde dans la même fibre. On atteint ainsi des débits de 300 à 400 Gbps. Des systèmes utilisant des pas de 50 GHz (0,4 nm) et de 25 GHz (0,2 nm) permettent d'obtenir respectivement 80 et 160 canaux optiques. La technologie DWDM présente cependant des coûts assez élevés, On l'emploi désormais pour les transmissions longues distance [16].

- **U-DWDM (Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing)**

Pour des intervalles encore plus petits, on parlera d'U-DWDM. Ainsi, des systèmes à 10 GHz (0,08 nm) permettent d'obtenir 400 canaux optiques. On peut actuellement avec 160 longueurs d'onde différentes atteindre des débits de 1,6 Tbps.

- **CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)**

Utilise des longueurs d'onde comprises entre 1270 et 1610 nm, respectivement espacées de 20 nm, 18 canaux au maximum sont utilisables. Mais une technologie moins coûteuse utilisable notamment pour les boucles locales (MAN).

- **WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing)**

Le multiplexage WWDM est un autre dérivé du WDM. Il est encore plus restrictif que le CWDM puisqu'il n'autorise l'utilisation que de quatre canaux au maximum. Les canaux ont une longueur d'onde comprise entre 1275,7 nm et 1349,2 nm. Les canaux sont espacés de 24,5 nm entre eux et travaillent sur une longueur d'onde de 1310 nm. Ce multiplexage peu être utilisé sur des fibres multimode et monomode.

2.3 Le développement des capacités

La capacité d'un système WDM peut être augmentée en jouant soit sur le débit de chaque canal, soit sur le nombre de canaux, voir sur les deux en même temps [15] [17].

A. Augmentation du débit par canal

L'augmentation des débits est de plus en plus élevée. Si les premiers systèmes WDM travaillaient avec des débits de 2,5 Gbit/s, rapidement des transmissions à 10 Gbit/s sont apparues pour atteindre aujourd'hui des débits de 40Gbit/s par canal. Mais cette augmentation du débit rend le signal de plus en plus sensible aux défauts de la propagation, tant linéaires que non linéaires. Ainsi, la dispersion chromatique (autour de 16,5 ps/(nm.km) à 1550 nm pour une fibre de type SMF-28), néfaste à la transmission d'information, ne pourra plus être négligée et des solutions de compensation de dispersion devront être trouvées et développées. De même l'apparition de puissance injectée plus élevée ainsi que la dispersion modale de polarisation seront aussi des facteurs de dégradation très importants et leurs impacts devront être maîtrisés.

B. Augmentation du nombre de canaux

Pour augmenter le nombre de canaux, une méthode consiste à diminuer l'espacement entre chaque longueur d'onde tout en restant dans la même bande. Les espacements utilisés prennent alors pour valeurs 50 GHz (ou 0,4 nm) voir 25 GHz (0,2 nm). Des centaines de canaux peuvent donc être obtenus dans une même bande. Du fait que l'espacement se trouve inférieur à 100 GHz, on parle alors de technologie DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Ce resserrement impose par ailleurs des tolérances de plus en plus faibles sur la stabilité des lasers et des filtres qui séparent les canaux dans le démultiplexeur.

2.4 Comparaison entre WDM et TDM

Au premier abord, on pourrait penser que les deux approches de multiplexage optique TDM et WDM sont semblables. Elles le sont au niveau formel puisqu'elles permettent la superposition sur le même support physique de transmission de plusieurs canaux de communication, identifiables selon leur décalage temporel pour TDM et selon leur longueur d'onde pour WDM. Cependant, au niveau technologique l'approche TDM présente des inconvénients significatifs par rapport à l'approche WDM.

En premier lieu, les canaux TDM ne sont pas transparents pour le débit de modulation ni pour le type de modulation. Ils sont uniquement modulables numériquement en amplitude et leur débit imposé par le multiplexeur temporel. A l'inverse, chaque canal WDM peut être modulé individuellement, numériquement ou analogiquement, en amplitude ou en phase. Le débit de chaque canal WDM peut en outre être choisi arbitrairement, du moment que les signaux ne se recouvrent pas spectrelement. Il en résulte une plus grande flexibilité.

Une autre caractéristique désavantageuse du multiplexage optique TDM provient du très haut débit du signal multiplexé, qui résulte de l'agrégation des canaux entrelacés temporellement. Cette conséquence inhérente au multiplexage temporel constitue un inconvénient majeur pour les systèmes de transmission optiques, lorsque le signal multiplexé se met à couvrir des dizaines de gigahertz. Le traitement électronique constitue alors un frein aux opérations de multiplexage et démultiplexage temporels, alors que l'approche WDM

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

effectue celle-ci optiquement et passivement. De plus, le phénomène de dispersion limite d'autant plus la propagation du signal TDM multiplexé que son débit est important. Les débits moindres de chaque canal WDM permettant d'éviter ce problème.

Enfin, l'approche TDM souffre d'un manque d'extensibilité. L'addition d'un nouveau canal TDM nécessite une modification des décalages temporels et une resynchronisation de tous les canaux déjà existants. Inversement, l'indépendance des canaux WDM autorise la création d'un nouveau canal simplement par l'ajout d'un émetteur et d'un filtre optique appropriés, sans affecter les autres canaux [18].

2.5 Applications de la technologie WDM

L'intérêt premier du WDM est de permettre le transport de débits d'informations très importants sur une même fibre, à destination de plusieurs utilisateurs [12].

On trouve aujourd'hui des systèmes à 4 * 10 Gbits/s, 16 * 10 Gbits/s. Cependant, il est à noter que le véritable point de départ du développement des systèmes de transmission WDM se fait lorsqu'il est associé à l'amplification optique

En effet, l'apparition des amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (EDFA) a permis l'amplification simultanée de l'ensemble des *N* canaux d'un multiplex, sans distorsion du signal utile. Envoyer *N* canaux dans une fibre optique plutôt que *N* fibres devient un avantage économique indiscutable.

Nous allons voir maintenant les différents types d'amplificateurs optiques et les fibres compensatrices de dispersion, qui sont devenus des éléments primordiaux pour les systèmes à multiplexage. Le signal optique peut être alors transmis sur une distance beaucoup plus grande sans aucune démodulation/remodulation des signaux de chaque canal.

2.6 Amplificateurs optiques

La création des amplificateurs optiques a constitué un tournant pour le développement des systèmes de transmission optique. Les amplificateurs optiques sont désormais une vraie alternative à la solution lourde et couteuse des répéteurs-régénérateurs. Leur large bande d'amplification permet de couvrir toutes les bandes optiques utilisées par les systèmes WDM.

2.6.1 Amplificateur optique à semi-conducteur (SOA)

Développé dans les années 1980, l'amplificateur optique à semi-conducteur SOA (Semiconductor Optical Amplifier) utilise le même principe de fonctionnement qu'un laser, avec un pompage électrique par injection de courant [10].

2.6.2 Amplificateur optique à fibre dopée Erbium (EDFA)

C'est l'amplificateur qui est à ce jour le plus abouti. Très étudié au début des années 1990, il a été mis en service pour la première fois en 1995 [15].Un amplificateur optique

absorbe l'énergie fournie par l'extérieur désigné par le terme de pompage. Il la restitue au signal pour le renforcer et l'amplifier. Les amplificateurs à fibre fonctionnent à la longueur d'onde de 1550 nm. Un de leurs avantages est la simplicité du dispositif (figure 2.4).

L'EDFA se composent pour : d'une fibre active de quelques mètres de longueur, dopée avec des ions appropriés (erbium), et connectée à la fibre de ligne, d'une pompe et d'un dispositif de couplage de la lumière de la pompe vers la fibre dopée. Le couplage de la lumière de la pompe dans la fibre est obtenu à l'aide de multiplexeur. Il est habituel d'ajouter deux isolateurs (diode optique), une à l'entrée, l'autre à la sortie, qui ne laissent passer la lumière que dans un sens. Les longueurs d'onde les mieux adaptées à ce type d'amplificateur sont : 980 et 1480 nm [19].

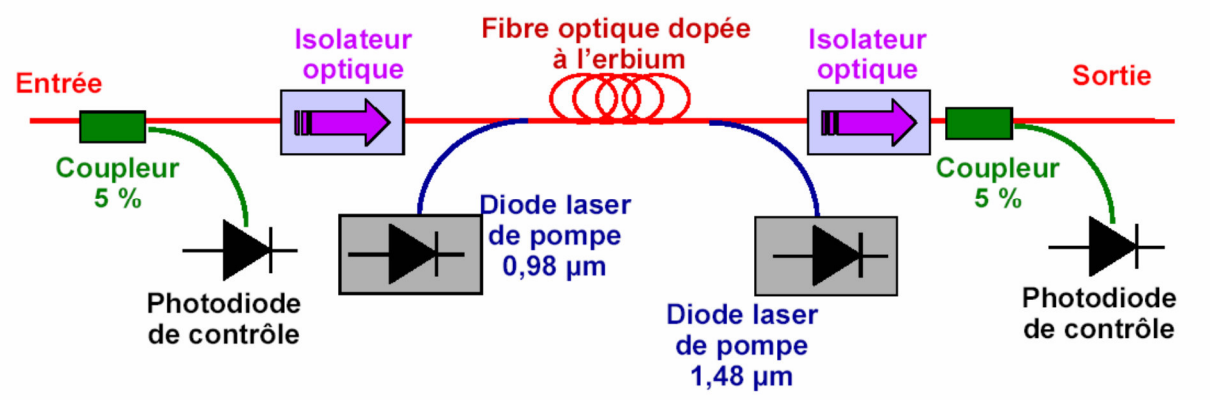


Figure 2.4 : Schéma d'un amplificateur optique à fibre dopé erbium.

En général, les EDFA possèdent un gain de 25 à 45 dB et des puissances de saturation allant de 1 à 10 mW (0 à 10 dBm). Enfin, les EDFA ont une large bande passante (1530-1560 nm) pour laquelle le gain est quasiment identique, ce qui rend intéressant ces amplificateurs quand on veut d'amplifier simultanément plusieurs signaux multiplexés en longueur d'onde [1].

2.6.3 Amplificateur Raman

Avec l'accroissement des canaux dans la fibre, la bande spectrale offerte par les amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium, limitée au maximum à 40 nm, peut s'avérer être un facteur pénalisant. Ce constat a relancé les études sur de nouvelles méthodes permettant l'augmentation de la bande spectrale [1].

De nouveaux amplificateurs optiques tels que les amplificateurs Raman prennent une part non négligeable dans les systèmes de télécommunications. Ils sont basés sur le principe de la diffusion Raman, qui est un effet non linéaire à deux photons dans lequel un photon de pompe est absorbé et un photon de plus faible énergie est émis en même temps qu'un phonon. Ce phénomène peut être spontané s'il n'y a pas de photon signal, ou stimulé par la présence d'un photon signal. Ainsi, dans le cas de l'amplificateur Raman, l'onde incidente, dite onde de pompe, stimulée par l'onde signal, va créer une autre onde signal et un phonon. L'amplification est alors réalisée.

Comme pour les autres amplificateurs optiques, l'amplificateur Raman a besoin d'une source externe, une source optique. Des lasers YAG sont le plus souvent utilisés dans ce cas, ils émettent une longueur d'onde inférieure à celle du signal. L'avantage principal de ces lasers est d'être accordable sur une très grande plage de longueurs d'onde. Le gain obtenu peut atteindre quelques dizaines de décibels, mais une saturation qui s'accompagne d'une forte dégradation du rapport signal sur bruit (l'émission spontanée continuant à être amplifiée) peut apparaître. La limite en puissance est due à la génération d'une onde autre que l'onde signal lors de la diffusion Raman.

2.6.4 Comparaison des amplificateurs

Malgré qu'il est le meilleur candidat à 1,3 µm et qu'il se prête a l'intégration monolithique, ses caractéristiques assez peu favorables, font que l'amplificateur a semi-conducteur n'apparait que très peu dans les systèmes de transmission. Au regard des caractéristiques présentées par les amplificateurs EDFA qui ont permis de créer un milieu de propagation sans perte sur une très grande distance dans les systèmes de transmission travaillant à 1,55 µm. Ils introduisent de plus faibles pertes d'insertion, une faible distorsion du signal, un gain plus important et sont insensibles a la polarisation de la lumière incidente contrairement aux SOA, ceci conduit à préférer les EDFA. Leur plus gros défaut est leur limite à amplifier uniquement autour de 1550 nm. Chose qui peut être résolue en utilisant la nouvelle génération des amplificateurs Raman qui présentent une large bande d'amplification avec un faible bruit [19].

2.7 Fibres compensatrices DCF (Dispersion CompensatingFiber)

Cette technique notée (DCF) est considérée comme meilleure solution permettant de minimiser les pénalités introduites par la dispersion chromatique sur une large bande de longueurs d'onde.

Elle consiste à introduire dans une liaison un tronçon de fibre produisant une dispersion chromatique de signe opposée à la fibre de ligne (SMF ou NZ-DSF). Etant donné que la dispersion chromatique d'une fibre varie avec la longueur d'onde (variation appelée pente de la D_{ch}), il n'est pas possible de ramener la dispersion chromatique cumulée à zéro périodiquement, simultanément sur toute une bande de plusieurs nanomètres en ajoutant simplement une seule et même valeur négative.

L'idée est alors de combiner les deux fibres en utilisant le bon rapport de longueur donné par :

$$K = \frac{L_{\text{Fibre de ligne}}}{L_{DCF}} = \left|\frac{D_{\text{ch DCF}}}{D_{\text{ch Fibre de ligne}}}\right| \quad (2.1)$$

La dispersion chromatique totale (ou cumulée) notée D_{chT} est alors définie par :

$$D_{chT} = D_{\text{ch Fibre de ligne}} L_{\text{Fibre de ligne}} + D_{\text{ch DCF}} L_{Dcf} = 0 \quad (2.2)$$

Cette valeur (appelée aussi D_{ch} résiduelle) doit être ramenée à zéro (ou autour d'une valeur faiblement positive) en fin de chaque section. D'après la relation on doit obtenir une valeur de D_{ch} la plus négative possible pour limiter la longueur de fibre compensatrice à insérer [20].

La DCF est caractérisée par sa simplicité de mise en œuvre et sa bonne résistance aux éléments extérieurs, son avantage majeur est son caractère large bande, mais elle présente aussi des inconvénients comme les pertes linéiques non négligeables.

2.8 Composants de multiplexage

Il existe différents composants nécessaires dans les réseaux optiques pour qu'ils deviennent« tout-optique » à savoir :

2.8.1 Réseaux de diffraction

Un réseau de diffraction est constitué d'une surface optique sur laquelle est gravée un grand nombre de traits. Ce réseau réfléchit les différentes longueurs d'ondes optiques du faisceau incident et séparées angulairement, l'angle de diffraction étant fonction de l'espacement des traits et de l'angle d'incidence du faisceau. Ce type de réseau peut (dé)multiplexer simultanément un grand nombre de longueurs d'ondes [1].

2.8.2 Filtres optiques

Les filtres permettent la séparation spectrale en réfléchissant certain gamme de longueurs d'onde et en transmettant les autres. En effet Le filtrage a pour but de limiter l'occupation spectrale d'un signal. D'autre part Le multiplexage optique regroupe les signaux occupant des gammes de longueurs d'onde différentes tandis que la fonction réciproque le démultiplexage, permet de séparer des signaux occupant des bandes de longueurs d'onde différentes.

On caractérisera le filtre par sa bande passante, c'est-à-dire le domaine de longueur d'onde dans lesquelles il laisse passer la lumière, et sa bande atténuée c'est-à-dire le domaine de longueur d'onde dans lesquelles il réfléchit la lumière incidente.

2.8.3 Phasars (Phased Array ou AWG Arrayed Wave Guide Grating)

Le dispositif comporte en entrée un coupleur étoile qui répartit sur les différents guides les signaux optiques présents en entrée. Le réseau de guide est conçu pour que le déphasage entre deux guides voisins soit de λc, longueur d'onde centrale de la bande passante optique traitée. Ainsi après le deuxième coupleur étoile, toute la puissance optique à λc est couplée aux guides voisins successifs.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.8.4 Commutation optique

La commutation est l'ensemble des techniques permettant d'établir la connexion entre l'émetteur et le récepteur. C'est dans ce sens que les communications sont basées sur un principe de commutation pour acheminer l'information d'un client vers un autre.

Les opérations de commutation et de routage sont réalisées en convertissant les signaux optiques sous leur forme électronique originelle. Il en résulte une grande flexibilité, cependant le débit de l'électronique n'est pas compatible avec l'énorme bande passante de la fibre optique.

De plus, la conversion optoélectronique introduit un délai supplémentaire dans le routage des flots d'information. Pour s'affranchir de ces limitations des composants, de commutation optique ont été développés, capables de traiter des signaux optiques à très haut débit sans conversion optoélectronique.

Pour cette raison, les réseaux utilisant cette technologie de commutation sont appelés réseaux tout-optiques.

D'autres composants nécessaires pour effectuer le multiplexage sont :

2.8.5 Brasseur optique

Un brasseur optique (Wavelength Routing Optical Cross-Connect, WR-OXC) est un dispositif qui aiguille des canaux optiques arrivant sur les fibres connectées à ses entrées vers différentes fibres connectées à ses sorties (figure 2.5) [15].

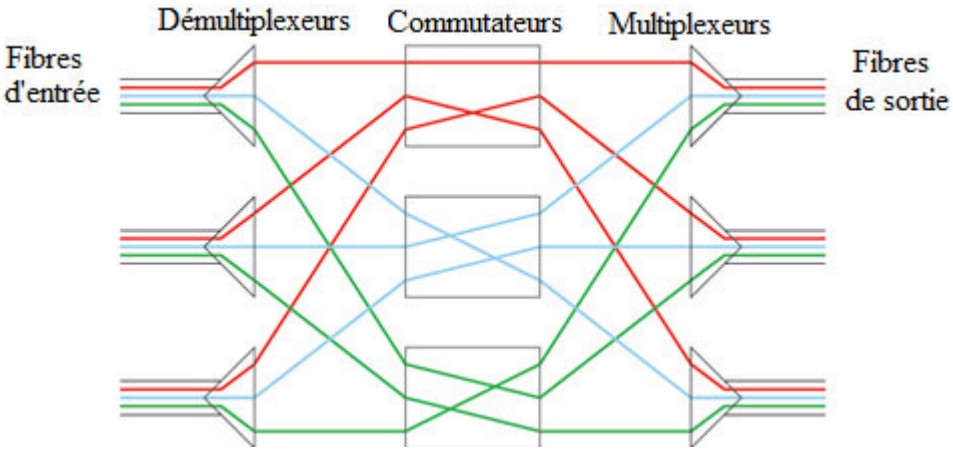


Figure 2.5 : Schéma de principe d'un brasseur optique.

Il se compose d'une série de démultiplexeurs situés aux extrémités des fibres d'entrée, il permet dans un premier temps de démultiplexeur les signaux entrants et de diriger spatialement chaque groupe de canaux WDM à la même longueur d'onde vers un commutateur photonique particulier [18].

Ces commutateurs sont contrôlés électroniquement et appliquent sur les groupes de canaux des fonctions de commutation indépendantes les unes des autres. Les canaux WDM sont enfin remultiplexés sur chaque fibre de sortie.

2.8.5 Multiplexage d'insertion/extraction

Les multiplexeurs d'insertion/extraction (MIE ou OADM, Optical Add Drop Multiplexers) permettent d'insérer un canal optique dans un multiplex ou de l'en retirer (figure 2.6) [15].

Il devient alors possible de ne traiter au niveau électrique dans un nœud que les trains à 2.5 Gbit/s destinés à ce nœud ou originaires de ce nœud, les canaux optiques sui les portent étant insérés ou extrait dans un MIE. Les canaux qui ne transportent pas d'information à destination du nœud considéré le traversent sans être traités, alors que dans un répartiteur numérique, les trains à 2.5 Gbit/s sont systématiquement démultiplexés et remultiplexés, même s'ils correspondent à du trafic en transit [21].

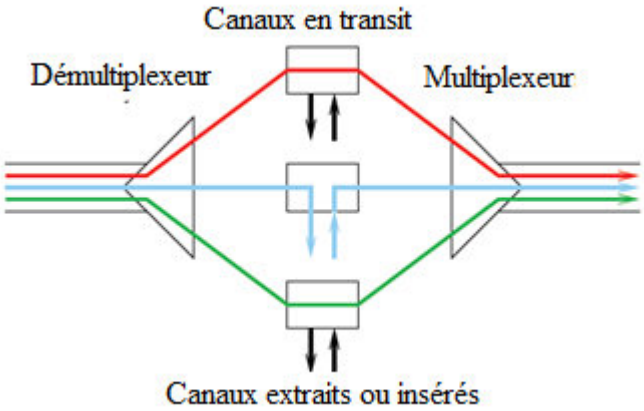


Figure 2.6 : Schéma de principe d'un multiplexeur d'insertion/extraction.

Les multiplexeurs d'insertion/extraction peuvent ainsi être utilisés en dehors des nœuds du réseau pour remplir une fonction de brasseurs fixes.

2.8.6 Circulateurs optiques

Les circulateurs optiques sont des dispositifs qui transportent un signal optique d'un port à un autre de seulement deux façons : du premier port vers le deuxième, et du deuxième vers le troisième (figure 2.7). Ils peuvent être employés pour séparer les signaux provenant des deux sens différents sur une fibre [2].

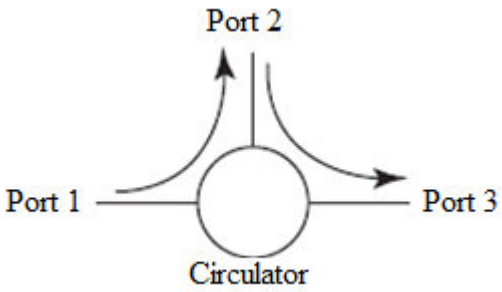


Figure 2.7 : Schéma de principe d'un circulateur optique.

2.8.7 Réseau de Bragg

Le réseau de Bragg consiste à une variation périodique de l'indice de réfraction du cœur de la fibre, c'est-à-dire le réseau de Bragg est composé de plusieurs périodes de couches d'indice n_1, n_2 (figure2.8). Quand la lumière se propage dans la fibre, le réseau réfléchit les longueurs d'ondes qui vérifient la relation :

$$\Lambda = 2 \times n_{eff} \tag{2.3}$$

Où Λ est la période de la modulation d'indice.

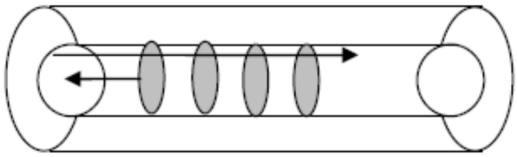


Figure 2.8 : Schéma d'un réseau de Bragg.

Une telle modulation de l'indice du cœur est obtenue par effet photo-réactif, c'est-a-dire par irradiation de la fibre. L'irradiation des fibres se fait sur une bande d'absorption associée au dopant présent dans la fibre (oxyde de germanium ou autre), elle généré une modification permanente de l'indice de réfraction. Cette technologie intervient à différents niveaux : multiplexage optique, amplificateurs, compensateurs de dispersion chromatique [10].

2.9 Convertisseurs optiques

Un convertisseur optique permet de modifier la longueur d'onde d'un signal optique. Ce composant est donc très utile pour les réseaux utilisant de nombreuses longueurs d'ondes. Deux grands types de technologies se distinguent :

- **Conversion optoélectronique**

Consiste à traduire le signal optique en signal électrique, puis émettre un nouveau signal optique avec une longueur d'onde différente. Cette technique est équivalente à la régénération du signal, c'est pourquoi on pourra profiter de la régénération du signal pour

modifier la longueur d'onde d'un signal optique. Des expérimentations pour des débits de 10 Gbps ont été réalisées.

- **Conversion tout-optique**

Cette technique de conversion en longueur d'onde, permet d'atteindre de plus haut débits. Des expérimentations ont démontré la faisabilité de convertisseurs tout-optique opérant à 40 Gbps.

2.10 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les techniques de multiplexage : multiplexage en longueur d'onde (WDM), en code (CDM), ou encore en temporel (TDM) qui ont permis d'accroître les débits de transmission.

L'approche WDM s'avère la technique de multiplexage préférentielle pour les systèmes de transmission optiques, en raison de la transparence, de la flexibilité et de l'extensibilité des canaux WDM.

Nous avons présenté également les différentes solutions pour augmenter la capacité totale d'un système WDM.

Nous abordons dans le chapitre suivant, l'étude d'un système WDM.

Rapport-Gratuit.com

Chapitre 3

Etude d'une liaison WDM

3.1 Introduction

La demande croissante pour les grandes largeurs de bande dans les réseaux optiques peut être réalisée en fournissant un nombre important de canaux optiques, qui à son tour implique un développement de nouvelles technologies pour la gestion des systèmes multiplexés en longueur d'onde. Les multiplexeurs (MUX) et les démultiplexeurs (DEMUX) optiques sont des blocs de base importants requis pour la combinaison et la séparation d'un nombre de canaux dans les réseaux multiplexés en longueur d'onde.

Dans ce chapitre, nous allons décrire le simulateur système OptiSystem, ainsi nous allons définir les éléments qui serviront de critères de qualité pour évaluer la qualité de transmission des données des utilisateurs en sortie de la partie multiplexage.

Nous abordons ensuite à la liaison WDM, on étudiera l'effet de l'espacement en longueur d'onde sur la qualité de transmission, on y exposera ainsi les résultats obtenus avec les formats RZ, NRZ et le format sans code (OFF), avec deux types de modulations directe et externe.

3.2 Présentation du logiciel OptiSystem

OptiSystem est un outil qui permet aux scientifiques et aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement du signal, allant du dispositif le plus élémentaire, au système complet de communication. OptiSystem est un environnement interactif qui allie des outils numériques efficaces à des fonctionnalités graphiques puissantes et une interface utilisateur conviviale.

La démarche à suivre se décompose en deux étapes :

- Construire le schéma bloc,
- Analyser le schéma.

3.2.1 Interface OptiSystem

L'interface OptiSystem contient une fenêtre principale répartit en plusieurs parties (figure 3.1) :

- ***Bibliothèque :*** une base de données de divers composants existants.
- ***Editeur du layout :*** permet l´édition et la configuration du schéma en cours de conception.
- ***Projet en cours :*** visualisation des divers fichiers et composants correspondant au projet en cours.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

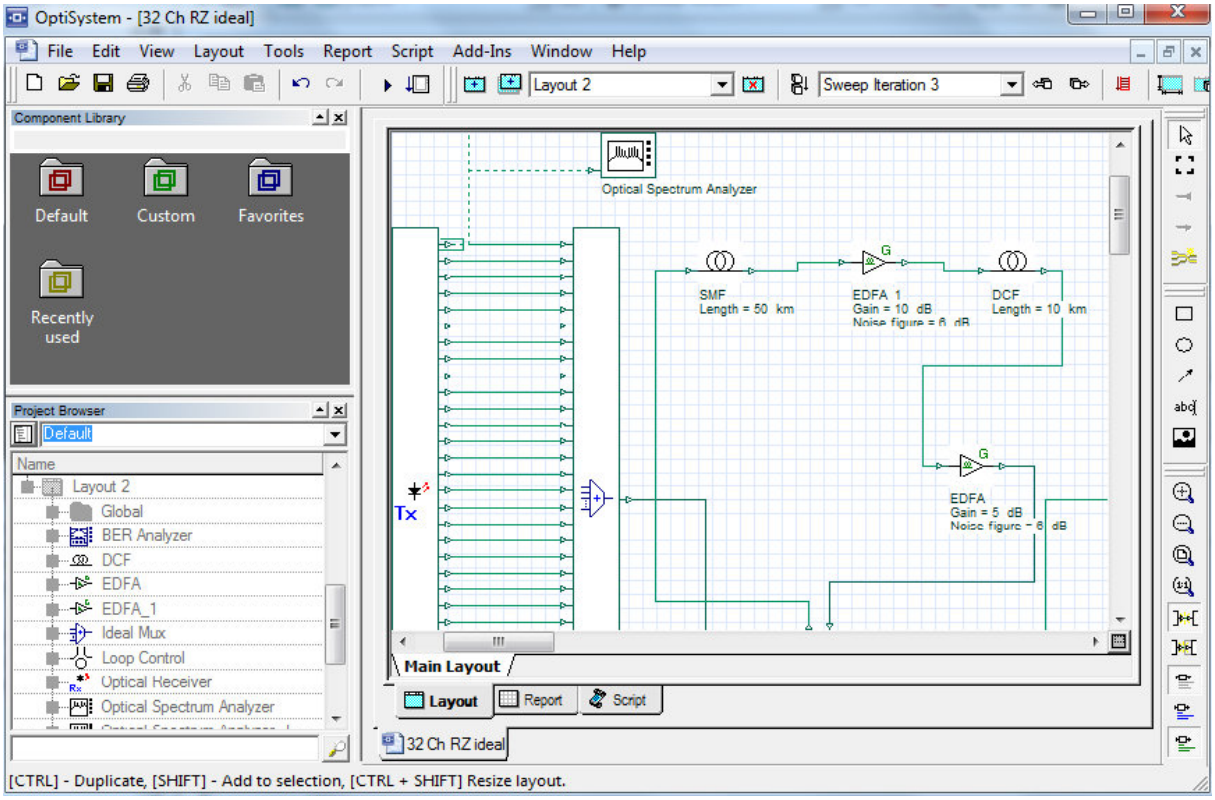


Figure 3.1 : Schéma de l'interface OptiSystem.

3.2.2 Paramètres caractéristiques

Pour insérer un composant (photodétecteur) de la bibliothèque OptiSystem, il suffit d'accéder au bloc Default, Receivers Library et Photodetectors (figure 3.2).

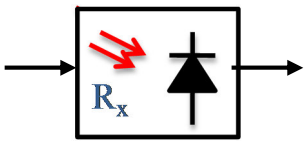


Figure 3.2 : Schéma d'un photodétecteur.

Les caractéristiques du photodétecteur utilisé, sont obtenues par un clic sur le composant (figure 3.3).

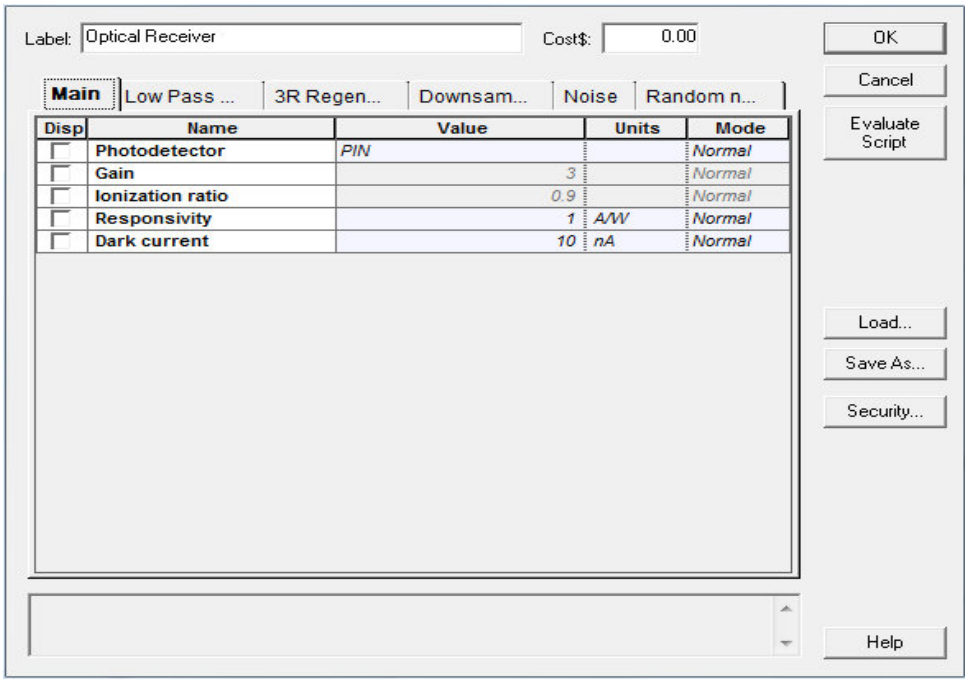


Figure 3.3 : Interface de définition du photodétecteur.

3.3 Résultats de la simulation

Le schéma général de la liaison avec multiplexage WDM est représenté sur la figure 3.4.

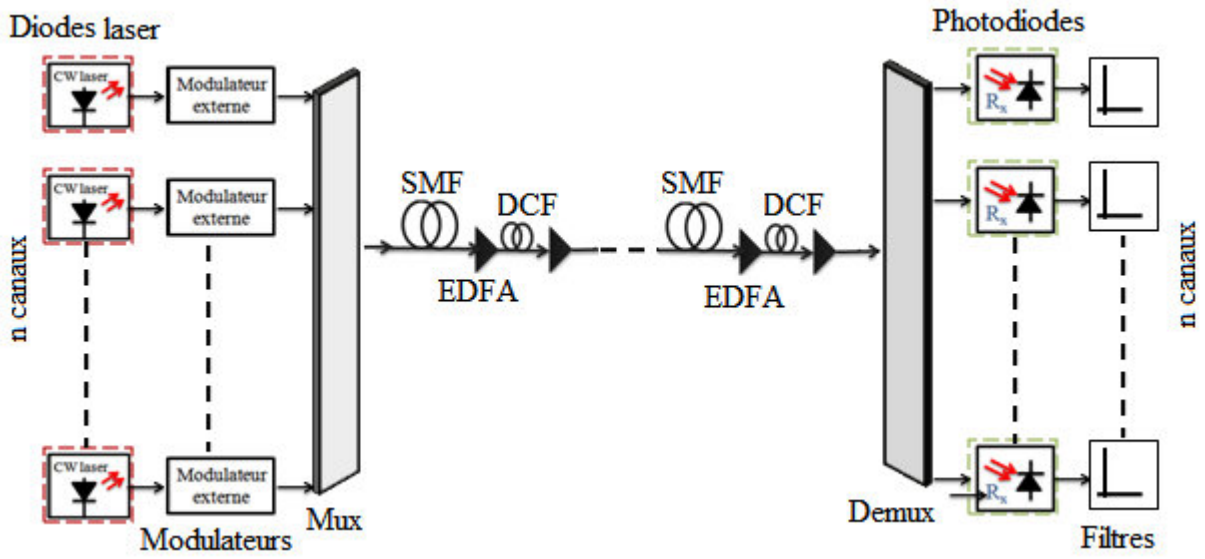


Figure 3.4 : Schéma de la liaison optique.

Nous allons présenter dans ce qui suit les différents éléments de la liaison.

3.4 Partie émission

L'émetteur est constitué d'une source optique émettant une onde pure, suivie d'un modulateur externe.

La source choisit dans la simulation est une source continue (laser à cavité externe). Cette source émet à 193.1 THz avec une puissance égale à 0dBm.

Pour la modulation, on utilise le modulateur d'amplitude Mach-Zender (MZ), son principe de fonctionnement repose sur la modification des indices de réfraction d'un matériau biréfringent soumis à un champ électrique. Une tension est appliquée à l'un des bras de l'interféromètre (MZ) de sorte que la différence de phase entre les deux faisceaux de sortie soit un multiple impair de π.

3.5 Partie transmission

Dans cette partie, nous avons une fibre monomode (SMF), caractérisée par : une longueur de la fibre L_{SMF} en km, une longueur d'onde égale 1550 nm, une atténuation de l'ordre de 0.2 dB/km et d'une dispersion chromatique de l'ordre de 17 ps/nm/km.

Nous avons également une fibre compensatrice de dispersion (DCF) de longueur L_{DCF} et de longueur d'onde égale à 1550 nm avec une atténuation de 0.5 dB/km et une dispersion chromatique négative de - 85 ps/nm/km, et enfin deux amplificateurs optiques dopés à l'erbium de gain G_1 et G_2.

3.6 Partie réception

Bien que certains dispositifs soient plus sensibles, les photodétecteurs à semi-conducteurs présentent les avantages d'être rapides et faciles à utiliser.

Le photodétecteur utilisé est de type photodiode PIN. Les paramètres de cette photodiode sont la sensibilité égale à 1 A/W, et le courant d'obscurité qui est de l'ordre de 10 nA. La sensibilité S relie la puissance lumineuse P_{opt} au photocourant I_{ph}, elle augmente avec λ.

Le courant idéal de sortie I_{ph}de la photodiode est :

$$I_{ph} = S \cdot P_{opt} \tag{3.1}$$

Le courant d'obscurité I_{obs} est le courant qui circule dans la jonction en l'absence d'éclairement.

3.7 Critères et méthodes d'évaluer la qualité de transmission

Pour évaluer la qualité de transmission des systèmes WDM, il existe trois principaux critères : taux d'erreurs binaires (BER), facteur de qualité (Q) et diagramme de l'œil.

3.7.1 Taux d'erreurs binaires

La qualité de transmission numérique binaire est intrinsèquement simple à évaluer puisqu'il suffit de comparer la séquence de symboles envoyés avec la séquence de symboles reçus, et de compter les erreurs c'est-à-dire le nombre de fois d'un « 0 » est détecté pour un symbole « 1 » émis ou vice versa. On définit alors le taux d'erreurs binaires ou Bite Error Rate en anglais (BER) correspondant au nombre d'erreurs sur le nombre de bits transmis pendant la durée de la mesure [21].

$$\mathrm{BER} = \frac{\text{Nombre de bits érronés}}{\text{Nombre de bits transmis}} \tag{3.2}$$

La mesure de qualité globale d'un système de canaux multiplexé en longueurs d'onde passe par la mesure du taux d'erreur de tous les canaux. Si un seul canal parmi plusieurs canaux présente des erreurs, le taux d'erreurs du système global est proche du taux d'erreurs du canal présentant des erreurs.

3.7.2 Facteur de qualité

Le signal mesuré à l'entrée du canal de l'oscilloscope contient une contribution due au signal utile ainsi qu'un apport en bruit dû à l'ensemble des éléments de la chaîne de transmission [10]. Dans le diagramme de l'œil qui retrace le signal mesuré, le signal utile est représenté par les niveaux moyens μ_1 et μ_0. Le 'bruit' représente les déviations des puissances optiques autour de ces niveaux moyens, il est quantifié en combinant les écarts-types μ_1 et μ_0.

On définit donc le facteur Q à partir de relevé du diagramme de l'œil par :

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \tag{3.3}$$

Le facteur Q est usuellement exprimé en dB en utilisant la formule suivante :

$$Q_{dB} = 20.\log_{10}(Q) \tag{3.4}$$

3.7.3 Diagramme de l'œil

La façon la plus « visuelle » de juger la qualité d'un signal est d'observer le diagramme de l'œil qui représente la superposition synchrone de tous les symboles binaires de la séquence transmise [10].

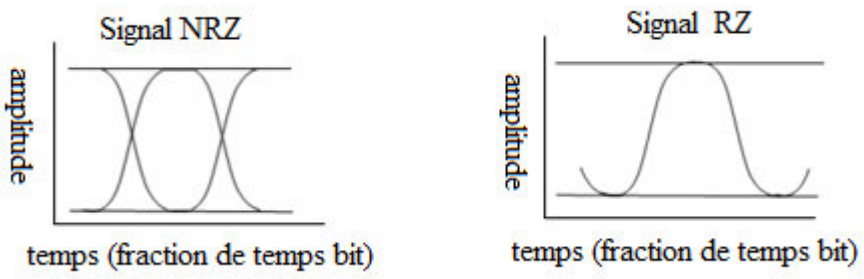


Figure 3.5 : Diagramme de l'œil d'un signal RZ et d'un autre NRZ.

Plus le signal est de mauvaise qualité, plus le diagramme de l'œil est fermé, plus le facteur de qualité est faible et ainsi plus la détection du signal sans erreur est difficile. Le diagramme de l'œil est donc un excellent moyen visuel de juger de la qualité du signal dans la limite de la réponse de la photodiode et de l'oscilloscope utilise.

3.8 Effet de variation d'espacement en longueur d'onde

En premier temps, nous allons étudier l'effet de l'espacement en longueur d'onde (WDM, DWDM, et U.DWDM) sur la qualité de transmission, pour différents nombre de canaux (16, 32 et 64).

Les figures ci-dessous, représentent l'effet d'espacement en longueur d'onde et du débit pour 16 canaux, sur une distance de 60km, avec une puissance de 1 mW et un nombre de tronçon égale à 2.

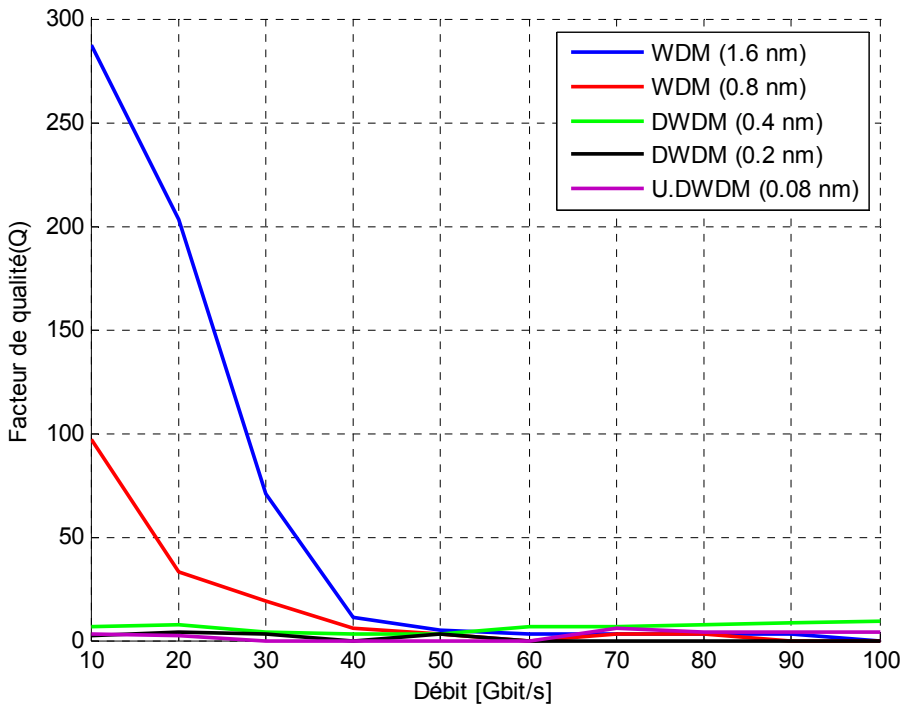


Figure 3.6 : Variation du facteur de qualité en fonction du débit.

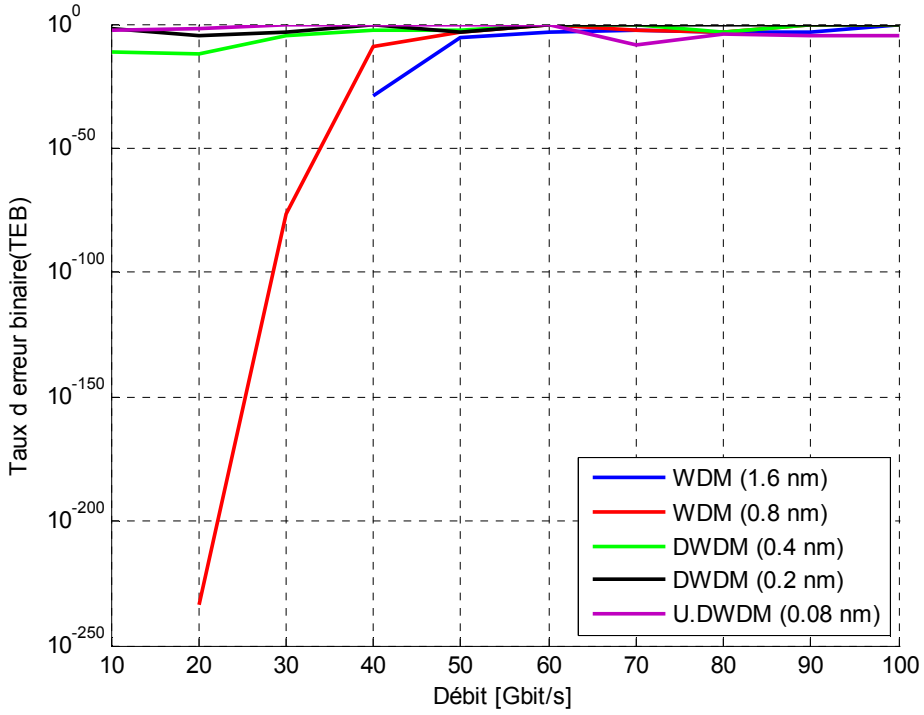


Figure 3.7 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du débit.

Sur les graphes de la figure 3.6 et 3.7, nous constatons que plus le débit augmente, plus la qualité de transmission décroît. Nous remarquons ainsi que le taux d'erreur binaire est meilleur pour des débits inférieurs à 40 Gbit/s pour l'espacement en longueur d'onde de 1.6 nm et de 0.8 nm (WDM), ce qui n'est pas le cas pour le DWDM et l'U.DWM.

Nous allons voir maintenant, l'effet de la longueur de la liaison sur la qualité de transmission pour différents espacement, le débit de chaque canal est fixé à 40 Gbit/s.

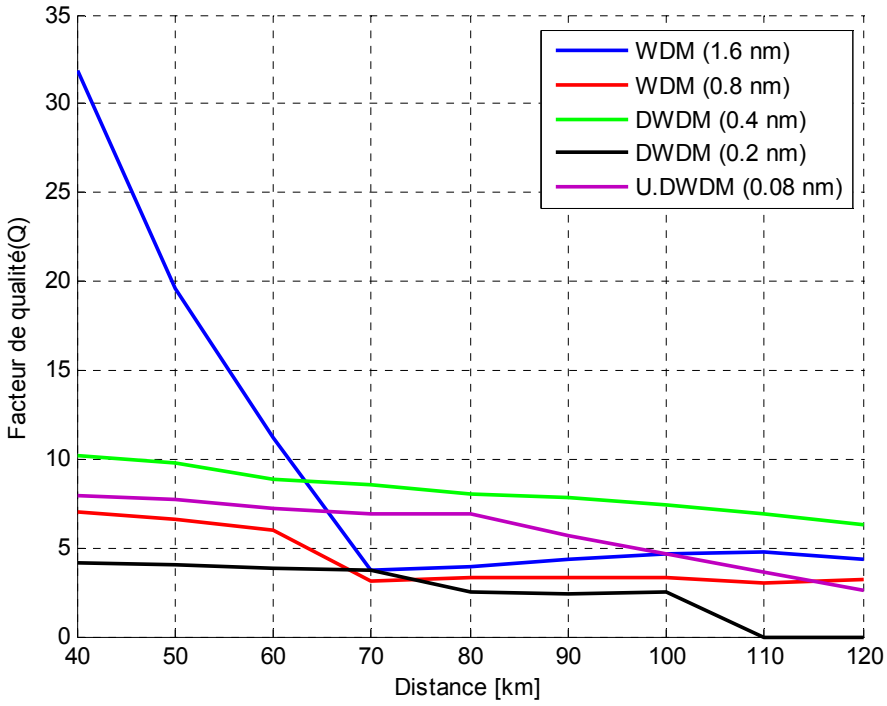


Figure 3.8 : Variation du facteur de qualité en fonction de la distance.

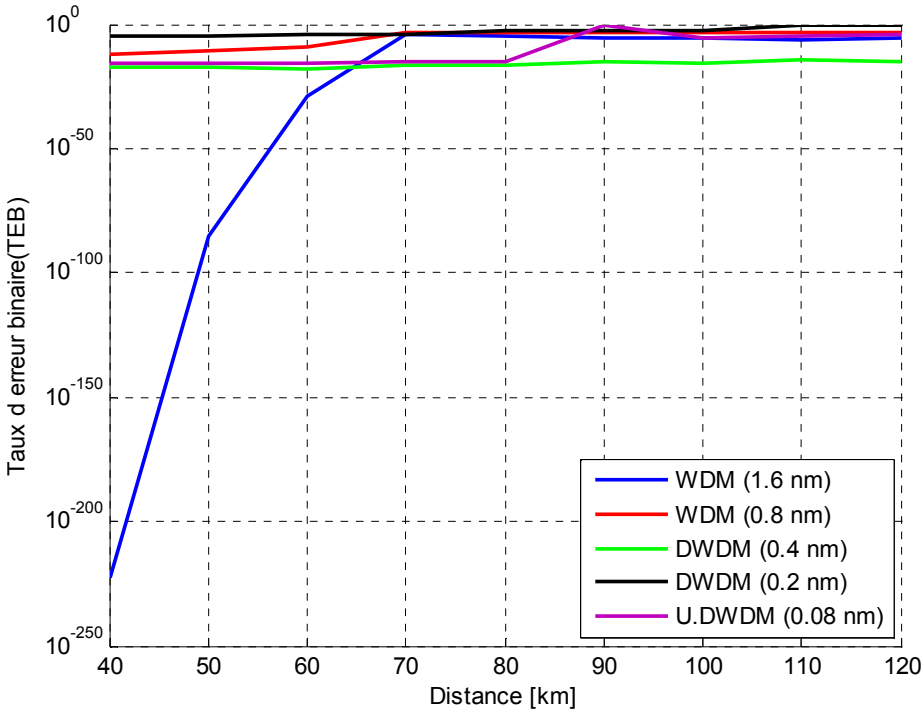


Figure 3.9 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la distance.

Pour les différents espacements, nous observons que le facteur de qualité est meilleur jusqu'à 60 km pour le WDM (1.6 nm), à partir de cette valeur il chute, c'est pour ça on a pris cette longueur (60 km) comme référence pour ce qui suit.

Les mesures suivantes sont faites en variant le nombre de tronçons pour différents espacement en longueur d'onde, la longueur de la fibre SMF pour un tronçon est fixée à 60 km. Nous obtenons les figures 3.10 et 3.11.

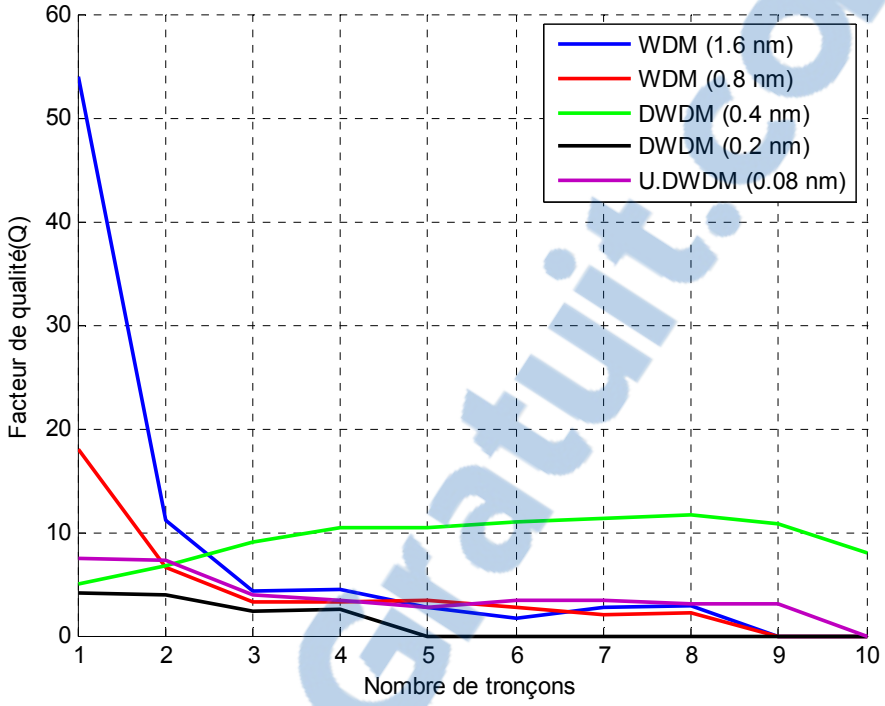


Figure 3.10 : Variation du facteur de qualité en fonction du nombre de tronçons.

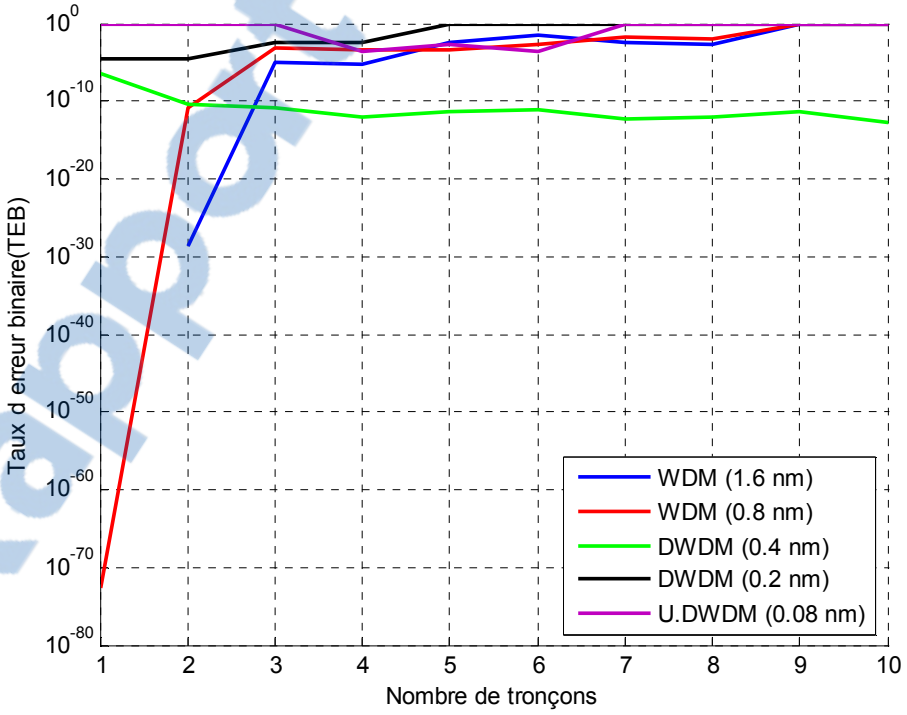


Figure 3.11 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du nombre de tronçons.

Rapport-Gratuit.com

Les graphes des figures ci-dessus, indiquent une meilleure qualité de transmission (TEB = 10^{-10}) pour un nombre de tronçons égale à 2 pour les différents espacements en longueur d'onde.

Cette fois-ci, nous allons étudier l'effet du débit et de l'espacement sur la qualité de transmission, on a augmenté le nombre de canaux à 32.

Après avoir fixé la longueur de la fibre à 60 km, et le nombre de tronçons à 2, nous allons étudier la variation de la qualité de transmission sur le débit (figure 3.12 et 3.13).

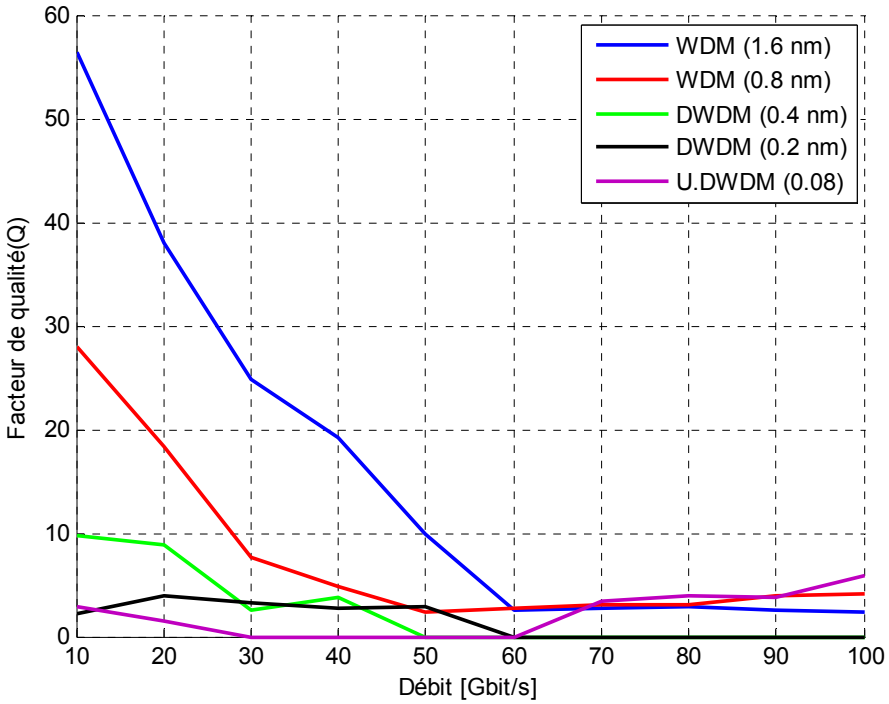


Figure 3.12 : Variation du facteur de qualité en fonction du débit.

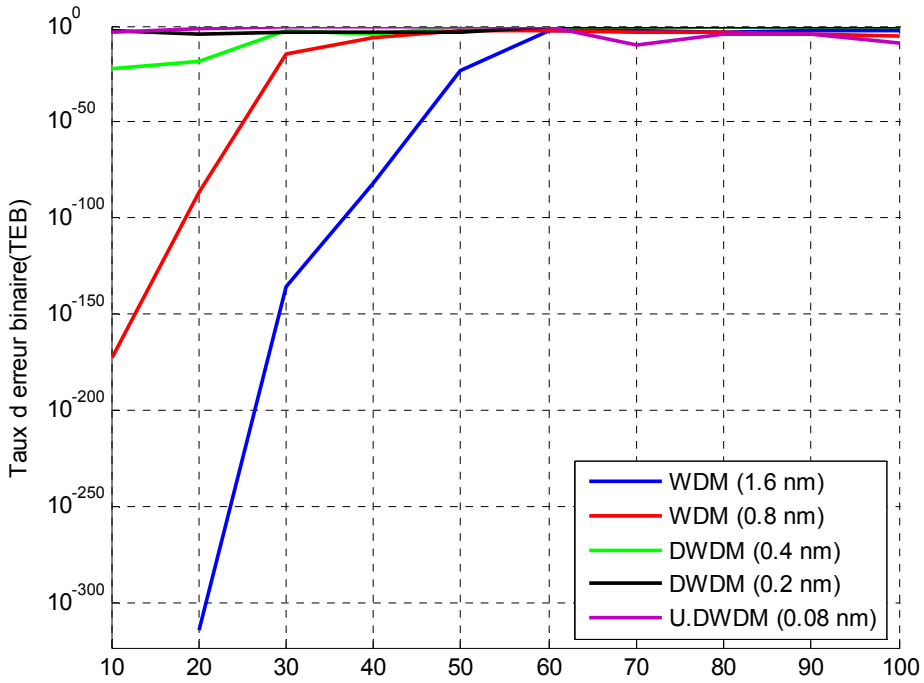


Figure 3.13 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du débit.

Les figures ci-dessus montrent que le facteur de qualité est meilleur pour un espacement de 1.6 nm, suivi de 0.8 nm et de 0.4 nm. On constate alors un TEB de 10^{-10} à un débit de 50 Gbit/s.

Nous pouvons aussi visualiser l'effet de la distance pour un nombre de canaux égale à 32, en traçant les courbes pour différentes longueurs de la liaison comme le montre les figures 3.14 et 3.15.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

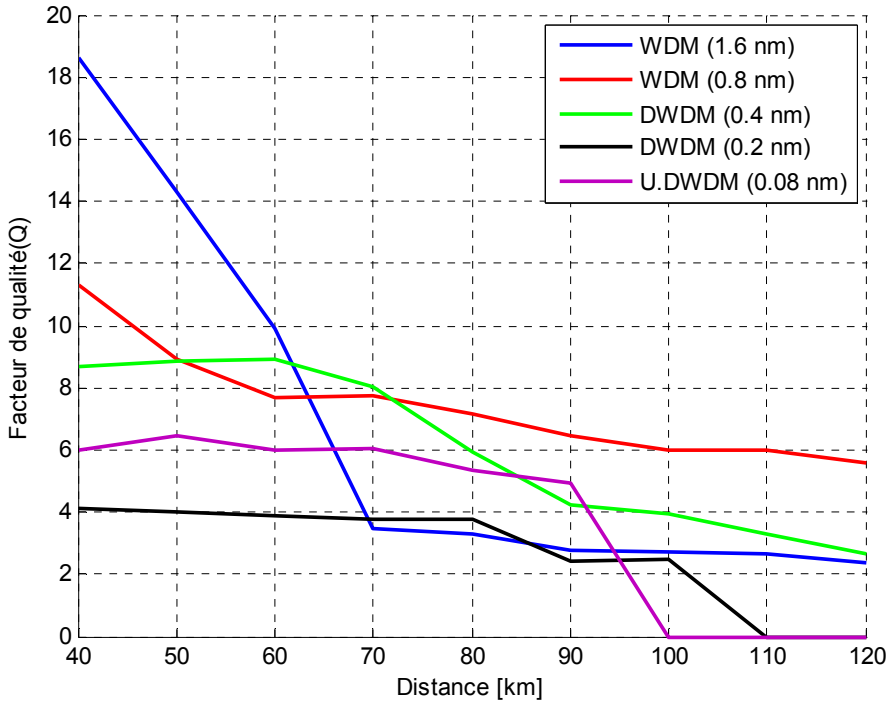


Figure 3.14 : Variation du facteur de qualité en fonction de la distance.

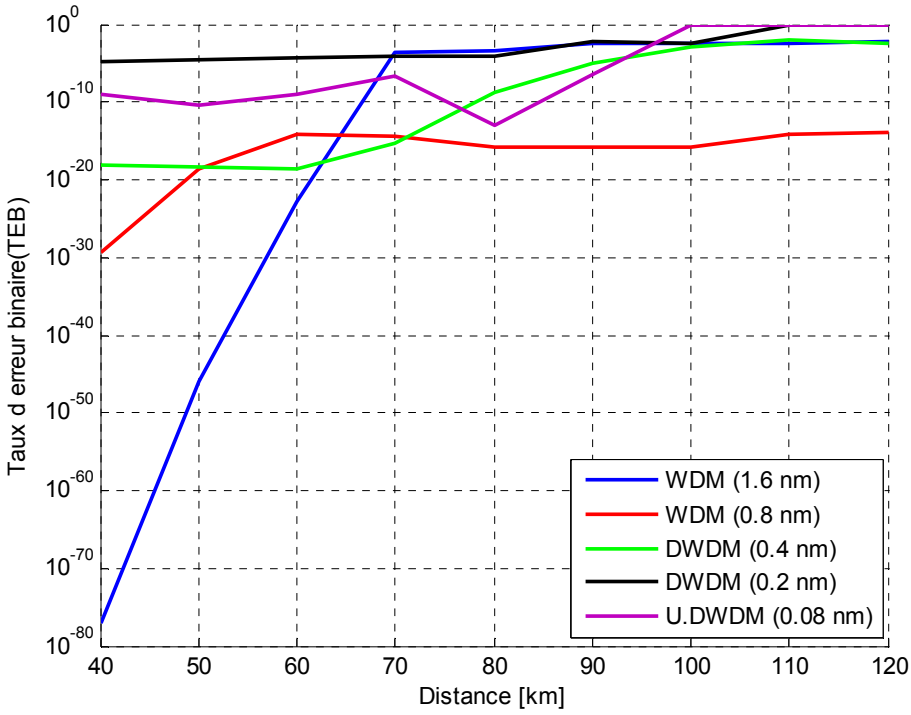


Figure 3.15 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la distance.

Nous constatons également une décroissance du facteur de qualité en fonction de la distance et ceci est dû aux différents effets linéaires et non linéaires. On remarque un TEB de 10^{-10} à la distance 65 km pour le WDM (1.6 nm).

Les courbes de la variation du facteur de qualité et du taux d'erreur binaire en fonction du débit pour 32 canaux sont représentées sur les figures 3.16 et 3.17.

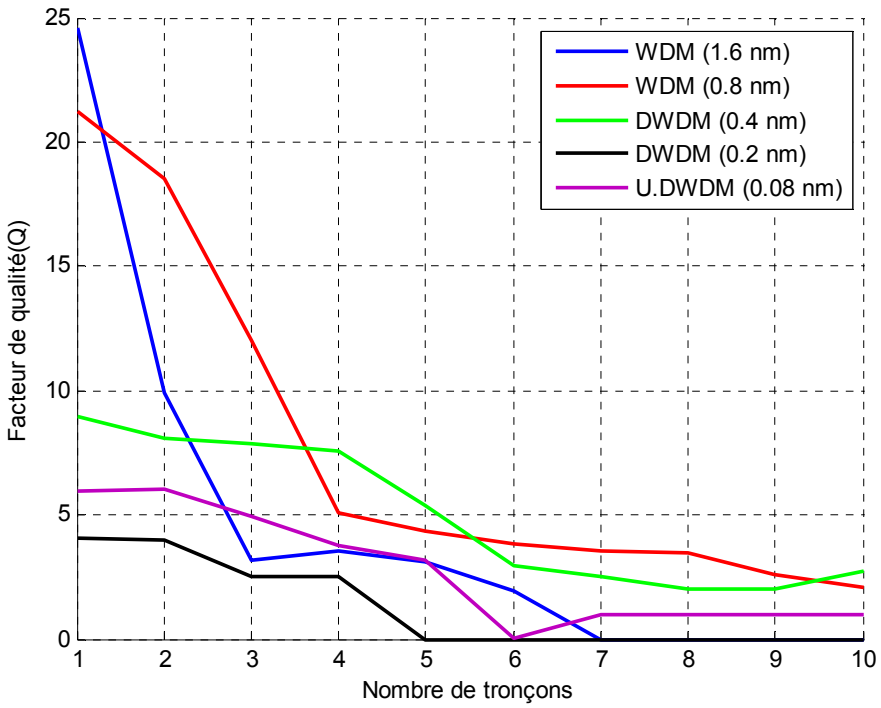


Figure 3.16 : Variation du facteur de qualité en fonction du nombre de tronçons.

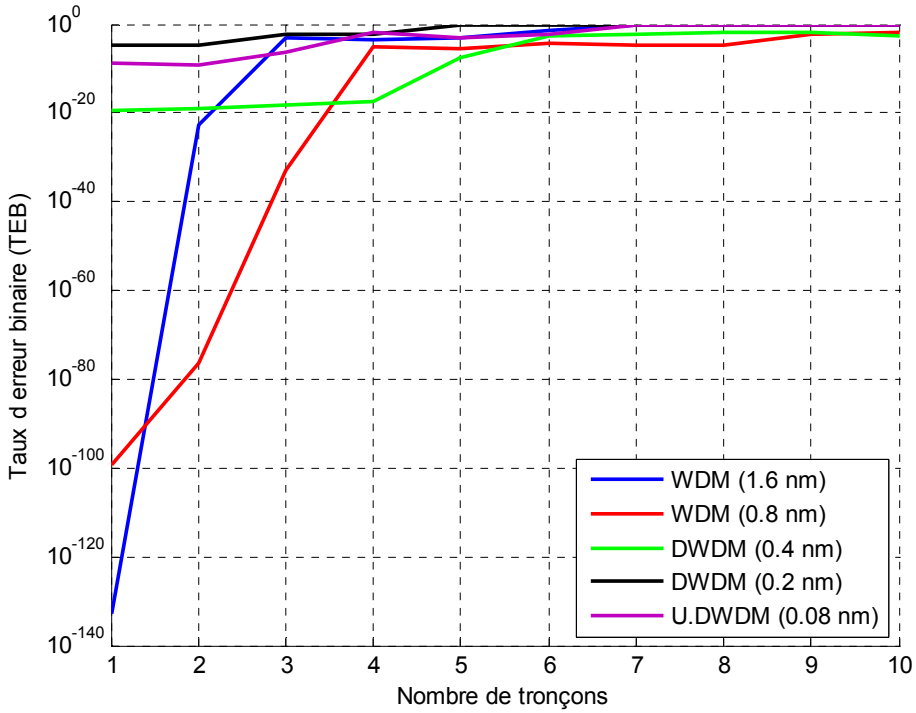


Figure 3.17 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du nombre de tronçons.

Nous constatons une décroissance du facteur de qualité pour les différents espacements ainsi que le TEB atteint 10^{-10} à un nombre de tronçons égale à 5 pour les systèmes DWDM.

D'autre part, nous avons effectué la simulation sur 64 canaux, pour différents espacements en longueur d'onde, les courbes des figures 3.18 et 3.19, illustrent la variation du facteur de qualité et du taux d'erreur binaire en fonction du débit.

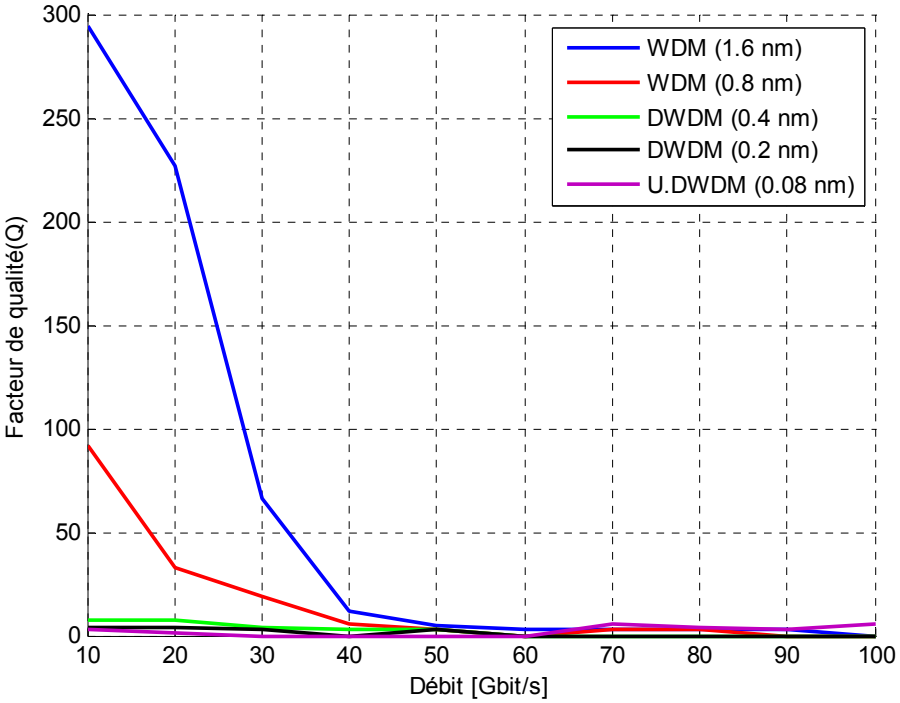


Figure 3.18 : Variation du facteur de qualité en fonction du débit.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

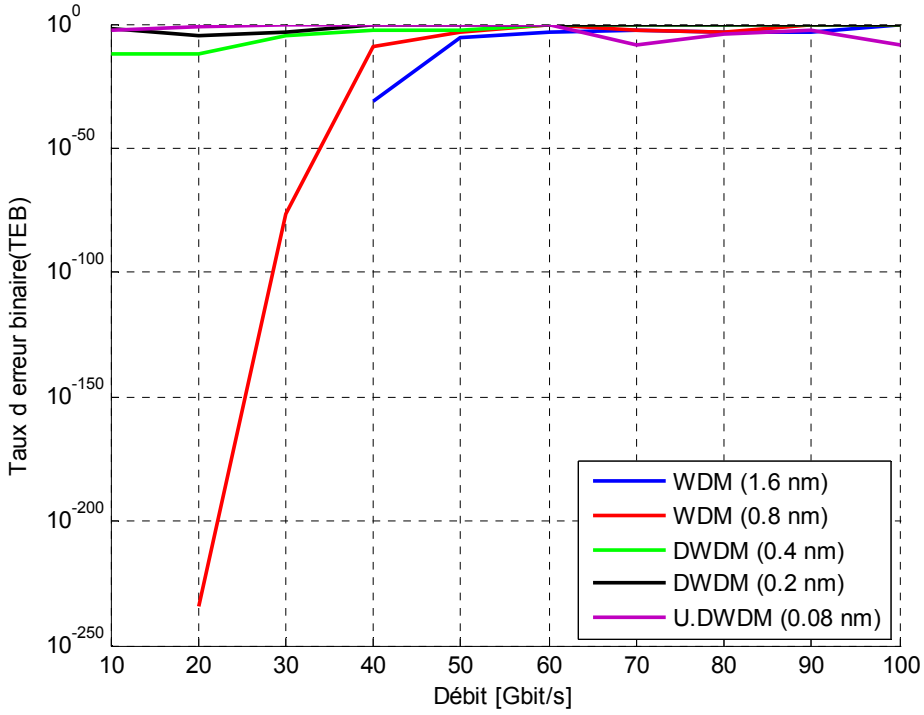
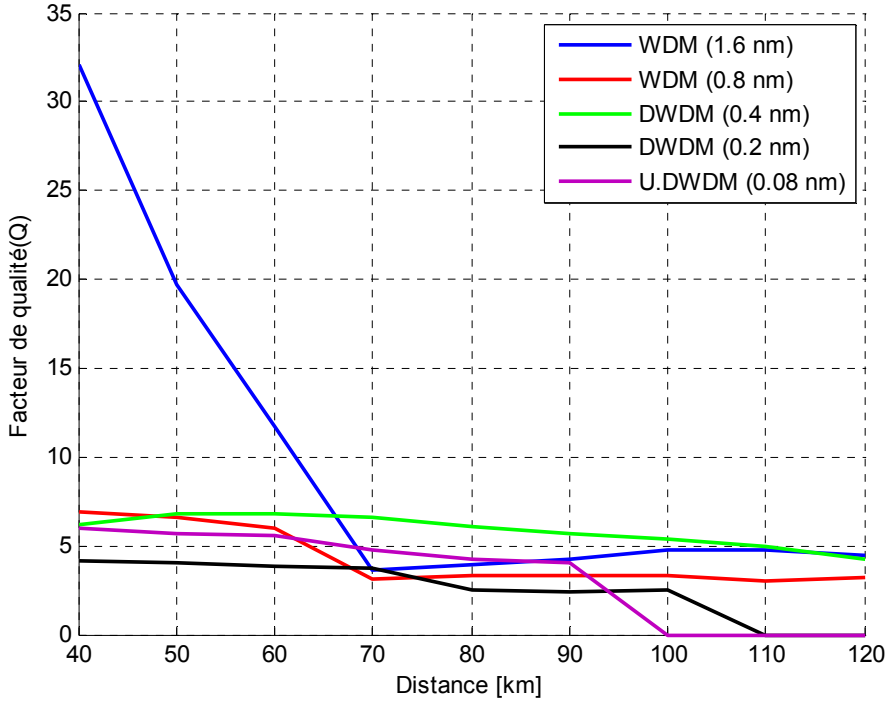


Figure 3.19 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du débit.

On remarque que le taux d'erreur binaire est presque nul et le facteur de qualité est maximal pour des débits inférieurs à 40 Gbit/s, pour 1.6 nm. Pour un espacement de 0.8 nm le TEB est de l'ordre de 10^{-10} pour 40Gbit, d'autre part les systèmes DWDM et l'UDWM donne une meilleure qualité de transmission à 40 Gbits.

Dans ce qui suit les mesures sont faites avec différentes longueurs de liaison (figure 3.20 et 3.21).



-

Figure 3.20 : Variation du facteur de qualité en fonction de la distance.

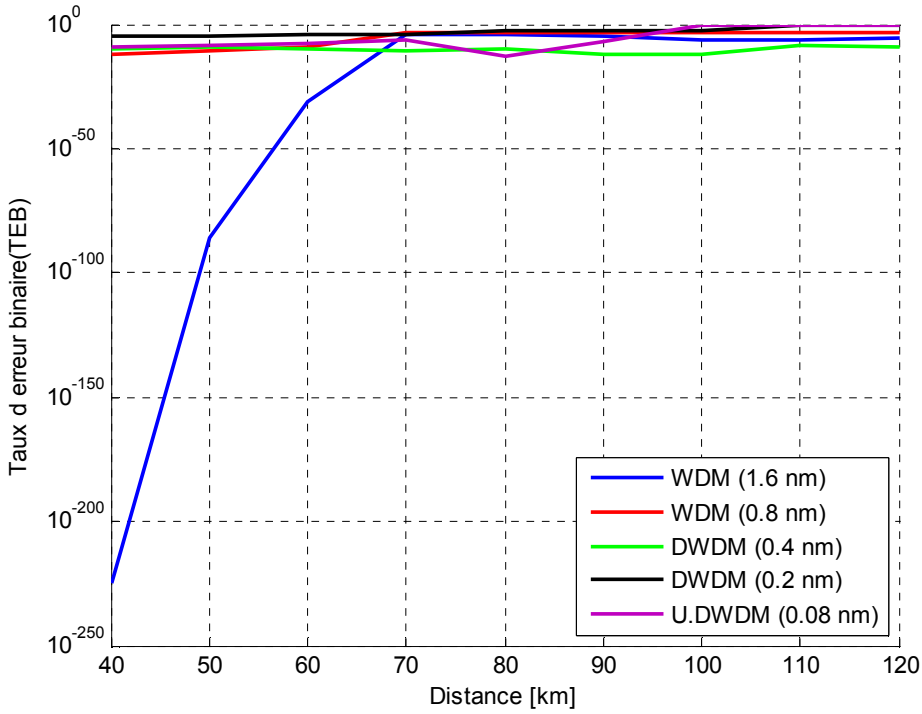


Figure 3.21 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la distance.

Nous remarquons que le taux d'erreur binaire augmente en fonction de la distance, il est idéal à la longueur 60 km pour le WDM. Pour les systèmes DWDM et l'UDWDM, le TEB est de 10^{-9} à la longueur 50 km.

Les tracés de la figure 3.22 et de la figure 3.23 nous donnent la variation de la qualité de transmission en fonction du nombre de tronçons pour 64 canaux.

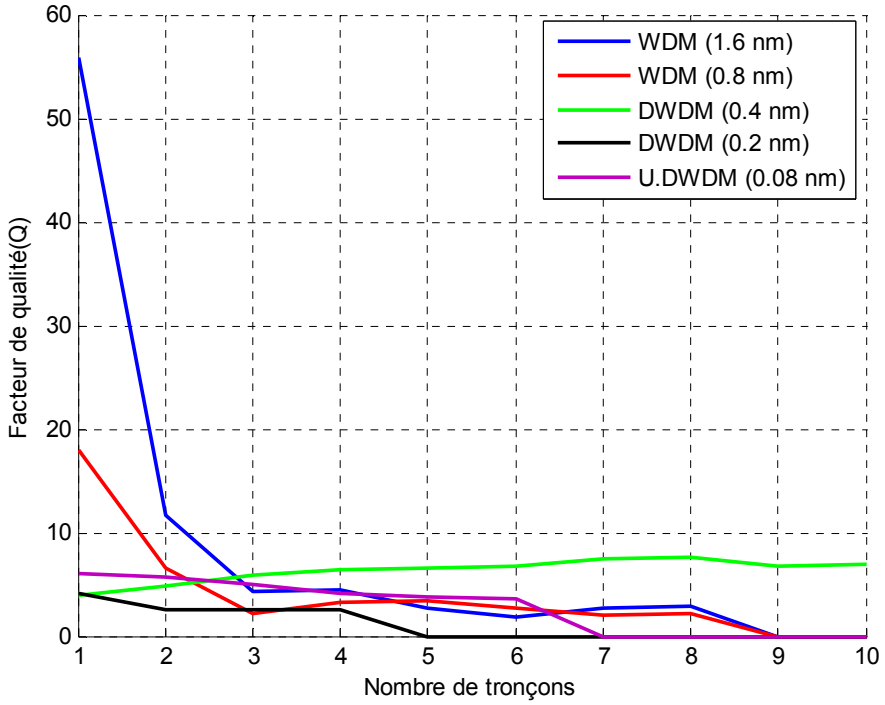


Figure 3.22 : Variation du facteur de qualité en fonction du nombre de tronçons.

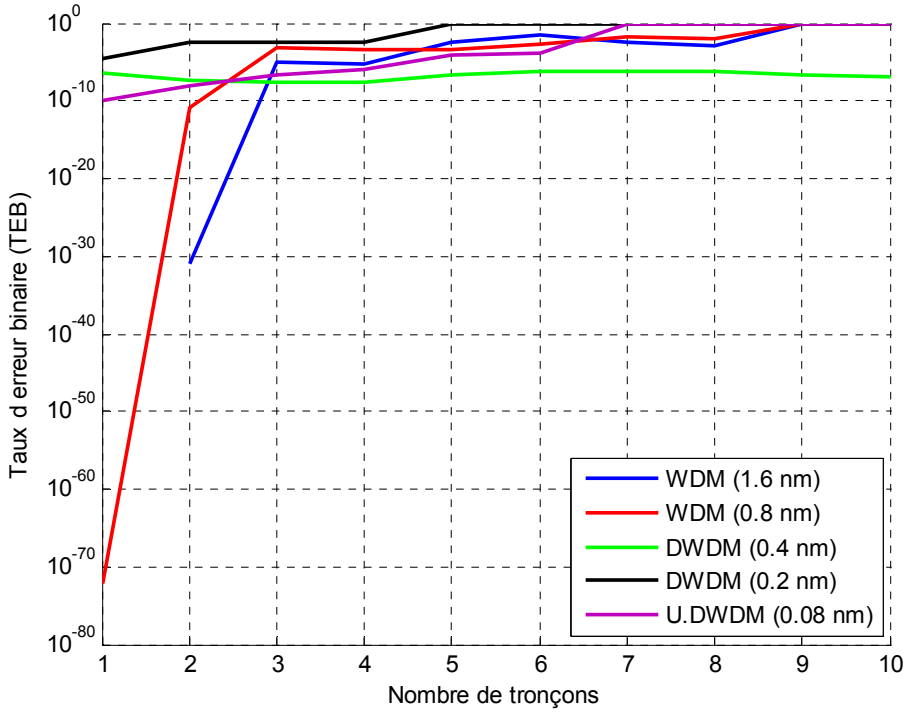


Figure 3.23 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du nombre de tronçons.

La qualité de transmission de la liaison se dégrade en fonction du nombre de tronçons, le meilleur TEB est obtenu pour un nombre de tronçons égale à 3, pour les systèmes DWDM.

3.9 Effet de variation du nombre de tronçons

La figure 3.24 montre la variation du facteur de qualité (Q) et du taux d'erreur binaire (TEB) en fonction du nombre de tronçons. Un tronçon est une chaine composée d'une fibre monomode SMF, suivi d'un premier amplificateur EDFA, d'une fibre compensatrice DCF et d'un second amplificateur EDFA.

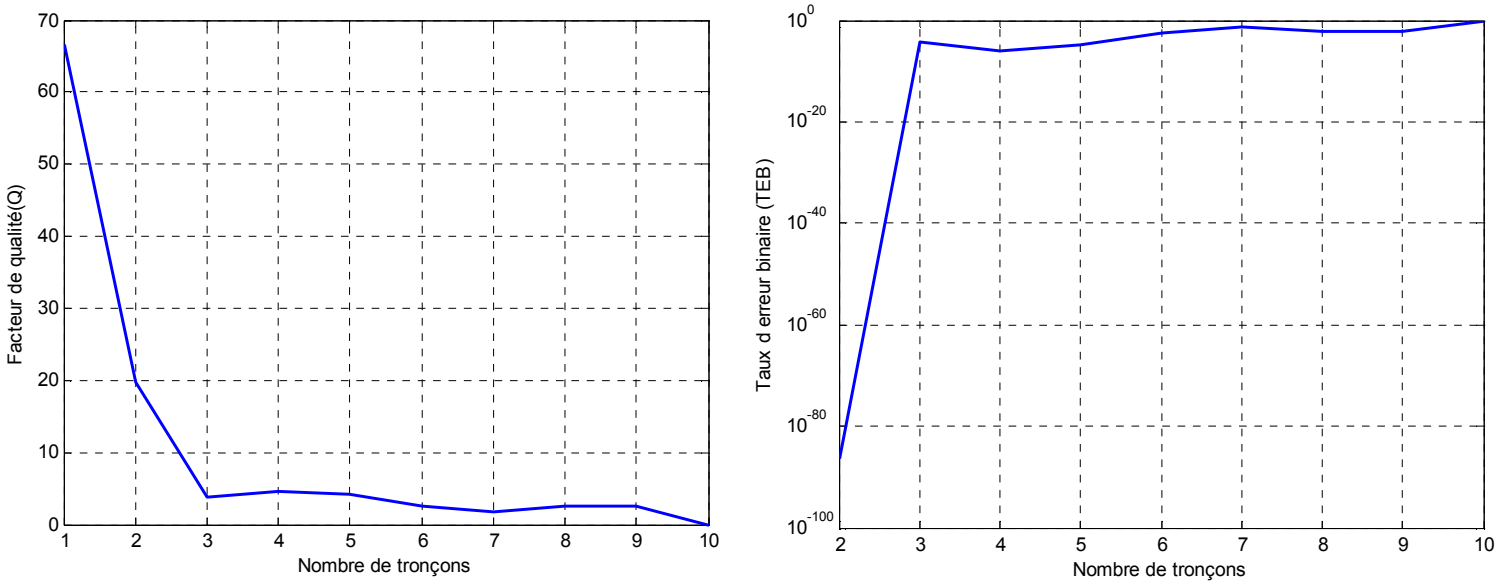


Figure 3.24 : Variation du facteur de qualité et du taux d'erreur binaire en fonction de nombre de tronçons.

Les résultats indiquent qu'on obtient un très bon facteur de qualité pour un nombre de tronçon de 2, mais la qualité de transmission se dégrade dès qu'on passe à 3 tronçons, avec un facteur de qualité de 3 et un taux d'erreur binaire de 10^{-5} c'est au-delà la limite des télécoms optiques (TEB = 10^{-9} et Q = 6.5).

3.10 Effet du débit et de la distance parcourue

Le but de toute liaison est d'atteindre une distance de transmission la plus longue possible avec le plus grand dédit, tout en conservant à la réception le signal émis. Dans ce qui suit nous allons étudier l'effet de ces deux paramètres sur une telle liaison.

Les résultats de simulation pour différentes longueurs de la fibre en km avec un débit de 40 Gb/s sont représentés sur la figure 3.25.

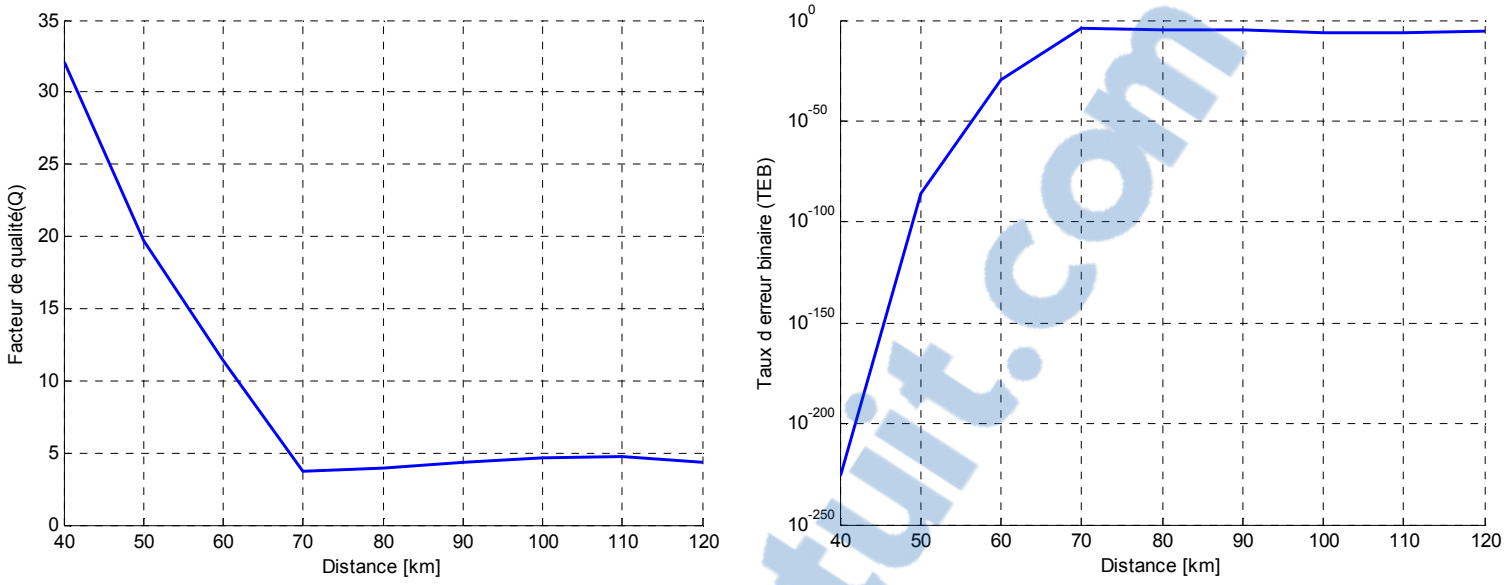


Figure 3. 25 : Variation du facteur de qualité et du taux d'erreur binaire en fonction de la distance.

On observe une forte décroissance du facteur de qualité en fonction de la distance, arrivé à 70 km, la qualité de transmission se stabilise. Pour ce qui est de la distance idéale, elle est de l'ordre de 60 km. Nous pouvons également noter que la distance totale de la liaison est égale à 144 km.

Les résultats de simulation pour différents débits se propageant sur une distance de60 Km, avec 2 tronçons sont représentés sur la figure 3.26.

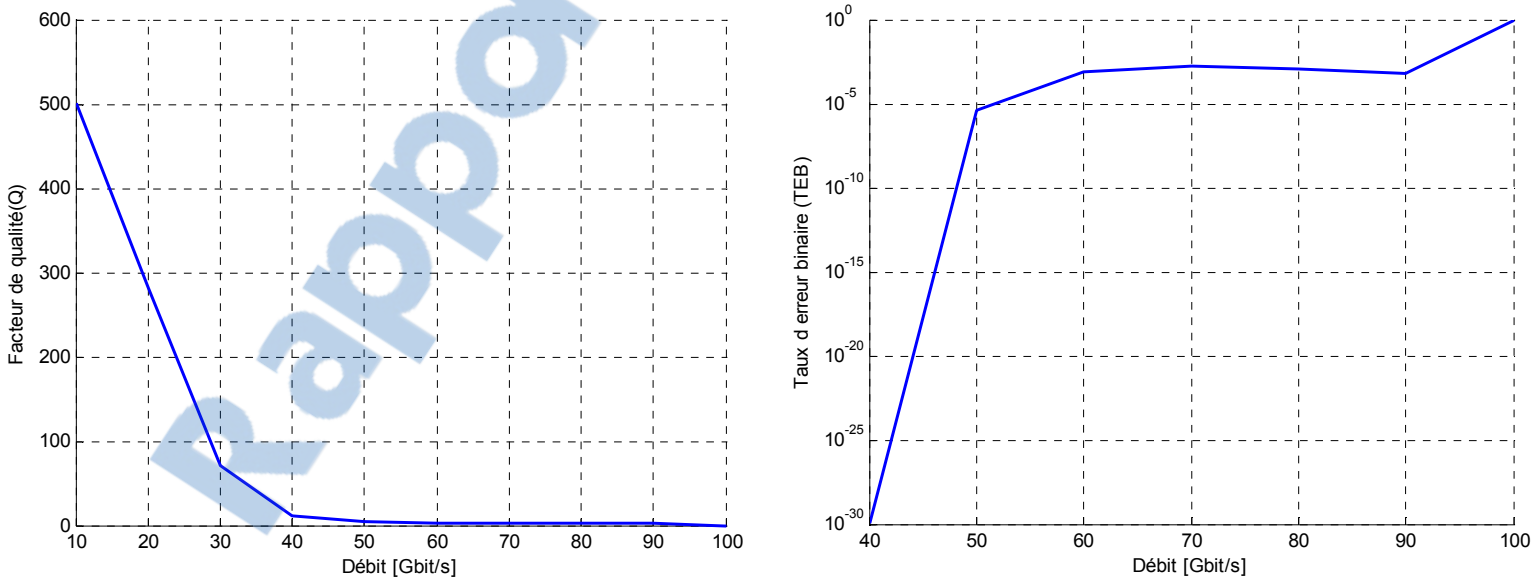


Figure 3.26: Variation du facteur de qualité et du taux d'erreur binaire en fonction de débit.

Rapport-Gratuit.com

D'après les résultats obtenus, nous remarquons de meilleures valeurs du facteur de qualité et du taux d'erreur binaire, de l'ordre de 10^{-30} pour un débit de 40 Gbps, quand on dépasse cette valeur, nous constatons une diminution du facteur de qualité.

En observant les courbes de la figure 3.25 et 3.26, on note que l'augmentation du débit ou de la longueur de fibre engendre une déformation du signal et une dégradation de la qualité de transmission causée par les différents effets linéaire et non linéaires. Et donc le facteur de qualité est d'autant plus petit que le débit et la longueur de la fibre sont plus grands.

Afin de déterminer la distance et le débit optimal nous allons passer au choix de la modulation.

Dans les études suivantes, nous avons fixé le nombre de canaux à 32, le nombre de tronçons à 2, la longueur de la liaison à 144 km, et le débit par canal de 40 Gbit/s.

3.11 Effet de la modulation sur la liaison WDM

Tout d'abord, nous allons décrire les deux types de modulation utilisés : modulation directe et externe.

3.11.1 Modulation directe

Un des principaux avantages de l'utilisation des lasers à semi-conducteur pour les systèmes de télécommunications par fibres optiques réside dans le fait qu'il est possible de les moduler facilement, la modulation du courant qui le traverse entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise. Cette technique est appelée modulation directe. Ainsi, il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser.

3.11.2 Modulation externe

Ce type de modulation consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu. Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du laser et non plus le courant d'alimentation à l'entrée du laser. Ainsi les défauts de la modulation directe qui incombent au laser ne seront plus présents sur le signal optique.

3.11 Format de modulation

Nous citons dans le paragraphe suivant les différents formats (RZ et NRZ) utilisés dans la simulation.

3.11.1 Format NRZ (No Return to-Zero)

C'est le format le plus simple et le plus intuitif qui existe. Un signal optique modulé en NRZ est la copie conforme du signal binaire électrique : un « 0 » est codé par un signal à faible puissance (idéalement nulle), et un « 1 » par un signal à forte puissance (figure 3.27).

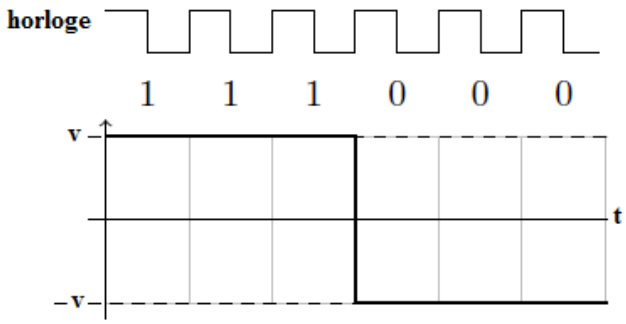


Figure 3.27: Format NRZ.

3.11.2 Format RZ (Return-to-Zero)

Le format RZ est un dérivé du format NRZ. Comme son nom l'indique, à chaque temps-bit, un retour à zéro systématique est opéré. Ainsi le symbole codant un « 0 » en RZ sera quasi-similaire à celui codant un « 0 » d'un format NRZ, c'est-à-dire un signal à faible puissance, mais le symbole codant un « 1 » en RZ sera une impulsion lumineuse de durée totale 1 temps-bit et de largeur à mi-hauteur dépendant de sa méthode de génération. Ainsi, une succession de « 1 » sera codée, en RZ, par une succession d'impulsions, et non par un signal continu comme en NRZ (figure 3.28).

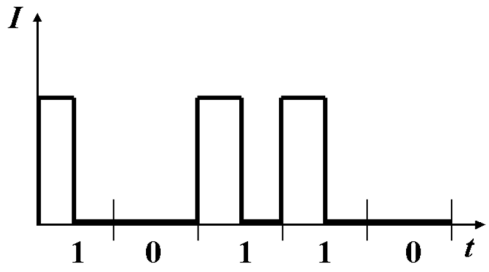


Figure 3.28 : Format RZ.

Les figures 3.29 et 3.30, illustrent une étude comparative entre les différents formats de codage, le format RZ, le format NRZ et le format sans code (OFF) en fonction de la puissance [dBm] avec une modulation externe.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

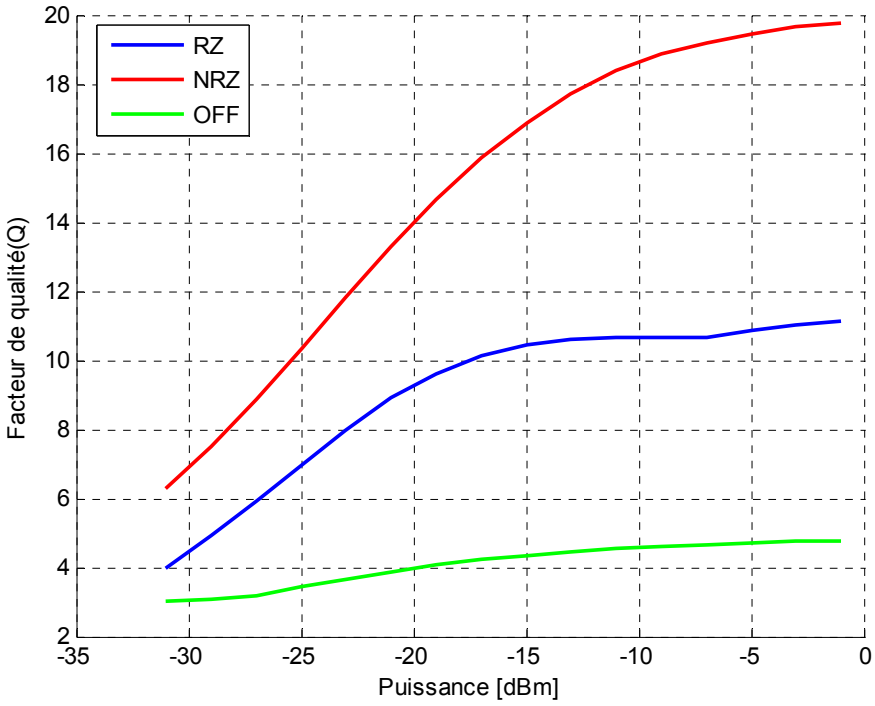


Figure 3.29 : Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance.

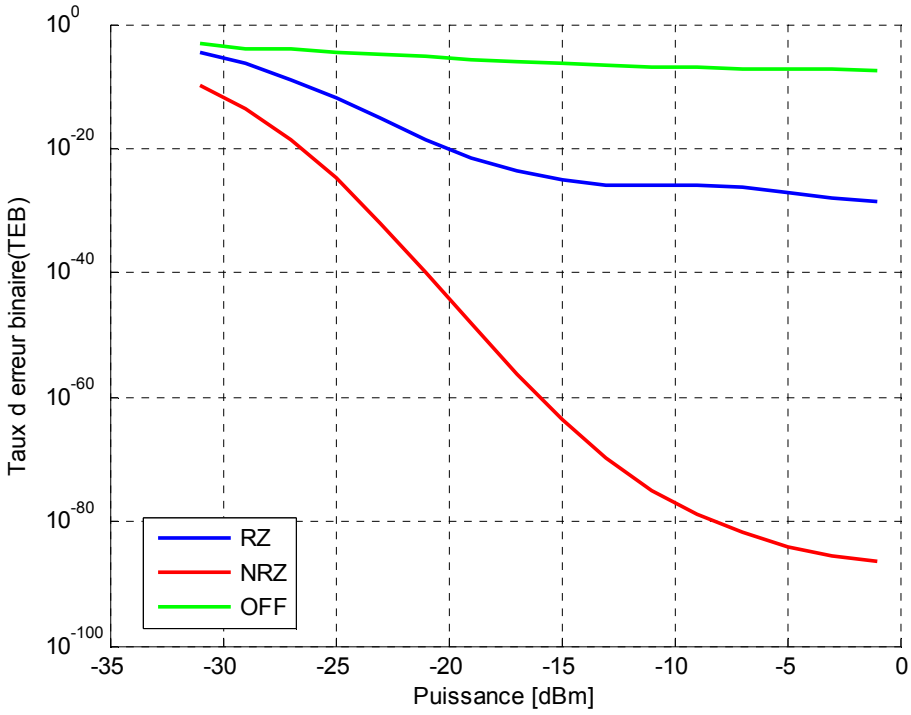


Figure 3.30 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance.

D'après ces résultats, nous constatons une augmentation du facteur de qualité pour les différents formats, nous remarquons aussi que le taux d'erreur binaire du signal NRZ décroit plus rapidement que celui des autres formats. Pour le format RZ nous obtenons un TEB de l'ordre de 10^{-9} à la puissance -27 dBm et un TEB de 10^{-10} pour le format NRZ à la puissance

-31 dBm, ce qui correspond à la puissance minimale avec la quelle on doit transmettre le signal.

Les figures 3.31 et 3.32, illustrent une étude comparative entre les différents formats de codage RZ, NRZ et code OFF en fonction de la puissance en dBm avec une modulation directe.

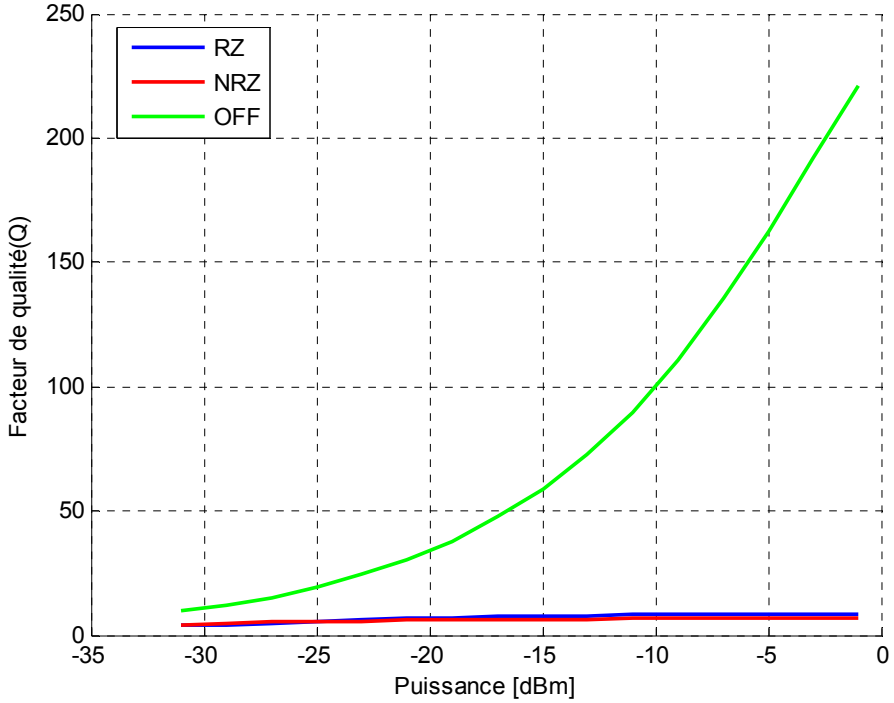


Figure 3.31 : Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance.

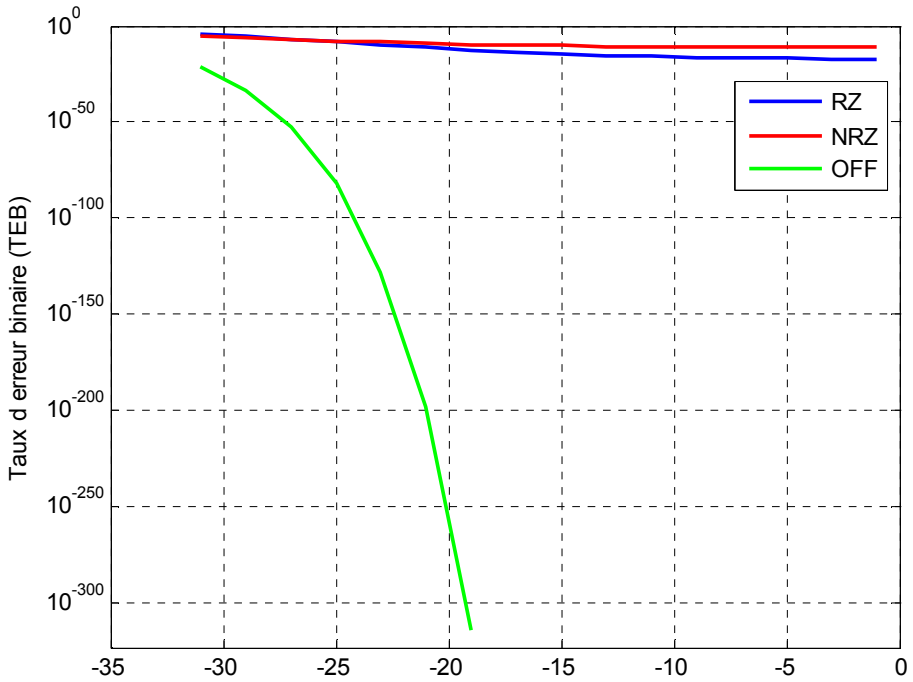


Figure 3.32 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance.

Les résultats obtenus indiquent une augmentation du facteur de qualité et de la puissance, nous constatons ainsi que le meilleur taux d'erreur binaire est celui du format sans code OFF qui décroit plus rapidement que celui des autres formats (RZ et NRZ), il atteint une valeur nulle (pas d'erreur) à la puissance -17 dBm.

Dans ce qui suit nous allons étudier l'effet du format du code sur les deux types de modulation (ME et MD).

Les courbes des figures 3.33 et 3.34, montrent l'allure de la modulation externe et directe pour le format RZ.

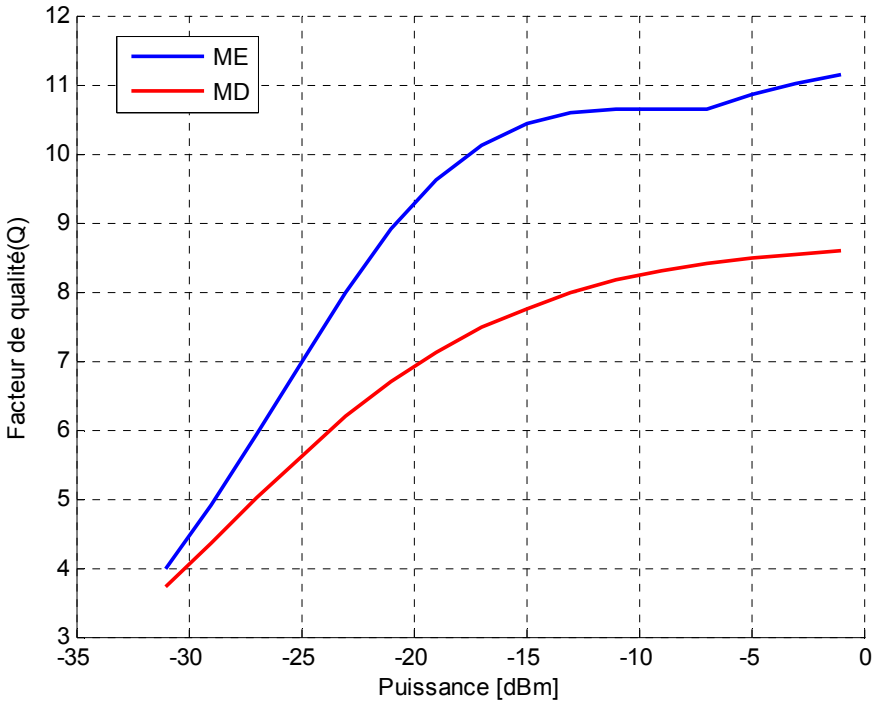


Figure 3.33 : Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance.

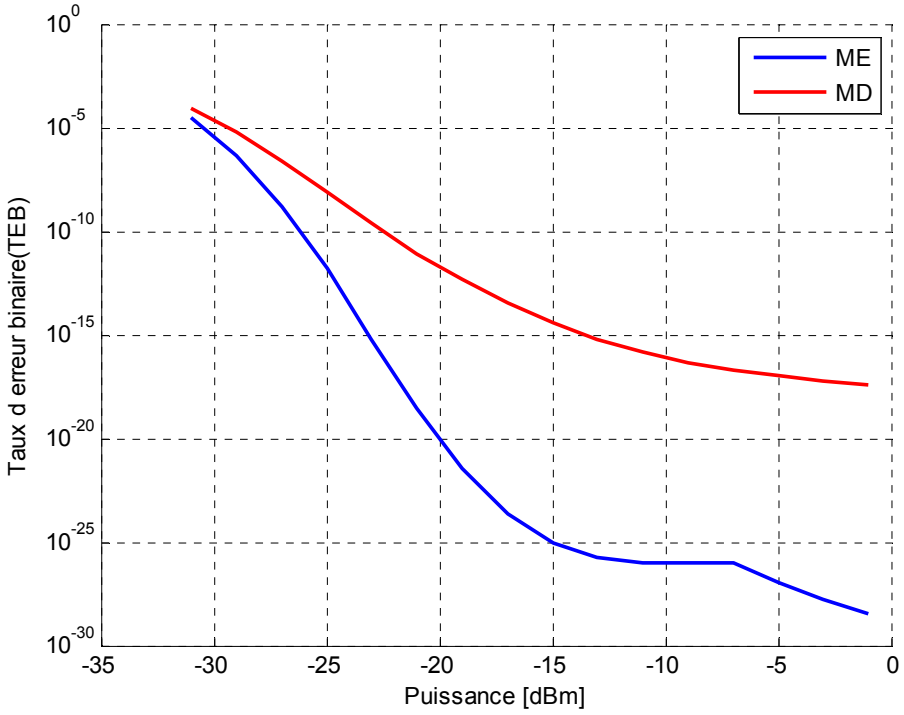


Figure 3.34 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance.

Le taux d'erreur binaire diminue en fonction de la puissance pour les deux types de modulation (ME et MD), cependant on s'aperçoit que le meilleur TEB est celui de la modulation externe pour le format RZ qui chute plus rapidement que celui de la modulation directe.

Les courbes des figures 3.35 et 3.36 montrent l'allure de la qualité de transmission pour la modulation externe et directe pour le format NRZ.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

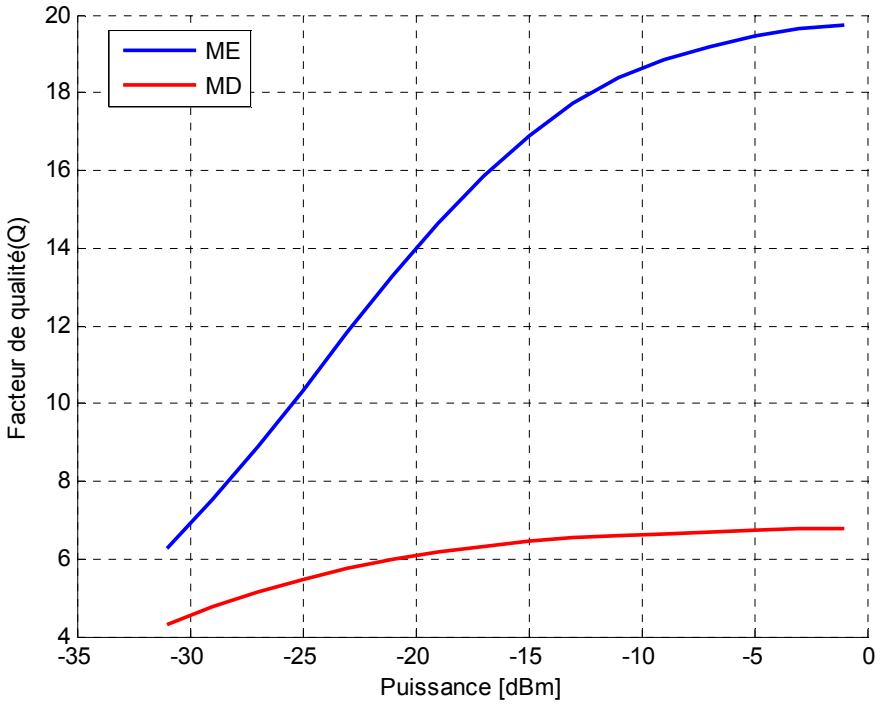


Figure 3.35 : Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance.

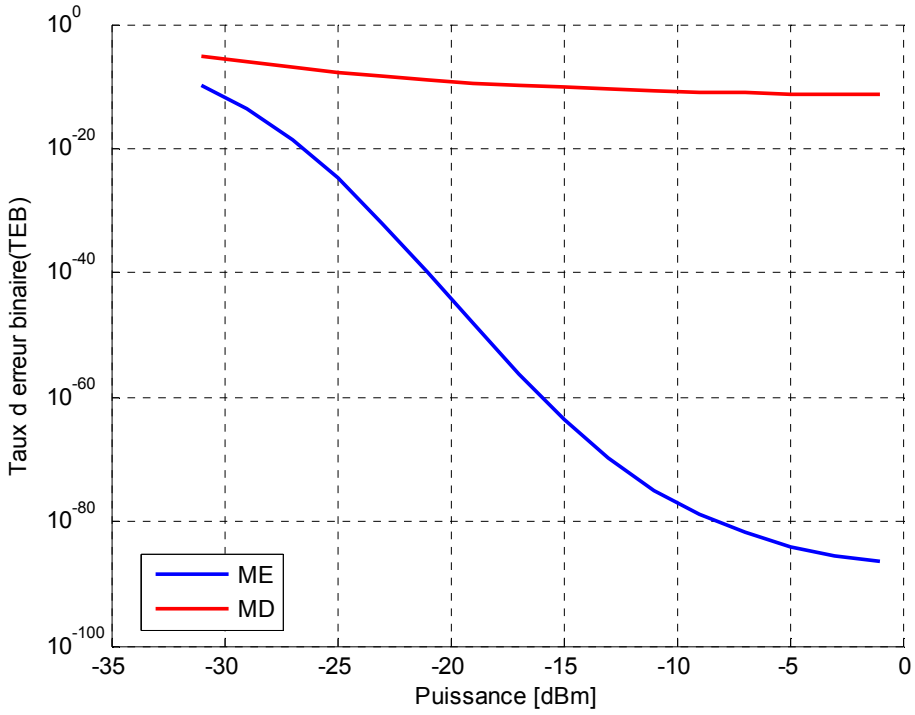


Figure 3.36 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance.

Ces résultats indiquent une forte augmentation du facteur de qualité en fonction de la puissance pour la modulation externe, le maximum est atteint à des puissances supérieures de 0 dBm. On remarque une grande différence entre la modulation externe et la modulation directe. Donc il faut noter que la modulation externe donne des meilleurs résultats par rapport à la modulation directe.

Les courbes de la figure 3.37 et 3.38 montrent l'allure de la modulation externe et directe pour le format sans code (OFF).

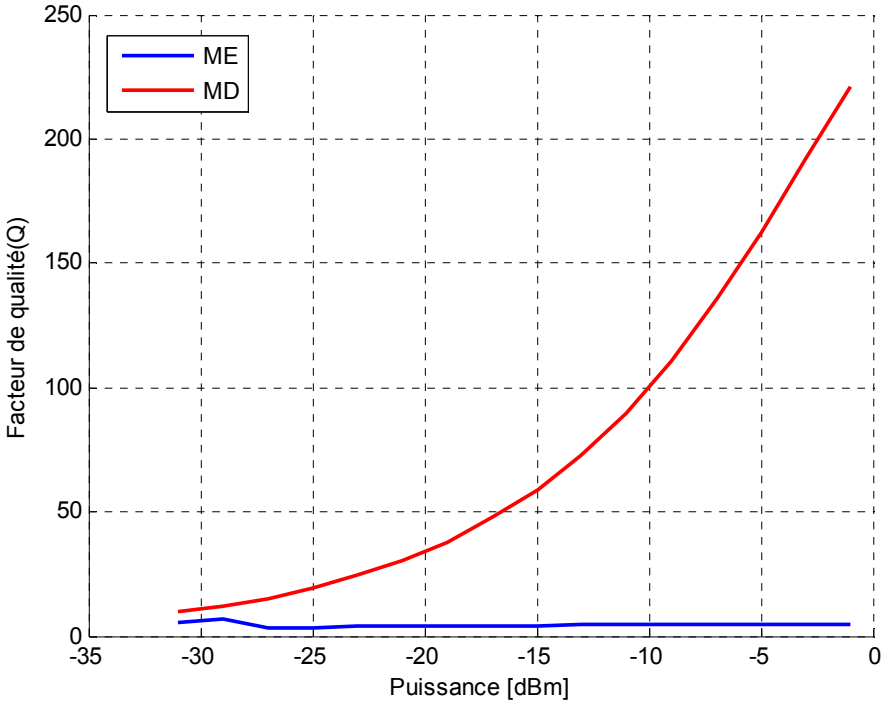


Figure 3.37 : Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance.

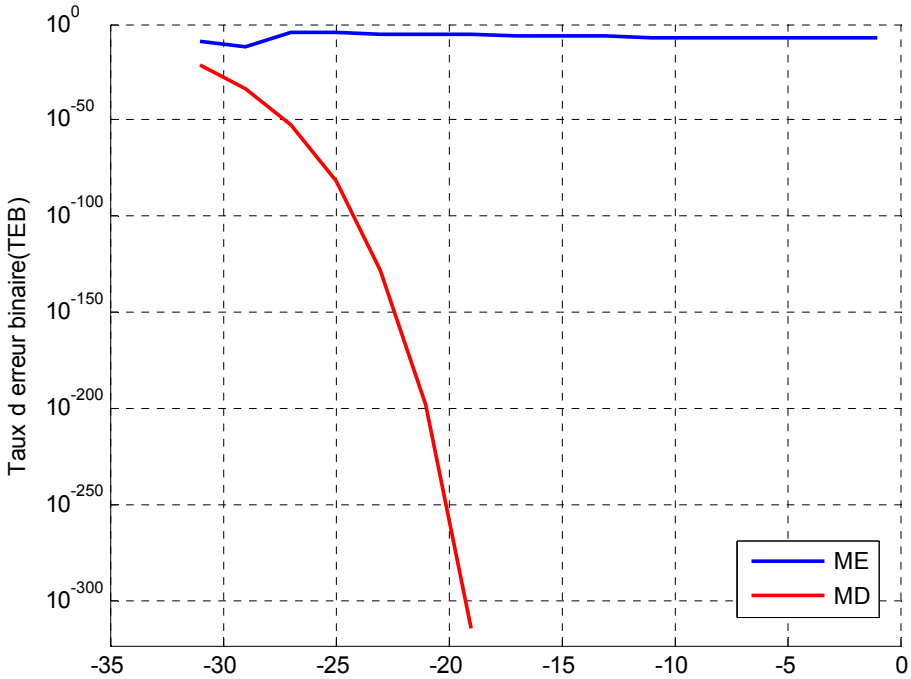


Figure 3.38: Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance.

Contrairement au format RZ et NRZ, les différentes études sur le signal OFF ont montrées que le facteur de qualité augmente plus rapidement pour la modulation directe, et il est presque constant pour la modulation externe, nous observons aussi pour la modulation

directe, que le TEB est toujours supérieur à 10^{-10}, ce qui nous amène à dire qu'il faut un codage avec la modulation directe.

3.12 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons effectué nos recherches sur la variation de la qualité de transmission en agissant sur différents paramètres tel que la longueur de la liaison, le débit par canal, le nombre de tronçons et la puissance.

Pour cela, nous avons défini les différents critères pour améliorer la qualité de transmission : le facteur de qualité et le taux d'erreur binaire.

Nous avons étudié ainsi l'effet de format de codage avec RZ, NRZ et le format sans code OFF sur la puissance pour deux types de modulation : directe et externe.

CONCLUSION GENERALE

Il n'y a pas si longtemps, lorsque les systèmes numériques les plus rapides transmettaient l'information à un débit de 270 Mbits/s, le câble coaxial était parfaitement à même de remplir son rôle de support de transmission. Mais avec l'apparition des nouveaux services liés au développement du multimédia, un besoin d'un débit de transmission d'informations plus élevé est apparu, et une alternative au câble coaxial était à trouver : pertes trop élevées, courtes distances de propagation, performances limitées. La fibre optique remplit très bien ce rôle de support de transmission. Son utilisation est désormais courante dans les réseaux de télécommunications. C'est pourquoi il nous a paru important de commencer ce mémoire par une description approfondie des différents composants présents dans les liaisons sur fibre optique ainsi que les diverses limitations rencontrées au cours de la propagation du signal. Cette description nous aide à la compréhension de la conception d'un système de transmission.

Au cours de ce mémoire, nous avons effectué nos simulations en étudiant l'effet de l'espacement en longueur d'onde sur la qualité de transmission, le procédé employé consiste à faire varier les paramètres de la fibre, le débit par canal, et le nombre de tronçons. Ceci nous a conduits à dire que le WDM (1.6 nm et 0.8 nm) donne un meilleur résultat par rapport à DWDM, U.DWM et le CWDM pour un débit de 10 Gbi/st, il nous donne également la longueur maximale par tronçon.

Ensuite, nous avons étudié l'effet du code générateur sur la qualité de transmission (RZ, NRZ et OFF), en utilisant les deux types de modulation directe et externe. La modulation directe, consiste à moduler l'amplitude du Laser directement. La seconde, un peu plus coûteuse est basée sur un module externe d'où sa nomination modulation externe.

Suite à ces simulations, nous avons conclu que l'augmentation du débit ou de la longueur de la fibre de transmission ont fait de la dispersion chromatique et de l'atténuation des problèmes majeurs. De ce fait, pour éliminer ces perturbations il est indispensable d'utiliser une fibre compensatrice de dispersion et un amplificateur d'atténuation EDFA dans le but d'améliorer la qualité de signal reçu.

Rapport-Gratuit.com

LISTE DES ACRONYMES

Acronymes (anglais)	Signification (anglais)	Signification (français)
LD	Laser Diode	Diode laser
LED	Light Emitting Diode	Diode électroluminescente
ON	Numerical Apture	Ouverture numérique
APD	Avalanche Photodiode	Photodiode avalanche
MZ	Mach-Zender	Mach-Zender
TDM	Time Division Multiplexing	Multiplexage à répartition temporelle
OTDM	Optical Time Division Multiplexing	Multiplexage optique à répartition temporelle
ETDM	Electronic Time Division Multiplexing	Multiplexage électronique à répartition temporelle
FDM	Frequency Division Multiplexing	Multiplexage à répartition fréquentielle
CDM	Code Division Multiplexing	Multiplexage à répartition de code
OCDM	Optical Code Division Multiplexing	Multiplexage optique à répartition de code
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexage à répartition en longueur d'onde
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Multiplexage dense à répartition en longueur d'onde
U.DWDM	Ultra- Dense Wavelength Division Multiplexing	Ultra-dense multiplexage à répartition en longueur d'onde

CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing	Etroit multiplexage en longueur d'onde
WWDM	Wide Wavelength Division Multiplexing	Large multiplexage en longueur d'onde
SOA	Semiconductor Optical Amplifier	Amplificateur optique à semi-conducteur
EDFA	Erbium DopedFiber Amplifier	Amplificateur optique à fibre dopée à l'Erbium
DCF	Dispersion Compensation Fiber	Fibre de compensation de dispersion
WR-OXC	Wavelength Routing Optical Cross-Connect	Brasseur optique
OADM	Optical Add Drop Multiplexing	Multiplexeur d'insertion/extraction optique
RZ	Return to Zero	Retour à zéro
NRZ	No Return to Zero	Non-retour à zéro
SMF	Single Mode Fiber	Fibre monomode
BER	Bit Rate Error	Taux d'erreur binaire
Q	Q Factor	Facteur de qualité

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

BIBLIOGRAPHIE

[1] LAURENT. J; 2004 - « Communication Optique à très haut débits ». Examen Probatoire. Département STIC. Centre de Paris.

[2] COLOMBIER. F ; PUGNOUD. C ; 2005 – « Réseaux et routage optique ».

[3] HINCELIN.G ; « Laser et diode laser » Optoélectronique.

[4] GIANANDRA. Q ; 2004 - « Contribution à l'étude de liaisons optiques analogiques pour la distribution de signaux de référence en gamme RF et Micro-ondes» Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse.

[5] ZOUINE. Y ; 2005 - « Contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant technique CDMA » Thèse de doctorat de l'Université de LIMOGES.

[6] BRAHIMI ; H, 2010 - « Etude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences Modélisation, caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence» Microondes, Électromagnétisme et Optoélectronique. Thèse de doctorat de l'université de Paul Sabatier. Toulouse III.

[7] DELLIER.S ; 2005 - « Contributions à la conception des circuits micro-ondes» Thèse de doctorat de l'Université de LIMOGES.

[8] MASSOUBRE.D ; 2006 - « Composant passif à absorbants saturables sur InP pour la régénération tout-optique à très hauts-débits » Thèse de doctorat de l'Université Paris XI, UFR scientifique d'Orsay.

[9] RADOUANI.R ; 2006 - « Dérive dans les modulateurs électro-optiques Mach-Zehnder. Analyse physique et résolution. » Photonique et Systèmes. Thèse de doctorat de l'université de Paul Verlaine – Metz et Supélec.

[10] MERZOUK. K; 2008 - « Etude d'un système bas cout de transmission optique par multiplexage temporel ». Thèse de doctorat Optique, Optoélectronique et Microondes. Institut Polytechnique de Grenoble.

[11] REGIS. A ; VENOT.R « Les techniques de transmission optiques ».

[12] VERNEUIL. J – L ; 2003 - « Simulation de system par fibre optique à 40Gbit/s » Telecom. Hautes Fréquences et optiques. Thèse de doctorat de l'université de Limoges.

[13] CALVEZ. S ; 2002 - « Laser à fibre pour les télécommunications multiplexées en longueur d'onde : étude de l'accordabilité en longueur d'onde et de la génération de trains d'impulsions multi-longueur d'onde par voie électro-optique » Thèse de doctorat de l'université de Franche-Comté.

[14] CORDETTE. S ; 2010 - « Continuum de fréquences optiques pour application OCDMA » Electronique et Communications. Thèse de doctorat. Ecole Doctorale d'Informatique, Télécommunications et Electronique de paris.

[15] MEUNIER. J - P; 2003 – « Télécoms Optique » : Composants à fibres systèmes de transmission. Ed. Hermes. Paris.

[16] SEGURA. D ; LABAUD. A ; 2007 - « Réseaux optiques et routage optique ».

[17] GEROME. F ; 2005 - «Conception et caractérisation de fibres compensatrices de dispersion chromatique pour application aux liaisons optiques WDM » Thèse de doctorat de l'Université de LIMOGES.

[18] BEAUQUIER, B; 2000 – « Communication dans les réseaux optiques par multiplexage en longueur d'onde » Es Sc. Informatique. Thèse de doctorat de NICE - SOPHIA ANTIPOLIS.

[19] CHLUDA. C ; 2006 - « Bruit basse et moyenne fréquence des amplificateurs optiques distribués à effet Raman » Thèse de doctorat de l'Université Montpellier II.

[20] FRIGNAC. Y ; 2003 – « Contribution a 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. ».

[21] MECHIN. D ; 2001 « Etude et réalisation de multiplexeurs insertion-extraction à réseaux de Bragg » Optique, Optoélectronique, Microondes. Thèse de doctorat de l'Université Jean Monnet de Saint-Étienne.