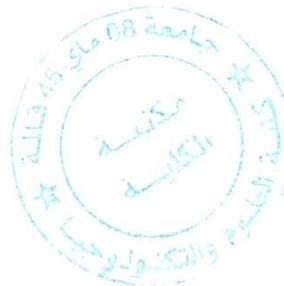


M/RA. 792

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de Fin d'Etude
Pour l'obtention du Diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Techniques**
Filière : **Télécommunications**
Spécialité : **Systèmes de Télécommunications**

**Conception d'un Système de Transmission Multiplexé en
Longueur d'onde par OPTISYSTEM**



CHERAIET Zeyneb

Présenté par :

LAYADA Amel

Sous la direction de :

Dr. HAMDI Rachid

MAI 2013

13/2956

Remerciements

Nous remercions en premier lieu notre encadreur Mr. HAMDJ RACHID pour m'avoir proposé ce sujet. Et pour son encadrement au quotidien, son aide et son soutien, qui a toujours su me remettre sur le chemin de la rigueur scientifique.

Nous remercions Dieu

De nous avoir accordé des connaissances de la science et de nous avoir aidé à réaliser ce travail.

Au terme de ce modeste travail nous tenons à remercier chaleureusement et respectivement, tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste projet de fin d'étude.

Nous tenons à remercier tous les enseignants qui nous ont suivis durant notre formation.

Merci à tous

Table des matières

Introduction	01
Chapitre I : Les techniques de multiplexage dans les systèmes de transmissions optiques	
I.1. Introduction	04
I.2. Le Multiplexage	04
I.3. Techniques de multiplexage en optique	05
I.3.1. Multiplexage temporel	05
I.3.2. Multiplexage en longueur d’onde WDM	08
I.3.3. Multiplexage par répartition de code	09
I.3.4. Multiplexage par division de polarisation (PDM)	11
I.3.5. Multiplexage par répartition orthogonale de fréquence (OFDM)	13
I.3.6. Multiplexage par répartition spatial	15
I.4. Conclusion	16
Chapitre II : Le multiplexage en longueur d’onde (WDM)	
II.1. Introduction	19
II.2. Le principe de multiplexage WDM	19
II.3. Les différentes technologies WDM	19
II.4. Structure générale d’un système de transmission WDM sur fibre optique	20
II.4.1. Le module d’émission	21
II.4.1.1. Diodes laser	21
II.4.1.1.1. Le laser à rétroaction distribuée (DFB)	22
II.4.1.1.2. Le laser à réflecteur de Bragg distribué (DBR)	23
II.4.1.2. Modulateur	24
II.4.1.2.1. Modulation directe	24
II.4.1.2.2. Modulation externe	24
II.4.2. Multiplexeurs / démultiplexeurs optiques	26
II.4.2.1. Différents types de multiplexage en longueur d’onde	26
II.4.2.1.1. Multiplexage à filtre optique	27
II.4.2.1.2. Multiplexage à coupleurs sélectif	30
II.4.2.1.3. Multiplexage à réseau de diffraction	31
II.4.3. Support de transmission : La Fibre optique	33
II.4.3.1. Fonctionnement de la fibre	33
II.4.3.1.1. La réflexion totale interne	34
II.4.3.1.2. Propagation de la lumière dans une fibre	35
II.4.3.2. Différents types de fibre optique	35
II. 4.3.2.1. Les fibres multimodes	35
II. 4.3.2.2. Les fibres monomodes	36
II. 4.3.2.3. Les fibres micro-structurées	37
II.4.3.3. Caractéristiques de la fibre optique	38
II.4.3.3.1. Atténuation	38

II.4.3.3.2. Dispersion.....	39
II.4.3.3.3. Phénomènes non linéaires.....	40
II. 4.4. La fibre compensatrice de dispersion (DCF).....	41
II. 4.5. L'amplificateur.....	41
II.4.5.1. Composants pour l'amplification optique.....	42
II.4.5.1.1. Composant EDFA.....	42
II.4.5.1.2. Module d'amplification Raman.....	43
II.4.5.1.3. Amplificateur optique à semiconducteur (AOS).....	43
II.4.6. Les OXC (Optical Cross Connect).....	44
II.4.7. Les Multiplexeurs optiques à insertion/extraction (OADM).....	45
II.4.7.1. Circulateur optique.....	45
II.4.7.2. Les réseaux de Bragg.....	46
II.4.7.3. ROADM à base de WB.....	46
II.4.7.4. ROADM à base de WSS.....	47
II.4.8. Le module de réception.....	48
II.4.8.1. Principe de la photodétection.....	48
II.4.8.2. Types de photodiodes.....	49
II.4.8.2.1. Les photodiodes PIN.....	49
II.4.8.2.2. Les photodiodes à avalanche APD.....	49
II.5. Conclusions.....	50

Chapitre III : Présentation du logiciel OPTISYSTEM

III.1. Introduction.....	52
III.2. Domaines d'applications.....	52
III.3. Dispositifs et principales fonctionnalités.....	53
III.3.1. Bibliothèque de composants.....	53
III.3.2. Intégration avec des outils logiciels d'Optiwave.....	53
III.3.3. Représentation du signal mixte.....	53
III.3.4. Algorithmes de qualité et de performance.....	53
III.3.5. Outils de visualisations avancées.....	53
III.3.6. Moniteurs de données.....	54
III.3.7. Simulation hiérarchique de sous-systèmes.....	54
III.3.8. Langage de script puissant.....	54
III.3.9. Etat de l'art du calcul des flux de données.....	54
III.3.10. Page de rapport.....	54
III.3.11. Le projet de loi de matériaux.....	55
III.3.12. Dispositions multiples.....	55
III.3.13. AWG Bidirectionnel.....	55
III.3.14. Composants de micro-onde.....	55
III.3.15. Fibres optiques et amplificateurs.....	55
III.3.16. Optique en espace libre(FSO).....	55
III.3.17. Constellation et diagrammes polaires.....	55
III.4. Interface de l'Utilisateur Graphiques (GUI).....	56
III.4.1. Utilisation de la bibliothèque de composants.....	57
III.4.2. Connexion des composants.....	58
III.4.3. Visualisation des résultats.....	59
III.4.4. Connexion de visualiseurs.....	59
III.4.5. Paramètres de composants.....	60
III.4.6. Modification des unités de paramètres.....	61

III.4.7. Exécution de la simulation	61
III.4.8. Affichage de résultats à partir du visualiseurs.....	62
III.4.9. Sauvegarde des graphes.....	63
III.4.10. Sauvegarde des résultats de la simulation.....	63
III.5. Conclusion.....	65

Chapitre IV : Simulation et discussion

IV.1. Introduction.....	67
IV.2. Etude d'un système WDM (sans amplification ni compensation de dispersion).....	67
IV.2.1. Effet du débit et de la distance parcourue sur la qualité de la liaison.....	73
IV.2.1.1. Effet du débit.....	73
IV.2.1.2. Effet de la distance.....	73
IV.3. Etude d'un système WDM (avec amplification et compensation de dispersion).....	75
IV.4. Conclusion.....	82
Conclusion générale.....	84

Liste des figures et tableaux

Figure I.1 : la fonction de multiplexage dans sa forme la plus simple.....	04
Figure I.2 : Exemple d'un système de multiplexage TDM à deux canaux.....	05
Figure I.3 : L'émission dans le Système OTDM pour N utilisateurs.....	06
Figure I.4 : Le système de Multiplexage OTDM pour 4 utilisateurs.....	07
Figure I.5 : La Réception dans un Système OTDM pour N utilisateurs.....	08
Figure I.6 : Exemple d'un réseau typique WDM.....	09
Figure I.7 : Diagramme du codage des données d'un utilisateur.....	10
Figure I.8 : Différentes techniques CDM.....	10
Figure I.9 : Chaîne de transmission en OCDM.....	11
Figure I.10 : Système de multiplexage par division de polarisation (PDM).....	12
Figure I.11 : Diagramme conceptuel pour un système générique de CO-OFDM.....	14
Figure I.12 : L'architecture d'un système de transmission SDM avec FMF.....	16
Figure II.1 : Le principe du multiplexage en longueur d'onde.....	19
Figure II.2 : Le système WDM avec les différents espacements entre longueurs d'onde..	20
Figure II.3 : Structure générale d'un système de transmission WDM sur fibre optique...	21
Figure II.4 . Diagramme d'une diode laser à semi-conducteur polarisée en direct avec substrat de GaAs et des couches barrières d'AlGaAs.....	22
Figure II.5 : Laser à rétroaction distribuée (DFB).....	23
Figure II.6 . Schéma d'un laser DBR 3 Sections composé d'une section active, d'une section passive de phase et d'une section avec un réseau de Bragg.....	24
Figure II.7 . Schéma simplifié d'un modulateur de Mach-Zehnder.....	26
Figure II.8 : Courbe de transmission d'un filtre dichroïque (0,8/1,3 μm).....	27
Figure II.9 : Courbe de transmission d'un filtre Fabry-perot.....	28
Figure II.10 : Multiplexage à filtre optique.....	29
Figure II.11 : Démultiplexeur à filtre optique.....	29
Figure II.12 : Multiplexeur à filtre avec lentille à G.I.....	29
Figure II.13 : Coupleur optique en x 2 :2.....	30
Figure II.14 : Coupleur en arbre (1 : N).....	30
Figure II.15 : Multiplexeur à coupleur en arbre.....	31
Figure II.16 : Démultiplexeur à coupleur en arbre 1 : N.....	31
Figure II.17 : Multiplexeur à coupleur en étoile N : N.....	31
Figure II.18 : Schéma de principe d'un réseau de diffraction en réflexion.....	32
Figure II.19 : Demux/Mux à réseau de diffraction à la configuration de Littrow.....	33
Figure II.20 : Réfraction d'un rayon lumineux pour $\theta_1 < \theta_c$, le rayon incident est aussi partiellement réfléchi dans le premier milieu, b) rayon critique lorsque $\theta_1 = \theta_c$ c) réflexion totale interne pour $\theta_1 > \theta_c$	34
Figure II.21 : Propagation d'un rayon lumineux dans une fibre optique.....	35
Figure II.22 : Structure d'une fibre multimode à saute d'indice.....	36
Figure II.23 : Structure d'une fibre multimode à gradient d'indice.....	36
Figure II.24 : Structure d'une fibre monomode.....	37
Figure II.25 : Structure des fibres à cristaux photoniques.....	37
Figure II.26 : Différentes catégories de fibres à cristaux photoniques.....	38
Figure II.27 : Schématisation du fonctionnement d'un amplificateur EDFA.....	42
Figure II.28 : Schématisation du fonctionnement de l'amplification Raman.....	43
Figure II.29 : Schématisation du fonctionnement de la technologie AOS.....	44

Figure II.30 : Schéma de principe d'un OXC.....	44
Figure II.31 : Exemple de brasseur réalisé à base de micro miroirs 2D.....	45
Figure II.32 : Schéma de principe des OADM.....	45
Figure II.33 : Les circulateurs optiques.....	46
Figure II.34 : Les OADM à réseaux de Bragg.....	46
Figure II.35 : Architecture B&S d'un ROADM.....	47
Figure II.36 : ROADM utilisant WSS.....	48
Figure II.37 : Photodiode PIN.....	49
Figure II.38 : Structure d'une photodiode à avalanche	50
Figure III.1 Interface Graphique de l'Utilisateur.....	57
Figure III.2 Ajout d'un modulateur Mach-Zehnder à la disposition.....	58
Figure III.3 Connexion de composants.....	58
Figure III.4 Ajout d'un visualiseur oscilloscope à la disposition.....	59
Figure III.5 Connexion de visualiseurs.....	60
Figure III.6 Les paramètres des composants.....	60
Figure III.7 Modification des unités des paramètres.....	61
Figure III.8 Exécution de la simulation.....	62
Figure III.9 Affichage les résultats à partir d'oscilloscope.....	62
Figure III.10 Les données d'exportation.....	63
Figure III.11 La zone de dialogue options.....	64
Figure III.12 Enregistrement des résultats du projet et de la simulation.....	64
Figure IV.1 Synoptique du système WDM étudié.....	67
Figure IV.2 Le signal émis à la sortie du générateur NRZ du canal 1.....	68
Figure IV.3 Modulation directe du laser.....	69
Figure IV.4 Le spectre optique et (à gauche) et le signal optique (à droite) à la sortie du laser du canal 1.....	69
Figure IV.5 Le spectre optique à la sortie du multiplexeur.....	70
Figure IV.6 Le spectre optique à la sortie de la fibre.....	70
Figure IV.7 Les spectres optiques à la sortie du démultiplexeur, a) pour le canal 1, b) pour le canal 2, c) pour le canal 3, d) pour le canal 4.....	71
Figure IV.8 Le signal (à gauche) et le diagramme de l'œil (à droite) à la sortie de la photodiode du canal 1.....	72
Figure IV.9 Le signal (à gauche) et le diagramme de l'œil (à droite) après filtrage du canal 1.....	72
Figure IV.10 Diagramme de l'œil et facteur de Qualité du signal en sortie du canal 1 pour différents débits avec une fibre de longueur $L=100\text{Km}$	73
Figure IV.11 Diagramme de l'œil et facteur de Qualité du signal en sortie du canal 1 pour différentes longueurs de la fibre à un débit $D=2.5\text{Gbis/s}$	74
Figure IV.12. Variation du facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre de transmission.....	74
Figure IV.13 Variation du facteur de qualité en fonction du débit de transmission.....	75
Figure IV.14 Synoptique du système WDM étudié avec la fibre de compensation DCF et l'amplificateur EDFA.....	76
Figure IV.15 Allure des signaux en divers points du système à un débit égale 155Mbit/s	78
Figure IV.16 Diagramme de l'œil et facteur de Qualité du signal en sortie du canal 1 pour différents débits avec une fibre de longueur $L=150\text{Km}$	79
Figure IV.17 Variation du facteur de qualité en fonction du débit de transmission avec amplification et compensation de dispersion.....	79

Figure IV.18 Synoptique du système WDM avec le modulateur Mach-Zender.....	81
Figure IV.19 Diagramme de l'œil en sortie du système, a) pour un débit=10Gbit/s, b) pour un débit=40Gbit/s.....	81
Tableau IV.1 Paramètres caractéristiques de la fibre de compensation et de la fibre SMF	76

Abbreviations

ADC: Analog-to-Digital Converter
APD: Avalanche Photodiode
AWG: Arrayed Waveguide Grating
BER: Bit Error Rate
CD: Chromatic Dispersion
CDM: Code Division Multiplexing
CIDF: Component Iteration Data Flow
CO-OFDM: Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplexing
DAC: Digital-to-Analog Converter
DCF: Dispersion Compensating Fiber
DFT: Discrete Fourier Transform
DGD: Differential Group Delay
DQPSK: Differential Quaternary Phase-Shift Keying
DSP: Digital Signal Processing
DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier
ETDM: Electrical Time Division Multiplexing
FDM: Frequency Division Multiplexing
FMF: Few-Mode Fiber
FSO: Free Space Optics
FTTx: Fiber to The x
GUI: Graphical User Interface
IDFT: Using Inverse Discrete Fourier Transform
IL: Insertion Loss
LPF: Low-Pass Filter
MCF: Multi-Core Fiber
MCM: Multi-Marrier Modulation
MIMO: Multiple-Input Multiple-Output
MMF: multi-mode fiber
MZMs: Mach- Zehnder modulators
OADM: Optical Add/Drop Multiplexer

OCDM: Optical Code Division Multiplexing
OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSA: Optical Spectrum Analyzer
OSNR: Optical Signal-to-Noise Ratio
OSP: Orthogonal Frequency Division Multiplexing Symbol Phase
OTDM: Optical Time Division Multiplexing
OTR: Optical-To-RF
OXC: Optical Cross Connect
PBC: Polarization Beam Combiner
PBS: Polarization Beam Splitter
PC: Polarization Controller
PDC: Polarization Chromatic Dispersion
PDM: Polarization Division Multiplexing
PIN: Positive-Intrinsic-Negative
PMD: Polarization Mode Dispersion
PON: Passive Optic Network
QPSK: Quaternary Phase-Shift Keying
RF OFDM: Radio Frequency Orthogonal Frequency Division Multiplexing
ROADM: Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer
RoF: Radio Over Fiber
RTO: RF-To-Optical
RWA: Routing and Wavelength Assignement
RZ: Return to Zero
SCM: Subcarrier Multiplexing
SDH: Synchronous Digital Hierarchy
SDM: Space-Division Multiplexing
S-DMUX: Spatial-Mode Demultiplexer
SE: Spectral Efficiency
SMF: Single-Mode Fiber
S-MUX: Spatial-Mode Multiplexer
TDM: Time Division Multiplexing
WDM: Wavelength-Division Multiplexing
UIT-T : Union Internationale des Télécommunications- Branche de standardisation des Télécommunications

Introduction générale

Introduction générale

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

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

Ces systèmes ont permis d'accroître les débits de transmission grâce à des techniques de multiplexage en longueur d'onde (WDM), en code (CDM), en temporel (TDM), par division de polarisation (PDM), par répartition orthogonale de fréquence (OFDM), ou encore par répartition spatial (SDM).

Au début des années 90 est apparue l'idée de transmettre l'information sur plusieurs longueurs d'onde au lieu d'une seule à l'intérieur d'une même fibre optique. C'est le multiplexage en longueurs d'onde (Wavelength Division Multiplexing). Cette solution présente le double avantage d'augmenter de manière significative les débits de transmission, puisqu'ils sont multipliés par le nombre de canaux, et de pouvoir être mise en œuvre à moindre coût sur les fibres optiques déjà installées. Les premiers systèmes utilisant cette technique, avec un débit de 2,5 Gbit/s par canal, ont été installés dès 1995 par tous les grands opérateurs mondiaux dans leurs réseaux de transport pour faire face à la croissance du trafic. Les longueurs d'onde, étaient situées dans une fenêtre spectrale de 1,53 μm à 1,56 μm , choisie pour deux raisons majeures liées à l'atténuation du signal sur les longues distances parcourues. D'une part, l'absorption de la silice est faible autour de 1,55 μm . D'autre part, dans cette fenêtre, il est possible d'utiliser des amplificateurs optiques à fibre dopée Erbium. Les amplificateurs, installés à intervalles réguliers sur le parcours, rendent possible la transmission sur de très longues distances. Ils ont été suivis rapidement par des systèmes à $N \times 10$ Gbit/s dès le début des années 2000 et, dix ans plus tard, des équipements offrant un débit de 40 Gbit/s par canal étaient commercialement disponibles. Autour de 2005 apparaît une nouvelle génération de systèmes, toujours basés sur le multiplexage en longueur d'onde,

mais dans lesquels les techniques de compensation électronique permettent de surmonter des obstacles à la montée en débit. Le débit de 100 Gbit/s est d'ores et déjà disponible. Aujourd'hui des techniques de multiplexage et formats de modulation offrent un débit de 400 Gbit/s par canal.

Le projet de ce mémoire consiste à comprendre l'effet du débit et la longueur sur un système de transmission multiplexé en longueur d'onde en se basant sur la simulation du système à l'aide du logiciel OPTISYSTEM qui simplifie la tâche en donnant des critères permettant de quantifier la qualité de transmission d'un tel système

Ce mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier présente l'ensemble des techniques de multiplexage dans les systèmes de transmissions optiques.

Le second chapitre est consacré un système de transmission multiplexé en longueur d'onde où on décrit les différents composants intervenant dans ce système de transmission optique longue portée en expliquant leur fonctionnement.

Le troisième chapitre sera destiné à la présentation du simulateur OPTISYSTEM.

Enfin, le dernier chapitre portera sur la simulation d'un système de transmission multiplexé en longueur d'onde avec présentation des résultats de simulation permettant de visualiser les performances atteintes.

Chapitre I :
Les techniques de multiplexage
en optique

I.1. Introduction

La bande passante potentielle d'une fibre optique, définie comme la fenêtre sur laquelle l'atténuation reste suffisamment faible pour permettre la transmission, est très importante. Elle est de 15 THz autour de chacune des fenêtres 1.55 μm et 1.3 μm . Théoriquement, on peut atteindre des débits extrêmement élevés. Cependant, l'utilisation de cette capacité rencontre de nombreux problèmes, ne serait-ce que la dégradation due à l'interférence entre symboles provoquée par la dispersion de la fibre qui devient de plus en plus importante lorsque le débit augmente, et le traitement électronique des signaux avant la modulation et après la détection.

C'est pourquoi diverses solutions ont été imaginées pour profiter des capacités de la fibre optique et donc augmenter le transfert d'informations sur un même support. Dans la plupart des cas, le principe reste identique : utiliser N signaux au débit nominal D équivalent en termes de capacité à un signal au débit $N \cdot D$: c'est ce qu'on appelle le multiplexage. Les débits transportés sont désormais plus importants. Le signal concentré des flux d'origines diverses est appelé signal multiplex.

Pour préserver l'intégrité de chaque signal sur le canal, le multiplexage introduit entre les signaux une séparation temporelle, spatiale ou fréquentielle.

I.2. Le Multiplexage

Le multiplexage est une opération essentielle dans un système de communication où les multiples utilisateurs transmettent des données simultanément sur un lien simple qui peut être soit un câble coaxial, une fibre, un canal radio ou satellite. Son objectif est d'augmenter la capacité de transmission du support et diminuer les coûts du système.

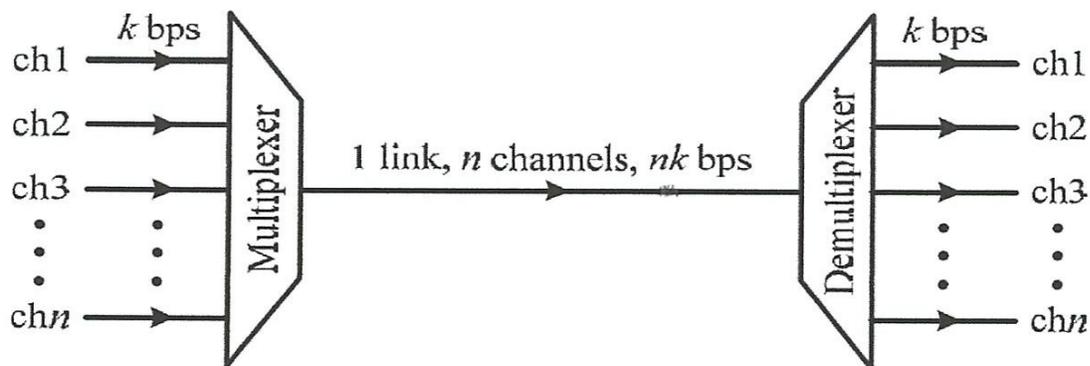


Figure. I.1 la fonction de multiplexage dans sa forme la plus simple [1].

La figure I.1 illustre la fonction de multiplexage dans sa forme la plus simple. Dans un multiplexeur, il y a n entrées. Le multiplexeur combine ces entrées d'une manière telle qu'elles puissent être séparées. Le démultiplexeur effectue le processus inverse que celui du multiplexeur pour séparer les données multiplexées, et les fournit aux lignes de sortie appropriées. Si chaque entrée du multiplexeur porte des données numériques de k bps, le débit cumulé ou le taux du lien est $n*k$.

I.3. Techniques de multiplexage en optique

I.3.1. Multiplexage temporel

Plusieurs signaux de débit binaire bas peuvent être multiplexés ou combinés pour former un signal de débit binaire élevé en partageant le temps. Puisque le milieu est traversé par divers signaux entrants décalés dans le temps, cette technique est généralement appelée multiplexage temporel (TDM). Lorsque cette opération est mise en œuvre dans le domaine électrique, elle est appelée Électrique TDM (ETDM). Exemple d'un système de multiplexage TDM à deux canaux est montré sur la figure I.2.

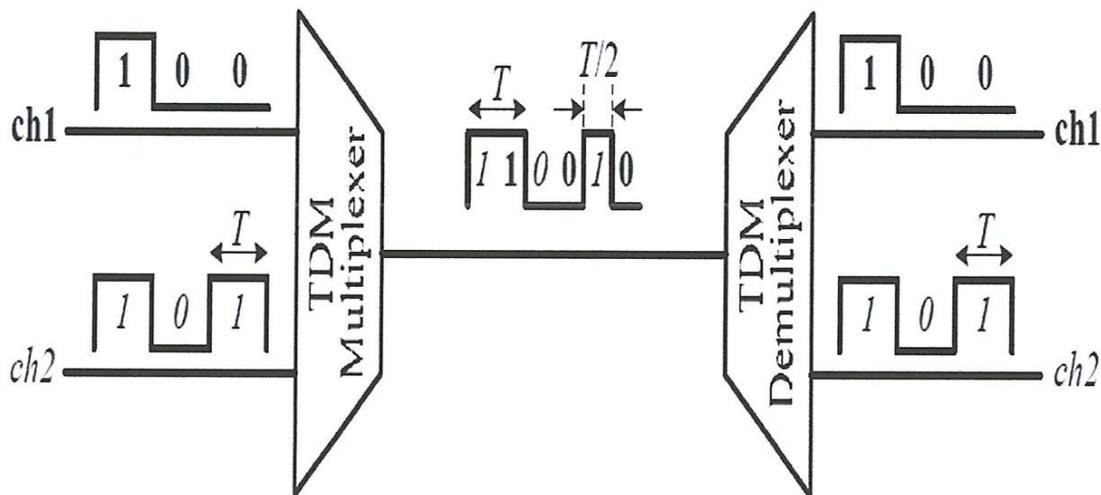


Figure I.2 Exemple d'un système de multiplexage TDM à deux canaux [1].

Dans les systèmes TDM, si un nombre n d'utilisateurs avec une même largeur d'impulsion T_s (secondes) est multiplexée, la largeur d'impulsion des signaux multiplexés est T/n . En TDM, le multiplexeur et le démultiplexeur doivent fonctionner à une fréquence égale au débit binaire total cumulé, qui est n fois plus rapide que le débit binaire d'un seul utilisateur.

Le multiplexeur intercale les canaux généralement à faible vitesse pour obtenir un flux de vitesse plus élevée. L'entrelacement peut être effectué sur un bit-par-bit (figure I.2) ou

paquet par paquet. La synchronisation est exigée pour les deux cas, car au niveau du terminal de réception, les flux numériques entrants doivent être divisés et distribués vers les canaux de sortie appropriés. A cet effet, le terminal de réception doit pouvoir correctement identifier le moment de chaque bit. Ceci exige du système de réception de se synchroniser de façon unique dans le temps avec le début de chaque trame, à chaque emplacement dans une trame, et chaque bit à l'intérieur d'une trame. Ceci est obtenu par l'addition de bits d'encadrement et de synchronisation sur les bits de données. Ces bits font partie des bits supplémentaires [1].

Le multiplexage temporel optique (OTDM) a un concept similaire au TDM électrique, sauf qu'il est mis en œuvre dans le domaine optique. Le système OTDM (Figure I.3) est constitué à l'émission d'une source laser qui émet des impulsions optiques de durée T_c . Ces impulsions sont appliquées à l'entrée d'un modulateur optique, commandé par un signal électrique de durée T_b qui représente les données à transmettre d'un utilisateur. Le débit des données D est tel que :

$$D = \frac{1}{T_b} \ll \frac{1}{T_c}$$

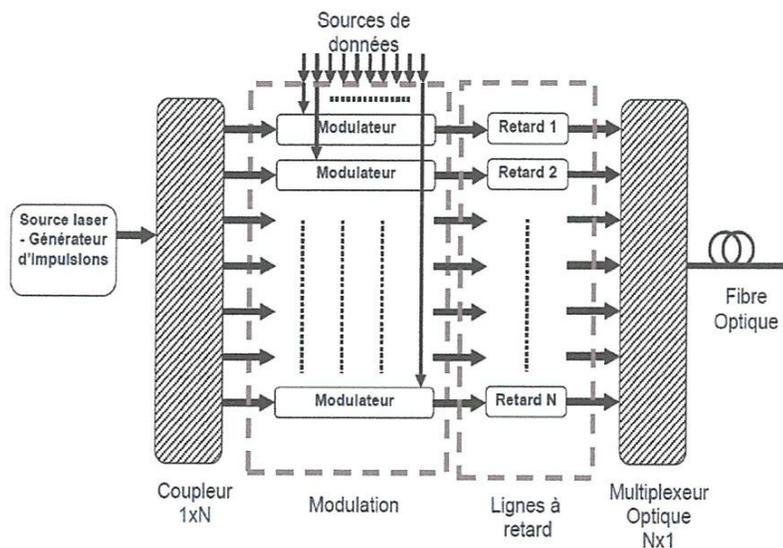


Figure. I.3 L'émission dans le système OTDM pour N utilisateurs [2].

Pour un système à N utilisateurs, les trains optiques en sortie des modulateurs sont décalés en temps et multiplexés en un train optique unique de débit $R = N \times D$ Bit/s envoyé dans le milieu de transmission, la fibre optique.

Par exemple pour un système de $N=4$ utilisateurs de débit 10 Mbit/s (Figure I.4) chacun, on peut obtenir en sortie un multiplex temporel tel que le débit à l'entrée de la fibre soit 40 Mbit/s. La source laser doit émettre au débit D , des impulsions ultracourtes de largeur :

$$T_c = 1/40 \cdot 10^6 = 25ns .$$

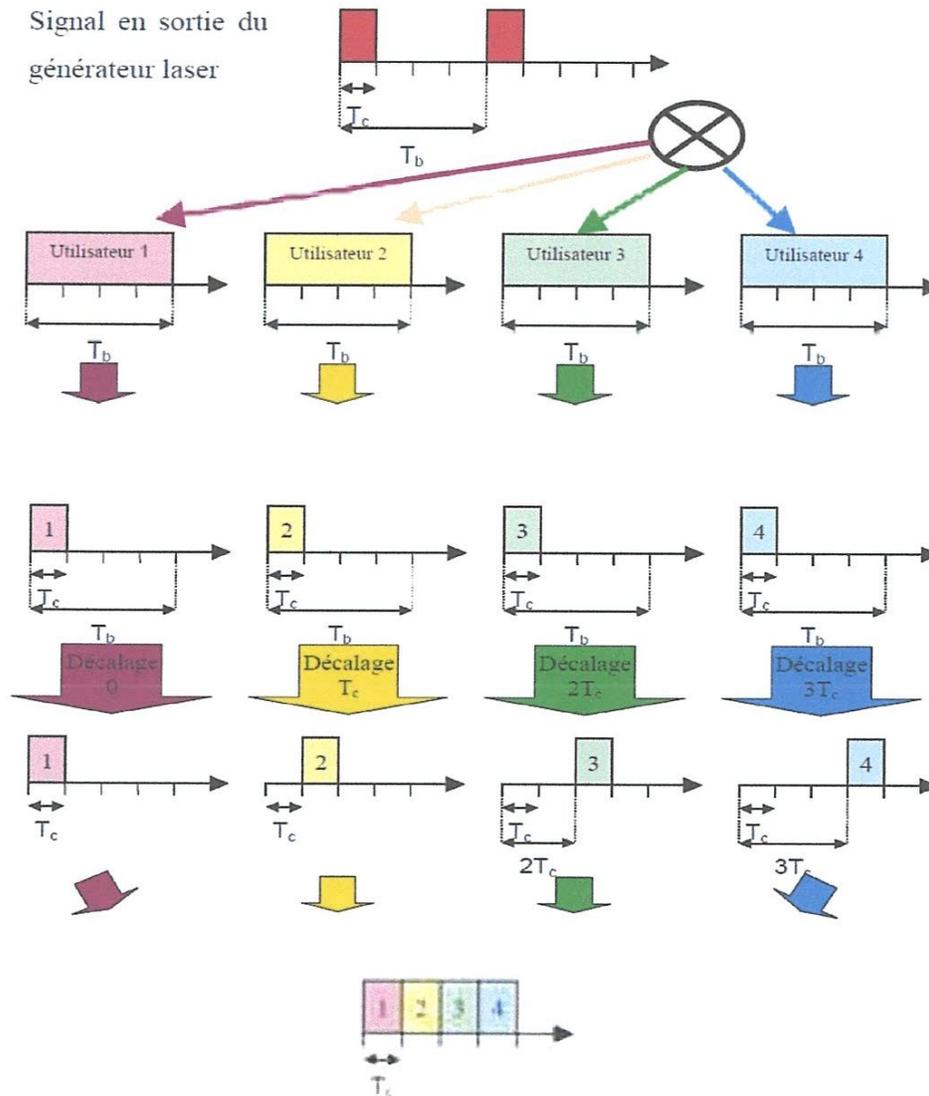


Figure. I.4 Le système de Multiplexage OTDM pour 4 utilisateurs [2].

Pour récupérer en réception par démultiplexage temporel les informations d'un utilisateur, le système nécessite un signal de synchronisation du rythme des données émises T_b (Figure I.5) [2].

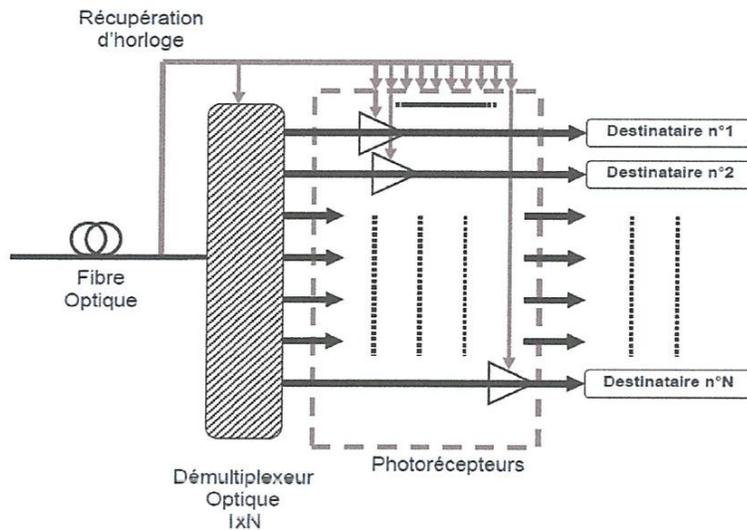


Figure. I.5 La Réception dans un Système OTDM pour N utilisateurs [2].

OTDM nécessite des impulsions très étroites de type RZ pour pouvoir intercaler les données de différents utilisateurs dans un intervalle de bit. Ces impulsions étroites exigent une largeur spectrale plus élevée. En outre, ce système devient vulnérable à la dispersion chromatique (CD) et à la dispersion de mode de polarisation (PMD) [3].

I.3.2. Multiplexage en longueur d'onde WDM

Dans les systèmes de multiplexage en longueur d'onde (WDM), différents utilisateurs indépendants transmettent des données sur une seule fibre en utilisant différentes longueurs d'onde [4,5].

Conceptuellement, l'arrangement de WDM, qui est illustré sur la figure I.6 est semblable au multiplexage par division de fréquence (FDM) utilisé dans les faisceaux hertziens et les systèmes satellites. Au niveau du côté émetteur, les n données des utilisateurs indépendants sont modulées sur n porteuses optiques, chacune ayant une longueur d'onde unique λ . Ces longueurs d'onde peuvent être espacées selon les normes d'ITU-T. Un multiplexeur de longueur d'onde combine ces signaux optiques et les couple entre eux dans une seule fibre.

À l'extrémité de réception, un démultiplexeur est nécessaire pour séparer les signaux optiques dans des canaux appropriés.

La capacité totale d'une liaison WDM dépend du nombre de canaux pouvant être espacés dans la fenêtre de transmission disponible. Dès les années 80 et avec l'avènement des lasers accordables qui ont une largeur de raie très étroite, on peut avoir des espacements

entre canaux très étroits. C'est la base du Dense WDM (DWDM). La figure I.6 montre un réseau typique WDM.

L'inconvénient principal du WDM est l'utilisation des canaux à faible efficacité spectrale du fait qu'une longueur d'onde est exigée par utilisateur. Par conséquent, pour n utilisateurs en multiplexage en longueurs d'onde, n sources lasers avec n filtres sont nécessaires, ce qui augmente le coût de système. Le but de toutes les autres techniques de multiplexage et formats de modulation sont d'augmenter l'utilisation de canal et/ou la capacité de canal des systèmes de WDM [1,4].

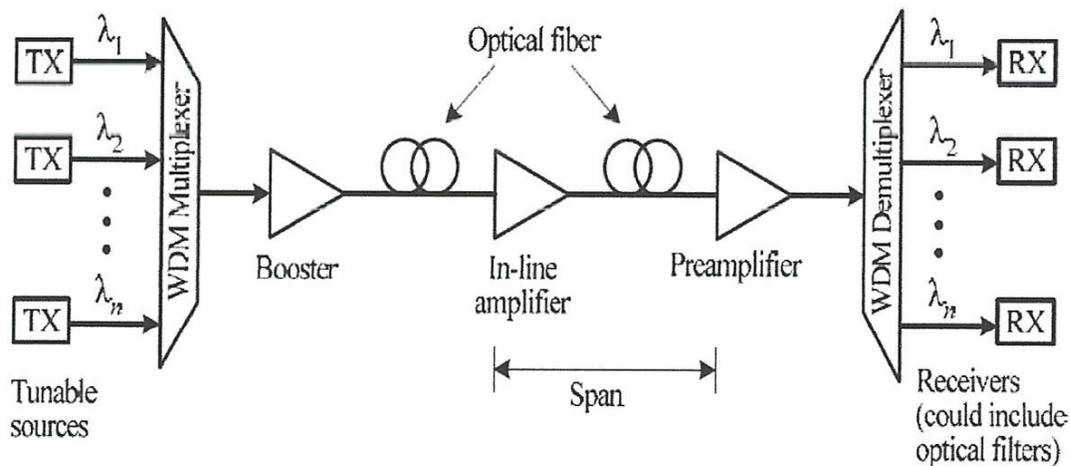


Figure. I.6 Exemple d'un réseau typique WDM [4].

I.3.3. Multiplexage par répartition de code

Cette technique permet la transmission des données des utilisateurs sur la même bande de fréquence et en même temps. Le principe consiste à attribuer à chaque utilisateur un code, appelé également «signature», constitué d'une suite de bits rapides (appelés «chips» pour les distinguer des bits de données de l'utilisateur). Le débit après codage est celui des données utilisateur multiplié par la longueur de la séquence de codes (7 dans le cas de la Figure I.7).

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

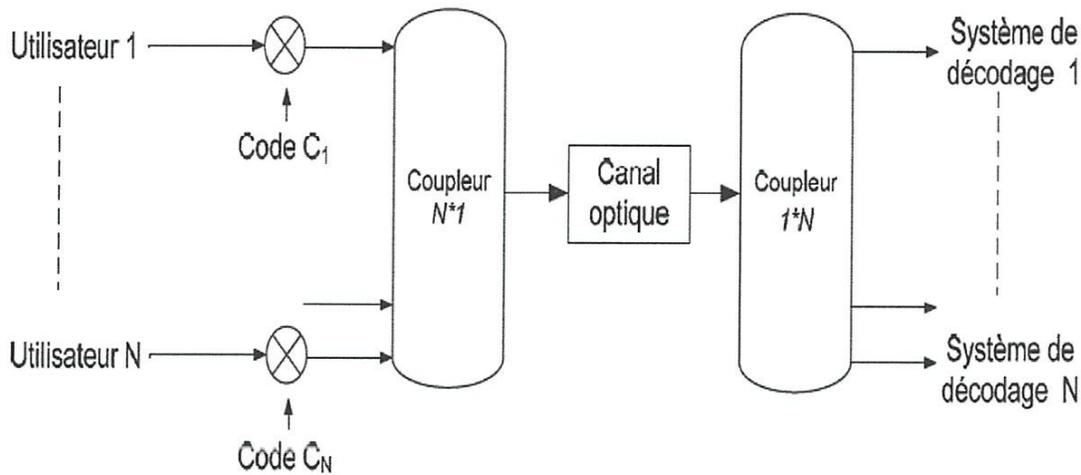


Figure. I.9 Chaîne de transmission en OCDM [6].

Les données d'un utilisateur i sont codées avec le code C_i avant d'être combinées dans un coupleur $N \times 1$, N étant le nombre d'utilisateurs. Après transmission, un second coupleur $1 \times N$ permet de distribuer le signal optique sur N voies, associée chacune à un système de décodage. Chaque système de décodage possède le code C_i lui permettant d'extraire les données de l'utilisateur i avant conversion dans le domaine électrique.

La principale méthode de codage des données en optique consiste à utiliser un ensemble de lignes à retard. Le décodage optique, utilise un système de lignes à retard dans l'ordre inversé de celui utilisé pour le codage.

L'intensité lumineuse ne pouvant avoir que des valeurs positives ou nulles, l'une des principales limitations du OCDM réside dans le fait qu'il n'est pas possible d'y utiliser des codes bipolaires, contrairement au domaine de la radiofréquence. Or, le nombre de codes orthogonaux est très réduit dans une famille de codes dont la longueur est inférieure à 100 chips. Afin de résoudre ce problème, l'OCDM cohérente a été développée. Elle consiste à coder la phase de l'onde lumineuse, qui peut prendre des valeurs positives ou négatives, au lieu de l'amplitude du signal lumineux. Cela permet de tirer profit de tous les codes bipolaires, qui ont été développés pour la radiofréquence, et dont un bien plus grand nombre permet de constituer des familles de codes orthogonaux de même longueur [6].

I.3.4. Multiplexage par division de polarisation (PDM)

Le multiplexage par division de polarisation (PDM) est une méthode pour doubler la capacité du système ou l'efficacité spectrale, et dans laquelle deux canaux des données

modulées indépendamment avec la même longueur d'onde, mais à des états de polarisation orthogonaux sont transmises simultanément dans une seule fibre [7-11]. À l'extrémité du récepteur, les deux canaux de polarisation sont séparés et détectés indépendamment. La figure I.10 montre un croquis simple d'un système multiplexé en polarisation. Comme le montre cette figure, le multiplexeur exige un combinateur de faisceau de polarisation (PBC) pour combiner deux canaux avec des polarisations orthogonales. L'état de polarisation est commandé par un contrôleur optique de polarisation (PC). Au récepteur, le démultiplexeur de polarisation actionne l'opposé du multiplexeur, dans lequel un contrôleur de polarisation (PC) dynamique commande l'état de polarisation avant que le séparateur de faisceau polarisant (PBS) sépare les deux flux de données.

Le principal avantage du PDM est qu'il peut être appliqué dans les systèmes à fibre existants sans avoir à modifier n'importe quelle partie du matériel ou des logiciels de transmission [11]. Il peut également être utilisé avec le format de modulation comme DQPSK [12,13] ou QPSK [14-16] pour quadrupler la capacité de système et pour augmenter l'efficacité spectrale (SE). Néanmoins, dans multiplexage de polarisation, la séparation des deux canaux avec une diaphonie acceptable à l'extrémité de la réception n'est pas insignifiante, parce que l'état de polarisation des canaux multiplexés change rapidement avec le temps.

En plus, la dispersion de mode de polarisation (PMD) est une autre déficience pour PDM [9,10]. Différentes techniques ont été proposées pour pallier à cette déficience [17-22], mais elles aussi rajoutent une complexité et coût au système [11].

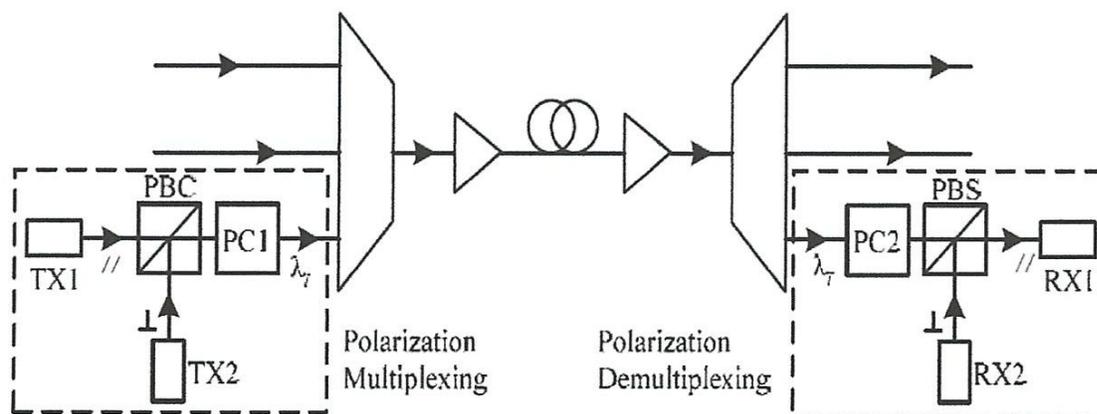


Figure. I.10 Système de multiplexage par division de polarisation (PDM) [9,11].

I.3.5. Multiplexage par répartition orthogonale de fréquence (OFDM)

Le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence (OFDM) est une forme particulière d'une modulation à porteuses multiples (MCM) ou sous-porteuse de multiplexage (SMC). Dans MCM, les informations de différents utilisateurs sont modulées avec des formes d'onde différentes, qui sont appelés sous-porteuses. L'espacement entre sous-porteuses de canal doit être un multiple de débit de symboles, ce qui réduit l'efficacité spectrale. Une nouvelle approche qui chevauche entre les sous-porteuses en réduisant l'espacement des canaux employant ensemble des signaux orthogonaux est appelée OFDM. Un problème fondamental de l'OFDM est le nombre de sous-porteuses, où un grand nombre sont nécessaires pour que l'autre canal traite des sous-canaux comme canal plat. Cela conduit à une architecture extrêmement complexe impliquant de nombreux oscillateurs et des filtres à l'émission et à la réception [23]. Une famille de l'OFDM a d'abord été proposée par Weinstein et Ebert, dans lequel la modulation /démodulation a été mis en œuvre en utilisant la transformée inverse de Fourier discrète (IDFT)/transformée de Fourier discrète (DFT) [24]. Ceci a rendu OFDM attrayant pour être étudiée pour des applications dans le domaine optique en raison de sa résistance à la dispersion de canal [23,25]. L'hypothèse la plus critique pour OFDM est la linéarité de la modulation, la transmission et la démodulation. Par conséquent, une transformation linéaire est le but principal pour l'exécution d'OFDM. Ceci est réalisé en cohérence optique OFDM (CO-OFDM) avec des défis dans la conception d'un modulateur linéaire (la conversion Radio fréquence (RF) vers l'optique) et le démodulateur (la conversion de l'optique vers RF). Un système générique de CO-OFDM peut être divisé en cinq blocs fonctionnels comprenant (i) l'émetteur de RF OFDM, (ii) la conversion RF vers l'optique (RTO), (iii) le canal optique, (iv) la conversion de l'optique vers RF (OTR), et (v) le récepteur de RF OFDM [23,26] comme le montre la Figure I.11.

Dans l'émetteur RF OFDM, l'entrée de données numériques sont converties de série en parallèle dans un bloc de bits comprenant des symboles d'information. Ce symbole d'information sera mis en correspondance avec un signal bidimensionnel complexe. Les indices inférieurs de symbole d'information complexe correspondent à la séquence de sous-porteuses et des blocs d'OFDM. Le domaine temporel du signal OFDM est obtenu par IDFT et un intervalle de garde est inséré pour éviter la dispersion de canal. Le signal numérique est ensuite converti en analogique par un convertisseur numérique-analogique (DAC) et filtré avec un filtre passe-bas (LPF) pour supprimer l'alias signal de bande latérale. Le RTO transforme le signal de bande de base en domaine optique en utilisant un modulateur optique

en phase/en quadrature (E / Q) comprenant une paire de modulateurs de Mach-Zehnder (MZMs) avec une phase de 90 ° de décalage. Le signal de bande de base OFDM est directement converti en domaine optique et se propage à l'intérieur du support optique. Au niveau du récepteur, le signal optique OFDM est alors introduit dans l'OTR où il est converti en un signal de RF OFDM. Dans le récepteur RF OFDM, le signal abaissé en fréquence est échantillonné avec un convertisseur analogique-numérique (ADC). Ensuite, le signal doit passer par trois niveaux de synchronisation avant que la décision de symbole puisse être faite. Les trois niveaux de synchronisation sont (i) la fenêtre de synchronisation DFT où le symbole d'OFDM est convenablement définie pour éviter les interférences entre symboles; (ii) une synchronisation de fréquence, à savoir, le décalage de fréquence doit être estimée, compensée, et de préférence, ajusté à une valeur faible au début; (iii) la récupération sous-porteuse, dans lequel chaque de sous-porteuse est estimé et récupéré. La troisième synchronisation de la récupération de sous-porteuse comprend l'estimation de la phase de symbole OFDM (OSP), et la fonction de transfert de canal [26].

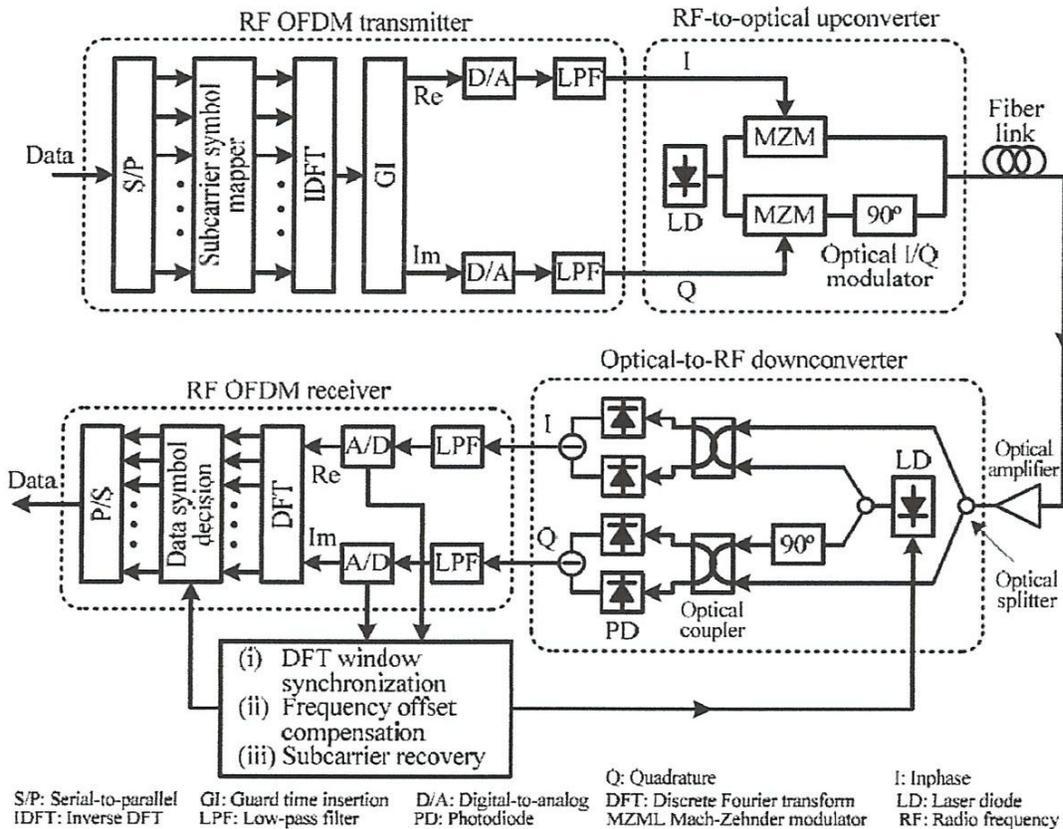


Figure. I.11. Diagramme conceptuel pour un système générique de CO-OFDM [29].

CO-OFDM présente d'avantage d'atténuer les effets de dispersion chromatique CD [25,26], comme il transmet un débit de données élevé divisé en plusieurs canaux de sous-porteuses à faible largeur d'impulsion. De plus, les spectres des sous-porteuses OFDM se chevauchent partiellement, ce qui entraîne une grande efficacité spectrale optique. D'autre part, CO-OFDM nécessite des synchronisations très précises, très sensibles aux effets non-linéaires, très complexes et coûteux [23,26].

I.3.6. Multiplexage par répartition spatial

Le multiplexage par répartition spatial (SDM) est une technique prometteuse pour augmenter la capacité des systèmes de communications optiques. Ces systèmes sont actuellement proches de leur limite fondamentale. SDM utilise la dimension de l'espace sur les guides d'ondes optiques pour transmettre des signaux indépendants dans le même temps, d'où la capacité peut être augmentée considérablement.

Les systèmes optiques basés sur le SDM peuvent être réalisés sur une fibre multimode (MMF). Cependant, ces systèmes sont limités dans la largeur de bande et la distance de transmission par manque de coupleurs sélectifs de mode, qui excitent indépendamment tous les modes du guide d'ondes, et la valeur élevée du retard de groupe différentiel (DGD) sur un MMF. Plus récemment, deux approches qui utilisent de manière sélective tous les modes possibles du guide d'ondes à l'aide des fibres à nombre de modes réduit (FMF) ou des fibres multicœurs (MCF) avec un DGD optimisé ont été proposées [27,28].

La première approche proposée consiste à utiliser une FMF en combinaison avec entrée- multiple sortie-multiple (MIMO) de traitement du signal et de lancer et de détecter de manière cohérente tous les modes de fibre individuelle avec des coupleurs sélectifs de mode [29].

L'architecture d'un système de transmission SDM réalisés sur une fibre (FMF) est illustrée dans la figure I.12. Les signaux sont générés par N émetteurs. La sélectivité de mode est réalisée en utilisant des plaques de phase. Le mode de multiplexage des N signaux est réalisé en utilisant le mode de multiplexage spatial-(S-MUX). Les signaux véhiculés par les différents modes spatiaux sont alors lancés dans la FMF. Après la transmission par la FMF, les signaux reçus sont alors démultiplexés par un démultiplexeur de mode spatial (S-DMUX). Les signaux démultiplexés sont ensuite détectés par les N récepteurs cohérents. Les signaux optique sont convertis en domaine électrique, échantillonné par un oscilloscope numérique ou

CAN à haute vitesse, et enfin traitées à l'aide d'un module DSP. L'algorithme MIMO est utilisé pour compenser le couplage de mode et/ou de la diaphonie dans le canal qui peut être introduit dans S-MUX / S-DEMUX ou la fibre FMF [30].

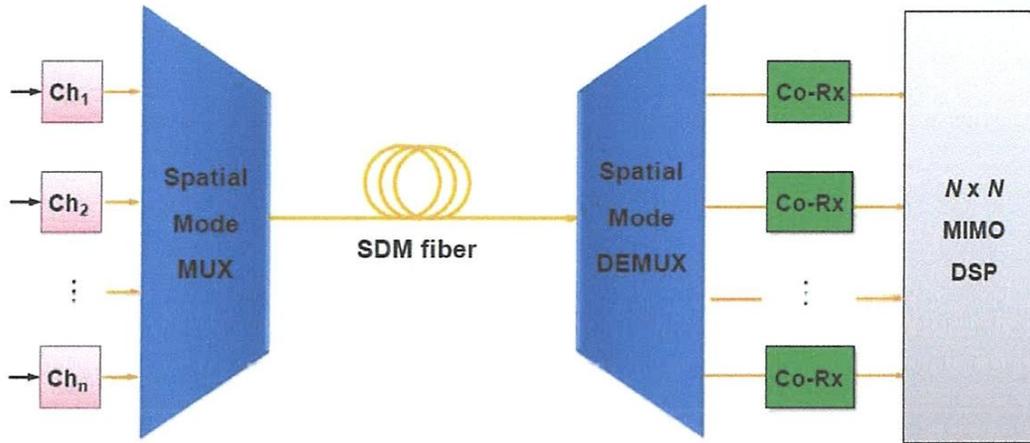


Figure I.12 L'architecture d'un système de transmission SDM avec FMF [30].

La deuxième approche consiste à utiliser une MCF. Dans cette fibre la diaphonie entre les cœurs peut être presque complètement supprimée, et donc chaque cœur individuel peut être considéré comme une fibre monomode (SMF) indépendant [31,32]. En outre, une MCF fortement couplée peut être utilisée avec des résultats prometteurs en utilisant des techniques MIMO similaires comme dans le cas FMF. Dans cette fibre, la diaphonie est plus faible que dans les systèmes MMF, et le DGD est beaucoup plus inférieur que dans des systèmes de FMF [33,34].

La deuxième approche ne diffère de la première que par le multiplexage/ démultiplexage, parce que dans le cas d'utilisation d'une MCF, le système de multiplexage est réduit à une SMF couplée dans chacun des cœurs [35,36].

I.4. Conclusion

L'objectif principal dans les systèmes de communication est de transmettre le plus possible d'informations. Les différentes techniques de multiplexage telles que TDM, WDM, CDM, OFDM, PDM, SDM sont proposées pour améliorer l'utilisation du canal.

En TDM, les différents utilisateurs partagent le même canal en attribuant à chaque utilisateur une tranche de temps. Dans le WDM, le spectre optique disponible peut être utilisé pour soutenir plusieurs nombres d'utilisateurs. Dans cette technique, chaque utilisateur est

assigné une longueur d'onde comme signal de porteuse. Par contre dans le CDM, tous les utilisateurs exploitent la même bande spectrale et en même temps, mais leurs données transmises se distinguent par le code propre à chaque utilisateur. Le PDM permet à deux utilisateurs d'être transmis sur deux polarisations différentes, la polarisation verticale et la polarisation horizontale. Dans l'OFDM, en utilisant IDFT, plusieurs signaux différents RF peuvent être assignés comme support pour beaucoup d'utilisateurs à faible débit binaire. Dans le SDM, on utilise la dimension de l'espace sur les guides d'ondes optiques pour transmettre des signaux indépendants dans le même temps.

Chapitre II :
Le multiplexage en longueur
d'onde (WDM)

II.1. Introduction

Les besoins croissants en débit ont amené à chercher une solution pour augmenter les capacités de transmission des réseaux par fibre optique. Mais la pose d'une fibre optique a un coût non négligeable et on ne peut pas se permettre de poser plusieurs fibres pour augmenter la quantité d'informations transportables. Il est donc nécessaire de faire en sorte d'exploiter au maximum les fibres existantes déjà installées. D'où l'idée du multiplexage en longueur d'onde qui consiste à transmettre des longueurs d'onde distinctes simultanément dans la même fibre (Figure II.1).

Le multiplexage en longueur d'onde (WDM) permet de répondre à cette demande, tout en ayant le gros avantage d'exploiter les fibres existantes.

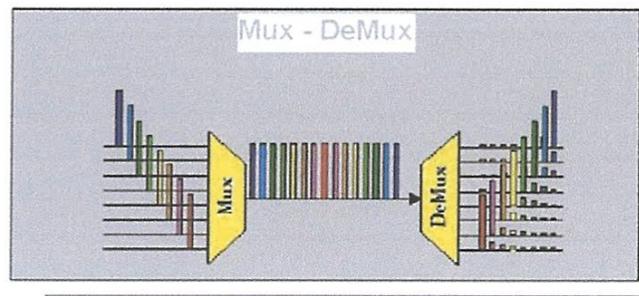


Figure II.1 Le principe du multiplexage en longueur d'onde [39].

II.2. Le principe de multiplexage WDM

Le multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing en anglais) est une technique utilisée en transmissions optiques qui permet de faire passer plusieurs ondes de longueur d'onde différentes sur une seule fibre optique. On multiplexe ainsi plusieurs signaux optiques sur une seule fibre, et en sortie on sépare les différentes ondes au moyen d'un démultiplexeur.

Pour pouvoir multiplexer les n sources, il faut préalablement changer leurs longueurs d'ondes en utilisant des transpondeurs.

II.3. Les différentes technologies WDM

Lorsque l'espacement entre les longueurs d'onde (entre deux couleurs successives) est de 20nm, on parle de Coarse WDM (CWDM). L'avantage du CWDM est son coût. En effet,

grâce à l'important espacement laissé à chaque canal, on n'est pas obligé de réguler en température le laser d'émission (voir figure II.2).

Par contre, on est limité à 7 canaux non amplifiés (donc moins chers) sur 120 km maximum, et à cause du bas coût des sources laser, il n'y a pas de source 10Gbps disponible.

Pour un espacement plus faible (donc plus de longueurs d'onde simultanément en propagation), on parle de WDM voire Dense WDM (DWDM, plus de 32 longueurs d'onde) et même Ultra Dense WDM (UDWDM). Les systèmes DWDM commerciaux présentent des espacements entre les longueurs d'onde d'environ 0.8 nm (100 GHz), 0.4 nm (50GHz) voire même 0.1 nm (12.5GHz). Il est ainsi possible de combiner 160 longueurs d'onde optiques et plus (voir figure II.?) [37].

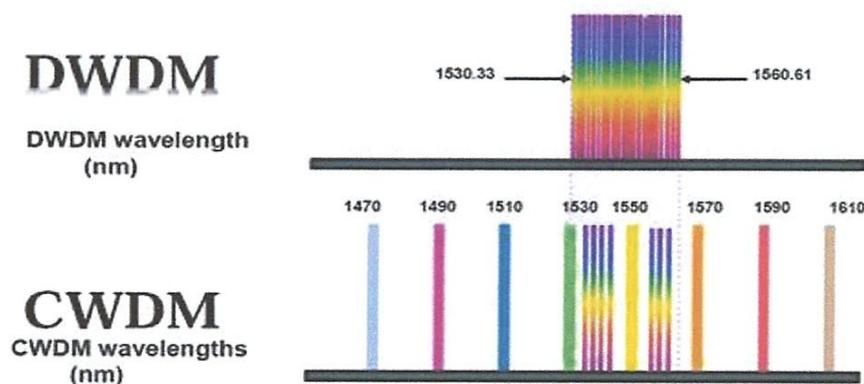


Figure II.2 Le système WDM avec les différents espacements entre longueurs d'onde [38].

II.4. Structure générale d'un système de transmission WDM sur fibre optique

Sur la figure (II.3) on présente un système de transmission WDM sur fibre optique. En général, il comporte les dispositifs et composants suivants :

- Des modules d'émission.
- Multiplexeur/démultiplexeur.
- Une Fibre Optique.
- Fibre compensatrice de dispersion (dispersion compensating fiber : DCF).
- Amplificateur optique.
- Des brasseurs optiques (Optical cross-connect : OXC).
- Des multiplexeurs optiques à insertion /extraction (ROADM pour Reconfigurable Optical add-drop multiplexer) reconfigurables.
- Des récepteurs.

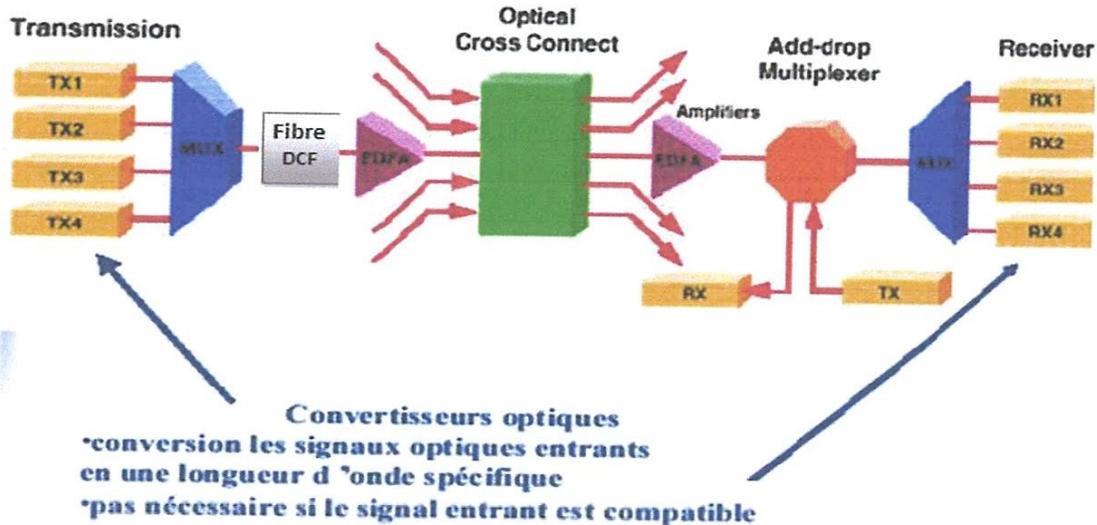


Figure II.3 Structure générale d'un système de transmission WDM sur fibre optique.

II.4.1. Le module d'émission

La partie émission d'une liaison optique est composée de divers éléments (laser, modulateur,...). Son rôle est de délivrer au support de transmission un signal optique sur lequel sont inscrites les données.

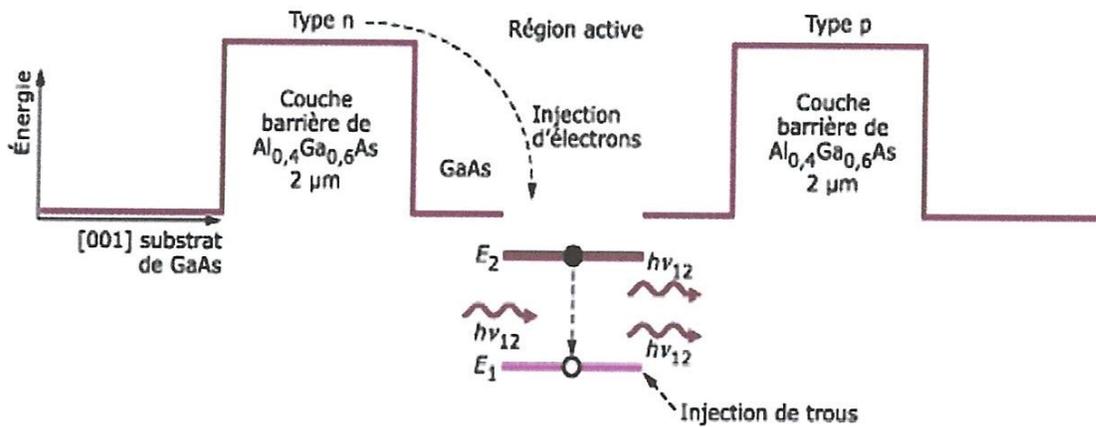
Dans les systèmes de transmission par fibre optique, on utilise de préférence comme source optique des composants semi-conducteurs à cause de leurs petites dimensions en rapport avec celles du cœur des fibres optiques, de la relative facilité que l'on a à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant, de leur spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation énergétique. Ainsi, la diode laser est la source la mieux adaptée pour les télécommunications optiques car elle permet d'avoir la meilleure efficacité de couplage optique avec la fibre [40].

II.4.1.1. Diodes laser

Une diode laser est un dispositif optoélectronique qui produit un faisceau de lumière cohérent créé par les phénomènes d'émission stimulée et de recombinaison radiative des porteurs de charge dans la zone active dans laquelle l'inversion de population est créée par injection de courant : la lumière confinée au sein de la zone active est amplifiée.

Une diode laser est constituée typiquement de trois couches, qui forment un guide d'onde. Les deux couches externes de type AlGaAs, appelées couches barrières, assurent un confinement électronique et optique à la verticale de la couche active où l'effet laser se produit.

Afin d'assurer un confinement optique et de former l'axe d'émission du faisceau laser dans la direction longitudinale et d'assurer également une interaction efficace entre la lumière et le milieu amplificateur, le guide d'onde est inséré au sein d'une cavité optique (résonateur FabryPerrot) [41].



Les électrons et trous sont injectés respectivement depuis les couches de type n et p dans la région active, où l'effet laser a lieu. La région active est simplifiée sous la forme d'un système à deux niveaux, E_1 (état fondamental) et E_2 (état excité). Lorsque l'inversion de population est créée par injection de courant, un photon incident (dont l'énergie est égale à l'énergie séparant les niveaux E_1 et E_2 : $h\nu_{12}$) crée un autre photon, strictement identique en phase et énergie : le système est stimulé.

Figure II.4 Diagramme d'une diode laser à semi-conducteur polarisée en direct avec substrat de GaAs et des couches barrières d'AlGaAs [41].

II.4.1.1.1. Le laser à rétroaction distribuée (DFB)

Les lasers à semi-conducteurs à rétroaction distribuée (DFB) ont fait leur apparition au début des années 70 et la première émission laser a été montrée durant cette même période. Kogelnik et Schank proposèrent d'abord de remplacer la réaction optique des miroirs d'un laser par une réaction distribuée le long de la cavité en faisant une variation périodique du gain ou de l'indice du guide optique. Trois ans plus tard, en s'appuyant sur le concept qui avait été démontré auparavant avec les lasers, Scifres, Burnham et Streifer furent les premiers à faire fonctionner un laser DFB à semi-conducteurs en AlGaAs/AsGa. On fabrique ces lasers en incorporant, directement dans le milieu actif, un réseau de haute sélectivité spectrale dans ou au dessus de la région active (Figure II.5).

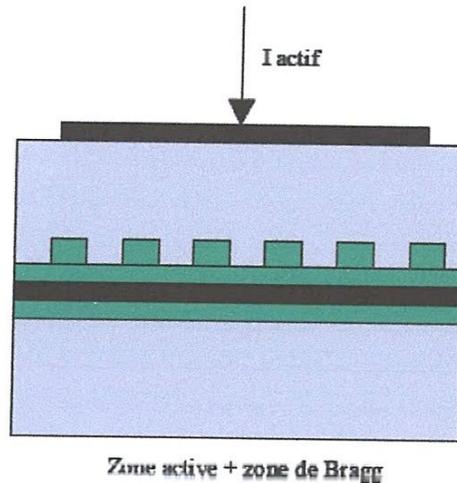


Figure II.5 Laser à rétroaction distribuée (DFB) [42].

Les seules longueurs d'ondes qui peuvent osciller sont celles qui sont renforcées par la périodicité du réseau. Chaque pas du réseau inscrit dans la cavité laser provoque une rétrodiffusion qui a pour effet de coupler les ondes propagatives et contra-propagatives sur toute la longueur de la cavité. Ces diffusions, sur chaque pas du réseau, produisent une multiplicité d'ondes qui s'additionnent de façon cohérente selon leur phase respective. La condition d'accord de phase ne se produit que pour certaines longueurs d'ondes correspondant à la condition de Bragg, qui stipule que les longueurs d'ondes dans le milieu laser sont reliées à la période spatiale du réseau.

En général pour un laser DFB symétrique, c'est à dire pour un laser possédant un réseau tout à fait périodique, il y a une dégénérescence des modes qui se traduit par le fait que deux modes peuvent exister de part et d'autre d'une bande spectrale interdite. Cette dégénérescence peut amener des instabilités et aussi une incertitude sur la longueur d'onde exacte à laquelle il y aura oscillation laser. De plus, les réflexions des facettes du laser clivé vont contribuer à dégrader la pureté spectrale du laser. Pour pallier à ces problèmes et pour obtenir une seule longueur d'oscillation qui soit stable, la symétrie du laser est brisée en incorporant un saut de phase dans la périodicité du réseau. De nos jours, on préfère rendre la facette arrière du laser fortement réfléchissante, tandis que la facette avant est munie d'une couche antireflet ce qui a pour effet d'accroître la puissance émise.

II.4.1.1.2. Le laser à réflecteur de Bragg distribué (DBR)

Un schéma de laser DBR est représenté sur la Figure II.6. Le laser DBR est un composant intégrant monolithiquement trois sections contrôlées chacune par un courant: une

section active, et deux sections passives, une comportant un réseau de Bragg et une "dite" de phase. La section active est le milieu amplificateur qui apporte le gain à la cavité laser par l'intermédiaire du courant I_{actif} actif. La section passive de Bragg est composée d'un matériau quaternaire InGaAsP, dans cette zone est réalisé un réseau de Bragg afin de sélectionner la longueur d'émission du laser [42].

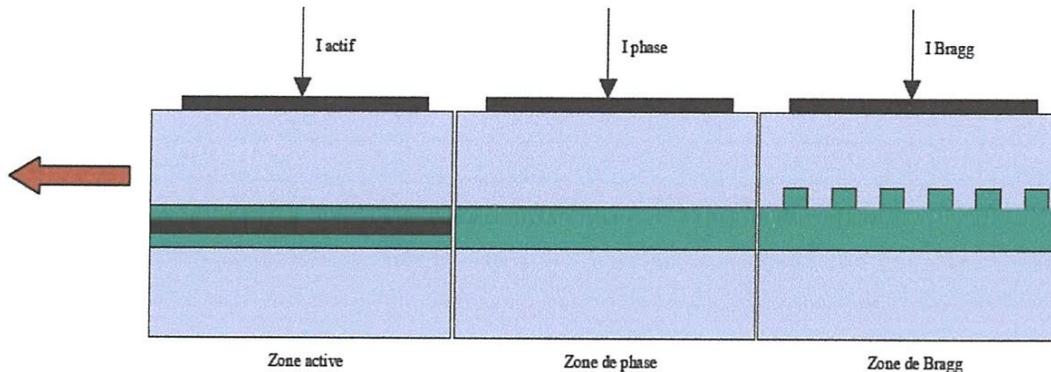


Figure II.6 Schéma d'un laser DBR 3 Sections composé d'une section active, d'une section passive de phase et d'une section avec un réseau de Bragg [42].

II.4.1.2. Modulateur

Un modulateur est un système capable de modifier les paramètres de la lumière (essentiellement amplitude et/ou phase ; mais cela pourrait être : polarisation, direction de propagation, fréquence, répartition de modes, etc.) en fonction d'un signal de commande.

Un modulateur est un système d'interaction. Les interactions entre phénomène physique de nature différente - mécanique (ou élastique), acoustique, magnétique, etc.

On peut moduler ces sources de deux manières différentes.

II.4.1.2.1. Modulation directe

On agit sur le courant de jonction qui provoque l'effet laser. En première approximation, la puissance optique délivrée varie linéairement en fonction du courant.

Ce type de modulation provoque une modification dynamique du spectre due à la conversion amplitude-fréquence (désignée par le terme anglo-américain de chirp) et du diagramme de rayonnement, avec des effets nuisibles aux grandes vitesses de modulation.

II.4.1.2.2. Modulation externe

Le champ émis par la source n'est pas modulé et passe par un circuit optique spécial où l'on peut provoquer une modulation de phase ou d'amplitude. Les modulateurs d'amplitude ne

présentent aucune propriété de linéarité mais introduisent beaucoup moins de conversion amplitude-fréquence [43].

Plusieurs types de modulateurs sont disponibles, en particulier le modulateur de Mach-Zehnder et le modulateur électro-absorbant.

II.4.1.2.2.1. Le modulateur électro-absorbant (MEA)

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

II.4.1.2.2.2. Le modulateur de Mach-Zehnder (MZMs)

Les modulateurs de Mach-Zehnder sont des modulateurs électro-optiques que l'on place directement en sortie du laser. Ils sont fréquemment utilisés pour les applications de télécommunication large bande.

En réalité, les effets électro-optiques sont à la base de ce type de modulateurs, à savoir que l'indice de réfraction de certains matériaux peut être modifié par l'application d'un champ électrique.

Ce phénomène est appelé effet Pockels si les effets électro-optiques sont linéaires, c'est-à-dire que la variation d'indice est proportionnelle au champ appliqué, et effet Kerr quand elle est proportionnelle au carré du champ. L'effet Pockels est prépondérant dans certains matériaux et permet des modulations de phase et d'amplitude de la lumière.

Un des principaux impératifs est d'utiliser des matériaux transparents à la longueur d'onde de fonctionnement et présentant des coefficients électro-optiques aussi élevés que possible.

De tels modulateurs fonctionnant à 1,5 μm ont été réalisés sur substrat de niobate de lithium (LiNbO_3) ainsi que dans des matériaux semi-conducteurs (GaAs, ...).

Grâce à ce modulateur on peut obtenir une modulation d'amplitude à travers une modulation de phase à l'intérieur du composant.

a) Modulation de phase

Le champ électrique appliqué change l'indice de réfraction du matériau, ce qui a pour conséquence de faire varier la phase de l'onde guidée et d'engendrer un retard variable de l'onde optique. Un déphasage dépendant de la tension électrique est ainsi créé (modulation de phase en alternatif).

b) Modulation d'amplitude

Cela consiste à réaliser un interféromètre dans lequel il est possible de commander la différence de phase entre les deux bras par l'application d'une tension contrôlée sur le matériau électro-optique [44].

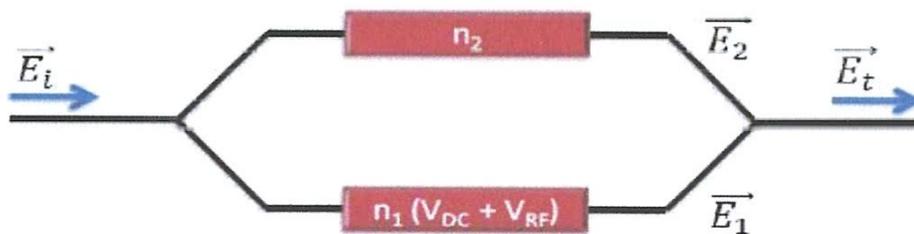


Figure II.7. Schéma simplifié d'un modulateur de Mach-Zehnder [44].

II.4.2. Multiplexeurs / démultiplexeurs optiques

Le multiplexeur en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing) est défini comme étant un dispositif de dérivation avec deux accès d'entrée ou plus et un accès de sortie, ou la lumière à chaque accès d'entrée est restreinte à une gamme de longueurs d'onde présélectionnée et la sortie est une combinaison de la lumière provenant des accès d'entrée.

Par contre, le démultiplexeur en longueur d'onde est un dispositif qui effectue l'opération inverse.

II.4.2.1. Différents types de multiplexage en longueur d'onde

Les multiplexeurs optiques peuvent être classés en trois catégories principales selon la technique utilisée :

- Multiplexage à filtre optique
- Multiplexage à coupleurs sélectif
- Multiplexage à réseau de diffraction

II.4.2.1.1. Multiplexage à filtre optique

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

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

Deux types de filtre sont utilisés :

a) Les filtres dichroïques

Ces dispositifs présentent un pic de réflexion à une longueur d'onde donnée. Il est possible d'accroître le domaine de réflexion en empilant des couches successives et d'obtenir ainsi des filtres passe haut et passe bas. Les filtres dichroïques sont donc constitués par un empilement de couches diélectriques d'indice alternativement haut et bas.

Le filtre est caractérisé par son coefficient de transmission T en bande passante, et son coefficient de réflexion R en bande atténuée (voir figure II.8).

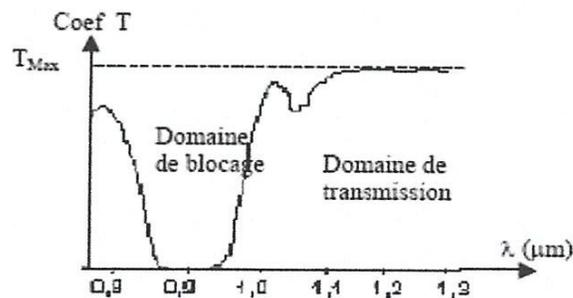


Figure II.8 Courbe de transmission d'un filtre dichroïque ($0,8/1,3 \mu\text{m}$) [45].

En générale les filtres passe haut ont des meilleures performances que les filtres passe bas, le coefficient de réflexion est supérieur à 99% et le coefficient de transmission est en pratique limité à des valeurs d'environ 95%.

Pour obtenir ses performances, un contrôle précis des épaisseurs déposées s'impose. En pratique, on arrive à une séparation spectrale $\Delta\lambda > 0,05\lambda$ (soit 50nm à la longueur d'onde de $1\mu\text{m}$).

$\Delta\lambda$: Largeur du domaine de transition entre toutes les bandes.

b) Les filtres Fabry-Perot

Ils ont une caractéristique de transmission passe bas, ils présentent un pic de transmission étroit autour d'une longueur d'onde λ_0 et les deux domaines spectraux adjacents sont réfléchis (voir figure II.9).

Pour accroître la raideur du filtre, on peut répéter l'empilement pour un assemblage à deux ou trois cavités.

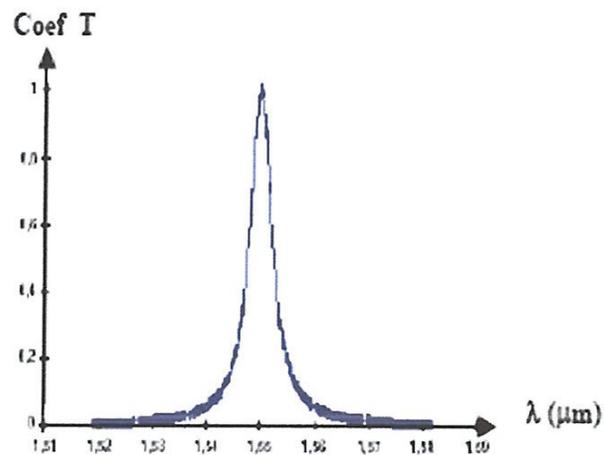


Figure II.9 Courbe de transmission d'un filtre Fabry-perot [45].

Comme pour le filtre dichroïque, le coefficient de réflexion est supérieur à 99%, le coefficient de transmission peut atteindre 95%.

c) Utilisation de ces deux types de filtres

Une application de ces filtres consiste en la réalisation de la fonction de multiplexage optique qui effectue une séparation chromatique sur une ligne de transmission à fibre optique.

Une solution adoptée sur certains dispositifs est le dépôt du filtre sur l'extrémité d'une fibre optique.

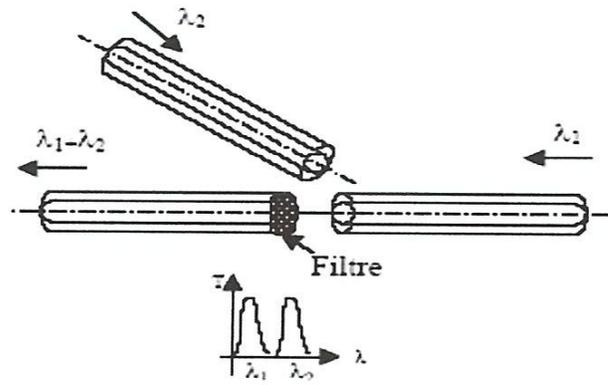


Figure II.10 Multiplexage à filtre optique [45].

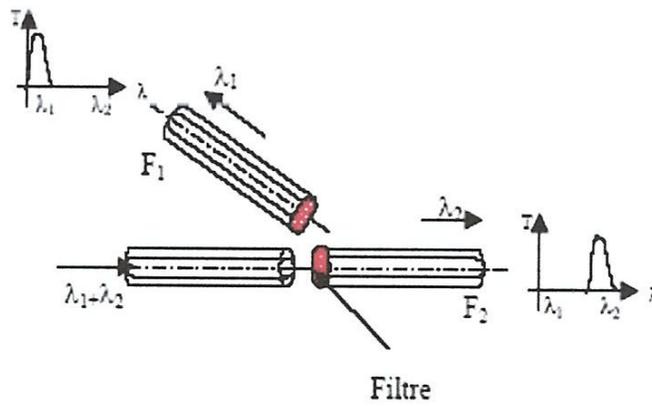


Figure II.11 Démultiplexeur à filtre optique [45].

Les autres produits commerciaux utilisent une optique intermédiaire. Les lentilles à gradient d'indice qui assurent la continuité entre la fibre et le filtre.

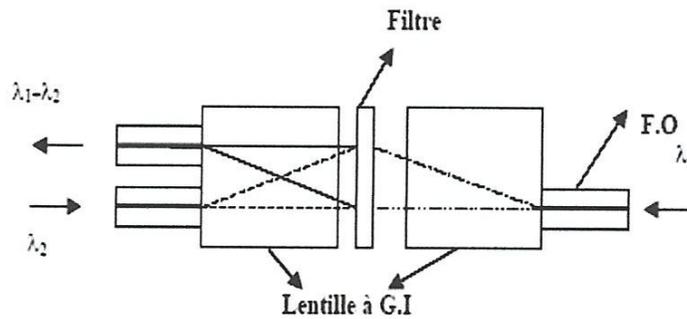


Figure II.12 Multiplexeur à filtre avec lentille à G.I [45].

II.4.2.1.2. Multiplexage à coupleurs sélectif

Le principe de ces composants est l'interaction cohérente entre deux guides optiques, ils sont appelés les coupleurs de puissance, qui sont utilisés pour additionner ou diviser les signaux. Ils sont plus utilisés dans les systèmes multiplexés.

Les différents types de coupleurs :

a) Coupleurs en X (2 :2)

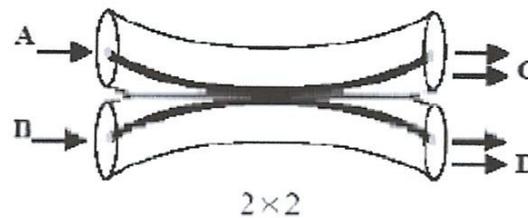


Figure II.13 Coupleur optique en x 2 :2 [45].

La puissance d'un signal arrivant sur une des branches est également répartie sur les deux branches opposées. Cependant, les chemins croisés (A-D, B-C) sont plus longs que les chemins directs (A-C, B-D). Ceci représente un déphasage $\pi/2$ entre les deux sorties du coupleur. Soit:

Les signaux aux entrées : $\cos (wt+\varphi_a)$ et $\cos (wt+\varphi_b)$.

La sortie C vaut $\cos (wt+\varphi_a) + \cos (wt+\varphi_b+\pi/2) = \cos (wt+\varphi_a) - \sin (wt+\varphi_b)$.

La sortie D devient $\cos (wt+\varphi_a+\pi/2) + \cos (wt+\varphi_b) = \cos (wt+\varphi_a+\pi/2) + \sin (wt+\varphi_b+\pi/2)$.

b) Les coupleurs en arbre

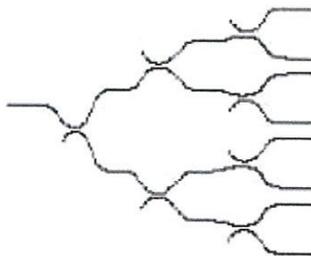


Figure II.14 Coupleur en arbre (1 : N) [45].

Les coupleurs en arbre sont composés de coupleurs 1 :2. Un coupleur 1 :2 est un coupleur 2 :2 dont une des entrées a été désactivée, elle peut simplement ne pas être connectée. Un coupleur en arbre permet la distribution d'un signal optique d'une voie vers N voies.

Addition par coupleur optique (multiplexeur).

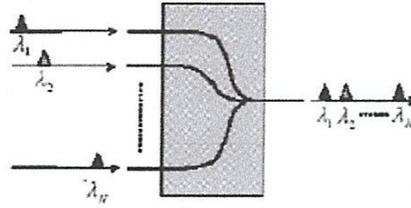


Figure II.15 Multiplexeur à coupleur en arbre [45].

Distribution avec un coupleur optique+ filtrage (démultiplexeur).

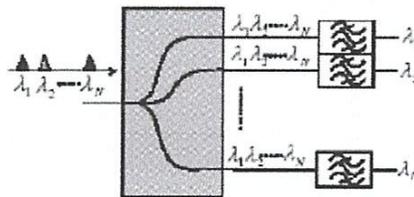


Figure II.16 Démultiplexeur à coupleur en arbre 1 : N [45].

c) les coupleurs en étoile

Un coupleur en étoile N : N est différent de deux coupleurs en arbre 1 : N et N : 1 cascadiés, c'est un assemblage de coupleurs 2 :2. Le nombre d'étages nécessaire à sa réalisation est identique à celui d'un coupleur en arbre 1 : N, soit alors égale à l'entier supérieur de log₂ (N).

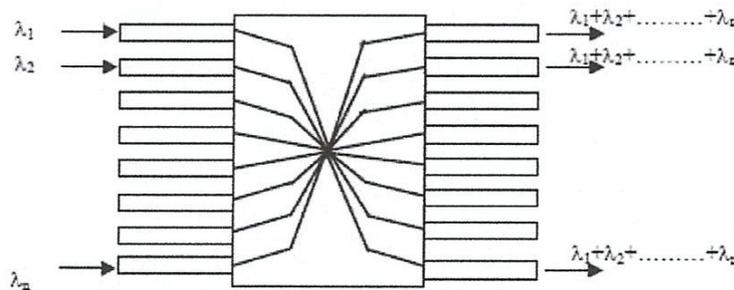


Figure II.17 Multiplexeur à coupleur en étoile N : N [45].

II.4.2.1.3. Multiplexage à réseau de diffraction

Le réseau a l'avantage de traiter simultanément un grand nombre de voies à l'intérieur de la même fenêtre.

Un réseau se compose d'une surface optique qui transmet ou réfléchit la lumière et sur laquelle un grand nombre de traits sont gravés au diamant.

Le réseau a la propriété de renvoyer, séparer angulairement, les différentes longueurs d'ondes contenues dans un même faisceau incident. En vertu du principe de retour inverse de la lumière, le réseau peut combiner dans une même direction des faisceaux incidents séparés angulairement et des longueurs d'onde adéquates.

L'angle de diffraction est fonction de l'espacement des traits et de l'angle d'incidence.

Considérons le cas de réseaux à surface optique réfléchissante et un rayonnement monochromatique de longueur d'onde λ . Soit θ_1 l'angle du rayonnement incident avec la normale au réseau et θ_2 l'angle du rayon diffracté. Le réseau est caractérisé par des traits régulièrement espacés d'une distance « a ».

La différence de marche entre deux rayons diffractés est, $D = a (\sin\theta_1 + \sin\theta_2)$

Lorsque la différence de marche est multiple de la longueur d'onde, on déduit l'équation de diffraction du réseau, $\sin\theta_1 + \sin\theta_2 = K\lambda / a$

Avec K : l'ordre d'interférence (nombre entier).

On dit qu'un réseau est utilisé dans la configuration Littrow quand $\theta_1 = \theta_2 = \theta$, dans ce cas, les rayons incidents et diffractés ont la même direction, et la formule devient, $2 \cdot \sin\theta = K\lambda / a$

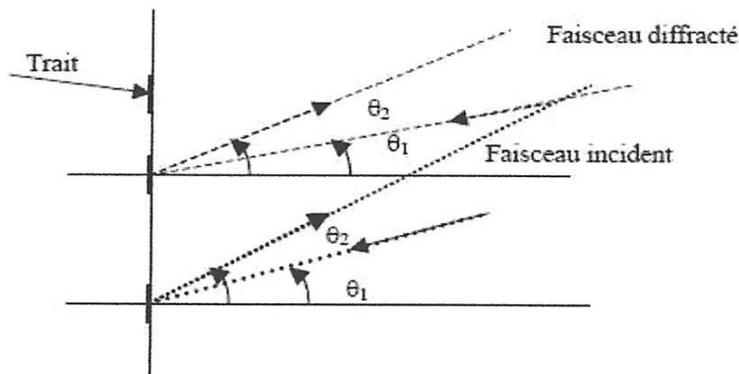


Figure II.18 Schéma de principe d'un réseau de diffraction en réflexion [45].

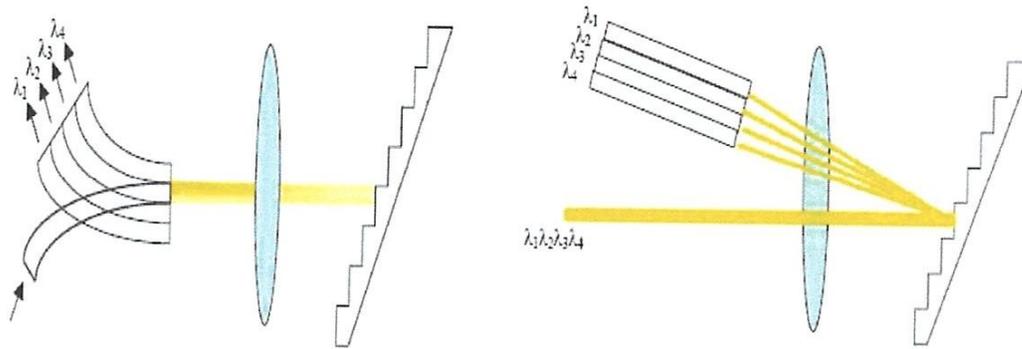


Figure II.19. Demux/Mux à réseau de diffraction à la configuration de Littrow [45].

Le rendement de diffraction à une longueur d'onde est le rapport entre l'énergie diffracté et l'énergie totale incidente sur le réseau [45].

II.4.3. Support de transmission : La Fibre optique

II.4.3.1. Fonctionnement de la fibre

II.4.3.1.1. La réflexion totale interne

Le principe de la réflexion totale interne est à la base de la propagation des ondes lumineuses dans la fibre optique. D'après ce principe, lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu à un autre dont l'indice de réfraction est plus faible, il peut être réfléchi. De plus, lorsque l'angle d'incidence du rayon lumineux est plus grand que l'angle critique, la lumière est réfléchie en totalité et il n'y a aucune perte de lumière (figure II.20).

La réflexion totale interne est régie par deux facteurs : les indices de réfraction des deux milieux et l'angle critique. Ces facteurs sont reliés par l'équation suivante :

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

En connaissant les indices de réfraction des deux matériaux de l'interface, l'angle critique peut facilement être calculé.

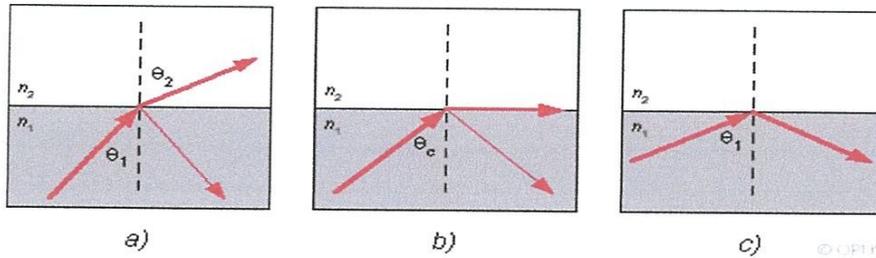


Figure II.20 Réfraction d'un rayon lumineux pour $\theta_1 < \theta_c$, le rayon incident est aussi partiellement réfléchi dans le premier milieu, b) rayon critique lorsque $\theta_1 = \theta_c$ c) réflexion totale interne pour $\theta_1 > \theta_c$ [46]

Physiquement, l'indice de réfraction d'une substance est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide (c) et sa vitesse dans le matériau (v).

$$n = \frac{c}{v}$$

La lumière voyage donc plus rapidement dans un matériau avec un indice de réfraction plus petit.

II.4.3.1.2. Propagation de la lumière dans une fibre

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 sans perte, en empruntant un parcours en zigzag.

Une fibre optique est souvent décrite selon deux paramètres. Le premier est la différence d'indice normalisée, qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine.

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Le second est l'ouverture numérique de la fibre ($N.A.$ pour Numerical Aperture). Concrètement, ce paramètre est le sinus de l'angle d'entrée maximal de la lumière dans la fibre pour que la lumière puisse être guidée sans perte. Cet angle est mesuré par rapport à l'axe de la fibre.

$$ON = \sin(\theta_{OL}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Afin de faciliter l'injection de la lumière dans la fibre à l'entrée, on a intérêt à avoir l'angle limite θ_{OL} le plus grand possible. Ceci s'obtient pratiquement en choisissant des indices n_1 et n_2 très proches [46].

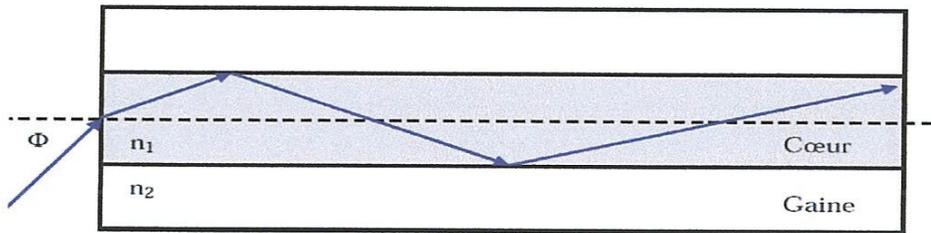


Figure II.21 Propagation d'un rayon lumineux dans une fibre optique [47].

II.4.3.2. Différents types de fibre optique

Il existe trois types de fibre optique : monomode, multimode et microstructurée

II. 4.3.2.1. Les fibres multimodes

Ce type de fibre présente certains inconvénients tels que l'atténuation des signaux qui est plus marquée ou encore une vitesse de propagation des signaux plus faible. Elles sont aujourd'hui utilisées sur de courtes distances ou dans les décorations

Il existe deux types de fibres multimodes :

- La fibre à saut d'indice
- La fibre à gradient d'indice.

Leur différence réside principalement dans la différence du diamètre du cœur. La fibre à saut d'indice présente un diamètre de cœur deux à quatre fois plus grand que celui des fibres à gradient d'indice.

a) Les fibres à saut d'indice

Le cœur et la gaine présentent des indices de réfraction différents et constants. Le passage d'un milieu vers l'autre est caractérisé par un saut d'indice. Le faisceau lumineux injecté à l'entrée de la fibre atteint la sortie en empruntant des chemins optiques différents, ce qui se traduit par des temps de propagation différents et donc un étalement du signal transmis. Ce phénomène est appelé dispersion modale.

Pour diminuer cet effet, le profil d'indice de cœur peut être modifié de telle sorte à créer un « gradient d'indice ».

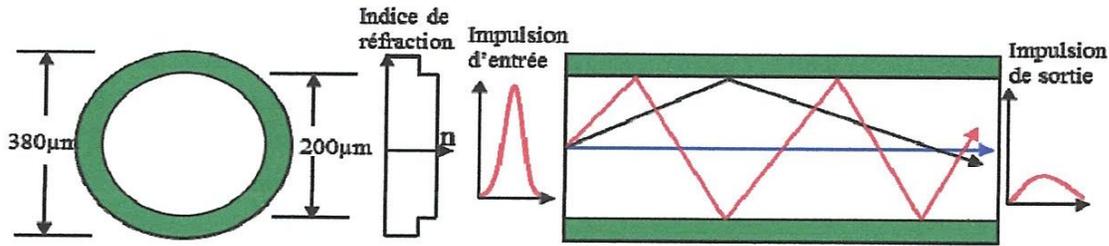


Figure II.22 Structure d'une fibre multimode à saut d'indice [47].

b) Les fibres à gradient d'indice

Le cœur se caractérise par un indice variable qui augmente progressivement de n_1 à l'interface gaine-cœur jusqu'à n_2 au centre de la fibre. Là aussi les rayons lumineux vont emprunter des chemins différents, mais un choix judicieux du profil d'indice du cœur permet de tendre vers des temps de parcours voisins et donc réduire l'étalement du signal.

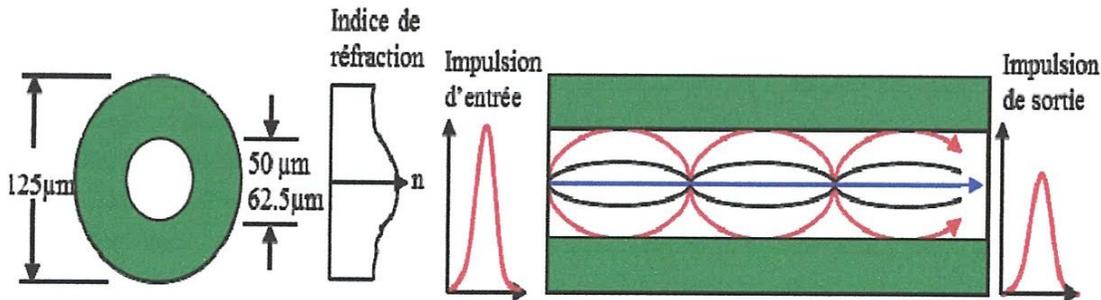


Figure II.23 Structure d'une fibre multimode à gradient d'indice [47].

II. 4.3.2.2. Les fibres monomodes

La fibre monomode classique est à saut d'indice. Son diamètre permet la propagation d'un seul mode, le fondamental ; comme un seul mode se propage il n'y a pas de différence de vitesse contrairement aux fibres multimodes.

Le but recherché dans cette fibre est que le chemin que doit parcourir le faisceau soit le plus direct possible. Pour cela on réduit fortement le diamètre du cœur qui est dans la plupart des cas inférieur à $10 \mu\text{m}$.

À cause du très petit diamètre du cœur de la fibre monomode, le transport de la lumière s'effectue sans réflexion et de manière quasi -rectiligne. L'avantage de ce type de fibre est qu'il produit peu de dispersion, ce qui fait qu'une impulsion lumineuse polychromatique transmise dans la fibre n'est alors que très peu déformée. Les résultats sont meilleurs, mais compte tenu de la faible section de cette fibre, seule la lumière laser est ici exploitable.

L'inconvénient de ce type de fibres est qu'elles sont relativement coûteuses car elles nécessitent une puissance d'émission très élevée (des diodes au laser qui sont relativement onéreuses) dû au petit diamètre du cœur.

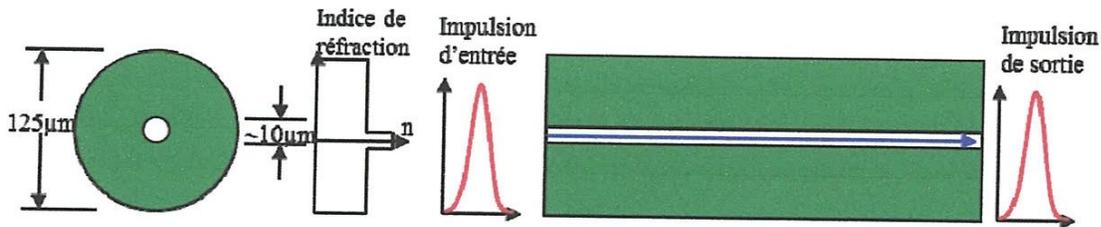


Figure II.24 Structure d'une fibre monomode [47].

II. 4.3.2.3. Les fibres micro-structurées

Les fibres à cristaux photoniques (PCF) sont très proches des fibres classiques au premier abord. En effet, les fibres PCF sont construites à partir d'une structure hexagonale de petits cylindres d'air autour d'un cœur qui peut être en silice ou constitué d'air, suivant l'utilisation visée.

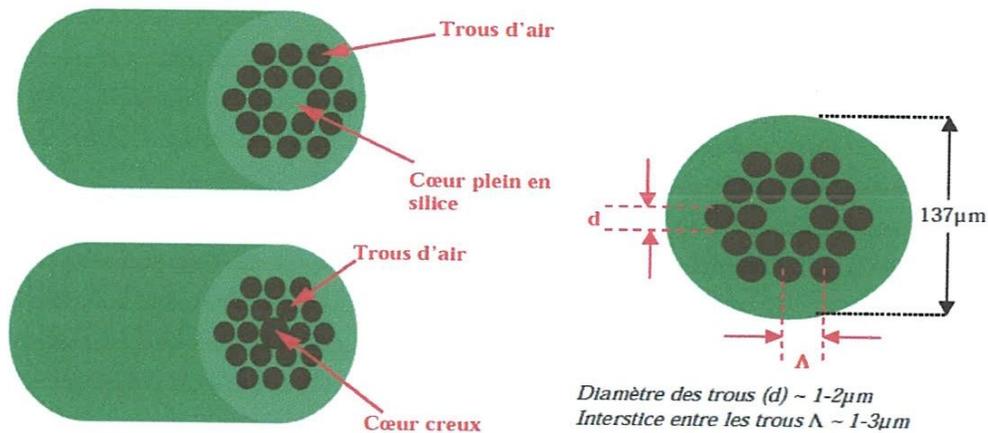


Figure II.25 Structure des fibres à cristaux photoniques [47].

L'originalité de ces guides d'ondes provient de leurs mécanismes de confinement de la lumière qui reposent sur la périodicité de leur structure d'indice. Cette dernière permet, dans certains cas, d'utiliser l'air pour propager la lumière dans un cœur de verre ou d'air.

Les fibres micro-structurées se divisent généralement en deux catégories principales : les fibres à guidage d'indice qui possèdent un cœur solide et les fibres photoniques à bande interdite qui ont des éléments micro-structurés périodiques et un cœur constitué d'un matériau

à indice bas (par exemple un cœur creux). Une classification est présentée ci-après figure II.26.

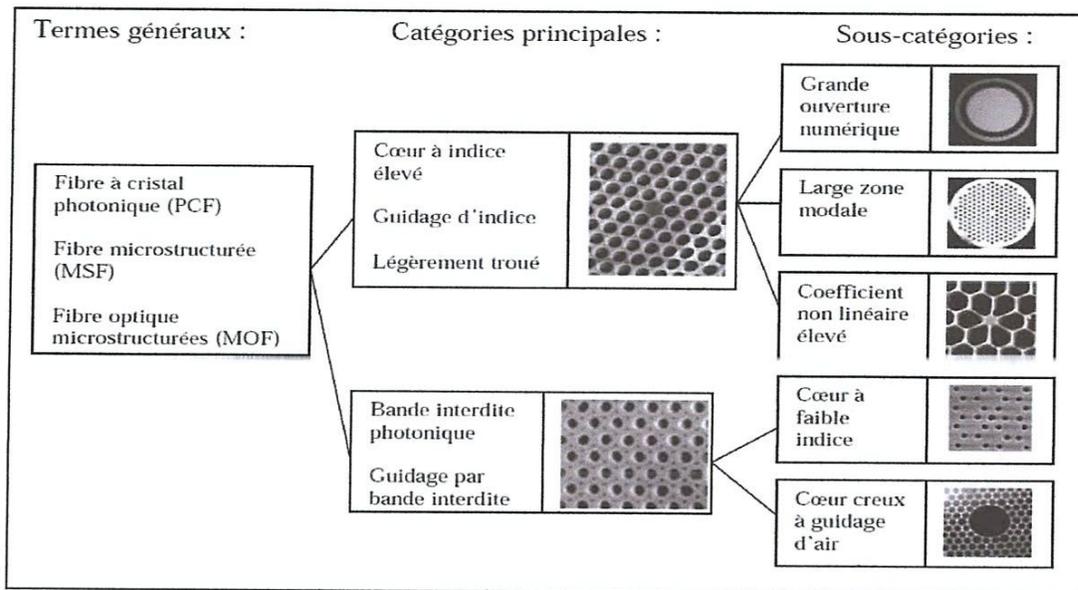


Figure II.26 Différentes catégories de fibres à cristaux photoniques [47].

Contrairement aux fibres classiques SMF et MMF pour lesquelles la lumière est piégée dans le cœur par réflexion interne totale, les fibres PCF piègent la lumière dans le cœur suivant deux mécanismes. Le premier mécanisme est une réflexion interne totale modifiée et la seconde repose sur l'effet de bande interdite photonique [47].

II.4.3.3. Caractéristiques de la fibre optique

II.4.3.3.1. Atténuation

L'atténuation est la perte de puissance que subit la lumière au cours de sa propagation dans la fibre optique. Il existe dans la fibre de nombreuses causes conduisant à l'affaiblissement d'un signal optique. On doit distinguer les causes fondamentales inhérentes à la matière des matériaux entrant dans la composition du guide et les causes secondaires produites par les imperfections de la technologie de fabrication qui sont de nature réductibles. Les causes d'atténuation irréductible sont la diffusion de Rayleigh produite par les non uniformités à l'échelle microscopique de la densité de la matière et donc de l'indice de réfraction des verres constituant la fibre, l'absorption infrarouge et ultraviolette. Les pertes extrinsèques sont quant à elles dues à l'absorption produite par les impuretés chimiques : ions métalliques (Fe, Cu...), ions hydroxyles, ainsi qu'aux micro-courbures dues à des

imperfections microscopiques de la géométrie du guide (défauts de symétrie, fluctuations du rayon du cœur ou de l'interface cœur-gaine), et les courbures imposées aux câbles par le relief. En général les fibres sont fabriquées avec des longueurs de quelques kilomètres. Ces longueurs souvent insuffisantes conduisent à connecter deux fibres optiques entre elles avec un minimum d'atténuation (épissurage). La fibre est raccordée aux équipements d'extrémité par des connecteurs. Épissures et connecteurs introduisent ainsi un affaiblissement. Dans la pratique toutes les atténuations se combinent et produisent les pertes sur l'énergie transportée par l'onde guidée. L'atténuation de la fibre est fonction de la longueur d'onde. Les progrès réalisés dans la technique de fabrication de fibre en silice ont permis d'atteindre une atténuation de 0,18 dB/km à la longueur d'onde $\lambda=1.55 \mu\text{m}$, soit quasiment la limite théorique espérée.

II.4.3.3.2. Dispersion

La fibre optique est utilisée comme canal de transmission et à ce titre, elle possède une bande passante. Tout canal de transmission se comporte comme un filtre passe bas ou passe bande, c'est-à-dire de bande passante limitée. Or il faut savoir que la répartition dans l'espace des fréquences, des composantes fréquentielles d'un signal numérique (densité spectrale de puissance) occupe une bande passante infinie. Le canal de transmission va amputer le signal d'information d'une partie de ses composantes fréquentielles et il y'aura, outre un retard du signal d'information à la sortie du canal (retard correspondant à la traversée du filtre).

a) Dispersion chromatique

La dispersion chromatique se manifeste par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation. Ce type de dispersion existe dans tous les fibres, il est dû au fait que la source de lumière n'est pas monochromatique c'est-à-dire qu'elle possède une largeur spectrale non nulle.

La dispersion chromatique résulte de la différence de vitesse de groupe, des différents composants spectraux du signal à transmettre. Le caractère dispersif est lié au fait que la silice a un indice de réfraction qui dépend de la longueur d'onde.

b) Dispersion intermodale

L'élargissement de l'impulsion dû à la dispersion modale résulte de la différence de temps de propagation des différents modes qui se propage dans une fibre multimode .

Dans une fibre optique multimode à saut d'indice, l'indice de réfraction du cœur est constant et les différents modes ne se propagent pas tous suivant les mêmes trajectoires et ne parcourt donc pas la même distance mais ont cependant la même vitesse de propagation [48].

c) Dispersion de polarisation

Cette dispersion due à la biréfringence de la fibre, provoque une déformation des impulsions lumineuses par le fait que les deux principaux états de polarisation ont des constantes de propagation légèrement différentes.

Il en résulte que les états de polarisation des bords et du centre des impulsions différentes de plus en plus au cours de la propagation, d'où leur déformation.

Pour pouvoir compenser avec précision la dispersion de polarisation de la fibre installée, il est nécessaire de l'avoir préalablement mesurée. Les recherches effectuées dans ce domaine ont surtout pour objectif de comparer la précision de différents procédés de mesure [43].

II.4.3.3.3. Phénomènes non linéaires

Les systèmes de télécommunications sur fibre optique sont conçus dans l'hypothèse d'une transmission linéaire ; les effets non-linéaires sont alors des effets parasites qui dégradent les performances quand les puissances véhiculées deviennent élevées. Aujourd'hui, les systèmes de transmission à haut débit et grande distance utilisent à l'émission des amplificateurs de puissance, ce qui conduit à des puissances injectées dans la fibre très élevées et des effets non-linéaires non négligeables. On peut citer comme effets non linéaires :

-L'effet Kerr qui traduit la dépendance de l'indice de réfraction par rapport à l'intensité du champ électromagnétique. Les conséquences de cet effet sont : l'auto-modulation de phase, la modulation de phase croisée, le mélange à quatre ondes, l'instabilité de modulation.

-L'effet Brillouin stimulé qui se traduit par le transfert de la puissance du signal utile vers une onde contrapropagative séparée de 11GHz. Il se caractérise par un seuil très marqué, à partir duquel la puissance réfléchie croît très rapidement au détriment du signal utile. Compte tenu des valeurs de puissances par canal mises en général en jeu dans les systèmes terrestres, cet effet n'est pas un problème.

-L'effet Raman stimulé qui se traduit par un transfert de puissance vers une onde copropagative séparée de 13THz environ (soit 104 nm) du signal utile, et il a un seuil de puissance nettement plus élevé que l'effet Brillouin. Il pourra avoir une influence dans les

systèmes futurs avec des multiplex très larges, les canaux extrêmes se trouvant perturbés par ceux situés à l'autre bord de la bande [48].

II. 4.4. La fibre compensatrice de dispersion (DCF)

La DCF est une fibre dont le rôle est d'annuler la dispersion chromatique qui provient de la variation de l'indice de réfraction et la vitesse de groupe du signal transmis avec la longueur d'onde du signal lors de la propagation du signal dans la fibre monomode. Cette fibre peut être conçue par un choix judicieux du profil d'indice de la fibre. Cette technique est considérée comme étant la meilleure solution permettant de minimiser les pénalités introduites par la dispersion chromatique sur une large bande de longueurs d'onde.

Elle consiste alors à introduire un tronçon de longueur adaptée de cette fibre dont la dispersion est de signe opposé par rapport à celle de la fibre de ligne, mais il n'est pas possible de ramener la dispersion chromatique cumulée à zéro périodiquement simultanément sur toute une bande de plusieurs nanomètres en ajoutant simplement une seule et même valeur négative. L'idée est alors de combiner les deux fibres en utilisant le bon rapport de longueur donné par :

$$\kappa = \frac{L_{\text{Fibre de ligne}}}{L_{\text{DCF}}} = \left| \frac{D_{\text{chDCF}}}{D_{\text{chFibre de Ligne}}} \right|$$

La dispersion chromatique totale (ou cumulée) notée D_C est alors définie par :

$$D_C = D_{\text{chFibre de Ligne}} L_{\text{Fibre de Ligne}} + D_{\text{chDCF}} L_{\text{DCF}} \approx 0$$

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

La DCF est caractérisée par sa simplicité de mise en œuvre et sa bonne résistance aux éléments extérieurs, son avantage majeur est son caractère large bande, mais elle présente aussi des inconvénients comme les pertes linéiques non négligeables [49].

II. 4.5. L'amplificateur

L'amplificateur optique est un dispositif qui assure l'amplification. L'amplificateur optique présente de nombreux intérêts qualitatifs par rapport au répéteur régénérateur qui doit être conçu pour un débit bien spécifique. En effet, dans un amplificateur optique, la bande

passante n'est plus limitée par l'électronique et peut atteindre plusieurs centaines de gigahertz. L'amplificateur optique offre l'avantage d'amplifier les signaux dont la longueur d'onde correspond à leur plage de sensibilité sans tenir compte du débit de transmission et du format de modulation utilisé. Cependant, l'amplificateur optique ne régénère pas le signal et n'effectue pas non plus la mise en forme du signal à amplifier, il amplifie le signal au même titre que son bruit associé.

II.4.5.1. Composants pour l'amplification optique

Les différents moyens d'amplification optique, dans le cadre des télécommunications autour de $1,55\mu\text{m}$, ont été développés dans l'objectif de garantir une amplification optique du signal incident en ligne optimale. Cet objectif est atteint lorsque les systèmes autorisent :

- un fort gain d'amplification (supérieur à 20dB),
- un fort rapport signal sur bruit transmis (proche de 8dB),
- une possibilité d'amplification sur une large bande spectrale (supérieure à 30nm).

II.4.5.1.1. Composant EDFA

Le support d'amplification de la technologie EDFA est une fibre dopée par une petite quantité d'ions terre rare Erbium. Elle utilise un laser de pompe pour apporter l'énergie nécessaire et exciter les ions Erbium (inversion de population ou pompage optique) de la fibre.

Après pompage, l'ion terre rare dans la fibre se trouvant dans un niveau d'énergie élevé tend à revenir vers un état d'énergie plus faible en restituant cette énergie sous forme de photons. Ces photons sont émis de manière stimulée à une longueur d'onde de $1,55\mu\text{m}$: le cœur de la fibre devient alors un milieu amplificateur, et génère ainsi l'amplification "tout optique" du signal d'entrée. Cette technologie est un produit technologiquement mature.

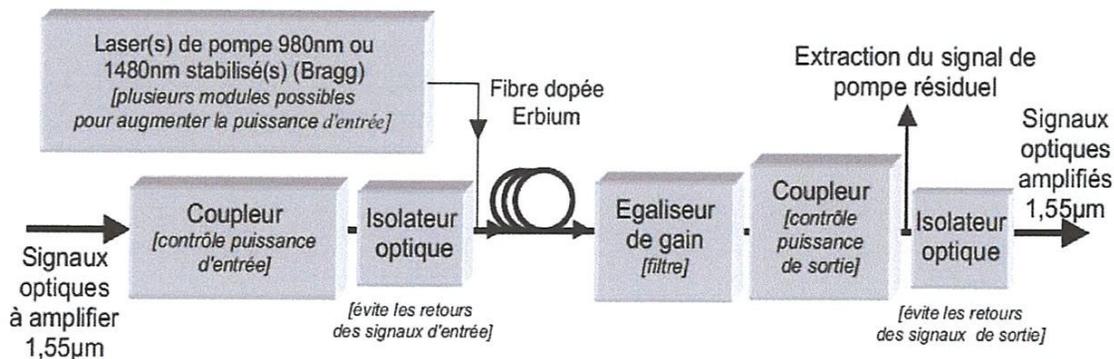


Figure II.27 Schématisation du fonctionnement d'un amplificateur EDFA [50].

II.4.5.1.2. Module d'amplification Raman

Le processus d'amplification Raman utilise les propriétés intrinsèques d'une fibre en silice pour amplifier le signal optique incident. En effet, lors du processus d'amplification optique, le pompage optique (laser de pompe de longueur d'onde de 1480nm) conduit les électrons de la fibre à un niveau d'énergie supérieure : état de transition. Les électrons se trouvent alors dans un état instable. Ceux-ci tendent donc à revenir vers un état d'énergie plus faible en se désexcitant sur le niveau d'énergie inférieure : état de vibration ou l'émission stimulée a lieu grâce aux photons incidents émis par le laser de pompe. Puis, le retour à l'état fondamental se fait sous la forme d'émission d'un photon appelé phénomène de relaxation. Le cœur de la fibre constitue alors un milieu amplificateur.

L'inconvénient de cette amplification réside dans le fait que le gain de la fibre dépend fortement de la puissance du laser de pompe; pour obtenir un gain élevé, une importante puissance de laser de pompe est alors nécessaire. De plus, les modules d'amplification Raman nécessitent l'utilisation de composants actifs et passifs (laser de pompage, filtre...) ne favorisant pas une intégration accrue.

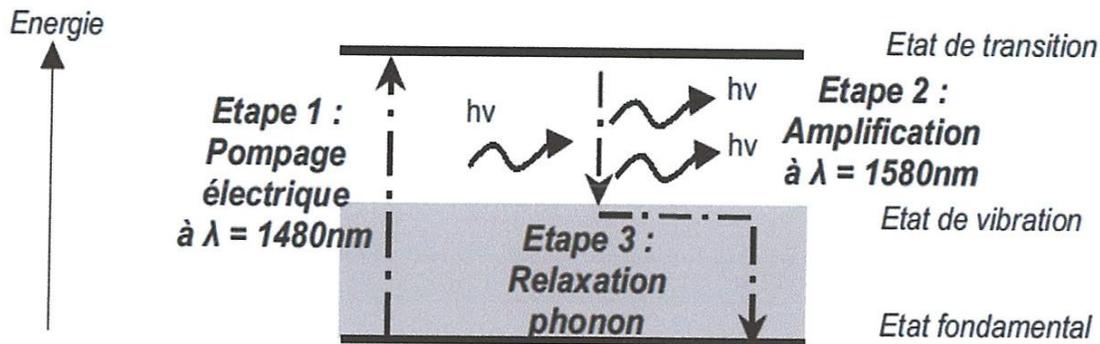


Figure II.28 Schématisation du fonctionnement de l'amplification Raman [50].

II.4.5.1.3. Amplificateur optique à semiconducteur (AOS)

Un AOS est un composant qui permet l'amplification de la lumière incidente par émission stimulée dans un matériau semiconducteur. Pour se placer dans les conditions d'amplification optique, un pompage électrique est nécessaire et il est réalisé grâce à une jonction PN (hétérostructure), brique de base d'un AOS, polarisée en direct permettant alors l'inversion de population au sein de ce composant. La technologie AOS ressemble donc fortement à celle des diodes laser [50].

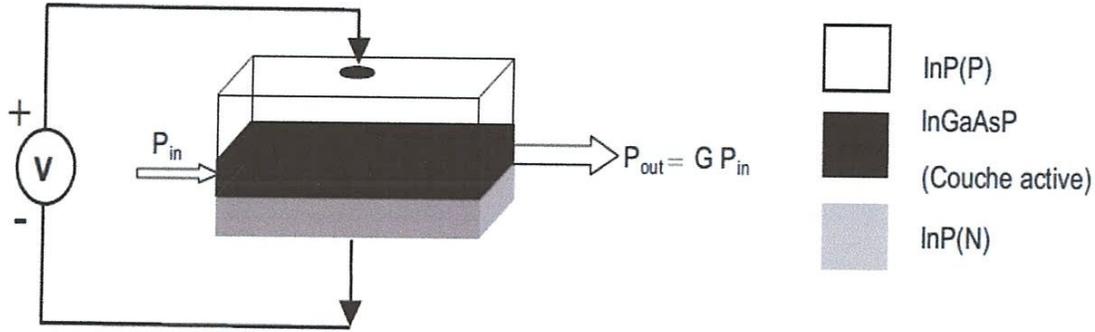


Figure II.29 Schématisation du fonctionnement de la technologie AOS [50].

II.4.6. Les OXC (Optical Cross Connect)

Le schéma sur la figure (II.30) représente le principe général des brasseurs optiques (Optical Cross-Connect : OXC).

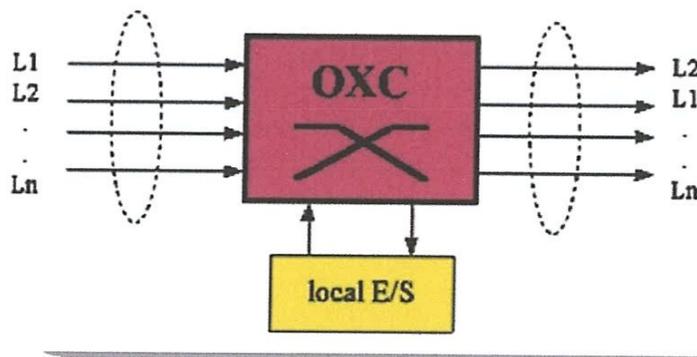


Figure II.30 Schéma de principe d'un OXC [39].

Les brasseurs optiques sont typiquement utilisés à la jonction de grands réseaux de types métropolitains, régionaux ou longue distance, et servent à rediriger le trafic d'une fibre vers une autre. La "matrice de redirection" peut être figée par construction ou reconfigurable par l'utilisation de techniques variées comme les MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems - micro miroirs), ou des commutateurs optiques à commande électriques (commutateur électro-optiques, à cristaux liquides). Parmi les technologies reposant sur l'utilisation de la micromécanique, une seule est aujourd'hui réellement opérationnelle : celle des micros miroirs 2D/3D, elle permet de réaliser des brasseurs optiques reconfigurables.

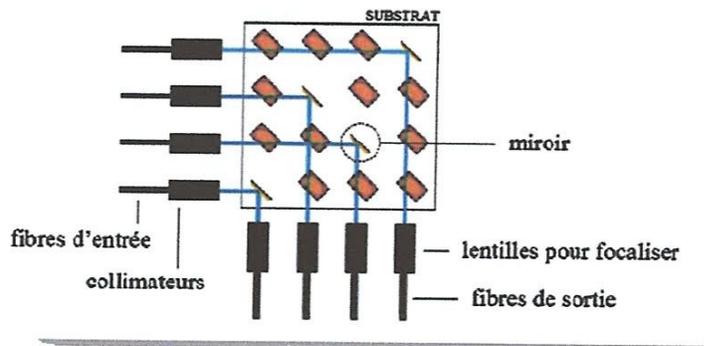


Figure II.31 Exemple de brasseur réalisé à base de micro miroirs 2D [39].

II. 4.7. Les Multiplexeurs optiques à insertion/extraction (OADM)

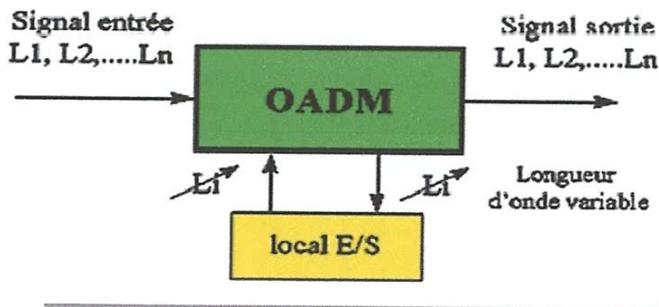


Figure II.32 Schéma de principe des OADM [39].

Sur la figure (II.32) est représenté le schéma de principe d'un Multiplexeur Optique à insertion/extraction (Optical Add/Drop Multiplexer, OADM). L'OADM le plus rencontré dans les réseaux optiques fait appel à l'utilisation combinée de deux composants: le circulateur optique et les réseaux de Bragg [39].

II.4.7.1. Circulateur optique

Un circulateur optique impose au signal un sens de circulation et oblige un signal à sortir par la "porte" qui suit immédiatement celle par où il est entré. Des modèles à 3 ou 4 ports sont couramment commercialisés. Contrairement à ce que laisse penser le schéma, les circulateurs ne sont pas circulaires et sont commercialisés "hors OADM" sous forme de petits cylindres (ressemblant à des stylos) ou de T.

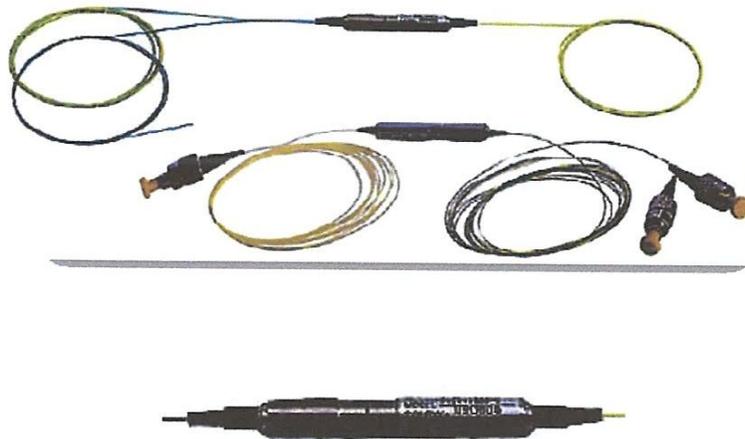


Figure II.33 Les circulateurs optiques [37].

II.4.7.2. Les réseaux de Bragg

Le réseau de Bragg est un dispositif très sélectif en longueur d'ondes. Il est utilisé comme un filtre en réflexion pour l'application d'extraction et d'insertion dans les OADM.

Le principe du multiplexeur optique à insertion/extraction est d'extraire une seule longueur d'onde d'un signal multiplexé transportant une information et d'insérer à la même place la même longueur d'onde mais qui transporte une autre information [39].

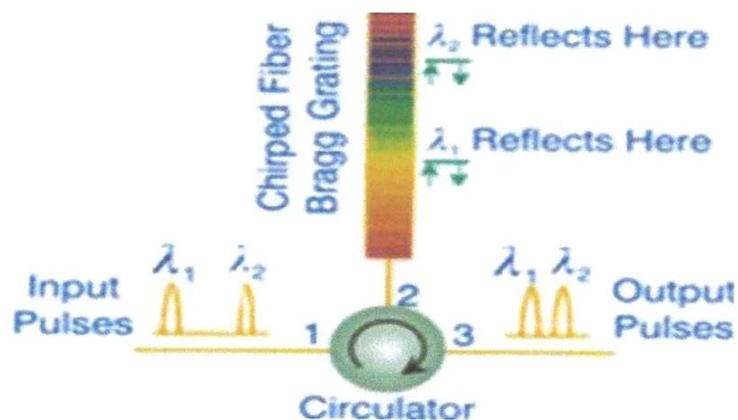


Figure II.34 Les OADM à réseaux de Bragg [37].

II.4.7.3. ROADM à base de WB

Un OADM Reconfigurable (ROADM) en architecture Broadcast & Select (B&S) est basée sur l'utilisation d'un bloqueur de longueurs d'onde (Wavelength Blocker, WB). Tous les canaux à l'entrée sont partiellement extraits au niveau d'un coupleur. Les canaux à insérer sont combinés avec les canaux "express" au niveau d'un autre coupleur. Le sous système WB

fournit la fonctionnalité atténuateur optique variable pour les canaux "express" et bloque tout canal qui va être remplacé par un nouveau canal à insérer. Comme le WB est le seul élément sélectif en longueur d'onde vu par les canaux "express", alors l'implémentation de cet élément avec une technologie garantissant une bande spectrale large et plate permettra à ces canaux de traverser plusieurs nœuds avec une dégradation minimale. La contrainte sur la qualité de la fonction de filtrage est un peu moins forte au niveau des multiplexeurs et démultiplexeurs des ports "Add" et "Drop" car ils ne sont traversés qu'une seule fois par le signal optique.

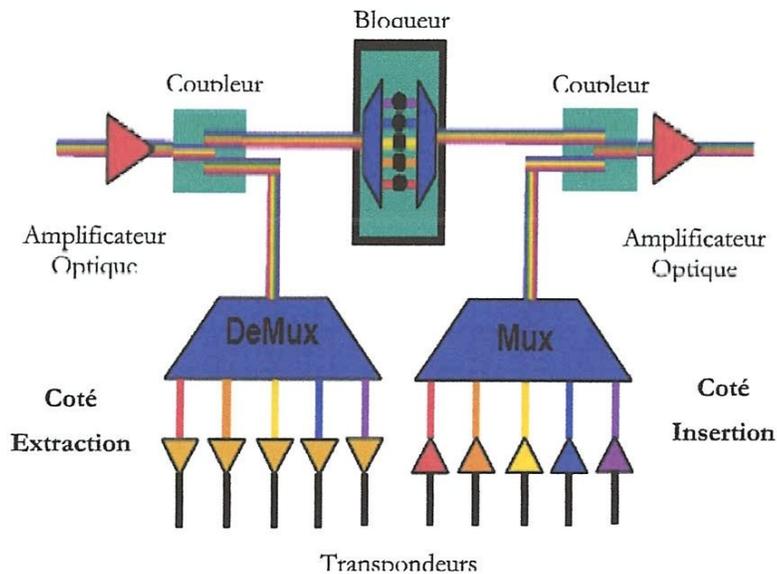


Figure II.35. Architecture B&S d'un ROADM [39].

II.4.7.4. ROADM à base de WSS

L'architecture de ROADM, qui utilise un élément appelé Commutateur Sélectif de longueur d'onde (Wavelength Selective Switch, WSS) est illustrée sur la figure (II.36). Le WSS a un port d'entrée et plusieurs ports de sorties. Un de ces derniers ports peut être désigné comme port "express" et les autres comme ports d'extraction. Toute combinaison de canaux sur le port d'entrée peut être routée vers n'importe quel port de sortie. Si le nombre de canaux à extraire est supérieur au nombre de ports d'extraction, alors il est nécessaire d'équiper ces ports avec des filtres ou des démultiplexeurs [39].

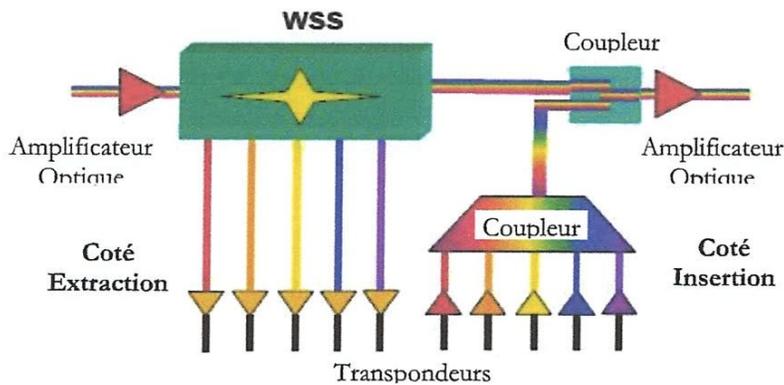


Figure II.36 ROADMs utilisant WSS [39].

II.4.8. Le module de réception

La transmission par fibre optique des données nécessite des conversions électrique-optique et optique-électrique du signal. L'interface optique de réception, est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique, en lui apportant le minimum de dégradation. Ce rôle est garanti par le photodétecteur qui, pour simplifier, se comporte comme un compteur de photons et un générateur de courant. La première propriété requise est une sensibilité importante pour la longueur d'onde utilisée. La deuxième est la rapidité. La troisième propriété demandée est un apport minimum de bruit.

II.4.8.1. Principe de la photodétection

Les photons transmis par la fibre pénètrent dans le détecteur, constitué d'une jonction p-n semi-conductrice. Absorbés, ils peuvent provoquer le passage d'électrons d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Dans cette dernière, les électrons moins liés deviennent libres.

Le photon a donc laissé place à une paire électron-trou. Une différence de potentiel est appliquée en inverse afin d'empêcher les électrons de retomber dans son état le plus stable. Sous l'effet du champ électrique, les deux catégories de porteurs sont séparées et entraînées vers des zones où ils sont majoritaires (nommées P ou N). Les porteurs ainsi générés sont alors recueillis sous forme de photocourant. Le nombre de paires électron-trou est égal au nombre de photons absorbés, mais seules les paires réellement collectées (non recombinées) contribuent au photocourant.

Chapitre III :
Présentation du logiciel
OPTISYSTEM

III.1. Introduction

Les systèmes de communication optiques deviennent de plus en plus complexes de jour en jour. La conception et l'étude de ces systèmes, qui comprennent en général des dispositifs non-linéaires et des sources de bruit non-gaussien, sont très complexes et consomment un temps considérable. En conséquence, il est nécessaire de faire appel à de nouveaux outils logiciels pour surmonter cette difficulté.

Optisystem est un logiciel innovateur de simulation des systèmes de communication qui conçoit, teste et optimise pratiquement n'importe quel type de lien optique dans la couche physique d'un large éventail de réseaux optiques. Optisystem est un produit autonome basé sur la modélisation réaliste des systèmes de communication par fibres optiques. Il possède un environnement de simulation puissant et une définition hiérarchique des composants. Ses possibilités peuvent être étendues avec l'ajout par l'utilisateur de nouveaux composants, et peut être parfaitement interfacé par un large éventail d'autres outils.

III.2. Domaines d'applications

Créé pour répondre aux besoins des chercheurs, des ingénieurs des télécommunications optiques, intégrateurs de systèmes, des étudiants et une grande variété d'autres utilisateurs, Optisystem répond à la demande de l'évolution du marché photonique en mettant à disposition de cette communauté scientifique un outil puissant et facile à employer pour concevoir des systèmes optiques.

Optisystem permet aux utilisateurs de planifier, tester et simuler :

- Des réseaux WDM/TDM ou de CATV.
- Des anneaux SONET/SDH.
- Émetteur, canal, amplificateur, et conception de récepteur.
- Conception de carte de dispersion.
- Estimation de BER et des pénalités du système avec différents modèles de récepteurs.
- Estimation de BER du système amplifié et calcul de bilan de liaison.
- Conception de système de communication optique.
- Les réseaux optiques passifs (PON) – FTTx.
- Systèmes optiques en espace libre (FSO).
- Systèmes radio sur fibre (RoF).

III. 3. Dispositifs et principales fonctionnalité [51]

III.3.1. Bibliothèque de composants :

La bibliothèque des composants d'Optisystem inclut des centaines de composants dont les paramètres peuvent être déduits à partir de dispositifs physiques réels. Elle s'intègre avec l'équipement d'essai et de mesure des différents fournisseurs. Les utilisateurs peuvent incorporer des nouveaux composants basés sur des sous-ensembles et des bibliothèques définies pour l'utilisateur, ou utiliser la Co-simulation avec un outil de tiers tel que MATLAB ou SPICE.

III.3.2. Intégration avec des outils logiciels d'Optiwave

Optisystem permet d'utiliser les outils spécifiques de logiciels d'Optiwave pour l'optique intégrée et des fibres au niveau des composants: OptiAmplifier, OptiBPM, OptiGrating, et OptiFiber.

III.3.3. Représentation du signal mixte

Optisystem gère les formats des signaux mixtes pour les signaux optiques et électriques dans la bibliothèque des composants. Optisystem calcule les signaux en utilisant les algorithmes appropriés relatifs à la précision de la simulation et l'efficacité requises.

III.3.4. Algorithmes de qualité et de performance

Afin de prédire les performances du système, Optisystem calcule des paramètres tels que le BER et le facteur Q en utilisant l'analyse numérique ou les techniques semi-analytiques intégrant les interférences entre symboles et le bruit.

III.3.5. Outils de visualisation avancés

Les outils de visualisation avancés produisent des spectres sur l'OSA, signal chirp, des diagrammes de l'œil, des états de polarisation, des diagrammes de constellation et bien plus encore. En outre, des outils d'analyse du système WDM sont inclus énumérant la puissance de signal, le gain, le niveau de bruit et l'OSNR par canal.

Ces outils permettent aussi de mesurer la dispersion de mode de polarisation (PMD) et enregistre simultanément plusieurs traces, perte d'insertion (IL), retard de groupe différentiel (DGD), dispersion de polarisation chromatique (PDC), le taux de dépolarisation, la pente de dispersion et de propagation de groupe (GD).

III.3.6. Moniteurs de données

On peut sélectionner les ports des composants pour sauvegarder les données et fixer les détecteurs après la fin de la simulation. Cela permet de traiter les données après la simulation sans recalculer. On peut joindre un nombre arbitraire de visualiseurs à l'écran dans le même port.

III.3.7. Simulation hiérarchique de sous-systèmes

Pour construire un outil de simulation flexible et efficace, il est essentiel de fournir des modèles à différents niveaux d'abstraction, y compris le système, sous-système, et composant. Optisystem dispose d'une définition vraiment hiérarchique des composants et des systèmes, ce qui permet d'utiliser des outils logiciels spécifiques pour l'optique intégrée et des fibres au niveau du composant, et permet à la simulation d'être aussi détaillée que les impératifs de précision le souhaitent.

III.3.8. Langage de script puissant

On peut entrer des expressions arithmétiques pour les paramètres et créer les paramètres globaux qui peuvent être partagées entre les composants et sous-systèmes en utilisant la norme langage de script VB. Le langage de script peut également manipuler et contrôler Optisystem, y compris les calculs, la création de disposition et post-traitement lors de l'utilisation de la page de script.

III.3.9. Etat de l'art du calcul des flux de données

Le planificateur de calcul contrôle la simulation en déterminant l'ordre d'exécution des différents modules selon le modèle de flux de données sélectionnée. Le modèle de flux de données principal qui adresse la simulation de la couche de transmission est le flux de données de composant d'itération (CIDF). Le domaine de CIDF emploie l'établissement du programme d'exécution, les conditions de support, dépendant des données d'itération, et la vraie récursivité.

III.3.10. Page de rapport

Une page de rapport entièrement personnalisable permet d'afficher l'ensemble des paramètres et les résultats disponibles dans la conception. Les rapports produits sont organisés dans des bilans, de texte, de graphiques 2D et 3D. Il comprend également l'exportation HTML et des modèles avec des présentations de rapport pré-formatés.

III.3.11. Le projet de loi de matériaux

Optisystem fournit un tableau d'analyse des coûts du système conçu, agencé par le système, mise en page ou d'un composant. Les données sur les coûts peuvent être exportées vers d'autres applications ou des bilans.

III.3.12. Dispositions multiples

On peut créer des nombreux modèles en utilisant le même fichier de projet, ce qui permet de créer et modifier des dessins rapidement et efficacement. Chaque dossier d'Optisystem peut contenir beaucoup de versions de conception. Les versions de conception sont calculés et modifié indépendamment, mais les résultats des calculs peuvent être combinés dans différentes versions, permettant de comparer les modèles.

III.3.13. AWG Bidirectionnel

Une nouvelle fonctionnalité autorise les capacités particulières bidirectionnelles d'Optisystem, ce qui facilite la conception de l'AWG basé sur PON.

III.3.14. Composants de micro-onde

Nouvelle bibliothèque de composants sophistiqués comprenant les coupleurs hybrides de 180 et 90 degrés, les dresseurs, les diviseurs de puissance et les combinateurs. Une solution idéale pour des applications de simulation de la ROF.

III.3.15. Fibres optiques et amplificateurs

Un nouveau paramètre de discrétisation pour les signaux échantillonnés à large bande offre des performances améliorées, la précision et la convergence de gain de l'amplificateur. Mélange à quatre ondes, la diffusion Brillouin stimulée, auto-modulation de phase, modulation de phase croisée, sont tous inclus dans les modèles de fibres optiques d'Optisystem.

III.3.16. Optique en espace libre(FSO)

Nouvelle fonctionnalité permettant la simulation de complexes liens de communication entre satellites.

III.3.17. Constellation et diagrammes polaires

Un moteur de calcul dans Optisystem utilisé pour estimer l'erreur de symbole dans les régions définies par l'utilisateur et les cibles.

III.4. Interface de l'Utilisateur Graphiques (GUI)

Dans l'interface de l'utilisateur graphique on trouve deux fenêtres et une barre d'état. La première fenêtre nommée Plan de projet est une zone de travail principale où on peut insérer et supprimer des composants dans la mise en page, et de créer des connexions entre les composants. La fenêtre dockers où trois dockers sont disponibles : la bibliothèque de composants, le navigateur de projet et la description. La bibliothèque de composant contient des centaines de composants pour construire des projets, on peut importer des composants individuels ou une bibliothèque de composants entiers dans Optisystem, et utiliser la fonction de recherche pour trouver des éléments dans la bibliothèque. Il existe plusieurs catégories de bibliothèque de composants :

- **Default:** affiche la bibliothèque de composants par défaut.
- **Custom:** utilisé pour créer et inclure des composants personnalisés définis par l'utilisateur.
- **Favorites:** utilisé pour inclure les composants les plus souvent utilisés pour un accès facile.
- **Recently Used:** affiche les dix éléments les plus récemment utilisés.

Le deuxième docker est le navigateur du projet qui répertorie des informations sur le projet. On l'utilise aussi pour personnaliser l'affichage du projet puisqu'il permet de sélectionner les informations visibles, calculées, utilisées dans les rapports, et tracées dans les graphiques.

Le dernier docker concerne la description qui permet de développer une description détaillée sur le projet et des composantes, y compris les informations techniques détaillées, pour que d'autres visualiser lorsqu'ils ouvrent le fichier projet et d'utiliser Optisystem.

Il existe dans l'interface une barre d'état permettant d'afficher des informations sur le calcul et l'avancement du projet, des indications utiles sur l'utilisation d'Optisystem, et autres aides situées en bas de la fenêtre du plan du projet.

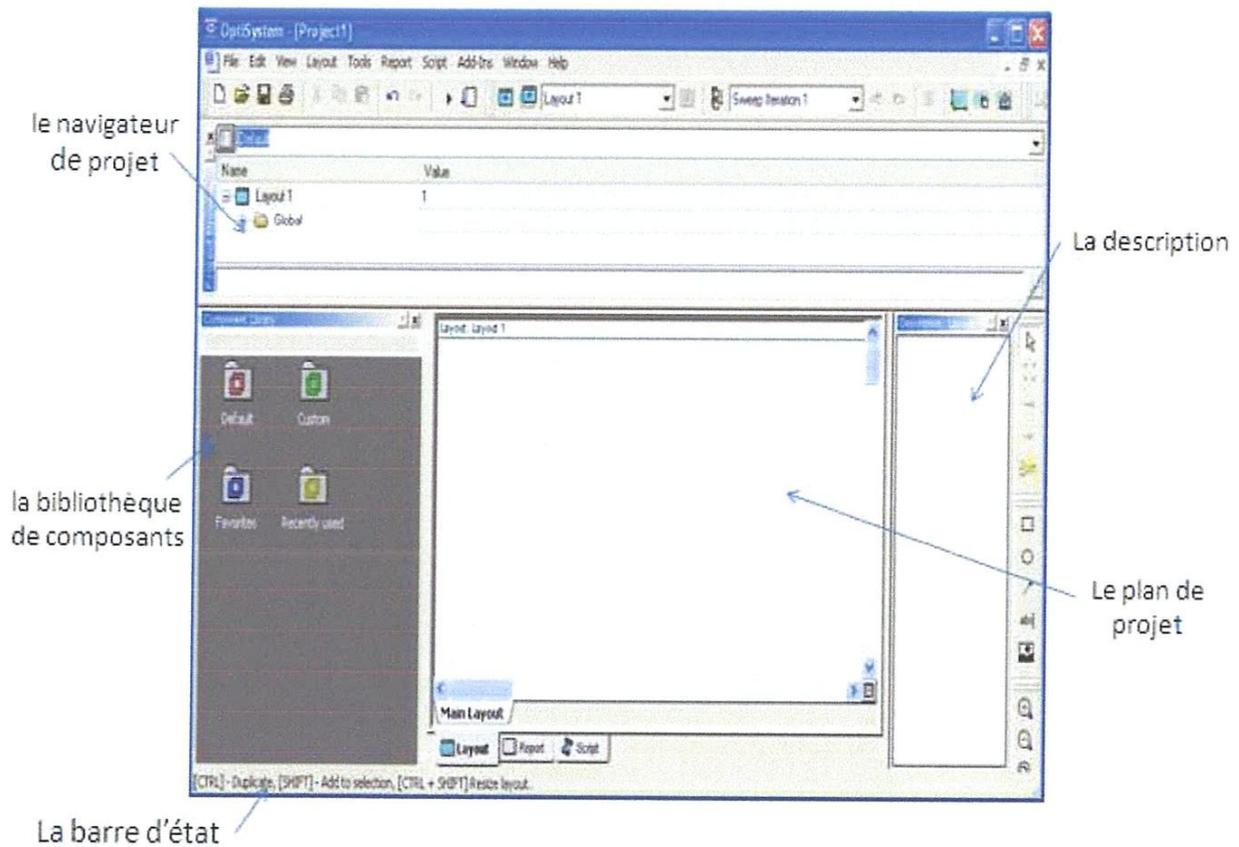


Figure III.1 Interface Graphique de l'Utilisateur.

III.4.1. Utilisation de la bibliothèque de composants

Pour créer un modèle dans le plan de travail, Optisystem fournit à l'utilisateur un ensemble de composants de construction par défaut. Tous les composants nécessaires dans une simulation sont disponibles à partir de la bibliothèque de composants qu'offre le logiciel.

Les étapes à suivre pour utiliser un composant sont :

- Démarrer un nouveau projet, dans le menu principal, aller à **File > New**.
- À partir de la bibliothèque de composants, sélectionner le composant et le placer sur l'espace de travail en faisant glisser l'icône de la bibliothèque, et en le déposant dans l'espace de travail.

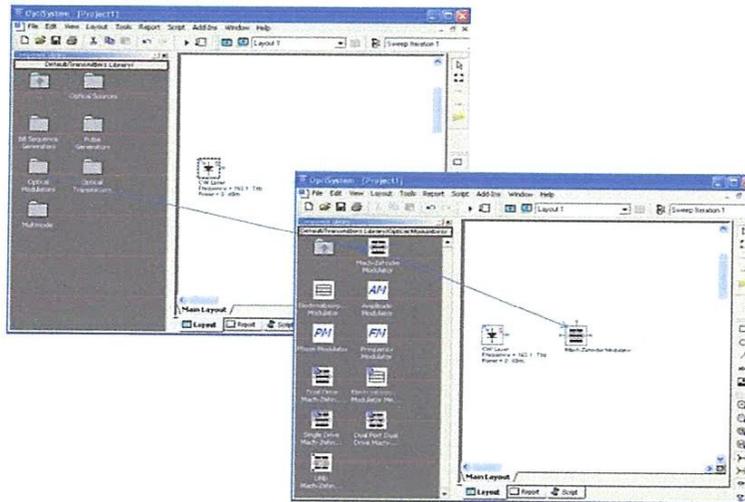


Figure III.2 Ajout d'un modulateur Mach-Zehnder à la disposition.

III.4.2. Connexion des composants

Pour envoyer le signal d'un composant à un autre, nous devons connecter le port de sortie du composant avec le port d'entrée du composant suivant.

Lors de la connexion entre composants, nous ne pouvons pas connecter plus d'un port d'entrée au même port de sortie. Cela signifie que:

- Connecter les composants en cliquant sur le port du premier composant et en la faisant glisser vers le port du suivant composant.

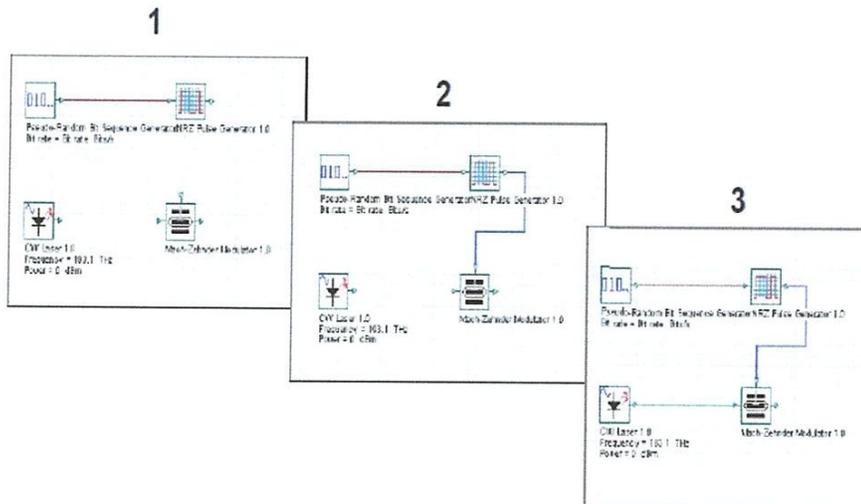


Figure III.3 Connexion de composants.

III.4.3. Visualisation des résultats

Il ya plusieurs façons pour visualiser les résultats lorsque nous utilisons Optisystem. Le dossier visualiseurs dans la bibliothèque de composants permet à l'utilisateur de post-traiter et d'afficher les résultats de la simulation. Selon le type de signal d'entrée, le visualiseur est classé en électrique ou en optique.

- À partir de la bibliothèque de composants, aller à **Default > Visualizers > Electrical (or Optical)**.
- Sélectionner le visualiseurs et le mettre dans l'espace de travail en faisant glisser l'icône de la bibliothèque.

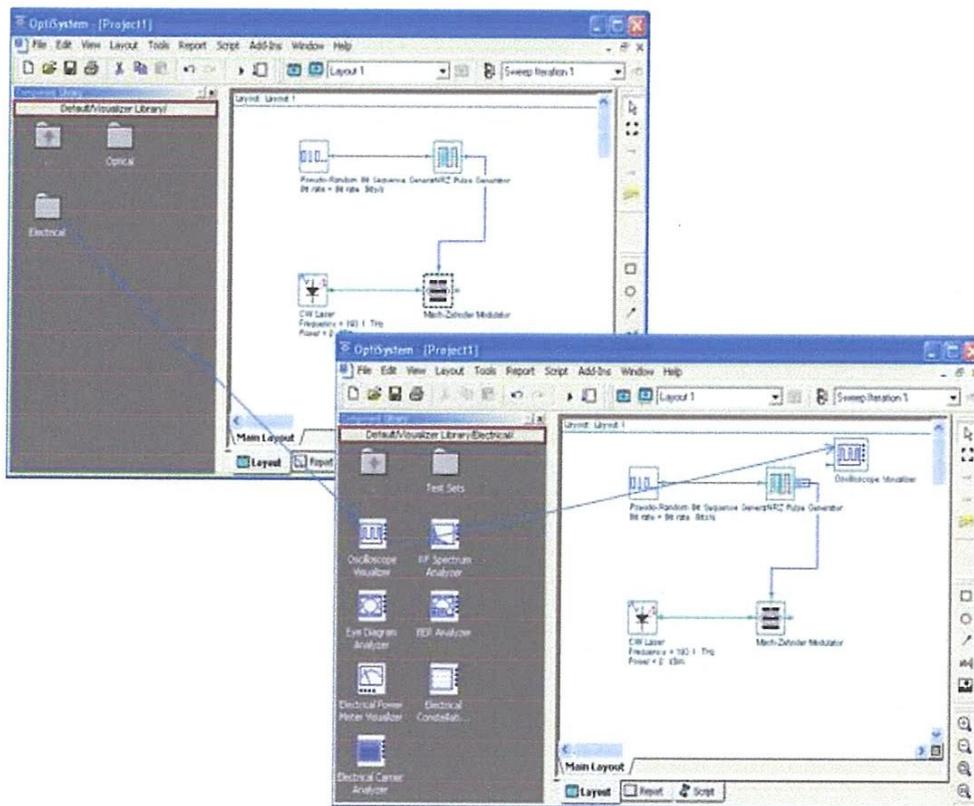


Figure III.4 Ajout d'un visualiseur oscilloscope à la disposition.

III.4.4. Connexion de visualiseurs

Afin de visualiser le signal d'un composant, on doit raccorder le port de sortie du composant au port d'entrée du visualiseur.

Lorsqu'on raccorde les composants de visualiseurs, nous pouvons connecter plus d'un visualiseur à un port de sortie du composant. Cela signifie que nous pouvons avoir plusieurs visualiseurs attachés au port de sortie du même composant.

- Connecter le composant et les visualiseurs en cliquant sur le port de sortie du composant et en le faisant glisser vers le port d'entrée du visualiseur.

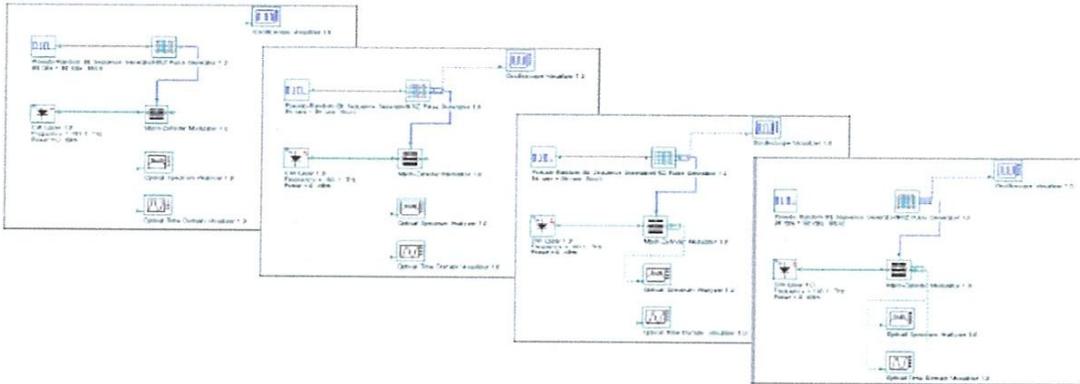


Figure III.5 Connexion de visualiseurs.

III.4.5. Paramètres des composants

Un Double clic sur l'un des composants fait apparaître une boîte de dialogue pour éditer les propriétés de ce composant.

- Dans l'éditeur de mise en page, double clic sur l'icône de composants. Les Paramètres des composants sont organisés par catégories. Pour chaque onglet de la catégorie, il y'a une liste de paramètres. Les paramètres ont les propriétés suivantes: **disp**, **nom**, **valeur**, **unités** et **mode**.

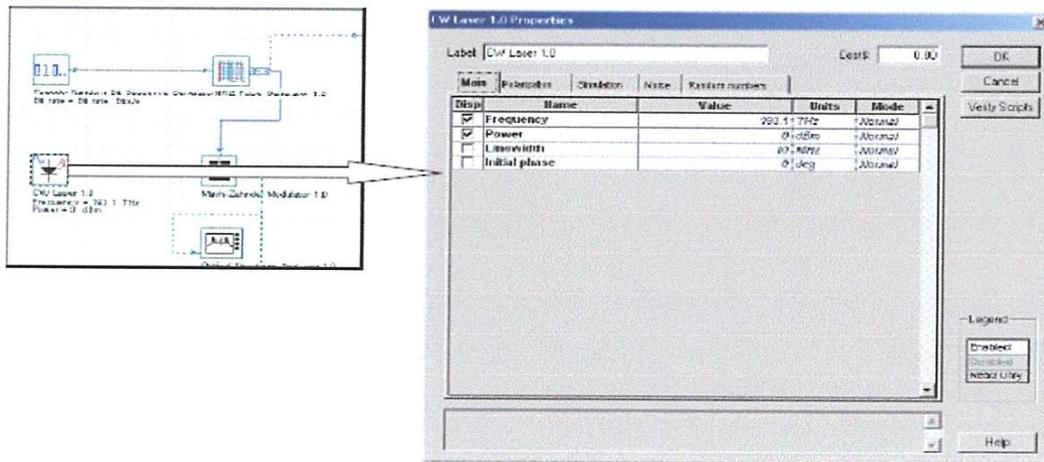


Figure III.6 Les paramètres des composants.

III.4.6. Modification des unités de paramètres

Certains paramètres peuvent avoir de multiples unités, ce qui est le cas de la fréquence et des paramètres de puissance. La fréquence pourrait être en Hz, THz ou nm, ou la puissance pourrait être inscrite en W, mW ou dBm, et la conversion sera automatique. Nous devons appuyer sur entrée ou cliquer sur une autre cellule pour mettre à jour les valeurs.

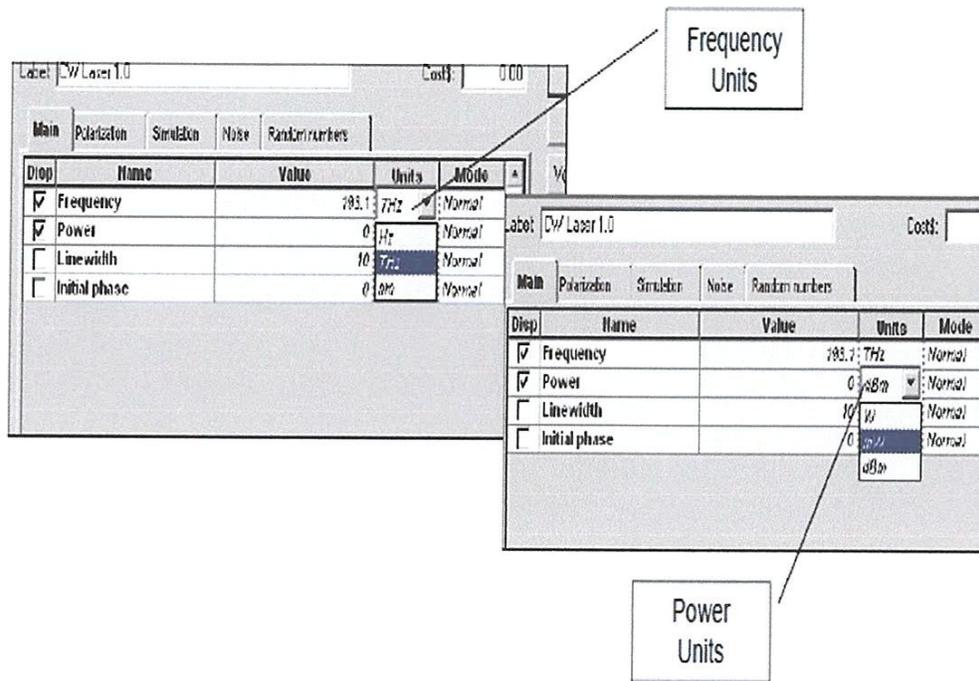


Figure III.7 Modification des unités des paramètres.

III.4.7. Exécution de la simulation

Optisystem permet à l'utilisateur de contrôler le calcul de différentes manières:

- Il calcule l'ensemble du projet.
- Calcule la version actuelle de la conception: toutes les itérations de balayage.
- Calcule l'itération actuelle: itération courante de balayage dans la version actuelle de la conception.

Pour exécuter une simulation, effectuer la procédure suivante

- Dans File menu, sélectionner **Calculate**.
- Dans la boîte de dialogue de calcul, sélectionner **Play** pour lancer la simulation.

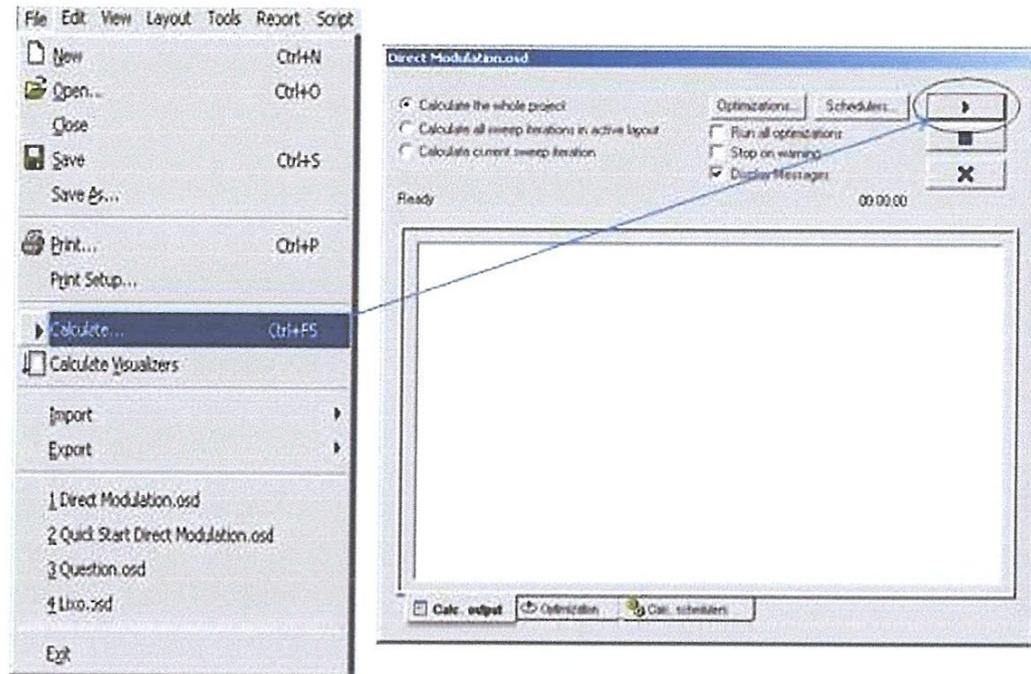


Figure III.8 Exécution de la simulation.

III.4.8. Affichage des résultats à partir du visualiseurs

Un double clic sur l'un des visualiseurs fait apparaître une boîte de dialogue pour la visualisation des graphes et des résultats générés au cours de la simulation. Depuis Optisystem, on peut visualiser le signal et le bruit séparément. L'utilisateur peut également visualiser les résultats en fonction de leur représentation. Chaque onglet de gauche se réfère à l'une des représentations.

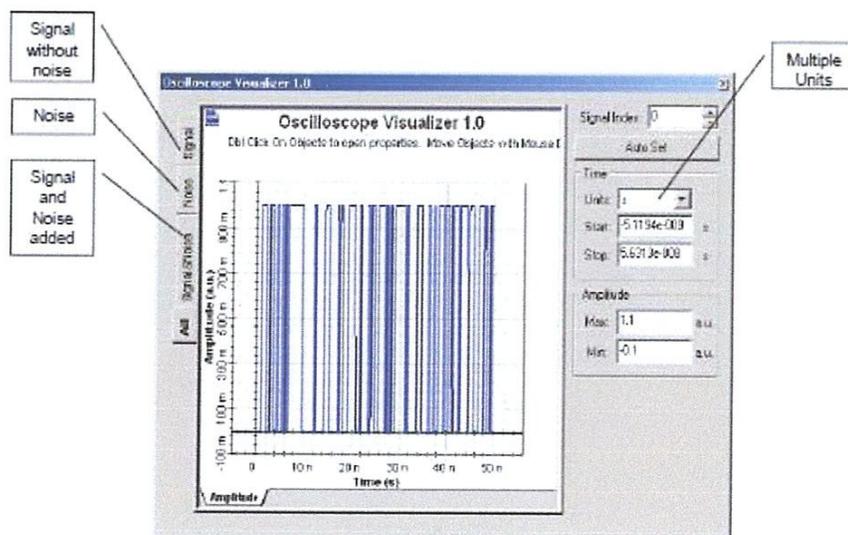


Figure III.9 Affichage les résultats à partir d'oscilloscope.

III.4.9. Sauvegarde des graphes

Nous pouvons également obtenir le tableau de points avec les valeurs de chaque point dans le graphe, puis l'enregistrer comme un fichier texte, copier le graphe dans le presse papier sous forme de bitmap ou nous pouvons exporter le graphique dans différents formats de fichiers.

- Cliquer sur le bouton **Menu** dans le coin supérieur gauche et sélectionner les données d'exportation « export data ».
- Afin de sauvegarder les données dans un fichier texte, dans la boîte de dialogue d'exportation de données cliquer dans le bouton **Exporter** dans un fichier texte.

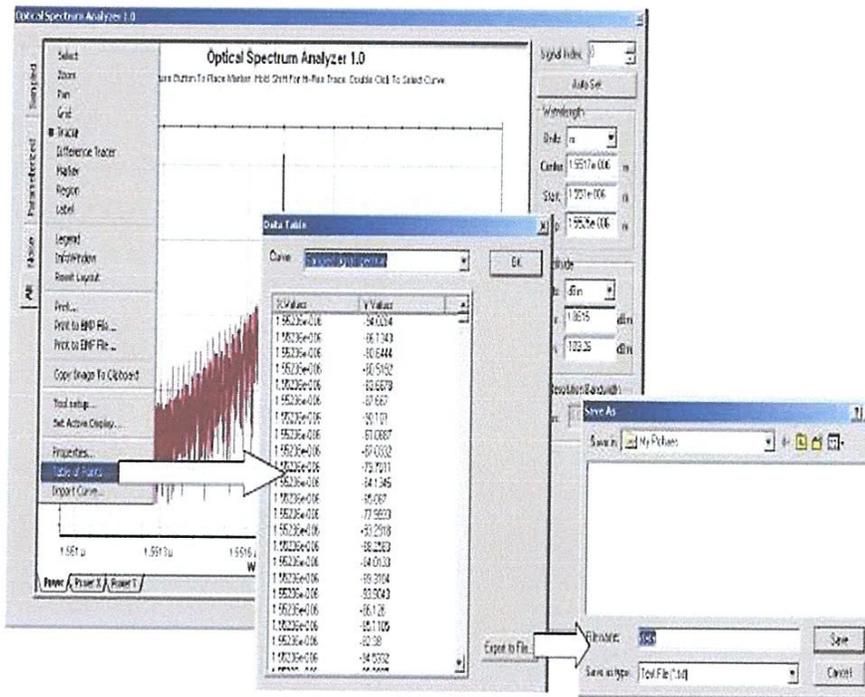


Figure III.10 Les données d'exportation.

III.4.10. Sauvegarde des résultats de la simulation

Optisystem permet à l'utilisateur de sauvegarder les données des moniteurs. Cela signifie que nous pouvons enregistrer le fichier projet avec les signaux provenant des moniteurs. La prochaine fois que nous chargeons le fichier, les visualiseurs recalculent les graphes et les résultats des moniteurs.

Pour sauvegarder les résultats de simulation, exécuter le procédé suivant :

- Après la fin du calcul, à partir du menu **Outils**, choisir **options**. La zone de dialogue **options** apparaît.
- Choisir **Save Monitor Data**, puis cliquer sur **Save**. Les résultats sont sauvegardés dans le fichier-projet.

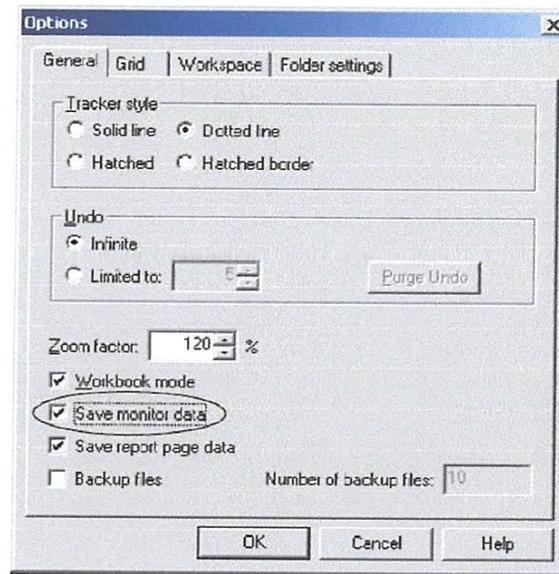


Figure III.11 La zone de dialogue options.

- Choisir **File > Save As**, puis cliquer sur **Save**. La zone de dialogue **Enregistrer sous** apparaît.
- Enregistrer le projet.

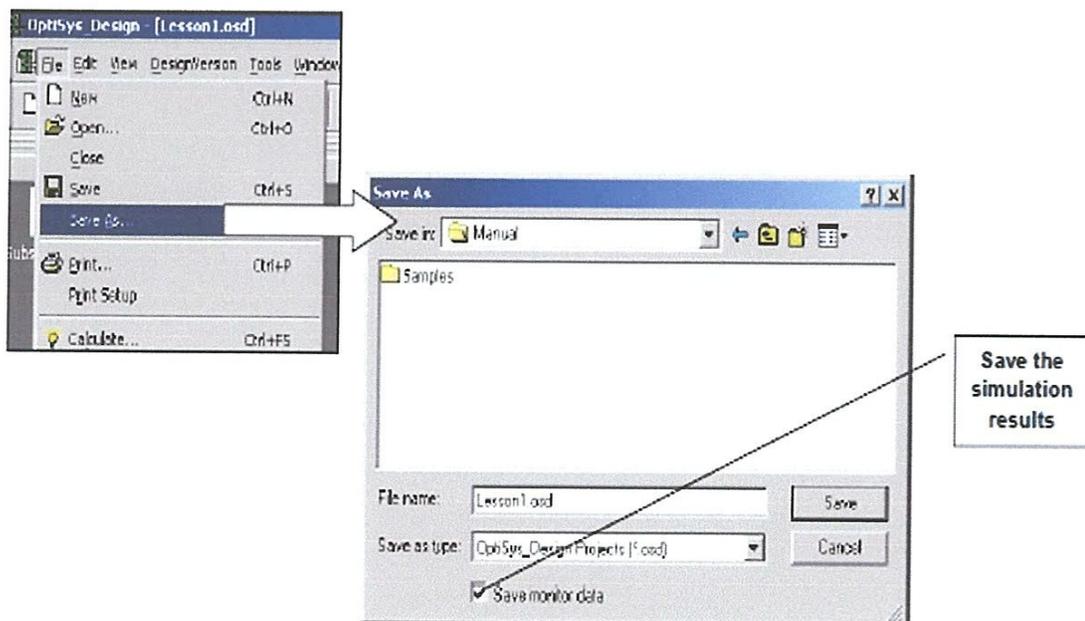


Figure III.12 Enregistrement des résultats du projet et de la simulation.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description exhaustive du logiciel Optisystem, qui est un logiciel de simulation destinée à concevoir et à faciliter la connaissance et la maîtrise du fonctionnement des systèmes de télécommunications optiques.

Chapitre IV :
Simulation et discussion

IV.1. Introduction

La raison principale pour laquelle de nombreux travaux de recherche portent sur l'amélioration des performances que peuvent atteindre les systèmes de transmission optique, notamment de leur produit capacité \times distance, est la demande croissante et continue en capacité de transmission. Il est important donc de concevoir des systèmes capables de répondre à cette demande. Le but de cette étude est d'évaluer la contribution de l'amplification optique et la fibre de compensatrice de dispersion dans l'amélioration des performances d'un système de communication optique à longue distance.

IV.2. Etude d'un système WDM (sans amplification ni compensation de dispersion)

Pour un système de transmission à quatre canaux WDM avec un espacement entre canaux de 100 GHz (193.1Thz jusqu'à 193.4Thz), l'évaluation de ces performances a été faite en utilisant le logiciel OPTISYSTEM, comme représenté sur la figure (IV.1). Le système WDM comporte les composants suivants : les modules d'émission, le multiplexeur et le démultiplexeur, la fibre, et les modules de réception. Il est utile de signaler que le choix du nombre de canaux qui est égale à quatre canaux est arbitraire et sert uniquement pour le besoin de la démonstration.

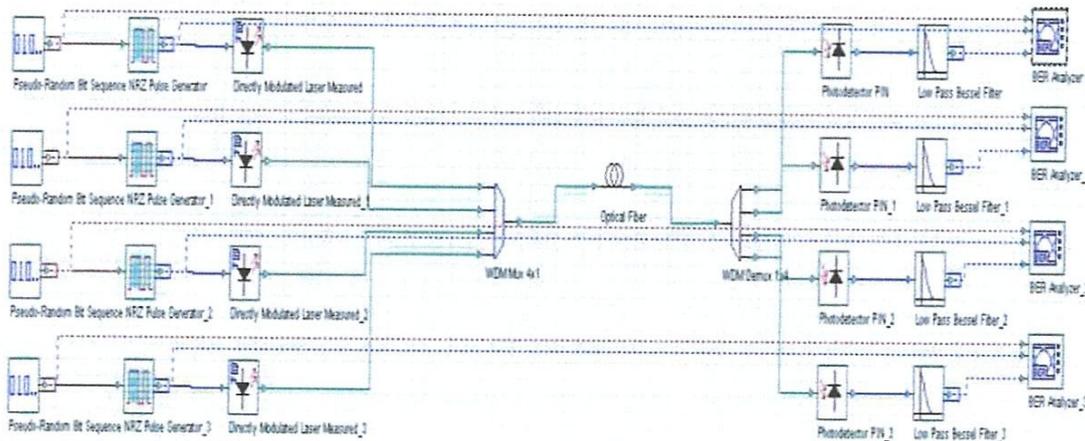


Figure IV.1 Synoptique du système WDM étudié.

a. Le bloc émission

Le rôle de l'émetteur consiste à délivrer à la fibre un signal optique continu et modulé, sur lequel sont inscrites les données électriques binaires. Pour le besoin de notre simulation, nous avons choisi les grandeurs décrites ci-dessous.

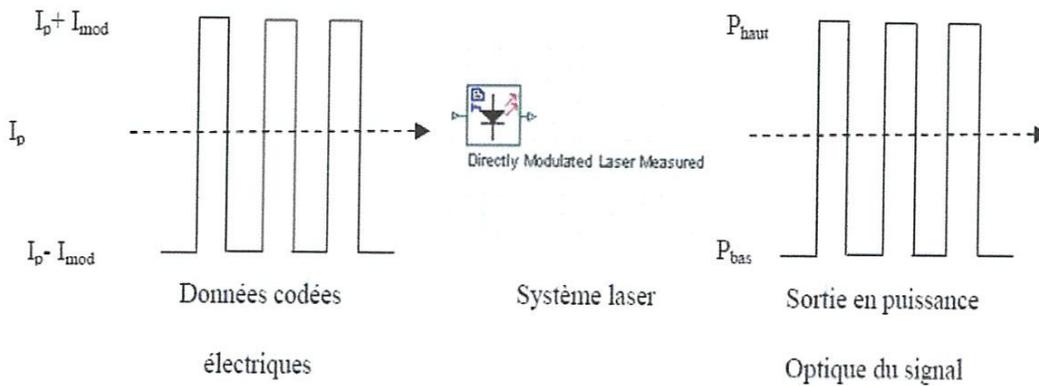


Figure IV.3 Modulation directe du laser.

Pour un bon fonctionnement du laser, il est fortement conseillé de rester en fonctionnement continu, c-à-d conserver en permanence un courant de polarisation (I_p) au dessus du courant du seuil du laser. En effet, avoir des niveaux de modulation ($I_p - I_{mod}$) en dessous du seuil signifie alterner un état allumé et un état éteint du laser (fonctionnement impulsionnel), alterner l'émission stimulée et l'émission spontanée. Or l'émission spontanée nécessite un temps de réponse de plusieurs nanosecondes et limite donc le débit de transmission.

Pour la simulation, le laser émet une puissance de 5dBm et présente une largeur spectrale de 10Mhz.

Le spectre et le signal optique à la sortie du laser du canal 1 sont représentés à la figure IV.4.

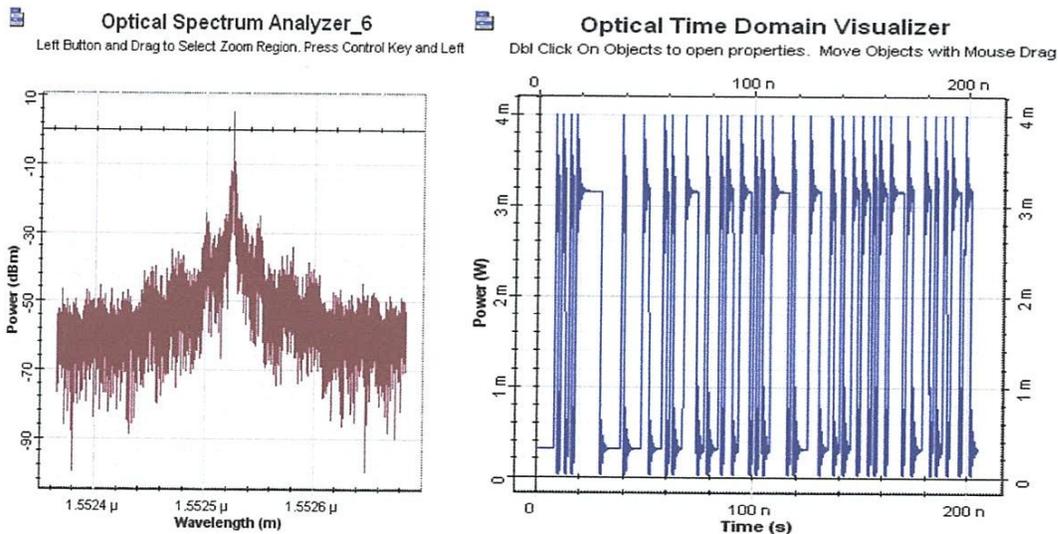


Figure IV.4 Le spectre optique et (à gauche) et le signal optique (à droite) à la sortie du laser du canal 1.

b. Le multiplexeur

Un multiplexeur de longueur d'onde est utilisé pour combiner les quatre signaux optiques et les couples entre eux dans une même fibre.

Dans cette étude nous avons pris la perte d'insertion 0dB et le filtre de type Bessel de 5^{ème} ordre. Le spectre obtenu est illustré à la figure IV.5.

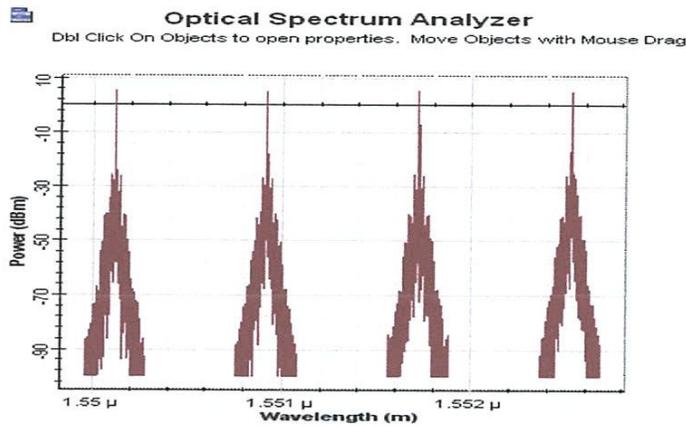


Figure IV.5 Le spectre optique à la sortie du multiplexeur.

c. La fibre

La partie support de transmission du système est l'opérateur représentant une fibre optique monomode.

Dans cette simulation, la fibre qu'on a utilisée est monomode avec une atténuation de 0.25dB/Km à la longueur d'onde $\lambda=1.55\mu\text{m}$, un paramètre de dispersion chromatique égale à $+17\text{ps/nm.Km}$ et respectivement une longueur de $L=80\text{Km}$.

Le spectre optique à la sortie de la fibre est représenté à la figure IV.6.

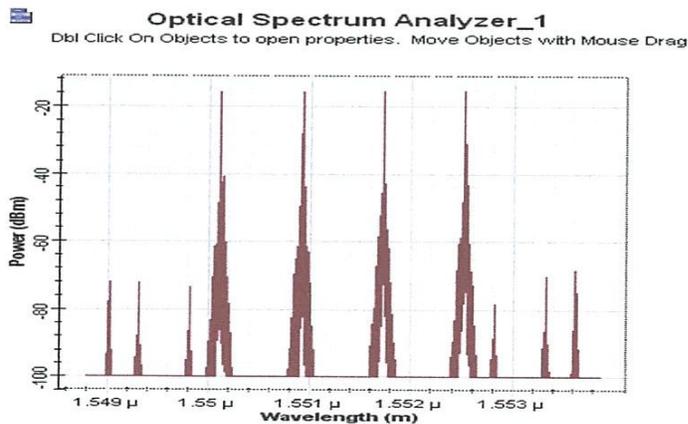


Figure IV.6 Le spectre optique à la sortie de la fibre.

On note que le spectre présente une atténuation due à l'affaiblissement introduit par le passage dans la fibre optique.

d. Le démultiplexeur

Un démultiplexeur est utilisé pour séparer les signaux optiques dans des canaux appropriés.

Dans notre simulation nous avons pris la perte d'insertion 0dB et le filtre de type Bessel de 5^{ème} ordre. Les spectres obtenus sont illustrés à la figure IV.7.

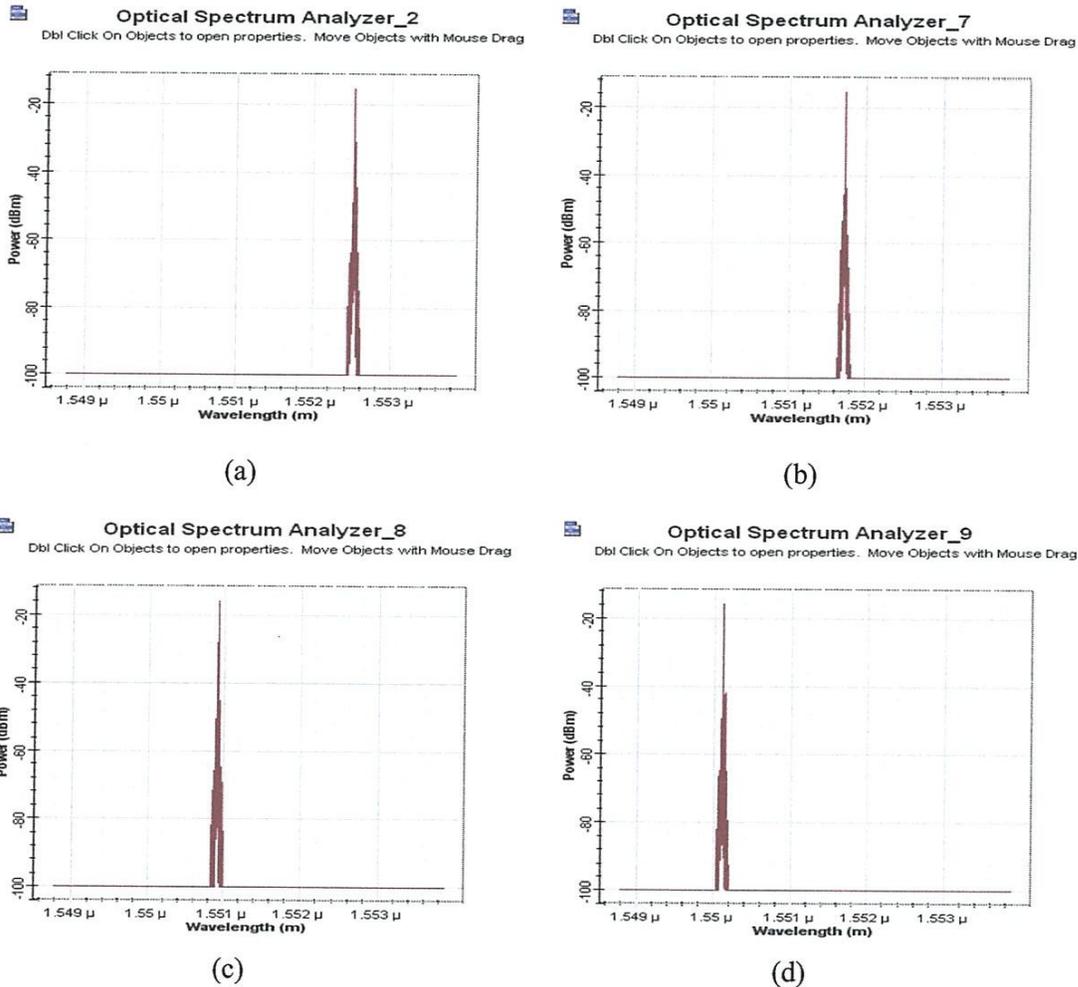


Figure IV.7 Les spectres optiques à la sortie du démultiplexeur, a) pour le canal 1, b) pour le canal 2, c) pour le canal 3, d) pour le canal 4.

e. Le bloc de réception

Le récepteur, qui a pour rôle d'extraire des informations traitées, est composé d'une photodiode PIN qui convertit les signaux optiques en signaux électroniques. On a choisi une PIN qui a une Sensibilité de 0.9 A/W et un courant d'obscurité de 10nA.

La figure suivante illustre le signal reçu et le diagramme de l'œil à la sortie photodiode PIN du canal 1.

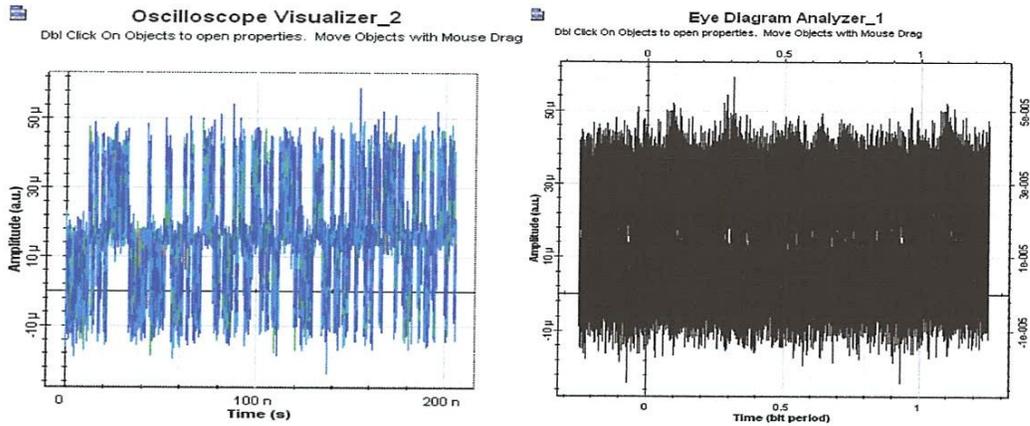


Figure IV.8 Le signal (à gauche) et le diagramme de l'œil (à droite) à la sortie de la photodiode du canal 1.

Le Diagramme de l'œil affiche un facteur de qualité $Q=2.89$ pour le canal 1, car le signal est complètement noyé dans le bruit pour cela nous allons utiliser un filtre dont le rôle est d'éliminer ce dernier et mettre le signal en forme.

Le filtre électrique passe-bas utilisé est de type Bessel de 5^{ème} ordre de bande passante $0.75 R$ (R est le débit binaire).

Le signal reçu et le Diagramme de l'œil après le filtrage pour les mêmes données sera le suivant avec une amélioration remarquable du facteur Q qui donne une valeur de 34.33 , pour le canal 2, 3 et 4 nous avons trouvé un facteur de qualité Q (mesuré après le filtre) de 34.71 , 35.29 et 35.67 , respectivement.

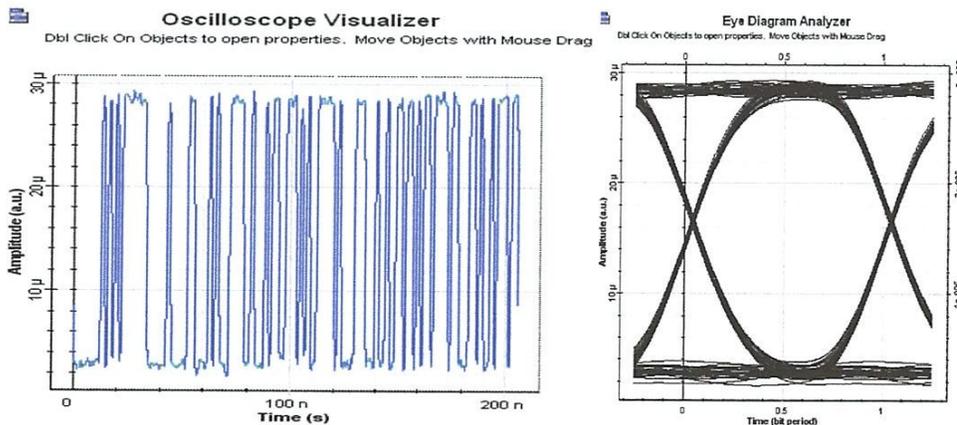


Figure IV.9 Le signal (à gauche) et le diagramme de l'œil (à droite) après filtrage du canal 1.

IV.2.1. Effet du débit et de la distance parcourue sur la qualité de la liaison

Nous avons choisi d'évaluer les performances du système étudié en mesurant le Facteur de qualité Q. Sachant que les normes fixées dans le domaine des télécommunications exigent, pour maintenir la qualité de transmission à un niveau acceptable, un facteur Q supérieur à 6, ce qui correspond à un taux d'erreurs binaire (BER) inférieur à 10^{-9} .

Le but de toute liaison est d'atteindre une distance de transmission la plus longue possible avec le plus grand débit, tout en conservant à la réception le signal émis. Dans ce qui suit, nous allons étudier l'effet de ces deux paramètres sur une telle liaison. Plusieurs simulations ont été réalisées avec les mêmes modules d'émission et de réception mais avec différentes longueurs de transmission de fibre et diverses valeurs de débit.

IV.2.1.1. Effet du débit

Dans cette simulation, nous avons varié, pour une longueur de fibre $L=100\text{Km}$, le débit binaire entre $D=155\text{Mb/s}$ jusqu'à $D=10\text{Gbit/s}$. Les résultats de simulation pour différents débits se propageant sur une distance de $L=100\text{ Km}$ sont représentés sur la figure suivante :

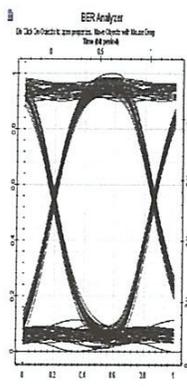
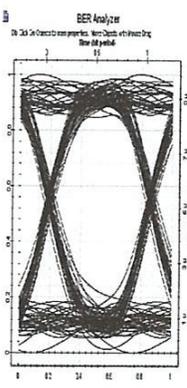
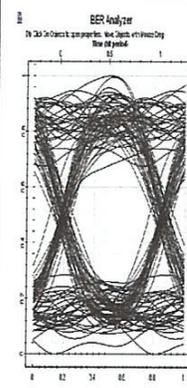
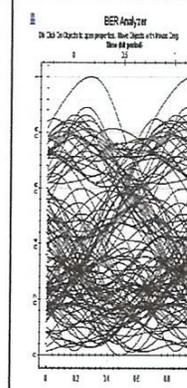
Débit D	D=155Mbit/s	D=622 Mbit/s	D=2.5 Gbit/s	D=10 Gbit/s
Facteur de qualité Q	Q=24.09	Q=13.39	Q=6.26	Q=0
Diagramme de l'œil				

Figure IV.10 Diagramme de l'œil et facteur de Qualité du signal en sortie du canal 1 pour différents débits avec une fibre de longueur $L=100\text{Km}$.

IV.2.1.2. Effet de la distance

Dans cette simulation, nous avons varié, pour un débit $D=2.5\text{Gbit/s}$, la longueur de la fibre optique entre $L=50\text{Km}$ jusqu'à $L=150\text{Km}$. Les résultats de simulation pour ces différentes longueur de fibre et au débit de 2.5 Gbit/s sont représentés sur la figure suivante :

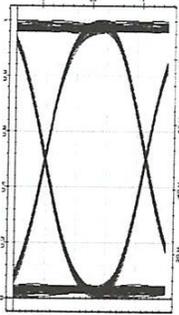
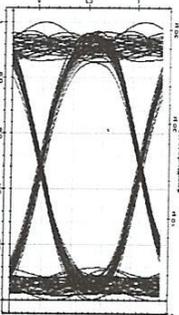
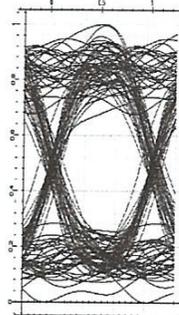
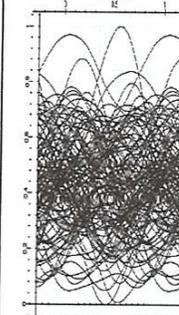
Longueur L (km)	L=50 km	L=80 km	L=100 km	L=150 km
Facteur de qualité Q	Q=51.74	Q=18.87	Q=6.26	Q=0
Diagramme de l'œil				

Figure IV.11 Diagramme de l'œil et facteur de Qualité du signal en sortie du canal 1 pour différentes longueurs de la fibre à un débit $D=2.5\text{Gbit/s}$.

Les deux graphes suivants représentent les variations que subit le facteur de qualité lorsque la longueur de la fibre ou le débit de transmission augmentent.

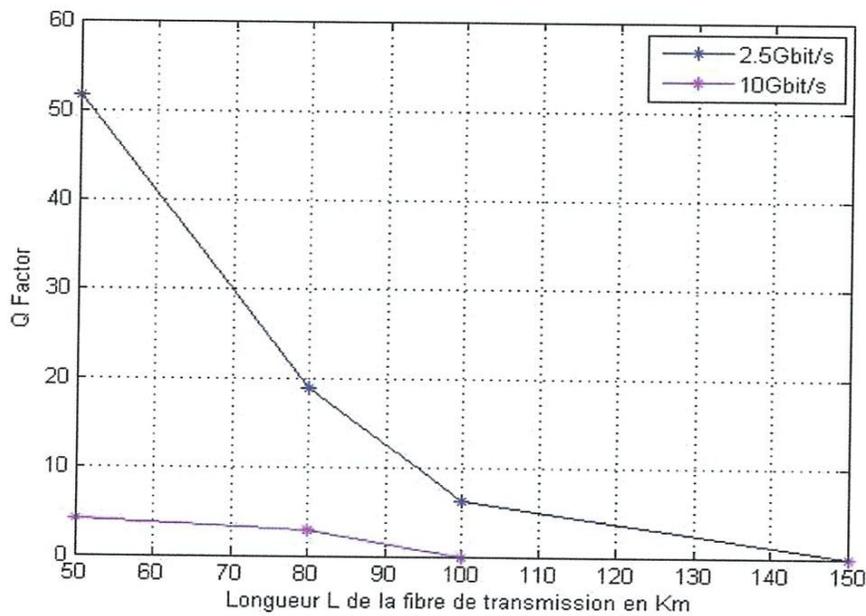


Figure IV.12. Variation du facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre de transmission.

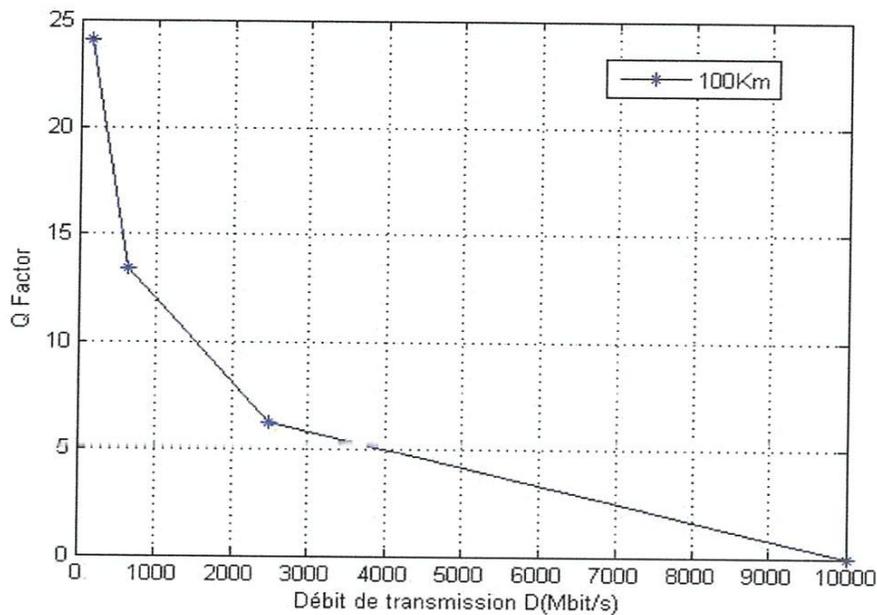


Figure IV.13 Variation du facteur de qualité en fonction du débit de transmission.

Comme prévu, la distance de propagation et le débit ont une relation inversement proportionnel avec le facteur de qualité de la transmission. D'après les résultats trouvés, nous remarquons que la qualité du signal reçu est d'autant plus faible que la longueur de la fibre (ou le débit) est plus grande. Ceci est constaté par la diminution du facteur de qualité à la réception. Ces dégradations sont dues aux différents effets inhérents à la fibre et aux composants tels que la dispersion chromatique, l'atténuation et les divers bruits de transmission. Pour éliminer ces perturbations, il est indispensable d'utiliser une fibre compensatrice de dispersion (DCF) et un amplificateur optique dans le but d'améliorer la qualité du signal reçu.

IV.3. Etude d'un système WDM (avec amplification et compensation de dispersion)

Pour corriger les effets d'atténuation et de dispersion, on a utilisé un amplificateur optique à fibre dopée à l'Erbium avec un gain de 10dB et un facteur de bruit de 6dB, et une fibre de compensation de dispersion (DCF) qui n'est autre qu'une simple fibre monomode à forte dispersion négative. Pour déterminer la longueur de la DCF, on fait appel à la théorie qui prévoit que la dispersion cumulée doit être nulle :

$$D_{c1}L_1 + D_{c2}L_2 = 0$$

Où D_{c1} et D_{c2} , L_1 et L_2 , désignent les dispersions chromatiques et les longueurs des fibres de ligne monomode (SMF) et DCF, respectivement.

Les caractéristiques détaillées de cette fibre de compensation et de la fibre SMF sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Les paramètres de la fibre	SMF	DCF
Longueur (km)	50	10
Dispersion (ps / km / nm)	17	-85
les pertes (dB / km)	0.25	0.5

Tableau IV.1 Paramètres caractéristiques de la fibre de compensation et de la fibre SMF

Notre nouveau système à étudier est représenté sur la figure (IV.14).

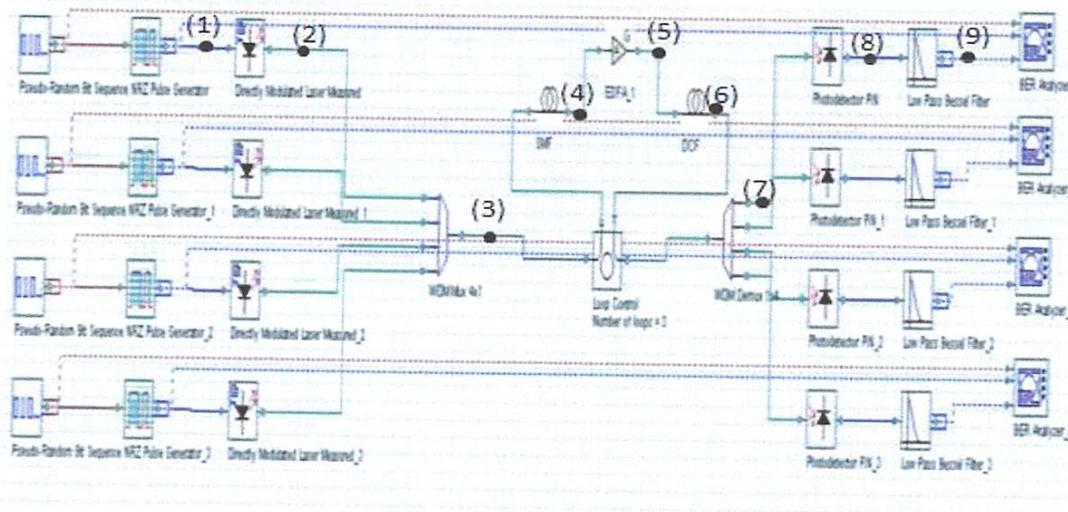


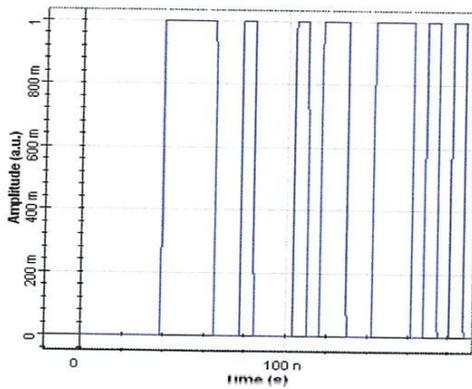
Figure IV.14 Synoptique du système WDM étudié avec la fibre de compensation DCF et l'amplificateur EDFA.

Avant de voir la qualité et les performances de notre nouveau système par la visualisation du signal de sortie, il apparaît intéressant de visualiser l'allure des signaux aux divers points du système pour voir les transformations successives du signal durant son parcours, le comportement et l'influence de chaque composant.

Pour le besoin de la démonstration nous avons choisi d'utiliser le débit de 155 Mbit/s pour revoir facilement visualiser les signaux.

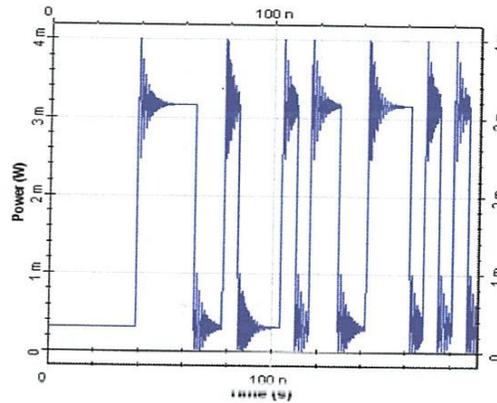
Afin de bien visualiser l'influence des composants nous n'allons prendre que sept impulsions de signal transmis :

Oscilloscope Visualizer
Left Button and Drag to Select Zoom Region. Press Control Key and Left



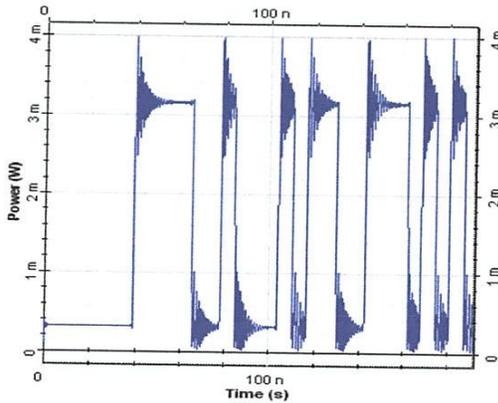
Le signal au point 1.

Optical Time Domain Visualizer
Left Button and Drag to Select Zoom Region. Press Control Key and Left



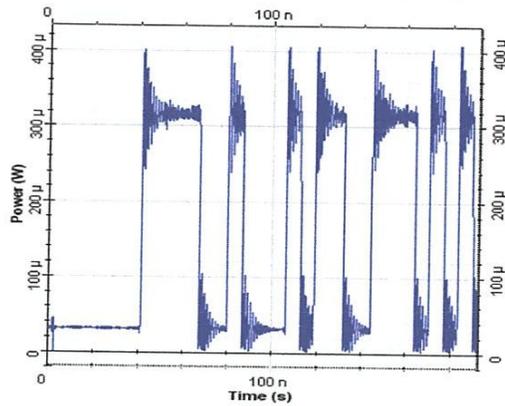
Le signal de sortie au point 2.

Optical Time Domain Visualizer_1
Left Button and Drag to Select Zoom Region. Press Control Key and Left



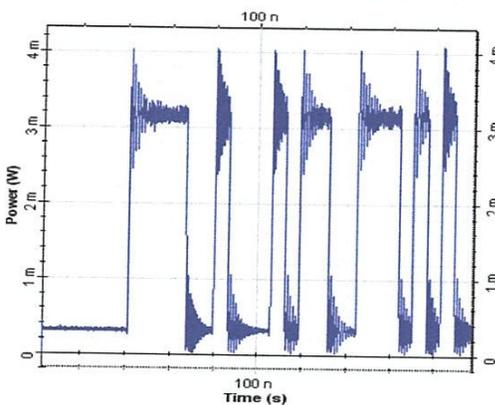
Le signal de sortie au point 3.

Optical Time Domain Visualizer_2
Left Button and Drag to Select Zoom Region. Press Control Key and Left



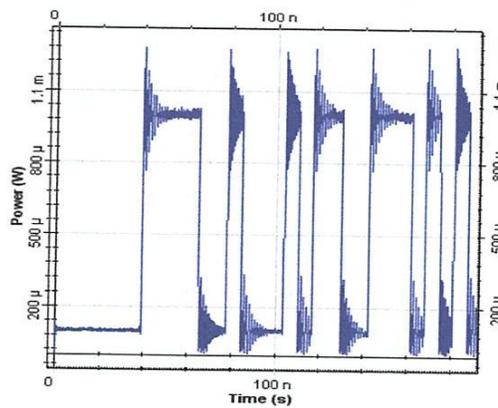
Le signal de sortie au point 4.

Optical Time Domain Visualizer_3
Left Button and Drag to Select Zoom Region. Press Control Key and Left

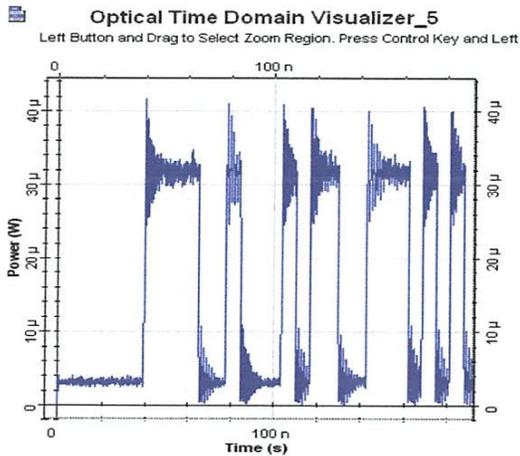


Le signal de sortie au point 5.

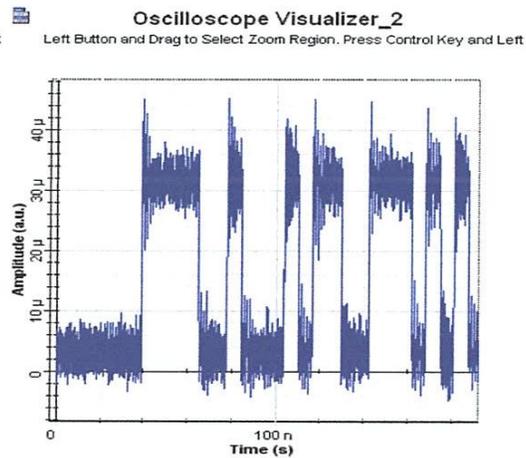
Optical Time Domain Visualizer_4
Left Button and Drag to Select Zoom Region. Press Control Key and Left



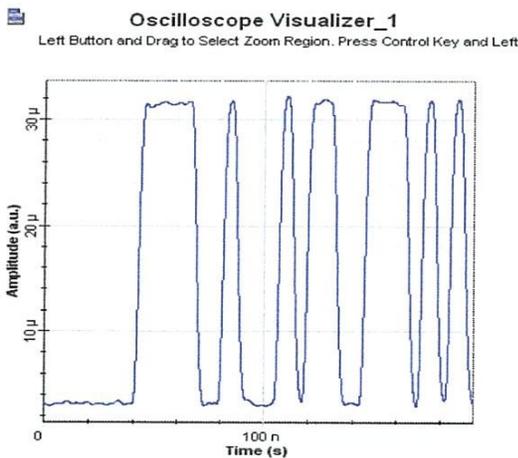
Le signal de sortie au point 6.



Le signal de sortie au point 7.



Le signal de sortie au point 8.



Le signal de sortie au point 9.

Figure IV.15 Allure des signaux en divers points du système à un débit égale 155Mbit /s.

Le passage du signal optique généré par le laser dans la fibre va lui faire subir l'effet de la dispersion chromatique de la fibre accompagnée d'une atténuation qui vont toutes les deux être corrigées par le passage du signal optique dans la fibre compensatrice et dans l'amplificateur optique EDFA, respectivement. À la réception, la photodiode PIN ajoute à son tour un certain bruit, pour arriver finalement au filtre de réception qui élimine la grande partie du bruit et laisse passé un signal semblable à celui injecté à l'entrée. Les courbes tracées aux divers points du système réconfortent bien cette analyse.

La simulation de cette nouvelle liaison a donné les résultats suivants :

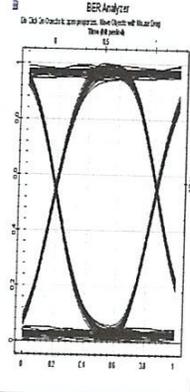
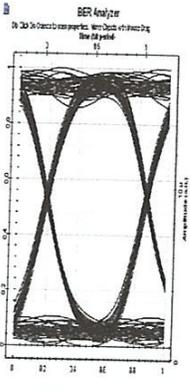
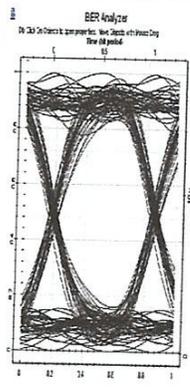
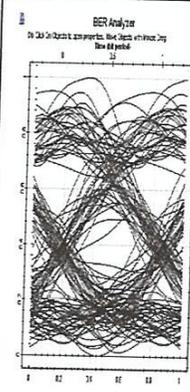
Débit D	D=155Mbit/s	D=622 Mbit/s	D=2.5 Gbit/s	D=10 Gbit/s
Facteur de qualité Q	Q=40.37	Q=22.24	Q=12.77	Q=3.17
Diagramme de l'œil				

Figure IV.16 Diagramme de l'œil et facteur de Qualité du signal en sortie du canal 1 pour différents débits avec une fibre de longueur $L=150\text{Km}$.

Le graphe suivant représente les variations que subit le facteur de qualité lorsque le débit de transmission de notre système augmente avec amplification et compensation de dispersion.

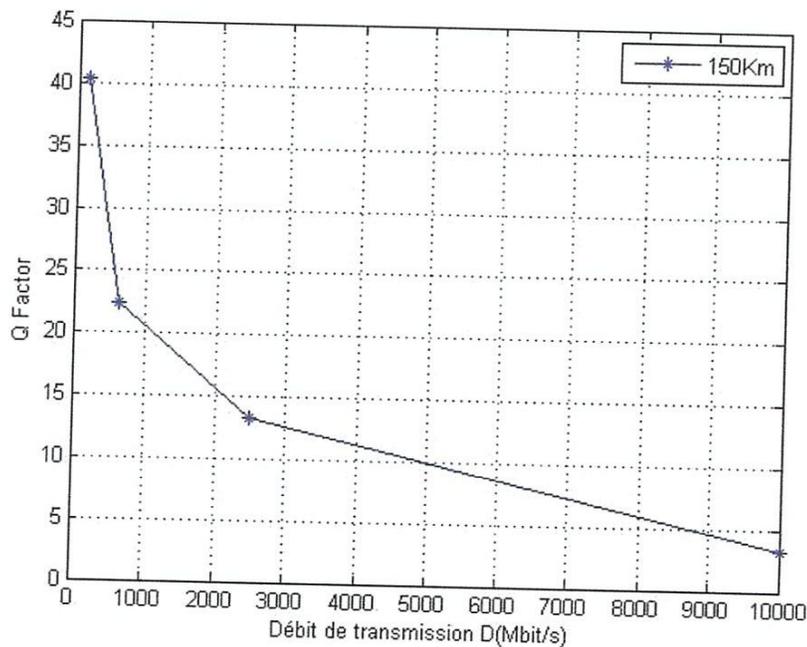


Figure IV.17 Variation du facteur de qualité en fonction du débit de transmission avec amplification et compensation de dispersion.

Les valeurs du facteur de qualité nous donnent une idée claire sur les améliorations apportées par l'introduction de ces deux composants, ce qui nous donne la possibilité d'étendre notre distance de propagation jusqu'au 150 Km pour la fibre de transmission.

Néanmoins, on remarque que le facteur de qualité Q est toujours inférieur à 6 pour le débit de 10Gbit/s. Cette dégradation est due à l'utilisation de la modulation directe du laser.

Cas du système WDM à un débit ≥ 10 Gbit/s : nécessité d'une modulation externe.

L'étude précédente était réservée à la simulation d'un système basée sur la modulation directe. Cette technique a beaucoup d'avantages, mais elle présente aussi des limites critiques dont le laser en est souvent la cause. Les oscillations, le bruit crée font que la modulation directe engendre pour les hauts et très hauts débits certaines dégradations sur le signal optique modulé (phénomène de Chirp). A cela, la modulation externe constitue un remède. Cette méthode sera retenue pour le reste des simulations.

Dans le but d'atteindre des performances pour les hauts débits, nous allons procéder à la modulation externe qui consiste à inscrire les données électriques sur un signal optique continu. Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du laser et non plus par le courant de polarisation (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. Pour cela, il est nécessaire d'insérer un nouveau composant au niveau du bloc d'émission : le modulateur externe utilisé sera le modulateur d'amplitude Mach-Zender, et la source laser utilisé est une source continue. Ces principaux paramètres sont : La puissance (5dBm) et la longueur d'onde.

Notre nouveau schéma bloc est celui de la figure suivante :

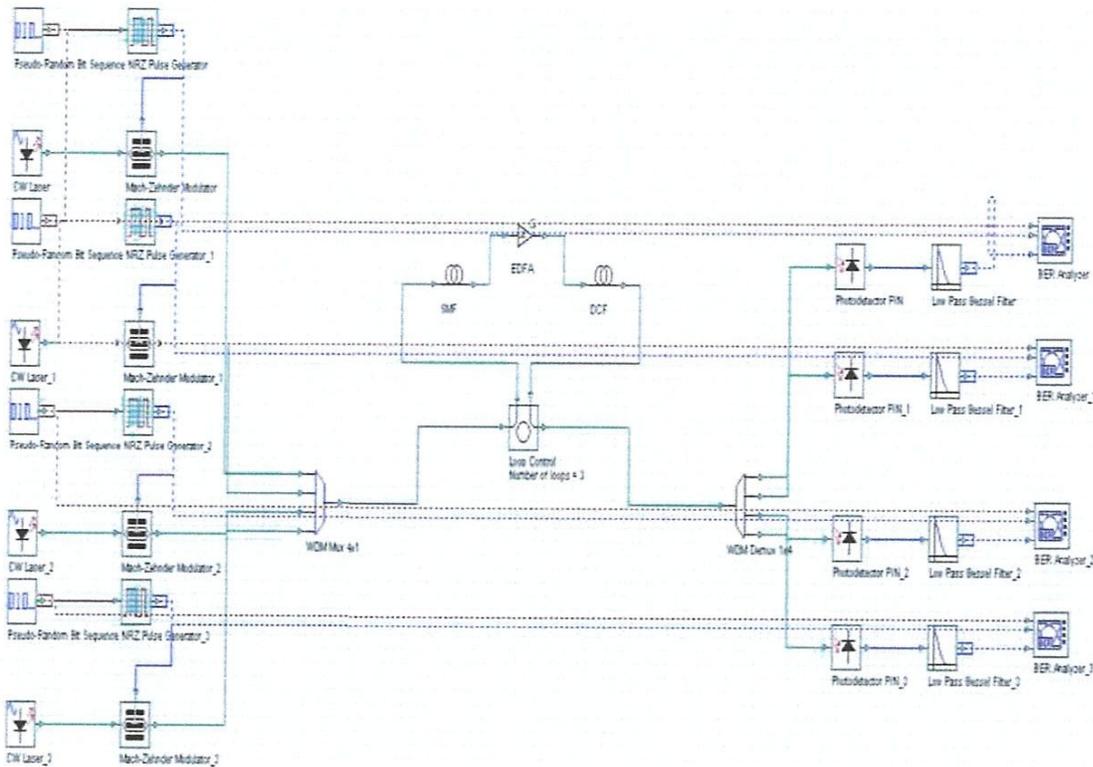


Figure IV.18 Synoptique du système WDM avec le modulateur Mach-Zehnder.

Pour une distance maximale de 150 Km, la simulation de ce dernier système WDM donne des résultats satisfaisant avec un facteur de qualité de 19.40 et 12.09 respectivement avec les débits 10Gbit/s et 40Gbit/s. pour le canal 1.

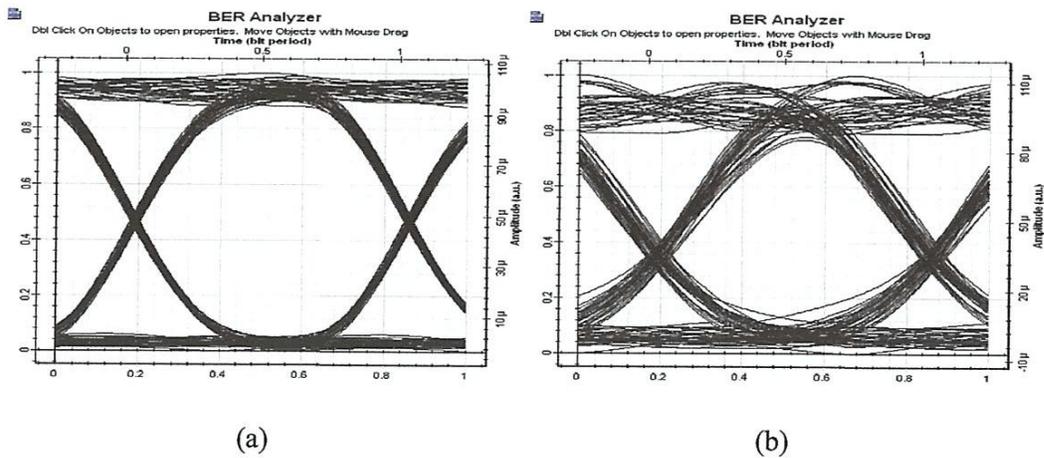


Figure IV.19 Diagramme de l'œil en sortie du système du canal 1, a) pour un débit=10Gbit/s, b) pour un débit=40Gbit/s. avec L=150Km

IV.4.Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre était de montrer l'utilité d'un logiciel de simulation appelé Opisystem et son aide à la conception des systèmes WDM très hauts débits. . Notre travail était porté sur les longueurs et les débits de transmission pour aboutir finalement à des résultats permettant de valider les choix des techniques et des composants utilisés pour développer un système WDM à très haut débit et très longue distance.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les progrès réalisés dans le domaine des télécommunications se font tellement rapidement, que les structures des systèmes de transmission connaissent de véritables bouleversements. C'est pourquoi il nous a paru intéressant de commencer ce mémoire par une description des différentes techniques de multiplexage dans les systèmes de transmissions optiques. On aborde ensuite une description détaillée de la plupart des techniques et des composants présents dans la technologie WDM et qui représentent les briques de base pour la conception d'un système de transmission optique.

Cependant, la conception de nouveaux systèmes, toujours plus performants, est un problème de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances d'une liaison est important. Aussi, les outils de simulation sont de plus en plus utilisés. Ils permettent des gains de temps et d'argent en évitant les expérimentations itératives qui sont généralement très onéreuses.

Nous nous sommes intéressés en particulier à l'influence de l'atténuation et de la dispersion chromatique dans la fibre optique standard par la simulation à l'aide du logiciel OPTISYSTEM. L'approche employée consiste à modifier les longueurs de la fibre ainsi que le débit, puis voir la répercussion sur les performances globales du système.

L'augmentation du débit ou de la longueur de fibre de transmission ont fait de la dispersion chromatique et de l'atténuation des problèmes majeurs. De ce fait, plusieurs techniques, optiques et électroniques, ont vu le jour ces dernières années pour résoudre ces problèmes. Étant donné que les solutions électroniques sont généralement plus fiables, mais également complexes à mettre en œuvre et chers par rapport aux solutions optiques, alors en choisissant une fibre optique de compensation de dispersion et un amplificateur EDFA nous avons pu diminuer ces effets limitatifs.

- [1] Keiser, G., "Optical fiber communications (3rd edition ed.)", McGraw-Hill, 2000.
- [2] Naufal M. SAAD, "Contribution à l'étude de l'application de la technique CDMA aux systèmes de transmission optique", Thèse de doctorat, Université de LIMOGES, 2005.
- [3] Weber, H. G., et al, "Ultrahigh-Speed OTDM-Transmission Technology", *J.Lightwave Technology*, 24(12), 4616-4627, 2006.
- [4] Keiser, G. E., "A review of WDM technology and applications", *Optical Fiber Technology*, 5, 3-39, 1999.
- [5] Palais, J. C. "Fiber optic communications (5th edition ed.)", Pearson Prentice Hall, 2005.
- [6] Khalil M, "Étude d'un syseme bas cout de transmission optique par multiplexage temporel", Thèse de doctorat, Institut polytechnique de grenoble, 2008.
- [7] Hayee, M. I., Cardakli, M. C., Sahin, A. B., & Willner, A. E., "Doubling of Bandwidth Utilization Using Two Orthogonal Polarizations and Power Unbalancing in a Polarization Division-Multiplexing Scheme", *IEEE Photonics Technology Letters*, 13(8), 881-883, 2001.
- [8] Martelli, P., Boffi, P., Ferrario, M., Marazzi, L., Parolari, P., Pietralunga, S. M., "Endless Polarization Stabilizer for High Bit-rate Polarization-Division Multiplexed Optical Systems", Paper presented at the OFC/NFOEC, 2008.
- [9] Nelson, L. E., & Kogelnik, H., "Coherent crosstalk impairments in polarization multiplexed transmission due to polarization mode dispersion", *Optical Express*, 7(10), 350-361, 2000.
- [10] Nelson, L. E., Nielsen, T. N., & Kogelnik, H., "Observation of PMD-Induced Coherent Crosstalk in Polarization-Multiplexed Transmission", *IEEE Photonics Technology Letters*, 13(7), 738-740, 2001.
- [11] Yao, X. S., Yan, L.-S., Zhang, B., Willner, A. E., & Jiang, J., "All-optic scheme for automatic polarization division demultiplexing", *Optical Express*, 15(12), 7407-7414, 2007.
- [12] Gnauck, A. H., Charlet, G., Tran, P., Winzer, P., Doerr, C., Centanni, J., "25.6-Tb/s C+L-Band Transmission of Polarization-Multiplexed RZ-DQPSK Signals", Paper presented at the Proc. OFC/NFOEC, Anaheim, California, 2007.
- [13] Gnauck, A. H., Charlet, G., Tran, P., Winzer, P. J., Doerr, C. R., Centanni, J. C., "25.6-Tb/s WDM Transmission of Polarization-Multiplexed RZ-DQPSK Signals", *J. Lightwave Technology*, 26(1), 79-84, 2008.
- [14] Charlet, G., Renaudier, J., Mardoyan, H., Tran, P., Pardo, O. B., Verluise, F., "Transmission of 16.4Tbit/s Capacity over 2,550km Using PDM QPSK Modulation Format and Coherent Receiver", Paper presented at the Proc. OFC/NFOEC, San Diego, California, 2008.
- [15] Pardo, O. B., Renaudier, J., Mardoyan, H., Tran, P., Charlet, G., & Bigo, S., "Investigation of design options for overlaying 40Gb/s coherent PDM-QPSK channels over a 10Gb/s system infrastructure", Paper presented at the Optical Fiber communication/National fiber Optic Engineers Conference, 2008. OFC/NFOEC 2008.

- [16] Pardo, O. B., Renaudier, J., Mardoyan, H., Tran, P., Charlet, G., & Bigo, S., "Investigation of design options for overlaying 40Gb/s coherent PDM-QPSK channels over a 10Gb/s system infrastructure", Paper presented at the OFC/NFOEC, 2008.
- [17] Chraplyvy, A. R., Gnauck, A. H., Tkach, R. W., Zyskind, J. L., Sulhoff, J. W., Lucero, A. J., "1-Tb/s transmission experiment", *IEEE Photonics Technology Letters*, 8, 1264-1266, 1996.
- [18] Hill, P. M., Olshansky, R., & Burns, W. K., "Optical polarization division multiplexing at 4 Gb/s", *IEEE Photonics Technology Letters*, 4(5), 500-502, 1992.
- [19] Han, Y., & Li, G., "Experimental demonstration of direct-detection quaternary differential polarization-phaseshift keying with electrical multilevel decision", *Electronics Letters*, 42, 109-111, 2006.
- [20] Hayee, M. I., Cardakli, M. C., Sahin, A. B., & Willner, A. E., "Doubling of Bandwidth Utilization Using Two Orthogonal Polarizations and Power Unbalancing in a Polarization-Division-Multiplexing Scheme", *IEEE Photonics Technology Letters*, 13(8), 881-883, 2001.
- [21] Noe, R., Hinz, S., Sandel, D., & Wust, F., "Crosstalk detection schemes for polarization division multiplex transmission", *Journal of Lightwave Technology*, 19, 1469-1475, 2001.
- [22] Jansen, S. L., Morita, I., Schenk, T. C. W., & Tanaka, H., "Long-haul transmission of 16x52.5 Gbits/s polarization-division- multiplexed OFDM enabled by MIMO processing", *Journal of Optical Networking*, 7(2), 173-182, 2008.
- [23] Shieh, W., Bao, H., & Tang, Y., "Coherent optical OFDM: theory and design", *Optical Express*, 16(2), 841-859, 2008.
- [24] Weinstein, S. B., & Ebert, P. M., "Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform", *IEEE Transactions on Communication*, 19, 628- 634, 1971.
- [25] Shieh, W., & Athaudage, C., "Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing", *Electronics Letters*, 42(10), 2006.
- [26] Shieh, W., Yi, X., Ma, Y., & Yang, Q., "Coherent optical OFDM: has its time come?" *Journal of Optical Networking*, 7(3), 234-255, 2008.
- [27] M. de Boer, C. P. Tsekrekos, A. Martinez, H. Kurniawan, J. W. M. Bergmans, A. M. J. Koonen, H. P. A. van den Boom, and F. M. J. Willems, "A first demonstrator for a mode group diversity multiplexing communication system", *Optical Fibre Communications and Electronic Signal Processing*, 2005. The IEE Seminar on (Ref. No. 2005-11310), December 2005.
- [28] S. Schollmann, S. Soneff, and W. Rosenkranz, "10.7 Gb/s Over 300 m GI-MMF Using a 2x2 MIMO System Based on Mode Group Diversity Multiplexing", *Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference*, 2007. OFC/NFOEC 2007. Conference on, pp. 1-3, March 2007.

- [29] R. Ryf, S. Randel, A. H. Gnauck, C. Bolle, R.-J. Essiambre, and P. J. Winzer, "Space-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent 6x6 MIMO processing", Optical Fiber Communication Conference (OFC 2011), March 2011.
- [30] T. Morioka, Y. Awaji, R. Ryf, P. Winzer, D. Richardson, F. Poletti, "Enhancing optical communications with brand new fibers," Communications Magazine, IEEE, vol. 50, no.2, pp.31–42, (2012).
- [31] B. Zhu, T. Taunay, M. Fishteyn, X. Liu, S. Chandrasekhar, M. Yan, J. Fini, E. Monberg, F. Dimarcello, K. Abedin, P. Wisk, D. Peckham, and P. Dzedzic, "Space-, wavelength-, polarization-division multiplexed transmission of 56-Tb/s over a 76.8-km seven-core fiber", Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), March 2011.
- [32] J. Sakaguchi, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, T. Hayashi, T. Taru, T. Kobayashi, and M. Watanabe, "109-Tb/s (7 x 971 x 72-Gb/s SDM/WDM/PDM) QPSK transmission through 16.8-km homogeneous multi-core fiber", Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), March 2011.
- [33] R. Ryf, R. Essiambre, S. Randel, A. H. Gnauck, P. J. Winzer, T. Hayashi, T. Taru, and T. Sasaki, "MIMO-Based Crosstalk Suppression in Spatially Multiplexed 3 x 56-Gb/s PDM-QPSK Signals for Strongly Coupled Three-Core Fiber", Photonics Technology Letters, vol. 23, October 2011.
- [34] S. Randel, M. Margarini, R. Ryf, R. J. Essiambre, A. Gnauck, P. J. Winzer, T. Hayashi, T. Taru, and T. Sasaki, "MIMO-based Signal Processing of Spatially Multiplexed 112-Gb/s PDM-QPSK Signals using Strongly-Coupled 3-Core Fiber", European Conference on Optical Communication (ECOC 2011), September 2011.
- [35] W. Q. Thornburg, B. J. Corrado, and X. D. Zhu, "Selective launching of higher order modes into an optical fiber with an optical phase shifter", Opt. Lett., vol. 19, pp. 454-456, 1994.
- [36] W. Mohammed, M. Pitchumani, A. Mehta, and E. G. Johnson, "Selective excitation of the LP₁₁ mode in step index fiber using a phase mask", SPIE Opt. Eng, vol. 45, p. 074602, 2006.
- [37] Soulef H, Hana A, "Synthèse d'un filtre à gabarit prédéfini par la méthode de Harris", Thèse de Master, Université 08 Mai 1945, 2011.
- [38] NURSURIANI BT M^{ed} Salleh, "Minimum channel spacing of 2.5 2.5Gbit/s and 10Gbit/s DWDM system", A thesis of Bachelor of Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 2012.
- [39] Afef B, Housemeddine H, "Etude d'un égaliseur de canaux optiques ", Thèse de Licence, Université 08 Mai 1945, 2010.
- [40] Jean- Louis Verneuil, " Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbit/s ", Thèse de doctorat, Université de LIMOGES, 2003.
- [41] <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/electronique-automatique-th13/telecommunications-optiques-42454210/diodes-laser-pour-les-telecommunications-optiques-re48>

[42] Stéphane GINESTAR, “ Réalisation et caractérisation d’un laser DFB bi-mode pour applications radio sur fibre”, Thèse de doctorat, Université LILLE 1, 12009.

[43] Nouri K, Larbi G, “Transmission de données par voie optique”, Mémoire d’Ingénieur, Institut des Télécommunications Abdelhafidh Boussouf d’Oran, 2005.

[44] Houda BRAHIMI “ Etude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences Modélisation, caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence ”, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2010.

[45] Djebbar M^{ed} KH, Djilali K, “ La transmission par soliton appliqué à un système WDM ”, Mémoire d’Ingénieur, Institut des Télécommunications Abdelhafidh Boussouf d’Oran, 2004.

[46] Hamza H, Khaled DJ, “ Liaison par fibre optique à haut débit etude les liaisons point à point polychromatiques”, Mémoire d’Ingénieur, Institut des Télécommunications Abdelhafidh Boussouf d’Oran, 2004.

[47] Dafa Seynabou, LOUM, “ Transmissions radio haut débit multiservices sur fibres optiques – Application à l’optimisation de la capacité utilisateurs en emprises de transport”, Thèse de doctorat, Université de VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS, 2012.

[48] Abdoul Aziz B, Zakaia R, “ Etude d’un système de transmission hybride : Application à l’UMTS ” Thèse de Master, Université 08 Mai 1945, 2012.

[49] Abdessamad B, “La compensation de dispersion chromatique pour les systèmes de transmission haut débit” Institut des Télécommunications Abdelhafidh Boussouf d’Oran, 2006.

[50] Sarah HUYGHE, “ Fiabilité des amplificateurs optiques a semiconducteur 1,55 μm pour des applications de Télécommunication : Etude expérimentale et modélisation physique ” Thèse de doctorat ,Université de BORDEAUX 1, 2005.

[51] Optiwave Corporation, Ottawa, Canada, www.optiwave.com.