

Université Abou Bekr Belkaid
Tlemcen Algérie



جامعة أبي بكر بلقايد

تلمسان الجزائر

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE (GEE)



Mémoire



Pour l'obtention du diplôme de

MASTER en Télécommunications
Option : Systèmes et Réseaux de Télécommunication (SRT)

Présenté par

KIMBIRI Seydou & KPEMISSI EYANA Piham

THEME

Etude d'une liaison optique multiplexée RZ/NRZ 16 x 40 Gbit/s

Soutenu le 01 Juillet 2012 devant un jury composé de:

Mr B. BENADDA	Président	M. C. à l'université de Tlemcen
Mr S. M. BAHRI	Examineur	M. C. à l'université de Tlemcen
Mr S. A. DJENNAS	Examineur	M. C. à l'université de Tlemcen
Mr. A. R. BORSALI	Encadreur	M. C. à l'université de Tlemcen

Année Universitaire 2011/2012

DEDICACES

Je dédie ce travail à mes chers parents ERNEST et CONSTANTINE qui ont toujours su m'encourager, me conseiller, m'aider et me soutenir. Je voudrais vous dire merci d'avoir cru en moi et d'avoir toujours été à mes côtés, sans vous je n'aurais jamais atteint ce jour.

Je dédie aussi ce travail à :

À ma petite sœur MIREILLE, mon frère CORNEILLE, sans oublier ma très chère MARLÈNE-AUDREY, ainsi qu'à la mémoire de mes chers regrettés grands-parents MAMY et RICHARD.

KPEMISSI EYANA Piham

Je dédie ce modeste travail à mes parents, à la famille Sangaré, qui m'ont tout donnée dans la mesure du possible.

Je le dédie aussi à la mémoire de mes deux grands-pères N'GOLO Sangaré et BABA Kimbiri, ainsi qu'à ma petite sœur Djélika Dembélé, que Dieu, le Tout Puissant ait pitié de leur âme et que la terre leur soit légère.

KIMBIRI Seydou

Nous dédions aussi ce travail à la mémoire des personnes décédées suite au drame survenu dans la cité universitaire de BEKHTI à Tlemcen.

REMERCIEMENTS

Nous tenons particulièrement à remercier le Tout Miséricordieux, le Tout Puissant, le Tout Clément qui a récompensé nos prières ; ce mémoire n'aurait jamais été réalisé sans Sa Bénédiction.

Nous remercions :

- ✓ *notre encadreur, Monsieur A. R. BORSALI, Maître de Conférences à l'université de Tlemcen, qui a suivi de très près notre mémoire afin qu'il soit réalisé à terme ;*
- ✓ *Monsieur B. BENADDA, Maître de Conférences à l'université de Tlemcen, d'avoir l'amabilité de présider ce jury.*
- ✓ *Mr S. M. BAHRI et Mr S. A. DJENNAS, Maîtres de Conférences à l'université de Tlemcen, pour avoir acceptés d'examiner notre travail ;*
- ✓ *Mr Traoré Brama pour ses conseils précieux ;*
- ✓ *bien sûr nos parents, les familles SANGARE, KIMBIRI, KPEMISSI, BODJONA et TCHA pour l'aide et l'affection qu'elles n'ont jamais cessées de nous apporter ;*
- ✓ *Tous nos professeurs de l'université Abou Bekr BELKAÏD ;*
- ✓ *Les membres de la SOTELMA-MALITEL, Mr Kouyaté pour tout, Mr Dembélé Issa, du centre de transmission FH/FO, qui m'ont préparé sur les notions de la transmission par fibres optiques ;*
- ✓ *Tous nos amis et collègues ;*

Nous tenons aussi à remercier les coopérations Algérie-Mali et Algérie-Togo, ainsi que tous ceux que nous avons oublié de mentionner et qui nous ont aidé, tant sur le plan matériel que sur le plan moral.

KPEMISSI EYANA Piham

&

KIMBIRI Seydou

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	I
DEDICACES.....	II
SOMMAIRE.....	III
TABLES DES ACRONYMES.....	V
TABLES DES FIGURES.....	VII

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les systèmes de transmission par fibre optique

I.1 Introduction.....	4
I.2 Historique.....	4
I.3 Structure de la fibre optique.....	6
I.4 Principe de la fibre optique.....	6
I.5 Types de fibre optique.....	7
I.5.1 Fibres multimodes (MMF).....	7
I.5.1.1 Fibre à saut d'indice.....	7
I.5.1.2 Fibre à gradient d'indice.....	8
I.5.2 Fibres monomodes (SMF).....	8
I.6 Caractéristiques d'une fibre optique.....	9
I.6.1 Atténuation.....	9
I.6.2 Dispersions.....	10
I.6.3 Effets non linéaires.....	10
I.7 Compensation de la dispersion chromatique avec la DCF.....	11
I.8 Liaison optique point à point.....	12
I.8.1 Emetteur optique.....	12
I.8.2 Récepteur optique.....	13
I.9 Amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA).....	15
I.10 Modulations.....	16
I.10.1 Modulation directe.....	16
I.10.2 Modulation externe.....	17
I.11 Formats de modulations.....	18
I.11.1 Format RZ (Return-to-Zero).....	19
I.11.2 Format NRZ (Non-Return-to-Zero).....	19
I.11.3 Format Manchester.....	20
I.12 Conclusion.....	20

Chapitre II : Réseaux de télécommunication optiques

II.1 Introduction.....	22
II.2 Aperçu historique des télécommunications optiques.....	22
II.3. Caractéristiques et application des télécommunications optiques.....	23
II.4 Réseaux optiques.....	24
II.4.1 Réseaux longue distance (WAN).....	25
II.4.2 Réseaux métropolitains (MAN).....	25
II.4.3 Réseaux locaux (LAN).....	26
II.5 Principe des transmissions.....	26
II.6 Augmentation de la capacité d'une liaison.....	27
II.6.1 Multiplexage/ démultiplexage.....	27

II.6.2	Différents types de multiplexages	28
II.6.2.1	Multiplexage temporel (TDM).....	28
II.6.2.2	Multiplexage en longueur d'onde (WDM).....	29
II.7	Commutation optique.....	31
II.8	Commutateurs optiques.....	32
II.8.1	Répartiteur (F-OXC).....	32
II.8.2	Multiplexeur à insertion/extraction (MIE).....	33
II.8.3	Brasseur optique.....	35
II.9	Convertisseurs optiques.....	36
II.9.1	Conversion optoélectronique.....	36
II.9.2	Conversion tout-optique.....	37
II.10	Conclusion.....	37

Chapitre III : Etude de la liaison optique WDM 16 x 40 Gb/s

III.1	Introduction.....	39
III.2	Présentation du Logiciel « OptiSystem »	39
III.3	Présentation des composants utilisés et leurs caractéristiques.....	41
III.3.1	Partie émission	42
III.3.2	Composants entre les parties émission et réception	45
III.3.3	Partie réception	46
III.4	Résultats de simulation	48
III.4.1	Qualité de transmission d'une liaison optique	50
III.4.1.1	Effet de variation de la longueur de la fibre SMF dans un tronçon	51
III.4.1.2	Effet de variation du nombre de tronçons	54
III.4.1.3	Qualité de transmission des différents canaux	57
III.4.1.4	Effet de variation du débit par canal	59
III.5	Conclusion	62
Conclusion Générale et perspectives.....		65
Références Bibliographiques		68

TABLE DES ACRONYMES

Acronymes	Signification anglo-saxone	Signification française
ASK	Amplitude Shift Keying	Modulation d'amplitude
BER	Bit error rate	Taux d'Erreur Binaire
CW-Laser	Continuous Wave Laser	Laser en Régime Continu
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing	Gros multiplexage en longueur d'onde
DCF	dispersion compensating fiber	fibre compensatrice
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Multiplexage dense en longueurs d'ondes
EDFA	Erbium doped Fibre Amplifier	l'Amplificateur dopé à l'erbium
F-OXC	Fiber Optical Cross-Connect	Répartiteur
FDM	Frequency Division Multiplexing	Multiplexage par répartition de fréquence
FTTB	Fiber To The Building	Fibre jusqu'au pied d'immeuble
FTTC	Fiber To The Curb	Fibre jusqu'au trottoir
FTTH	Fiber To The Home	Fibre à domicile
FTTO	Fiber To The Office	Fibre jusqu'au bureau
LAN	<i>Local Area Network</i>	Réseau local
LD/DL	Laser Diode	Diodes LASER
LED/DEL	Light Emitting Diode	Diodes électroluminescentes
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>	Réseau métropolitain
MIE (OADM)	Optical Add/Drop Multiplexer	Multiplexeur à insertion/extraction
MMF	MultiMode Fiber	Fibre multimode
MZI	Mach-Zehnder Interferometer	Interféromètre de Mach-Zehnder
NRZ	Non-Return-to-Zero	Non-retour à zéro
RZ	Return-to-Zero	Retour à zero
PRBS	Pseudo-Random Binary Sequence	Séquence pseudo aléatoire
Q	Q factor	Facteur de Qualité
SMF	Single Mode Fiber	Fibre monomode
TDM	Time Division Multiplexing	Multiplexage temporel
U-DWDM	Ultra-Dense Wavelength Division	Ultra-dense multiplexage en longueur

	Multiplexing	d'onde
WAN	Wide area network	Réseau étendu
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexage en longueur d'onde
WR-OXC	Wavelength Routing Optical Cross-Connect	Brasseur optique
WWDM	Wide Wavelength Division Multiplexing	Large multiplexage en longueur d'onde

TABLE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : Structure de la Fibre Optique	6
Figure I.2 : Fibre à saut d'indice.....	8
Figure I.3 : Fibre à gradient d'indice.....	8
Figure I.4 : Fibre monomode.....	9
Figure I.5 : Effet d'Atténuation.....	9
Figure I.6 : Effet de la Dispersion Chromatique.....	10
Figure I.7 : Système de Transmission Optique.....	12
Figure I.8 : Symbol de la Source Optique.....	12
Figure I.9 : Symbol du Photodétecteur.....	14
Figure I.10 : Photodiode PIN.....	14
Figure I.11 : schéma du principe d'un amplificateur optique à fibre dopé à l'erbium.....	16
Figure I.12 : Synoptique d'une modulation directe.....	17
Figure I.13 : Synoptique d'une modulation externe.....	18
Figure I.14 : Format RZ.....	19
Figure I.15 : Format NRZ.....	19
Figure I.16 : Format Manchester.....	20

Chapitre II

Figure II.1 : Multiplexage/démultiplexage.....	28
Figure II.2 : Principe d'un multiplexage temporel (TDM).....	29
Figure II.3 : Principe d'un multiplexage en longueurs d'onde (WDM).....	30
Figure II.4 : Répartiteur (F-OXC).....	33
Figure II.5 : Multiplexeur à insertion/extraction(MIE).....	34
Figure II.6 : Répartiteur avec MIE.....	34
Figure II.7 : Brasseur Reconfigurable (WR-OXC).....	35
Figure II.8 : Convertisseur de longueur d'onde optoélectronique	36

Chapitre III

Figure III.1 : Les sous fenêtres dans Optisystem.....	40
Figure III.2 : Les paramètres de la fibre monomode utilisée.....	41
Figure III.3 : Liaison optique point à point.....	41

Figure III.4 : Composants dans la partie émission.....	42
Figure III.5 : Modulateur externe.....	43
Figure III.6 : Format NRZ.....	44
Figure III.7 : Format RZ.....	44
Figure III.8 : Schéma d'un interféromètre de Mach-Zehnder.....	45
Figure III.9 : Composants dans la partie réception.....	46
Figure III.10 : Illustration des réponses des filtres.....	47
Figure III.11 : forme de l'onde résultante.....	48
Figure III.12 : Schéma de la liaison optique.....	49
Figure III.13 : Etude comparative des formats NRZ et RZ sur Q en fonction de L_t	52
Figure III.14 : Etude comparative des formats NRZ et RZ sur le BER en fonction de L_t	53
Figure III.15 : Diagramme de l'œil du 1 ^{er} canal, format RZ.....	54
Figure III.16 : Diagramme de l'œil du 1 ^{er} canal, format NRZ.....	54
Figure III.17 : Etude comparative des formats NRZ et RZ sur Q en fonction de N_t	55
Figure III.18 : Etude comparative des formats NRZ et RZ sur le BER en fonction de N_t	55
Figure III.19 : Diagramme de l'œil du 1 ^{er} canal, format RZ.....	56
Figure III.20 : Diagramme de l'œil du 1 ^{er} canal, format NRZ.....	56
Figure III.21 : Etude comparative des formats NRZ et RZ sur Q par canal.....	57
Figure III.22 : Etude comparative des formats NRZ et RZ sur le BER par Canal.....	58
Figure III.23 : Diagramme de l'œil du 1 ^{er} canal, format RZ.....	58
Figure III.24 : Diagramme de l'œil du 1 ^{er} canal, format NRZ.....	59
Figure III.25 : Etude comparative des formats NRZ et RZ sur Q en fonction du débit.....	60
Figure III.26 : Etude comparative des formats NRZ et RZ sur le BER en fonction du débit.....	61
Figure III.27 : Diagramme de l'œil du 1 ^{er} canal, format RZ.....	62
Figure III.28 : Diagramme de l'œil du 1 ^{er} canal, format NRZ.....	62

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Les premières liaisons servant à communiquer entre les continents furent les câbles télégraphiques, installés sous la mer depuis l'époque de la guerre de Sécession. Les câbles coaxiaux leurs ont succédé pour acheminer les conversations téléphoniques. Le premier câble coaxial traversant l'Atlantique fut posé en 1955 et correspondait à 48 lignes téléphoniques [1].

La fibre optique s'est, dans une première phase (1984 à 2000), limitée à l'interconnexion des centraux téléphoniques, ces derniers nécessitant de forts débits [2]. Cependant, avec la baisse des coûts entraînée par sa fabrication en masse et les besoins croissants des particuliers en très haut débit, on envisagea depuis 2005 son arrivée même chez les particuliers : FTTH (Fiber To The Home), FTTB (Fiber To The Building), FTTC (Fiber To The Curb), etc. [3].

La course vers les hauts débits a également bénéficié du développement des techniques optiques de multiplexage et de commutation. Le multiplexage consiste à transporter sur un même support physique plusieurs signaux [4]; la commutation quant à elle, désigne une opération de routage au niveau du réseau global qui permet d'acheminer les signaux d'un émetteur vers un destinataire.

Dans les générations de câbles optiques, l'accroissement du débit est assuré par la technique de multiplexage en longueur d'onde [5], appelé « Wavelength Division Multiplexing » (WDM) [6]. Celui-ci consiste à envoyer plusieurs signaux de longueurs d'onde différentes simultanément dans la même fibre optique. Le Multiplexage et le démultiplexage en longueur d'onde [7] sont effectués par des composants optiques passifs, de façon similaire à la décomposition et recombinaison des couleurs de l'arc-en-ciel par un prisme. La technique WDM ouvre également des perspectives de routage optique dans les réseaux. Les communications peuvent être ainsi aiguillées dans telle ou telle direction suivant leur longueur d'onde.

Les fibres optiques présentent effectivement des débits élevés, mais lorsque ceux-ci sont supérieurs à 10 Gbits/s sur des milliers de kilomètres, d'autres difficultés majeures d'ordre physique se posent, en particulier la dispersion chromatique et les effets non-linéaires [8]. Les fibres optiques présentent aussi des pertes moindres que les câbles en cuivre utilisés pour les transmissions électriques. En dépit de ces performances remarquables et de l'amplificateur dopé à l'Erbium le signal finit toujours par s'affaiblir après une certaine distance. A chaque

record de transmission, de nouveaux effets limitant sont découverts, et de nouvelles parades mises en œuvre pour chacun d'eux.

En général deux questions majeures se posent dans une transmission par fibre optique, à savoir : quelle est la portée maximale des liaisons amplifiées ? et jusqu'à quel débit d'information peut-on aller ?

Ce mémoire est composé de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous dresserons l'état des systèmes de transmission par fibre optique ; nous donnons en premier lieu l'historique de la fibre optique ; ensuite sa composition, le principe, les différents types, les différentes applications ainsi que les caractéristiques d'une fibre optique. On parlera aussi des éléments d'une liaison optique à savoir les sources optiques, comme les diodes DEL et les diodes laser, les récepteurs avec la photodiode PIN, l'amplificateur dopé à l'erbium, les modulations ainsi que les formats de modulation.

Le deuxième chapitre est consacré à l'état des réseaux de télécommunication optiques ; nous commençons par l'historique des télécoms optiques puis les caractéristiques et applications ; ensuite les réseaux (WAN, MAN et LAN), les techniques de multiplexage, la commutation optique, les types de commutateurs optiques, les convertisseurs optiques et les types de convertisseurs optiques.

Enfin le troisième et dernier chapitre, la partie expérimentale, nous allons commencer par une présentation du logiciel « OptiSystem », ensuite présenter les différents composants utilisés ainsi que leurs caractéristiques et terminer par la simulation d'une liaison optique, qui va nous permettre, en variant certains paramètres, comme la longueur de la fibre optique monomode et le débit de transmission, de voir leurs effets à la sortie de la liaison; la simulation est faite avec deux formats : NRZ et RZ. Une conclusion générale avec perspectives est donnée à la fin du mémoire.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes de transmission par fibre optique

I.1 Introduction

Une **fibre optique** est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété de conduire la lumière et sert dans les transmissions terrestres et océaniques de données. Elle offre un débit d'informations nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et supporte un réseau " large bande " par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques [2].

Entourée d'une gaine protectrice, la fibre optique peut être utilisée pour conduire de la lumière entre deux lieux distants de plusieurs centaines, voire milliers, de kilomètres. Le signal lumineux codé par une variation d'intensité est capable de transmettre une grande quantité d'informations. En permettant les communications à de très longues distances et à des débits jusqu'alors impossibles, la fibre optique a constitué l'un des éléments clef de la révolution des télécommunications optiques. Ses propriétés sont également exploitées dans le domaine des capteurs (température, pression, etc.) et dans l'imagerie.

Un nouveau type de fibres optiques, fibres à cristaux, a également été mis au point ces dernières années, permettant des gains significatifs de performances dans le domaine du traitement optique de l'information par des techniques non linéaires, dans l'amplification optique ou bien encore dans la génération de super continus utilisables par exemple dans le diagnostic médical.

Dans ce chapitre nous allons voir comment s'est développée la transmission par fibre optique ; la composition, le principe de fonctionnement, les différents types, les différentes applications ainsi que les caractéristiques d'une fibre optique. Par la suite nous parlerons des sources optiques (DL et DEL), du récepteur avec la photodiode PIN, de l'amplificateur dopé à l'erbium EDFA et des formes de modulation.

I.2 Historique

La possibilité de transporter de la lumière le long de fines fibres de verre fut exploitée au cours de la première moitié du XX^e siècle. En 1927, Baird et Hansell tentèrent de mettre au point un dispositif d'images de télévision à l'aide de fibres. Hansell put faire breveter son invention, mais elle ne fut jamais vraiment utilisée. Quelques années plus tard, en 1930, Heinrich Lamm réussit à transmettre l'image d'un filament de lampe électrique grâce à un assemblage rudimentaire de fibres de quartz. Cependant, il était encore difficile à cette époque de concevoir que ces fibres de verre puissent trouver une application.

La première application fructueuse de la fibre optique a eu lieu au début des années 1950, lorsque le fibroscope flexible fut inventé par Van Heel et Hopkins. Cet appareil permettait la transmission d'une image le long de fibres en verre. Il fut particulièrement utilisé en endoscopie, pour observer l'intérieur du corps humain, et pour inspecter des soudures dans des réacteurs d'avion. Malheureusement, la transmission ne pouvait pas être faite sur une grande distance étant donnée la mauvaise qualité des fibres utilisées. En 1957, le fibroscope (endoscope flexible médical) est inventé par Basil Hirschowitz aux États-Unis [2].

Les télécommunications par fibre optique restèrent impossibles jusqu'à l'invention du laser en 1960. Le laser offrit en effet l'occasion de transmettre un signal avec assez de puissance sur une grande distance. Dans sa publication de 1964, Charles Kao décrivit un système de communication à longue distance et à faible perte en mettant à profit l'utilisation conjointe du laser et de la fibre optique. Peu après, soit en 1966, il démontra expérimentalement, avec la collaboration de Georges Hockman, qu'il était possible de transporter de l'information sur une grande distance sous forme de lumière grâce à la fibre optique. Cette expérience est souvent considérée comme la première transmission de données par fibre optique.

Cependant, les pertes dans une fibre optique étaient telles que le signal disparaissait au bout de quelques centimètres, non par perte de lumière, mais parce que les différents chemins de réflexion du signal contre les parois finissaient par en faire perdre la phase. Cela la rendait peu avantageuse par rapport au fil de cuivre traditionnel. Les pertes de phase entraînées par l'usage d'une fibre de verre homogène constituaient le principal obstacle à l'utilisation courante de la fibre optique.

En 1970, trois scientifiques de la compagnie Corning Glass Works de New York, Robert Maurer, Peter Schultz et Donald Keck, produisirent la première fibre optique avec des pertes de phase suffisamment faibles pour être utilisée dans les réseaux de télécommunications (20 décibels par kilomètre ; aujourd'hui la fibre conventionnelle affiche des pertes de moins de 0,25 décibel par kilomètre pour la longueur d'onde 1550 nm. Utilisée dans les télécommunications). Leur fibre optique était en mesure de transporter 65 000 fois plus d'informations qu'un simple câble de cuivre, ce qui correspondait au rapport des longueurs d'onde utilisées.

Le premier système de communication téléphonique optique fut installé au centre-ville de Chicago en 1977. On estime qu'aujourd'hui plus de 80 % des communications à longue distance sont transportées le long de plus de 25 millions de kilomètres de câbles à fibres optiques partout dans le monde.

I.3 Structure de la fibre optique

La fibre optique est composée de deux cylindres transparents :

- le cylindre intérieur s'appelle le **cœur**, de silice pure à haut indice de réfraction n_c
- le cylindre extérieur s'appelle la **gaine**, de silice pure à plus faible indice de réfraction n_g

Ces deux cylindres sont protégés par un **revêtement**.

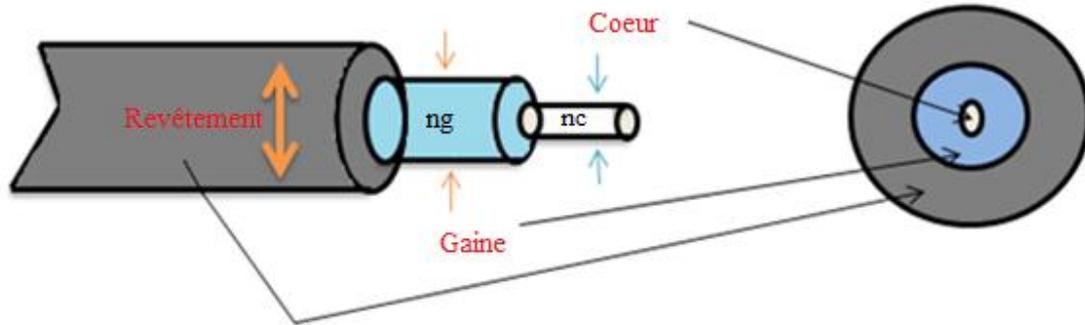


Figure I.1 : Structure de la Fibre Optique

Dans le domaine des télécommunications optiques, le matériau privilégié est la **silice** très pure car elle présente des pertes optiques très faibles. Quand l'atténuation n'est pas le principal critère de sélection, on peut également mettre en œuvre des fibres en matière plastique [2].

NB : Lorsqu'une fibre optique n'est pas encore alimentée, on parle de fibre optique noire.

I.4 Principe de la fibre optique

La fibre optique est un guide d'onde qui exploite les propriétés réfractrices de la lumière. Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre optique. La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec très peu de pertes même lorsque la fibre est courbée. Une fibre optique est souvent décrite selon deux paramètres :

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

$$\Delta = (n_c - n_g) / n_c \quad [I.1]$$

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

- ✓ l'ouverture numérique de la fibre, elle est mesurée par rapport à l'axe de la fibre. Elle nous renseigne sur la capacité qu'a une fibre pour propager les rayons optiques [2].

$$\sin\theta_{\max} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad [I.2]$$

I.5 Types de fibre optique

Les fibres optiques peuvent être classées en deux catégories selon leur diamètre et la longueur d'onde utilisée : Fibres monomodes et multimodes.

I.5.1 Fibres multimodes (MMF)

La fibre multimode, dénommée MMF (MultiMode Fiber), a été la première sur le marché. Elle a pour caractéristique de transporter plusieurs modes (trajets lumineux) simultanément [2] et est composée d'un diamètre du cœur important (supérieur ou égale à 50 microns).

Elles sont principalement utilisées dans les réseaux locaux dont la distance n'excède pas 2 kilomètres du fait de la dispersion modale. La transmission des données se fait au moyen d'une LED (Light Emitting Diode) d'une longueur d'onde de 850 nanomètres ou 1300 nanomètres [9].

Deux types de fibres multimodes sont disponibles : les fibres à saut d'indice et les fibres à gradient d'indice.

I.5.1.1 Fibre à saut d'indice

Dont l'indice de réfraction du cœur est homogène dans toutes les directions. La propagation des rayons lumineux se fait par différents chemins à la même vitesse quel que soit leurs angles par rapport à l'axe du cœur.

Ces rayons arrivent au récepteur avec des retards différentiels qui deviennent rapidement très prohibitif au-delà d'une certaine distance. Il en résulte une dispersion de l'énergie du signal dans le temps qui se traduit par un étalement de celui-ci [3].

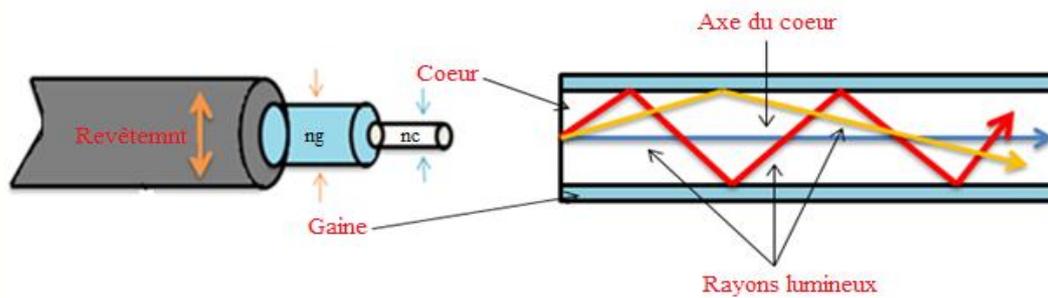


Figure I.2 : Fibre à saut d'indice

I.5.1.2 Fibre à gradient d'indice

Dont l'indice de réfraction du cœur n n'est pas homogène, elle est caractérisée par un diamètre de cœur de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de micromètres [2]. Elle permet de minimiser la dispersion modale (à une longueur d'onde donnée) et est couramment utilisée à l'intérieur des bâtiments [9].

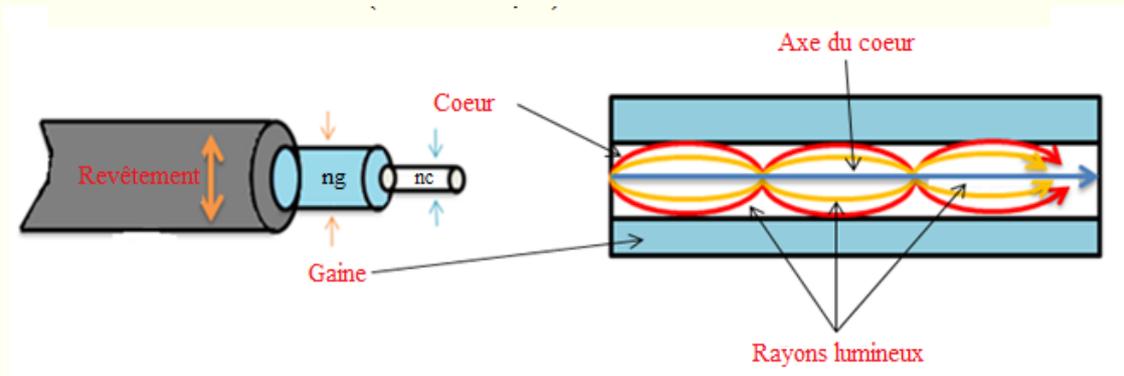


Figure I.3 : Fibre à gradient d'indice

I.5.2 Fibres monomodes (SMF)

La fibre optique monomode, dénommée **SMF** (Single Mode Fiber) est composée d'un cœur de diamètre inférieur ou égale à 10 microns, elle est principalement utilisée par les opérateurs pour parcourir de longues distances.

La transmission des données se fait au moyen d'un laser d'une longueur d'onde allant de 1300 ou 1550 nanomètres [9].

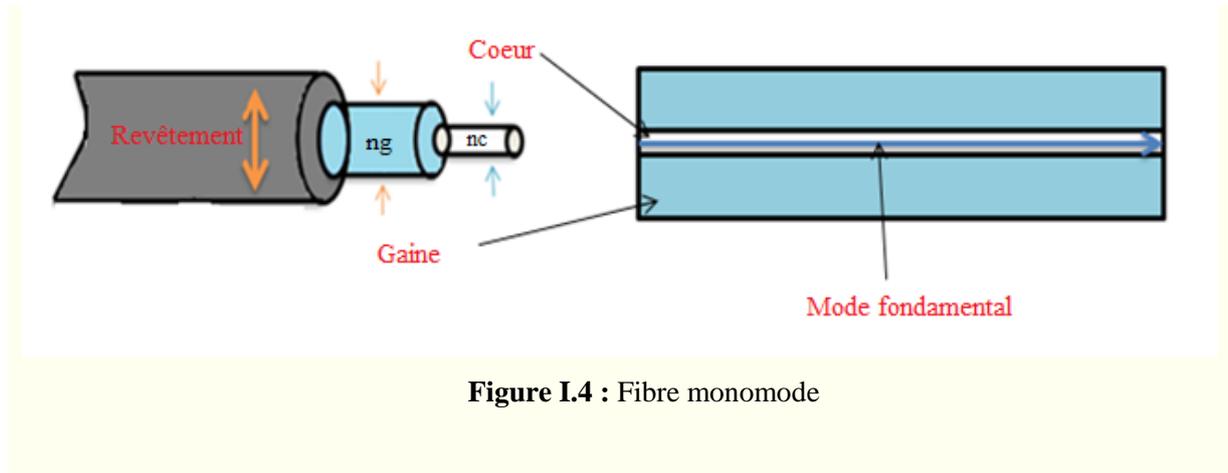


Figure I.4 : Fibre monomode

I.6 Caractéristiques d'une fibre optique

La fibre optique est caractérisée par l'atténuation, la dispersion et les effets non linéaires.

I.6.1 Atténuation

Elle caractérise l'affaiblissement du signal au cours de la propagation, elle est moins forte dans les systèmes à fibre optique que dans les systèmes électriques, elle est donnée en dB ou dBm par kilomètre [8].



Figure I.5: Effet d'Atténuation

Elle est causée par :

- ✓ La diffusion de Rayleigh, due aux variations de l'indice au niveau microscopique.
- ✓ L'absorption moléculaire, due aux impuretés du cœur ; région infrarouge.
- ✓ L'affaiblissement par absorption atomique ou électronique, due aux impuretés ; région infrarouge.
- ✓ Une courbure trop prononcée qui augmente les pertes par réflexion.

I.6.2 Dispersions

Elles se manifestent par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation.

a) Dispersion chromatique

À l'heure actuelle, c'est la dispersion, et non pas l'atténuation, le facteur limitant de la transmission de signaux à haut débit sur de longues distances. La dispersion chromatique se manifeste par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation, comme le montre la figure I.6 [8].

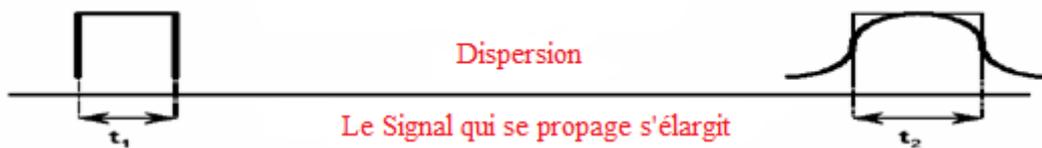


Figure I.6: Effet de la Dispersion Chromatique

Ce type de dispersion apparaît dans le cas des fibres monomode et multimode. Elle est de l'ordre de ps/km.

b) Dispersion intermodale

C'est le type de dispersion qui apparaît seulement dans les fibres multimodes, le signal transmis est composé de différents modes de propagation. Chaque mode de propagation suit un chemin différent dans la fibre et a un temps de propagation différent.

La valeur typique de dispersion intermodale dans une fibre à saut d'indice est d'environ de **30 ns/km** et celle de la fibre à gradient d'indice est d'environ **60 ps/km**. Elle n'existe pas dans la fibre monomode.

I.6.3 Effets non linéaires

Les effets non linéaires (variation de la vitesse de propagation liée à la longueur d'onde d'une part, liée à l'intensité d'autre part) sont généralement présents dans les fibres monomodes et se traduisent par :

- une atténuation du signal en fonction de l'augmentation de la puissance transmise

- une création de nouvelles longueurs d'onde à partir du signal [6].
- etc.

a) Effet Raman

C'est le plus connu des effets non linéaires. Il s'agit d'échange d'énergie entre l'onde optique et les vibrations du matériau [8].

b) Effet Kerr

Il est dû à la variation de l'indice de réfraction de la silice en fonction de l'intensité optique [6].

I.7 Compensation de la dispersion chromatique avec la DCF

Une dispersion chromatique non nulle peut se compenser optiquement, par l'intermédiaire d'une courte section de fibre de forte dispersion négative (mais en général d'atténuation élevée) dite DCF (dispersion compensating fiber). On peut aussi utiliser un dispositif compensateur de dispersion chromatique (à réseau de Bragg par exemple) jouant ce rôle, qui est de retarder les longueurs d'onde arrivées en premier.

La réalisation de ces dispositifs est délicate mais leur principe est simple ; la compensation est possible car tant que l'on reste en régime linéaire, les différentes longueurs d'onde d'un même signal ne se couplent pas, contrairement aux différents modes d'une fibre multimode [10].

Dans un système à multiplexage en longueur d'onde WDM, la compensation de dispersion s'applique en général en deux temps :

- ✓ Une compensation grossière pour tout le spectre, au niveau de chaque section, qui n'est pas très précise car il est difficile d'avoir une fibre ou un dispositif dont la dispersion soit l'exact symétrique de celle de la fibre de ligne sur tout le spectre ;
- ✓ Puis une compensation fine longueur d'onde par longueur d'onde après le démultiplexage.

Si L_{SMF} et D_{SMF} sont respectivement la longueur (en km) et la dispersion (en ps/nm/km) de la fibre standard utilisée, L_{DCF} et D_{DCF} respectivement celles de la fibre de compensation, on doit avoir la relation suivante [3] :

$$(L_{SMF} \times D_{SMF}) + (L_{DCF} \times D_{DCF}) = 0 \quad [I.3]$$

I.8 Liaison optique point à point

La figure I.7 représente une liaison point à point composée d'un bloc d'émission (composé d'une source optique et d'un modulateur), d'une fibre optique principale, d'une fibre compensatrice (DCF), de deux amplificateurs (EDFA) et d'un bloc de réception (composé d'une photodiode et d'un filtre passe bas).

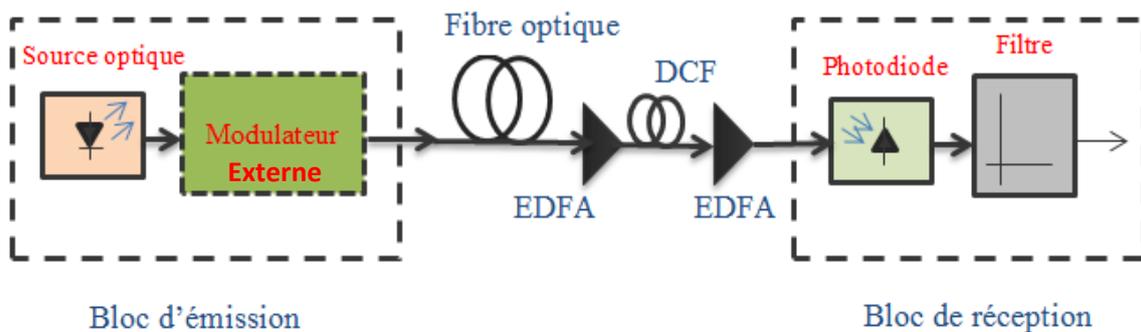


Figure I.7: Système de Transmission Optique

I.8.1 Emetteur optique

Il existe deux types d'émetteurs utilisables pour la génération de signaux lumineux : les diodes LASER (DL) et les diodes électroluminescentes (LED). Ces deux matériaux présentent des avantages et des inconvénients et chacun s'adapte à un type de multiplexage [1]. La figure I.8 représente le symbole de la source optique.

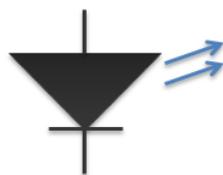


Figure I.8: Symbole de la Source Optique

- ✓ Les diodes électroluminescentes (**LED**) sont des composants bons marchés mais elles ne permettent pas l'émission de signaux à des débits trop élevés et elles émettent un signal sur plusieurs longueurs d'onde à la fois, généralement sur un intervalle de vingt (20) nanomètres. De plus le signal généré est assez faible, donc inapte à parcourir de longues distances. Ces caractéristiques font que les LED ne conviennent pas à la fibre monomode et elles sont donc réservées aux fibres multimodes. De la même façon, les LED sont inadaptées pour le multiplexage WDM étant donné que celui-ci utilise des intervalles pour chaque signal de l'ordre de **1,6** nanomètres ou moins [5].
- ✓ De son côté, le **laser** coûte beaucoup plus cher et nécessite une certaine attention du fait qu'il chauffe beaucoup. Cependant, il est plus performant que les LED car il n'émet que sur une seule longueur d'onde donnée et le signal émis est beaucoup plus puissant.

I.8.2 Récepteur optique

Le récepteur optique est un dispositif qui permet d'extraire l'information du signal optique reçu de la fibre; il est constitué de quatre parties essentielles : un photodétecteur ou photodiode, un convertisseur courant tension, un amplificateur et un circuit de traitement de l'information.

a) Photodiode

Le rôle du photodétecteur, qui peut être une diode PIN ou diode à avalanches, est de convertir le signal lumineux, reçu de la fibre, en un signal électrique en lui apportant le minimum de dégradation ; il se comporte comme un capteur et un générateur de courant [6].

La sensibilité, le courant d'obscurité, la détectivité et le temps de réponse sont les paramètres importants qui caractérisent une photodiode, ils dépendent du matériau et de la structure de la photodiode. La photodiode est une diode à jonction qui produit un courant en fonction de l'éclairement reçu.

La figure I.9 représente le symbole de la photodiode.

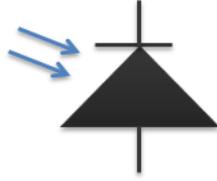


Figure I.9: Symbole du Photodétecteur

i. Photodiode PIN

La photodiode PIN comprend une couche intrinsèque (non dopée) entre la couche P et N. Sous l'effet d'un photon d'énergie suffisante, un électron est arraché de la bande de valence et passe dans la bande de conduction, produisant une paire de porteurs libres qui sont collectés aux bornes d'une jonction polarisée en inverse.

Dans cette jonction, il existe une zone sans porteurs libres dite région déplétée (pas de charges mobiles, ou peu). Donc toute paire électron-trou générée dans cette zone participe à la création d'un photon-courant. Pour favoriser le rendement quantique, il est préférable que cette zone soit large, d'où l'intérêt de la photodiode PIN [6].

La figure I.10 représente la photodiode PIN.

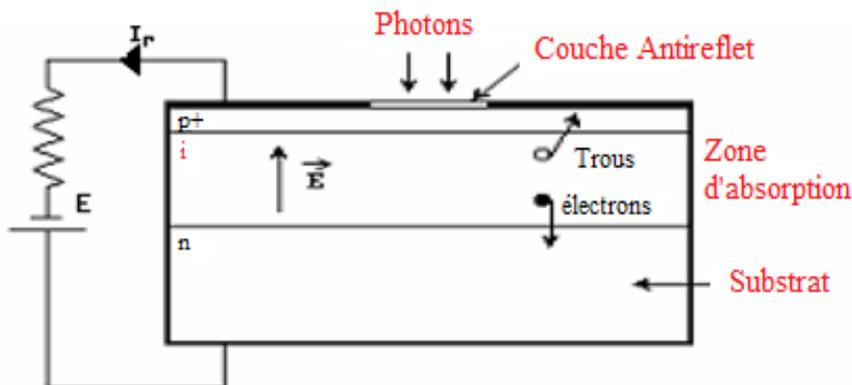


Figure I.10: Photodiode PIN

La majorité des photons sont absorbés dans la zone intrinsèque (**i**), où règne le champ électrique (**E**) pratiquement uniforme qui sépare les porteurs. Une des zones traversées par la lumière (**p** ou **n**) doit être de faible épaisseur (ici c'est la zone **p**) et recouverte d'une couche antireflet qui améliore le rendement quantique externe et protège le matériau.

La photodiode PIN présente les avantages suivants :

- Un faible bruit ;
- Une bonne sensibilité ;
- Un temps de réponse très court (parfois moins d'une nanoseconde) ;
- Un faible courant d'obscurité ;

I.9 Amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA)

Le principe d'amplification optique est basé sur le phénomène d'émission stimulée. L'amplificateur à fibre dopée à erbium (EDFA pour Erbium doped Fibre Amplifier) s'est imposé dans le domaine des télécommunications grâce à sa transparence au débit.

L'amplificateur est en effet constitué de fibre dont le cœur est dopé aux ions terre rare, les ions Erbium. Un pompage optique par une diode laser auxiliaire conduit à l'inversion de population des ions Erbium, qui passent dans un état excité. Le pompage s'effectue autour de 980 nm (habituellement utilisée pour des équipements à faible bruit, par contre on doit utiliser des sources lasers stabilisées) ou 1480 nm (utilisée pour des amplifications de plus forte puissance). Le signal optique qui traverse la fibre dopée, stimule le retour à l'équilibre des ions Erbium dans la fibre [11]. L'émission radiative stimulée autour de 1550 nm produit le signal amplifié.

Il se compose pour l'essentiel: d'une fibre active de quelques mètres de longueur (20 m), dopée avec des ions 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.

Dans la plupart des cas la pompe est un laser à semi-conducteur. 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 afin d'éviter toutes les réflexions qui pourraient : créer une cavité, faire osciller le dispositif et le transformer en laser. Le multiplexeur optique, sélectif en longueur d'onde, doit présenter une perte d'insertion faible à ces deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système.

La figure I.11 montre le schéma d'un amplificateur optique à fibre dopé à l'erbium.

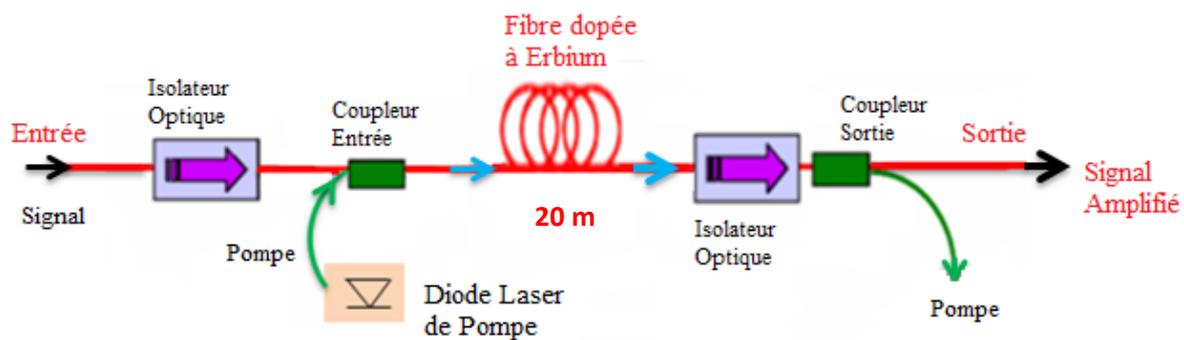


Figure I.11: Schéma du principe d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium

En général, les EDFA possèdent des gains de 25 à 45 dB, mais dans notre simulation on utilise des gains inférieurs à 25 dB vus la longueur de la fibre SMF, 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 (pour toutes les longueurs d'ondes de cette bande), ce qui rend intéressant ces amplificateurs quand on veut amplifier simultanément plusieurs signaux multiplexés en longueur d'onde [8].

I.10 Modulations

On a deux méthodes distinctes pour moduler les ondes optiques destinées aux communications : la modulation directe, dans ce cas c'est la source elle-même qui fait varier sa sortie, et la modulation extérieure, un modulateur est alors situé dans le faisceau de sortie. Dans les 2 cas, l'alimentation électrique nécessaire doit être réduite que possible [12].

I.10.1 Modulation directe

Cette technique n'est utilisée que pour des débits inférieurs à **5 Gb/s** et consiste à moduler directement le courant injecté dans un laser à semi-conducteur. Le principe est qu'on allume la diode laser pour transmettre la donnée « 1 » et on l'éteint pour la donnée « 0 » [6].

La figure I.12 représente le schéma synoptique d'une modulation directe.

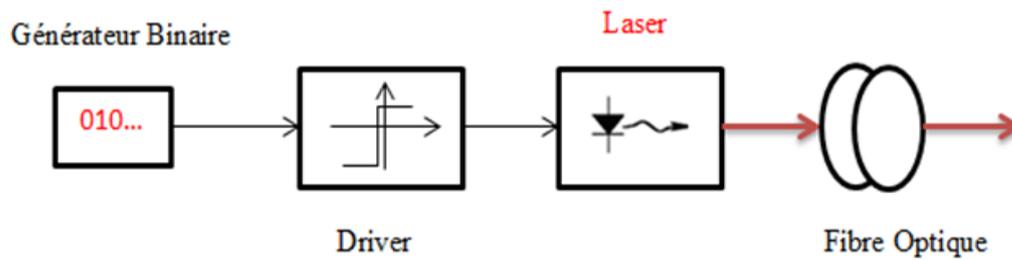


Figure I.12: Synoptique d'une modulation directe

Le rôle du Driver est de commander la source optique au niveau des puissances émises (en fixant les valeurs du courant d'alimentation).

I.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.

La modulation est effectuée sur une onde pure et constante et par un composant indispensable : le modulateur externe, dans notre cas le modulateur Mach-Zehnder. Celui-ci est commandé par une tension externe, 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 la tension externe.

La figure I.13 représente le schéma synoptique d'une modulation externe.

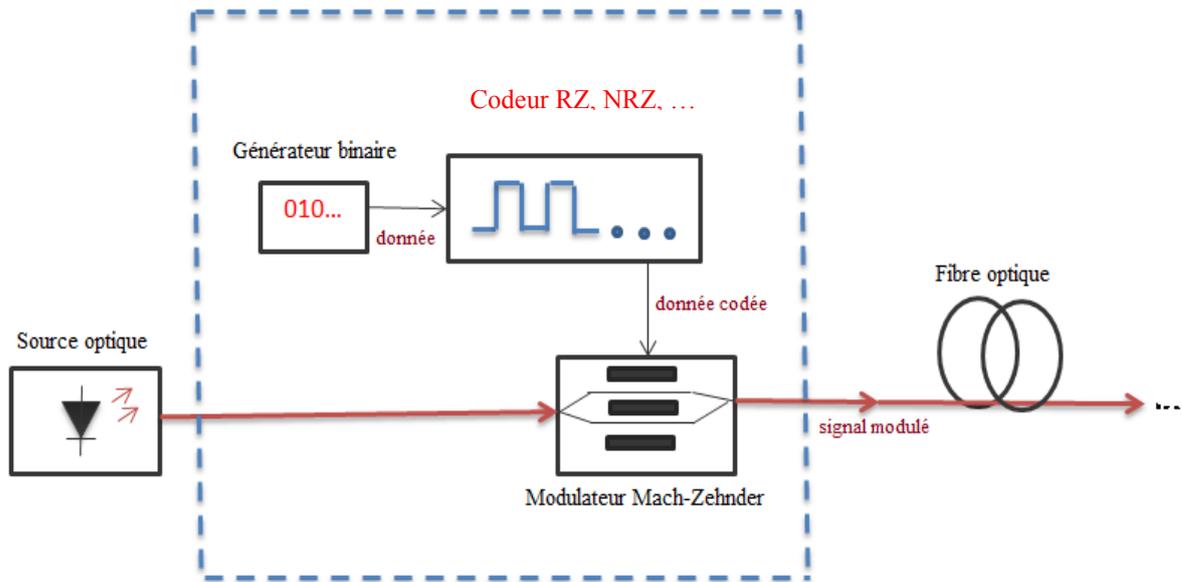


Figure I.13: Synoptique d'une modulation externe

La modulation directe, plus simple et moins coûteuse est encore très utilisée si les données sont transmises à un débit de quelques gigabits/s, selon la qualité du laser. Mais au-delà de 5 Gbits/s, la modulation externe est indispensable pour maintenir une qualité de transmission correcte. Cependant, les modulateurs ne sont pas parfaits et peuvent engendrer des défauts mais leur impact est moins important [13].

I.11 Formats de Modulations

Différentes modulations du signal optique permettent le codage du signal. Elles se classent en deux catégories :

- La modulation d'amplitude (ASK pour Amplitude Shift Keying) pour laquelle le passage d'un symbole binaire à l'autre se caractérise par la présence ou non de signal optique,
- La modulation de phase (PSK pour Phase Shift Keying) pour laquelle le passage d'un symbole binaire à l'autre se caractérise par une variation de la phase du signal [11].

Les deux principaux formats de modulation d'amplitude sont le format **RZ** (Return-to-Zero) et le format **NRZ** (Non-Return-to-Zero).

I.11.1 Format RZ (Return-to-Zero)

Dans ce format, l'impulsion associée à la donnée « 1 » est de durée nettement inférieure au temps symbole, la donnée « 0 » à l'absence de signal [14]. C'est un format impulsionnel [11]. Utilisé pour des débits plus élevés (au-delà 10 Gbit/s). La bande passante dans un format RZ est égale au débit.

La figure I.14 représente le codage d'une donnée (1 0 0 1 1 0) en format RZ.

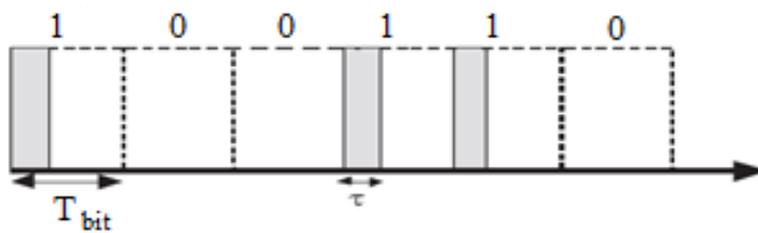


Figure I.14: Format RZ

I.11.2 Format NRZ (Non-Return-to-Zero)

La donnée binaire « 1 » est associée à une impulsion optique de durée sensiblement égale au temps symbole (inverse du débit), la donnée « 0 » à l'absence de signal. En pratique on n'a pas une absence totale de signal puisque le taux d'extinction n'est jamais infini. Le codage NRZ est utilisé pour des débits inférieurs à 10 Gbits/s, utilisé dans beaucoup de systèmes WDM à 2,5 Gbit/s et exige un modulateur externe [14]. La bande passante dans un format NRZ est égale à $\frac{1}{2}$ du débit.

La figure I.15 représente le codage d'une donnée (1 0 0 1 1 0) en format NRZ.

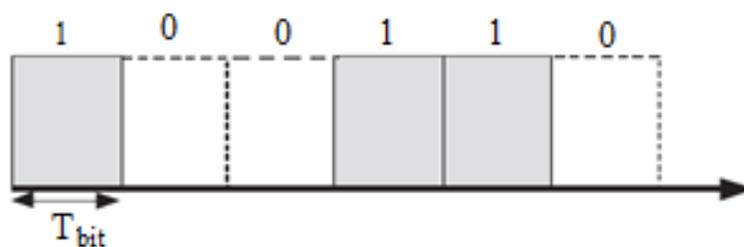


Figure I.15: Format NRZ

I.11.3 Format Manchester

Le codage Manchester, également appelé codage biphasé, introduit une transition au milieu de chaque intervalle, ce qui veut dire que la donnée « 1 » sera codé par un front montant au milieu de la période d'horloge et la donnée « 0 » par un front descendant au milieu de la période d'horloge. En fait, il consiste à faire un « OU » exclusif (XOR) entre le signal (la donnée) et le signal d'horloge. L'utilisation de ce codage supprime la composante continue.

La figure I.16 représente le codage d'une donnée (1 0 0 1 1 0) en format Manchester.

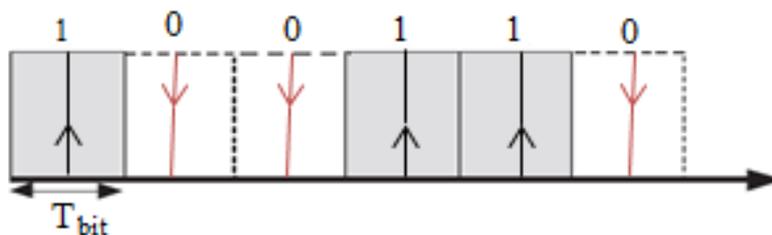


Figure I.16: Format Manchester

I.12 Conclusion :

Ce chapitre est consacré à la synthèse bibliographique des systèmes de transmission par fibre optique. Les deux types de la fibre ont chacune leurs sources optiques, c'est due à la puissance et au nombre de modes qu'elles peuvent transmettre ; les fibres monomodes utilisent le laser comme source optique car elles n'émettent que sur une seule longueur d'onde donnée et le signal émis est beaucoup plus puissant.

On constate que la modulation directe est une technique qui n'est utilisé que pour des débits inférieurs à 5 Gb/s, tandis que la modulation externe est utilisée pour des débits supérieurs.

Maintenant nous allons voir, dans le deuxième chapitre, des généralités sur les réseaux de télécommunications optiques.

Chapitre II

Réseaux de télécommunication optiques

II. 1 Introduction

Une des grandes tendances de la fin des années **90** est la demande croissante en bande passante des réseaux d'entreprises et d'opérateurs. Plusieurs facteurs induisent cette demande : de plus en plus d'utilisateurs d'internet, des applications de calcul incluant des bases de données distribuées, des communications multimédia, le commerce électronique... [15].

De nos jours un réseau permet l'échange d'informations vitales dans notre société de communication actuelle. La course aux débits est le moteur d'une dynamique inaltérable. L'apparition de nouvelles technologies permettant des débits toujours plus élevés entraîne l'élaboration et la mise sur le marché d'applications toujours plus gourmandes en ressources.

La fibre optique s'inscrit dans cette dépendance et apporte des améliorations considérables en termes de débits, mais pas uniquement. En effet la fibre optique est plus fiable et plus performante que les autres supports de transmission [5].

Dans ce chapitre, nous allons parler de:

- ✓ l'historique des télécommunications optiques ;
- ✓ caractéristiques et applications des télécommunications optiques ;
- ✓ réseaux de télécommunications (WAN, MAN et LAN);
- ✓ techniques de multiplexage (TDM et WDM) ;
- ✓ la commutation optique et quelques commutateurs optiques ;
- ✓ convertisseurs optiques.

II. 2 Aperçu historique des télécommunications optiques

Le téléphone standard fonctionne à 64 Kbits/s, la télévision numérique à quelque 100 Mbits/s. Dans les communications numériques à haut débit, on compte maintenant en Gbit/s, soit un milliard de bits transmis par seconde sous forme d'impulsions lumineuses (pour donner une idée, 1 Gbit/s représente environ 15 000 conversations téléphoniques simultanées).

Un débit supérieur n'est pas le seul avantage de la lumière. Les fibres optiques présentent des pertes bien moindres que les câbles en cuivre. Mais dans une transmission optique le signal finit par s'affaiblir après une certaine distance et se rapproche trop du bruit

de fond des détecteurs. Au-dessous d'un certain seuil d'énergie, le récepteur devient incapable de distinguer les bits sans ambiguïté.

Pour étendre la portée des liaisons sur plusieurs centaines de kilomètres sans dégrader le taux d'erreur, il suffit de maintenir le nombre de photons par bit au-dessus de la valeur nuisible au moyen de dispositifs qui régénèrent le signal affaibli à l'aide de répéteurs optoélectroniques. Les répéteurs optoélectroniques sont arrivés sur le marché dès les années 1980. Ils comportent une photodiode qui convertit le signal optique en signal électrique, un amplificateur, une bascule électronique qui identifie les bits, et finalement une diode laser commandée par le signal électrique résultant pour la conversion inverse [1].

C'est en 1988 que le tout premier système de ce type a été installé entre la France, l'Angleterre et les Etats-Unis. Il est constitué d'un câble sous-marin d'une longueur de 7500 km, doté d'environ 110 répéteurs places tous les 70 km, et il opère à 0,28 Gbits/s, soit l'équivalent de 40 000 lignes téléphoniques. Mais pour les distances transocéaniques, le débit maximal de ce type de liaisons avec répéteurs optoélectroniques était limité non par la fibre elle-même, mais par la rapidité de l'électronique. En effet, à des fréquences de fonctionnement supérieures au GHz, les circuits électroniques deviennent coûteux et leur fiabilité diminue. Cet obstacle a été contourné à la fin des années 1980 grâce à l'apparition révolutionnaire des amplificateurs optiques à fibre de verre dopée à l'erbium (EDFA). Un développement qui fut rapidement suivi en 1995 par leur mise en service dans le domaine des câbles sous-marins. Un amplificateur optique fonctionne au principe de l'émission stimulée comme un laser.

Dans les télécommunications optiques, l'intérêt d'utiliser de tels amplificateurs optiques plutôt qu'électroniques est énorme. Tout d'abord, ils se raccordent par simple soudure aux fibres de transmission. Mais surtout, ils évitent les conversions optoélectroniques effectuées par les répéteurs.

II. 3 Caractéristiques et applications des télécommunications optiques

La transmission par fibre optique présente les avantages suivants :

- ✓ Faible atténuation et grande bande passante ;

- ✓ Faible poids et faible surface de la section transversale ;
- ✓ Indifférence aux interférences électromagnétiques ;
- ✓ Souplesse physique avec possibilités de courbures à faible rayon sans affecter la transmission.

Ces caractéristiques permettent de nombreuses applications. Les fibres optiques peuvent, par exemple, être posées le long de câbles électriques. Ceci ne peut pas être fait avec des fils de cuivre qui sont très sensibles aux interférences électromagnétiques. On peut poser des fibres dans des galeries et des puits de mines grâce à leur très petite dimension et à l'absence de risque d'étincelles, tandis que leur faible poids les rend intéressantes pour les avions [12].

Voici quelques applications :

- CATV (télévision par câble) ;
- Transmission d'informations pour commandes et mesures (avions, bateaux, automobiles, trains, circuits de mesure, installations industrielles, réseaux d'énergie électrique) ;
- Ligne d'interconnexions entre ordinateurs ;
- Communications entre bureaux dans les bâtiments ;
- Communications publiques :
 - entre standard local et maisons (moins de 5 - 6 km) ;
 - entre centraux dans une ville (moins de 8 - 9 km) ;
 - entre centraux interurbains (10 - 30 km).
- Télécommunication sous-marines, télécommunication internationales (espacements entre répéteurs 10 – 100 km).

II. 4 Réseaux optiques

Selon la distance cible de transport de l'information, le réseau est dit 'longue et très longue distance' (> 150 km), 'd'accès' (jusqu'à l'utilisateur) ou encore 'métropolitain' (entre le transport longue distance et l'utilisateur) [11].

II. 4.1 Réseaux longue distance (WAN)

Le réseau longue distance (Long Haul) qui couvre typiquement des distances comprises entre 150 et 700 km permet de relier des villes, des régions entre elles. Les réseaux très longue distance (Very Long Haul entre 700 et 1500 km - Ultra Long Haul > 1500 km) sont, quant à eux, plus dédiés aux liaisons internationales.

Les liaisons radio par satellite, pour les communications à longue distance, sont longtemps restées les plus utilisées et elles n'ont été remplacées par les câbles optiques qu'à la fin des années 1980. Mais aujourd'hui, l'essentiel des communications intercontinentales se fait par des câbles optiques sous-marins déposés sur le fond des océans. Les fibres optiques ont ainsi complètement remplacés les câbles coaxiaux [1].

Les liaisons longue et très longue distances sont en général de type 'point à point' où une fibre permet de relier un point à un autre par opposition à une liaison dite 'en anneau' où l'architecture de la liaison est plus complexe.

Si les liaisons terrestres doivent être le plus flexible possible, les liaisons sous-marines sont développées pour une liaison donnée. Le type de fibre (très faibles pertes ~ 0,2 dB/km) et l'espacement entre répéteurs (30-65 km) sont alors optimisés pour une meilleure performance de chaque liaison (GAY, 2006).

Dans les liaisons terrestres par contre, les maîtres mots sont la flexibilité et le coût. La fibre présente alors souvent plus de pertes et l'espacement entre répéteurs peut varier entre 80 et 120 km (GAY, 2006).

II. 4.2 Réseaux métropolitains (MAN)

Le réseau métropolitain, comme son nom l'indique, se situe à l'échelle des villes et plus largement des zones métropolitaines. Il présente en général une architecture complexe, où l'information doit commuter du réseau longue distance (WAN) au réseau local (LAN) jusqu'à l'utilisateur [11].

Les réseaux MAN sont généralement constitués d'anneaux de 80 à 150 Km de circonférence avec 6 à 8 nœuds, acceptant n'importe quel débit de 100 Mbits/s à 2,5 Gbits/s et pouvant assurer ultérieurement le trafic à 10 Gbits/s sans modification [3].

II. 4.3 Réseaux locaux (LAN)

Le réseau local (LAN) est la partie du réseau situé entre le réseau métropolitain (MAN) et le terminal de l'abonné [3]. Ce sont des réseaux utilisés au sein d'un même endroit comme dans une entreprise, un même bâtiment. Elle a une longueur qui varie de 2 à 50 km. Les débits sur ces réseaux sont souvent supérieurs ou égale à 10 Mbits/s, actuellement on peut atteindre jusqu'à quelques Gbits/s.

Différents configurations sont envisageables selon la localisation d'une terminaison du réseau optique, nous avons [16] :

- ✓ FTTH/FTTO (Fiber To The Home/Fiber To The Office): La fibre optique va jusqu'au domicile ou au bureau; la terminaison du réseau, propre à l'abonné, est implantée dans ses locaux.
- ✓ FTTB (Fiber To The Building): Dans ce cas la terminaison du réseau optique est localisée soit au pied de l'immeuble, soit dans un local technique, soit dans une armoire ou dans un conduit sur le palier. Elle est généralement partagée entre plusieurs abonnés qui lui sont raccordés par des liaisons en fil de cuivre.
- ✓ FTTC (Fiber To The Curb): la fibre jusqu'au trottoir. La terminaison du réseau est localisée soit dans une chambre souterraine, soit dans une armoire sur la voie publique, soit dans un centre de télécommunication ou soit sur un poteau.

II. 5. Principe des transmissions optiques

Dans les télécommunications optiques, la puissance de sortie optique modulée provenant de la source est injectée dans la fibre optique. L'énergie transmise subit des pertes au cours de son trajet dans la fibre. La puissance optique, coté émetteur, est déterminée par la source (elle est fixe), alors qu'il faut, coté récepteur, un certain minimum de puissance optique (niveau de puissance reçu) pour que le signal soit décodé correctement.

La distance de transmission est donc limitée parce qu'on ne doit pas permettre à l'atténuation totale du système de dépasser le rapport de la puissance d'entrée à la puissance que requiert le récepteur.

Pour les communications à longue distance, la puissance optique doit être amplifiée par un répéteur quand elle tombe à un niveau bas [12].

Le récepteur détecte la lumière, effectue une correction ou remet en forme les impulsions et amplifie le signal. Le signal optique modulé est envoyé ensuite dans la section suivante de la fibre et le processus est répété.

II. 6 Augmentation de la capacité d'une liaison

Pour augmenter la capacité d'une liaison, nous avons besoin des multiplexeurs/démultiplexeurs.

II. 6.1 Multiplexage/ démultiplexage

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 ont poussées 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 (qui consiste à transporter sur un même support physique plusieurs signaux) 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 $N \times D$ [1].

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.

La figure II.1 montre un exemple de multiplexage/démultiplexage des signaux :

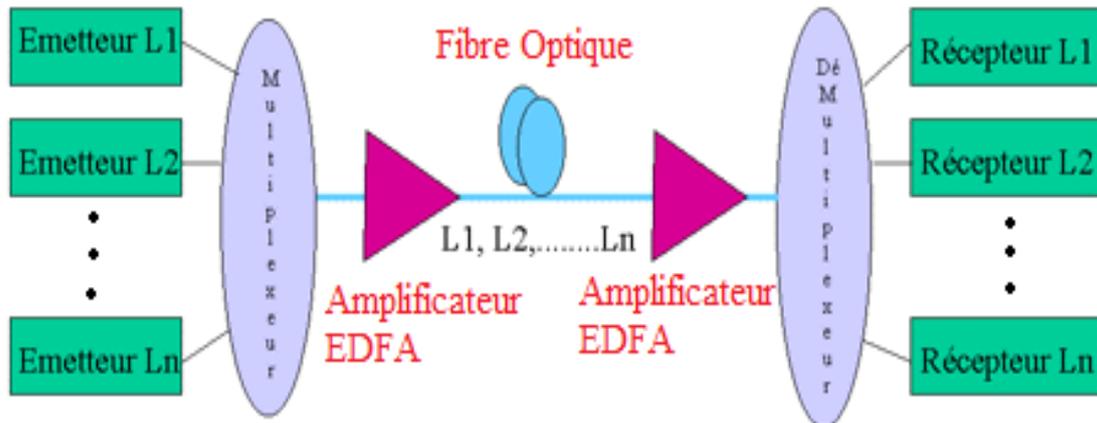


Figure II.1 : Multiplexage/démultiplexage

II. 6.2 Différents types de multiplexages

La division de la bande passante en canaux peut être réalisée, comme en électronique, dans la dimension temporelle ou dans la dimension des fréquences (ou longueurs d'onde) [1].

II. 6.2.1 Multiplexage temporel (TDM)

Le multiplexage TDM consiste à imbriquer temporellement différents canaux de communication en trames successives. Si l'on représente un flot d'information par les dents d'un peigne, le multiplexage temporel revient à superposer les peignes des différents canaux en les décalant les uns par rapport aux autres. Cela nécessite une synchronisation précise.

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 [1].

La figure II.2 montre principe d'un multiplexage temporel avec trois signaux différents.

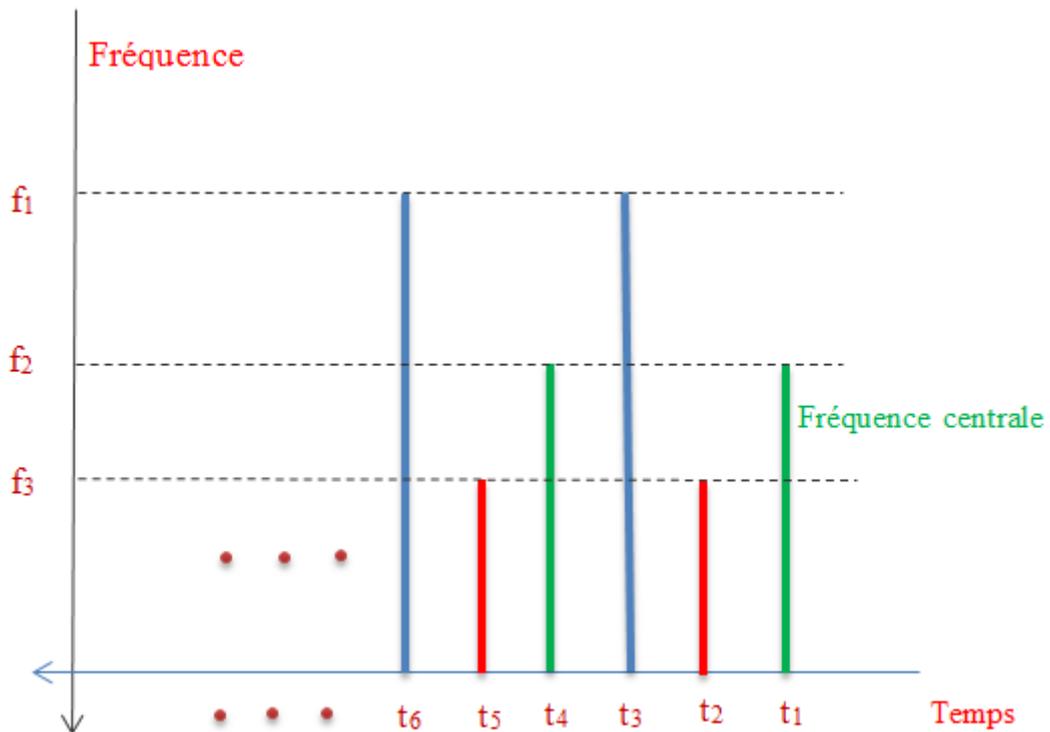


Figure II.2: Principe d'un multiplexage temporel (TDM)

II. 6.2.2 Multiplexage en longueur d'onde (WDM)

Développés dans les années 1980, les systèmes de multiplexage en longueurs d'onde (WDM) constituent en optique l'équivalent des systèmes de multiplexage par répartition de fréquence (FDM) dans le domaine des radiofréquences. On attribue à chaque utilisateur une longueur d'onde spécifique qui distingue les données le concernant [1].

La figure II.3 montre principe d'un multiplexage temporel avec trois signaux différents.



Figure II.3: Principe d'un multiplexage en longueurs d'onde (WDM)

Les données émises par des sources optiques à longueurs d'ondes distinctes sont transmises simultanément sur la même fibre optique. Le débit total obtenu est la somme des débits de tous les utilisateurs.

À la réception, les données de chaque utilisateur sont extraites à partir des signaux multiplexés, par filtrage optique à la longueur d'onde correspondant aux données de l'utilisateur souhaité, avant d'être détectées pour le traitement dans le domaine électrique [7].

a) Principe de la WDM

Le multiplexage WDM repose sur une propriété physique de la lumière. En effet, tout comme les signaux électriques se propagent avec une fréquence propre, les signaux lumineux possèdent une longueur d'onde.

Plutôt que de transmettre de l'information sur une seule longueur d'onde, on va utiliser plusieurs longueurs d'onde, et multiplier d'autant le débit de la liaison. De cette façon, on peut aisément augmenter le débit de transmission d'une fibre sans avoir à la remplacer par une

autre. Il suffit simplement de disposer d'émetteurs/récepteurs capables de distinguer les différentes longueurs d'onde utilisées. Ainsi un émetteur pourra multiplexer plusieurs canaux en affectant à chacun une longueur d'onde. Le signal lumineux composé de toutes ces longueurs d'onde va transiter sur la fibre, et le récepteur n'aura qu'à démultiplexer le signal pour obtenir les différents canaux de départ.

Le multiplexage WDM est caractérisé par l'intervalle minimum (0,8 nanomètres) entre deux longueurs d'onde utilisables. Si cet intervalle est inférieur ou égal à 0,4 nanomètres on parle de multiplexage DWDM (Dense WDM). On parle alors d'U-DWDM pour Ultra-Dense WDM si l'espacement entre les canaux est 0,2 nanomètres [5].

Il existe d'autre forme de multiplexage WDM :

- le CWDM (Coarse WDM qui signifie WDM grossier) utilise des longueurs d'onde comprises entre 1270 et 1610 nanomètres, respectivement espacées de 20 nanomètres ; 18 canaux au maximum sont utilisables.
- Le WWDM (Wide WDM), encore plus restrictif que le CWDM puisqu'il ne permet l'utilisation que de 4 canaux. Ceux-ci ont des longueurs d'onde espacées de 24,5 nanomètres comprises entre 1275,7 et 1349,2 nanomètres.

b) Application de la WDM

Dans la pratique, le multiplexage WDM s'applique principalement aux fibres monomode. Bien qu'étant assez coûteux à mettre en œuvre, le multiplexage WDM permet d'envisager des débits que seule la fibre optique peut nous offrir à l'heure actuelle [5].

Le CWDM est une alternative beaucoup moins coûteuse, mais également moins performante. C'est pourquoi il est destiné à être utilisé sur des réseaux locaux ou métropolitains.

II. 7 Commutation optique

La plupart des réseaux actuels procèdent électroniquement au traitement des données et utilisent la fibre optique seulement comme un support de transmission. 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 [1].

De plus, la conversion optoélectronique introduit un délai supplémentaire dans le routage des flots d'information. Pour s'affranchir de ces limitations des composants, commutations, optiques 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.

II. 8 Commutateurs optiques

Les commutateurs optiques utilisés dans la télécommunication sont :

II. 8.1 Répartiteur

Un répartiteur (Fiber Optical Cross-Connect, **F-OXC**) permet d'effectuer une fonction de commutation entre les fibres d'entrée et de sortie du routeur (voir figure II.4). C'est le plus élémentaire des commutateurs optiques et le moins coûteux en fabrication. Ce type d'équipements ne permet pas d'effectuer les opérations de démultiplexage sur les signaux entrants ni de multiplexage sur les signaux sortants. C'est pourquoi il est dit insensible aux longueurs d'onde [1].

Les fonctions d'extraction et d'insertion de signaux avec le terminal relié au routeur sont possibles, mais c'est alors l'ensemble des canaux WDM multiplexés qui est extrait d'une fibre d'entrée ou inséré dans une fibre de sortie.

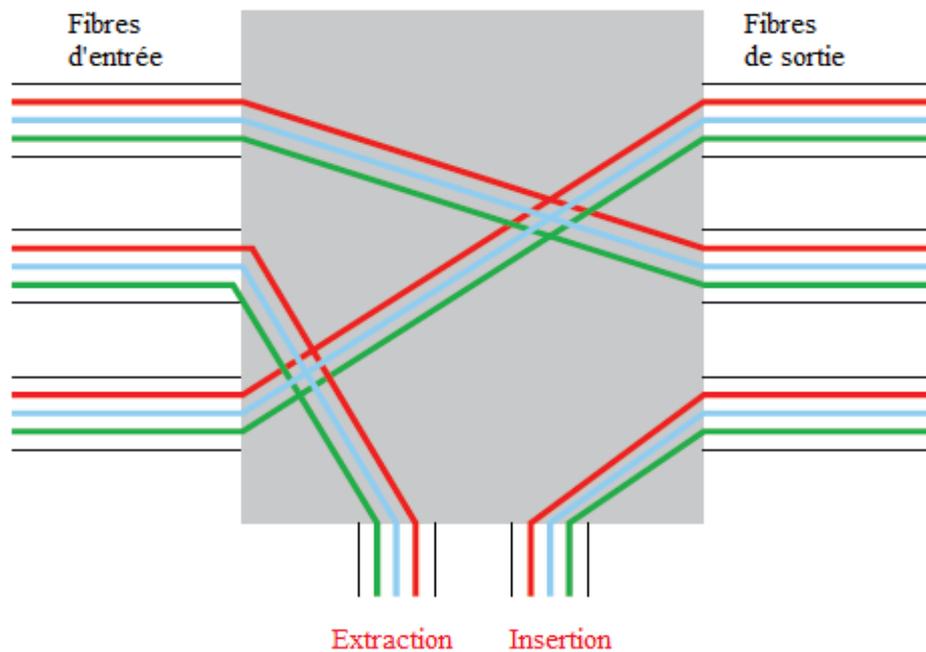


Figure II.4: Répartiteur (F-OXC)

II. 8.2 Multiplexeur à insertion/extraction (MIE)

Un multiplexeur à insertion/extraction (Optical Add/Drop Multiplexer, **OADM**) permet d'extraire certains canaux WDM en transit sur une fibre optique et d'en insérer d'autres.

Il est généralement constitué d'un démultiplexeur optique passif, de commutateurs 2x2 dédiés aux différentes longueurs d'onde et d'un multiplexeur optique passif, comme il est montré sur la figure II.5 [1].

Les états des commutateurs intermédiaires contrôlés électroniquement déterminent quels canaux WDM poursuivent leur chemin, lesquels sont extraits en vue de leurs réceptions locales et lesquels peuvent être insérés après émission local.

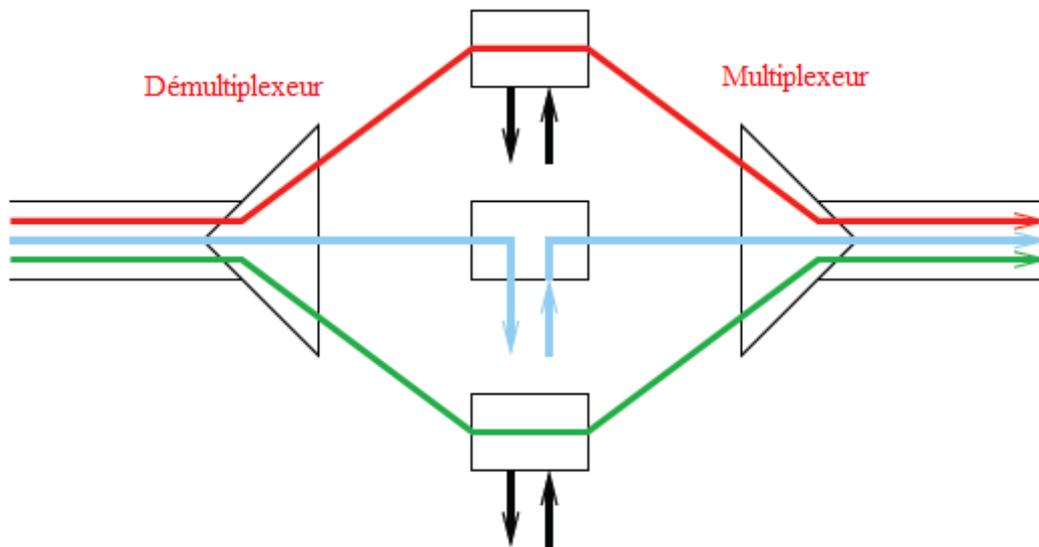


Figure II.5: Multiplexeur à insertion/extraction(MIE)

Le composant MIE peut être greffé directement sur une fibre optique, ou faire partie d'un nœud de routage plus complexe [1].

La figure II.6 montre un répartiteur avec MIE :

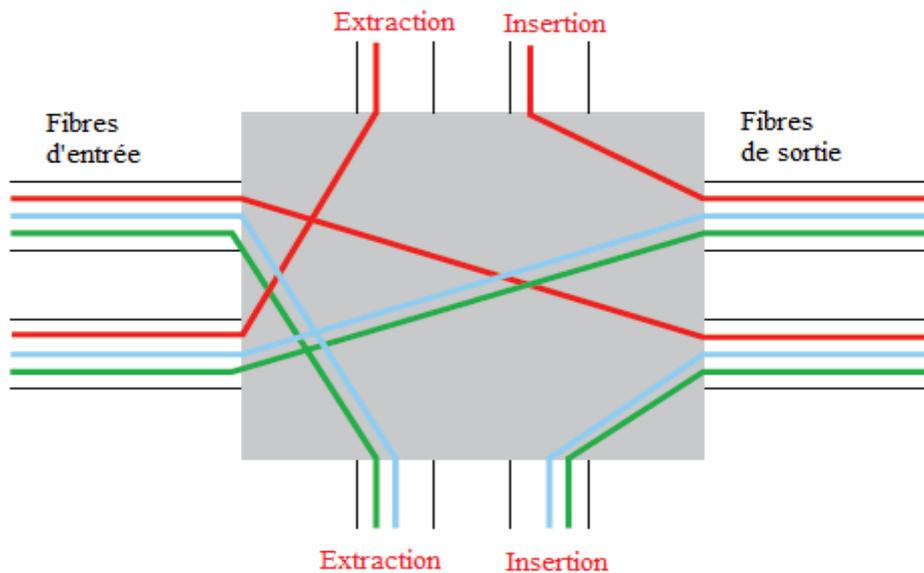


Figure II.6: Répartiteur avec MIE

II. 8.3 Brasseur optique

Un brasseur (Wavelength Routing Optical Cross-Connect, **WR-OXC**) est un composant de commutation sélectif en longueur d'onde. Cela signifie que chaque canal WDM peut être dirigé vers une fibre de sortie indépendamment des autres canaux multiplexés sur la même fibre d'entrée [1].

La composition d'un brasseur est représentée sur la figure.II.7.

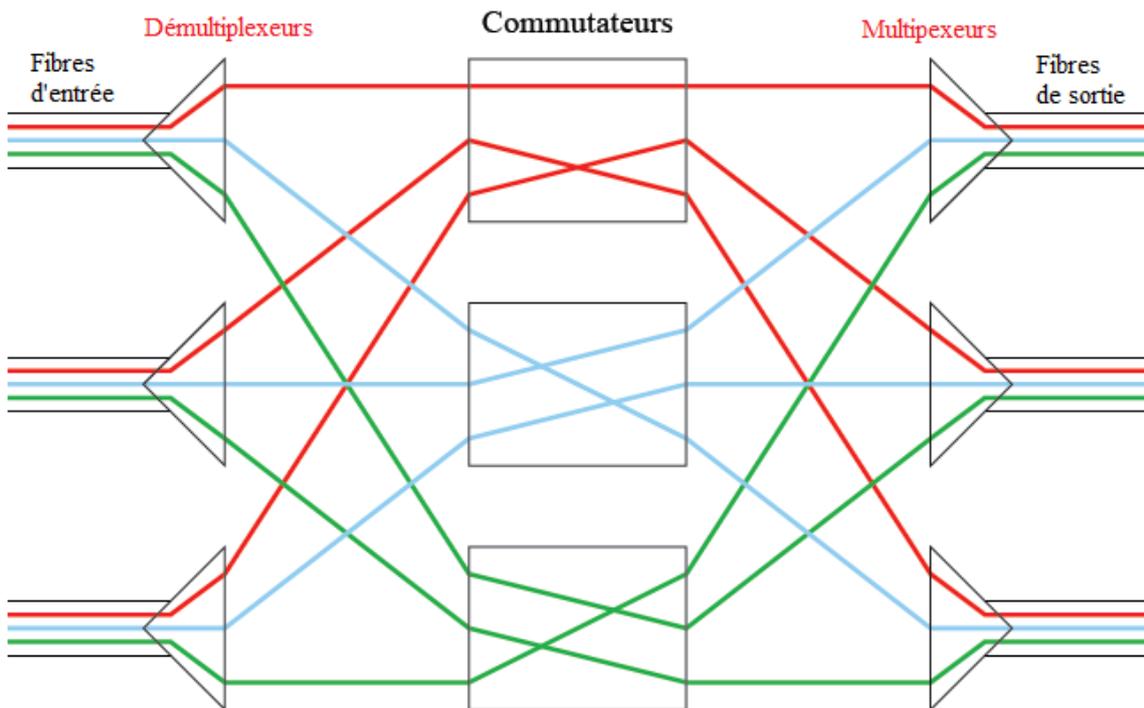


Figure II.7: Brasseur Reconfigurable (WR-OXC)

Une série de démultiplexeurs situés aux extrémités des fibres d'entrée permet dans un premier temps de démultiplexer les signaux entrants et de diriger spatialement chaque groupe de canaux WDM à la même longueur d'onde vers un commutateur photonique particulier.

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.

II. 9 Convertisseurs optiques

Les différents composants optiques de commutation que nous venons de décrire imposent aux canaux WDM de respecter la contrainte de continuité en longueur d'onde. En d'autres termes, les canaux commutés conservent en sortie la longueur d'onde qu'ils possèdent en entrée. On peut s'affranchir de cette contrainte et augmenter ainsi les capacités de routage optique par l'utilisation de convertisseurs de longueur d'onde [1].

Les différentes techniques permettant la conversion de longueur d'onde ont été classifiées et comparées dans différentes études. On peut distinguer deux grands types de technologies : la conversion optoélectronique, pour laquelle le signal optique doit être préalablement converti en un signal électrique, et la conversion tout-optique, pour laquelle le signal demeure dans le domaine optique.

II. 9.1 Conversion optoélectronique

Dans la conversion de longueur d'onde optoélectronique, le signal optique à convertir doit d'abord être traduit dans le domaine électrique à l'aide d'une photodiode (voir figure II.8). Le flot électronique résultant est ensuite réinjecté, après stockage éventuel dans une mémoire tampon, sur la commande de modulation d'un émetteur laser réglé sur la longueur d'onde désirée.

Cette méthode a été expérimentée pour des débits allant jusqu'à 10 Gbits/s. Cependant, elle est plus complexe et consomme davantage de puissance [1]. De plus, le procédé de conversion optoélectronique affecte la transparence du signal, en lui imposant un format de modulation et un débit spécifiques. Toute information modulée en phase, en fréquence ou analogiquement, est perdue durant ce processus de conversion.

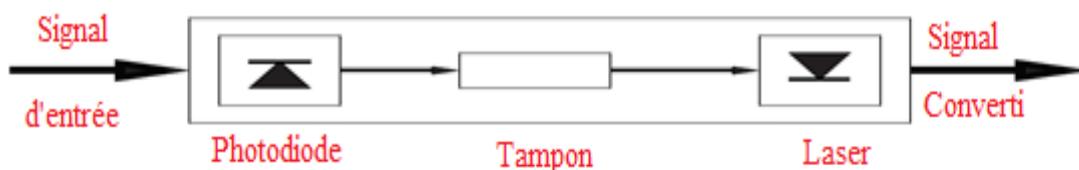


Figure II.8: Convertisseur de longueur d'onde optoélectronique

II. 9.2 Conversion tout-optique

Sans entrer dans les détails technologiques, nous donnons ici brièvement les propriétés des deux principales techniques de conversion tout-optique.

- ✓ Les méthodes de conversion basées sur les effets cohérents tolèrent tous les formats de modulation, offrant ainsi une transparence totale du signal. C'est de plus le seul type d'approche qui permet la conversion simultanée d'un ensemble de longueurs d'onde vers un autre et qui peut tolérer des débits dépassant les 100 Gbits/s.
- ✓ Les techniques de conversion basées sur la modulation croisée utilisent des composants optiques actifs à semi-conducteurs, tels que des amplificateurs ou des émetteurs laser. Les débits autorisés sont de l'ordre de 10 Gbits/s. L'avantage de cette approche réside dans sa facilité d'utilisation [1].

II. 10 Conclusion

Ce chapitre nous donne une idée générale sur les réseaux de télécommunication par fibre optique. Nous pouvons dire que grâce à la télécommunication par fibre optique la transmission des informations est devenue beaucoup plus fiable, facile et rapide.

Ce chapitre met aussi en évidence l'intérêt de l'utilisation dans un réseau de télécommunication des multiplexeurs/démultiplexeurs optiques ainsi que des commutateurs et convertisseurs optiques. Nous avons remarqué aussi la différence entre les deux techniques de multiplexage (TDM et WDM) et entre les différents réseaux de télécoms (LAN, MAN et WAN).

Maintenant nous allons passer à la simulation d'une liaison optique afin d'analyser principalement la qualité de la transmission.

Chapitre III

Etude de la liaison optique WDM 16 x 40 Gb/s

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons simuler une liaison optique avec le logiciel « OptiSystem », qui est un paquet destiné à la simulation des communications optiques.

Le plan du chapitre est le suivant :

- Une présentation du logiciel « OptiSystem » ;
- Une présentation des différents composants ainsi que leurs caractéristiques principales utilisés dans notre simulation.
- La simulation d'une liaison optique qui va nous permettre, en variant certains paramètres de la liaison comme la longueur de la fibre monomode par tronçon et le débit par canal, de voir leurs effets sur la qualité de la liaison; la simulation est faite avec les deux formats : NRZ et RZ.

III.2 Présentation du logiciel « OptiSystem »

Les systèmes de communication optiques présentent une complexité dans leurs modélisations et leurs simulations. Le dessin et l'analyse de systèmes incluent des composants non linéaires et des sources non gaussiennes de bruit, ce qui ne facilite pas la tâche du concepteur.

Optisystem vient résoudre ces problèmes tant par la simplicité de son utilisation que par la grande variété de sa bibliothèque de composants. C'est une application complète pour établir des simulations et des tests de montages optiques, en effet il comprend une bibliothèque riche de composants, tels que les fibres et des appareillages de mesures paramétrables.

C'est une application Xwindows, elle comprend essentiellement une fenêtre principale réparti en plusieurs parties :

- ✓ **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.

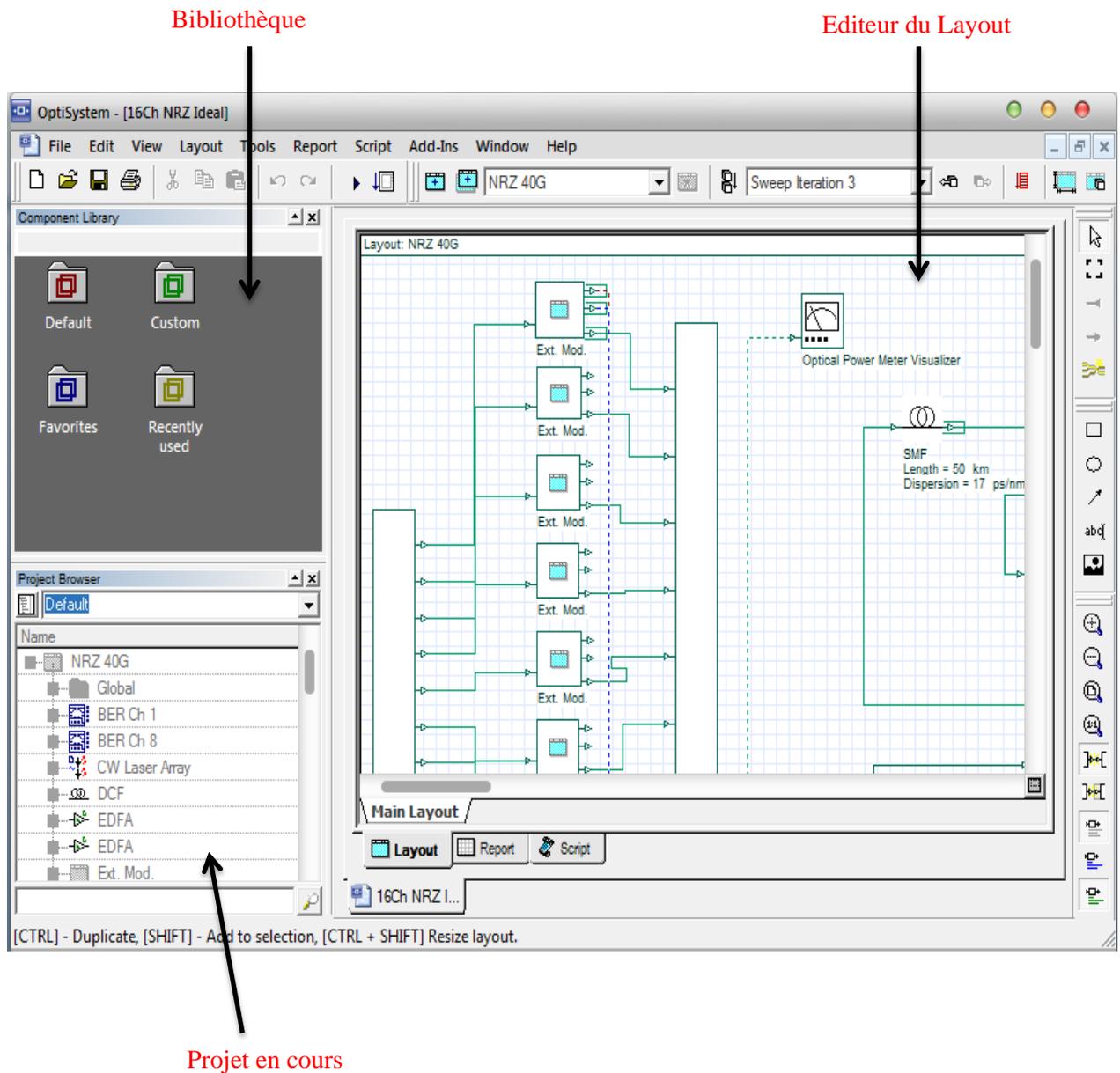


Figure III.1 : Les sous fenêtres dans Optisystem

Optisystem est un logiciel très performant qui permet aussi de concevoir et de modéliser des composants optiques. Lors de la conception, il suffit de glisser le composant de la bibliothèque vers le layout.

La figure II.2 contient les paramètres de la fibre monomode.

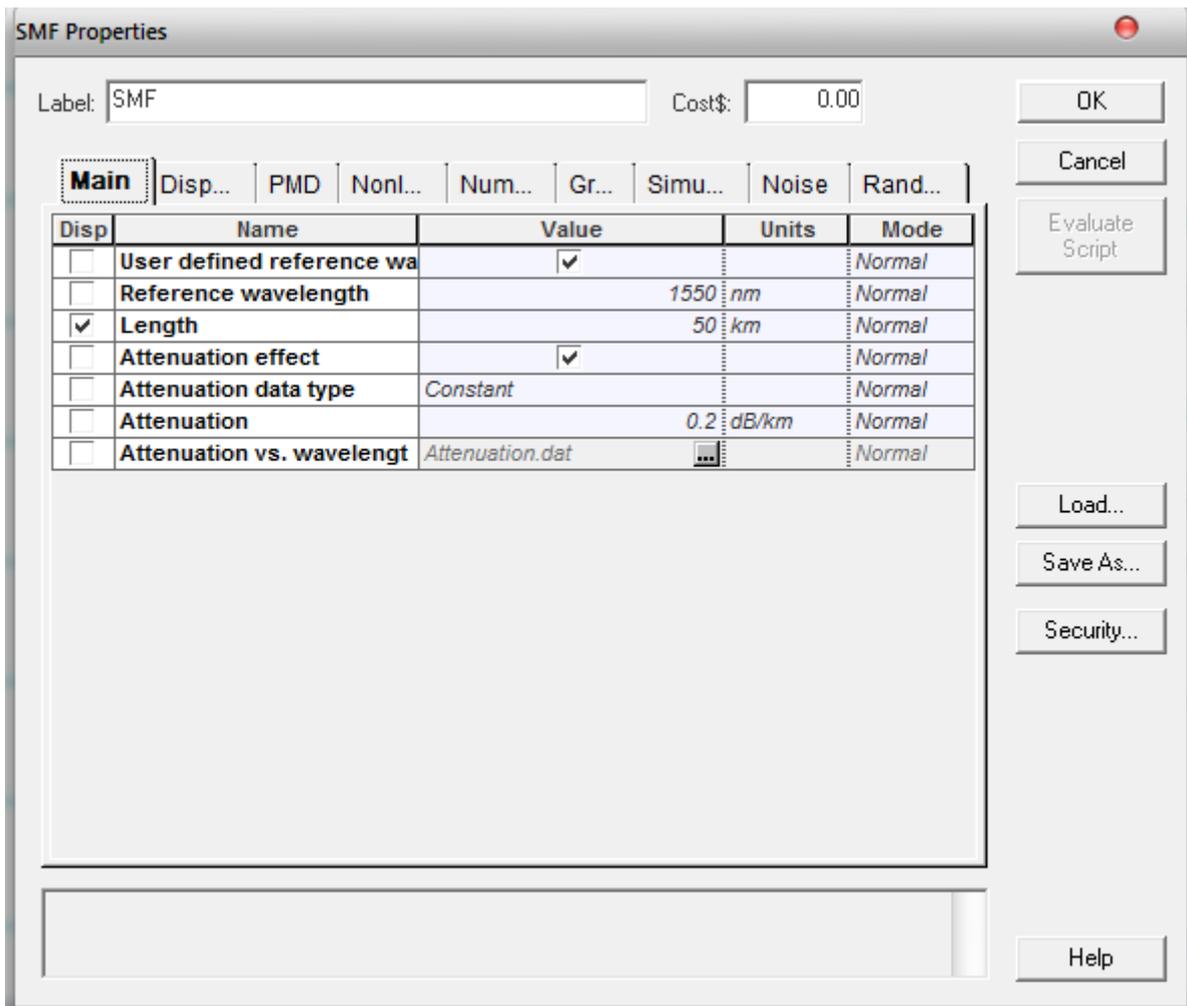


Figure III.2 : Les paramètres de la fibre monomode utilisée

III.3 Présentation des composants utilisés et leurs caractéristiques

La figure III.3 résume les différentes composantes utilisées dans notre simulation.

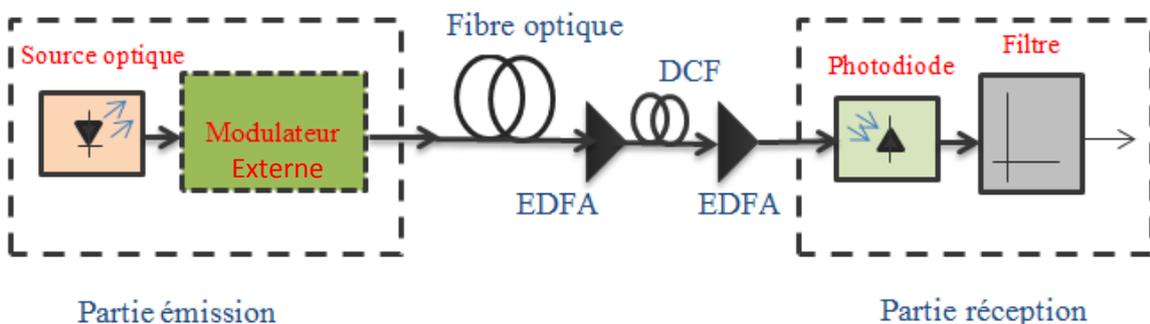


Figure III.3 : Liaison optique point à point

III.3.1 Partie émission

La partie émission est composée principalement des lasers qui fonctionnent en régime continu (CW-Laser), des modulateurs externes et d'un multiplexeur à 16 ports de sortie.

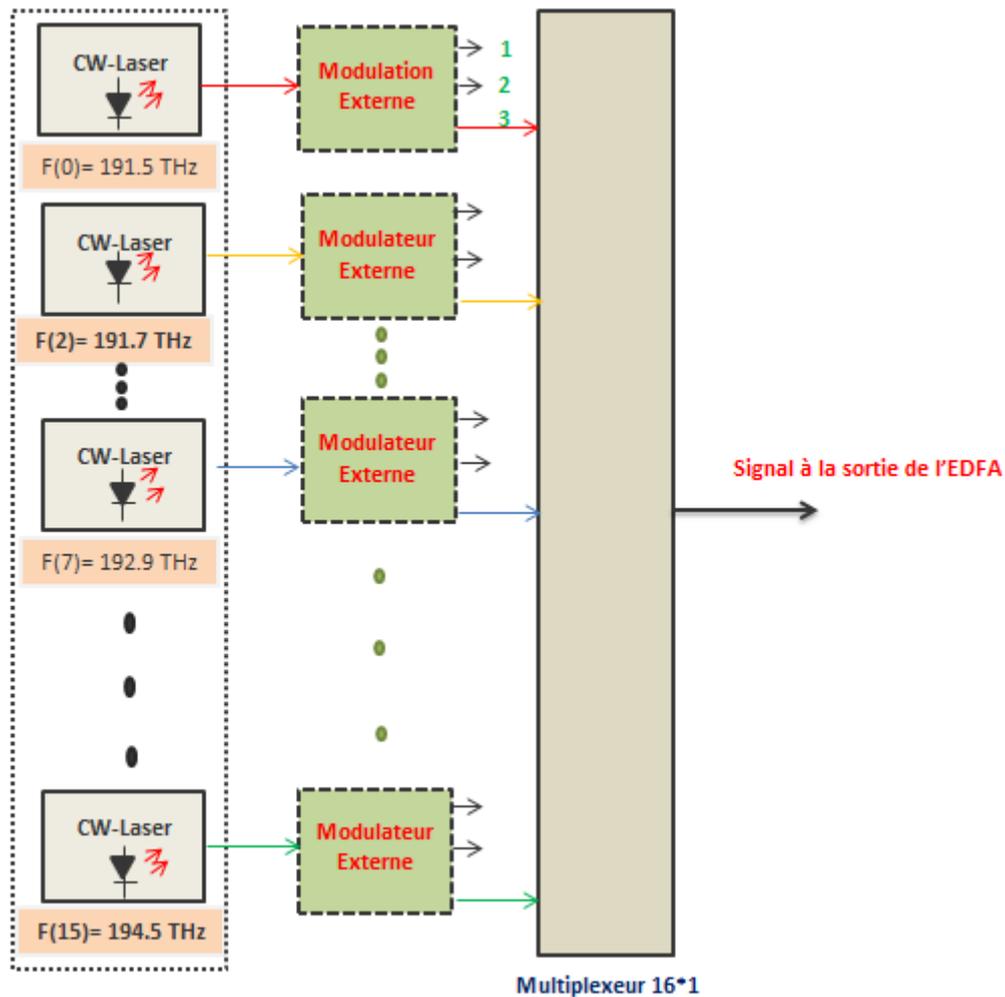


Figure III.4 : Composants dans la partie émission

Les modulateurs externes sont eux aussi composés de générateurs binaires (PRBS ou Pseudo-Random Binary Sequence), de générateurs NRZ ou RZ et de modulateurs Mach-Zehnder.

La figure III.5 représente le schéma d'une modulation externe.

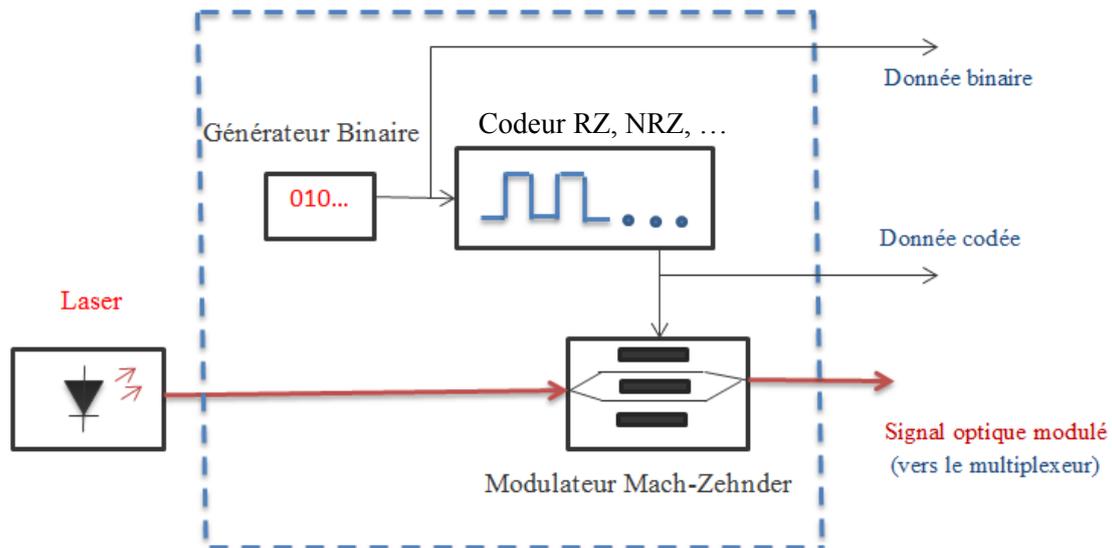


Figure III.5 : Modulateur externe

Dans le CW-laser, la cavité considérée est constituée d'un amplificateur à fibre dopée à l'erbium rebouclé sur lui-même grâce à un coupleur (de puissance), supposé indépendant de la longueur d'onde [4]. Le laser utilisé dans notre simulation est composé de 16 ports de sorties, la fréquence initiale étant fixée à 191.5 THz avec une variation de fréquence entre canaux de 0.2 THz.

a) **Générateur binaire PRBS**

C'est un générateur qui produit une suite de longueur connue, de « 0 » et de « 1 » logiques. Il est dit aléatoire car c'est une suite arbitraire. Cependant, lorsque la suite arrive à son terme, le générateur ne s'arrête pas de fonctionner. La séquence déjà transmise est à nouveau reproduite, d'où le qualificatif de pseudo-aléatoire [17].

b) **Générateur NRZ vs générateur RZ**

Dans le générateur NRZ, la donnée binaire « 1 » est associée à une impulsion optique de durée sensiblement égale au temps symbole (inverse du débit), la donnée « 0 » est associée à l'absence de signal. En pratique on n'a pas une absence totale de signal puisque le taux d'extinction n'est jamais infini.

Le codage NRZ est utilisé pour des débits inférieurs à 10 Gbits/s, utilisé dans beaucoup de systèmes WDM à 2,5 Gbit/s et exige un modulateur externe [14]. La bande passante dans un format NRZ est égale à $\frac{1}{2}$ du débit.

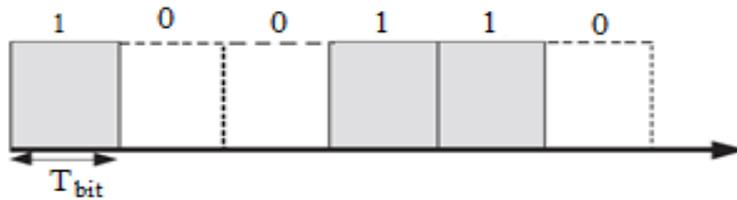


Figure III.6: Format NRZ

Dans le générateur RZ, l'impulsion associée à la donnée « 1 » est de durée nettement inférieure au temps symbole, la donnée « 0 » à l'absence de signal [14]. C'est un format impulsionnel [11].

Utilisé pour des débits plus élevés (au-delà 10 Gbit/s). La bande passante dans un format RZ est égale au débit.

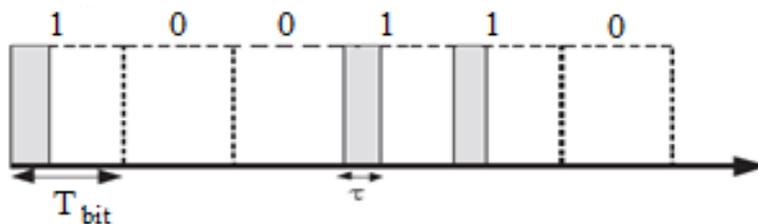


Figure III.7: Format RZ

La supériorité du format RZ sur le format NRZ est le fait qu'à une énergie donnée, la puissance crête est plus forte, ce qui permet de bénéficier de la compensation mutuelle des effets linéaires et non linéaires [14].

c) Modulateur Mach-Zehnder

C'est la mise en série de deux coupleurs entre lesquels on introduit un déphasage commandé par une tension électrique [18].

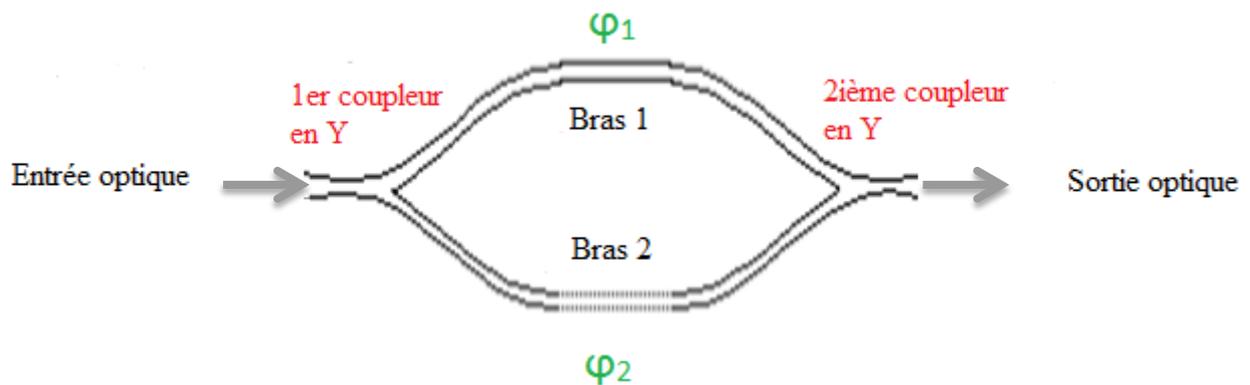


Figure III.8 : Schéma d'un interféromètre de Mach-Zehnder

La technique utilisée pour moduler l'amplitude d'un faisceau consiste à lui faire traverser un interféromètre de Mach-Zehnder dans lequel il est possible de commander la différence de phase entre les deux bras [8].

La lumière est couplée dans deux guides par un coupleur en Y. Les deux faisceaux se recombinaient ensuite dans un deuxième coupleur en Y. L'indice de réfraction du matériau électro-optique, placé sur l'un des bras de l'interféromètre (ou même sur les deux bras), est modifié par l'application d'une tension, entraînant ainsi un déphasage entre les deux faisceaux.

Suivant leur différence de marche (ou phase relative), les deux faisceaux interfèrent de manière constructive (dans ce cas on retrouve toute la puissance optique disponible en sortie) ou destructive (dans ce cas aucune lumière n'est injectée dans le guide de sortie) [8].

III.3.2 Composants entre les parties émission et réception

Dans cette partie, nous avons une fibre monomode d'une longueur d'onde égale à 1550 nm avec une atténuation linéique de 0.2 dB/km et d'une dispersion chromatique de 17 ps/nm/km, une fibre compensatrice d'une longueur d'onde égale à 1550 nm avec une atténuation linéique de 0.5 dB/km et d'une dispersion chromatique (négative) de - 85 ps/nm/km, et enfin deux amplificateurs optiques dopés à l'erbium (EDFA) dans chaque tronçon.

La longueur de la fibre compensatrice (L_{DCF}), avec une dispersion D_{DCF} , est déterminée par la relation suivante :

$$(L_{SMF} \times D_{SMF}) + (L_{DCF} \times D_{DCF}) = 0 \quad [III.1]$$

Où L_{SMF} et D_{SMF} sont respectivement la longueur et la dispersion dans la fibre monomode.

Le 1^{er} amplificateur de gain G_1 compense l'atténuation linéique dans la fibre monomode et le 2^{ème} amplificateur de gain G_2 dans la fibre compensatrice (DCF).

Le gain de l'amplificateur est déterminé par le produit de la longueur de la fibre, placée avant l'amplificateur, et l'atténuation linéique dans la fibre.

III.3.3 Partie réception

La partie réception comprend un démultiplexeur à 16 ports de sortie avec une largeur de bande égale à 16×40 GHz, chaque récepteur étant composé d'une photodiode PIN et d'un filtre de Bessel caractérisé par une limite de fréquence (f_0) de 32 GHz.

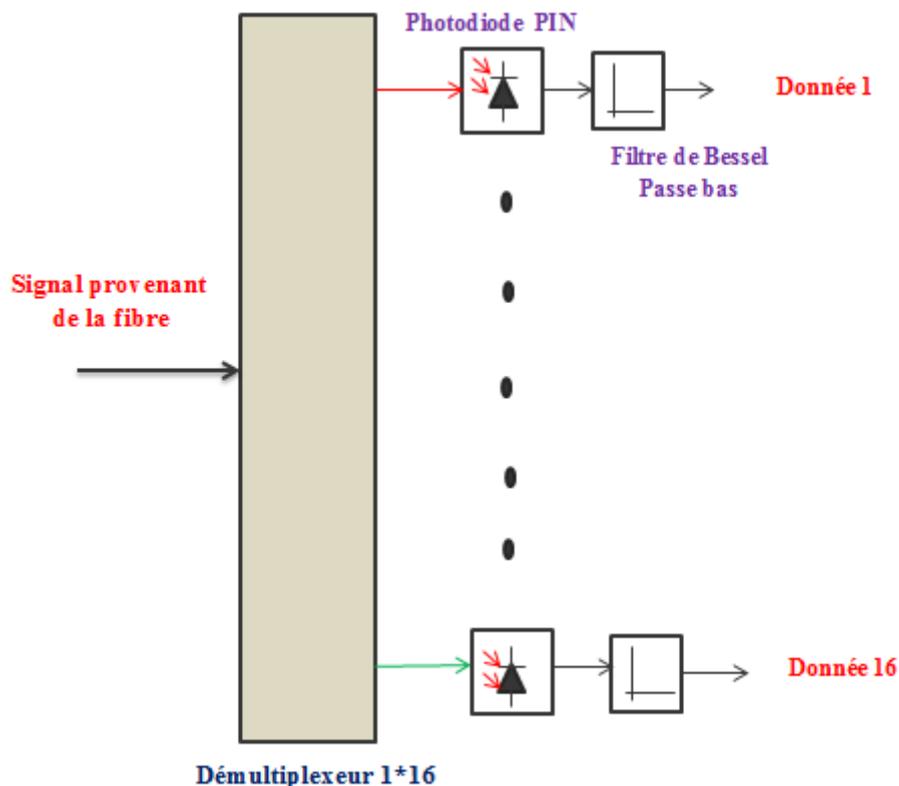


Figure III.9 : Composants dans la partie réception

a) **Filtre de Bessel**

Le terme Bessel désigne un type de réponse du filtre et non un type. Il dispose d'un retard de groupe à plat dans la bande passante.

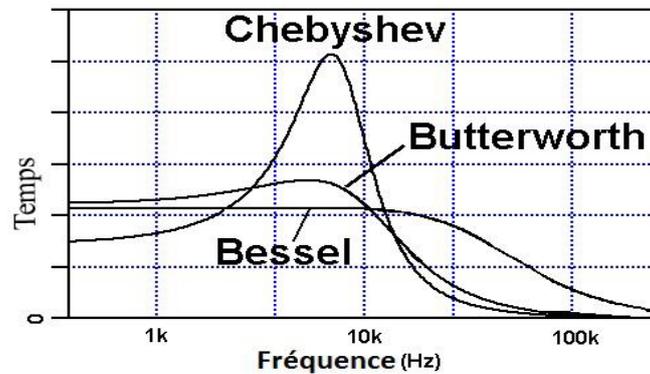


Figure III.10: Illustration des réponses des filtres

C'est la caractéristique des filtres de Bessel qui les rend précieux pour les concepteurs numériques. Très peu de filtres sont conçus avec des ondes carrées à l'esprit. La plupart du temps, les signaux filtrés sont des ondes sinusoïdales, ou suffisamment proche pour que l'effet des harmoniques peuvent être ignorés.

Si avec une forme d'onde harmonique haute contenu est filtré, tel qu'un signal carré, les harmoniques peut être retardé par rapport à la fréquence fondamentale si une réponse de Butterworth ou de Chebyshev est utilisé. La série de Fourier d'une onde carrée est :

$$X(t) = \text{Sin}(\omega_0 t) + \frac{[\text{Sin}(3\omega_0 t)]}{3} + \frac{[\text{Sin}(5\omega_0 t)]}{5} + \dots \quad \text{[III.2]}$$

Cela signifie qu'une onde carrée est une série infinie d'harmoniques impaires, ou sinusoïdes, additionnés pour créer la forme carrée. Évidemment, si une onde carrée doit être transmis sans distorsion, toutes les harmoniques - à l'infini - doit être transmis. Cela signifie que l'onde carrée peut être filtré passe-haut, sans distorsion, si le point 3 dB du filtre est significativement plus faible que le fondamental.

Si l'onde carrée est filtré passe-bas, cependant, la situation change de façon spectaculaire. Harmoniques sera éliminé, la production de distorsion dans l'onde carrée. C'est

le travail du concepteur de décider combien d'harmoniques doit être transmis et ce qui peut être éliminé. Supposons que le concepteur veut garder cinq harmoniques.

La forme d'onde résultante ressemble à ceci:

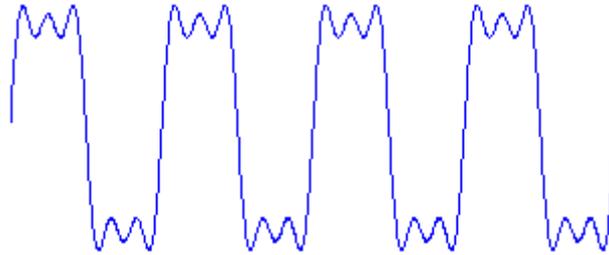


Figure III.11: forme de l'onde résultante

Cela peut être acceptable pour le concepteur - il dépend du moment du bord avant et arrière de la forme d'onde. L'élimination d'harmoniques se traduira par arrondissement des bords, et par conséquent un retard dans les bords d'attaque et de fuite du signal numérique. De plus d'importance, les harmoniques qui sont passés ne seront pas retardés.

Le rapprochement de Bessel a une bande passante en douceur et la réponse bande d'arrêt, comme le Butterworth. Pour le même ordre de filtre, l'atténuation bande coupée du rapprochement de Bessel est beaucoup plus faible que celle de l'approximation de Butterworth.

La caractéristique du filtre est optimisée pour la phase. En effet, cette caractéristique permet d'obtenir un déphasage pratiquement linéaire pour les fréquences à l'intérieur de la bande passante [19].

III.4 Résultats de simulation

Avant de parler du travail effectué, nous allons définir un tronçon qui est une chaîne composée d'une fibre monomode SMF, d'un amplificateur, d'une fibre compensatrice DCF et d'un second amplificateur.

Le travail que nous allons effectuer consiste principalement à faire varier certains paramètres, comme la longueur de la fibre monomode sur un tronçon de fibre optique et de voir leurs influences sur la qualité de la liaison.

Pour étudier la qualité de transmission d'une liaison, deux paramètres sont importants à savoir : le facteur de qualité (Q) et le taux d'erreur binaire (BER).

La figure III.12 représente la liaison optique étudiée dans ce mémoire :

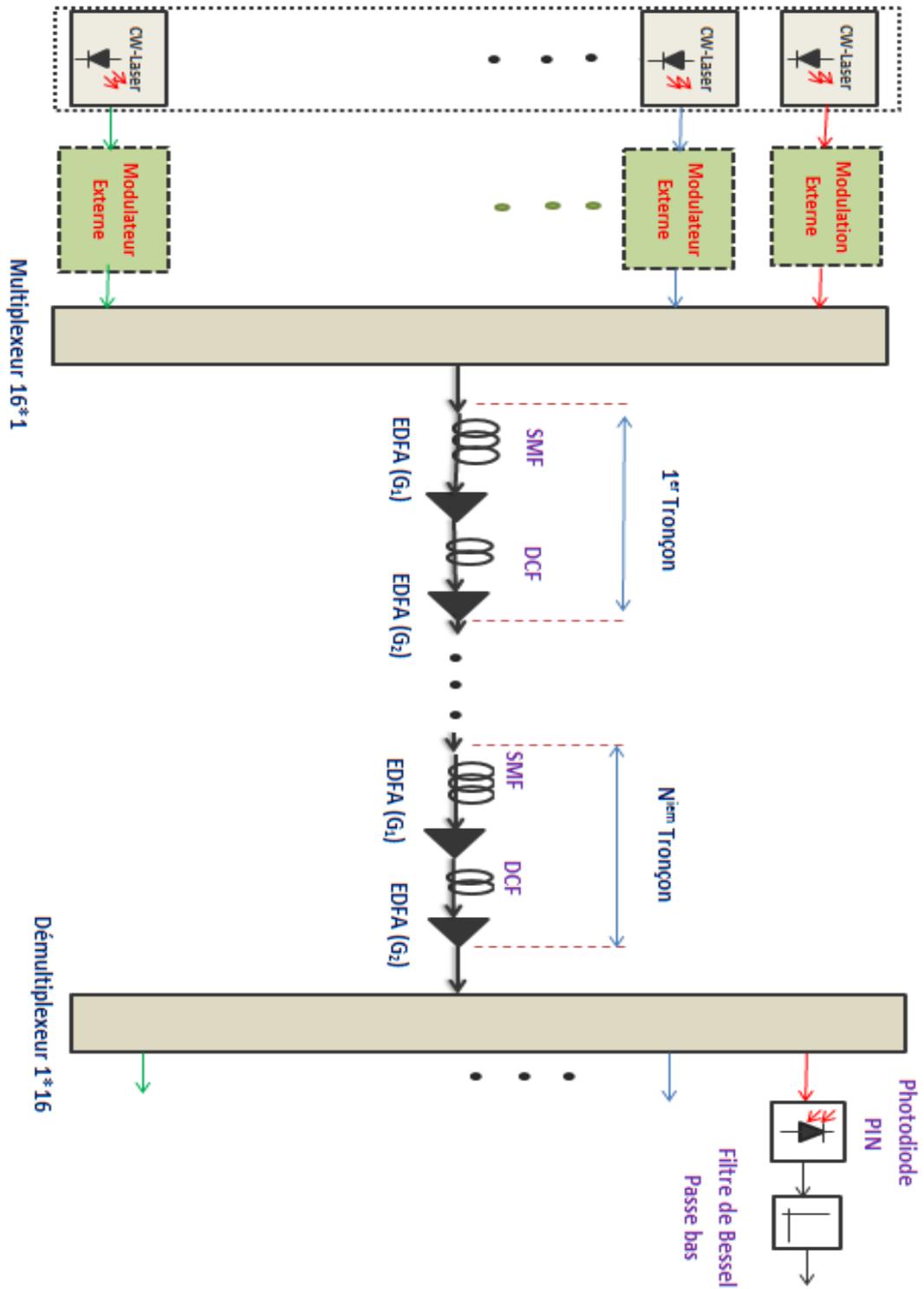


Figure III.12: Schéma de la liaison optique

III.4.1 Qualité de transmission d'une liaison

Pour définir la qualité d'une transmission optique, différents critères existent. Les trois principaux critères de qualité d'un signal transmis sont le diagramme de l'œil, le taux d'erreur binaire BER et le facteur de qualité Q. Ces trois critères sont décrits dans la suite.

a) Le Taux d'Erreur Binaire (TEB) :

La méthode, pour évaluer les performances d'un système, consiste à comparer les bits envoyés avec les bits reçus [3].

$$\text{TEB} = \text{Nombre de bits erronés} / \text{Nombres de bits transmis} \quad [\text{III.3}]$$

Malgré le fait que le taux d'erreur binaire soit une grandeur mesurable, il est impossible à estimer avec un logiciel de simulation. Ce dernier considère la propagation de l'onde optique dans la fibre et calcule l'onde optique en sortie en tenant compte des diverses dégradations de l'onde au cours de sa propagation.

De plus on ne se contente que de quelques bits dans une simulation, il est donc impossible de faire un comptage des erreurs en réalisant une statistique satisfaisante [3].

Le TEB habituellement accepté pour une transmission de bonne qualité est inférieur à 10^{-9} voir inférieur à 10^{-12} .

b) Le Facteur de Qualité :

Cette méthode qui permet de quantifier et d'évaluer le signal sans avoir à compter directement les erreurs. Elle s'appuie sur l'hypothèse gaussienne de la distribution de bruit d'amplitude pour chaque symbole.

Si l'on considère que le bruit est gaussien, qu'on connaît les tensions moyennes (V_0 et V_1) et les variances (σ_0 et σ_1) des niveaux « 0 » et « 1 », le facteur de qualité (Q) est donnée par :

$$Q = (V_1 - V_0) / (\sigma_1 - \sigma_0) \quad [\text{III.4}]$$

Dans la pratique on choisit un seuil de discrimination V_T afin de distinguer le « 1 » et le « 0 » ; ce seuil est choisi au point moyen et correspond à celui qui donne le TEB avec des « 0 » et « 1 » équiprobables ($\sigma_1 = \sigma_0 = \sigma$).

On aura:

$$Q = (V_1 - V_0) / 2\sigma = (V_T - V_0) / \sigma \quad [\text{III.5}]$$

Dans l'hypothèse où la distribution de puissance des symboles est gaussienne, le facteur de qualité est relié au taux d'erreur binaire (TEB) par la relation suivante :

$$\text{TEB} = \frac{1}{2} [\text{erfc} (Q/\sqrt{2})] \quad [\text{III.6}]$$

où **erfc** : fonction d'erreur complémentaire.

c) Diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil est formé par la superposition de tous les symboles binaires du signal émis. Il permet d'avoir une idée sur la qualité du signal en termes de bruit d'amplitude, d'interférences entre symboles, de gigue temporelle.

Le diagramme de l'œil n'a toutefois qu'une valeur qualitative, le critère qui permet réellement d'évaluer de manière quantitative la qualité du signal est le taux d'erreur binaire.

III.4.1.1 Effet de variation de la longueur de la Fibre SMF dans un tronçon

Les mesures sont faites ici en variant la longueur (**Lt**) de la fibre monomode d'un tronçon, dans le format NRZ et le format RZ.

Nous avons 6 tronçons pour une distance de 360 Km le débit de chaque canal est de 40 Gbits/s. Le tracé nous donne les courbes de la figure III.13 :

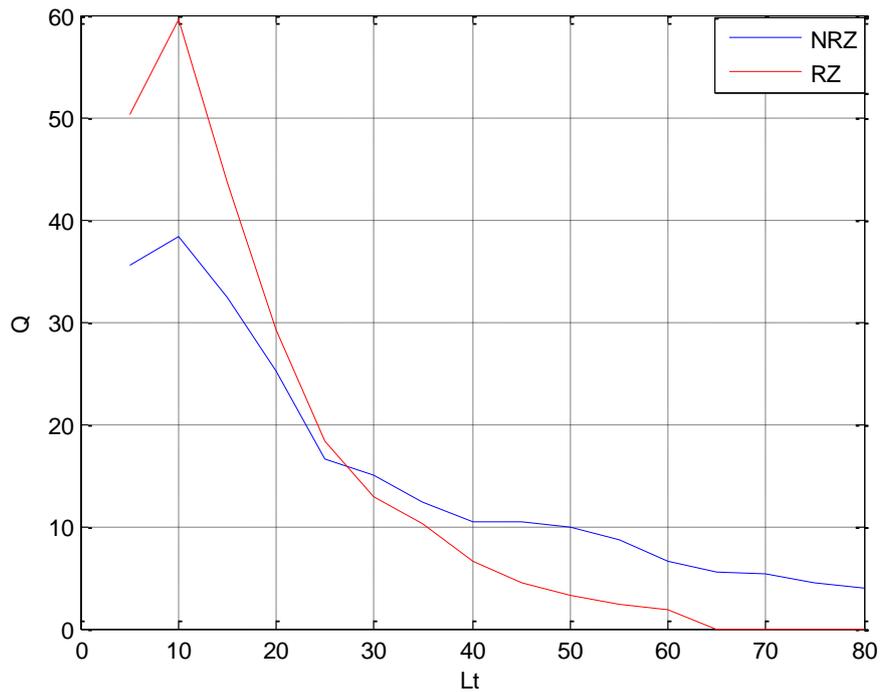


Figure III.13: Etude comparative des formats NRZ et RZ sur Q en fonction de L_t

Sur les graphes de la figure III.13, nous constatons une augmentation du facteur de qualité; le maximum est ainsi atteint à la longueur de 10 km. À partir de la longueur de 25 km, nous remarquons que le signal du format RZ décroît plus rapidement que le signal du format NRZ. Arrivé à la longueur de 65 km, le signal RZ s'affaiblit totalement alors que celui de NRZ continue sa chute.

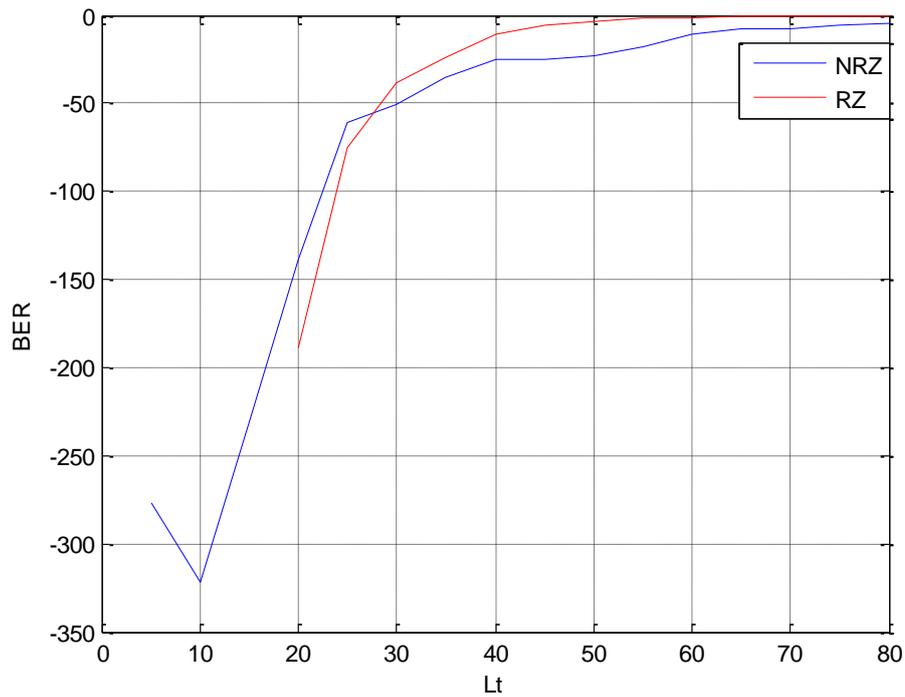


Figure III.14: Etude comparative des formats NRZ et RZ sur le BER en fonction de Lt

On observe que la variation du taux d'erreur binaire dans les deux cas est similaire du point de vue qualitatif, mais quantitativement on s'aperçoit que le meilleur BER est celui du format RZ qui croît plus rapidement que celui du format NRZ.

Ces résultats obtenus sont logiques et peuvent s'expliquer par le fait que l'augmentation de la longueur engendre l'amplification des effets dispersifs dans la liaison, d'où l'atténuation progressive recensée dans la qualité de la transmission.

Les figures III.15 et III.16 représentent les diagrammes de l'œil correspondant aux meilleurs résultats obtenus sur l'étude comparative précédente.

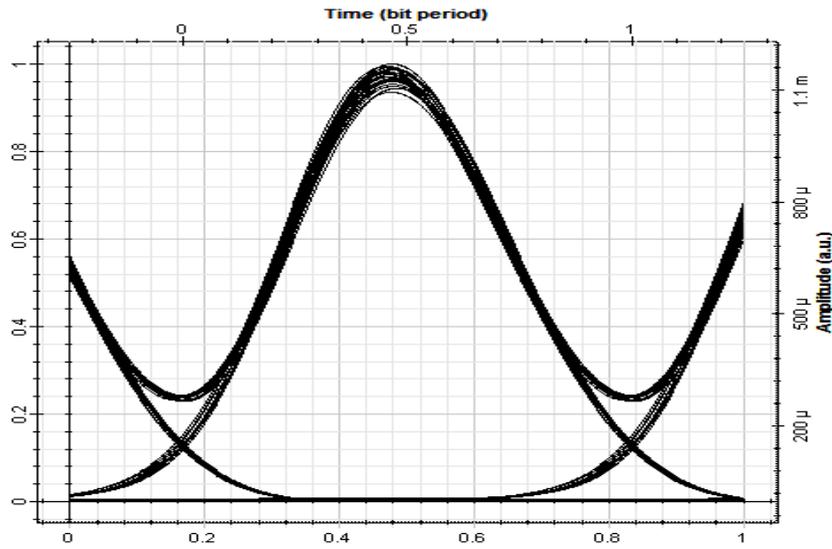


Figure III.15 : Diagramme de l'œil du 1^{er} canal, format RZ

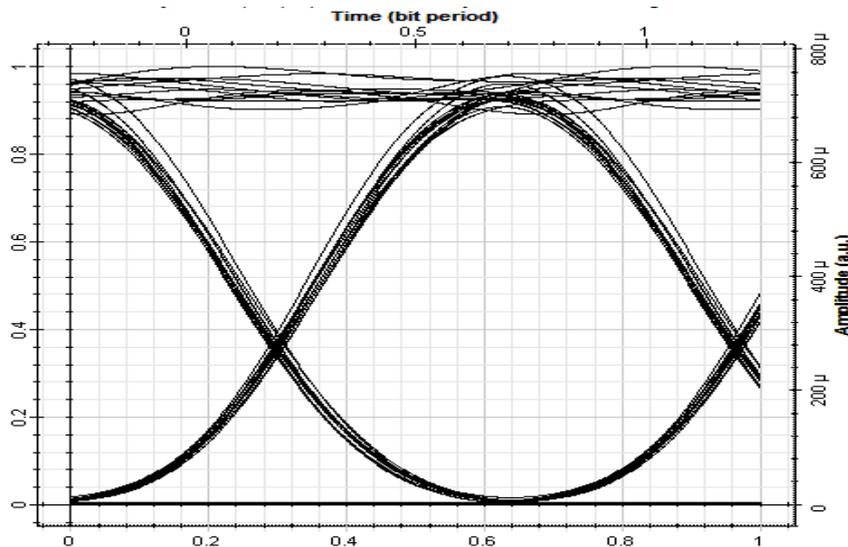


Figure III.16 : Diagramme de l'œil du 1^{er} canal, format NRZ

Les diagrammes de l'œil ci-dessus représentés montrent des fluctuations assez réduites indiquant ainsi une légère différence entre le signal émis et le signal reçu, ce qui confirme l'excellente qualité de transmission.

III.4.1.2 Effet de variation du nombre de tronçons

Les mesures sont faites en variant le nombre de tronçons (Nt), dans le format NRZ et le format RZ.

La longueur de la fibre SMF (d'un tronçon) étant fixée à 50 km et le débit de chaque canal toujours à 40 Gbits/s. Le tracé nous donne les figures III.17 et III.18.

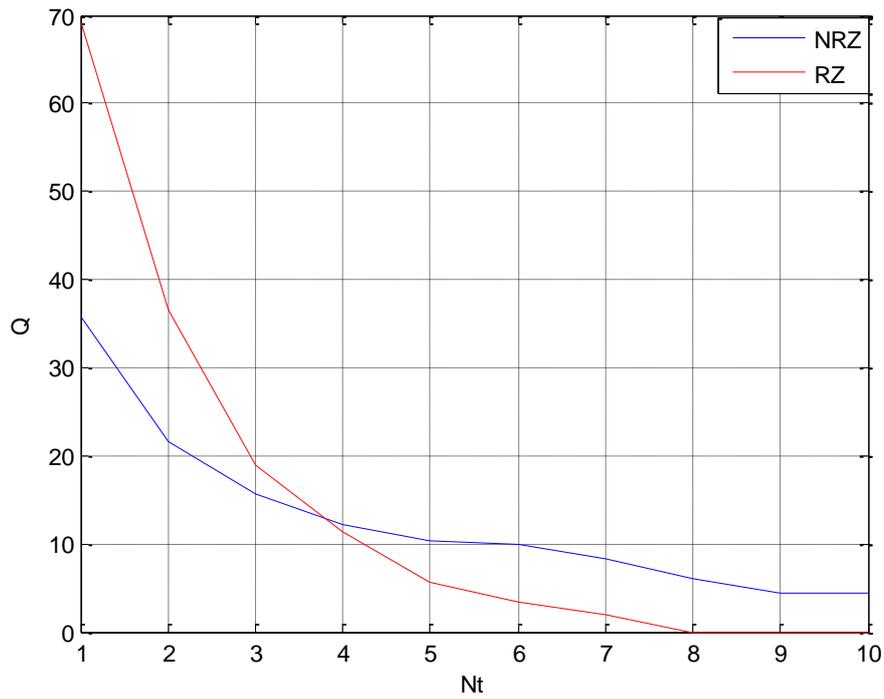


Figure III.17 : Etude comparative des formats NRZ et RZ sur Q en fonction de Nt

Sur ce graphe nous constatons que plus la longueur de la liaison augmente, plus le facteur de qualité diminue.

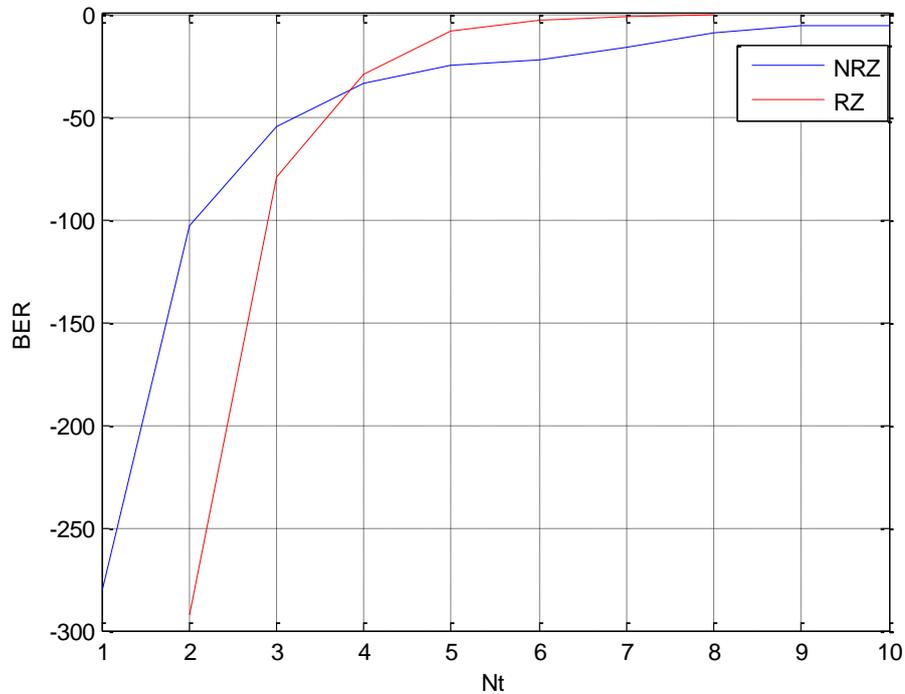


Figure III.18 : Etude comparative des formats NRZ et RZ sur le BER en fonction de Nt

Les deux formats ont presque le même taux d'erreur binaire, cependant on s'aperçoit que le meilleur BER est celui du format RZ qui commence à varier à partir du deuxième tronçon et plus rapidement que celui du format NRZ.

Ici nous pouvons conclure à un affaiblissement de la qualité de liaison dû à la taille du réseau qui augmente. Ceci revient à confirmer, que la longueur (ici de l'ensemble des tronçons) est source de cet affaiblissement.

Les figures III.19 et III.20 représentent les diagrammes de l'œil obtenus pour un tronçon unique, que ça soit avec le format NRZ ou le format RZ.

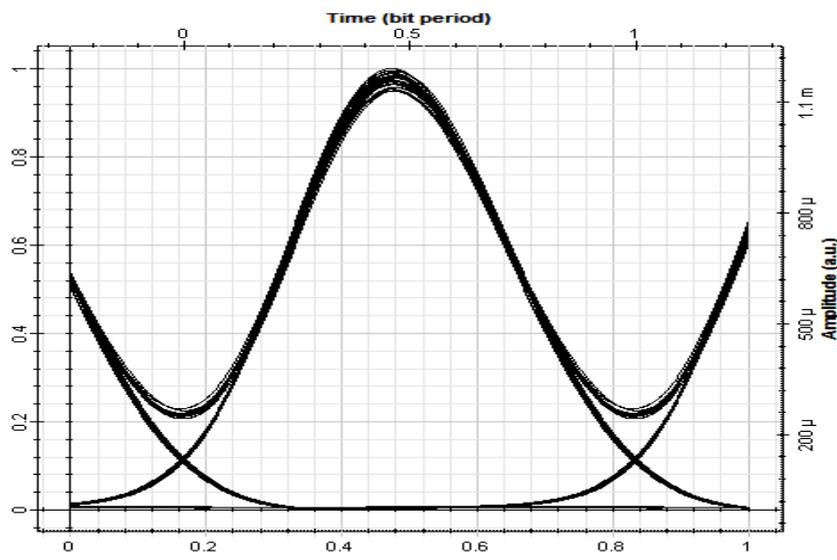


Figure III.19 : Diagramme de l'œil du 1^{er} canal, format RZ

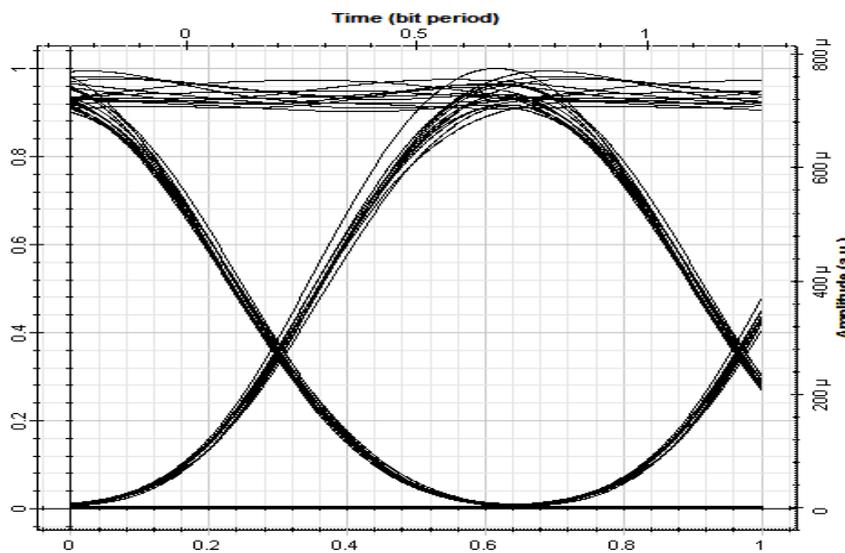


Figure III.20 : Diagramme de l'œil du 1^{er} canal, format NRZ

Dans le cas présent, nous avons obtenus des diagrammes de l'œil ouverts, donc la transmission effectuée est de bonne qualité.

III.4.1.3 Qualité de transmission des différents canaux

Dans ce cas les mesures sont faites pour chaque numéro de canal (N_c), dans le format NRZ et le format RZ.

La longueur de la fibre SMF fixée à 50 km, 6 tronçons et le débit de chaque canal à 40 Gbits/s. Le tracé nous donne les figures III.21 et III.22.

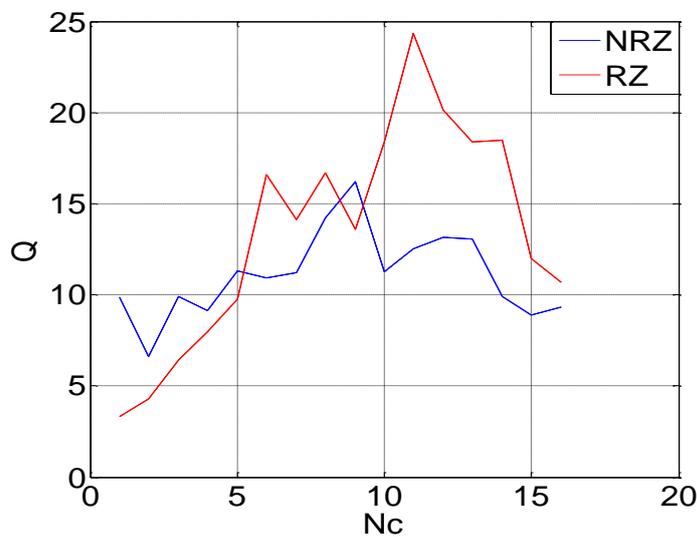


Figure III.21 : Etude comparative des formats NRZ et RZ sur Q par canal

On remarque que le meilleur facteur de qualité du signal est obtenu pour le 11^{ème} canal avec le format RZ, pour le 9^{ème} canal avec le format NRZ; Le format RZ donne un meilleur résultat que le format NRZ. En générale c'est le canal central qui devrait avoir un meilleur facteur de qualité.

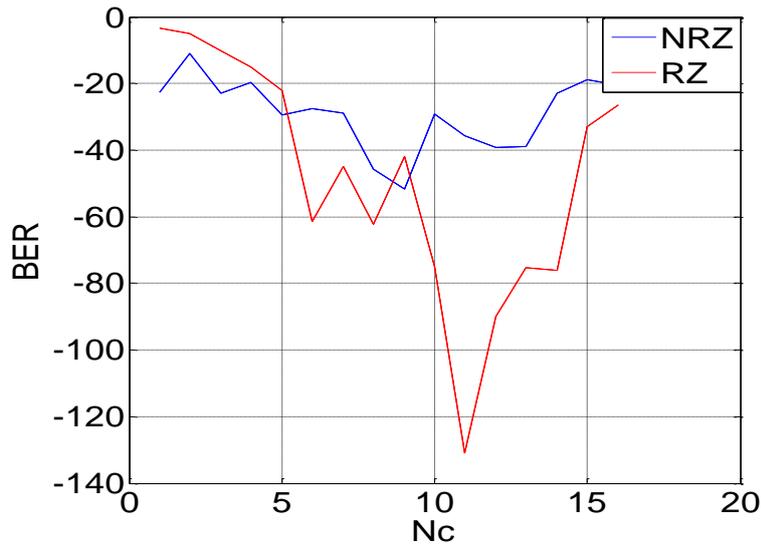


Figure III.22 : Etude comparative des formats NRZ et RZ sur le BER par canal

Les résultats obtenus ici confirment ceux obtenus précédemment car nous remarquons que le minimum du taux d'erreur binaire est obtenu pour le 11^{ème} canal avec le format RZ, pour le 9^{ème} canal avec le format NRZ.

Les diagrammes de l'œil correspondant aux meilleurs résultats obtenus avec les deux formats RZ et NRZ sont représentés sur les figures III.23 et III.24.

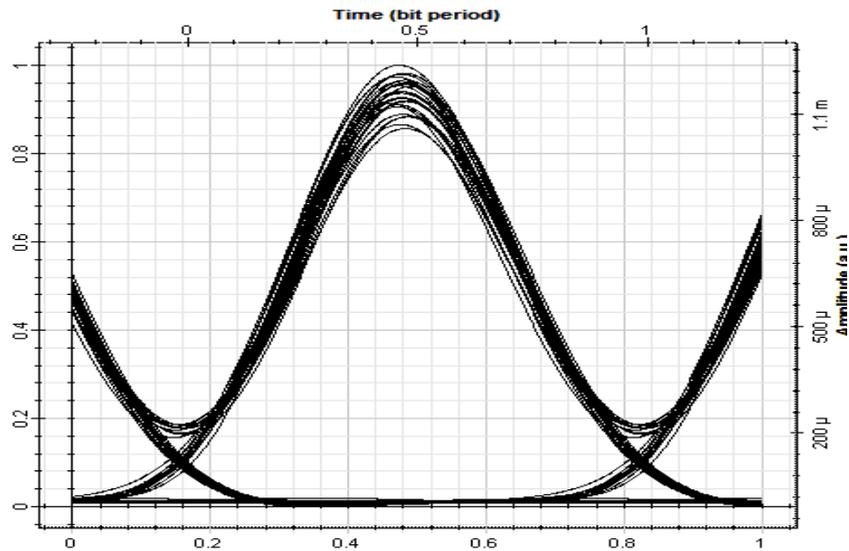


Figure III.23 : Diagramme de l'œil du 11^{er} canal, format RZ

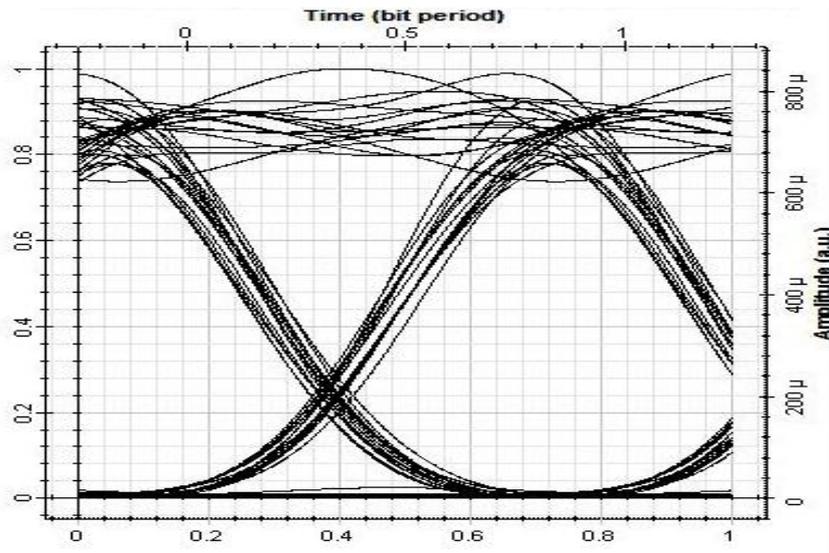


Figure III.24 : Diagramme de l'œil du 9^{er} canal, format NRZ

Nous avons une bonne qualité de transmission due à l'ouverture des diagrammes de l'œil.

III.4.1.4 Effet de variation du débit par canal

Les mesures sont faites ici en variant le débit de donnée de chaque canal, dans le format NRZ et le format RZ.

La longueur de la fibre SMF (d'un tronçon) fixée à 50 km et avec 6 tronçons. Le tracé nous donne les figures III.25 et III.26.

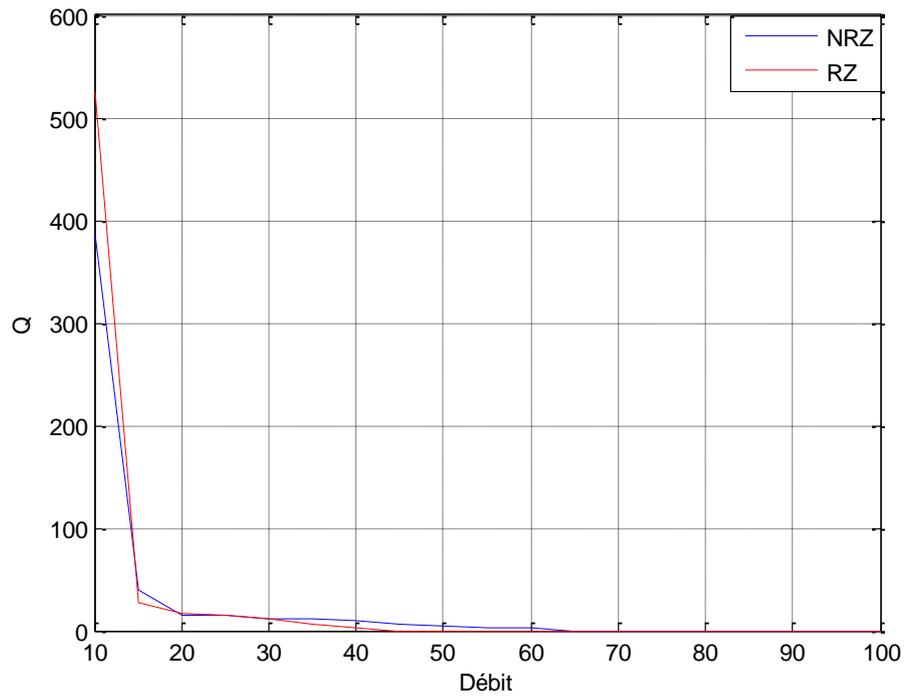


Figure III.25 : Etude comparative des formats NRZ et RZ sur Q en fonction du débit

Sur ce graphe, nous constatons que plus le débit augmente, moins le facteur de qualité est bon pour les deux formats. Pour un débit inférieur à 10 Gbits/s le facteur de qualité est nul. Nous observons aussi une décroissance des deux signaux, celui du format NRZ décroît moins rapidement que celui du format RZ.

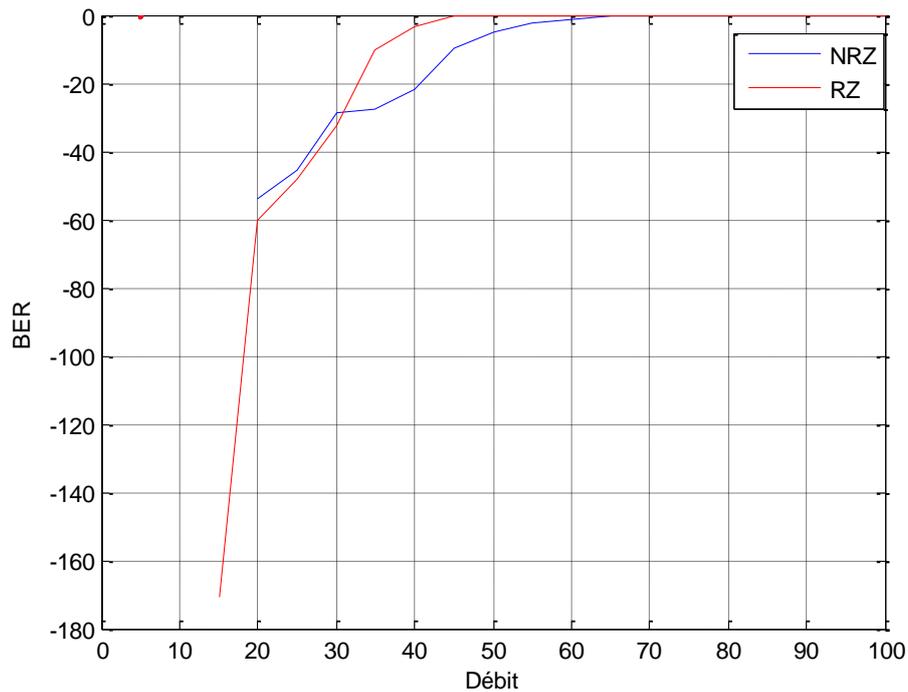


Figure III.26 : Etude comparative des formats NRZ et RZ sur le BER en fonction du débit

Le taux d'erreur du format RZ commence à tendre vers zéro à partir d'un débit de 15 Gbits/s alors que celui de NRZ ne commence qu'à partir de 20 Gbits/s. Du fait que le BER pour le format RZ soit plus acceptable que celui du format NRZ, nous confirmons donc l'efficacité de ce dernier qui a été évoqué théoriquement un peu plus tôt dans ce chapitre.

Les diagrammes de l'œil représentés sur les figures III.27 et III.28 correspondant aux meilleurs résultats obtenus avec un débit de 10 Gbits/s pour les deux formats utilisés.

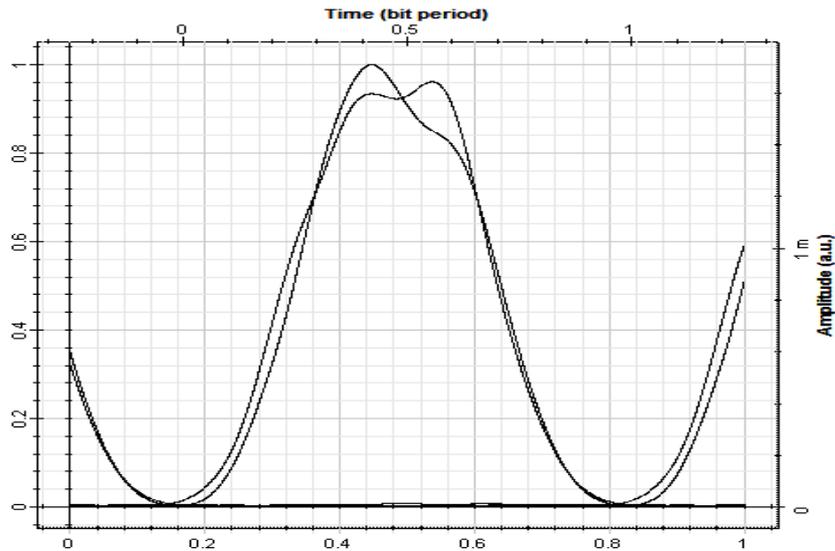


Figure III.27 : Diagramme de l'œil du 1^{er} canal, format RZ

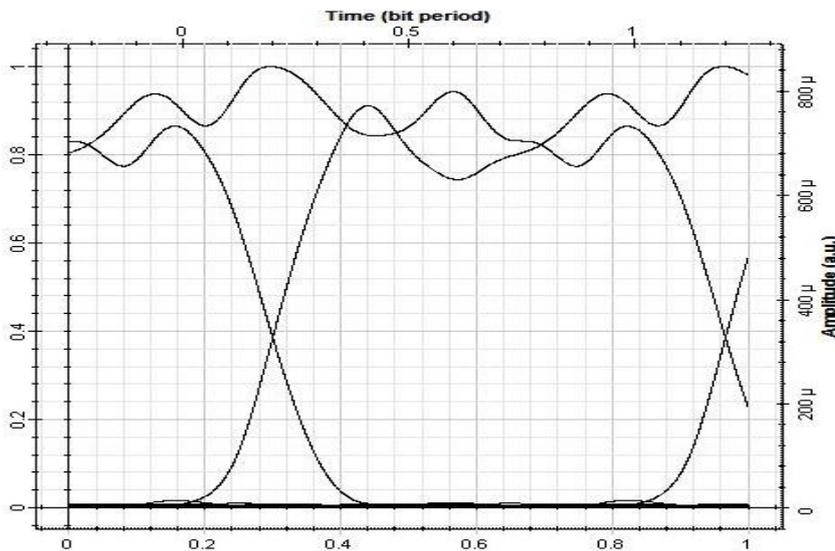


Figure III.28 : Diagramme de l'œil du 1^{er} canal, format NRZ

Les diagrammes de l'œil obtenus dans cette simulation nous indiquent une bonne qualité de transmission.

III.5 Conclusion

L'étude de la liaison optique dans ce chapitre s'est basée sur la variation de la qualité d'une liaison optique en fonction de ses paramètres tels que la longueur de la fibre monomode dans chaque tronçon, le débit des données (débit par canal) et le nombre de tronçons.

Il nous a fallu, pour atteindre ce but, cibler deux critères définissant une bonne transmission optique : le facteur de qualité et le taux d'erreur binaire.

Grâce à ces critères, nous avons constaté que la variation des paramètres entraîne l'amplification des effets dispersifs sur la qualité de la liaison. Pour un bon rendement sur la transmission du signal, il est donc à préconiser de bonnes dimensions tant du côté de la longueur que de celui du débit ajusté par canal.

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives

« L'optique sera au XXI^e siècle ce que l'électronique a été au XX^e siècle ». Telle était la prophétie et le rêve de ceux qui travaillent dans ce domaine ces dernières années. Ce rêve devient réalité. La transmission optique a pris le pas sur toutes les autres solutions comme technologie de transport de l'information, grâce aux progrès en WDM.

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.

Les fibres monomodes et multimodes forment deux classes d'utilisation distinctes avec des émetteurs et un multiplexage qui leur sont propres. Les fibres monomodes nécessitent l'emploi de lasers pour l'émission des signaux lumineux. En revanche, il paraît totalement inutile d'investir dans un équipement aussi coûteux pour des simples fibres multimodes qui ont une portée réduite et qui ne nécessitent pas une telle puissance. La précision du signal généré par le laser fait qu'il convient parfaitement pour le multiplexage WDM. La mise en œuvre du multiplexage WDM sur fibre monomode requiert l'utilisation de plusieurs lasers simultanément puisque chaque laser ne peut émettre que sur une unique longueur d'onde. Le signal émis par chacun d'eux va ensuite être envoyé sur la fibre, et ce indépendamment des autres signaux générés.

Nous avons étudié au court de ce mémoire, une liaison optique haut débit 16 x 40 Gbits/s avec un multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing). Ce multiplexage consiste en l'émission d'un signal lumineux composé de plusieurs longueurs d'onde qui va transiter sur le même canal, ici la fibre optique. De cette façon, on peut aisément augmenter le débit de transmission d'une fibre.

La liaison est composée d'une fibre monomode SMF, d'un amplificateur optique EDFA, d'une fibre compensatrice DCF et d'un second amplificateur optique. Le rôle de l'amplificateur optique et de la fibre compensatrice est de compenser la dispersion au cours de la transmission afin de rendre le plus fidèlement possible le signal émis à la réception.

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 pas 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.

Dans le troisième chapitre, nous avons effectué une série de simulations avec les deux formats NRZ et RZ, en agissant sur des facteurs de la liaison optique comme la longueur de la fibre optique, le nombre de tronçons et le débit par canal. Ceci nous a conduit à dire que la qualité d'une liaison optique est maximisée à une longueur de 10 km par tronçon avec un débit de 40 Gbits/s par canal; un débit de 10 Gbits/s avec une longueur de 50 km par tronçon.

Suite à ces simulations, nous avons conclu qu'en dépit des performances remarquables de la fibre et de l'amplificateur dopé à l'Erbium, le signal finit toujours par s'affaiblir après une certaine distance, le tout est de réduire cet affaiblissement. A chaque record de transmission, de nouveaux effets limitant sont découverts, et de nouvelles parades mises en œuvre pour chacun d'eux.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] BEAUQUIER, B. ; 2000 - Communication dans les réseaux optiques par multiplexage en longueur d'onde. Thèse Doct. Es Sc. Informatique. Univ. NICE - SOPHIA ANTIPOLIS. 188 p.
- [2] HECHT, J.; 1999 - City of Light. The Story of Fiber Optics. Oxford University Press. New York. En ligne : [\[http://www.technoscience.net/?onglet=glossaire&definition=2937\]](http://www.technoscience.net/?onglet=glossaire&definition=2937) (Consulté le 14 Mars 2012).
- [3] HAMINI, A. & MERGHACHE, M.; 2008 – Etude et optimisation d'une liaison par fibre optique longue distance. Mém. Ing. Telecom. Univ. ABB. Tlemcen. 102 p.
- [4] CALVEZ, S. ; 2002 - Laser a fibre pour les télécommunications multiplexées en longueur d'onde : étude de l'accordable en longueur d'onde et de la génération de trains multi-longueurs d'onde d'impulsions par voie électro-optique. Thèse Doct. Sc. Ing. Univ. Franche Comte. 191 p.
- [5] COLOMBIER, F. ; PUGNOUD, C. ; 2005 - Réseaux et routage optiques. Notes de cours. 35p. En ligne : [\[http://www.lirmm.fr/~ajm/Cours/0405/DESS_TNI/Rapports/RapportOptique.pdf\]](http://www.lirmm.fr/~ajm/Cours/0405/DESS_TNI/Rapports/RapportOptique.pdf) (consulté le 14 Mars 2012).
- [6] SGHAIRI, S.; 2008 – Technique de multiplexage en longueur d'onde optique WDM. Mém. Ing. Telecom. Univ. ABB. Tlemcen. 105 p.
- [7] MERZOUK, K. ; 2008 - Étude d'un système bas coût de transmission optique par multiplexage temporel. Thèse Doct. Optique, Optoélectronique et Microondes. Institut Polytechnique de Grenoble. 168 p.
- [8] LAURENT, J. ; 2004 – Communications Optique à très haut débits. Examen Probatoire. Département STIC. Centre de Paris. 64 p.
- [9] FAESSLER, J.-D. ; sd - La fibre optique. En ligne: [\[http://www.estelenerg.org/archives/fibr_optiq.htm\]](http://www.estelenerg.org/archives/fibr_optiq.htm) (consulté le 14 Mars 2012).
- [10] LECOY, P.; 2008 – Télécoms sur fibres optiques. 2^{ième} Ed. Rev. Augm. Lavoisier. Paris. 359 p.

- [11] GAY, M. ; 2006 – Etude théorique et expérimentale de l'impact de la régénération 2R dans un système de transmission optique haut débit. Thèse Doct. Physique. Inst. Nat. Sciences Appliquées. Rennes. 216 p.
- [12] SUEMATSU, S. & IGA, K.-I.; 1984 - Transmissions sur fibres optiques. Ed. Masson. Paris. 197 p.
- [13] VERNEUIL, J.-L. ; 2003 – Simulation de systèmes de télécommunication par fibre optique à 40 Gbits/s. Thèse Doct. Telecom. Hautes Frequences et optiques. Univ. Limoges. 293 p.
- [14] MEUNIER, J.-P. ; 2003 – Télécoms Optique : Composants à fibres systèmes de transmission. Ed. Hermes. Paris. pp.134, 208, 210 et 227.
- [15] GAUTIER, J.- P. ; 1999 - Les réseaux optiques.74p. En ligne : [\[http://1999.ires.org/articles/gautier-te-08-final.pdf\]](http://1999.ires.org/articles/gautier-te-08-final.pdf) (Consulté le 14 Mars 2012).
- [16] CHENIKA, A. & HABI, M.; 2009 – Etude de la dispersion chromatique dans une ligne de transmission par fibre optique. Mém. Ing. ELN. Univ. ABB. Tlemcen. 77 p.
- [17] FOURCADIER, J. F. ; 2000-2004 - Le générateur pseudo-aléatoire. En ligne : [\[http://jf.fourcadier.pagesperso-orange.fr/haut_debit/pseudo/pseudo.htm\]](http://jf.fourcadier.pagesperso-orange.fr/haut_debit/pseudo/pseudo.htm) (Consulté le 01 Juin 2012).
- [18] KHEMIRI, S. ; 2005 – Génération d'impulsions optiques brèves à 40 GHz par mélange à quatre ondes. Rap. de Proj. De fin d'étude. Ing. Télécom. Ecole Supérieur des Communications de Tunis. Tunisie. 59 p.
- [19] LEVASSEUR, J. ; 2006 – Filtres passe-bas. En ligne [\[http://www.cours.polymtl.ca/mec6405/Labo%20A06/Filtres%20pass_e-bas.pdf\]](http://www.cours.polymtl.ca/mec6405/Labo%20A06/Filtres%20pass_e-bas.pdf) (Consulté le 02 Juin 2012).

Résumé

Les lignes de télécommunication optiques ont été reconnues capables de transmettre une énorme quantité d'information, mais de par leur fréquente sollicitation, il devient nécessaire de développer des techniques permettant l'accessibilité à tout public de ce service. Nous entendons par là, les techniques de multiplexages en longueur d'ondes (WDM) et l'utilisation des amplificateurs à fibre dopée à l'erbium. Le but de ce travail consiste à étudier une liaison optique 16 x 40 Gbits/s afin de déterminer la qualité de la transmission, avec deux formats : RZ et NRZ, en prenant en compte certains paramètres de la liaison, à savoir : la longueur de la fibre SMF d'un tronçon de la fibre optique, le nombre de tronçons ainsi que le débit de transmission dans chaque canal.

Mots clés : Multiplexage en longueur d'onde, Amplificateurs optiques, Fibre compensatrice de dispersion, Taux d'erreur par bit, Facteur de qualité

Abstract

The optical lines of telecommunication were recognized capable of passing on (transmitting) an enormous quantity of information, but due to their frequent request, it becomes necessary to develop techniques allowing the accessibility to every public of this service (department). We use here, the techniques of Wavelength Division Multiplexing (WDM) and the amplifiers with fiber doped in the erbium. The purpose of this work consists in studying an optical connection 16 x 40 Gbps to determine the quality of the transmission, with two sizes (formats): RZ and NRZ, by taking into account certain parameters of the connection, namely: the length of the optical fiber SMF of the section, the number of sections as well as the data rate of transmission for every channel (canal).

Keywords: Wavelength multiplexing, Optical amplifiers, Dispersion compensating fiber, Bit Error Rate, Quality factor.

خلاصة

وقد تم الاعتراف خطوط الاتصالات البصرية يمكن أن تنقل كمية هائلة من المعلومات، ولكن عن طريق استدراج العروض المشتركة بينهما، يصبح من الضروري تطوير تقنيات تتيح إمكانية الوصول إلى جميع (، واستخدام مكبرات الصوت WDM الخدمات العامة. ونعسني بهذا، في مضاعفة طول الموجة تقنيات) الألياف مخدر مع الإربيوم. والهدف من هذا العمل هو دراسة وجود صلة بصري 16 × 40 جيجابيت / ، مع الأخذ في الاعتبار المعايير صلة معينة، وهي: NRZ وRZ ثانية لتحديد نوعية البث، مع صيغتين: الألياف من قسم من الألياف البصرية، وعدد من الفروع، فضلا عن معدل انتقال في كل قناة SMF طول

الكلمات الرئيسية: الطول الموجي بالتقسيم، المضخمات الضوئية، تشتت الألياف التعويض، معدل بت خطأ، عامل الجودة