

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Ingénierie des Systèmes Électriques
Mémoire de Master

Présenté par
HADDOUCHE IMENE & BOUBEKEUR SIDALI
Promoteur : Mr MERAIHI YASSINE
Filière : Télécommunications
Spécialité : Réseaux et Télécommunications

La Fibre optique et les transmissions DWDM et SDH

Soutenu le 06/07/2020 devant le jury composé de:

HAMADDOUCHE	MOHAMED	Boumerdes	Président
MESSAOUDI	NOUREDDINE	Boumerdes	Jury

Année Universitaire : 2019/2020

REMERCIEMENTS

Nous remercions le bon dieu de nous avoir donné la volonté et la patience qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur

Mr Meraihi Yassine pour nous avoir encadré durant notre projet de fin d'étude et nous conseillé tout au long de notre travail.

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer nos sincères gratitudees à nos familles.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Enfin, nos remerciements vont à toute personne ayant contribué, de près ou de loin à la réalisation ce travail.



Dédicace :

A mon meilleur exemple dans la vie mon père, pour les sacrifices qu'il a consenti pour mon éducation et pour l'avenir qu'il n'a cessé d'offrir.

Au symbole de douceur, de tendresse, d'amour et d'affection, et grâce au sens de devoir et aux sacrifices immenses qu'elle a consenti ma mère, grâce à elle j'ai pu arriver à réaliser ce travail.

A celle qui m'a été toujours le garant d'une existence paisible et d'un avenir radieux ma sœur

A ceux qui m'ont souhaité de la chance mes frères

A ma famille, celle qui m'a aidé à résoudre mes problèmes, m'a permis le savoir-faire au travail.

A celui qui est toujours dans mes pensées,

A ceux qui m'ont aidé, encouragé, apprécié mon effort et crée le milieu favorable,

A toutes ces personnes que j'ai senti redoutable de leur dédier ce modeste travail avec mes vifs remerciements et les expressions respectueuses de ma profonde gratitude : Mes chers amis surtout Bilal Hebrih et Bouahri Sidali.

SIDALI





Dédicace :

Je rends grâce à dieu et dédie ce modeste travail :

À la mémoire de ma mère.

À mon père pour tous ses sacrifices moraux et financiers.

À mes frères et sœurs : Fouad, Akrame, Nesrine, Fella.

À mes quatre adorables : Younes, Adem, Lina, Maïssa.

À mes cousins et cousines.

À toute la famille Kaddouche et Azzouzi sans exception.

À mon binôme et toute sa famille.

À tous mes amies

À toute la promotion 2019 de Réseaux et Télécommunication

À tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

À tous ceux qui ont participé de près ou de loin à mon cursus scolaire.

Smène.

Résumé : Le domaine des communications par fibres optiques est actuellement caractérisé par une augmentation de la demande en termes de capacité de transmission. On cherche à transmettre de plus en plus de données et de nouvelles applications voient le jour. Le multiplexeur en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing) est une technique de transmission vers les hauts débits qui sont devenues une nécessité vu la demande des utilisateurs. Le WDM est obtenue en injectant simultanément dans la même fibre plusieurs longueur d'onde, le nombre de ces dernières dépend de l'espacement entre elles avec un espacement fondamental de 100GHz et si l'espacement est inférieur à 0.1nm ce multiplexage est appelé DWDM (Dence Wavelength Division Multiplexing). La SDH est issue des concepts SONET proposés par BELLCORE (BELL Communication Research). Les premières normes SDH ont été approuvées par le CCITT (Comité Consultatif International de Téléphone et Télégraphe) à MELBOURNE en Novembre 1988. Elles définissent les débits de la trame et les procédés de multiplexage. Une simulation a été réalisée à l'aide du logiciel « Optisystem » afin d'étudier les limitations inhérentes en termes de distance de transmission –dues aux effets linéaires – d'une liaison de transmission numérique par fibre optique à un débit égal à 40 Gb/s.

Mots clés : WDM, DWDM, SDH, fibres optiques, Longueur d'onde.

Abstract: The field of optical communications is currently characterized by an increase demand in term of transmission capacity. We look forward to more and more data and new applications are emerging, the wavelength division multiplexer WDM is a transmission technique to the broadband that has become a necessity given the demands of users. WDM is obtained by injecting simultaneously in the same wavelength several fibers the number of the latter depends on the spacing between them with a fundamental spacing of 100 GHz and if the spacing is less than 0,1 nm This is called multiplexing DWDM. The SDH comes from the SONET concepts proposed by BELLCORE (BELL Communication Research). The first SDH standards were approved by the CCITT (International Telephone and Telegraph Consultative Committee) in MELBOURNE in November 1988. They define the frame rates and the multiplexing methods. A simulation was performed using the software OPTISYSTEM, study the inherent limitations in terms of transmission distance - due to linear effects - of a digital transmission link by optical fiber at a speed equal to 40 Gb / s.

Keywords: WDM, DWDM, SDH, Optical fibers, Wavelength.

LISTE DES ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing.
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing.
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier.
FDM	Frequency division multiplexing.
OA	Optical amplifier.
OADM	Optical Add/Drop Multiplexer.
OTU	Optical Transponder Unit.
OM	Optical Multiplexer.
ODU	Optical De-multiplexer Unit.
OLA	Optical Line amplifier.
OSC	Optical Supervisory Channel .
ESC	Electrical Supervisory Channel .
OTM	Optical Terminal Multiplexer .
OXC	Optical Cross – Connect.
FOADM	Fixed Optical Add/Drop Multiplexer.
ROADM	Re-configurable Optical Add/Drop Multiplexer.
U-DWDM	Ultra - Dense Wavelength / Division Multiplexing.
WDM	Wavelength Division Multiplexing.
ATM	Asynchronous Transfer Mode.
IP	Internet Protocol.
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy.
SDH	Synchrone Digital Hierarchy.
SONET	Synchronous Optical Network.

SOMMAIRE

PAGE DE GARDE

Remerciements

Dédicace

Résumé

Abstract

LISTE DES ACRONYMES

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE 1 : Généralités sur les fibres optiques

1-1) Introduction:	3
1-2) Généralités sur la fibre optique:	3
1-2-1) Définition de la fibre optique:	3
1-2-2) Structure de la fibre:	4
1-2-3) Type de fibre optique:	5
1-2-3-1) La fibre monomode:	5
1-2-3-2) La fibre multi mode:	5
1-2-3-2-1) La fibre multi mode à saut d'indice:	6
1-2-3-2-2) La fibre multi mode à gradient d'indice:	6
1-3) Caractéristiques physique de la fibre optique:	7
1-3-1) Bande passante:	8
1-3-2) Ouverture numérique:	10
1-3-3) Loi de la réflexion (1ère loi de Descartes):	10
1-3-4) L'indice de réfraction (2ème loi de Descartes):	10
1-3-5) L'atténuation:	11
1-3-6) Dispersion:	12
1-3-6-1) Dispersion chromatique (ou intra modale):	12
1-3-6-2) Dispersion modale (ou intermodale):	13
1-4) Avantages et Inconvénients:	14
1-4-1) Avantages:	14

1-4-2) Inconvénients:	14
1-5) Système de transmission d'une information par fibre optique :	15
1-5-1) Émission:	15
1-5-2) Réception:	15
1-5-3) Codage:	15
1-6) Les méthode de modulation, la détection et l'amplification:	16
1-6-1) Modulation (inscription):	16
1-6-1-a) La modulation directe:	16
1-6-1-b) La modulation externe:	17
1-6-2) La détection:	18
1-6-2-1) La détection directe:	18
1-6-2-2) La détection hétérodyne:	19
1-6-2-3) La détection homodyne:	20
1-6-3) Le préamplificateur:	21
1-7) Communication optique:	21
1-7-1) Les étapes de l'évolution du réseau de transport:	21
1-7-2) La Hiérarchie Numérique Plésiochrone PDH:	22
1-7-3) L'arrivée du SDH (SONET):	23
1-7-4) Passage du SDH vers WDM:	24
1-8) Conclusion:	25

CHAPITRE 2 : La technologie de multiplexage DWDM

2-1) Introduction :	26
2-2) Principes du multiplexage d'onde	26
2-3) Application de WDM :	28
2-4) Les composants de base WDM:	28
2-5) Modes de transmission :	29
2.5.1) Transmission unidirectionnelle/ bidirectionnelle	29
2.6) Structure du système WDM	30
2.7) Techniques de multiplexage:	31
2-7-1) Multiplexage fréquentiel FDM:	31
2-7-2) Multiplexage temporel TDM:	31
2-7-3) Multiplexage en longueur d'onde WDM:	31
2-7-4) Les apports du WDM :	32
2-8) Multiplexage dense(DWDM)	32
2-9) Principe et architecture DWDM	33
2-10) Les différents composants d'un système DWDM:	35
2-10-1) Multiplexeur terminal optique OTM:	35

2-10-2) Amplificateur de ligne optique (OLA):	36
2-10-3) Les multiplexeurs à insertion /extraction optique (OADM):	37
2-10-3-1) Principe:.....	37
2-10-3-2) Les types d'OADM:	38
2-10-3-2-1) FOADM (multiplexeur a insertion /extraction optique fixe):	38
2-10-3-2-2) Multiplexeur à insertion/extraction optique reconfigurable ROADM:	38
2-11) Applications de technique DWDM.....	39
2-11-1) Multiplexage U-DWDM (Ultra DWDM)	39
2-11-2) Multiplexage CWDM	40
2-11-2-1) Applications de technique CWDM	41
2-12) Comparaison entre les techniques démultiplexages	41
2-13) Conclusion.....	42

CHAPITRE 3 : Aperçu sur les réseaux optiques

3-1) Introduction:.....	43
3-2) Définition de la SDH:	43
3-3) La trame SDH:	44
3-4) Les en-têtes:	45
3-4-1) Le POH (Path-Over-Head):	46
3-4.-1-1) Le HPOH (High Path-Over-Head):.....	46
3-4-1-2) Le LPOH (Low Path Over Head):.....	47
3-4-2) Le SOH (Section Over-Head):	47
3-4-2-1) L'en-tête de section régénération(RSOH):	47
3-4-2-2) L'en-tête de section multiplexage(MSOH):.....	48
3-5) Les pointeurs(PTR):.....	49
3-6) Le multiplexage SDH	50
3-6-1) Principe de multiplexage:	50
3-6-2) Les éléments de la hiérarchie synchrone:	51
3-6-3) Structure de multiplexage SDH:.....	53
3-7) Le réseau SDH:	54
a- Les équipements mis en œuvre dans un réseau SDH:.....	54
b- Les topologies du réseau SDH:	54
3-8) Conclusion:	55

CHAPITRE 4 : Simulation des transmissions sur fibre optique

4-1) Introduction	57
4-2) Présentation du logiciel Optisystem	57

4-2-1) Applications d'Optisystem.....	59
4-2-2) Principales caractéristiques du logiciel Optisystem	60
4-3) Critères de qualité d'une transmission	60
4-3-1) Diagramme de l'œil	61
4-3-2) Le facteur de qualité en amplitude ou facteur Q	62
4-3-3) Le taux d'erreurs binaire (BER)	62
4-4) Chaîne de transmission de base.....	63
4-4-1) Bloc émission.....	63
4-4-1-1) Les données électriques	63
4-4-1-2) Le laser	63
4-4-2) Bloc de transmission.....	64
4-4-3) Bloc réception	65
4-5) La simulation de la chaîne de base	65
4-5-1) La distance	66
4-5-2) Le débit	66
Débit 2.5Gbps	67
Débit 3Gbps	67
Débit 4Gbps	68
4-5-3) Ajout de la fibre de compensation et de l'amplificateur à fibre dopée erbium	68
4-5-4) La modulation externe	69
4-6) Vers le Haut débit.....	70
4-7) Conclusion	72
CONCLUSION GENERALE	73
BIBLIOGRAPHIE.....	75

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1 : Généralités sur les fibres optiques

Figure 1.01: La fibre optique.....	4
Figure 1.02: Structure de la fibre optique.....	5
Figure 1.03: La fibre optique monomode.....	5
Figure 1.04: Fibre multi mode à saut d'indice.....	6
Figure 1.05:Fibre multi mode à gradient d'indice.....	7
Figure 1.06:Champ électrique et champ magnétique de la lumière.....	8
Figure 1.07: Spectre des longueurs d'ondes.....	9
Figure 1.08: La loi de Descartes.....	9
Figure 1.09:Ouverture numérique.....	10
Figure 1.10:Courbe de l'atténuation de la fibre optique en fonction de la longueur d'onde.....	12
Figure 1.11:La dispersion chromatique.....	13
Figure 1.12:La dispersion modale.....	13
Figure 1.13:Synoptique de la modulation directe.....	17
Figure 1.14:Synoptique de la modulation externe.....	18
Figure 1.15:Schéma du photo-détecteur en détection directe.....	19
Figure 1.16:Schéma du photo-détecteur en détection hétérodyne.....	20
Figure 1.17: Les couches réseaux.....	22
Figure 1.18: Multiplexage temporel dans la hiérarchie PDH.....	23
Figure 1.19:Le réseau optique.....	25

CHAPITRE 2 : La technologie de multiplexage DWDM

Figure 2-1: Répartition des sous-bandes WDM.....	27
Figure 2-2: Transmission de données optiques.....	27
Figure 2-3: Schéma de principe du multiplexage DWDM.....	28
Figure 2-4: Composants de base du WDM.....	29
Figure 2-5 : Transmission unidirectionnelle.....	29
Figure 2-6 : Transmission bidirectionnelle.....	30
Figure 2-7: Les techniques de multiplexage optique.....	31
Figure 2-8 : Grille UIT pour DWDM avec un espacement 0.8 nm.....	33
Figure 2-9: Principe des communications optiques.....	34
Figure 2-10: Principales composantes d'un réseau DWDM.....	35
Figure 2-11: Le Schéma de l'OTM.....	36
Figure 2-12 : Le schéma de l'OLA.....	36
Figure 2-13: Architecture de base d'un système DWDM.....	37
Figure 2-14: Représentation schématique d'un OADM.....	38
Figure 2-15: OADM fixe.....	38
Figure 2-16: OADM Dynamique.....	39
Figure 2-17: Technique de multiplexage Ultra DWDM.....	40
Figure 2-18 : Multiplexage CWDM.....	40
Figure 2-19: différence entre la bande des techniques multiplexages DWDM et CWDM.	41

CHAPITRE 3 : Aperçu sur les réseaux optiques

Figure 3. 1: Situation de SDH dans le modèle OSI.....	44
Figure 3. 2: Structure de la trame SDH STM-1.....	45
Figure 3. 3: Les en-têtes.....	45
Figure 3. 4: Les octets de POH et SOH.....	46
Figure 3. 5: Multiplexage de containers VC- 4 sur une trame STM- 4.....	50
Figure 3. 6: Les niveaux démultiplexage SDH.....	51
Figure 3. 7: Conteneur virtuel.....	52
Figure 3. 8: Tributary Unit TU.....	52
Figure 3.9: Structure de multiplexage SDH.....	53
Figure 3.10: Les équipements mis en œuvre dans un réseau SDH.....	54
Figure 3.11 Infrastructure du réseau SDH.:	55
Figure 3. 12: Les différentes Topologies.....	55

CHAPITRE 4 : Simulation des transmissions sur fibre optique

Figure 4-1 : La bibliothèque de logiciel Optisystem.....	58
Figure 4-2 : Éditeur du lay-out.....	58
Figure 4-3 : Le composant fibre optique de la bibliothèque.....	59
Figure 4-4 : Interface de définition de la fibre optique.....	59
Figure 4-5: Modification composant du paramètre.....	60
Figure 4-6: Diagrammes de l'œil d'un signal codé NRZ.....	61
Figure 4-7: Présentation des effets du bruit d'amplitude et de la gigue temporelle sur une séquence et le diagramme de l'œil correspondant.....	62
Figure 4-8 : Synoptique d'une chaîne de transmission optique.....	63
Figure 4-9 : Modèle de simulation du bloc émetteur.....	63
Figure 4-10 : Modèle de simulation du Laser.....	64
Figure 4-11 : Modèle de simulation de la fibre optique.....	64
Figure 4-12: Modèle de simulation de la photodiode PIN.....	65
Figure 4-13 : Diagramme de l'œil du signal de sortie après filtrage.....	66
Figure 4-14 : Diagramme de l'œil du signal de sortie (D=2.5 Gbps) Q=19.1316.....	67
Figure 4-15 : Diagramme de l'œil du signal de sortie (D=3 Gbps) Q= 7.41866.....	67
Figure 4-16 : Diagramme de l'œil du signal de sortie (D=4 Gbps) Q=5.04576.....	68
Figure 4-17 : Ajout d'une fibre de compensation et d'une fibre amplificatrice EDFA.....	68
Figure 4-18 : Diagramme de l'œil du signal de sortie (D=4 Gbps) avec EDFA et DCF.....	69
Figure 4-19 : Modèle de simulation du modulateur externe.....	70
Figure 4-20 : Diagramme de l'œil du signal de sortie (D=4 Gbps), (modulation externe)...	70
Figure 4-21 : Diagramme de l'œil du signal de sortie (D=40 Gbps).....	71

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 02 : La technologie de multiplexage DWDM

- ❖ Tableau 2-1 : Comparaison entre les techniques de multiplexage (WDM, DWDM, UDWDM, CWDM).....41

Chapitre 03 : Aperçu sur les réseaux optiques

- ❖ Tableau 3-1: HPOH (High Path over Head).....46
- ❖ Tableau 3-2: LPOH (Low Path Over Head).....47
- ❖ Tableau 3-3: Les réseaux de section.....48
- ❖ Tableau 3-4: Les réseaux de section de multiplexage (MSOH).....48
- ❖ Tableau 3-5 : Répertoire des débits de la hiérarchie SDH.....50
- ❖ Tableau 3-6 : La correspondance affluent –conteneur.....51

Chapitre 04 : Simulation des transmissions sur fibre optique

- ❖ Tableau 4-1 : Paramètres caractéristiques de la photodiode.....65
- ❖ Tableau 4-2 : Distances et facteur de qualité.....66
- ❖ Tableau 4-3 : Débits et facteur de qualité. (chaine de transmission avec EDFA, DC et MEA).....71

INTRODUCTION GENERALE

Depuis vingt ans, la fibre optique est la technologie préférée pour l'interconnexion des nœuds de télécommunication. Sa suprématie dans le domaine du transport est particulièrement évidente dans le cœur des réseaux de télécommunication. La technologie optique reste inégalée pour le transport économique et fiable de données sur de longues distances, Il n'existe actuellement aucune autre technologie qui puisse menacer sa suprématie. Le réseau optique synchrone (SONET) et la hiérarchie numérique synchrone (SDH) ont beaucoup contribué au succès de la technologie des réseaux optiques et se sont fait une solide réputation comme technologies de référence pour les réseaux résistant aux défaillances.

Pour augmenter le taux d'utilisation de la capacité des fibres, le SONET et la SDH ont été complétés par le multiplexage en longueur d'onde dense (DWDM), employé d'abord pour des liaisons point à point spécialisées et actuellement passe de devenir la technologie de réseau optique. À cet égard, l'approbation de la recommandation G.709 sur le multiplexage optique par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT-T) peut être considérée comme un événement majeur dans l'évolution vers le réseau tout optique.

L'objectif de notre présent travail de fin d'étude est de décrire les différentes technologies de réseaux de télécommunications, citer leurs avantages et leurs inconvénients et de montrer l'exigence de déploiements d'un transport tout optique.

Pour cela, nous avons organisé notre mémoire en quatre chapitres :

Le premier chapitre de ce mémoire donne un aperçu sur les généralités des réseaux optiques en s'appuyant sur la définition de la fibre optique et la description des systèmes de transmission d'une information d'une liaison optique.

Le deuxième chapitre présente l'ensemble des techniques de multiplexage dans les systèmes de transmissions optiques particulièrement le multiplexage WDM/DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) ainsi que les différentes solutions pour augmenter la capacité totale d'un système WDM/DWDM. Il présente également les différents composants nécessaires pour le multiplexage.

INTRODUCTION GENERALE

Le troisième chapitre est consacré à la présentation et à la constitution et du réseau SDH

Le quatrième chapitre est consacré aux simulations avec le logiciel OptiSystem, pour cerner et étudier les limitations inhérentes en termes de distance de transmission –dues aux effets linéaires – d’une liaison de transmission numérique par fibre optique à un débit égal à 40 Gb/s.

Généralités sur les fibres optiques

1-1) Introduction:

Les télécommunications utilisent les réseaux de transport optique qui réalisent la transmission au moyen de liaisons en fibre. Ces réseaux constituent aujourd'hui l'infrastructure de base des systèmes de communications modernes et répondent aux besoins en capacités qui ne cessent de croître en utilisant des techniques courantes et éprouvées dans le monde des réseaux de télécommunications [1].

Le développement des réseaux optiques constitue l'un des grands défis, créateur de valeur, de croissance, d'emplois, d'innovations industrielles et de services pour la nation toute entière [1].

L'évolution des diodes laser, l'apparition des amplificateurs optiques et des nouvelles technologies sont permises l'amélioration des liaisons de télécommunications ainsi le réseau optique autorise le très haut débit et une mise en œuvre de qualité parfaite avec une rapidité de transmission.

Dans ce premier chapitre nous avons apporté un descriptif des réseaux de transport optique notamment les étapes de l'évolution des techniques de communication optique.

1-2) Généralités sur la fibre optique:

1-2-1) Définition de la fibre optique:

La fibre optique est un support physique de transmission de données IP à très haut débit qui varie de 50 Mbit/s à 250 Mbit/s en émission et de 100 Mbit/s à 1 Gbit/s en réception, elle peut l'assurer jusqu'à des Térabits/s, et ceci grâce à la technologie WDM.

La fibre optique peut être assimilée à un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété de conduire la lumière d'une manière guidée à des vitesses élevées sur de grandes distances sans affaiblissement qui peut être que de l'ordre de 0.2 dB/km à comparer aux 15 dB/km du cuivre.

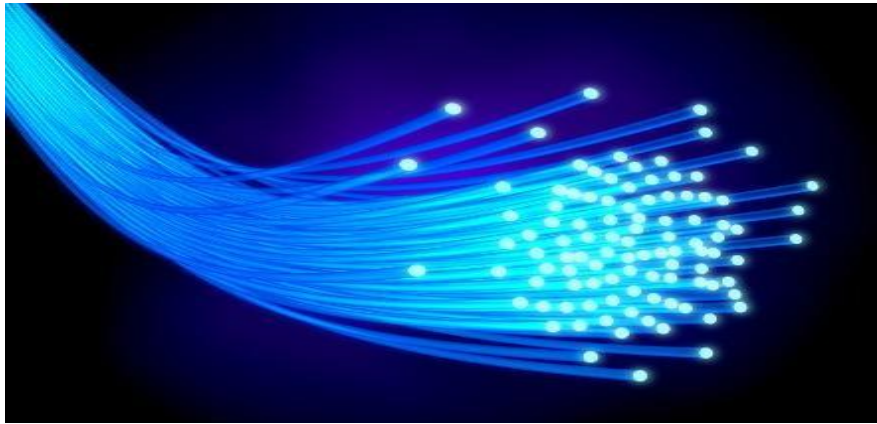


Figure 1.01: La fibre optique.

1-2-2) Structure de la fibre:

La fibre optique est constituée d'un cœur cylindrique en matériau transparent entouré d'une gaine concentrique, le tout dans un revêtement de protection. [1]

- **Le cœur** est la couche la plus importante en termes de transmission optique, elle est composée de silice, de quartz fondu ou de plastique pouvant être "dopé" afin de modifier son indice de réfraction. C'est à l'intérieur de ce cœur que va se propager la lumière en suivant la loi de réfraction, ce qui permet de guider les informations d'un bout à l'autre de la fibre sans trop de pertes.
- **La gaine optique** est composée des mêmes matériaux que le cœur. Son indice de réfraction n_2 est inférieur à celui du cœur n_1 (différence de quelques millièmes), ce qui permet de réfléchir la lumière entièrement de multiples fois à l'interface cœur-gaine (phénomène de réflexion totale interne).

La gaine optique n'est pas destinée à transmettre la lumière. Le cœur et la gaine constituent la partie optique qui canalise et propage la lumière.

- **Le revêtement de protection** généralement en plastique, il assure la protection mécanique de la fibre optique avec une flexibilité de la fibre et une facilité de manipulation. Cette couche de protection extérieure n'intervient pas dans la transmission de la lumière.

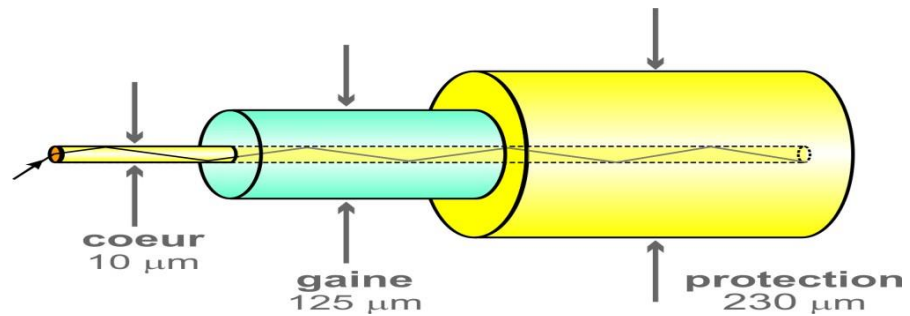


Figure 1.02: Structure de la fibre optique.[1]

1-2-3) Type de fibre optique:

1-2-3-1) La fibre monomode:

La fibre monomode permet la propagation d'un seul mode dont le diamètre du cœur 5 à 10 microns faible par rapport au diamètre de la gaine (125 microns), l'onde se propage alors sans réflexion sur la gaine optique. Le petit diamètre du cœur exige une grande puissance d'émission qui ne peut être délivrée que par des diodes laser. Les fibres monomodes sont essentiellement utilisées sur de grandes distances.

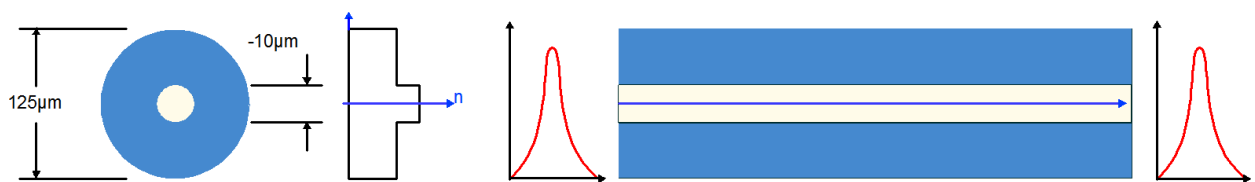


Figure 1.03: La fibre optique monomode.[2,3,4]

1-2-3-2) La fibre multi mode:

La fibre multi mode permet la propagation de plusieurs modes (plusieurs trajets ou plusieurs faisceaux) à travers son cœur dont le diamètre varie entre 50 et 200 µmet elles sont utilisées uniquement pour des bas débits et de courtes distances.

À l'entrée de la fibre, chaque mode est excité sous un angle différent et guidée dans le cœur de la fibre selon des trajectoires différentes par conséquent chaque mode arrive à l'extrémité du conducteur à un temps différent.

On distingue deux sous-catégories de fibres multi modes:

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

1-2-3-2-1) La fibre multi mode à saut d'indice:

La fibre multi mode à saut d'indice est la fibre la plus ordinaire. C'est ce type de fibre qui est utilisé dans les réseaux locaux LAN. Il existe plusieurs modes de propagation provoqués par la dispersion des signaux lumineux la traversant par réflexion totale interne en "dent de scie" en fonction de l'angle d'incidence de la lumière, les différents temps de propagation et les très grandes variations entre les indices de réfraction n_1 (cœur) et n_2 (gaine), ce qui génère une déformation du signal reçu et une forte atténuation du signal. La fibre à saut d'indice possède un cœur très large, son diamètre est d'environ $200\mu\text{m}$.

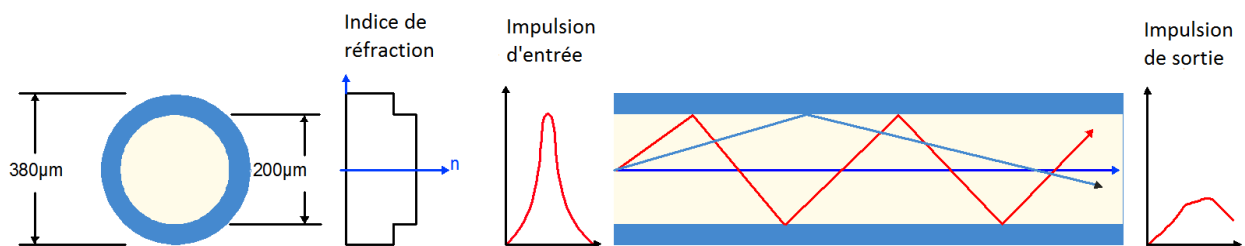


Figure 1.04: Fibre multi mode à saut d'indice.[2,3,4]

1-2-3-2-2) La fibre multi mode à gradient d'indice:

La fibre multi mode à gradient d'indice est elle aussi utilisée dans les réseaux locaux. A la différence de la fibre à saut d'indice, il n'y a pas de grande différence entre l'indice de réfraction du cœur et de la gaine.

Dans les fibres à gradient d'indice, le cœur est constitué de couches de verre successives ayant un indice de réfraction proche. Ces différentes couches de silice de densités multiples influent sur la direction des rayons lumineux, qui ont une forme elliptique. Ainsi, l'indice décroît de façon continue, depuis le centre du cœur jusqu'à l'interface cœur / gaine.

Ainsi on s'approche d'une égalisation des temps de propagations, ce qui signifie que l'on a réduit la dispersion modale. Tous les rayons sont «refocalisables» au centre de

la fibre.

L'atténuation et l'élargissement du signal sont beaucoup plus faibles que dans la fibre à saut d'indice. La taille du cœur varie entre 50 et 100 microns.

La distance réelle parcourue par le signal est pratiquement égale à la longueur de la fibre.

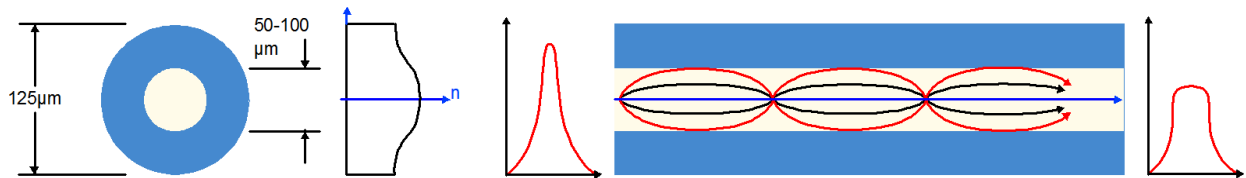


Figure 1.05:Fibre multi mode à gradient d'indice.[2,3,4]

1-3) Caractéristiques physique de la fibre optique:

La lumière est constituée d'ondes électromagnétiques ou flux de particules appelées « photons ».

De manière générale, une onde est caractérisée par sa longueur d'onde et sa phase. La longueur d'onde correspond à la couleur de la lumière.

Ainsi, si une lumière constituée d'ondes de même longueurs d'ondes et de fréquence unique elle est dite «**Monochromatique**». Si en plus toutes les ondes ont la même phase, alors la lumière est «**Cohérente**»; c'est ce qui se passe dans un laser.

La longueur d'onde d'une onde électromagnétique périodique est la distance que parcourt la lumière dans le vide pendant le temps qui sépare deux crêtes successives de cette onde électromagnétique. On la dénote communément par la lettre grecque λ tel

$$\lambda = v / f$$

que :

λ : Longueur d'onde

v : Vitesse de la lumière $3 \cdot 10^8$ m/s

f : fréquence de l'onde

- La phase indique la situation instantanée dans le cycle, d'une grandeur qui varie cycliquement.
- La vitesse de la lumière dans le vide est une constante de la physique. C'est la vitesse maximale permise pour tout déplacement d'informations ou d'un objet matériel par la théorie de la relativité.

Comme toute onde électromagnétique qui se propage, la lumière est constituée d'un champ électrique (E) et d'un champ magnétique (B) tout deux perpendiculaires à la direction de propagation.

La polarisation d'une onde lumineuse indique les directions qu'elle encourt dans l'évolution temporelle ou le long d'un rayon lumineux donnée, le vecteur champ électrique et le vecteur champ magnétique dans le plan orthogonal au vecteur d'onde.
[2]

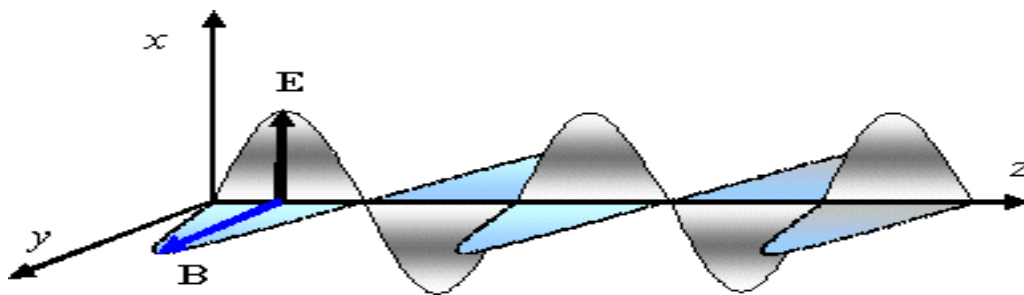


Figure 1.06: Champ électrique et champ magnétique de la lumière. [2]

1-3-1) Bande passante:

La bande passante est un des paramètres les plus importants pour définir les propriétés de transmission d'une fibre optique. Elle est déterminée par la quantité de lumière qu'elle peut transporter en raison d'un certain nombre de facteurs physiques.

La transmission de la lumière dans une fibre n'est optimale que dans certaines bandes du spectre optique. Ces fenêtres ont toutes une largeur d'environ 200 nm et sont centrées autour des longueurs d'onde 850, 1310, 1550 et 1625 (nm). [2]

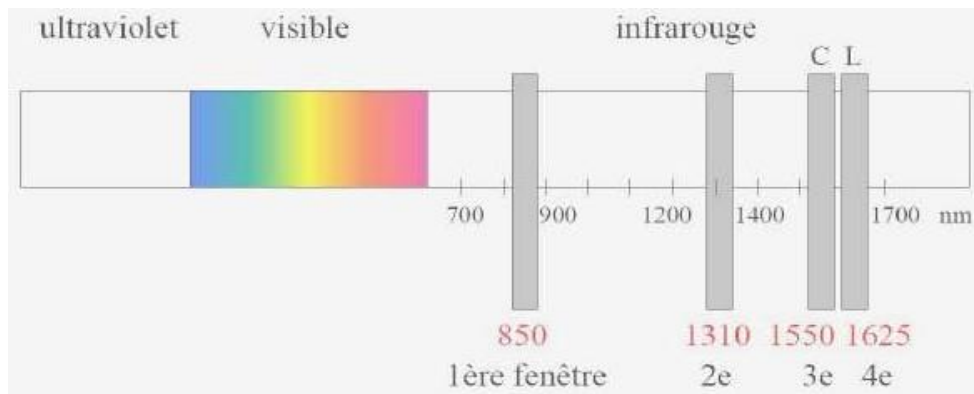


Figure 1.07: Spectre des longueurs d'ondes.[2]

La bande Conventiennelle (C-Band) est entre 1525nm et 1565nm et la bande Longue (appelée L-Band) entre 1570nm et 1650 nm. Ces fenêtres ont une bande passante comprise entre 25 et 50 hertz.

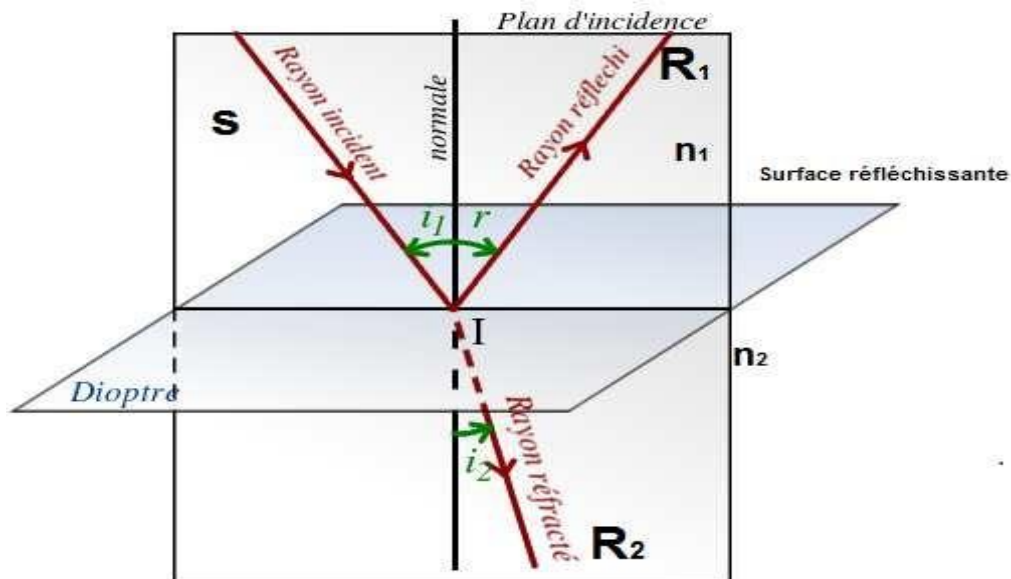


Figure 1.08: La loi de Descartes.[2]

La lumière est une onde progressive qui se propage dans les milieux transparents. Lorsqu'un faisceau lumineux S arrive sur une surface de séparation de deux milieux transparents d'indice de réfraction n_1 et n_2 , il y a simultanément un faisceau réfléchi R_1 et un faisceau réfracté R_2 .

Lorsque l'angle d'incidence augmente, l'énergie réfractée diminue et l'énergie réfléchie augmente.

Dans ce cas précis, le signal lumineux touche la gaine avec un angle plus petit que

l'angle critique, la réflexion est alors totale dans le cœur. Cette propriété est utilisée pour réaliser des guides de lumière dans la fibre optique. [2]

1-3-2) Ouverture numérique:

Ce paramètre est le sinus de l'angle d'entrée maximale 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.

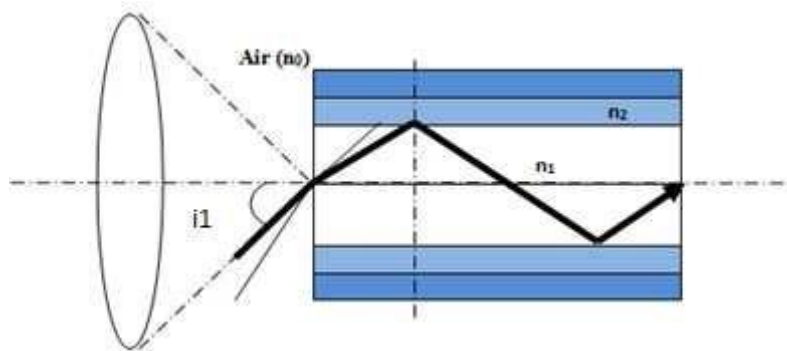


Figure 1.09: Ouverture numérique.

La loi de Descartes:

$$ON = \sin i_1 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Afin de faciliter l'injection de la lumière dans la fibre à l'entrée on a intérêt à avoir l'angle limite i_1 le plus grand possible. Ceci s'obtient pratiquement en choisissant des indices n_1 et n_2 très proches.

1-3-3) Loi de la réflexion (1^{ère} loi de Descartes):

La réflexion est un brusque changement de direction d'une onde à l'interface de deux milieux différents (d'indices différents).

La loi de Descartes précise que : «Le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence; l'angle d'incidence est égale à l'angle de réflexion». La relation s'exprime comme suite:

$$i_1 = r$$

1-3-4) L'indice de réfraction (2^{ème} loi de Descartes):

La réfraction est la déviation subite par les rayons lumineux à la traversée de

l'interface séparant deux milieux transparents, elle rencontre une résistance lorsqu'elle se propage dans un milieu, car tout milieu a une densité optique plus grande que celle du vide.

Par conséquent, elle mesure la densité optique allant d'une propriété fondamentale; chaque matériau transparent a son indice de réfraction tel que le milieu 1 (air) son indice de réfraction n_1 (cœur) vers un milieu 2 d'indice de réfraction n_2 gaine à travers le dioptre (interface cœur- gaine), cette valeur permet d'évaluer la propagation de la lumière (vide) dans le matériau considéré (n_1, n_2) [2]. L'indice de réfraction correspond à une mesure de la vitesse de la lumière

Dans un milieu donné comparativement à sa vitesse dans le vide. Cette relation s'exprime comme suit:

$$n = c/v$$

- n est l'indice de réfraction.
- c est la vitesse de la lumière dans le vide (300 000 km/s).
- v est la vitesse de la lumière dans le milieu considéré.

L'indice de réfraction d'un milieu ne peut pas être plus petit que « 1 », puisque la vitesse de la lumière dans un milieu peut être inférieure à sa vitesse dans le vide. Plus l'indice de réfraction est grand, plus la vitesse dans le matériau étudié est faible. La relation qui prend en fonction l'angle de faisceau réfracté i_2 et l'angle d'incidence i_1 est:

$$n_1 \times \sin i_1 = n_2 \times \sin i_2$$

Ce sont ces deux principes qui permettent de faire circuler la lumière au sein du cœur de la fibre optique. [2]

1-3-5) L'atténuation:

La mesure de l'atténuation spectrale consiste à mesurer l'affaiblissement de la fibre sur une plage de longueurs d'ondes.

L'atténuation dans les fibres optiques est due au verre et résulte de plusieurs mécanismes.

- **Pertes intrinsèques:** Ce type d'atténuation dépend des caractéristiques typiques du processus technologique de réalisation.
- **Pertes par absorption moléculaire :** elles sont causées par l'absorption des rayons optiques par la silice et les impuretés contenus dans celle-ci.
- **Pertes par diffusion (diffusion Rayleigh):** elles sont provoquées par les irrégularités involontaires de structure.

- **Pertes extrinsèques:** dépendent du couplage fibre-fibre ou fibre-composant.
- Les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres .Toute courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement.
- Les micros courbures: sont des courbures très faible, mais répétées et pratiquement incontrôlables, dues au conditionnement des fibres dans les câbles.
- Les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux .Chaque jonction peut provoquer une perte de raccordement. [4]

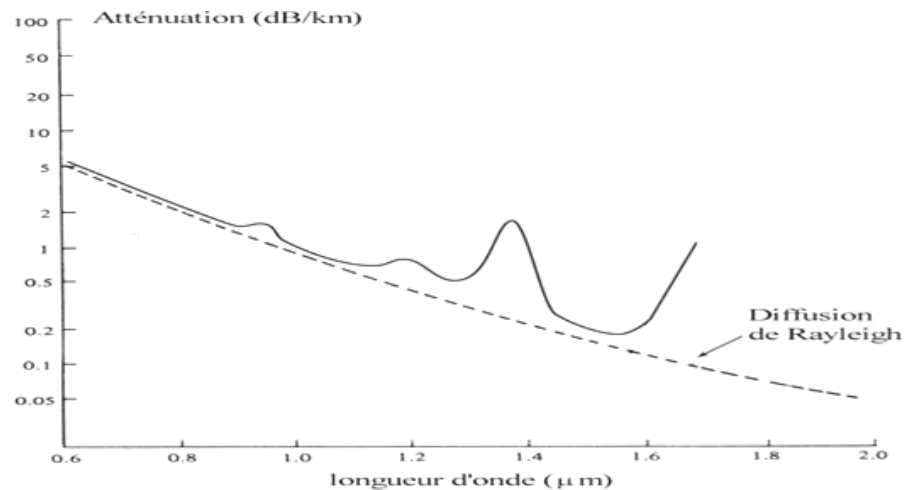


Figure 1.10: Courbe de l'atténuation de la fibre optique en fonction de la longueur d'onde.[5]

L'atténuation minimale de 0.22 dB/Km n'est pas très loin du minimum théorique pour la silice.

La différence s'explique par le fait que l'on ne peut pas utiliser de la silice pure. On doit doper soit le cœur

Soit la gaine et cela augmente les fluctuations de composition et donc les pertes par absorption. [5]

1-3-6) Dispersion:

La dispersion d'un signal optique se manifeste par une distorsion du signal et cause un élargissement des impulsions au cours de leur propagation dans la fibre optique.

Il existe deux types de dispersion:[6]

1-3-6-1) Dispersion chromatique (ou intramodale):

La dispersion chromatique est la combinaison de deux types de dispersion : la dispersion du matériau et la dispersion du guide d'onde.

La dispersion du matériau est causée par la dépendance de l'indice de

réfraction de la longueur d'onde. En effet la dispersion du matériau est très petite par rapport à la longueur d'onde d'environ 1300nm, cette dispersion existe dans toutes les fibres optiques qu'elles soient monomodes ou multi modes.

La dispersion du guide d'onde est particulièrement importante pour les fibres monomodes .Elle est causée par le fait que la répartition de la lumière du mode fondamental sur le verre du cœur et la gaine dépend de la longueur d'onde.

La dispersion totale est la somme des dispersions due au matériau et la dispersion du guide d'onde.

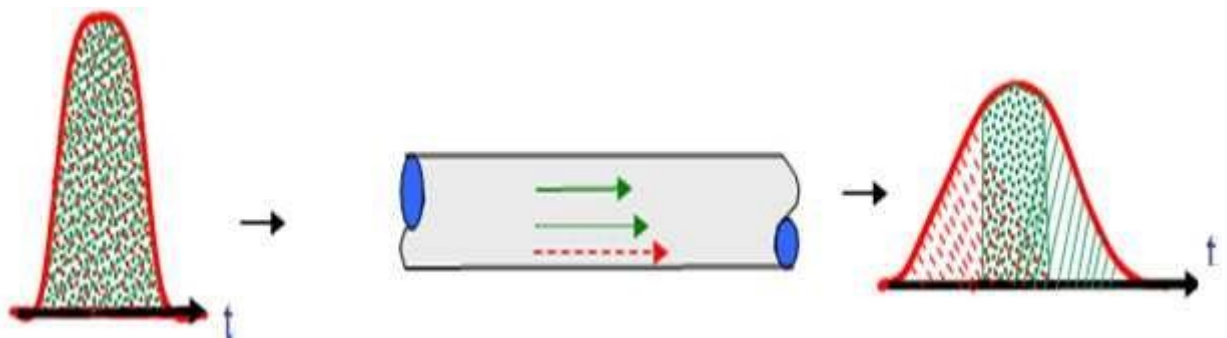


Figure 1.11:La dispersion chromatique.[6]

1-3-6-2) Dispersion modale (ou intermodale):

Dans une fibre optique multi mode, chaque mode se propage suivant une trajectoire différente. L'énergie lumineuse transmise dans la fibre se repartie entre les différents modes qui se propagent dans le cœur.

L'ensemble des retards entre les différents rayons composant le signal lumineux déterminent en réception une distorsion du signal électrique obtenu par le convertisseur optique –électrique ; cette distorsion est la Dispersion Modale

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. [6]

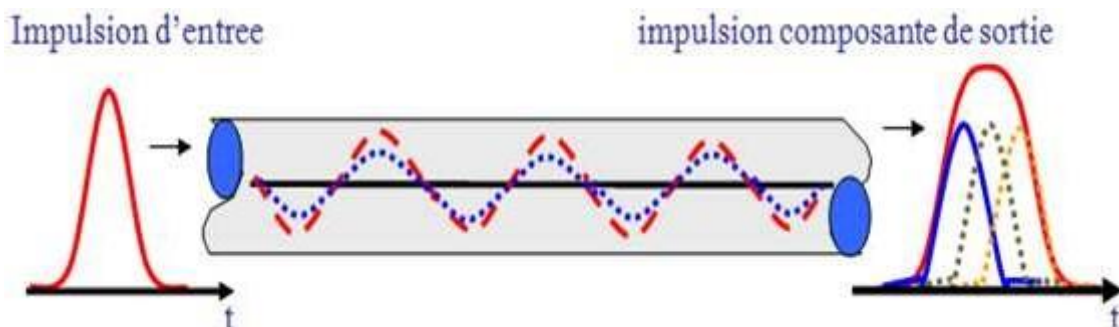


Figure 1. 12:La dispersion modale.[6]

1-4) Avantages et Inconvénients:**1-4-1) Avantages:**

- ❖ Performance de transmission: très faible atténuation qui permet d'envisager une grande distance entre les points de régénération des signaux transmis, vitesse de transmission quasi instantanée, très grande bande passante de l'ordre de 1Ghz pour 1 km, ceci permet notamment le multiplexage de plusieurs signaux, elles permettent au système d'avoir une portée et une capacité très supérieur à celle des câbles conducteurs.
- ❖ Avantage de mise en œuvre: très petite taille, grande souplesse, faible poids, appréciable aussi bien en télécommunication que pour le câblage en informatique, aéronautique, application industrielle.
- ❖ Sécurité électrique : isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosif ou sous forte tension.
- ❖ Sécurité électromagnétique: la fibre optique n'est pas sensible aux parasites étaux bruits électromagnétiques et n'en crée pas elle-même, présente une bonne résistance à la chaleur et au froid. Elle présente aussi une absence totale de rayonnement. Ceci rend son emploi particulièrement intéressant pour les applications militaires. Une tentative d'intrusion sur la fibre optique peut être aisément détectée par l'affaiblissement de l'énergie lumineuse en réception qu'elle provoque.
- ❖ Avantage économique: le cout global d'un système sur fibre optique est plus souvent inférieur à celle d'un système sur cuivre. [4]

1-4-2) Inconvénients:

- ❖ Les divers rayons qui vont pénétrer dans la fibre vont suivre des chemins différents et ne vont pas tous arriver à l'autre bout en même temps. De plus, on pourra assister à des phénomènes d'interférences.
- ❖ La fibre optique ne permet pas le transport d'énergie.
- ❖ Les répéteurs doivent être alimentés séparément, soit localement, soit par second câble électrique, soit par un câble mixte optique et électrique.
- ❖ Les techniciens des installations doivent protéger leurs yeux: il est indispensable de porter des verres de protection infrarouge pour travailler de prêt sur un dispositif en fonctionnement.
- ❖ Pertes de raccordement entre différents composants optique du système soit entre deux

fibres ou entre une fibre et un module d'émission ou de réception. Parmi les pertes de raccordement, on trouve:

- Les pertes de couplage à la source: une partie seulement de la puissance émise par le laser sera capté par la fibre à cause de la désadaptation entre eux.
- Les pertes d'épissure: elle est due à cause d'une discontinuité du rayon, une erreur d'espacement, une erreur d'excentrement, une erreur d'alignement angulaire. [4]

1-5) Système de transmission d'une information par fibre optique :

Les systèmes de communication optique comportent un certain nombre de composants de base: un système de codage de l'information, une source lumineuse qui envoie les signaux lumineux dans la fibre optique, un récepteur de lumière et enfin un décodeur. [4]

1-5-1) Émission:

Pour la propagation d'un signal lumineux à l'intérieur d'une fibre optique, 3 types de moteur sont utilisés:

- Les LED diode électroluminescente (light Emiting Diode) qui fonctionne dans le rouge visible à la limite de l'infrarouge 850 nm.
- Les diodes à infrarouge est dans l'invisible a une longueur d'onde de 1300 nm.
- Laser (diode laser LD) utilisé seulement pour la fibre monomode dans la longueur d'onde est 1300 ou 1550 nm. L'intensité du signal lumineux sera modulé en fonction de l'information en plus d'un de ces types de composants on rajoute une lentille chargée de diriger le signal lumineux dans la fibre et ces dispositifs sont d'une taille minimale.

1-5-2) Réception:

Les capteurs ou récepteur utilisé sont:

- Soit un phototransistor où le signal lumineux est directement amplifié par le gain en courant.

Les capteurs convertissent une variation d'intensité lumineuse en une variation de courant électrique. Ils ne sont pas plus gros que les émetteurs.

Les composants électroniques utilisés pour l'émission et la réception du signal sont appelés semi-conducteurs.

1-5-3) Codage:

Avec les techniques de transmission numérique, on ne cherche plus à transmettre un signal identique à celui que l'on veut reproduire quelle que soit la nature de

l'information traitée (images, son, texte...), elle le sera toujours sous la forme d'une suite de 0 et de 1.

En effet, c'est le cas dans les fibres optiques: l'information (audio, vidéo ou informatique) est codée numériquement sous forme d'une succession de 0 et de 1, chaque caractère étant appelé un «bit».

Le temps est divisé en intervalles de durées égales, dans chaque intervalle on fait correspondre à 1 une impulsion lumineuse d'une certaine intensité et le 0 est représenté par une absence d'impulsion.

Toute information numérique est donc un ensemble de bits de 0 et de 1, c'est le cas des fichiers et applications des ordinateurs une fois numérisé l'information sera donc transmise à une vitesse très élevée à l'intérieur de la fibre optique, sous forme de ses nombreuses impulsions lumineuses successives.

En sortie les impulsions s'ajoutant les unes aux autres seront reconverties en une suite de 0 et de 1, qui une fois décodée formera une information identique à celle de départ. [4]

1-6) Les méthode de modulation, la détection et l'amplification:

1-6-1) Modulation (inscription):

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les imprimer sur le signal à envoyer dans la fibre, c'est ce que l'on appelle une modulation. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une conversion des données électriques en données optiques.

Il existe principalement 2 techniques:

1-6-1-a) La modulation directe: La modulation d'amplitude:

Un des principaux avantages de l'utilisation des lasers à semi-conducteur pour les systèmes de télécommunications par fibres optiques réside dans le fait qu'il est possible de les moduler facilement : la modulation du courant qui les traverse entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise.

Cette technique est appelée modulation directe où il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser. [7]

Les composants utilisés:

Cette solution de modulation directe requiert assez peu de composants. En dehors de la source optique, le laser, un générateur de courant et un driver sont

nécessaires.

Le premier va émettre à un débit donné une séquence de données, expression de l'information à transmettre. Le rôle du driver est de commander la source optique au niveau des puissances émises (en fixant les valeurs du courant d'alimentation).

Pour cela, il modifie et transforme les niveaux du courant issu du générateur. [7]

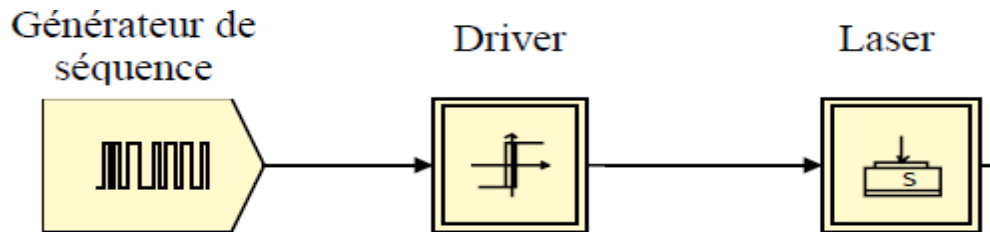


Figure 1.13: Synoptique de la modulation directe. [7]

Les limites:

La modulation directe connaît beaucoup d'avantages, en particulier le faible coût de mise en œuvre. Mais elle comporte aussi des limites. Les lasers en sont souvent la cause.

Leur temps de réaction, les oscillations, le bruit créé font que la modulation directe engendre pour les hauts et très hauts débits certaines dégradations sur le signal optique modulé. A cela, la modulation externe constitue un remède.

1-6-1-b) La modulation externe:

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

Les composants:

La modulation est effectuée sur une onde pure et constante et par un composant indispensable; le modulateur externe. Celui-ci est commandé par une tension externe $v(t)$, modulée et représentative de l'information à transmettre.

Cette tension appliquée au modulateur a pour propriété de modifier le facteur de transmission en intensité en sortie.

Le signal optique continu émis par le laser alimenté par un courant constant est donc peu dégradé. En traversant le modulateur, il subit les modifications du facteur de transmission et le signal de sortie se trouve modulé selon $v(t)$.

Un driver est souvent présent entre les données et le modulateur afin de fixer les

niveaux de $v(t)$ et choisir les modifications du facteur de transmission. [7]

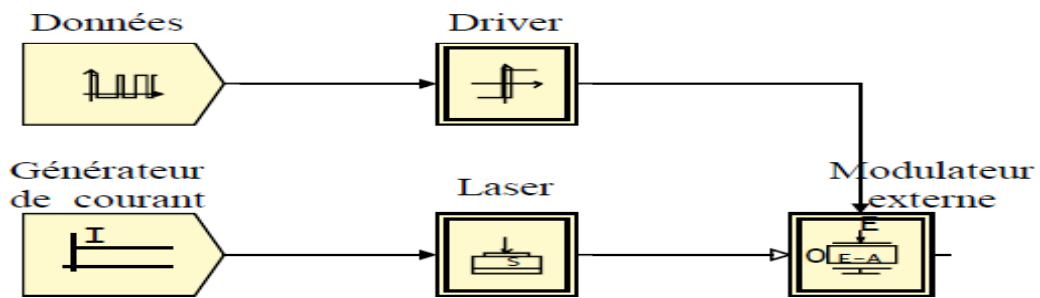


Figure 1.14: Synoptique de la modulation externe. [7]

1-6-2) La détection:

Le photo-détecteur est un dispositif qui transforme la lumière qu'il absorbe en une grandeur mesurable généralement un courant électrique ou une tension électrique pour cela plusieurs méthodes sont utilisées tel que la détection directe ainsi que la détection hétérodyne et homodyne. [7]

1-6-2-1) La détection directe:

Cette méthode consiste en la conversion des fluctuations de puissance optique porteuses de l'information en fluctuations de courant électrique grâce à une photodiode.

Pour extraire le signal qui module en amplitude une onde, on peut le redresser, ou plus généralement le faire passer dans un dispositif non linéaire, tel qu'une diode. Un signal bas fréquence, le signal modulant et des harmoniques sont alors émis.

Les harmoniques peuvent être éliminées par filtrage, dans la mesure où la fréquence de l'onde porteuse est très grande devant la fréquence maximale du spectre du signal modulant. Nous présentons, sur la Figure 1- 15, la composition du bloc appelé photo-détecteur.

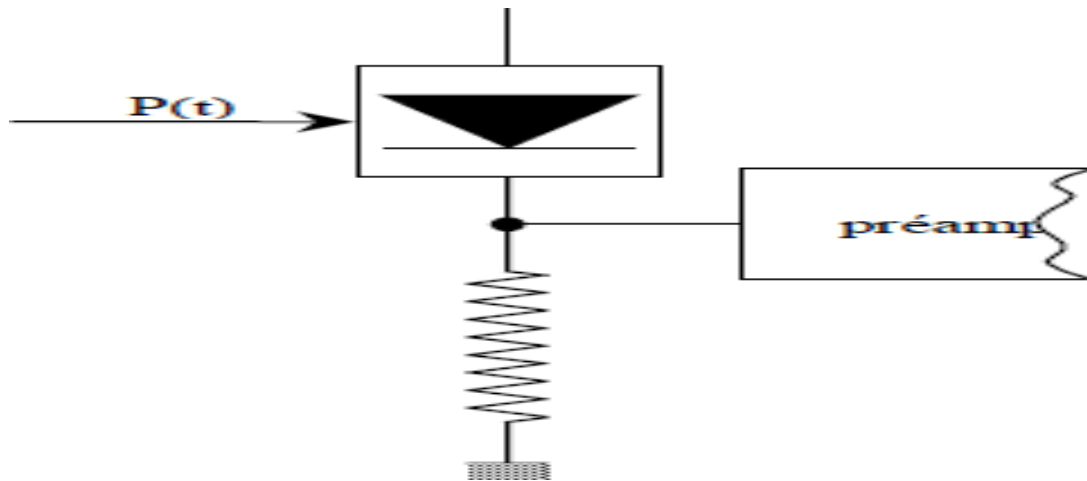


Figure 1.15:Schéma du photo-détecteur en détection directe.[7]

Le détecteur n'est pas "idéal", c'est-à-dire de bande passante infinie. En réalité, la résistance de charge et la capacité de jonction de la photodiode forment un filtre passe-bas.

Le détecteur peut être réalisé soit par une diode PIN, soit une photodiode à avalanche (PDA). Le principe de fonctionnement reste inchangé. L'effet du phénomène d'avalanche induit, en fait, d'une part, l'augmentation du niveau du signal et d'autre part, une augmentation de la puissance du bruit de grenaille. [7]

D'autres méthodes sont utilisées tel que la détection hétérodyne et homodyne, dans lesquelles la porteuse optique est modulée en amplitude, en phase ou en fréquence et démodulée dans le détecteur.

1-6-2-2) La détection hétérodyne:

A partir des années 1930, on a vu se développer la réception hétérodyne où le signal reçu et un signal issu d'un oscillateur local sont couplés pour réaliser une combinaison linéaire des signaux présents sur ses deux entrées. Une des deux sorties attaque le photo-mélangeur. Le signal détecté est filtré dans un filtre centré autour de la fréquence intermédiaire [7]. La figure suivante donne le schéma de principe du mélangeur hétérodyne, qui constitue le bloc.

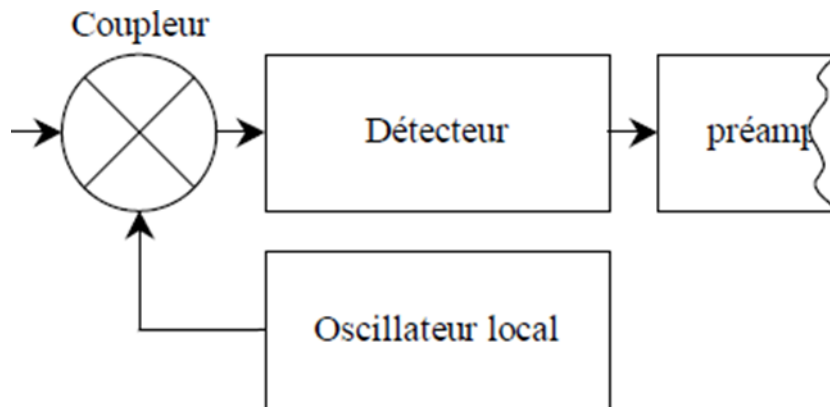


Figure 1.16:Schéma du photo-détecteur en détection hétérodyne.[7]

La plus grosse contrainte porte sur la stabilité des sources. En effet, l'oscillateur local ne délivre pas un signal sinusoïdal pur car il est affecté par des bruits d'amplitude et de phase qui se traduisent par une modulation parasite du signal en fréquence intermédiaire. [7]

1-6-2-3) La détection homodyne:

Dans l'analyse développée jusqu'ici, la fréquence intermédiaire a été supposée non nulle. Cependant, on peut aussi imaginer utiliser un oscillateur local qui soit à la même fréquence que le signal reçu et synchronisé en phase avec la porteuse de celui-ci. C'est ce que l'on appelle réception homodyne, un cas particulier de la réception hétérodyne. La réception homodyne apporte un gain de 3 dB par rapport à la réception hétérodyne. Par contre, elle impose des contraintes très fortes sur la pureté spectrale des oscillateurs, qui la rendent beaucoup plus difficile à mettre en œuvre.

De plus, il est plus facile de réaliser dessous ensembles (filtre, amplificateur) autour d'une fréquence intermédiaire. [7]

❖ Comparaison des détections directe et hétérodyne:

La réception hétérodyne possède de nombreux avantages sur la détection directe:

- Propose un gain supérieur en sensibilité du récepteur.
- Offre la possibilité d'utiliser la modulation de phase ou de fréquence, ce qui ne permet pas la détection directe.
- Permet de juxtaposer dans la bande de fréquences des porteuses modulées pour constituer un système à plusieurs canaux.
- Extraire du multiplex à large bande transmise par la fibre optique, le canal voulu par sélection de la fréquence correspondante sur l'oscillateur local.
- Les amplificateurs à fibre dopée ont radicalement changé la situation, en permettant

d'obtenir en détection directe une sensibilité équivalente à celle de la réception hétérodyne. Le filtrage optique devient également de plus en plus performant et l'avantage de la réception hétérodyne en termes de densité de canaux n'est pas prouvé.

De plus, la structure du récepteur hétérodyne est plus complexe qu'en détection directe. En optique, on ne dispose pas de récepteurs cohérents intégrés, incluant l'oscillateur local, le mélangeur et le circuit en fréquence intermédiaire, et cet aspect technique constitue un facteur supplémentaire en défaveur de la technique cohérente.

Aujourd'hui, l'association du préamplificateur optique avec la détection directe à diode PIN trouve son application dans les réseaux structurants et métropolitains.

Un récepteur à diode PIN avec un préamplificateur optique est en particulier dans le cas des hauts débits, bien plus performant qu'un récepteur avec diode à avalanche qui a un produit gain-bande limité.

1-6-3) Le préamplificateur:

Afin de remédier à la modeste sensibilité de la photodiode PIN, le photorécepteur est souvent accompagné d'un préamplificateur ainsi pour minimiser le bruit et les distorsions sur les signaux, ces deux blocs sont souvent réunis dans un même boîtier. [7]

1-7) Communication optique:

Dans le domaine des télécommunications, les communications optiques constituent une technologie optique de communications qui fait appel à la propagation de la lumière (spectre visible ou infrarouge) afin de transmettre des données entre deux points distants.

Cette technologie présente un intérêt lorsqu'on établit une connexion physique par le biais de fibre optique en utilisant des instruments d'optiques. [8]

1-7-1) Les étapes de l'évolution du réseau de transport:

Un réseau peut être modélisé de la manière suivante:

- Une couche service qui fournit des fonctions nécessaires aux communications de l'utilisateur final.
- Une couche infrastructure: ATM (Asynchronous Transfer Mode), IP (Internet Protocol),...
- Une couche transport qui fournit la connectivité entre les équipements (ATM, IP...) sur un média physique: fibre optique, radio, hertzien, cuivre. [7]

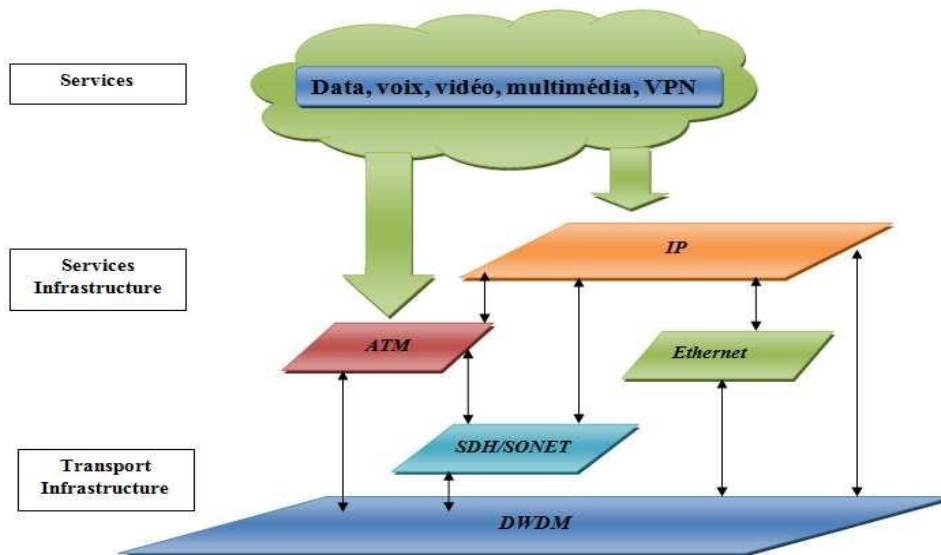


Figure 1. 17: Les couches réseaux.[7]

On distingue trois grandes classes de scénarios:

- Scénario reposant sur PDH, SDH.
- Scénario reposant sur SDH/WDM.
- Scénario reposant sur WDM.

1-7-2) La Hiérarchie Numérique Plésiochrone PDH:

La hiérarchie numérique plésiochrone ou PDH (en anglais Plesiochronous Digital Hierarchy) est une technologie utilisée dans les réseaux de télécommunications afin de véhiculer les voies téléphoniques numérisées. Le terme « plésiochrone » vient du grec *plesio* (proche) et *chronos* (temps) et reflète le fait que les réseaux PDH utilisent des éléments identiques mais non parfaitement synchronisés : ils ont un même débit nominal pour toutes les artères du même type mais ce débit diffère légèrement en fonction de l'horloge de traitement local.

Avant les années 90, le réseau de transmission des opérateurs était basé sur une hiérarchie plésiochrone, mais l'un des inconvénients de ce mode de transmission est le multiplexage bit à bit et l'absence de la normalisation au niveau du C.C.I.T.T ne permet pas d'interconnecter deux hiérarchies sans passer par un équipement intermédiaire.

On retrouve ce type de multiplexage temporel sur les canaux T1 aux États-Unis qui regroupent 24 voies à 64 Kbits/s en une voie à 1,544 Mbits/s ou sur les canaux E1 en Europe qui regroupent 30 voies analogiques en une voie à 2,048 Mbits/s. Les canaux T1 ou E1 peuvent être multiplexés entre eux pour former des canaux à plus hauts débits.

Cette technique présente toutefois un inconvénient dans le cas de la PDH. L'accès ou

l'insertion d'une information dans un canal E4 oblige à démultiplexer l'ensemble du train numérique.

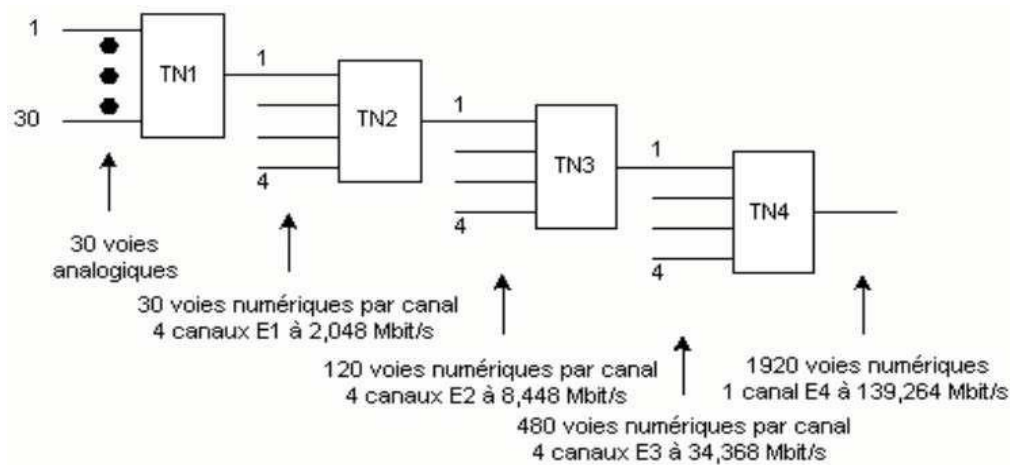


Figure 1.18: Multiplexage temporel dans la hiérarchie PDH.

1-7-3) L'arrivée du SDH (SONET):

A la fin des années 80 une nouvelle hiérarchie de transmission appelée SDH (Synchronous Digital Hiérarchy) est apparue, elle est fondée sur les concepts de SONET (Synchronous Optical Network) proposés par l'organisme de normalisation américain BELLCORE.

Cette Hiérarchie est basée sur des principes comparables au principe de la SDH. Elle repose sur une trame numérique de niveau élevé qui apporte une facilité de brassage et d'insertion/extraction des niveaux inférieurs, cela a surmonté les inconvénients du PDH. Les technologies SONET et SDH utilisées comme techniques de transport dans les réseaux téléphoniques des grands opérateurs pratiquent un multiplexage temporel pour assembler plusieurs lignes en une seule ligne de débit supérieur.

En 1988 le C.C.I.T.T élabore une série de recommandations qui sont écrites en s'inspirant du réseau optique américain (SONET) et des normes européennes.

Le débit de la trame de base STM1 (Synchronous Transport Module) est de 155,520 Mb/s, il est compatible avec le premier ordre de multiplexage des hiérarchies américaines (1544 Kb/s) et le premier ordre européen (2048 Kb/s).

❖ Les avantages de la nouvelle hiérarchie:

Le SDH offre des avantages significatifs sur le PDH. Le SDH repose sur une trame numérique de niveau élevé qui apporte en plus du haut débit (plus élevé qu'en PDH):

- Une facilité d'exploitation-maintenance (des débits importants sont réservés à ces fonctions).

- Une possibilité d'évolution Vers des hauts débits (les trames synchrones hauts débits sont construites par multiplexage synchrone de l'entité de base. Cette entité de base définit implicitement toutes les trames hauts débits).
- Une souplesse accrue quant à la possibilité d'extraire ou d'insérer directement un signal constituant du multiplex.
- Une interconnexion de systèmes à haut débit facilitée par la normalisation de la trame de ligne et des interfaces optiques correspondantes.
- Des architectures de réseaux assurant la sécurisation contre les défauts de ligne ou d'équipements.
- La modularité des équipements SDH est plus adaptée au progrès de la technologie que les équipements plésiochrones.

1-7-4) Passage du SDH vers WDM:

Le débit transporté dans les réseaux de télécommunications ne cesse d'augmenter, le transport de la voix et des données en sont les causes principales de plus avec l'expansion de l'Internet à l'échelle mondiale.

L'introduction du multiplexage en longueurs d'onde était dans le but d'augmenter les capacités de transmission et d'acheminement ainsi que la flexibilité et la rentabilité des systèmes qui conduisent de plus en plus à une optimisation des systèmes existants et à une meilleure intégration de systèmes de nouvelles générations et c'est là que le WDM est introduit et remplace le SDH petit à petit.

Les réseaux optiques ont commencé avec WDM (Wavelength Division Multiplexing) puis ont évolué vers DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) ces technologies fournissent de la capacité additionnelle sur les fibres existantes. Les réseaux optiques sont basés sur l'utilisation de multiples longueurs d'ondes qui sont transmises, assemblées mises sur le réseau. Un réseau optique (réseau de photons) peut pourvoir aux besoins d'IP & ATM et les transporter sur le réseau SDH ou PDH ainsi chacun de ces protocoles peut-être associé a une longueur d'onde. [7]

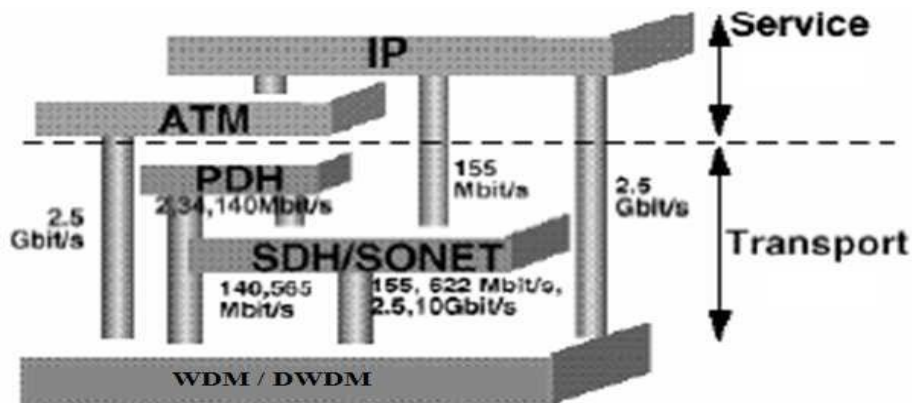


Figure 1.19:Le réseau optique.[7]

Le réseau optique futur sera constitué d'une couche de transport optique sur laquelle s'interconnecteront les services IP, ATM. L'élimination de certains protocoles de la couche transport (SDH...) conduira à réduire le nombre d'interface spécifique. [7]

De plus, il est clair que ce réseau mondial n'aurait jamais pu se développer sans l'existence de systèmes de transmission à très grande capacité et offrant des coûts de transmission très faibles.

1-8) Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons vu que la fibre optique est le support le mieux adapté pour la transmission de données, car la lumière permet de transmettre beaucoup d'informations sur sa bande passante qui est très large et permet un grand choix de fréquences et une faible atténuation.

L'interface dominante pour les hauts débits depuis de nombreuses années est SONET /SDH, qui apporte à la fois une vitesse de transmission importante et une sécurisation de l'interface.

De nos jours, les besoins en débits sont de plus en plus croissants et seule la fibre optique apporte une solution durable à cette demande car elle permet d'acheminer des trafics mondiaux engendrés par internet.

Dans les chapitres suivants, nous allons donner un aperçu des réseaux optiques SDH et WDM et leur rôle fondamental de transmission grâce à la fibre optique.

La technologie de multiplexage DWDM

2-1) Introduction :

Une des grandes tendances de la fin des années 90 est la demande croissante en bande passante des réseaux d'entreprises et d'opérateurs. La course vers les débits plus élevés est due à plusieurs facteurs tels que l'augmentation incessante du nombre d'utilisateurs de l'Internet, les applications de calcul incluant les bases de données distribuées, les communications multimédia et le commerce électronique.

Ainsi, pour remédier à cette demande, des composants et dispositifs suffisamment performants et fiables sont mis en place et on permis l'apparition des premiers systèmes de transmission optique tel que le multiplexage en longueurs d'ondes WDM (Wavelength Division Multiplexing) où le réseau est segmenté en fonction des différents besoins en débit, en bande passante et en distance de transmission avec un débits allant de 10 Gb/s à 40 Gb/s même plus.

Par contre un besoin d'un débit de transmission d'informations plus élevé est apparu donc la mise en application de la nouvelle technologie DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) a pu répondre à cette demande en utilisant plus de 16canaux.

L'étude de cette technologie s'articule en premier temps sur la description d'une liaison optique, par la suite, nous introduirons la technique de transmission DWDM et sa mise en œuvre dans les réseaux optiques.

2-2) Principes du multiplexage d'onde

Le multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing, WDM), consiste à envoyer dans une seule fibre N porteuses optiques à différentes longueurs d'onde transmettant chacune un débit DB. Ce procédé est encore appelé multiplexage en fréquence (Frequency Division Multiplexing, FDM). Ces deux termes recouvrent la même notion, mais par habitude, on parle de multiplexage en longueur d'onde lorsque la séparation entre deux canaux est relativement grande (typiquement plus de 1 nm), tandis qu'on parle de multiplexage en fréquence lorsque cet écart est relativement petit comme c'est montré sur la figure 2-1[12].

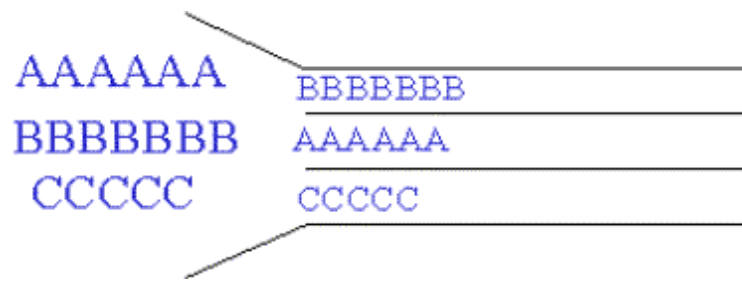


Figure 2-1: Répartition des sous-bandes WDM.[12]

La figure 2-2, montre une transmission optique effectuée pour chaque fréquence propre. Les systèmes actuels autorisent le nombre de canaux optiques suivant : 4, 8, 16,32 et 64. A partir de différentes sources émettant chacune sur une longueur d'onde propre, on peut regrouper et injecter ces canaux dans une seule fibre sans qu'il y ait mélange entre elles pendant leur propagation [12].

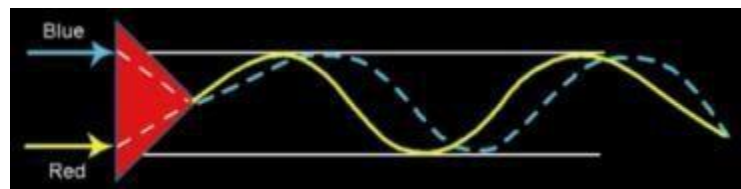


Figure 2-2: Transmission de données optiques.[12]

A l'extrémité de la fibre, il suffit de séparer ces longueurs d'ondes et de les envoyer sur autant de détecteurs différents pour retrouver les signaux électriques initiaux. Cependant Il faut noter qu'il existe des sources émettant simultanément plusieurs longueurs d'onde. La capacité des systèmes de transmission à WDM augmente parallèlement avec l'augmentation du débit par canal en multiplexage temporel (TDM) de 2,5Gbits/s à 10Gbits/s. lorsque l'espacement utilisé est égal ou inférieur à 0,8 nm ou quand plus de 16 canaux sont utilisés la technologie DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) est appliquée. Ce type de multiplexage nécessite un ensemble de diodes lasers émettant à des longueurs d'onde différentes assez proches (de l'ordre de 1550 nm), et de multiplexeurs/démultiplexeurs optiques pour combiner/séparer l'ensemble des signaux optiques dans/de la fibre figure 2-3 [12].

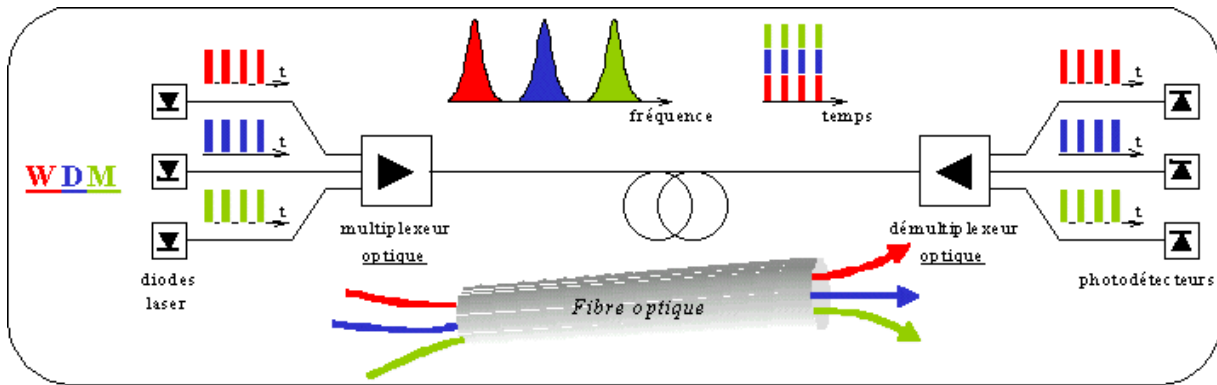


Figure 2-3: Schéma de principe du multiplexage DWDM. [12]

2-3) Application de WDM :

L'intérêt premier du WDM est de permettre le transport de débits d'informations très importants sur une même fibre, à destination de plusieurs utilisateurs. On trouve aujourd'hui des systèmes à $4 \times 10 \text{ Gbits/s}$, $16 \times 10 \text{ Gbits/s}$. Mais le véritable point de départ du développement des systèmes de transmission WDM s'est fait lorsqu'il a été associé à l'amplification optique.

En effet, l'apparition des amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (EDFA) a permis l'amplification simultanée de l'ensemble des N canaux d'un multiplex, sans distorsion du signal utile, envoyer N canaux dans une fibre optique plutôt que N fibres devenait un avantage économique indiscutable. S'il y a encore peu de temps, l'espacement entre canaux était de l'ordre de 1 nm , le terme de DWDM (Dense WDM) est maintenant utilisé. En effet, avec l'apparition, sur le marché, de lasers accordables de très bonne qualité, l'espacement entre les longueurs d'onde a pu être progressivement réduit, et est descendu à $0,8 \text{ nm}$ ou $0,4 \text{ nm}$. Une seconde application du WDM concerne les réseaux locaux. Chaque abonné se voit alors attribuer une longueur d'onde, c'est à dire une "couleur". [13]

Cette méthode présente l'avantage de permettre une évolution continue du réseau par l'adjonction de nouveaux services ou de nouveaux abonnés simplement par insertion d'une nouvelle longueur d'onde.

2-4) Les composants de base WDM:

- Transpondeur : C'est une carte qui convertit un signal (à partir d'un Signal SONET / SDH de la couche client ou autre) venant du côté client en un signal coloré (Prend un canal de la gamme DWDM).
- Multiplexeur /démultiplexeur : C'est une carte qui prend tous les signaux. colorés (canaux) venant des transpondeurs et le multiplexe sur un câble de fibre.

Du côté réception, la même carte Dé multiplexe ces canaux, et chaque canal va à son propre transpondeur.

- c) Amplificateur : Si la distance entre les sites est trop longue, nous prenons la sortie du signal du multiplexeur et la donnons à un amplificateur qui amplifie ce signal pour pouvoir parcourir de longues distances.

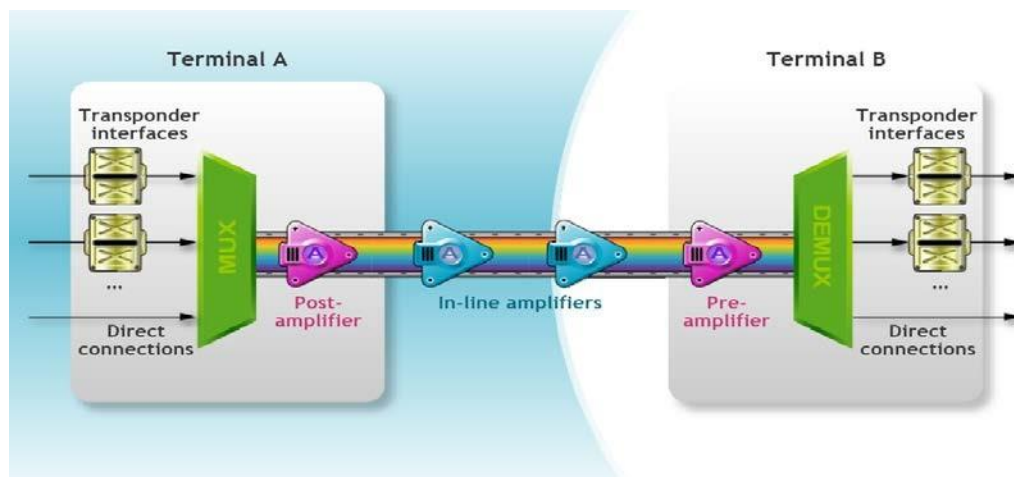


Figure 2-4 : Composants de base du WDM.

2-5) Modes de transmission :

2.5.1) Transmission unidirectionnelle/bidirectionnelle

Transmission unidirectionnelle

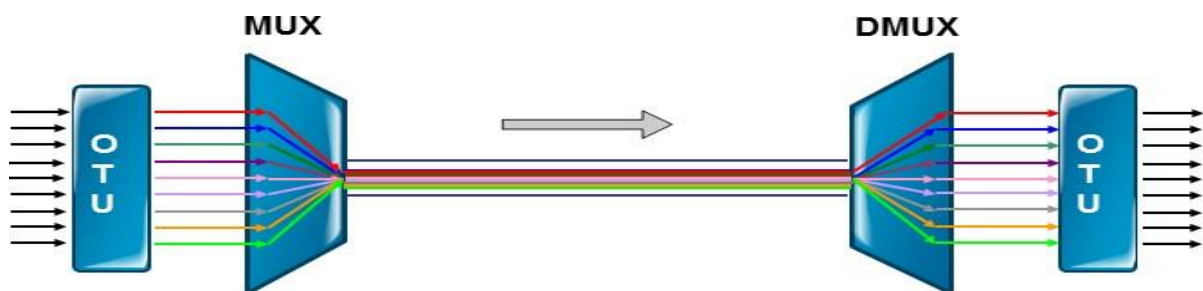


Figure 2-5 : Transmission unidirectionnelle.

- Le système WDM unidirectionnelle adopte deux fibres optiques.
- Un implémente que la transmission de signaux dans un sens, et l'autre met en œuvre la transmission des signaux dans la direction opposée.
- Largement utilisé dans le monde entier.

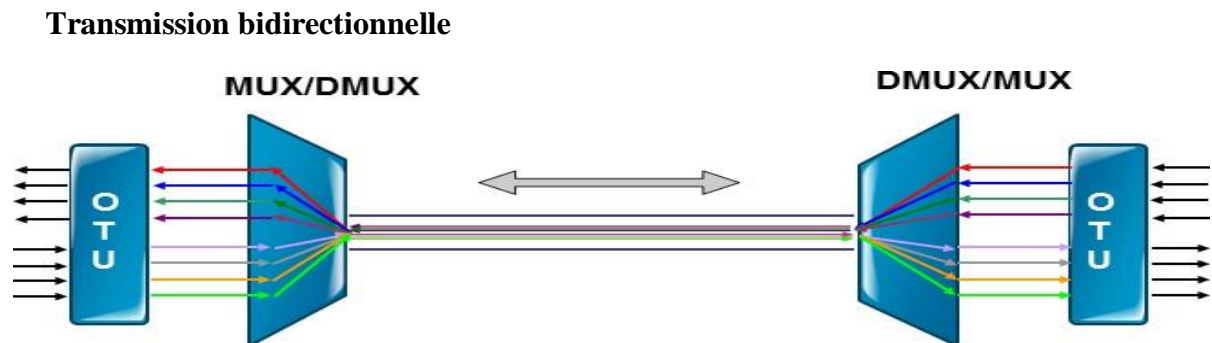
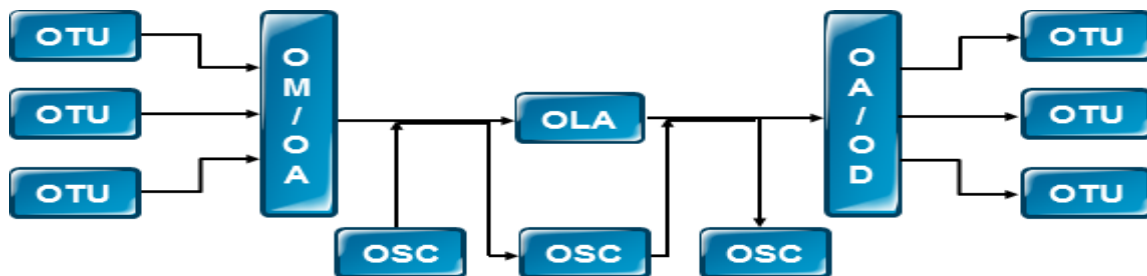


Figure 2-6 : Transmission bidirectionnelle.

- Le système WDM bidirectionnelle onde utilise une seule fibre optique. La fibre transmet des signaux optiques dans les deux directions simultanément, et les signaux dans les différentes directions devraient être attribués en longueurs d'onde différentes.
- Ce mode est généralement utilisé dans le système CWDM pour réduire le coût.

2-6) Structure du système WDM [14]



- OTU (Optical Transponder Unit) : La réception des services clients et les convertir en un signale WDM normalisé.
- OM (Optical Multiplexer): multiplexeur des services de différente longueur d'onde.
- ODU (Optical De-multiplexer Unit): Démultiplexeur des services
 - OA (Optical Amplifier): Amplificateur optique.
 - OLA: Amplificateur deligne.
 - OSC (Optical Supervisory Channel): Canal de supervision optique.
 - ESC (électrical Supervisory Channel): Canal de supervision électrique.

2.7) Techniques de multiplexage:

Compte tenu de l'énorme bande passante de la fibre optique, il est peu probable qu'un seul client utilise toute la bande passante. En revanche, elle peut être utilisée simultanément par plusieurs clients en utilisant la technique de multiplexage, (voir figure 2-7), qui consiste à partager le support optique entre plusieurs sources de trafic. Dans ce qui suit, nous présenterons les trois techniques principales de multiplexage optiques utilisés. [15]

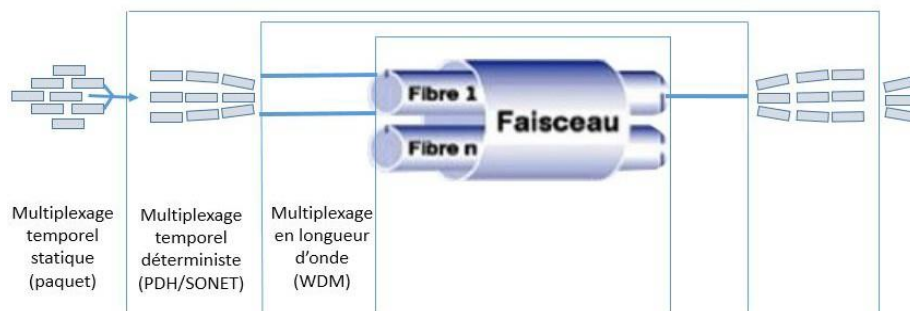


Figure 2-7: Les techniques de multiplexage optique[15].

2-7-1) Multiplexage fréquentiel FDM:

C'est la technique la plus ancienne, utilisée principalement dans les téléphones fixes. A chaque interlocuteur, ou chaque message, est alloué une bande de fréquence.

2-7-2) Multiplexage temporel TDM:

Le multiplexage temporel ou TDM, consiste à affecter à un client la totalité de la bande passante optique pendant un laps de temps et à tour de rôle pour chaque client. Ainsi, le multiplexage temporel permet de regrouper plusieurs signaux à faible débit en un seul signal à haut débit.

2-7-3) Multiplexage en longueur d'onde WDM:

En effet, WDM Représente le multiplexage en longueur d'onde à l'inverse de la technologie TDM qui n'utilise qu'une seule longueur d'onde par fibre optique, le multiplexage WDM met en œuvre un multiplexage de plusieurs longueurs d'onde. L'idée est de véhiculer simultanément dans une fibre optique plusieurs trames de signaux numériques sur des longueurs d'onde distinctes. Développé à l'origine pour les

applications sous-marines, les premiers systèmes WDM pouvaient transmettre deux ou quatre couleurs sur une même fibre.

2-7-4) Les apports du WDM :

Le WDM répond aux besoins d'augmentation de débits et de taux de partage dans le réseau d'accès [19]

- la limite en débit imposée par le TDM peut être dépassée en introduisant le WDM et en affectant une longueur d'onde par utilisateur, ce qui revient à faire du point à point en longueur d'onde. Nous cumulons ainsi les avantages du point à point (c'est-à-dire un débit pouvant être amélioré de 100 Mbit/s à 2.5 Gbit/s, une couche MAC simplifiée, l'absence de problème de synchronisation) ;
- la souplesse de multiplexage permet de superposer des adressages différents en fonction du type de clients (FFTx), des services (voix, données, vidéo ...), des technologies finales (xDSL, Wireless, Ethernet...);
- le WDM permet une indépendance vis-à-vis protocoles et une indépendance entre canaux ; – de plus, cette technique permet une plus grande concentration des clients sur un même lien principal (augmentation de la portée et du nombre de clients) et la localisation de panne est plus aisée que lorsqu'il y a partage de la longueur d'onde.

2-8) Multiplexage dense(DWDM)

On parle de Dense WDM lorsque l'espacement entre canaux est inférieur à 1.6 nm. De ce fait, le nombre de canaux qui peuvent être véhiculés dans une fibre optique est important, jusqu'à 32 canaux sur la bande C et 128 sur l'ensemble des bandes : C, S et L. L'engouement pour cette technologie a permis de réaliser des progrès importants en termes de fiabilité, débit et de performances. [16].

Les systèmes DWDM sont adaptés pour le transport court et long distance de données, voix, vidéo, et des services multimédias. Les systèmes DWDM sont parfaitement adaptés dans le Metro ou long distance où les demandes de capacité sont extrêmement élevés. Cette grande capacité demande un résultat de l'agrégation des services reçus des clients multiples à la périphérie de l'entreprise [17].

Les systèmes DWDM typiques utilisent des lasers qui ont un débit pouvant aller jusqu'à 10 Gbps (OC-192/STM-64). Les Émetteurs-récepteurs des systèmes DWDM consomment plus d'énergie et dissipent la chaleur beaucoup plus que les émetteurs-

récepteurs des systèmes CWDM. Cela crée une obligation pour le refroidissement des sous-systèmes de DWDM [17].

La figure 2-8 illustre un schéma DWDM. Aujourd'hui, les systèmes DWDM Metro déployés utilisent généralement un espacement de fréquence de 100 GHz ou de 200 GHz. L'espacement commun du DWDM peut être 200, 100, 50, 25, ou 12,5 GHz avec un nombre de canaux pouvant atteindre jusqu'à 300 ou plusieurs canaux à des distances de plusieurs milliers de kilomètres avec l'amplification et la régénération le long de cette route. Comme spécifié par le standard ITUG.694.1, les systèmes DWDM sont caractérisés par un espacement des canaux de 50 ou 100 GHz. La grille de fréquence de DWDM est ancrée à 193,1 THz. Les systèmes DWDM ont de façon significative une granularité plus fine entre les longueurs d'onde (espacement typique de 100 GHz) par rapport à leurs homologues CWDM. Selon la grille UIT, les produits DWDM fonctionnent dans la bande C entre 1530 et 1565 nm ou dans la bande L entre 1565 et 1625 nm [17].

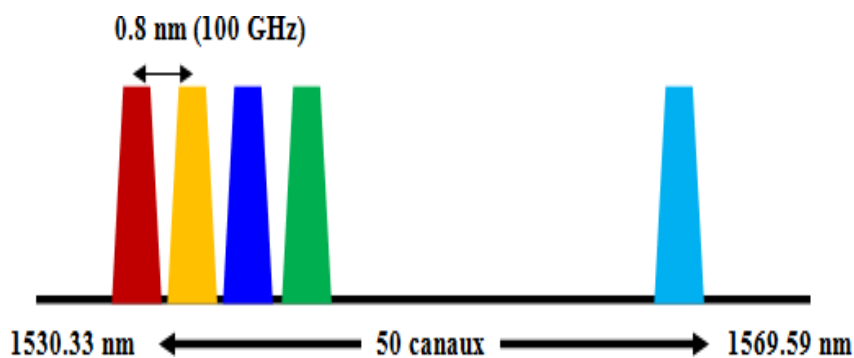


Figure 2-8 : Grille UIT pour DWDM avec un espacement 0.8 nm [18,25].

2-9) Principe et architecture DWDM

Le multiplexage en longueur d'onde repose sur l'envoi d'ondes lumineuses multiples (fréquences) dans une même fibre optique. L'information est transmise par chaque onde, appelée voie, par modulation d'intensité (ou d'amplitude) ou par modulation de phase. À la réception, un prisme optique ou un dispositif semblable sépare les fréquences de manière à extraire séparément l'information transmise par chaque voie. Un signal numérique binaire, plus précisément un signal de modulation d'intensité par tout ou rien,

peut également être acheminé par chaque voie individuelle, bien qu'on s'attende à un débit binaire plus faible qu'avec la modulation d'intensité ou de phase. Comme dans le multiplexage par répartition en fréquence (MRF) de type classique utilisé pour les transmissions de signaux électriques ou radio, on peut mélanger les porteuses sur un seul support car la lumière d'une fréquence donnée ne brouille pas celle d'une autre fréquence à l'intérieur de l'ordre linéaire d'approximation. La figure 2-9, illustre le principe de base des communications par fibre optique, y compris le DWDM l'émetteur manipule le signal d'entrée en exerçant une modulation par déplacement d'amplitude (ou d'intensité) (MDA), une modulation par déplacement de fréquence (MDF) ou une modulation par déplacement de phase (MDP) sur une onde porteuse lumineuse de fréquence FS et d'une largeur de bande très étroite – une onde laser mono fréquence (ou d'une seule couleur). Ce signal modulé est groupé à d'autres signaux émis sur d'autres fréquences, transmis au récepteur par fibre optique, puis reconverti en signal électrique par un détecteur optique et un démodulateur. Des commutateurs ou des routeurs peuvent en outre intervenir entre l'émetteur et le récepteur [18].

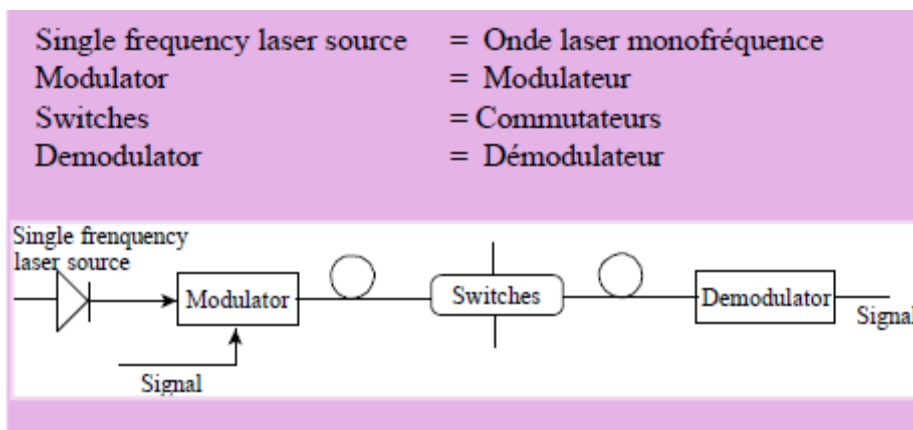


Figure 2-9: Principe des communications optiques.[18]

La figure 2-10 décrit l'architecture de base et le fonctionnement d'un réseau DWDM. Ce réseau se compose de nœuds d'extrémité, de nœuds de commutation et de liaisons par fibres optiques. Les nœuds d'extrémité consistent en modulateurs-démulateurs (ou modems) à chaque voie, ainsi que de multiplexeurs et de démultiplexeurs servant respectivement au groupement et à la séparation des ondes lumineuses de fréquences différentes. Les modulateurs convertissent les données numériques en ondes par modulation d'intensité ou d'amplitude, tandis que les démodulateurs reconvertissent les signaux optiques en données numériques. Les nœuds de commutation se composent de multiplexeurs et de démultiplexeurs à insertion-extraction, de commutateurs de

longueur d'onde et de convertisseurs de longueur d'onde. Les multiplexeurs servent à grouper les signaux de longueurs d'onde différentes aux fins de transmission alors que les démultiplexeurs séparent ces mêmes signaux aux fins de commutation. Le commutateur de longueur d'onde interconnecte les voies d'entrée aux voies de sortie voulues. Les convertisseurs de longueur d'onde ont pour fonction de convertir, au sein d'une même fibre optique, les longueurs d'onde surexploitées en longueurs d'onde disponibles de manière à maximiser l'utilisation des voies [18].

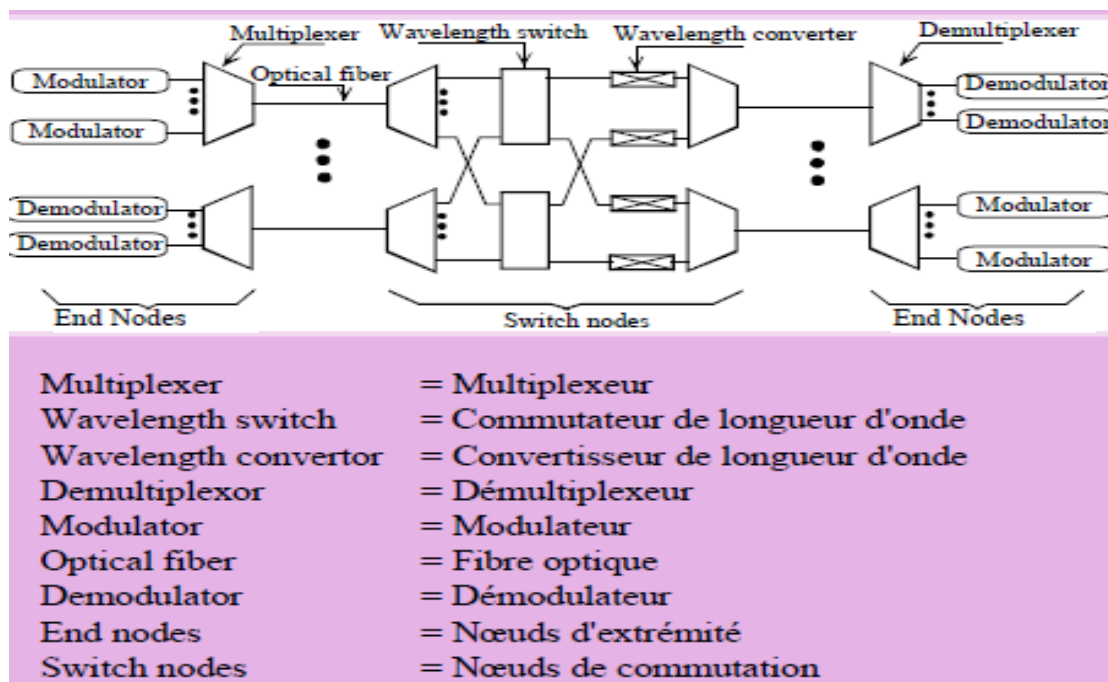


Figure 2-10: Principales composantes d'un réseau DWDM.[18]

2-10) Les différents composants d'un système DWDM:

La structure générale d'un système DWDM à N-trajectoire de longueurs d'ondes se compose de deux multiplexeurs terminaux optiques OTM (Optical Terminal Multiplexer) et d'un amplificateur optique en ligne OLA (Optical Line Amplifier).

2-10-1) Multiplexeur terminal optique OTM:

C'est un équipement de base pour la conception d'un système WDM. Installé aux extrémités des fibres optiques, ils permettent de rassembler/dissocier les différentes longueurs d'onde.

Les OTMs sont utilisés à l'entrée du réseau WDM où ils assurent l'accès pour les signaux provenant des autres réseaux clients.

A l'émission, l'OTM reçoit les signaux STM-n de n longueurs d'onde ($\lambda_1 \dots \lambda_n$)

à partir d'un équipement client (ex: équipement SDH), les convertit, les multiplexes, les amplifie, les ajoute au canal de supervision puis les envoie sur la fibre optique.

A la réception, l'OTM traite d'abord le canal de supervision λ_s ensuite démultiplie les n signaux dans des canaux individuels et les distribue à l'équipement client correspondant.

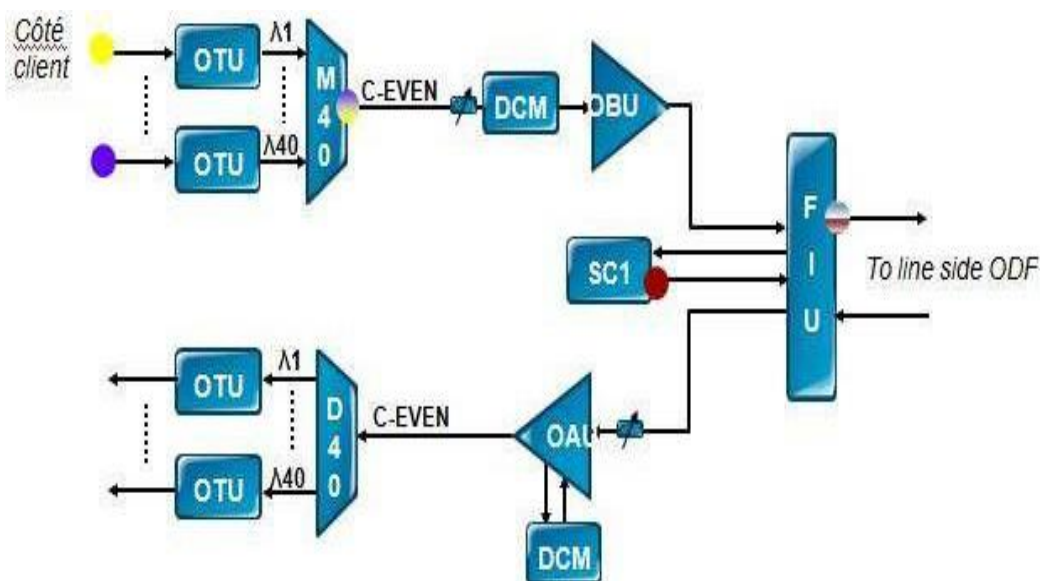


Figure 2-11: Le Schéma de l'OTM.

2-10-2) Amplificateur de ligne optique (OLA):

L'amplificateur OLA est utilisé sur la ligne pour compenser l'atténuation du signal et sa dispersion. Du côté de réception la FIU sépare le canal principal du canal de supervision puis amplifie le signal dégradé et compense la dispersion avec le DCM.

Du côté de l'émission le signal amplifié est multiplexé avec le signal de supervision via le FIU puis remis sur la fibre de transmission. [20]

La figure 2-12 ci-dessous montre le schéma de l'OLA.

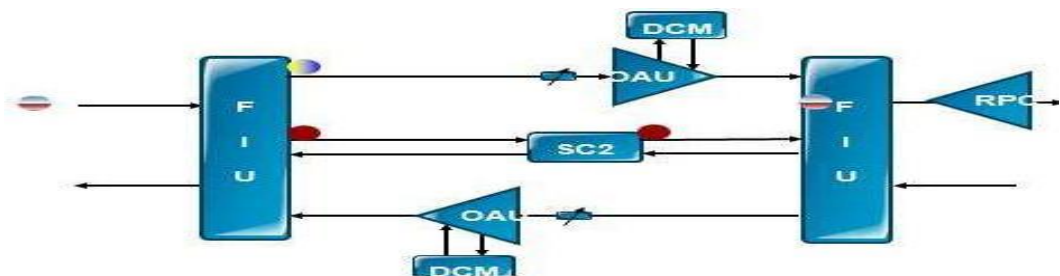


Figure 2-12 : Le schéma de l'OLA.[20]

Les composants OTM et OLA qui se divisent en unités suivantes:

- ❖ **Unité de conversion de longueur d'onde optique (OTU):** sa fonction principale est de mettre en application la conversion des longueurs d'ondes sur les côtés émetteurs et récepteurs, tel que les signaux optiques satisfaisant la recommandation.
- ❖ **Unité de démultiplexage optique / Unité de multiplexage optique (ODU/OMU).**
- ❖ **Amplificateur optique (OA):** Selon les différentes fonctions et positions dans le système, il existe trois types d'amplificateurs, l'amplificateur de ligne optique (OLA), l'amplificateur boosté optique (OBA), et le préamplificateur optique (OPA).
- ❖ **Canal de surveillance Optique (OSC):** Il accomplit principalement la transmission et la réception optique bidirectionnelle d'information de surveillance.

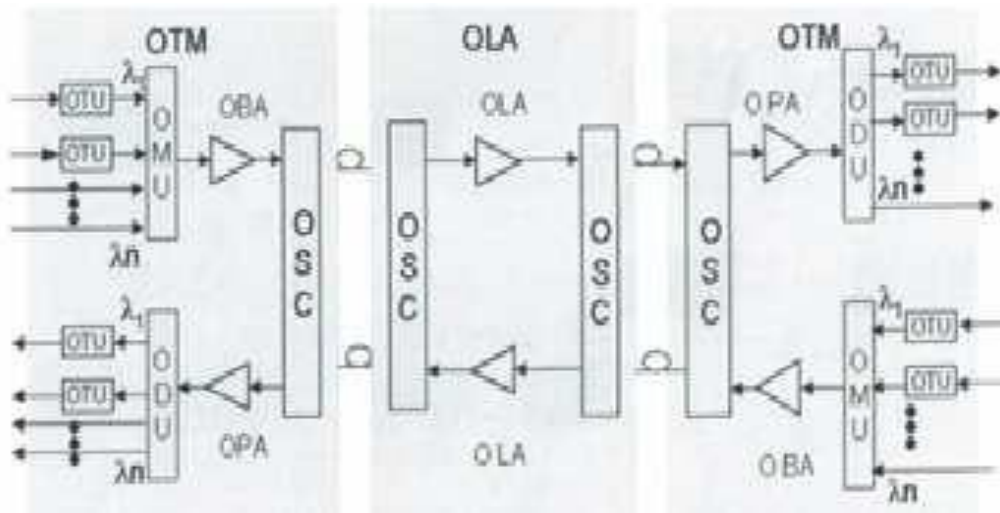


Figure 2-13: Architecture de base d'un système DWDM.

2-10-3) Les multiplexeurs à insertion /extraction optique (OADM):

Ces équipements sont utilisés pour insérer (à l'origine) et extraire (à la destination) une ou plusieurs longueurs d'onde sur une liaison WDM acheminant une pluralité de canaux optiques ayant des longueurs d'onde différentes.

2-10-3-1) Principe:

- ❖ Le module optique d'insertion extraction contient un démultiplexeur pour séparer les différentes longueurs d'onde et un commutateur optique OXC (Optical Cross – Connect) qui échange le signal de porteuse et un multiplexeur qui combine les différentes longueurs d'ondes sur une seule fibre optique.
- ❖ Le signal de porteuse provenant du démultiplexeur passe à travers le commutateur

optique et ensuite il est transféré vers le port d'extraction, simultanément un nouveau signal est introduit par le port d'insertion du commutateur.

- ❖ Dans le schéma ci-dessous, on a représenté 3 canaux de commutateurs 2*2 (deux entrées et deux sorties).

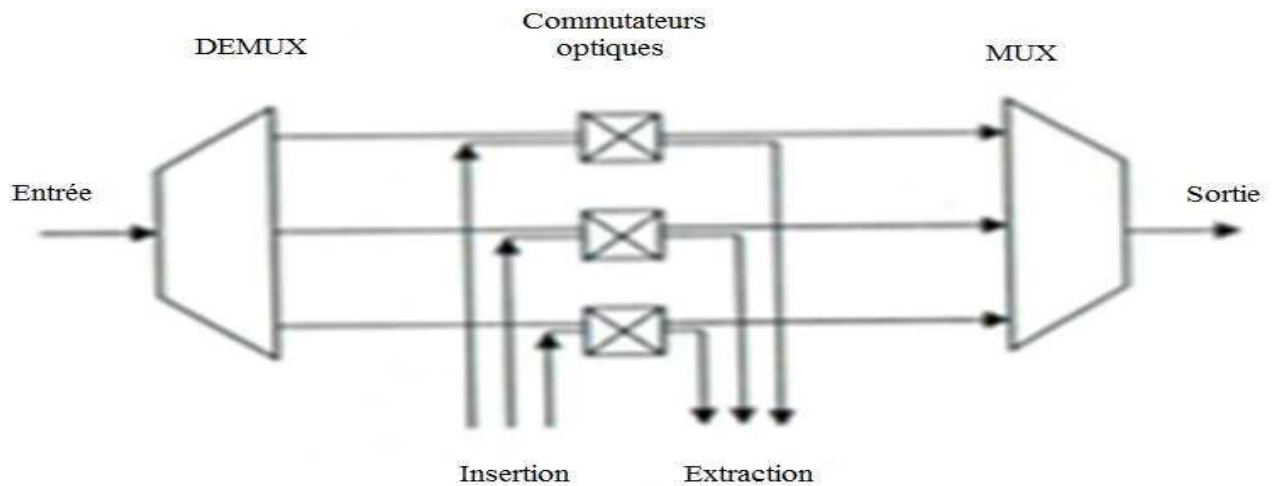


Figure 2-14: Représentation schématique d'un OADM.

2-10-3-2) Les types d'OADM:

On distingue deux types:

2-10-3-2-1) FOADM (multiplexeur à insertion /extraction optique fixe):

Il représente la première génération de multiplexeurs à Insertion/Extraction Optique.

Les longueurs d'ondes à insérer/extraire étaient fixe pour un OADM fixé.

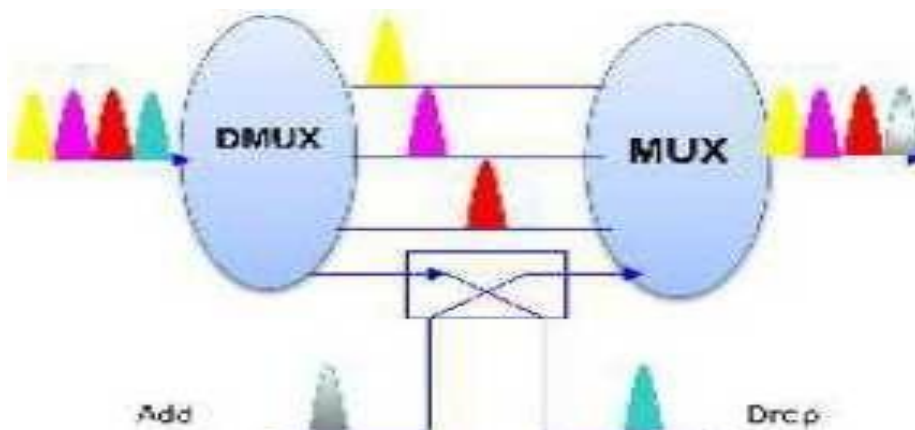


Figure 2-15: OADM fixe.

2-10-3-2-2) Multiplexeur à insertion/extraction optique ré-configurable ROADM:

A l'inverse des OADM statiques, les OADM dynamiques peuvent reconfigurer plusieurs longueurs d'onde, transportant des signaux clients, sans la nécessité de convertir les signaux sur tous les canaux WDM en des signaux électriques.

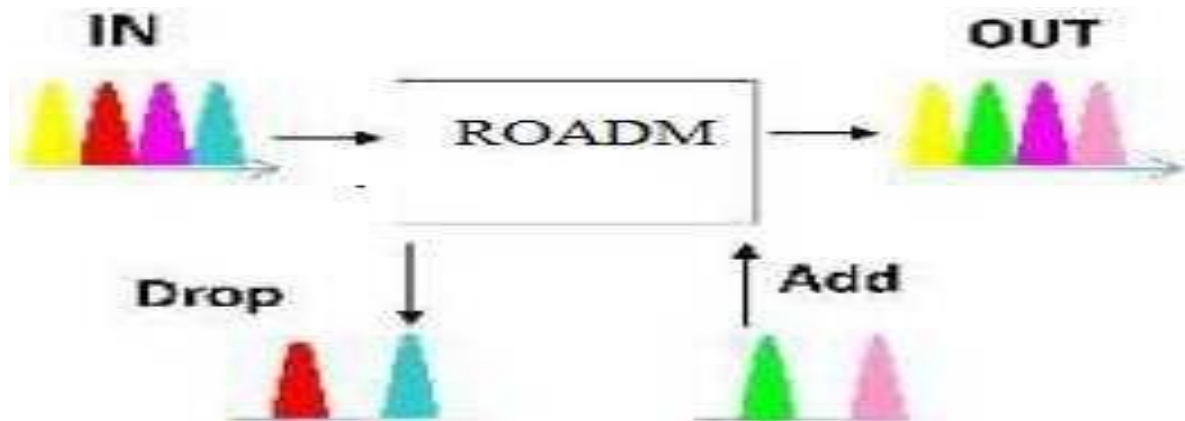


Figure 2-16: OADM Dynamique.

2-11) Applications de technique DWDM

Deux applications évidentes sont déjà utilisées : les câbles sous-marins et l'allongement de la durée de vie des câbles là où toutes les fibres sont utilisées. Pour les câbles sous-marins, DWDM améliore la capacité sans ajouter de fibres, ce qui crée des câbles plus gros et des répéteurs plus encombrants et plus compliqués. L'ajout de service dans les zones où les câbles sont maintenant pleins est une autre bonne application.

Mais cette technologie peut aussi réduire le coût de toutes les liaisons de communications interurbaines terrestres et les nouvelles technologies peuvent conduire à de nouvelles architectures de réseaux [21].

2-11-1) Multiplexage U-DWDM (Ultra DWDM)

Les systèmes de communications optiques sans fil utilisent le multiplexage par répartition en longueur d'onde ultra-dense (UDWDM) est la meilleure solution pour fournir une transmission à haut débit avec un très faible taux d'erreur de bits (BER). Ce type de multiplexage est le phénomène le plus récent pour l'avancement de la technologie, il s'agit d'une technologie qui peut transmettre plusieurs données simultanément sur la fibre unique avec un espacement des canaux très étroit [22], où l'espacement entre les canaux est de 0,4 nm et le nombre de canaux utilisables est égal à

100. Il y a des expériences actuellement avec l'espacement entre les canaux égal à 0.1 nm sont en cours d'exécution, mais les règles de travail pour eux sont les mêmes. De nos jours, les systèmes DWDM sont basés sur une grille de fréquences avec un espacement de 50 GHz (0.4 nm), 100 GHz (0.8 nm) et 200 GHz (1.6 nm) et sont appliqués avec une référence de fréquence égale à 193.1 THz [23].



Figure 2-17: Technique de multiplexage

Ultra DWDM.[22,23]

2-11-2) Multiplexage CWDM

Le multiplexage par répartition en longueur d'onde grossière (Coarse WDM) est une technologie de multiplexage en longueur d'onde pour les réseaux urbains et d'accès [24]. La transmission est réalisée en utilisant 18 canaux avec des longueurs d'onde comprises entre 1270 nm et 1610 nm, et 8 canaux pour des longueurs d'onde allant de 1470 à 1610 nm [25]. Les longueurs d'onde possèdent un espacement de 20 nm, et par conséquent ne peuvent pas se chevaucher les uns avec les autres [26], cet espacement spectral représente une des solutions bas coût envisagée pour les réseaux d'accès optiques [25]. La largeur du canal lui-même est de 13 nm, les 7 nm restants sont conçus pour sécuriser l'espace au prochain canal [24]. Cette technologie permet d'utiliser des lasers non refroidis et beaucoup moins précis ainsi que des AWG (American Wire Gauge) également non contrôlés en température [25], comme elle offre une solution pratique et économique pour des distances inférieures à 70 kilomètres, et pour les distances entre 40 et 70 kilomètres, CWDM a tendance à se limiter à supporter huit canaux [27].

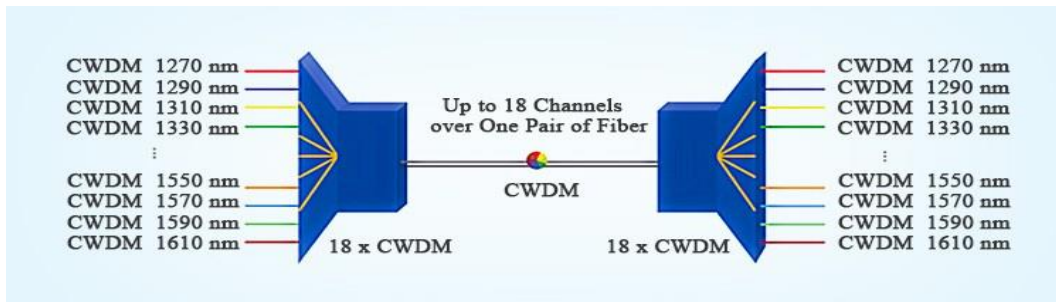


Figure 2-18 : Multiplexage CWDM.[25]

2-11-2-1) Applications de technique CWDM

En raison des caractéristiques techniques du CWDM, le CWDM s'applique principalement dans les deux grands domaines : métro et réseau d'accès. Il y a toujours deux fonctions. Une fonction consiste à utiliser chaque canal optique pour transmettre un signal d'entrée distinct à un débit individuel. Et un autre est d'utiliser le CWDM pour décomposer un signal à grande vitesse en composantes plus lentes qui peuvent être transmises de façon plus économique [28].

2-12) Comparaison entre les techniques démultiplexages

Le tableau suivant résume la différence entre les systèmes de multiplexage WDM, CWDM, DWDM et UDWDM :

Type de multiplexage	Espacement inter-canaux en (nm)	Nombre de canaux	Bande de signaux en (nm)
WDM	8	32	1530 – 1565
CWDM	20	8 – 18	1270 – 1610
DWDM	0.8	80 – 160	1525 – 1565
UDWDM	0.4	400	1675 – 1625

Tableau 2-1 : Comparaison entre les techniques de multiplexage (WDM, DWDM, UDWDM, CWDM).

Le schéma suivant montre la différence entre la bande et l'espacement inter-canaux des techniques de multiplexage DWDM et CWDM.

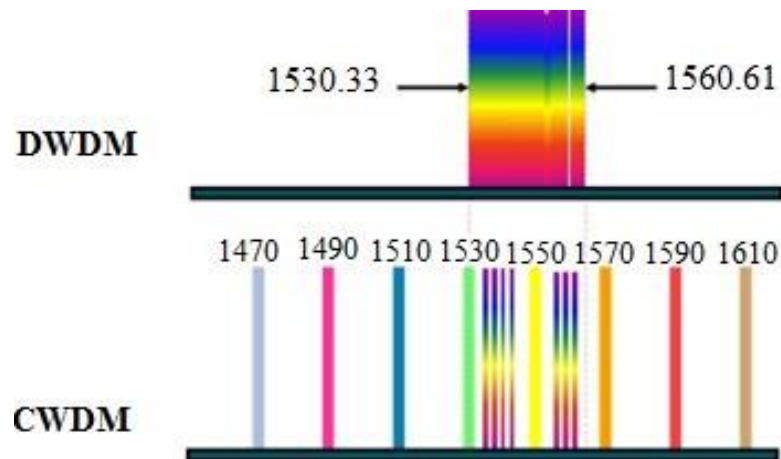


Figure 2-19: différence entre la bande des techniques multiplexages DWDM et CWDM.

2-13) Conclusion

Pour avoir une liaison optique à haut débit, plus l'utilisation la technologie WDM/DWDM, il est possible de générer des ondes impulsionnelles stables qui ont la propriété de pouvoir se propager sur de grandes distances dans un milieu non linéaire et dispersif sans grande modification et qui sont par conséquent idéales pour la transmission de données par fibres optiques.

De ce fait, en technologie WDM, un seul amplificateur optique se substitue aux N régénérateurs en chaque site de ligne, procurant ainsi une économie d'équipements croissante avec la longueur de la liaison et le nombre de canaux. Ce fut le véritable point de départ du développement des systèmes de transmission longue portée (typiquement entre 150 et 600 Km).

La technologie WDM est dite dense lorsque l'espacement utilisé entre deux longueurs d'onde est égal ou inférieur à 100 GHz. On l'emploie désormais pour les transmissions longues distance. Dans la pratique, cela signifie que l'on fait passer dans une même fibre beaucoup de signaux portés par des fréquences très rapprochées les unes des autres .

Aperçu sur les réseaux optiques

3-1) Introduction:

Le premier réseau de transmission numérique était basé sur la hiérarchie numérique plésiochrone (PDH). Cependant cette hiérarchie était peu flexible et s'est retrouvée incapable de satisfaire les exigences croissantes des réseaux de transmission modernes. D'où la nécessité de normaliser une nouvelle hiérarchie numérique synchrone (SDH) qui pallie les principaux défauts du PDH et supporte des débits très élevés. Elle garantit la transmission dans une même trame des services de types de débits différents (parole, image, communication multimédia, interconnexion des réseaux locaux, mode de transmission ATM) et un traitement plus souple des voies de transmission et une gestion plus élaborée.

La croissance du trafic internet oblige les opérateurs de réseau à augmenter la capacité de transmission de leur réseau terrestre en fibre optique, donc il faudra offrir des capacités de plusieurs Gigabits bits sur une seule fibre, pour cela une solution alternative est d'utiliser le multiplexage en longueur d'onde (WDM) et l'idée est d'envoyer plusieurs signaux en utilisant différentes longueurs d'ondes dans un multiplexeur.

Dans ce chapitre, nous illustrons l'infrastructure de transport optique basé sur le SDH, les principales composantes mises en œuvre et la gestion de réseau.

3-2) Définition de la SDH:

La SDH (Synchronous Digital Hierarchy) est une technologie de transmission synchrone qui utilise principalement la fibre optique vu ses nombreux avantages en terme du débit, de fiabilité, de sécurisation et de supervision à distance du réseau.

La SDH est issue des concepts SONET proposés par BELLCORE (BELL Communication Research). Les premières normes SDH ont été approuvées par le CCITT (Comité Consultatif International de Téléphone et Télégraphe) à MELBOURNE en Novembre 1988. Elles définissent les débits de la trame et les procédés de multiplexage. [9]

La SDH se situe sur les deux premières couches du modèle OSI. Elle offre la possibilité de transmettre dans une même trame des services de types et de débits différents.

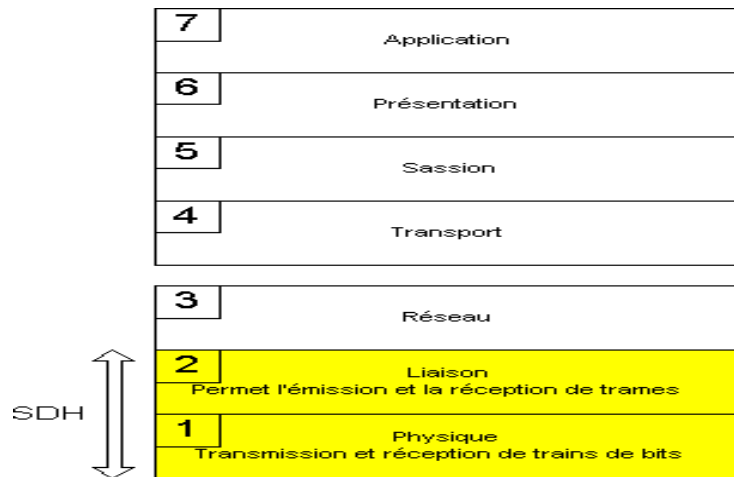


Figure 3.1: Situation de SDH dans le modèle OSI

3-3) La trame SDH:

Il existe différentes trames de SDH. La trame de base est appelée STM-1 (Synchronous Transport Module, niveau 1).

Cette trame est structurée en octets et possède les caractéristiques suivantes:

- ✓ Taille : 2430 octets (organisation : 9 rangées / 270 colonnes)
- ✓ Durée : 125µs

Ce qui nous donne un débit de:

$$2430 * 8 / 125 = 155.520 \text{ Mb/s.}$$

Dans cette trame, 9 octets sont réservés à la gestion et à l'adressage, il reste donc une charge utile de 150, 336 Mb/s, elle contient 3 blocs:

- ✓ **SOH (Section Over Head):** information de transport réservé à l'exploitation.
- ✓ **PTR:** Pointeur.
- ✓ **Payload:** Information à transmettre.



Figure 3.2: Structure de la trame SDH STM-1

- ✓ La capacité en octets est donc:
9*270 = 2430 octets
- ✓ La capacité en bits est donc:
2430*8 = 19440 bits
- ✓ D'où un débit de:
19440/125 μs = 155.520Mb/s.

L'information transportée est indiquée par un pointeur qui se situe dans la zone de supervision de la trame. Lorsque la quantité d'information à transporter est supérieure à la zone disponible dans la trame SDH, elle continue dans la trame suivante, la fin étant indiquée par un pointeur de fin.

3-4) Les en-têtes:

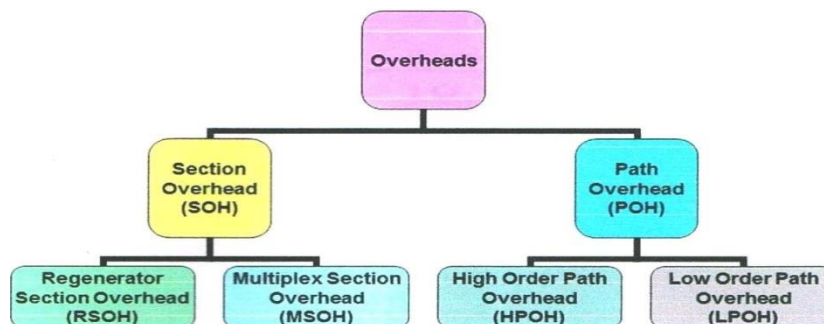


Figure 3.3: Les en-têtes.

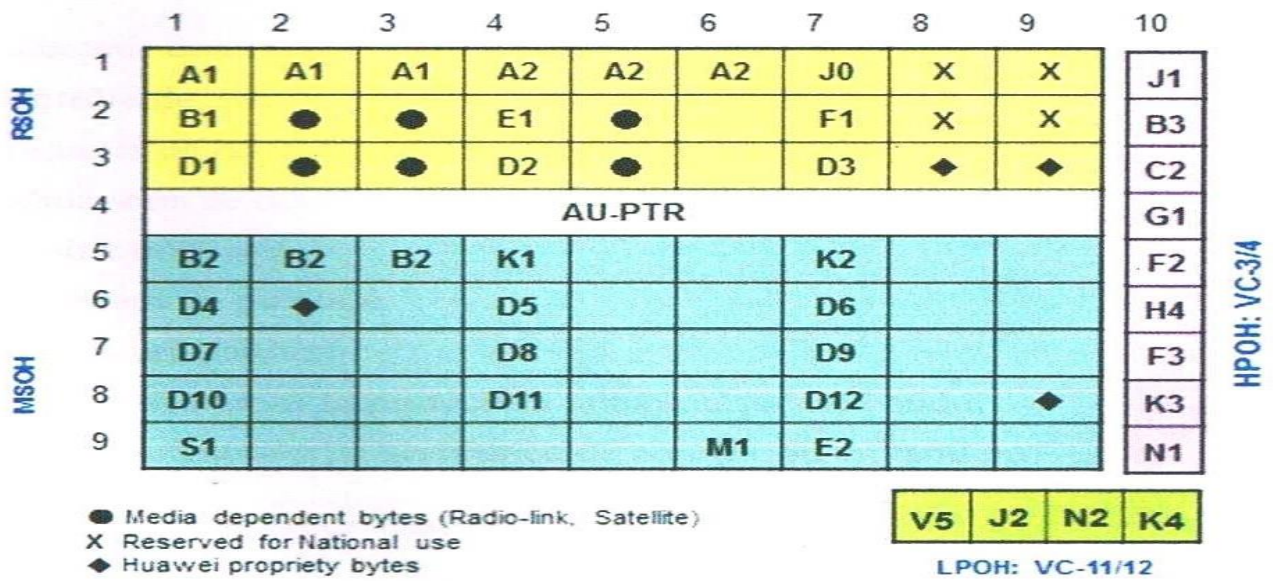


Figure 3.4: Les octets de POH et SOH.

3-4-1) Le POH (Path-Over-Head):

Le POH est généré et ajouté au conteneur dès son entrée dans le réseau SDH pour former le conteneur virtuel. Le POH procure au conteneur les éléments de sa propre gestion indépendamment des autres entités de transport. Son contenu sera extrait et interprété à l'autre extrémité du conduit en sortie du réseau SDH. [10,11]

3-4-1-1) Le HPOH (High Path Over-Head):

J1
B3
C2
G1
F2
H4
F3
K3
N1

Tableau 3.1: HPOH (High Path over Head)[10,11]

J1: Indicateur de conduit Path Trace.

B3: Contrôle de qualité (BIP-8).

C2: Étiquette de conduit (Signal label). **G1:** Indication de défauts distantes (RDI, REI). **F2:** Besoins utilisateurs.

H4: Indicateur de position.

F3: Besoin utilisateurs.

K3: Canal utilisé pour la protection automatique de conduit.

N1: Besoin opérateurs (Surveillance de connexion en tandem)

3.4.1-2). Le LPOH (Low Path Over Head):

V5	J2	N2	K4
----	----	----	----

Tableau 3.2: LPOH (Low Path Over Head)[10,11]

V5: La vérification d’erreurs.

N2 : Besoin d’opérateurs.

J2 : Indicateur de conduit.

K4 : Réserve pour les futures utilisations.

3-4-2) Le SOH (Section OverHead):

Une section désigne une portion physique de chemin entre deux nœuds. La norme SDH associée à la section une entête, le SOH qui contient de données de contrôle de la transmission de nœud à nœud (Commutation de protection, supervision des erreurs).

La section est partagée entre:

- La section de régénération.
- La section démultiplexage.

Le sur débit SOH est partagé entre deux sur débits: RSOH et MSOH: [10,11]

3-4-2-1) L’en-tête de section régénération(RSOH):

Il est constitué dans les 3 premières rangées et les 9 premières colonnes de la trame STM-1 comme le montre le tableau suivant. Cet entête est utilisé pour gérer le transfert d’informations entre les générateurs et les locations qui termine ou routent le trafic (multiplexeur ou démultiplexeur DXC).

A1	A1	A1	A2	A2	A2	J0	X	X
B1		●	E1	●		F1	X	X

D1	●	●	D2	●		D3		
----	---	---	----	---	--	----	--	--

Tableau 3.3: Les réseaux de section régénération (RSOH)[10,11]

(RSOH) La signification des octets du RSOH est la suivante:

A1, A2: Ces octets sont utilisés pour le verrouillage de trame. Pour une trame STM-1 la structure est A1A1A1A2A2A2, Où : A1 est 11110110=f6H. A2est 00101000=28H.

J0 : cet octet est utilisé pour la trace de section de régénération, identificateur de section (section trace).

B1 : utilisé pour la surveillance d’erreurs pouvant survenir sur le trafic.

E1 : entre deux équipements terminaux de la section de régénération (valider pour STM-1 seulement).

F1 : permet une voie de service de 64Kb/s.

D1 à D3: permettent un canal de communication de données à 192b/s affectes à la communication de donnes d’administration et de contrôle du réseau de la section de génération.

- : sont des octets dont la valeur dépend du media de transmission (transmission radio, satellite).

3-4-2-2) L’en-tête de section multiplexage(MSOH):

Le sur débit de section de multiplexage est structuré dans les lignes 5 à 9, et de 9 premières colonnes de la trame STM-1 comme le montre le tableau suivant. Il est utilisé pour gérer le transfert de bout en bout de l’information entre les générateurs et les locations qui termine ou routent le trafic (multiplexeur ou démultiplexeur DXC).

Ces réseaux assurent leurs fonctions en associant à chaque entité de données de niveau supérieur un en-tête de section de multiplexage (MSOH).

B2	B 2	B 2	K 1			K 2		
D4			D 5			D 6		
D7			D 8			D 9		
D10			D 11			D 12		
S1					M 1	E2		

Tableau 3.4: Les réseaux de section de multiplexage (MSOH)[10,11]

La signification des octets du MSOH est la suivante:

- ✓ **B2**: trois octets réservés pour la détection des erreurs.
- ✓ **K1, K2**: deux octets affectés à la commande de signalisation de protection automatique entre deux équipements terminaux de la section démultiplexage.
- ✓ **D4 à D 12**: il représente un canal de données (DCCM) pour transporter les flux de gestion au niveau de la section de multiplexage. Le DCCM est constitué de 9 canaux à 64Kb/s, soit un débit de 576Kb/s.
- ✓ **S1 (Status byte)**: marqueur de qualité de la synchronisation.
- ✓ **M1**: Indication d'erreur distante sur la section démultiplexage.
- ✓ **E2** : voie de service entre multiplexeurs.

3-5) Les pointeurs(PTR):

Pour pouvoir remplir un VC avec un affluent et le projeter dans la trame SDH, toutes en pouvant le localiser immédiatement, la norme SDH utilise un pointeur. Le principe est donc de ne pas placer le conteneur à un endroit précis dans la trame, ce qui nécessiterait l'utilisation de mémoire tampons pour synchroniser l'ensemble, mais bien d'indiquer dans une zone mémoire appelé pointeur, l'adresse relative de conteneurs par rapport au début de la trame. Le pointeur a deux fonctions importantes:

- ✓ Rattraper le déphasage des trames synchrones.
- ✓ Assurer la synchronisation des trames asynchrones.

Le principe est simple: SDH utilise des pointeurs et une technique de justification

« négative-nulle-positive » pour pouvoir faire flotter les informations utiles dans la trame ainsi le décalage de phase entre les horloges des équipements source sont absorbés. [10]

- **Justification du pointeur**: Bien que le réseau soit synchronisé, il existe toujours un problème d'asynchronisme, l'horloge locale n'est jamais exactement synchrone et que la gigue et le dérapage affectent le transport de trame synchrone d'un nœud vers un autre à travers le réseau. Pour le résoudre, on utilise le mécanisme des pointeurs mais aussi des octets de justification:
- ❖ **Justification positive** : Si le débit d'affluent est inférieur au débit nominal, l'affluent ne pourra être inscrit sur la durée d'une trame, la capacité de la charge utile ne sera plus utilisée en totalité et des octets de bourrage seront insérés.
- ❖ **Justification négative**: Si le débit d'affluent est supérieur au débit nominal, l'affluent doit pouvoir

déborder hors de la capacité utile, des octets sont réservés à cet effet dans le sur débit.

❖ **Justification nulle:** Si le débit d'affluent est égal au débit nominal, aucun décalage n'est fait.

3-6) Le multiplexage SDH:

Pour la norme SDH, les niveaux sont organisés hiérarchiquement en STM-n (Synchronous Transport module, niveau n). Pour SONET ils sont organisés en STS-n (Synchronous Transport signal, niveau n). [10] La hiérarchie SDH de l'UIT-T est récapitulée au tableau suivant:

STM-n	Debit/s	Support
STM-1	155 Mbit/s	FO, radio, coaxial
STM-4	622 Mbit/s	Fiber Optique
STM-16	2.5 Gbit /s	Fibre Optique
STM-64	10 Gbit/s	Fibre Optique
STM-256	40 Gbit/s	Fibre Optique

Tableau 3.5:Répertoire des débits de la hiérarchie SDH[10]

Les liaisons SDH normalisées sont au nombre de trois, correspondant au STM-1, STM-4, STM-16. La trame de base est multipliée par 4 dans le deuxième cas et par 16 dans le troisième. Les conteneurs virtuels pour ces niveaux sont les VC-4. Le transport de ces containers s'effectue par un multiplexage temporel comme illustré à la figure 3.5, dans laquelle 4 trames VC-4 sont découpé et entrelacées octets par octets.

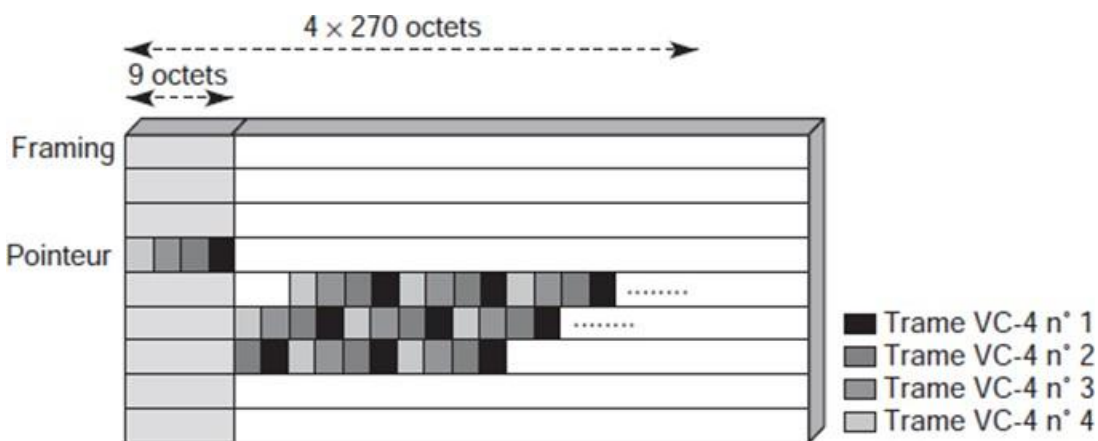


Figure 3.5:Multiplexage de containers VC- 4 sur une trame STM- 4.[10]

3-6-1) Principe de multiplexage:

Le multiplexage SDH se fait en deux étapes. Un premier niveau, dit niveau inférieur LO (Low-Order) suivi

d'un deuxième niveau, dit niveau supérieur HO (High Order).

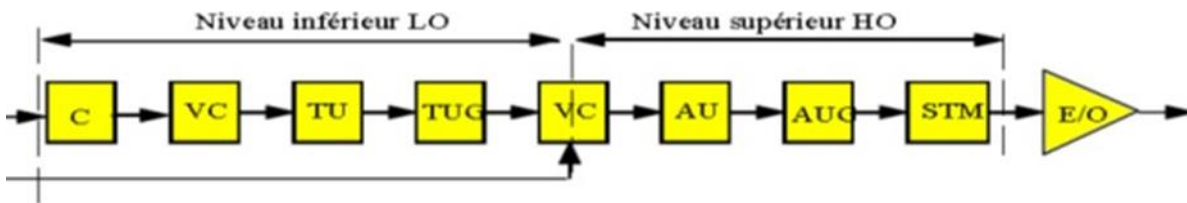


Figure 3.6: Les niveaux démultiplexage SDH.

Lors du multiplexage SDH, les données sont encapsulées dans des blocs (Trames) qui seront multiplexés pour donner des blocs de plus en plus gros jusqu'à obtenir une trame STM. Chaque bloc porte un nom, on trouve: conteneur (C), Conteneur Virtuel (VC), Tributary Unit (TU), Tributary Unit Group (TUG), Administrative Unit (AU), Administrative Unit Group (AUG), et Synchronous Transport Module (STM).

3-6-2) Les éléments de la hiérarchie synchrone:

❖ **Le Conteneur «C-n»:**

Le conteneur C-n est une entité dont la capacité est dimensionnée pour assurer le transport d'un des débits définis par le CCITT.

Le conteneur joue le rôle de régénération du signal plesiochrone du départ, il récupère l'horloge et transforme le code de transfert selon les débits entrants.

Le « n » de C-n dépend du débit entrant, par exemple C- 4 correspond à 139264 Kb/s, le C- 3 pour 44736 ou 34368 Kb/s, le C-12 pour 2048 Kb/s, le C-11 pour 1544 Kb/s.

Un conteneur est dimensionné pour assurer un des débits définis par le CCITT, et qui sont regroupés dans le tableau suivant:

Affluent (Mb/s)	Conteneur
1.5	C-11
2	C-12
6	C-2
34	C-3
45	C-3
140	C-4

Tableau 3.6: La correspondance affluent –conteneur.

❖ Le conteneur virtuel VC-n:

Le conteneur virtuel VC-n est obtenu à partir de conteneur en lui ajoutant un sur débit de conduit POH (Path Over Head) utilisé pour la gestion du conduit. C'est le conteneur virtuel VC qui est l'entité gérée par le réseau SDH. L'ensemble constitue ce qu'on appelle un conteneur virtuel VC (Virtual Container).

$$VC=C+POH$$

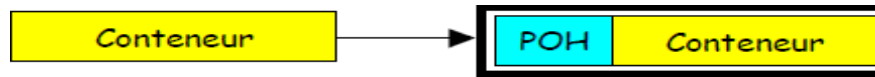


Figure 3.7:Conteneur virtuel.

Les conteneurs virtuels VC sont les éléments de base transportés par le réseau SDH, ils seront multiplexés pour obtenir des blocs plus grands et ainsi de proche en proches jusqu'à l'obtention d'une trame de base STM-1 constituée 2430 octets.

❖ L'unité tributaire(TUn):

L'unité d'affluent TUn (Tributary Unit) est composée de VC- n et d'un pointeur PTR associé. Pour pouvoir localiser un VC dans une trame SDH sans que celui-ci ne soit placé toujours à la même position, on utilise un pointeur qui indique l'adresse relative du VC par rapport au début de la trame. Ce pointeur est associé au processus de justification du VC dans la trame de transport.

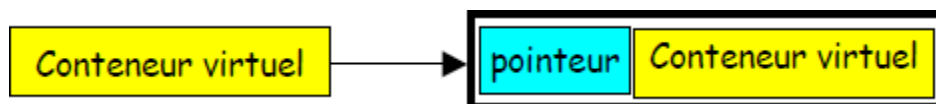


Figure 3.8: Tributary Unit TU.

❖ Le groupe d'unité d'affluent «TUG-n»:

Le Groupe d'Unités tributaires TUG (Tributary Unit Group) représente une structure virtuelle de la trame résultant dans le multiplexage des unités tributaires et non pas une nouvelle entité physique. Il constitue un regroupement des TU dans un espace réservé d'une entité supérieure (TUG supérieur ou VC-4).

On peut considérer que le TUG définit des règles de rangement des TU dans cette entête supérieure, et à travers elle, dans la trame de transport, on peut ainsi avoir:

- ✓ Le TUG 2 regroupant 3 TU12 ou 1TU2.
- ✓ Le TUG 3 regroupant 7 TU 2 ou 1TU3.

❖ Unité administrative «AU-n»: L'unité administrative (Administrative Unit), AU4, est

composée du VC4 et du pointeur PTR associé. La valeur de ce pointeur indique l'emplacement de début du VC-4 dans la trame.

❖ **Le groupe d'Unités Administratives:**

Le groupe d'Unités Administratives n'est pas une nouvelle entité physique, mais seulement une structure virtuelle de la trame STM- n. L'AUG correspond à la place que doit occuper AU-4 dans la trame de transport.

Les trames de transport STM- n (Synchro nous Transport Module) sont obtenus en multiplexant n AUG (et non n STM1) et en rajoutant un sur débit dit en-tête de section **SOH** (Section Over Head).

- ✓ La trame de Base STM-1 (155.520 Mbits/s) contient 1 AUG et sonSOH.
- ✓ La trame STM-4 (622.080 Mb/s) contient 4 AUG et sonSOH.
- ✓ La trame STM-16 (2488.320 Mb/s) contient 16 AUG et sonSOH.

3-6-3) Structure de multiplexage SDH:

Il s'agit de recevoir et de grouper des flux de données fournis par des affluents pour les transporter la figure suivante (arbre de multiplexage SDH) résume toutes les étapes de multiplexage SDH:

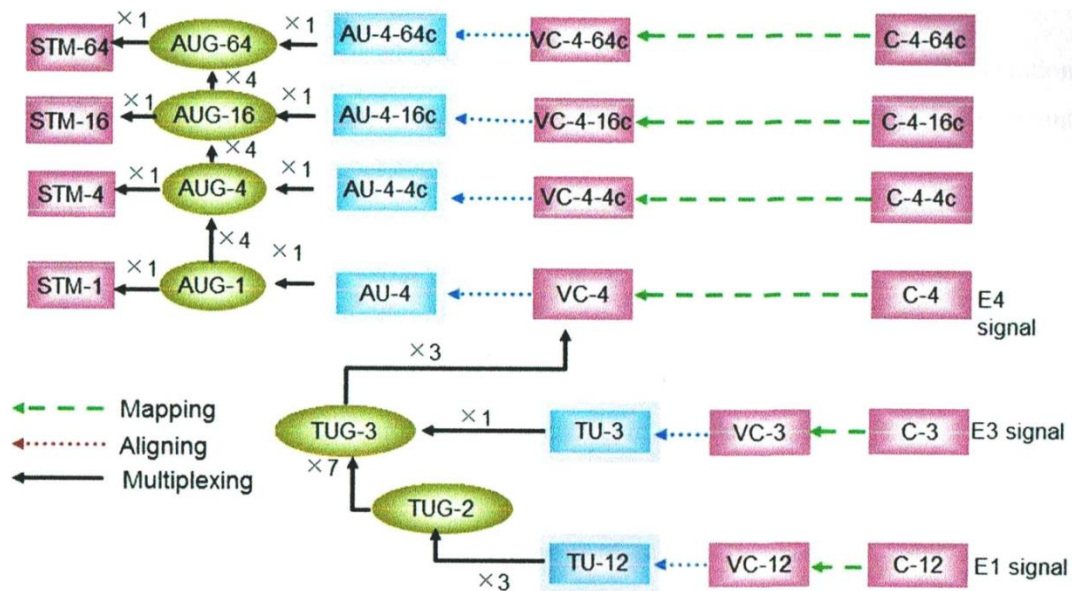


Figure 3.9: Structure de multiplexage SDH.

- **Projection (Mapping) :** Un processus a employé quand des tributaires sont adaptés dans VCs en ajoutant les bits de justification et l'information de POH.
- **Alignement (Aligning) :** Ce processus a lieu quand un indicateur est inclus dans une unité tributaire (TU) ou une unité administrative (AU), pour permettre au 1er bit du VC d'être localisé.

- **Multiplexage (Multiplexing)** : Ce processus est employé quand des signaux multiples d'ordre réduit du trajet sont adaptés dans un signal d'ordre élevé du trajet, ou quand des signaux d'ordre élevé du trajet sont adaptés dans une section multiplex.

2-7) Le réseau SDH:

a- Les équipements mis en œuvre dans un réseau SDH:

Le réseau de transmission SDH est composé d'un ensemble d'éléments réseau (NE) connectés via des câbles à fibre optique. Ces équipements assurent les différentes tâches attribuées à un réseau SDH comme extraction/insertion, brassage, régénération. [7]

- **Les multiplexeurs d'accès:** permettant le multiplexage et le démultiplexage de plusieurs affluents plésiochrones et/ou synchrones.
- **Les multiplexeurs à insertion/extraction (ADM, Add Drop Mux):** Assurent le transfert des données d'Est en Ouest ($E \leftrightarrow W$) tout en autorisant l'extraction et/ou l'insertion de sous-débit.
- **Les brasseurs numériques (DXC, Digital Connect)** modifient l'affectation des flux d'information entre un affluent d'entrée et un affluent de sortie. Le croisement de flux est défini par l'opérateur, il est permanent.

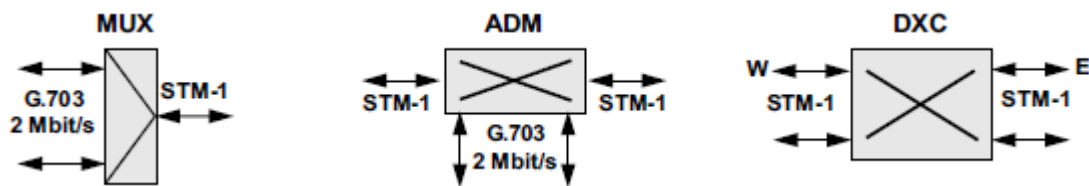


Figure 3.10: Les équipements mis en œuvre dans un réseau SDH. [7]

b- Les topologies du réseau SDH:

Un réseau SDH est un ensemble d'éléments réseau (ADM, ATM...etc) interconnectés entre eux par un câble à fibre optique. Une topologie réseau est une structure géométrique des éléments réseau et des lignes de transmission.

L'architecture en anneau est celle qui répond le mieux à ces considérations (L'efficacité, la fiabilité et la rentabilité d'un réseau dépendent largement de sa topologie), cependant, on constate dans la pratique un mélange de topologies, anneau, maillé et parfois on utilise d'autre topologies point à point ou en bus. [10]

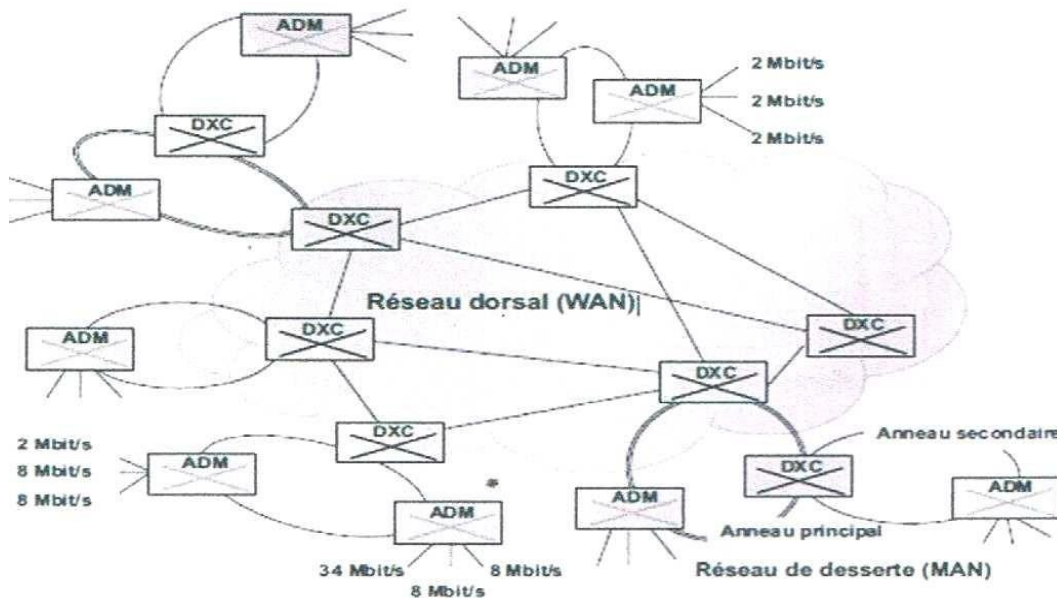


Figure 3.11: Infrastructure du réseau SDH.[10]

- ❖ **DXC:** Les brasseurs numériques (Digital Cross Connect).
- ❖ **ADM:** Les multiplexeurs insertion – extraction (Add -Drop).

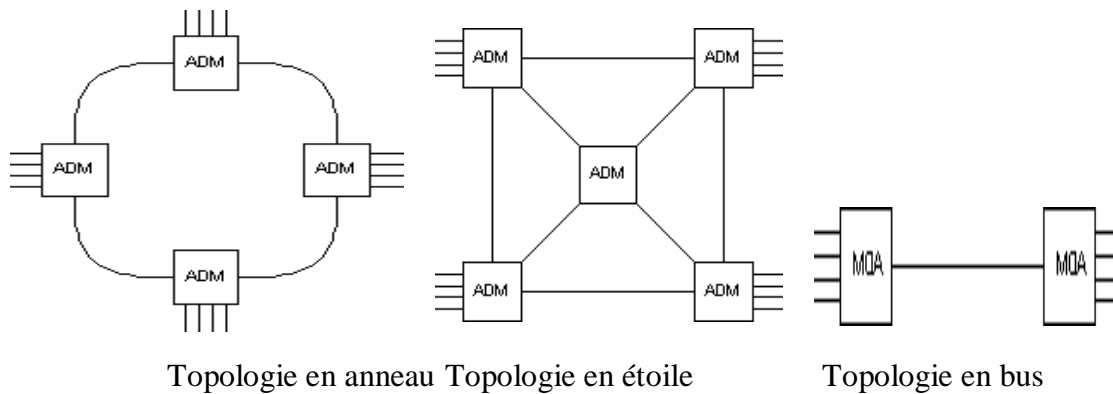


Figure 3.12: Les différentes Topologies.[10]

2-8) Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons vu que le réseau optique SDH constitue une réponse technique à une demande de réseau de transmission plus souple (accès directe aux affluents, sur débit d'exploitation, interconnexion des systèmes haut débit,...).La structure même de la trame qui, implicitement contient la notion de couche, a permis d'élaborer un modèle d'architecture de réseau

et une description d'équipement par bloc fonctionnel.

L'évolution de SDH permet aujourd'hui d'atteindre des records en termes de débit. Mais elle fait face à une réalité économique qui est l'apparition d'une nouvelle technologie permettant la mise en place de réseaux tout optique de type WDM.

La capacité des systèmes de transmission à multiplexage en longueur d'onde WDM à récemment augmenté d'une manière spéculaire, en raison notamment de la multiplication du nombre de canaux, toutefois pour atteindre des capacités encore plus grandes, il faudra augmenter le débit binaire par canal, rapprocher les canaux et élargir la bande passante optique exploitée.

Aujourd'hui, la technologie WDM n'a pas encore atteint ses limites. De plus, de nouvelles technologies en cours de développement vont permettre à priori de multiplier encore plus les capacités des systèmes optiques.

Simulation des transmissions sur fibre optique

4-1) 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. Pour cela, deux solutions sont possibles :

- ✓ Déployer directement des systèmes d'une nouvelle génération dont la capacité maximale est significativement supérieure à la demande du moment. Ainsi ils pourront servir pendant toute leur durée de vie et absorber l'augmentation de la demande en capacité sans entrer en saturation. Mais cela implique aussi qu'ils seront utilisés largement en sous-capacité pendant une certaine période, ce qui peut être contraignant en termes de retour sur investissement.
- ✓ Utiliser tels quels les systèmes déployés opérationnels aujourd'hui, et à modifier uniquement leurs émetteurs et leurs récepteurs pour leur permettre d'améliorer leurs performances dans la mesure des possibilités offertes. Et donc le coût de la mise à niveau du système s'en trouve drastiquement amoindri, même si le gain en performance peut être limité.

Notre objectif dans ce chapitre consiste à cerner et étudier les limitations inhérentes en termes de distance de transmission –dues aux effets linéaires – d'une liaison de transmission numérique par fibre optique à un débit égal à 40 Gb/s à l'aide du logiciel de simulation OPTISYSTEM Sachant que les phénomènes de dispersion des fibres optiques ne sont pas faciles à mettre en évidence expérimentalement et qu'en revanche, l'origine et les conséquences de ces phénomènes peuvent être décrites par des outils de simulations sur ordinateur.

4-2) Présentation du logiciel Optisystem

OptiSystem est un outil interactif développé par la société canadienne Optiwave SystemsInc qui permet aux chercheurs et aux ingénieurs de simuler, modéliser, analyser et concevoir tout module de système optique allant du dispositif le plus élémentaire au système complet de communication décrit sous la forme de schéma de blocs. C'est un environnement interactif qui allie donc des outils numériques à des fonctionnalités graphiques et une interface utilisateur [29].

La démarche à suivre se décompose en deux étapes [30]

Construire le schéma bloc.

Analyser les schémas.

Interface de l'OptiSystem

L'interface OptiSystem contient une fenêtre principale réparti en plusieurs parties

[30]:

Bibliothèque.

Éditeur du lay-out.

Projet encours.

La bibliothèque

La bibliothèque est une base de donnée qui contient tout type de modèles qui permettent de réaliser les différents schémas blocs, comme les entrées, régénérateurs, codeurs, modulateur, filtres,...etc. [31].

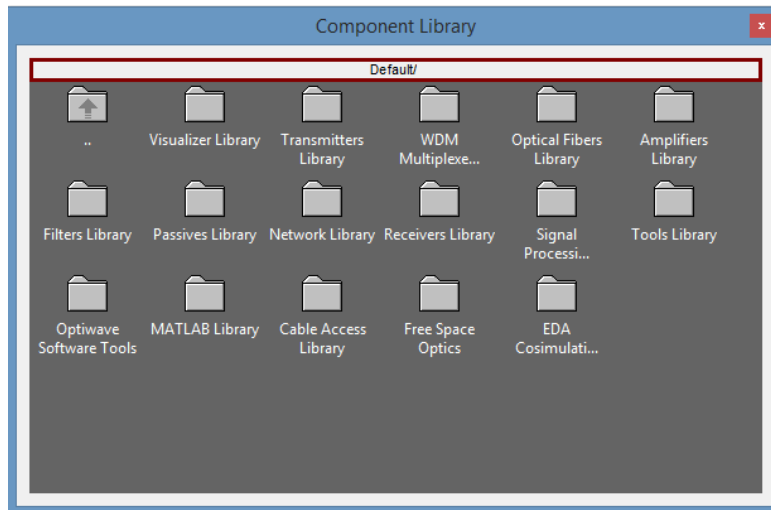


Figure 4-1 : La bibliothèque de logiciel optisystem.

Éditeur du lay-out

L'éditeur de lay-out et la fenêtre qui permet de concevoir des schémas bloc avec des déferents composants de la bibliothèque où on peut les configurer en modifiant ces paramètres.

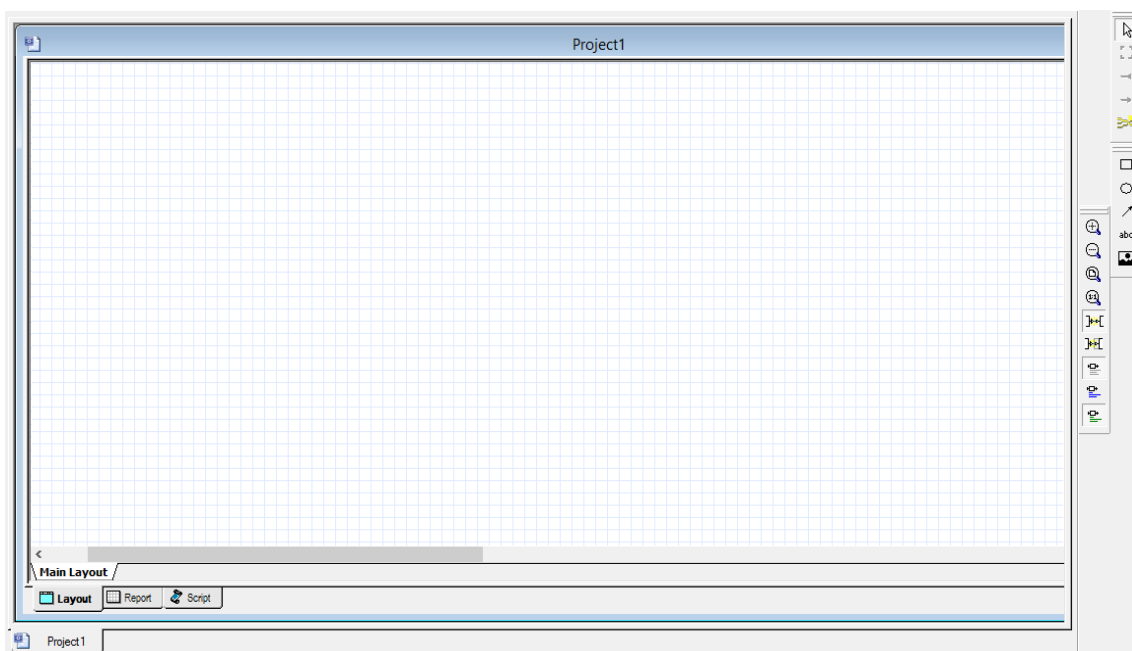


Figure 4-2 : Éditeur du lay-out.

Paramètres et caractéristiques des composants de la bibliothèque

Pour insérer un composant par exemple la fibre optique de la bibliothèque OptiSystem, il suffit d'accéder au bloc Default, on choisit le fichier qui contient tous les différents types de fibre optique (Optical fibres Library), puis on clique sur le composant (optical fiber) et on le glisse vers la fenêtre d'éditeur du lay-out.

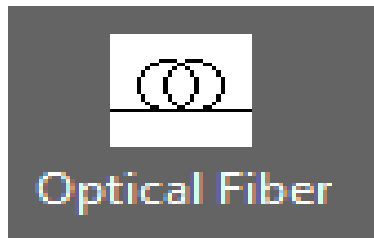


Figure 4-3 : Le composant fibre optique de la bibliothèque.

Par deux clics sur ce composant utilisé, on obtient une fenêtre qui contient tous ces caractéristiques (la figure 4-4), comme on peut changer ces paramètres.

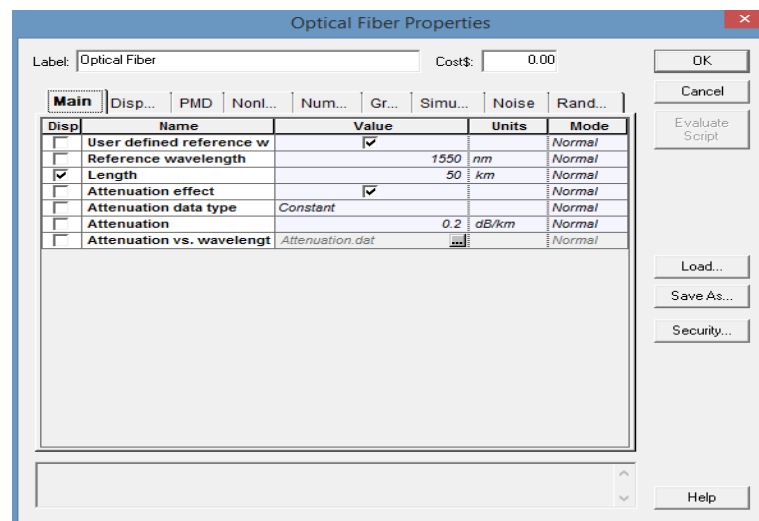


Figure 4-4 : Interface de définition de la fibre optique.

4-2-1) Applications d'Optisystem

Parmi les diverses applications d'Optisystem nous allons citer les plus utilisées :

- ❖ La conception du système de communication optique du composant au niveau de la couche physique.
- ❖ Le calcul du taux d'erreur binaire (BER) et le calcul du bilan de liaison.
- ❖ La conception des réseaux TDM/WDM et optiques passifs(PON).
- ❖ L'espace libre pour les systèmes optique(OSA).

- ❖ La conception d'anneau SONET/SDH.
- ❖ La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur.

4-2-2) Principales caractéristiques du logiciel Optisystem

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- Les composants virtuels de la Bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.
- La bibliothèque des composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurés à partir de périphériques réels, il s'intègre aux équipements de test et de mesurer des différents fournisseurs (figure4-5).
- Les outils de visualisation avancée produisent le SAOS Spectral, le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation, la constellation schémas et beaucoup plus.
- Il est possible de joindre un nombre arbitraire des visualiser sur le moniteur au même port.
- l'état de l'art et le calcul de flux de données.

Le calcul planificateur contrôle la simulation en déterminant l'ordre d'exécution des modules composants selon les données sélectionnées

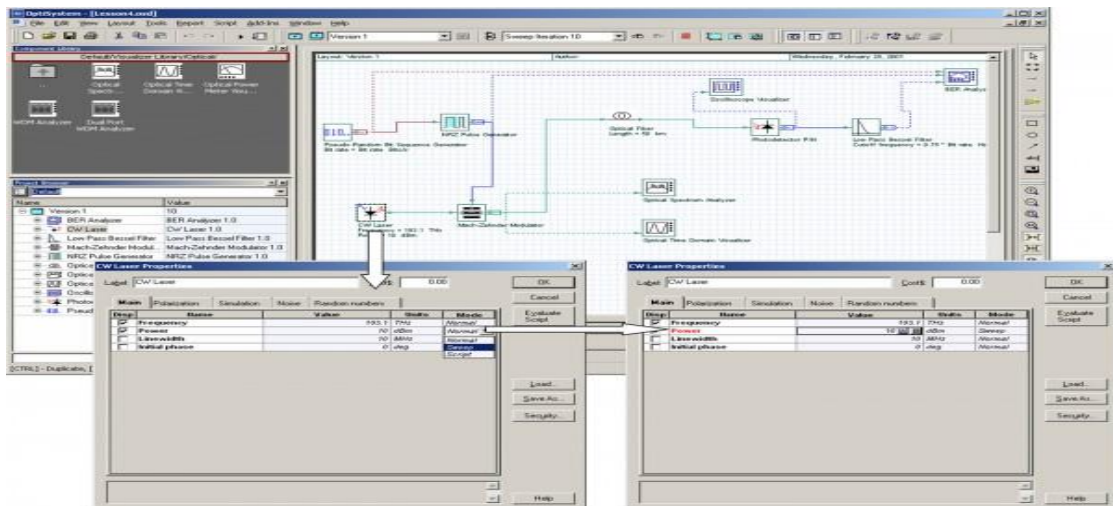


Figure 4-5: Modification composant du paramètre

- Plusieurs mises en page
- ✓ Création de nombreux dessins en utilisant le même fichier de projet, qui vous permet de créer et de modifier vos dessins rapidement et efficacement

4-3) Critères de qualité d'une transmission

Au vu de toutes les dégradations que peut subir le signal lors de son transport via la fibre optique, il s'est avéré nécessaire d'établir des critères pour juger de la qualité d'une

transmission. En pratique, ces critères sont évalués après détection du signal et sont surtout utilisés en laboratoire pour tester les performances de nouvelles transmissions : impact de nouveaux formats, insertion de fonctions de traitement du signal.

4-3-1) Diagramme de l'œil

La façon la plus « visuelle » de juger la qualité d'un signal est d'observer le diagramme de l'œil qui représente la superposition synchrone de tous les symboles binaires de la séquence transmise. Ce diagramme dépend du type de codage utilisé comme le montre la figure 4-6 :

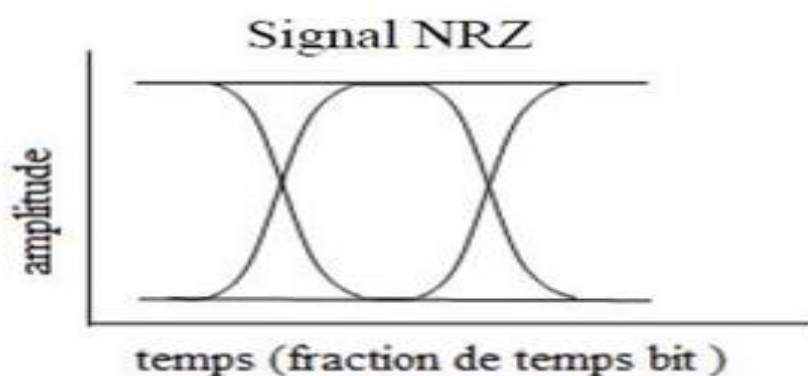


Figure 4-6: Diagrammes de l'œil d'un signal codé NRZ.

Cette courbe permet de visualiser, dans le domaine électrique après détection à l'aide d'une photodiode, la qualité du signal en termes :

- Interférences entre symboles qui sont la conséquence principale de l'élargissement temporel des impulsions du signal due à la dispersion chromatique ou à la SPM.
- Bruit d'amplitude qui résulte de l'accumulation du bruit d'émission spontanée amplifiée sur le signal tout au long de son parcours dans la liaison.
- Gigue temporelle provoqué par la dispersion de mode de polarisation mais également du couplage entre les impulsions et le bruit d'émission spontanée amplifiée.

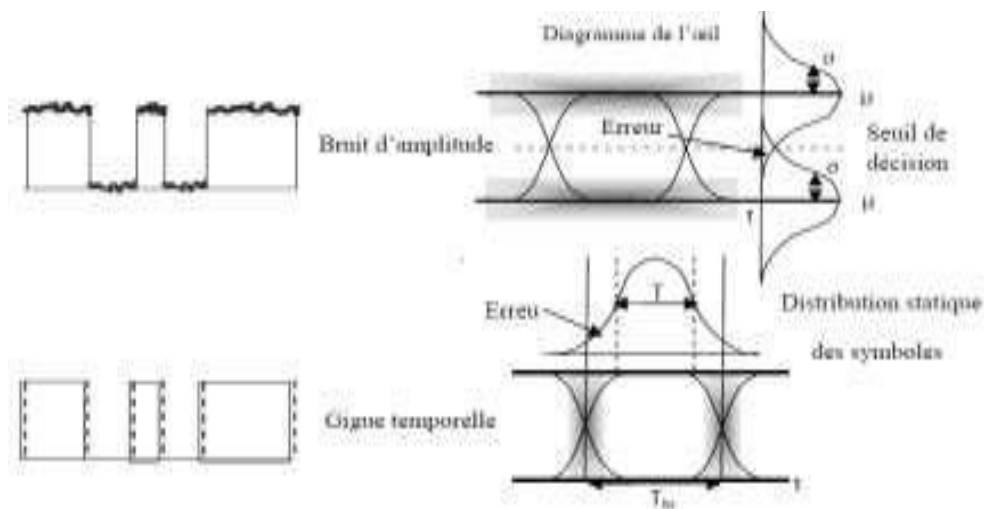


Figure 4-7: Présentation des effets du bruit d'amplitude et de la gigue temporelle sur une séquence et le diagramme de l'œil correspondant.

Ses expériences ont montré que plus le bruit d'amplitude ou la gigue temporelle sont élevés, plus les « bords » du diagramme de l'œil « s'épaississent » et plus la qualité du signal transmis est mauvaise.

D'un point de vue plus quantitatif, on peut définir deux paramètres mesurables à partir du diagramme de l'œil.

4-3-2) Le facteur de qualité en amplitude ou facteur Q

Le facteur Q, ou facteur de qualité, est un critère de qualité d'un signal optique. Il est obtenu à partir des statistiques de bruit (moyennes et écarts-types) des niveaux

« 1 » et « 0 » du signal à détecter.

4-3-3) Le taux d'erreurs binaire (BER)

Si le Diagramme de l'œil est la façon la plus visuelle de qualité d'un signal numérique, alors le critère qui quantifie le mieux cette qualité de transmission est le Taux d'erreurs binaire (TEB, ou BER pour Bit Error Rate) qui représente la probabilité d'une prise de décision erronée sur un élément binaire.

4-4) Chaîne de transmission de base

Dans son synoptique le plus général et le plus simple possible, un système de télécommunications optique est donné par la chaîne de la figure 4-8 :

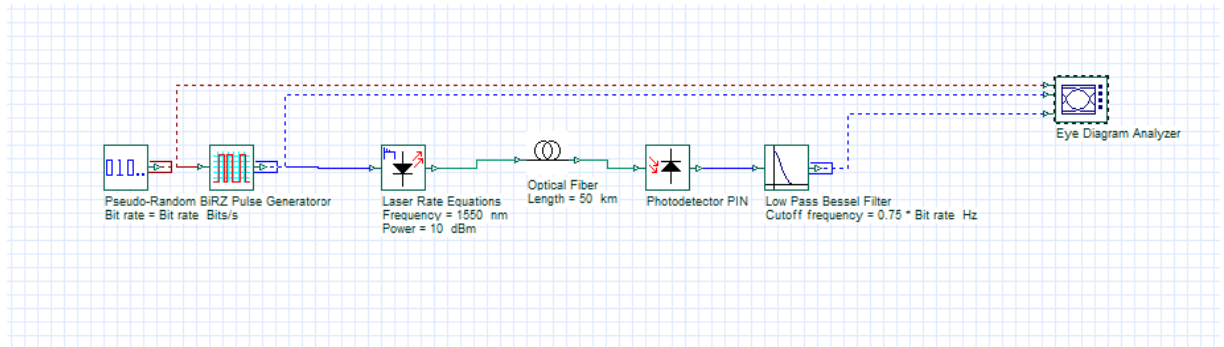


Figure 4-8 : Synoptique d'une chaîne de transmission optique

Les paragraphes suivants présentent les paramètres caractéristiques des composants utilisés de la bibliothèque OPTISYSTEM pour construire les différents blocs de la chaîne.

4-4-1) 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.

4-4-1-1) Les données électriques

Ce modèle permet de générer un courant d'entrée de laser, modélisé par une séquence binaire pseudo-aléatoire représentant l'information à transmettre. Le signal, formé de créneaux prend uniquement deux valeurs : I_{min} et I_{max} qui représentent le courant qui entre dans le laser quand l'information à transmettre est un 0 ou un 1 respectivement. Le choix de ces valeurs de courant dépend de la puissance voulue.

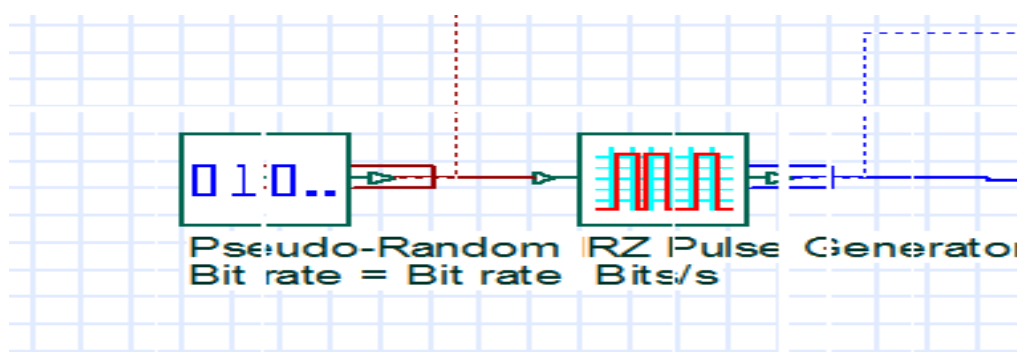


Figure 4-9 : Modèle de simulation du bloc émetteur.

4-4-1-2) Le laser

Ce modèle permet de simuler une diode laser DFB à semi-conducteur. Il est possible de le décrire par ses paramètres physiques internes (coefficient de gain différentiel, facteur de compression de gain, durée de vie des photons...), mais également par des grandeurs "système" ou mesurables, souvent plus accessibles, notamment dans les data sheet fournies par les constructeurs (courant de seuil, RIN, rendement...).

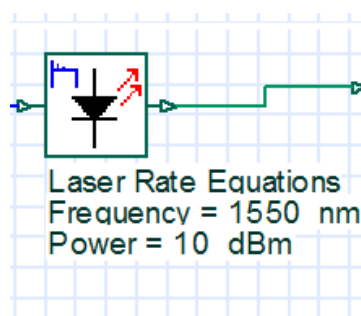


Figure 4-10 : Modèle de simulation du Laser

4-4-2) Bloc de transmission

La partie transmission de la chaîne s'agit d'un opérateur représentant une fibre optique monomode. Il permet d'introduire de façon optionnelle les effets non-linéaires Kerr et Raman.

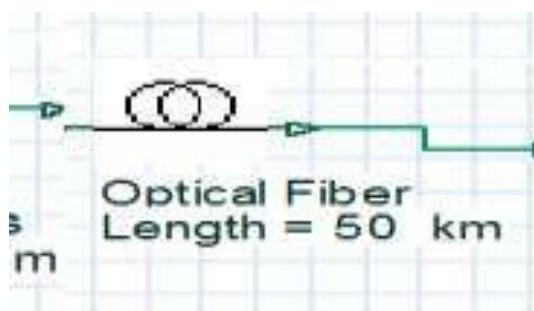


Figure 4-11 : Modèle de simulation de la fibre optique.

4-4-3) Bloc réception

Le modèle utilisé en réception est de type photodiode PIN

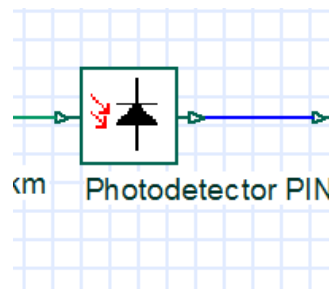


Figure 4-12: Modèle de simulation de la photodiode PIN

Paramètres de la photodiode	
Sensibilité (A/W)	0.8
Courant d'obscurité (nA)	5

Tableau 4-1 : Paramètres caractéristiques de la photodiode.

Le courant d'obscurité est le courant qui circule dans la jonction PN ou PIN en l'absence d'éclairement. Et le courant de bruit est calculé à partir du bruit quantique et du bruit d'obscurité.

4-5) La simulation de la chaîne de base

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

Une première simulation de cette chaîne de référence pour un débit de 2Gbits/s et une distance de 100 Km donne le résultat ci-dessous:

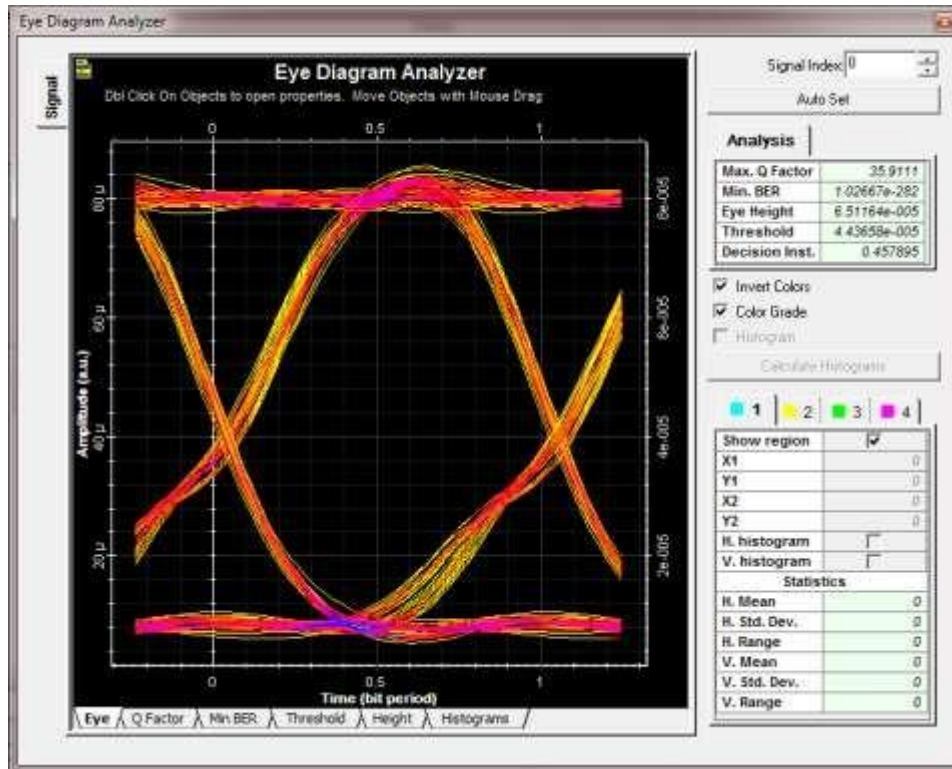


Figure 4-13 : Diagramme de l'œil du signal de sortie après filtrage.

4-5-1) La distance

Les résultats de simulation pour différentes longueurs de fibre et un débit de 2 Gbps sont représentés sur le tableau suivant :

Distance	Facteur Q
50 km	113.519
60 km	73.223
80 km	56.9901
100 km	35.9111
140 km	9.24215
160 km	3.97899

Tableau 4-2 : Distances et facteur de qualité.

4-5-2) Le débit

Les résultats d'une autre simulation pour différents débits se propageant sur une distance de 100 Km sont représentés sur les figures suivantes

➤ Débit 2.5Gbps

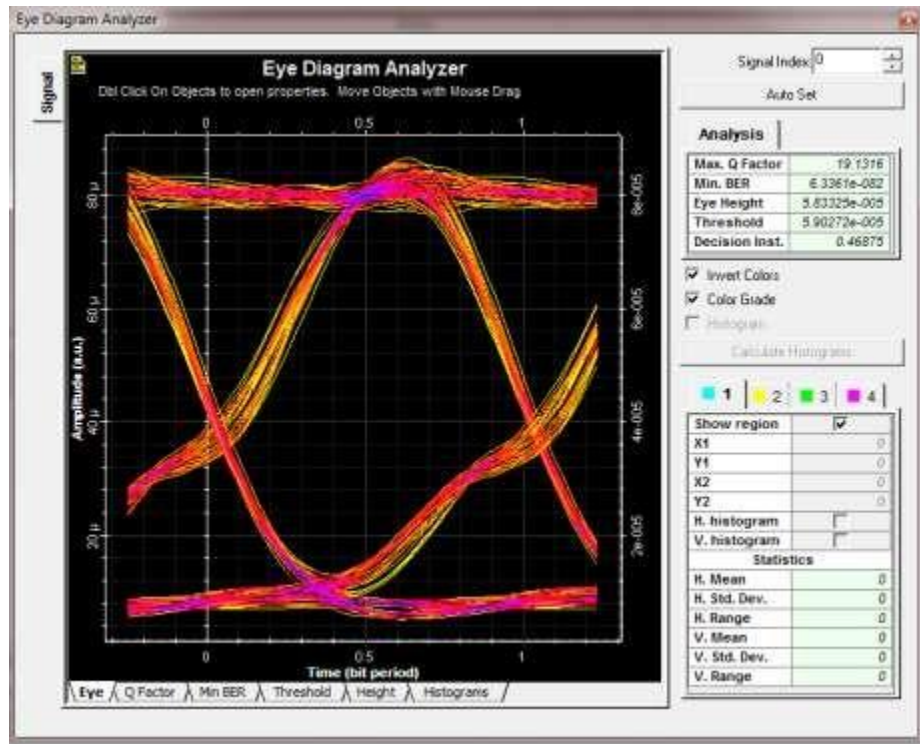


Figure 4-14 : Diagramme de l'œil du signal de sortie (D=2.5 Gbps) Q=19.1316

Débit 3Gbps

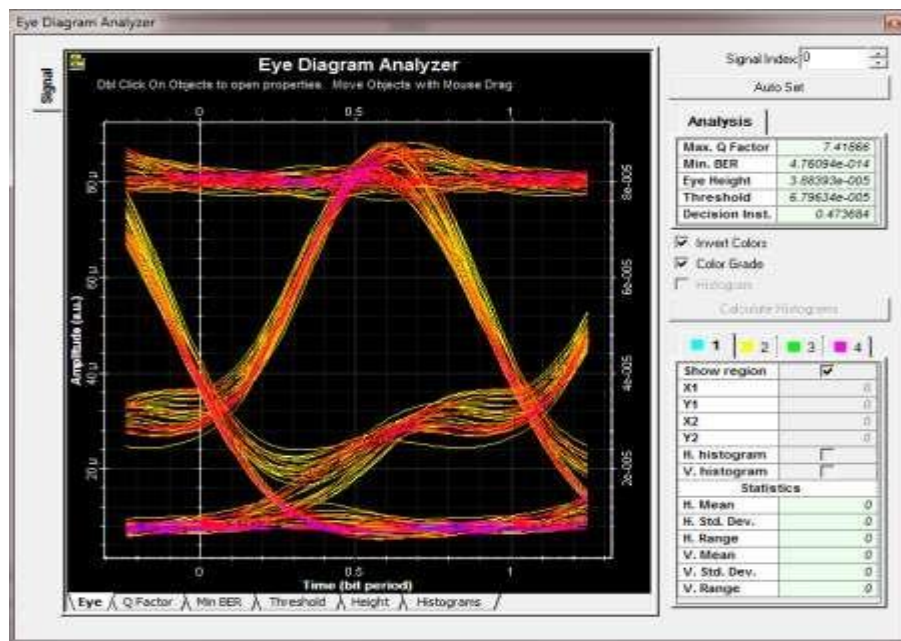


Figure 4-15 : Diagramme de l'œil du signal de sortie (D=3 Gbps) Q= 7.41866

➤ Débit 4Gbps

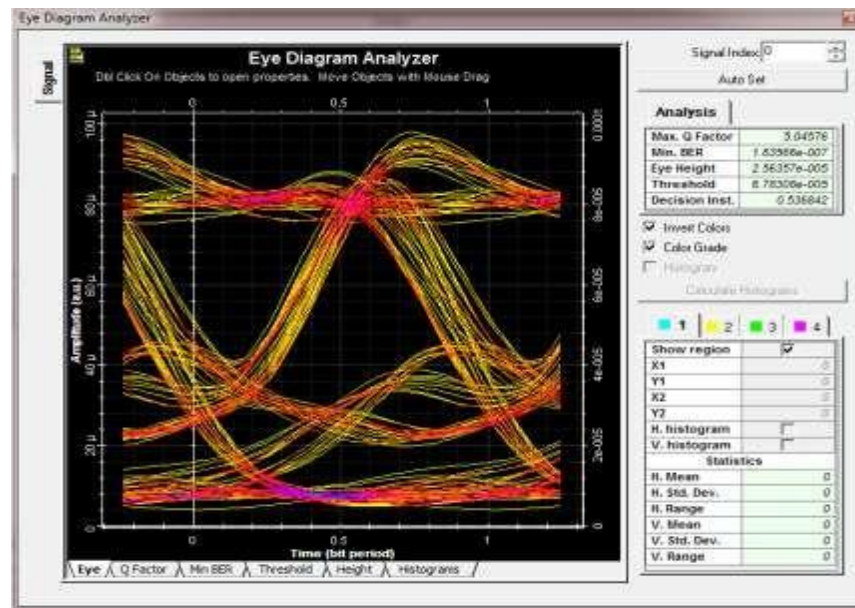


Figure 4-16 : Diagramme de l’œil du signal de sortie (D=4 Gbps) Q=5.04576

Comme c’était prévu la distance de propagation et le débit ont une relation inversement proportionnel avec la qualité de transmission. D’après les résultats trouvés nous remarquons que la qualité du signal reçu est d’autant plus faible que la distance (ou le débit) est plus grande. Ceci se traduit constaté par la diminution successive du facteur de qualité à la réception. Ces dégradations sont dues aux différents effets linéaires et non linéaires des 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 et un amplificateur d’atténuation dans le but d’améliorer la qualité de signal reçu.

4-5-3) Ajout de la fibre de compensation et de l’amplificateur à fibre dopée erbium

Par la suite nous avons introduit deux autres composants (DCF, EDFA)

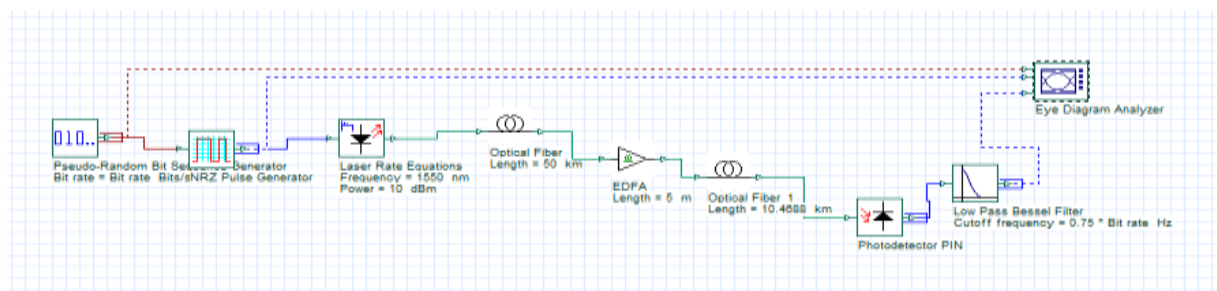


Figure 4-17 : Ajout d’une fibre de compensation et d’une fibre amplificatrice EDFA

La simulation de cette chaîne avec un débit de 4 Gbps et 100 Km nous a donné un facteur de qualité égale à 17.0962 comme le montre la figure suivante :

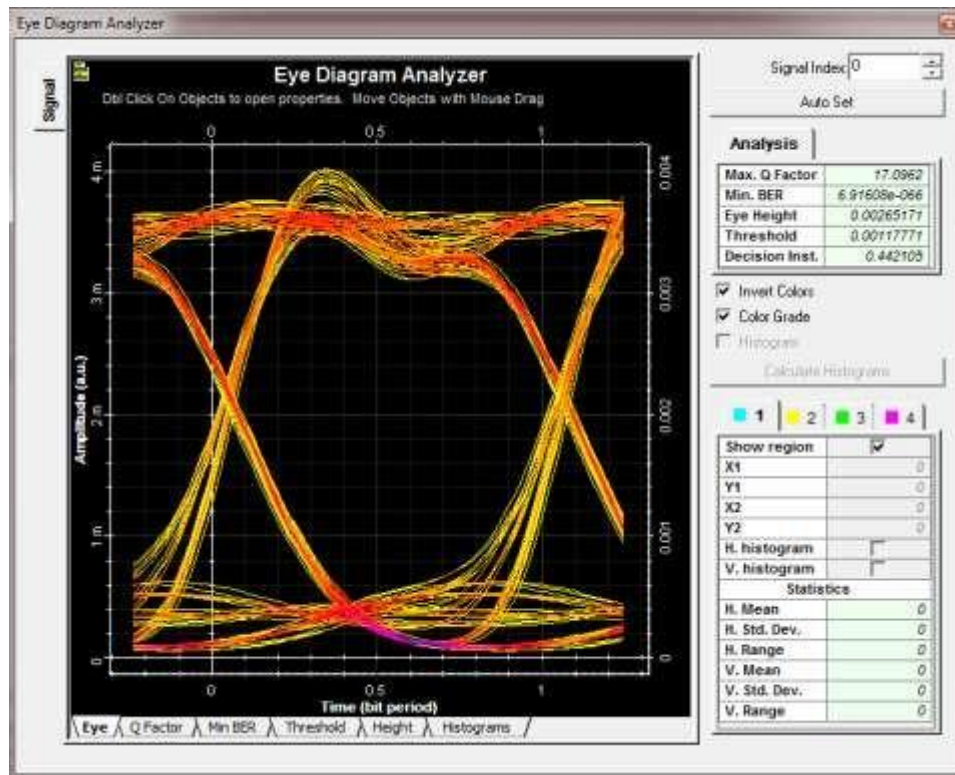


Figure 4-18 : Diagramme de l'œil du signal de sortie (D=4 Gbps), avec EDFA et DCF.

4-5-4) La modulation externe

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

Pour cela nous sommes obligés d'insérer des nouveaux composants aux niveaux des blocs d'émission (modulateur électro-absorbant) et de réception comme le montre le schéma bloc suivant:



Figure 4-19 : Modèle de simulation du modulateur externe.

La simulation de cette chaîne avec un débit de 4 Gbps et 100 Km nous a donné un facteur de qualité égale à 44.5542.

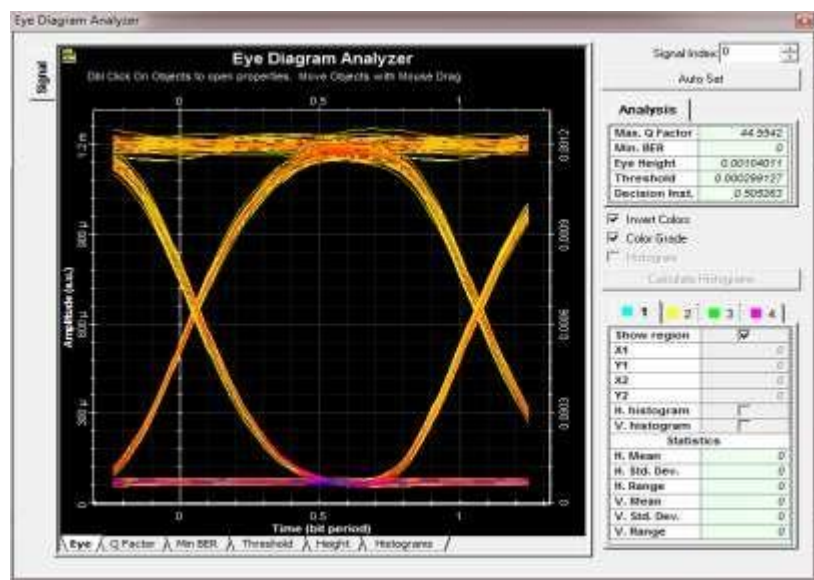


Figure 4-20 : Diagramme de l'œil du signal de sortie (D=4 Gbps), (modulation externe).

4-6) Vers le Haut débit

Les résultats de simulation de cette chaîne qui contient un modulateur externe (électro-absorbant) et une fibre de compensation de dispersion (DCF) et un amplificateur à fibre dopée erbium (EDFA) pour différents débits se propageant sur une distance de 100 Km sont représentés sur le tableau suivant :

Débit	Facteur Q	BER
4Gbps	44.5542	0
10 Gbps	22.5973	$1.93 \cdot 10^{-113}$
20 Gbps	11.4292	$1.23 \cdot 10^{-30}$
30 Gbps	10.8426	$5.40 \cdot 10^{-28}$
40 Gbps	9.43138	$1.79 \cdot 10^{-21}$

Tableau 4-3 : Débits et facteur de qualité. (Chaine de transmission avec EDFA, DCF et MEA).

Avec cette chaine qui contient un modulateur externe (électro-absorbant) et une fibre de compensation de dispersion (DCF) et un amplificateur a fibre dopée erbium (EDFA) nous avons pu atteindre un débit de 40 Gbps.

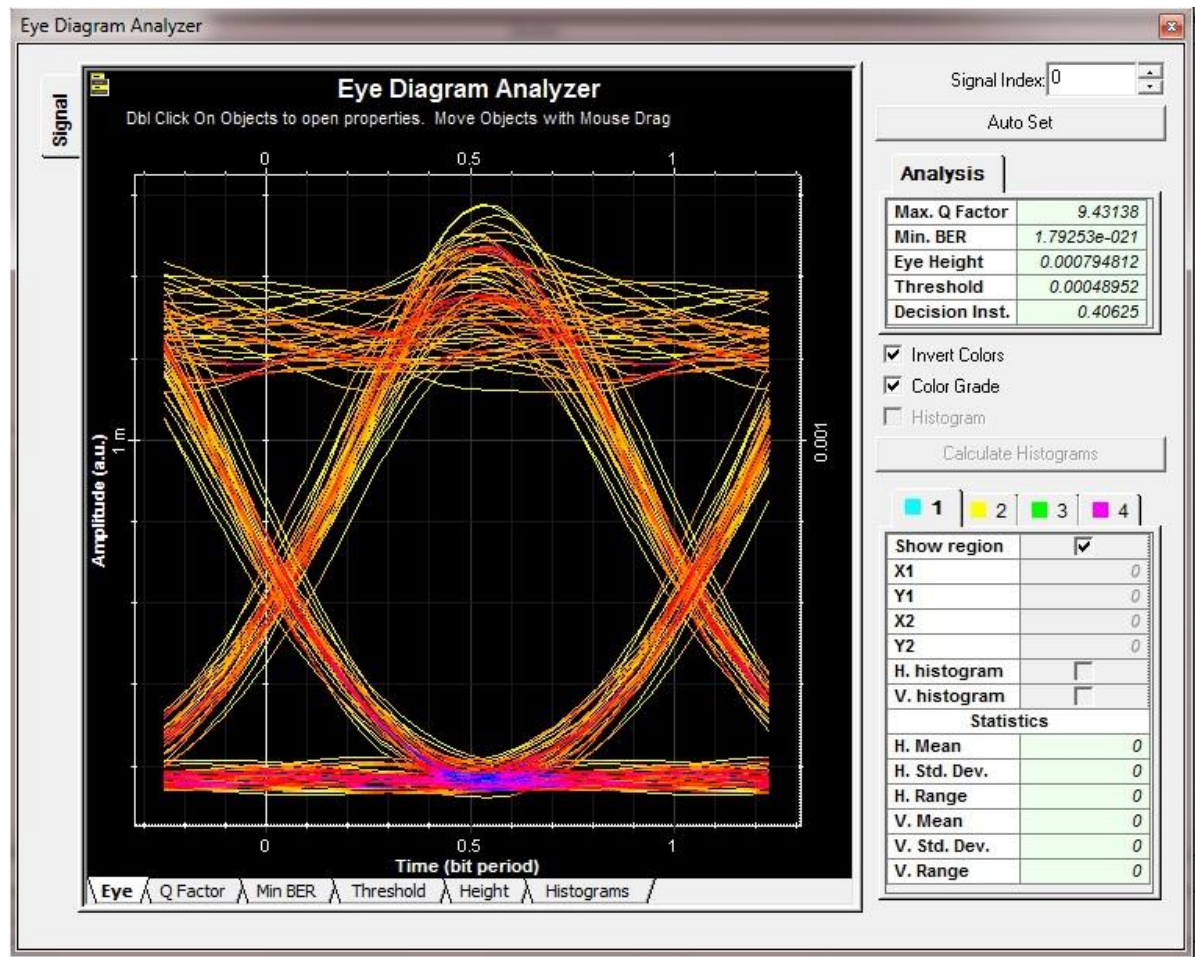


Figure 4-21 : Diagramme de l'œil du signal de sortie (D=40 Gbps).

4-7) Conclusion

Le but de ce chapitre était d'optimiser la chaîne de transmission 40 Gb/s sur fibre Optique. En utilisant le logiciel OPTISYSTEM qui permet de simplifier la conception et réduire le temps de simulation. D'après les résultats trouvés nous remarquons que la qualité du signal reçu est d'autant plus faible que la distance (ou le débit) est plus grande. Ceci se traduit constaté par la diminution successive du facteur de qualité à la réception.

CONCLUSION GENERALE

Le secteur de télécommunication a subi des évolutions ceci est en grande partie dû au développement des technologies de la télécommunication et au changement des habitudes du client. En effet, le secteur en question reste un perpétuel chantier qui essaie non seulement de satisfaire un besoin mais aussi de prévenir celui d'une clientèle potentielle croissante en nombre et diversifiée en termes de demandes de services, L'offre de ces services nécessite la planification ainsi que l'introduction de nouvelles technologies dans les réseaux de télécommunication et particulièrement dans le réseau d'accès. Par conséquent, Les compagnies de télécommunication ont entrepris de moderniser l'infrastructure réseau en augmentant la portion occupée par la fibre optique, c'est pourquoi il m'est apparu nécessaire d'entamer ce mémoire par des généralités concernant la fibre optique.

Le premier chapitre de ce mémoire a été consacré à une description d'une liaison par fibre optique avec tous ses éléments : émetteur, récepteur et canal de transmission. Pour l'émission nous avons étudié les diodes DEL et les diodes laser et les technique de modulation. Pour le canal de transmission, nous avons défini une fibre optique avec toutes ses caractéristiques. Enfin la réception, avec les photodiodes PIN et à avalanche. Pour le second chapitre, nous avons décrit une technique d'actualité, qui est le multiplexage en longueur d'onde, elle permet d'augmenter le débit d'une liaison. Il existe plusieurs sous-technique, différentes en espacement et en nombre de canaux, on peut les citer : WDM, DWDM, UDWDM et CWDM.

Dans le troisième chapitre nous avons vu que le réseau optique SDH constitue une réponse technique à une demande de réseau de transmission plus souple (accès directe aux affluents, sur débit d'exploitation, interconnexion des systèmes haut débit,...).La structure même de la trame qui, implicitement contient la notion de couche, a permis d'élaborer un modèle d'architecture de réseau et une description d'équipement par bloc fonctionnel.

Le but de quatrième chapitre était d'optimiser la chaîne de transmission 40 Gb/s sur fibre Optique. En utilisant le logiciel OPTISYSTEM qui permet de simplifier la conception et réduire le temps de simulation.

Pour conclure, il semble clair que le DWDM remodelera les réseaux de

communication, mais les architectures et protocoles de réseau actuels joueront leur rôle dans le futur cadre basé sur le DWDM. En raison de la simplicité de commutation et de la disponibilité de la bande passante via DWDM, SONET pourrait bien être le premier cadre pour un réseau optique complet. Bien que l'ATM ait perdu sa popularité en raison du manque de succès du RNIS-LB, il pourrait retrouver une nouvelle vie sur l'ATM sur DWDM pour les futurs réseaux de services intégrés.

Bibliographie

- [1] Pascal Nasom, fibre optique, Ed Dole magazine, 2010.
- [2] Didier Segura et Antoine Labaud, réseau optiques et routage optique, mémoire d'ingénierie, Sorbonne université ,23 mars 2007.
- [3] Colombier François et pugnoud Christophe, réseaux et routage optiques, mémoire M2 TNI-ASR, université Montpellier2 science et technique du Languedoc ,2004-2005.
- [4] Toffano Z, « Optoélectronique : Composants photoniques et fibres optiques », Ellipses: Paris, 2000.
- [5] ZOUINE. Y; 2005 – « Contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants».
- [6] MEUNIER. J - P; 2003 – « Télécoms Optique »: Composants à fibres systèmes de transmission. Ed.
- [7] Jean-Paul Gautier, les réseaux optiques, projet réseau académique parisien, société CADA ,1999.
- [8] Lecoy Pierre, communication sur la fibre optique, Ed.Lavoisier-hermès, 2014.
- [9] Ivan Kesteloot, Stephane Rzetelny et Eric Jullien, nouvelle technologie réseau SDH, mémoire d'ingénieur professeur, école EISTI, 2012-2013.
- [10] Bayer Gerard, les réseaux synchrones et entendus PDH et SDH, Ed. Hermès, 1997
- [11] Simo Kungne et Hervé Valere, étude de migration de la boucle mètre SDH vers une boucle métro IP, école nationale supérieur des postes et de télécommunication ,2011-2012.
- [12] Bensaad Billel, Benmoussa Sadok:' ETUDE ET SIMULATION D'UNE TRANSMISSION WDM'Université Saad Dahleb De Blida, 2011-2012
- [13] Huawei technologie CO.LTD, documentation interne : WDM principale ISSU E1.25, 2012.
- [14] '' DWDM Transmission System Principle and Testing'' HUAWEI.(Documentation interne)
- [15] Nabil BEN SALAH « Étude et Déploiement de la technologie de transmission NGWDM pour Maroc Telecom », mémoire fin d'étude, 2015, École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes, Maroc.
- [16] S. BENAMEUR, " La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable ", THESE EN COTUTELLE (UNIVERSITÉ DE LIMOGES et UNIVERSITE DE SIDI BEL-ABBES), 2015.
- [17] VivekAlwayn," Optical Network Design and Implementation ", ©Cisco, Vol.840, 17 Mars 2004, ISBN 1-58705-105-2.
- [18] Shaowen Song,' Le DWDM et les réseaux à intégration de l'avenir' IEEE Canadian Review- Summer, 1999.
- [19] FabiaRaharimanitra, " Contribution à l'étude des architectures bases sur le multiplexage en temps et en longueur d'onde dans le réseau d'accès, permettant la migration vers la nouvelle génération de PON (NG-PON) à 10 Gbit/s ", Thèse de

Bibliographie

- Doctorat, Université d'européenne de Bretagne (Télécom Bretagne), Le 13 janvier 2012
- [20] Charles Brackett (1996), « Foreword: Is There an Emerging Consensus on DWM Networking? » Journal of Lightwave Technology, vol. 14, no 6, juin 1996, p.936-941.
- [21] <http://www.thefoa.org/tech/dwdm.htm>
- [22] H.SINGH et H.SINGH, "Performance Analysis of Next Generation High Capacity Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing (UDWDM) Based on Inter-Satellite Optical Wireless Communication (OWC)", 10th International Conference on Recent Trends in Engineering Science and Management, Août 2017.
- [23] <http://itbundle.net/archives/2211>.
- [24] <http://www.pandacomdirekt.com/en/technologies/wdm/what-is-cwdm.html>.
- [25] F.PAYOUX, "Etude des réseaux d'accès optique exploitation le multiplexage longueurs d'onde", Thèse de Doctorat de l'ENST Bretagne, Août 2006.
- [26] <https://www.infradata.eurtechnologiescore-networkingcwdm-dwdm>.
- [27] <https://www.smartoptics.com/this-is-wdm/cwdm-dwdm-explained/>.
- [28] <https://www.fs.com/cwdm-cost-effective-alternative-to-expand-network-capacity-aid-63.html>.
- [29] ABOUDKHIL, A.OUZZANI et B.SOUDINI, "communication optique-bruit de photodetection".
- [30] I.HADJERESE et I.NOURA, "Étude et simulation de la technique CDMA appliqué aux transmissions optiques utilisant les réseaux de Bragg", Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master en télécommunication, Université Djilali Bounaama- Khemis Miliana, Année 2016.
- [31] H.HAMMACHE, "Étude et simulation des pertes dans une liaison fibre optique avec application", Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master en télécommunication, Université A.Mira de Bejaïa, Année 2016.

Bibliographie
