

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

Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou
Faculté du Génie Electrique et Informatique
Département d'Electronique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur
d'Etat en Electronique

Option : communication.

Thème :

**Etude d'une liaison par fibre
optique à haut débit
« Technologie WDM »**

Promoteur :

M. BENNAMANE K.

Co - Promoteur:

Etudié par :

M. GUETTAL Idir.

M. IFRIHADDADENE Adel.

M. IZRI K.

Remerciements

Nous remercions notre promoteur Mr BENMAMANE K. notre co-promoteur Mr IZRI K pour leur disponibilité et leurs orientations durant l'élaboration de ce travail.

Nous remercions toute l'équipe travaillant au centre CA2 d'ALGERIE Télécom de la wilaya de TIZI-OUZOU.

Nos remerciements iront également au président et aux membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre modeste travail.

Nos vifs remerciements vont également aux enseignants qui nous suivi durant tout le cycle (DEUA et ingéniorat), en particulier ceux du département d'électronique qui ont contribué à notre formation.

L'aboutissement de ce travail doit beaucoup à nos familles et à nos amis qui nous ont soutenus durant ces longs mois de labeur.

Merci à tous.

Nous dédions ce modeste travail :

*A la mémoire de la petite FUMDA.
A tous ceux qui nous sont chers.*

Adel et Idir.

Sommaire

Introduction générale.....	01
I. Introduction aux réseaux et liaisons optiques.	
Introduction.....	03
I.1.Les réseaux optiques.....	03
I.1.1 Le réseau étendu ou longue distance (WAN, Wide Area Network).....	04
I.1.2 Le réseau métropolitain (MAN, Metropolitan Area Network).....	05
I.1.3 Le réseau local (LAN, Local Area Network).....	06
I.2. Description d'une liaison optique.....	06
I.2.1. Le module d'émission.....	07
I.2.1.1 Le laser.....	07
I.2.1.2 La modulation des données.....	10
I.2.2 la fibre optique.....	12
I.2.2.1 les différents types de fibres.....	14
I.2.2.2 L'atténuation.....	15
I.2.2.3 La dispersion.....	17
I.2.2.4 La dispersion modale de polarisation.....	18
I.2.2.5 Les effets non-linéaires.....	19
I.2.3 Le module de réception.....	20
I.2.3.1 Le principe de la photodétection.....	21
I.2.3.2 Caractéristiques d'un photodétecteur.....	22
I.2.3.3 Les photodiodes PIN.....	23
I.2.3.4 Les photodiodes à avalanche.....	24

I.2.3.5 l'amplificateur électrique	26
I.2.3.7 le filtrage	26
I.2.3.8 le circuit de décision.....	26
I.2.4 Eléments du bloc de transmission.....	26
I.2.4.1 Les Amplificateurs optiques.....	27
I.2.4.2 Les isolateurs.....	30
I.2.4.3 Les coupleurs.....	30
I.2.4.4 Les filtres optiques.....	30
I.2.4.5 Les multiplexeurs et démultiplexeurs optiques.....	31
Conclusion.....	31

II. Technique du codage et de transmission sur fibre optique.

Introduction.....	32
II.1. Numérisation des signaux électriques.....	32
II.1.1. Principe de la modulation MIC.....	32
II.2. Codage binaire du signal.....	32
II.2.1. Quelques exemples du code en lignes.....	35
II.2.2. Représentation des signaux codés.....	35
II.2.2.1. Codage NRZ.....	35
II.2.2.2. Codage HDBn.....	36
II.2.2.3. Codage NRZI.....	36
II.2.2.4. Codage Manchester.....	38
II.3. Les modulations numériques de base.....	38
II.3.1. Modulation de fréquence ou FSK.....	39
II.3.2. Modulation de phase ou PSK.....	39
II.3.3. Modulation d'amplitude ou ASK.....	40

II.3.4.Modulation QAM.....	40
II.4.Types de transmission.....	42
II.4.1.Transmission asynchrone.....	42
II.4.2.Transmission synchrone.....	42
II.5.Hiérarchie numérique.....	43
II.5.1.La hiérarchie numérique plésiochrone(PDH).....	43
II.5.2.La hiérarchie numérique synchrone(SDH).....	45
II.5.2.1. La trame de base.....	45
II.5.2.2. Principe de multiplexa.....	47
II.6.Les techniques de multiplexage.....	48
II.6.1. Multiplexage temporel TDM.....	48
II.6.2. Multiplexage fréquentiel FDM.....	49
II.6.3. Multiplexage WDM/DWDM.....	50
Conclusion.....	51

III. La technologie WDM

Introduction.....	52
III.1.Principe de base.....	54
III.2.Développement des capacités.....	55
III. 3.Composants pour WDM.....	56
III.3.1. Sources optiques pour WDM.....	57
III.3.2.Les convertisseurs en longueurs d'ondes.....	57
III.3. 3.Les multiplexeurs /démultiplexeurs optiques.....	58
III.3.3.1.Multiplexage à filtre optique.....	59
III.3.3.2.Multiplexage à coupleur sélectif.....	60
III.3.3.3. Multiplexage/Démultiplexage à réseau de réfraction.....	61
III.3.3.4. Multiplexage/Démultiplexage à réseau de Bragg.....	61

III.3. 4.L’impact du design des fibres optiques dans le cadre de WDM.....	62
III.3. 4.1.Les paramètres cruciaux à gérer.....	62
III.3. 4.1.1.La dispersion chromatique.....	62
III.3. 4.1.2.La dispersion modale de polarisation (PMD).....	64
III.3. 4.1.3.Les effets non-linéaires.....	64
III.3. 4.2.La fibre optique idéale pour les hauts débits.....	69
III.3. 4.3.Les diverses familles de fibres optiques.....	70
III.3.5.Multiplexeur à insertion extraction optique.....	72
III.3.6.Les brasseurs optiques OXC.....	73
III.4.Les réseaux WDM.....	73
III.4.1.Réseaux fixes.....	74
III.4.2.Réseaux adressés en longueurs d’ondes.....	75
Conclusion.....	75

IV. Application

Introduction.....	76
IV. Les différentes étapes de la mise en service	76
IV.1.Pose de la fibre.....	76
IV.1.1. La pose en extérieur.....	77
IV.1.1.1.Pose en fouille ouverte.....	77
IV.1.1.2.Pose en fourreaux.....	78
IV.1.1.3.Pose en caniveaux de surface.....	78
IV.1.2.Le tirage en intérieur.....	79
IV.1.3.Le couplage optique.....	80
IV.2. Configuration SDH service.....	81
IV.2.1.Cahiers des charges.....	81
IV.2.2.Planification.....	82

IV.2.2.1.Réseau SDH.....	82
IV.2.2.2.Adresse IP.....	83
IV.2.2.3.Information sur les cartes.....	84
IV.2.2.4.Connexion des fibres optiques.....	84
IV.2.2.5.Allocation des timeslot.....	85
IV.2.2.6.Traçage de l'horloge.....	85
IV.2.3.Préparation des différentes liaisons.....	86
IV.2.4.Configuration d'un OptiX155/622(metro000)huawei.....	87
IV.2.4.1.Lancement de T 2000.....	87
IV.2.4.2.Recherche de l'équipement.....	87
IV.2.4.3.Configuration de l'équipement.....	88
IV.2.4.4.Configuration des différentes cartes.....	90
IV.2.4.5. Création des différentes liaisons entre les NEs.....	91
IV.2.4.6. Création d'une topologie sous-réseau.....	92
IV.2.4.7. Création d'un sous-réseau avec protection.....	93
IV.2.4.8. Création d'une liaison point-à-point sans protection (NE1-NE4).....	93
IV.2.4.9. Création du service SDH.....	93
IV.2.4.10.Configuration de la ligne service.....	94
IV. 3.Teste de la liaison optique.....	95
IV.3.1.Appareil Emission/Réception.....	95
IV.3.2.le réflectomètre	96
IV.3.3.liaison électrique.....	97
Conclusion.....	97
Conclusion générale.....	98

Annexe.

Bibliographie.

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Glossaire.

INTRODUCTION GENERALE

Il n'y a pas si longtemps, lorsque les systèmes numériques les plus rapides transmettaient l'information à quelques Mbits/s, le câble coaxial remplit parfaitement son rôle de support de transmission. Mais avec l'apparition des nouveaux services de communications, un besoin d'un débit de transmission d'informations plus élevé est apparu, et une alternative au câble coaxial était à trouver : perte très élevées, courtes distances de propagation, performances limitées. La fibre optique remplit très bien ce rôle de support de transmission le mieux adapté à la demande en bande passante. Son utilisation est désormais courante dans les réseaux de télécommunication.

Aujourd'hui, avec l'avènement du réseau de communication Internet, le marché des télécommunications a connu un essor sans précédent. En effet, la popularité et la facilité d'accès à ce réseau ont impliqué une demande en constante croissance de bande passante. Deux importantes solutions à base de fibre optique ont alors généré une augmentation considérable des capacités de transmission des liaisons : ce sont d'une part les amplificateurs optiques, et d'autre part, un nouveau principe de multiplexage-démultiplexage en longueur d'onde nommé WDM (pour Wavelength Division Multiplexing). Ce dernier permet de transporter plusieurs signaux sur une seule fibre optique en leur affectant une longueur d'onde différente. Mais surtout, il présente l'avantage d'exploiter les fibres existantes sans modifier l'infrastructure physique. Dès lors, la course au record en termes de capacité fut lancée pour atteindre de nos jours la barrière du Térabit/s. Avec cette stupéfiante montée en débit, le signal est devenu de plus en plus sensible aux effets de la propagation, et par conséquent des facteurs considérés jusque là comme négligeables, vont devoir être contrôlés.

Avec sa principale percée dans la connexion point à point à grande bande passante, le multiplexage dense en longueur d'onde (DWDM) refaçonne le tableau des réseaux de communication, ce qui a incité ALGERIE TELECOM a adopté cette technologie dans le Backbone national de transmission à 80Gbit/s (8 canaux de 10Gbit/s).

Le but de notre travail consiste à étudier la technologie de multiplexage en longueur d'onde afin de mettre en lumière les enjeux de ces nouveaux systèmes.

Pour ce faire, nous avons réparti notre mémoire en quatre chapitres :

Le premier chapitre fait l'objet d'une introduction au monde des réseaux optiques et des généralités sur les composants présents dans une liaison optique.

Le deuxième chapitre porte sur les Techniques du codage et de transmission sur fibre optique.

Le cœur de notre travail est le troisième chapitre, dans lequel une étude de la technologie de multiplexage en longueur d'onde (WDM) et les composants utilisés est effectuée.

Le dernier chapitre sera consacré au déploiement du réseau et la mise en place d'une configuration SDH,

CHAPTRE I
INTRODUCTION AUX
RÉSEAUX ET LIAISONS
OPTIQUES

Introduction

L'apparition de la fibre optique a totalement révolutionné le monde des télécommunications. La conception de systèmes de transmission à très grande capacité est désormais possible. De plus, les échanges à travers ces systèmes sont de plus en plus nombreux et la demande de services de plus en plus élevée. Il en résulte un bouleversement des réseaux de télécommunications précédents et un besoin de mettre en place de nouvelles structures. Nous avons choisi dans ce premier chapitre d'apporter un bref descriptif des réseaux optiques et de présenter les composants constituant un système de transmission numérique sur fibre optique.

I-1 Les réseaux optiques [2] [8]

Dans un réseau, la chaîne de transmission d'un signal, depuis le point d'expédition jusqu'au point de destination, comporte trois maillons principaux :

- Les réseaux longues distances (ou les WAN, Wide Area Network). Ce sont les réseaux déployés à l'échelle d'un pays ou d'un continent et dont les nœuds sont de très grands centres urbains.
- Les réseaux métropolitains (Metropolitan Area Network = MAN) qui correspondent aux réseaux mis en œuvre dans une grande ville ou une agglomération et qui permettent de relier entre eux par exemple différents arrondissements.
- Les réseaux locaux (Local Area Network = LAN) encore appelés réseaux de distribution ou réseaux d'accès. Ils représentent le dernier maillon et finissent d'acheminer les informations à l'abonné. Ils sont donc plus courts et moins gourmands en capacité.

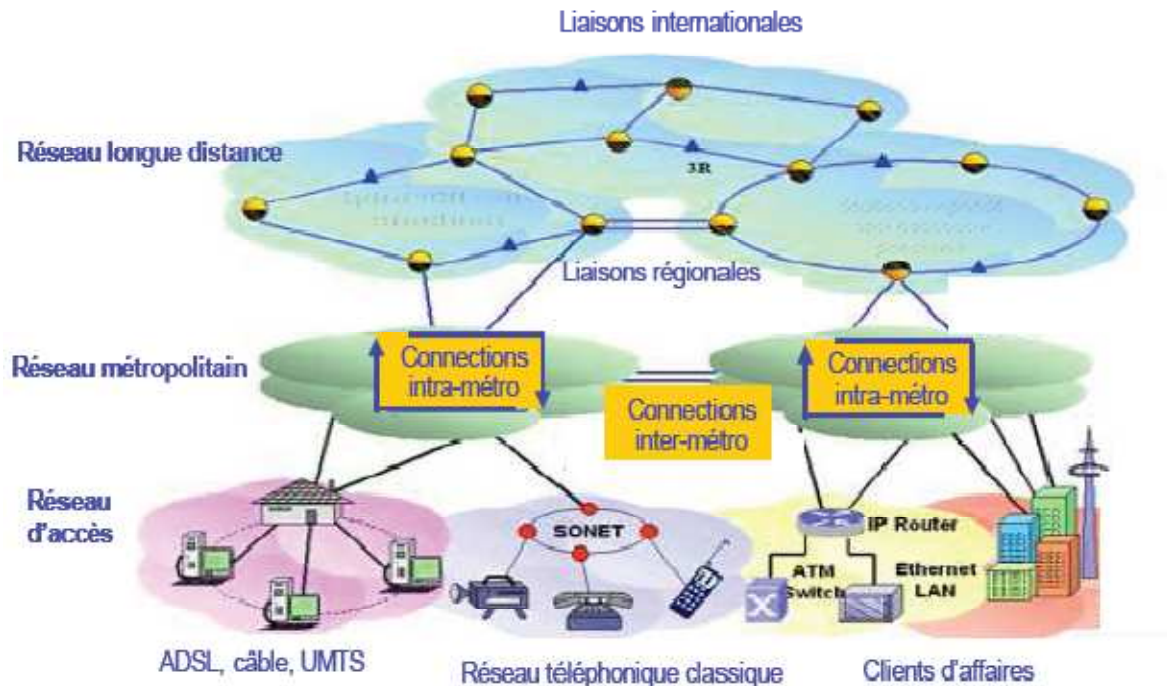


Figure I.1 Architecture typique d'un réseau de télécommunication

Tous ces maillons doivent répondre à la demande croissante de capacité des réseaux de télécommunications, quel que soit le type de service utilisé.

I.1.1 Le réseau étendu ou longue distance (WAN, Wide Area Network)

Il est déployé à l'échelle d'un pays ou d'un continent, et ses nœuds sont de très grands centres urbains. Ce type de système :

- comprend des systèmes terrestres ou sous-marins ;
- véhicule des données à grande vitesse sur des longues distances de plus de 100 km ;
- peut utiliser des répéteurs pouvant régénérer le signal optique. Ces répéteurs sont constitués par des régénérateurs optoélectroniques *3R* (*Retiming, Reshipping, Regenerating*) et par des amplificateurs optiques.

Les réseaux terrestres

- ont une dimension de quelques centaines de km et relient des grands centres urbains, reliés par des multiplexeurs d'insertion/extraction ;
- utilisent une topologie propre au SDH avec des boucles en double anneau permettant en cas de panne d'un anneau de diriger les signaux sur l'autre ;

- sont flexible vis-à-vis de la demande ; actuellement à 2.5 Gb/s, ils peuvent être augmentés, à l'aide du DWDM sur N canaux, à $N \times 2.5$ Gb/s ou $N \times 10$ Gb/s.

Les réseaux sous-marins

- peuvent atteindre plusieurs milliers de km;
- peuvent aussi relier des îles ou des pays d'un même continent. De plus, il est moins coûteux de poser des câbles sous-marins que des câbles enterrés ;
- utilisent la 3^{ème} fenêtre de la fibre optique à $\lambda=1,55$ nm où l'atténuation est la plus faible.

Les liaisons transocéaniques plus anciennes sont de type point-à-point ; dans les systèmes les plus modernes on adopte la structure en anneau de façon à pouvoir réorienter les signaux en cas de défaillance d'une voie.

I.1.2 Le réseau métropolitain (MAN, Metropolitan Area Network)

C'est un réseau qui dessert une grande ville et ses environs. Ce type de réseau :

- à une longueur qui varie entre 1 à 100 km.
- à un grand degré de connectivité.
- utilise des anneaux métropolitains qui se caractérisent généralement par un trafic maillé avec un certain degré de concentration lié à l'interconnexion avec le réseau longue distance. Les anneaux d'accès collectent en général le trafic de plusieurs nœuds pour le concentrer vers un nœud partagé avec un réseau métropolitain structurant.
- doit, à la différence du réseau longue distance, prendre en charge des formats, des protocoles et des débits de transmission très divers.
- mêlent les trafics de la hiérarchie numérique synchrone (SDH) ou autre encore. Les amplificateurs optiques sont essentiels pour les applications de ce type de réseau.
- est souvent équipé par des cartes transpondeurs multi-débits universelles, acceptant n'importe quel débit de 100 Mb/s à 2.5 Gb/s.
- utilise le DWDM, offrant les mêmes avantages que les systèmes à longues distances.
- les distances étant plus faibles, nécessite moins d'amplificateurs optiques, ce qui permet d'étendre la bande spectrale au-delà des amplificateurs dopés à l'erbium et réduit les problèmes de dispersion.

I.1.3 Le réseau local (LAN, Local Area Network) [3]

Aussi appelé réseau d'accès ou de desserte, ce réseau :

- à une longueur qui varie de 2 à 50 m ;
- est constitué par une partie en fibre entre l'autocommutateur et la terminaison de réseau optique suivie d'une partie en conducteur métallique qui va jusqu'au terminal de l'abonné.

L'optique entre désormais dans les réseaux de desserte grand public, on parle de FTTx (*Fiber To The ...*, « fibre jusqu'à ... ») : quartier (FTTN, pour *Neighborhood*), au pied d'immeuble (FTTB, pour *Building*), au domicile (FTTH, pour *Home*).

I.2. Description d'une liaison optique

L'architecture d'une liaison optique, quelque soit le niveau du réseau auquel elle est destinée, est composée des mêmes éléments, à savoir un émetteur, une fibre optique et un récepteur.

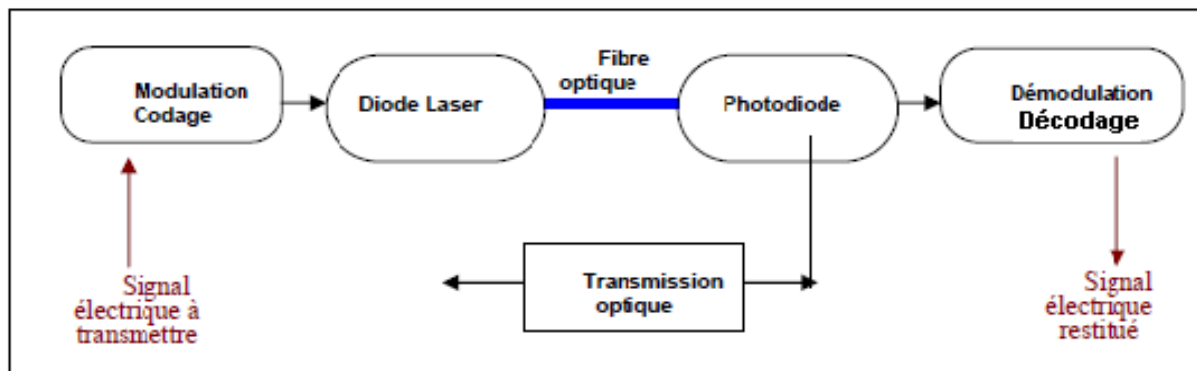


Figure I.2 Schéma de principe d'une liaison optique

Pour chacun de ces éléments constitutifs d'une liaison par fibre optique, nous tenterons de décrire leur rôle et leur fonctionnement. Nous débuterons par l'émetteur (laser, driver, modulateur, ...), puis nous poursuivrons par la description de la fibre optique. Enfin, nous terminerons par les blocs constituant le récepteur (photodiode, filtre électrique, circuit de remise en forme,..... etc.).

I.2.1 Le module d'émission

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

I-2-1-1. Le Laser [1] [3] [4]

Depuis le début des télécommunications par fibre optique, le choix des sources optiques s'est porté sur les émetteurs à semi-conducteur à cause de leurs petites dimensions en rapport avec celles du cœur des fibres optiques, de la relative facilité que l'on a à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant, de leur spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation. Ainsi la diode laser est la source la mieux adaptée pour les télécommunications optiques car elle permet d'avoir la meilleure efficacité de couplage optique avec la fibre. Le mot laser, sigle de l'expression anglaise Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, signifie amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement. L'effet laser ne fut démontré qu'en 1960 par Mainman en utilisant un barreau de rubis. Deux notions peuvent résumer cet effet : amplification et contre-réaction (Figure I-3).

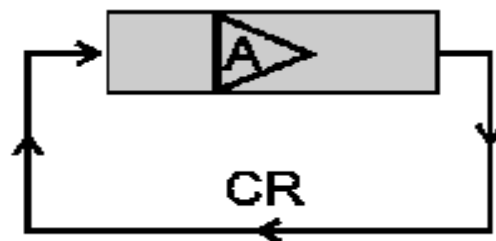


Figure I.3 Un laser est un oscillateur composé d'un milieu amplificateur (A) et d'une boucle de contre-réaction (CR).

Les lasers à semi-conducteur sont constitués [13]

- d'un milieu amplificateur qui utilise la propriété d'émission stimulée de photons dans une jonction **PN** où l'inversion de population entre les bandes de valence et de conduction est assurée par une injection de charges électriques.
- d'une cavité résonnante permettant de sélectionner les modes d'oscillation.

Les trois phénomènes importants de transitions quantiques présents dans les lasers à semi-conducteurs sont :

- **L'émission spontanée** : De sa propre initiative, l'électron peut tomber dans un état moins énergétique non occupé (il passe d'un état ionisé à un état lié), en émettant un photon spontané.
- **L'absorption** : En absorbant un photon, l'électron peut être amené dans un état plus énergétique. Il passe de l'état lié (électron et trou combinés) à l'état ionisé (électron dans la bande de conduction et trou dans la bande de valence).
- **L'émission stimulée** : Frappé par un photon, l'électron peut retomber dans l'état le moins énergétique (état lié) en émettant un photon stimulé dont le rayonnement correspond à la même longueur d'onde, la même phase, le même état de polarisation et la même directivité spatiale que le photon incident. On parle alors de lumière cohérente. Avec l'émission stimulée s'introduit la notion de gain ou d'amplification du rayonnement incident puisque, à partir d'un photon, on en obtient deux.

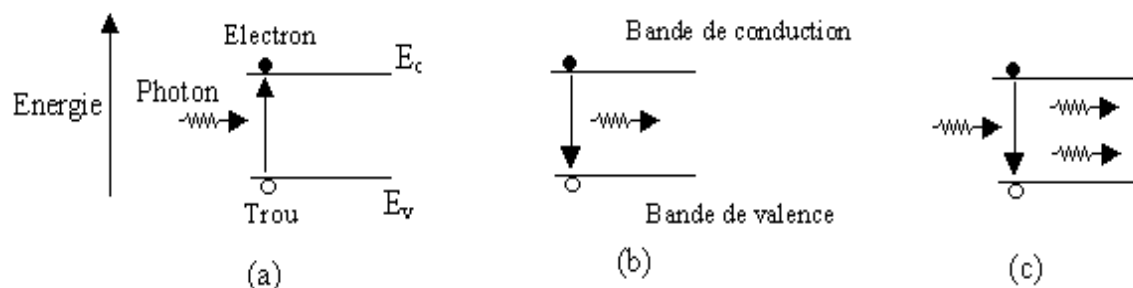


Figure I.4 Schéma des processus d'émission spontanée (a), d'absorption (b) et d'émission stimulée (c).

Pour que l'effet laser existe, il est nécessaire que la condition d'inversion de population soit atteinte. Plus précisément le taux d'émission stimulée excédera le taux d'absorption seulement si la densité de population au niveau fondamental est inférieure à la densité de

population au niveau excité. Dans un semi-conducteur, cette inversion est réalisée par l'opération de pompage qui consiste à fournir de l'énergie aux électrons afin qu'ils passent dans la bande de conduction. En plus pour obtenir l'effet laser il faut qu'il y ait suffisamment de photons excitateurs. Pour ce faire, l'énergie lumineuse est confinée dans une cavité résonnante, par exemple, par un résonateur du type Fabry-Pérot. Ce type de résonateur est constitué, dans le cas le plus simple, par deux miroirs plans, parallèles et réfléchissants entre lesquels les ondes lumineuses font de multiples allers-retours. Dans le cas d'un semi-conducteur, les parois clivées du cristal sont utilisées pour constituer la cavité. Une forte valeur de l'indice du semi-conducteur permet d'obtenir, avec les faces clivées en contact avec l'air, un coefficient de réflexion suffisant pour provoquer ces allers-retours de l'onde dans la cavité. C'est ce que nous avons appelé la boucle de contre-réaction. Ainsi, en imposant un coefficient de réflexion élevé, l'amplification dans le résonateur est d'autant plus accrue et peut compenser les pertes dues à l'absorption dans la cavité et à la transmission vers l'extérieur, transmission pourtant utile pour constituer le signal porteur de l'information dans le réseau. En effet, ces pertes signifient une baisse de l'émission stimulée.

Le seuil de l'effet laser est obtenu lorsque le gain maximal compense toutes les pertes que l'onde rencontre au cours de ses allers-retours entre les deux miroirs du résonateur (pertes provoquées par le milieu diffusant, par le phénomène d'absorption et par la transmission du signal vers l'extérieur). Lorsque le courant augmente au-dessus du seuil, l'émission stimulée apparaît : tous les porteurs injectés en supplément se recombinaient par recombinaison stimulée. Cela se traduit par une certaine directivité du rayonnement dans la direction perpendiculaire aux faces de la cavité et par une augmentation brutale de la puissance lumineuse émise par la diode laser. Le courant de seuil marque la séparation entre un fonctionnement dominé par l'émission spontanée et un fonctionnement dominé par l'émission stimulée.

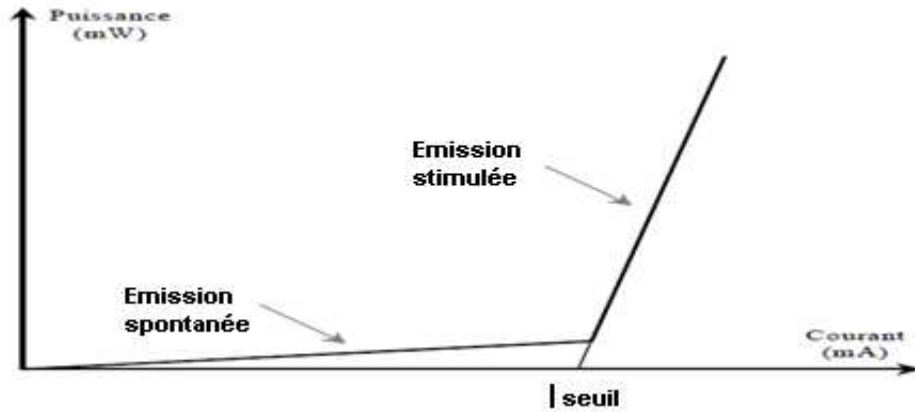


Figure 1.5 Caractéristique Puissance-Courant d'un laser.

I.2.1.2 La modulation des données [7]

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les graver sur le signal lumineux à envoyer dans la fibre. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une conversion des données électriques en données optiques. Il existe principalement deux techniques: la modulation directe et la modulation externe.

- **Modulation directe**

La méthode consiste à faire varier le courant de la source. Il en résulte une variation proportionnelle de la puissance émise qui suit le signal modulateur à condition d'utiliser la partie linéaire de la caractéristique $P_{OP}=f(I)$ du laser (Figure I-6).

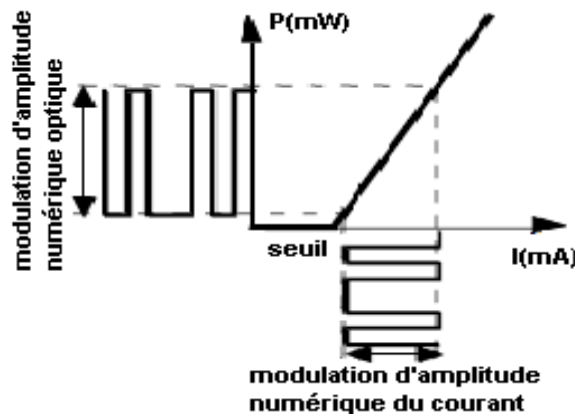


Figure I.6 Modulation directe d'une diode laser.

Cette solution de modulation directe requiert assez peu de composants. Un laser, un générateur de courant et un circuit de commande ou driver (Figure I-7). Le rôle du circuit de commande est de commander la source optique au niveau des puissances émises (en fixant les valeurs du courant d'alimentation). Pour cela, il modifie les niveaux du courant issus du générateur.

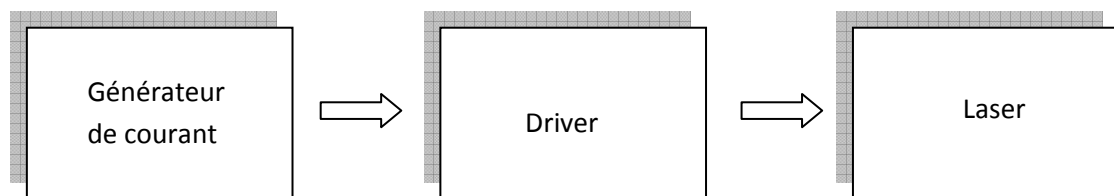


Figure I.7 Synoptique de la modulation directe.

La diode laser possède des propriétés qui limitent la modulation directe pour les haute fréquences. Il est fortement conseillé de rester en fonctionnement continu, c'est-à-dire conserver en permanence une polarisation au dessus du courant de seuil du laser. En effet, avoir des niveaux de modulation en dessous du seuil signifie alterner un état allumé et un état éteint du laser (fonctionnement impulsionnel), alterner l'émission stimulée et l'émission spontanée. Or l'émission spontanée nécessite un temps de réponse de plusieurs nanosecondes et limite donc le débit de transmission. De plus la modulation directe du courant provoque une modulation de la longueur d'onde émise (désigné sous le terme anglo-américain de chirp), la conséquence du chirp est un élargissement de la raie spectrale émise par le laser. [11]

- **Modulation externe [13]**

La modulation externe consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu en utilisant un modulateur. Ainsi, les défauts de la modulation directe qui sont liés au laser ne seront plus présents sur le signal optique. Le modulateur 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 pur et 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.

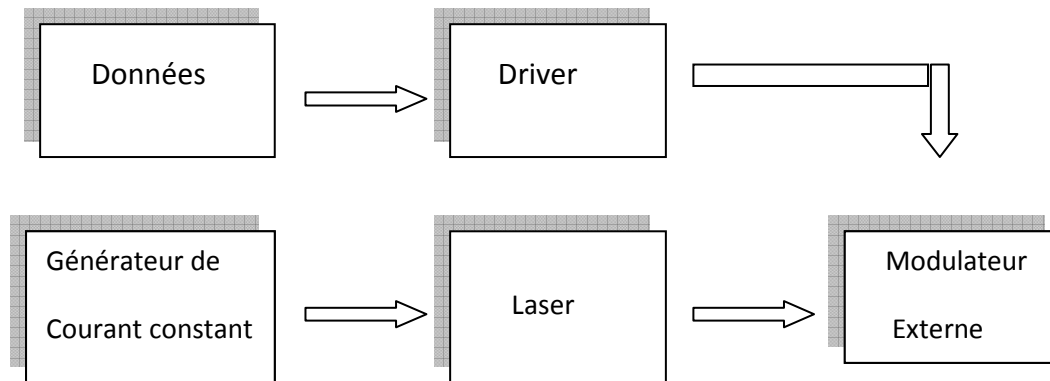


Figure I.8 Synoptique de la modulation externe.

Le principe physique utilisé dans ces modulateurs externes est soit la variation de l'indice de réfraction soit la variation de l'absorption (dispositifs à base de semi-conducteurs). (Voir annexe). La modulation externe présente de nombreux avantages. Elle est plus rapide et permet donc d'atteindre des débits plus élevés. Le bruit et le chirp ne sont pas inexistantes dans les modulateurs externes, mais leurs valeurs sont nettement plus faibles que dans la modulation directe. [7]

I-2-2 la fibre optique [1] [3]

La fibre optique est vite apparue très intéressante pour le domaine des télécommunications. Elle représente un support de transmission dont les nombreux avantages justifiant son introduction dans les systèmes de transmission sont donnés ci-après :

- **Performances de transmission** : Très faible atténuation, très grande bande passante, multiplexage possible.
- **Avantages de mise en œuvre** : Très petite taille, grande souplesse, faible poids.
- **Sécurité électrique** : Isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive ou sous de fortes tensions.
- **Sécurité électromagnétique** : Insensible aux parasites et n'en crée pas, inviolabilité presque totale.

Une fibre est un guide d'onde cylindrique. Elle est constituée de deux diélectriques de même axe, le cœur et la gaine, entourés d'une gaine de protection (Figure I- 9).

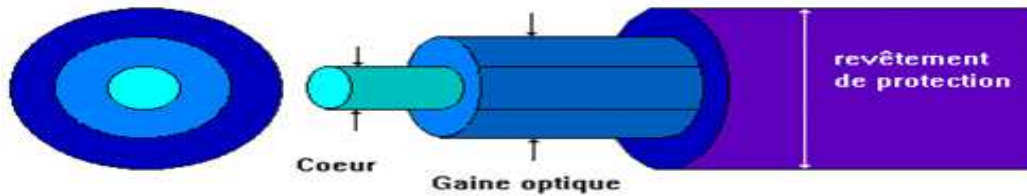


Figure I.9 Structure d'une fibre optique.

Le guidage du signal optique est basé sur la loi de Descartes. La lumière se propage le long de la fibre par réflexions successives entre le cœur et la gaine (Figure I-10). Cela n'est possible que si le cœur et la gaine sont constitués de matériaux transparents et que l'indice de la gaine est inférieur à celui du cœur (une différence de quelques % est suffisante).

La seconde condition est d'envoyer le signal lumineux dans la fibre avec un angle, par rapport à l'axe, inférieur à l'ouverture numérique. L'ouverture numérique caractérise l'angle maximum que doit faire le faisceau incident pour assurer sa propagation dans la fibre. [15]

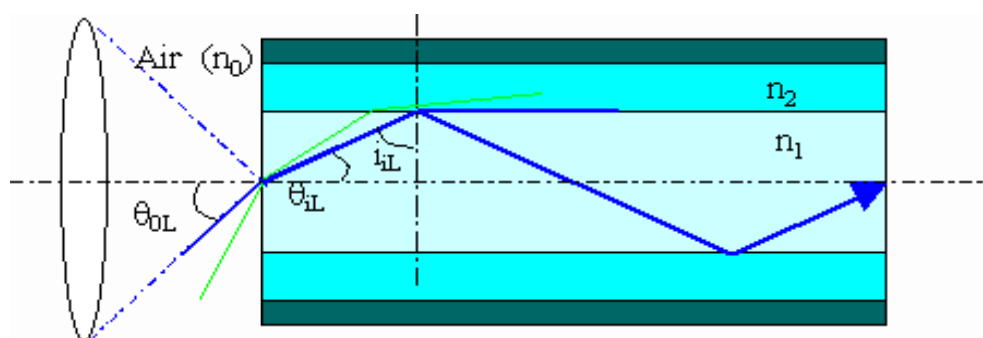


Figure I.10 Ouverture numérique d'une fibre optique

$$n_0 \cdot \sin(\theta_{OL}) = n_1 \cdot \sin(\theta_{iL}) \quad \text{I-1}$$

$$n_1 \cdot \sin(i_{iL}) = n_2 \cdot \sin(i_2) \quad \text{I-2}$$

Pour qu'il y ait réflexion totale, il faut que i_{iL} soit supérieur à l'angle critique donnée par :

$$\sin(i_{iL}) = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{I-3}$$

Comme $(i_{iL} = 90^\circ - \theta_{iL})$.

$$\sin(\theta_{OL}) = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(\theta_{iL}) = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \quad \text{I-4}$$

On définit l'ouverture numérique (ON) par:

$$ON = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \quad \text{I-5}$$

Plus l'ouverture numérique est grande, plus la puissance lumineuse injectée dans la fibre est importante.

I.2.2.1 Les différents types de fibres [15]

Suivant les dimensions du cœur et les expressions des indices « n1 » et « n2, on peut classer les fibres en deux catégories suivant la fréquence normalisée « v » qui est donnée par la relation suivante :

$$v = \frac{2 \pi \cdot a}{\lambda_0} \cdot n_1 \sqrt{2\Delta} \quad \text{I-6}$$

Avec : $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 n_1^2}$ est la différence d'indice relative, « λ_0 » représente la longueur d'onde de la lumière se propageant dans la fibre et « a » le diamètre du cœur.

La première est la fibre multimode (pour $v > 2.405$). Elle est généralement utilisée pour de courtes distances. Il y a deux principaux types de fibre multimode : à saut d'indice et à gradient d'indice. La fibre à saut d'indice, la plus classique, provoque une grande dispersion des signaux la traversant, générant une déformation du signal reçu. La fibre à gradient d'indice apporte deux améliorations à la fibre à saut d'indice : le cœur est deux à quatre fois plus petit, et il est constitué de couches successives pour permettre de mieux guider le rayon lumineux et ainsi réduire la déformation du signal.

Le second type de fibre optique est la fibre monomode (pour $v < 2.405$). Son cœur extrêmement fin (entre 8 et 10 μm) fait que le chemin de propagation des différents modes est pratiquement direct (Figure I-11). La dispersion modale devient quasiment nulle.

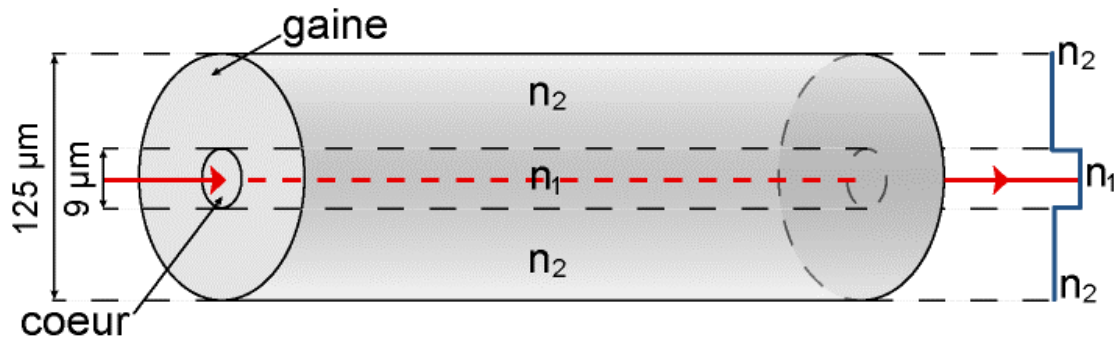


Figure I.11 Profil d'une fibre monomode à saut d'indice.

L'atténuation en dB/km de ce type de fibres est moins importante que dans les fibres multimodes. La transmission des données y est assurée par des lasers optiques émettant des longueurs d'onde lumineuse de 1300 à 1550 nm. Les fibres monomodes les plus récentes sont compatibles avec la technologie de multiplexage dense en longueur d'onde (DWDM). Ces fibres sont utilisées pour les liaisons à longue portée dont elles peuvent soutenir les hauts débits sur des distances très grandes. [11]

Les principales caractéristiques d'une fibre optique sont l'atténuation, la dispersion chromatique, la polarisation et les effets non-linéaires, que nous allons présenter.

I.2.2.2 L'atténuation [13]

La propagation d'un signal dans une fibre optique monomode est accompagnée d'une réduction de sa puissance moyenne. Cette réduction est liée au phénomène d'atténuation.

L'atténuation dans les fibres optiques résulte de plusieurs mécanismes. D'abord, l'absorption intrinsèque du matériau constitutif provoque une augmentation très rapide des pertes aux basses longueurs d'onde. La présence d'impuretés peut aussi créer diverses bandes d'absorption. De plus, les irrégularités involontaires de structure provoquent des pertes par diffusion (diffusion Rayleigh). Il y a ensuite les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres. Toute courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement. Les microcourbures sont des courbures très faibles, mais répétées et pratiquement incontrôlables, dues au

conditionnement des fibres dans les câbles. Ces pertes s'ajoutent directement aux pertes intrinsèques. Elles sont toutefois négligeables pour les fibres standard des télécommunications dans des conditions d'emploi normales. Enfin, les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux. Chaque jonction peut provoquer une perte de raccordement.

En général, on donne la puissance de l'onde électromagnétique, à la longueur d'onde parcourue une distance z , en fonction de la puissance incidente par la formule :

$$P(z) = P(0) e^{(-\alpha(\lambda)z)} \quad \text{I-7}$$

$\alpha(\lambda)$ est le coefficient d'atténuation exprimé en dB/Km, à la longueur d'onde λ .

L'évolution de ce coefficient en fonction de la longueur d'onde est représentée Figure I-12 pour une fibre standard en silice :

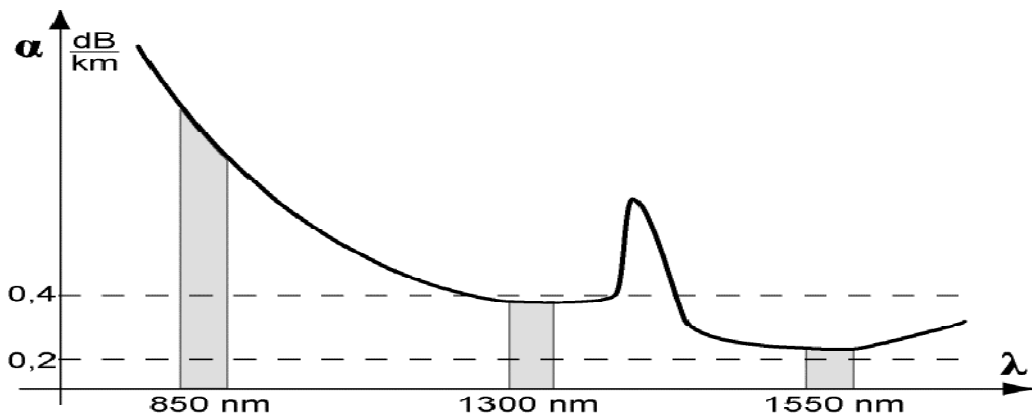


Figure I.12 Atténuation spectrale d'une fibre standard en fonction de la longueur d'onde.

Dans le but d'augmenter le produit débit \times distance entre répéteurs, une atténuation faible de la fibre est un impératif. L'observation de la Figure I-12 nous indique les trois fenêtres de longueur d'onde utilisables avec des fibres conventionnelles (autour de 0,8, 1,3 et 1,55 μm).

I.2.2.3 La dispersion

Les propriétés optiques d'un matériau diélectrique comme la silice sont dépendantes de la fréquence optique du rayonnement qui le traverse. La silice est un matériau dit dispersif car son indice de réfraction dépend de la longueur d'onde. Il en résulte que le temps de

propagation de groupe dépend de la longueur d'onde λ . Dans le cas d'un signal issu d'une source émettant sur une raie de largeur $\delta\lambda$ ces temps de propagation vont s'étaler sur une certaine durée. Le paramètre de dispersion chromatique (D) est défini comme la dérivée du temps de propagation de groupe par rapport à la longueur d'onde, pour une longueur de fibre de 1 km. Il est généralement donné en ps/(nm.km), les picosecondes correspondant à l'élargissement temporel, les nanomètres à la largeur spectrale et les kilomètres à la longueur de fibre.

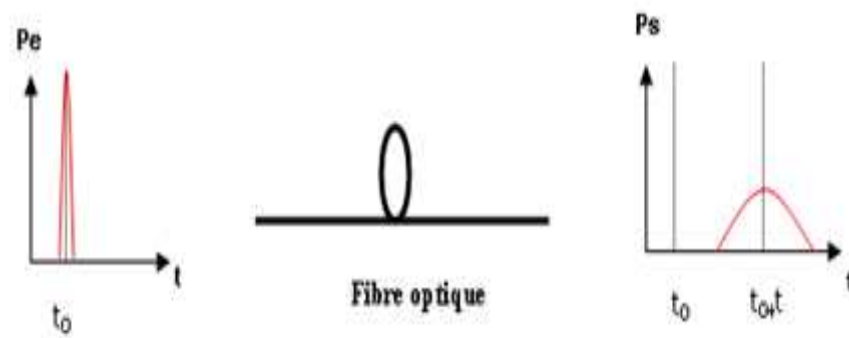


Figure 1.13 Effet de la dispersion chromatique : le signal qui se propage s'élargit

La Figure I-14 montre l'évolution du paramètre D en fonction de la longueur d'onde :

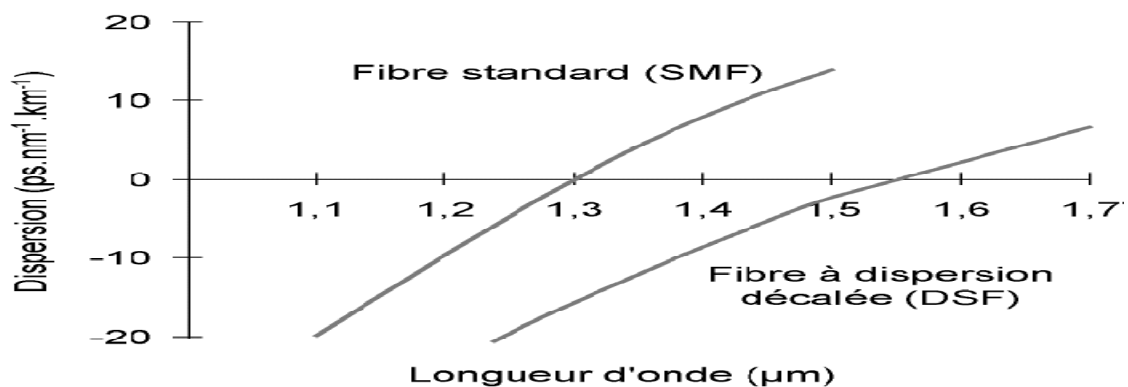


Figure I.14 Variation de la dispersion en fonction de la longueur d'onde pour une fibre standard (SMF) et une fibre à dispersion décalée (DSF)

Au vu de cette courbe, on remarque que pour une fibre standard (SMF single monomode fiber), la dispersion chromatique a une faible influence dans la fenêtre autour de 1.3µm, alors qu'elle devient un obstacle pour les transmissions rapides à 1.55µm, où l'atténuation est la plus faible. Pour résoudre ce problème, sont apparues les fibres à dispersion décalée dites

DSF (pour *Dispersion Shifted Fibre*) ayant un zéro de dispersion à 1550 nm, obtenues grâce à une modification du profil d'indice du cœur de la fibre.

La dispersion chromatique est un facteur majeur de limitation des performances des systèmes de transmission sur fibre à haut débit puisqu'elle entraîne un élargissement temporel des impulsions qui, au bout d'une certaine distance, provoque un recouvrement générateur d'interférences inter-symboles. On estime que la distance maximale de propagation en présence de dispersion chromatique est donnée par $\approx 1/(DB^2)$ où B est le débit (exprimé en bit/s). On obtient ainsi une émission sur 1000 km (respectivement 60 km) pour des communications à 2.5Gbit/s (10 Gbit/s) à 1.55 μ m. L'introduction de fibres à dispersion négative sur la ligne de transmission permet de compenser cet effet sous réserve que la conception de ces derniers soit adaptée à la ligne à compenser, et tienne compte de la variation de D avec la longueur d'onde.

I.2.2.4 La dispersion modale de polarisation

Le mode fondamental d'une fibre unimodale correspond en fait, pour une fibre idéale, à deux modes dégénérés qui sont polarisés orthogonalement. A priori, la symétrie cylindrique des fibres optiques leur confère un comportement identique pour tous les états de polarisation.

Cependant, les défauts de fabrication ainsi que les contraintes mécaniques ou thermiques brisent cette symétrie. Il est généralement admis que les déformations rendent le cœur elliptique et que la vitesse de propagation selon les deux axes de l'ellipse n'est pas la même.

Cette dispersion modale de polarisation (ou PMD pour *Polarization Mode Dispersion*) se modélise comme l'apparition d'une légère biréfringence, se traduisant par une différence d'indice effectif entre les deux axes de polarisation (un lent, l'autre rapide).

Lorsque l'on envoie un signal sur une fibre biréfringente, sans se soucier de sa polarisation, on excite les deux modes à la fois. Chacun d'entre eux a son propre temps de propagation de groupe. Ce décalage des temps de propagation de groupe (ou DGD pour *Differential Group Delay*) provoque le dédoublement du signal en sortie de la fibre (Figure I-15), et donc un brouillage de l'information. La PMD, dans la fibre standard de télécommunications, est de l'ordre de 0.05 ps/km.

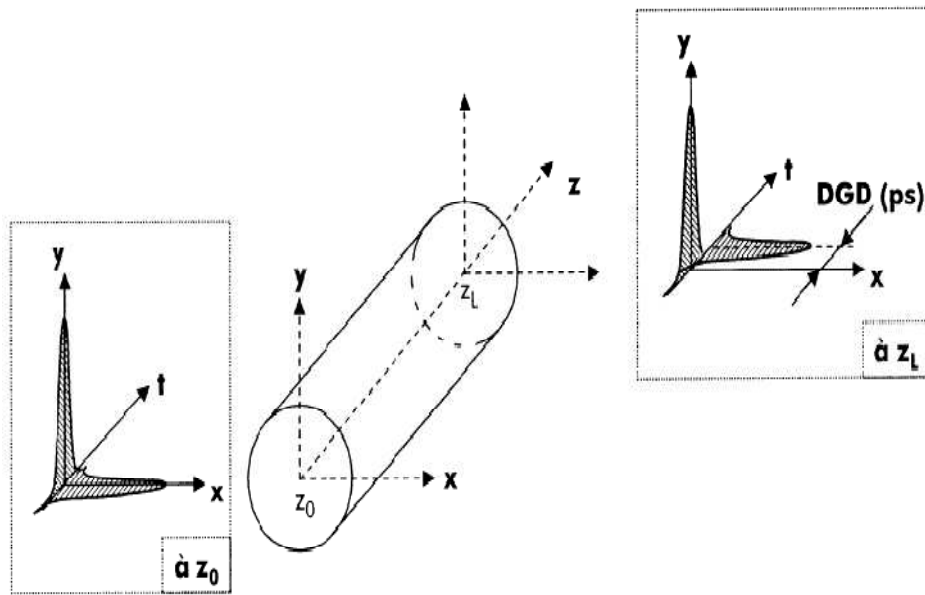


Figure I.15 Illustration de la différence du temps de propagation des deux modes.

Ce décalage a souvent été, car ce n'était pas le facteur limitatif. Cependant, il devient gênant pour les communications à 40 Gbit/s se propageant sur plus de 200 km [11].

I.2.2.5 Les effets non-linéaires [13]

Aujourd'hui, les systèmes de transmission à haut débit utilisent des amplificateurs de puissance à l'émission, ce qui conduit à des puissances très importantes injectées dans la fibre. De plus, la puissance optique couplée dans les fibres se trouve confinée sur de très faibles surfaces du fait de la petite dimension de leur zone guidante. Il en résulte des effets non-linéaires qui vont dégrader les performances des fibres optiques. Les deux effets non linéaires principaux dans les fibres optiques sont l'effet Kerr et l'effet Raman-Brillouin.

La première conséquence de l'effet Kerr se traduit par un phénomène d'auto-modulation de phase. L'impulsion est affectée d'une modulation de phase parasite qui croît avec la distance.

La modulation de phase, combinée à la dispersion chromatique, conduit à un élargissement temporel des signaux se propageant dans la fibre. Les autres conséquences de l'effet Kerr sont visibles si plusieurs ondes se propagent dans la fibre. Alors, la non-linéarité induit une modulation de phase croisée (cross phase modulation), ainsi que des phénomènes connus sous le nom de mélange à trois ou quatre ondes, sources d'intermodulations entre les différents canaux d'un système de transmission utilisant plusieurs longueurs d'onde.

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

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

I-2-3 Le module de réception [7]

Le rôle du récepteur est de convertir au mieux le signal optique en signal électrique. Ce module est composé de plusieurs blocs fonctionnels. On y retrouve trois parties (Figure I-16):

- Le bloc de 'premier étage' composé du photodétecteur. Il peut être accompagné d'un préamplificateur, qui a pour but de rendre le photocourant généré suffisamment fort malgré le faible signal optique reçu ou la faible sensibilité du photodétecteur.
- Le bloc 'linéaire', composé d'un amplificateur électrique à gain élevé et d'un filtre, réducteur de bruit.
- Le bloc 'récupération des données', correspondant au dernier étage du récepteur. On y trouve un circuit de décision et un circuit de synchronisation.

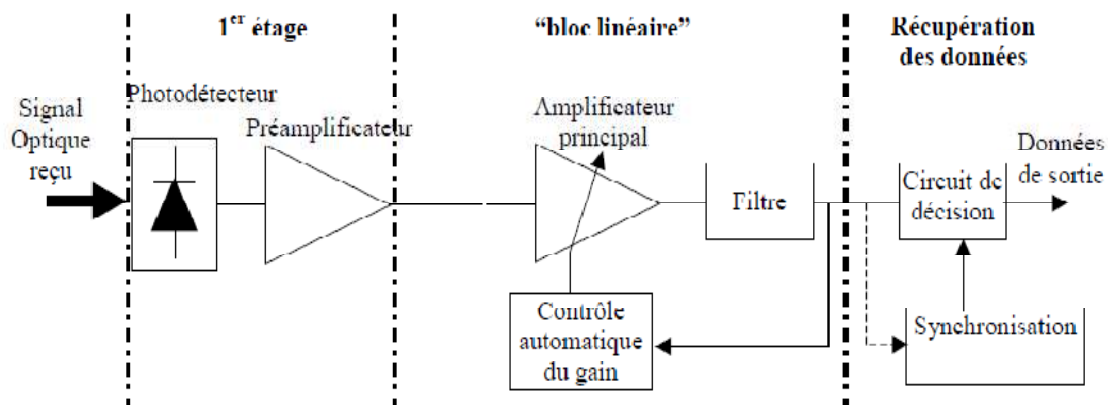


Figure I.16 Schéma d'un récepteur de données à détection directe.

I. 2.3. Le photodétecteur

L'interface optique de réception, dans une liaison à fibre optique, est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique, en lui apportant le minimum de dégradation. Ce rôle

est tenu par le photodétecteur, qui se comporte comme un compteur de photons et un générateur de courant. La première propriété requise est une sensibilité importante pour la longueur d'onde utilisée. La deuxième est la rapidité : il doit être utilisé dans des systèmes fonctionnant à 10Gbits/s voire même 40Gbits/s. La troisième propriété demandée est un apport minimum de bruit. Afin de satisfaire la plupart de ces conditions, le choix se porte sur les photodétecteurs à semi-conducteur, qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser, bien que d'autres dispositifs soient plus sensibles. Dans ce paragraphe, nous rappellerons le principe de la photodétection avant d'étudier plus précisément deux exemples de photodétecteurs : la photodiode PIN et la photodiode à avalanche (PDA).

I.2.3.1 Principe de la photodétection

Les photons transmis par la fibre pénètrent dans le détecteur, constitué d'un matériau semi-conducteur. Absorbés, ils peuvent provoquer le passage d'électrons d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Dans cette dernière, les électrons moins liés deviennent libres. Le photon a donc laissé place à une paire électron-trou. Une différence de potentiel est appliquée afin d'empêcher les électrons de retomber dans son état le plus stable. Sous l'effet du champ électrique, les deux catégories de porteurs sont séparées et entraînées vers des zones où ils sont majoritaires (nommées P ou N). Les porteurs ainsi générés sont alors recueillis sous forme de photocourant. Le nombre de paires électron-trou est égal au nombre de photons absorbés.

I.2.3.2 Caractéristiques d'un photodétecteur

Tout photon ne subira pas automatiquement la photodétection. Tout d'abord, il doit posséder une énergie E_{photon} égale ou supérieure à la hauteur de la bande d'énergie interdite E_g pour faire passer l'électron de la bande de valence à la bande de conduction. Cela implique une longueur d'onde de coupure λ_c au-delà de laquelle le matériau devient transparent au rayonnement. λ_c est déterminée par l'énergie de bande interdite E_g du semi-conducteur selon la relation suivante :

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} \geq E_g \rightarrow \lambda_c = \frac{hc}{E_g} \quad \text{I-8}$$

Ensuite, il peut traverser le détecteur sans être absorbé. Le coefficient d'absorption du semi-conducteur est donc un facteur essentiel qui va déterminer le rendement du photodétecteur.

Les autres propriétés qui caractérisent un photodétecteur sont :

- Le rendement quantique (η) qui est le rapport du nombre de paires de porteurs « photocréées et collectées » au nombre de photons incidents, il ne peut pas être supérieur à 1 et croît avec l'épaisseur de la zone absorbante.
- la sensibilité (S) de la photodiode exprimée en ampères par watt et définissant le rapport du photocourant I_{ph} au flux énergétique (ou puissance optique P_{opt}) reçu(e).
- la bande passante. Elle permet de savoir si le courant peut suivre une variation brusque du flux de photons, et quel est le facteur de proportionnalité entre le temps de montée ou de descente du photocourant et ceux du flux lumineux.
- Le bruit de photodétecteur. Certains électrons du courant utile peuvent être générés sans qu'un photon n'ait été absorbé.

Le rendement quantique et la sensibilité sont reliés par les relations suivantes, avec e représentant la charge élémentaire de l'électron, h la constante de Planck, λ la longueur d'onde et c la vitesse de la lumière :

$$\eta = \frac{I_{ph}/e}{P_{opt}/h\nu} \quad \text{et} \quad S(\lambda) = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} = \eta \cdot \frac{e\lambda}{hc} \quad \text{I-9}$$

Le courant créé est proportionnel à la puissance lumineuse, ce qui signifie que la puissance du signal électrique est proportionnelle au carré de la puissance optique. Il s'agit d'une détection quadratique.

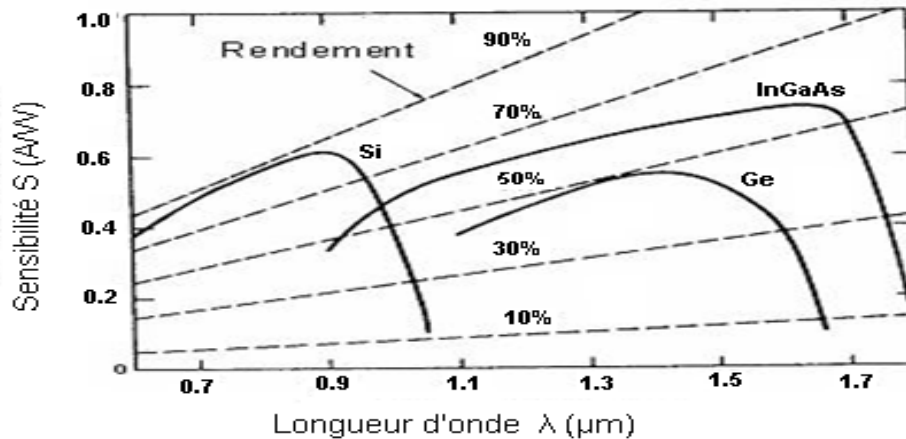


Figure I.17 Courbes de sensibilité et de rendement selon les longueurs d'onde pour divers matériaux. [2]

Au regard de la figure I-17, on observe que la sensibilité S augmente avec λ , puis s'écroule à la fréquence de coupure. Il apparaît donc pour chaque matériau une longueur d'onde pour laquelle la sensibilité est maximale. On observe que le silicium sera plutôt employé dans le domaine du visible alors que les hétérostructures III-V comme l'InGaAs seront utilisés dans les transmissions à fibre optique à $1,55\mu\text{m}$.

I.2.3.3 Les photodiodes PIN

Pour effectuer la photodétection, en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il faut que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN, encore appelée zone déplétée. La zone de charge d'espace doit être large pour permettre un bon rendement quantique, d'où l'intérêt de la photodiode PIN (Figure I-18), où une région intrinsèque est intercalée entre les régions de type P et de type N. La majorité des photons est absorbée dans la zone intrinsèque, où, lorsque la photodiode est polarisée, règne un champ électrique qui sépare les porteurs. La zone traversée par la lumière (P ou N) doit être de faible épaisseur, et recouverte d'une couche antireflet qui améliore le rendement quantique externe, et qui protège le matériau.

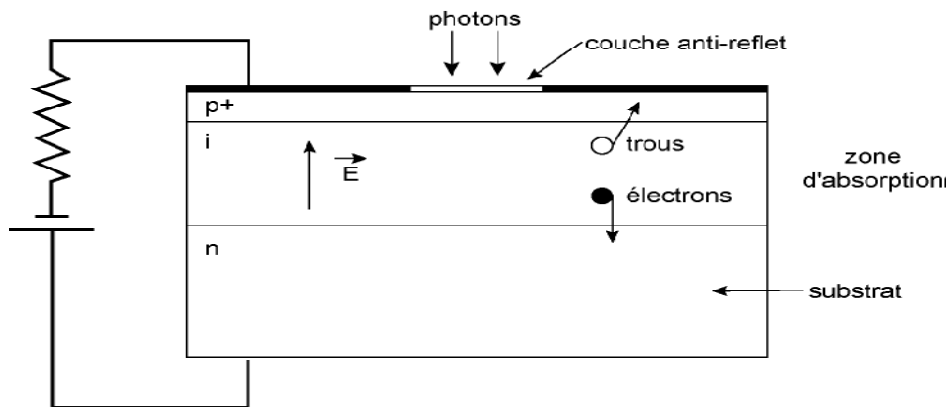


Figure I.18 Photodiode PIN

Les paramètres importants, dépendants du matériau et de la structure, qui caractérisent une photodiode PIN, sont principalement sa sensibilité, son courant d'obscurité et son temps de réponse. La sensibilité, qui relie la puissance lumineuse incidente au photocourant généré, varie suivant le coefficient d'absorption du matériau, et selon la largeur de la zone intrinsèque. Dans la photodiode, en l'absence d'éclairement, circule un courant, appelé courant d'obscurité. Ce courant peut avoir des origines multiples : génération thermique dans la zone intrinsèque, courants de surface, courants de fuite...

Une autre caractéristique de la photodiode, est son temps de réponse, qui doit être très bref, lorsque la structure est verticale, c'est-à-dire que l'éclairement se fait par le haut, le temps de réponse limite l'utilisation de la photodiode aux systèmes à 10Gbit/s. Pour augmenter la fréquence de coupure, il est nécessaire de travailler avec des photodétecteurs éclairés par la tranche.

I.2.3.4 Les photodiodes à avalanche

Afin que le rapport signal sur bruit soit suffisamment important, une idée est d'utiliser le phénomène d'ionisation par impact des porteurs. L'objectif est d'augmenter la puissance du signal électrique, correspondant à une puissance optique incidente donnée, par multiplication interne du nombre de porteurs. En faisant croître le champ électrique dans la jonction PN, l'énergie des porteurs s'élève, jusqu'au point d'ioniser un atome en cas d'impact avec celui-ci. Des ionisations en chaîne se produisent alors, et les porteurs se multiplient. Ce photodétecteur à gain interne est appelé photodiode à avalanche (ou PDA).

Ce phénomène, aussi connu sous le nom d'avalanche, entraîne s'il n'est pas contrôlé, le claquage de la jonction et la destruction du matériau. La Figure I-19 montre une structure P π PN en silicium, qui résulte d'un compromis entre une zone d'absorption large, et une jonction très abrupte pour obtenir un très fort champ électrique.

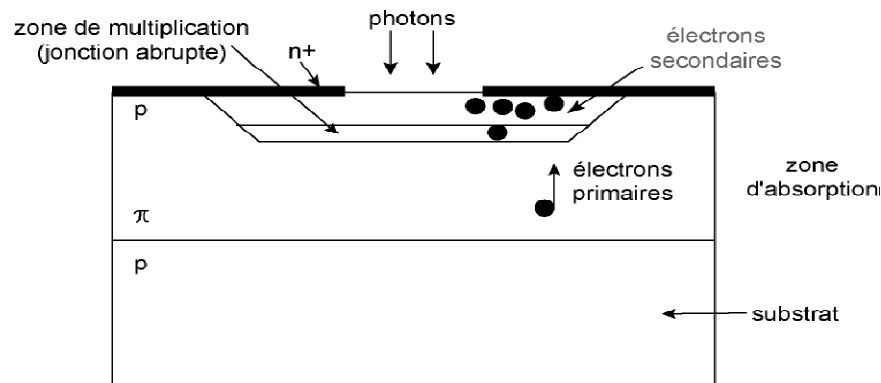


Figure I.19 Photodiode à avalanche en Silicium.

L'absorption a lieu dans une zone large et peu dopée, dite π et la multiplication a eu lieu dans la jonction abrupte PN^+ . En outre, pour une tension inverse élevée, la zone de charge d'espace s'étend dans la zone π , dont la résistivité va augmenter avec la tension. Ce phénomène introduit un effet stabilisateur : le champ électrique et le gain augmentent lentement, ce dernier pouvant atteindre de fortes valeurs tout en étant contrôlé avec précision.

Concernant le courant d'obscurité, il est plus important dans une photodiode à avalanche, mais n'est pas autant multiplié que le signal, car toutes les composantes de ce courant ne subissent pas le phénomène d'avalanche. Le bruit quantique quant à lui est bien multiplié par le gain interne de la photodiode.

Le temps de réponse de ces photodiodes est affecté par le phénomène d'avalanche, et ces photodiodes sont donc un peu moins rapides que les photodiodes PIN.

I.2.3.5 L'amplificateur électrique

Le courant émis par la photodiode, malgré la présence d'un préamplificateur, reste souvent assez faible. Il est donc nécessaire d'utiliser un amplificateur en sortie de photorécepteur.

I.2.3.6 Le filtrage

Afin de minimiser le bruit en sortie du récepteur, il faut filtrer le signal numérique dans une bande $0 - \Delta F$ qui soit la plus petite possible, tout en ne créant pas d'interférences intersymboles (IES), c'est-à-dire telle que la réponse du filtre à un symbole s'annule à tous les instants de décision sur les symboles voisins.

I.2.3.7 Circuit de décision

On doit assurer à l'abonné une qualité d'information parfaite. Pour cela, une mise en forme du signal détecté est réalisée grâce au bloc de décision. Ce dernier est composé d'un détecteur à seuil et d'un circuit de récupération de rythme, encore appelé circuit de synchronisation. Lors d'un front montant de l'horloge, le signal reçu est comparé au seuil de décision. S'il est supérieur, alors un niveau haut sera détecté et établi, sinon, ce sera un niveau bas. L'horloge doit être synchronisée sur le signal incident. Cette récupération de rythme est effectuée grâce à une boucle à verrouillage de phase classique.

I-2-4 Eléments du bloc de transmission

Le principal élément de la partie transmission est la fibre optique, elle offre une très grande capacité de transport, plus grande que les convertisseurs optique-électronique et les composants électroniques. D'où l'idée de traiter le plus souvent possible le signal lumineux avant sa conversion électrique. Pour cela, de nombreux progrès ont été réalisés sur les composants optiques. Nous verrons tout d'abord l'amplification optique et les différents amplificateurs permettant de la réaliser. Seront abordés également dans ce paragraphe les isolateurs optiques, les coupleurs optiques, les filtres optiques et les multiplexeurs optiques.

I.2.4.1 1'Amplificateurs optiques [1] [7] [14]

L'amplification optique est à l'origine d'une véritable révolution dans le domaine des télécommunications, vu les avantages que cette technologie procure en association avec le multiplexage en longueur d'onde (WDM). En effet, cette amplification peut intervenir sur l'ensemble des N longueurs d'onde d'un multiplexeur, sans distorsion du signal utile. Il évite donc une conversion opto-électronique et une amplification électrique sur chaque canal, donc N amplificateurs électriques.

- **Généralités sur l'amplification optique**

L'amplification optique repose sur le phénomène d'émission stimulée, déjà présentée dans le paragraphe sur les lasers. Le signal est amplifié dans un guide (semi-conducteur ou fibre) grâce à un apport extérieur d'énergie appelé pompage (courant injecté ou source de lumière) qui vient créer une inversion de population. La recombinaison électron-trou peut ensuite être provoquée par un photon incident, ce qui donne naissance à un deuxième photon de même fréquence, de même phase et même direction. Cette émission est dite stimulée et conduit à une amplification du signal. En même temps, la recombinaison peut se faire sans la présence d'un photon incident. Ces photons, émis de façon spontanée, de manière non cohérente, constituent le bruit de l'amplification optique. L'ensemble des photons, originels ou pas, subissent une série d'amplifications. Les photons spontanés seront aussi amplifiés, ce qui définit la source de bruit appelée ESA (Emission Spontanée Amplifiée).

- **Les amplificateurs à semi-conducteur (AOSC)**

Les premiers travaux sur les AOSC ont démarré au début des années 80, à partir du moment où les lasers à semi-conducteur fonctionnaient en continu avec une fiabilité acceptable. Leur structure de base est peu différente de celle d'une diode laser. Nous retrouvons l'inversion de population, l'émission spontanée et stimulée, les recombinaisons non radiatives, une source externe ... Contrairement aux lasers à semi-conducteur, il n'y a pas de miroirs aux extrémités mais un revêtement antireflets déposé sur les faces clivées afin de diminuer les réflexions de la lumière vers l'intérieur du circuit.

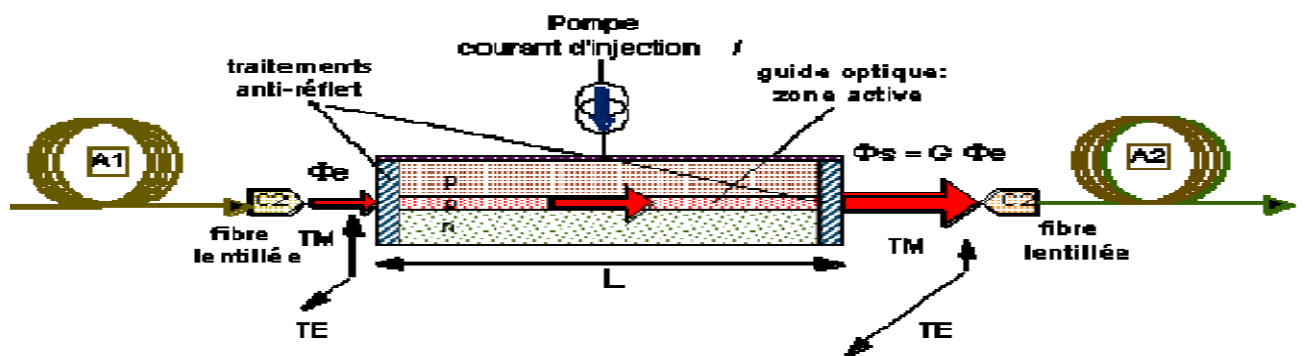


Figure I.20 Configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteur.

La lumière incidente entre dans le circuit, est amplifiée et sort par l'autre extrémité pour être couplée dans la fibre. Idéalement, il n'y a pas de réflexion du signal dans l'amplificateur. Les principales caractéristiques des AOSC sont :

- Un gain élevé (jusqu'à 30 dB) selon le semi-conducteur, la longueur d'onde, le courant injecté et la puissance du signal incident.
- Une puissance de saturation en sortie autour de 5 - 10 mW.
- Une bande passante optique importante, de l'ordre de 5THz (soit environ 40 nm autour de 1550 nm).
- Les non-linéarités sont particulièrement importantes dans les conditions de saturation du gain.
- C'est de loin le dispositif amplificateur le plus compact qui existe, avec un rendement (rapport gain à la consommation électrique) important.
- Les pertes de couplage du faisceau incident dans l'amplificateur sont élevées, en raison de la supériorité du diamètre du faisceau sur l'épaisseur de la couche active du semi-conducteur.

- **Les amplificateurs à fibre dopée (EDFA)**

Un amplificateur optique à fibre amplifie la lumière grâce au mécanisme d'émission stimulée. Les éléments actifs sont plus couramment des ions d'Erbium. Si un photon interagit avec un électron dans l'état métastable, un effet quantique de résonance produit le retour de l'ion dans l'état fondamental et un photon est émis avec les mêmes caractéristiques que le photon incident. A partir d'un photon on obtient ainsi deux : c'est la base de l'amplification optique. Mais l'amplification l'emporte si les photons rencontrent plus d'ions dans l'état métastable que dans l'état fondamental. Cette condition est désignée par le terme « inversion de population » et est obtenue par l'opération de pompage par exemple à la longueur d'onde de 980 nm (la figure I-21).

Les photons de la pompe excitent les particules actives et les font passer de l'état fondamental à l'état supérieur. Ces dernières ayant une durée de vie très courte. Les particules actives retombent très rapidement au niveau métastable.

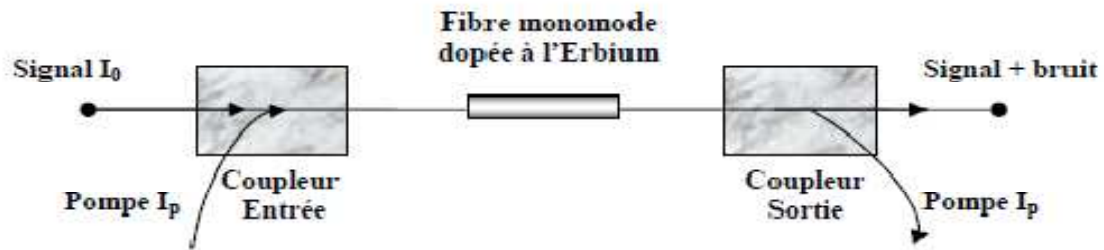


Figure I.21 Amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium avec pompage optique

- **Les amplificateurs à effet Raman**

Avec l'accroissement des canaux dans la fibre, la bande spectrale offerte par les amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium, limitée au maximum à 40 nm, peut s'avérer être un facteur pénalisant. Ce constat a relancé les études sur de nouvelles méthodes permettant l'augmentation de la bande spectrale. De nouveaux amplificateurs optiques tels que les amplificateurs Raman prennent une part non négligeable dans les systèmes de télécommunications. Ils sont basés sur le principe de la diffusion Raman, qui est un effet non linéaire à deux photons dans lequel un photon de pompe est absorbé et un photon de plus faible énergie est émis en même temps qu'un phonon. Ce phénomène peut être spontané, s'il n'y a pas de photon signal, ou stimulé par la présence d'un photon signal. Ainsi, dans le cas de l'amplificateur Raman, l'onde incidente, dite onde de pompe, stimulée par l'onde signal, va créer une autre onde signal, et un phonon. L'amplification est alors réalisée. Comme pour les autres amplificateurs optiques, celui-ci a besoin d'une source externe, une source optique. Des lasers YAG sont les plus souvent utilisés dans ce cas, en émettant une longueur d'onde inférieure à celle du signal. L'avantage principal de ces lasers est d'être accordables sur une très grande plage de longueurs d'onde. Le gain obtenu peut atteindre quelques dizaines de décibels, mais une saturation qui s'accompagne d'une forte dégradation du rapport signal sur bruit (l'émission spontanée continuant à être amplifiée) peut apparaître. La limite en puissance est due à la génération d'une onde autre que l'onde signal lors de la diffusion Raman.

I.2.4.2 Les isolateurs

En optique comme en électricité, un isolateur est un dispositif passif non réciproque qui a une faible atténuation dans un sens et une forte atténuation dans l'autre sens. Il a donc une entrée et une sortie. Dans les systèmes de télécommunications par fibre optique, les isolateurs

sont le plus souvent employés pour atténuer la lumière issue des réflexions parasites, qui, par exemple en revenant dans le laser, vient troubler son fonctionnement. Les occasions d'avoir des réflexions tout au long de la ligne sont fréquentes (un connecteur optiquement mal adapté, une extrémité de fibre mal coupée, ...). Les isolateurs sont également utilisés dans les amplificateurs optiques à fibre dopée afin de les empêcher de résonner et de se transformer en lasers s'il y a réflexion.

I.2.4.3 Les coupleurs

Dans les réseaux de fibres optiques, les coupleurs permettent de distribuer le signal optique vers plusieurs fibres ou inversement, acheminer le signal venant de plusieurs fibres vers une seule. Le principe de base est celui du couplage par onde évanescente entre deux fibres dont les cœurs sont très proches. Le champ électromagnétique s'étend au delà des cœurs. De ce fait, la lumière qui se propage dans un guide sent la présence de l'autre guide et se transfère progressivement dans l'autre guide. Si les guides sont identiques, la totalité de la lumière passe dans le second guide après une longueur d'interaction L_{inter} . Si cette région d'interaction est supérieure à L_{inter} , la lumière repasse dans le premier guide.

I.2.4.4 Les filtres optiques

Le filtrage a pour but de limiter l'occupation spectrale d'un signal. La séparation spectrale est réalisée en réfléchissant une certaine gamme de longueurs d'onde et en transmettant les autres. On caractérise donc le filtre par sa bande passante, c'est-à-dire le domaine de fréquences (ou de longueurs d'onde) pour lequel il laisse passer la lumière et par sa bande atténuée, c'est-à-dire le domaine de fréquences (ou de longueurs d'onde) pour lesquelles il réfléchit la lumière incidente. Ces deux domaines spectraux peuvent être très larges notamment pour les filtres passe-haut et passe-bas. Deux types de filtres sont couramment utilisés, les filtres dichroïques et les filtres Fabry-Perot.

I.2.4.5 Les multiplexeurs et démultiplexeurs optiques

Une application de ces filtres est la réalisation de la fonction de multiplexage optique. La solution adoptée sur certains dispositifs est le dépôt du filtre sur l'extrémité d'une fibre optique. Les multiplexeurs et démultiplexeurs peuvent également être composés à base de réseaux de diffraction.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord décrit les réseaux et les liaisons optiques et énuméré les principaux composants constituant ces liaisons, ainsi que les problèmes rencontrés lors de la propagation d'un signal optique dans une fibre. Les différentes techniques de codage et de transmission seront détaillées dans le chapitre suivant

CHAPITRE II
TECHNIQUES DU CODAGE
ET DE TRANSMISSION SUR
FIBRE OPTIQUE

Introduction

On appelle transmission numérique une transmission dont le signal électrique est sous forme binaire, c'est-à-dire une succession de zéro '0' et de un '1' appelés 'bits'. Les avantages apportés par cette dernière par rapport à l'analogique sont :

- Meilleure protection contre les perturbations.
- Plus grande vitesse de transmission.
- Amélioration de la qualité de transmission d'une liaison numérique caractérisée par un taux d'erreur qui est donné par :

$$TEB = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits reçus}}$$

II .1 Numérisations des signaux électriques [1]

Pour transmettre un signal $f(t)$ d'un émetteur à un récepteur, il n'est pas nécessaire de transmettre ce signal de manière continue. Il est parfois utile de ne transmettre que des éléments discrets du signal analogique continu prélevés à des instants de temps réguliers. L'intérêt de la modulation par impulsion et codage réside dans la représentation numérique d'informations analogiques. Elle permet de remplacer la transmission d'informations analogiques telles que la parole et la musique par une transmission de type « télégraphique » de symboles discrets de nombre fini (l'information numérique).

Malgré la conversion analogique/numérique nécessaire pour la transmission numérique des informations d'une source analogique vers un destinataire qui exige le retour à une forme analogique, la modulation PCM (Pulse Code Modulation) présente un intérêt croissant.

II.1.1 Principe de la modulation MIC

Pour passer d'un signal à variation continue, porteur d'informations analogiques, à une suite de symboles discrets, choisis parmi un ensemble déterminé de symboles possibles, la modulation MIC procède en quatre étapes fondamentales, à savoir l'échantillonnage, la quantification, la compression et le codage.

▪ L'échantillonnage

L'échantillonnage consiste à prélever périodiquement de brefs échantillons de fréquence (F_e) sur un signal $S_1(t)$ pour obtenir un nouveau signal $S_2(t)$ identique à $S_1(t)$ pendant de brefs instants de durée t et nul entre $T_e - t$ selon le théorème de SHANNON.

Cette opération revient donc à multiplier le signal $S_1(t)$ par un train d'impulsions rectangulaire $U_p(t)$ d'amplitude égale à l'unité.

Théorème de SHANNON

Un signal qui ne contient aucune composante de fréquence supérieure à une fréquence maximale F_{\max} (spectre borné) est entièrement déterminé par des échantillons équidistants prélevés avec une fréquence F_e telle que $F_e \geq 2 F_{\max}$.

▪ La quantification

Elle consiste à donner à chaque échantillon une valeur prise dans une échelle de valeur. L'erreur effectuée dans l'approximation est appelée bruit de quantification.

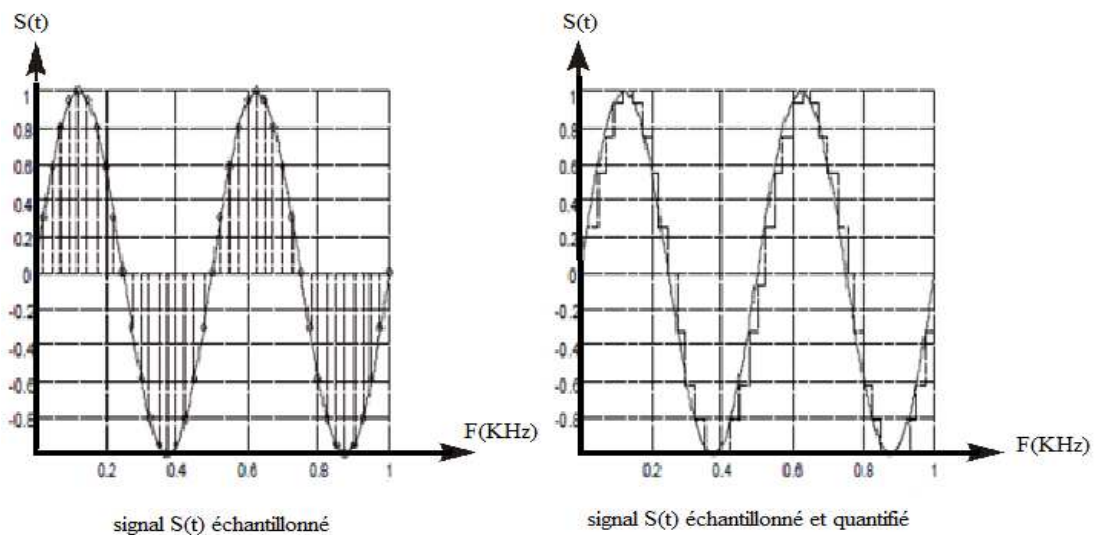


Figure II.1 l'échantillonnage et la quantification d'un signal analogique $S(t)$.

• Le codage

Attribution d'un symbole binaire à chacun des q niveaux de quantification sans influence sur la qualité de la modulation, mais peut influencer les propriétés de transmission.

Chaque échantillon sera codé sur un ensemble de bits. Pour permettre le codage des différentes valeurs, huit bits seront nécessaires. Ainsi, pour le signal téléphonique (4KHz), nous avons 8000 échantillons/S codés sur 8 bits / échantillon

- **La compression**

C'est une opération purement logique qui consiste à confondre certaines plages obtenues par une quantification linéaire pour obtenir un mot de 8 éléments binaires. Pour coder les échantillons compris entre 0 et 1, on trouvera 32 échelons sur la loi linéaire qui va falloir comprimer en 16 échelons.

Enfin il faut diminuer la taille des échelons pour les niveaux faibles, ceci a pour but d'augmenter la valeur du rapport signal/bruit (S/B).

Il existe deux lois de compression définies par l'Union International des Télécommunications (UIT):

- La loi américaine dite la loi μ .
- La loi européenne dite la loi A.

La loi μ

La loi μ est une loi logarithmique continue, elle a pour équation :

$$Y = \frac{\ln(1 + \mu x)}{\ln(1 + \mu)} \text{ avec } \mu = 100 \text{ ou } \mu = 225.$$

La loi A

Cette loi normalisée par l'UIT est donc celle que nous trouvons désormais sur tout le matériel numérique. A cette loi sont associés 2^8 échelons pour l'échelle de quantification.

Les équations qui définissent cette loi sont :

Pour la partie linéaire : $Y = Ax / (1 + \ln A)$.

Pour la partie logarithmique : $Y = [1 + \ln(Ax)] / (1 + \ln A)$. Avec $A = 87.6$.

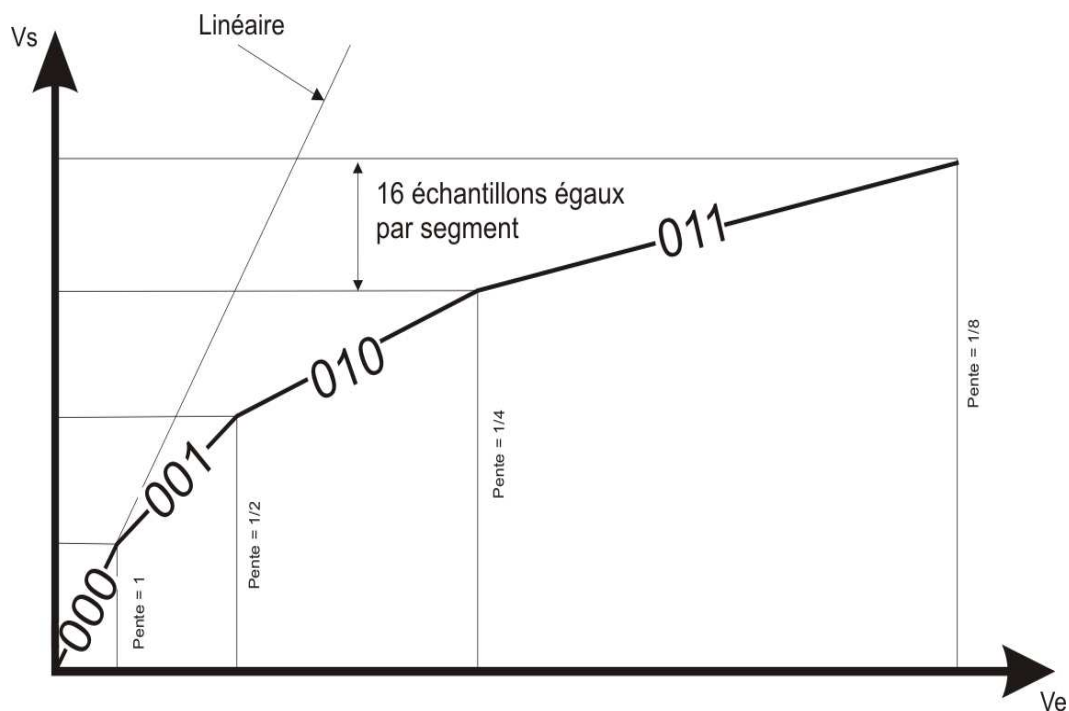


Figure II.2 Compression du signal avec la loi A.

II.2 Codage binaire du signal [1]

L'information que nous venons de définir est une grandeur abstraite et immatérielle, dans le cas numérique c'est simplement une suite de nombres. Pour la transmettre il faut "imprimer" sur des signaux physiques, en générale électriques ou électromagnétiques. C'est cette opération que l'on appelle "codage binaire du signal".

II.2.1 Quelques exemples de codes en ligne

Il existe une grande variété en ligne développés depuis le début de la transmission numérique. Le choix est dicté en particulier par la densité spectrale de puissance de signal aléatoire.

II.2.2 Représentation des signaux codés

Pour l'ensemble des différents codes décrits, nous prendrons la même suite binaire afin de permettre la comparaison : 1 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1

II.2.2.1 Codage NRZ (Non Return to Zero)

Principe : très proche du codage binaire de base, il code un 1 par +V, un 0 par -V

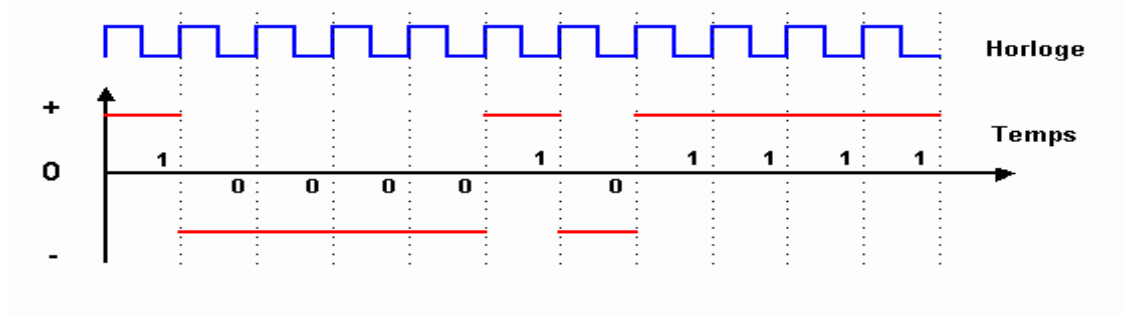


Figure II.3 Codage NRZ.

Le codage NRZ améliore légèrement le codage binaire de base en augmentant la différence d'amplitude du signal entre les 0 et les 1. Toutefois les longues séries de bits identiques (0 ou 1) provoquent un signal sans transition pendant une longue période de temps, ce qui peut engendrer une perte de synchronisation.

Le débit maximum théorique est le double de la fréquence utilisée pour le signal : on transmet deux bits pour un hertz.

Particularités du code NRZ

- Plusieurs séquences de zéros ne contiennent aucune information sur le rythme. Pour éviter de longues séquences de zéros (de un) on utilise un brouilleur à l'émission et un débrouilleur à la réception. Le brouillage est une opération qui consiste à émettre avec le signal, une séquence pseudo-aléatoire que l'on élimine à la réception à l'aide du débrouilleur.
- Grande facilité de mise en œuvre.

II.2.2.2 Codage HDBn (Haute Densité Binaire d'ordre n)

Principe : le principe de base est le même que pour le codage bipolaire, mais pour éviter une trop longue série de 0, on introduit un bit supplémentaire au signal pour termine une série de n 0 consécutifs. Ce bit supplémentaire est de même phase que le dernier 1 transmis pour pouvoir l'identifier, afin qu'il ne soit pas pris en compte dans l'information transmise.

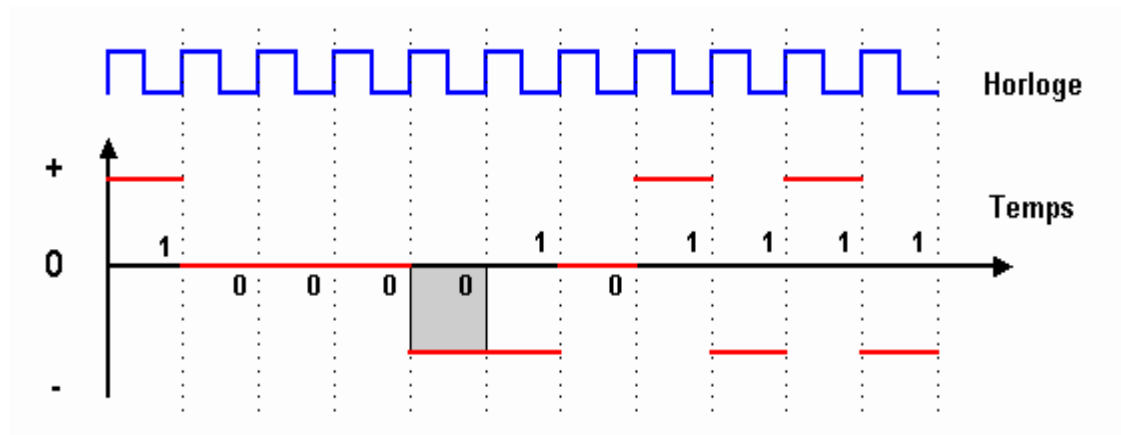


Figure II.4 Codage HDBN

II.2.2.3 Codage NRZI (Non Return to Zero Inverted)

Utilisation : Fast Ethernet (100BaseFX).

Principe : on produit une transition du signal pour chaque 1, pas de transition pour les 0.

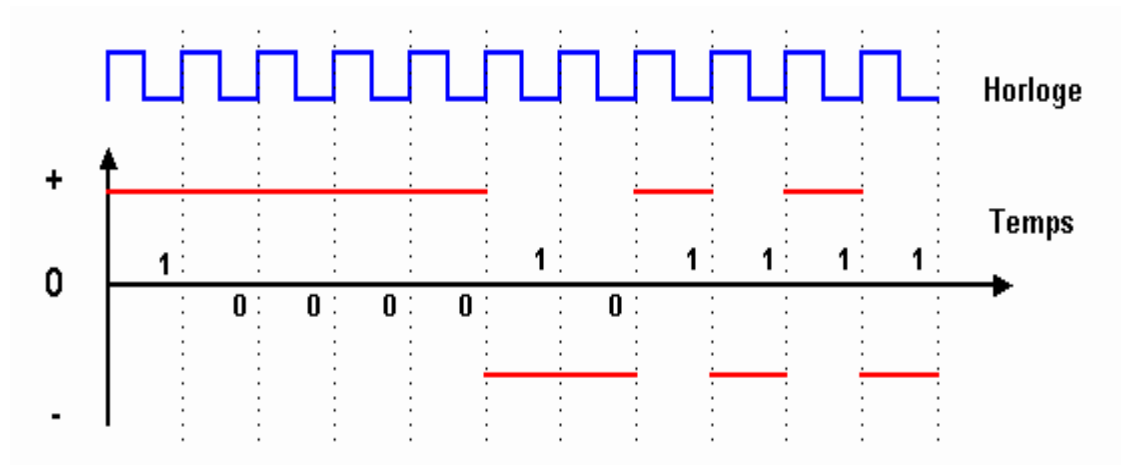


Figure II.5 Codage NRZI.

Avec le codage NRZI, on voit que la transmission de longues séries de 0 provoque un signal sans transition sur une longue période. Le débit binaire est le double de la fréquence maximale du signal : on transmet deux bits pour un hertz.

II.2.2.4 Codage Manchester

Utilisation : Ethernet 10Base5, 10Base2, 10BaseT, 10BaseFL

Principe : dans le codage Manchester, l'idée de base est de provoquer une transition du signal pour chaque bit transmis. Un 1 est représenté par le passage de $+V$ à $-V$, un 0 est représenté par le passage de $-V$ à $+V$.

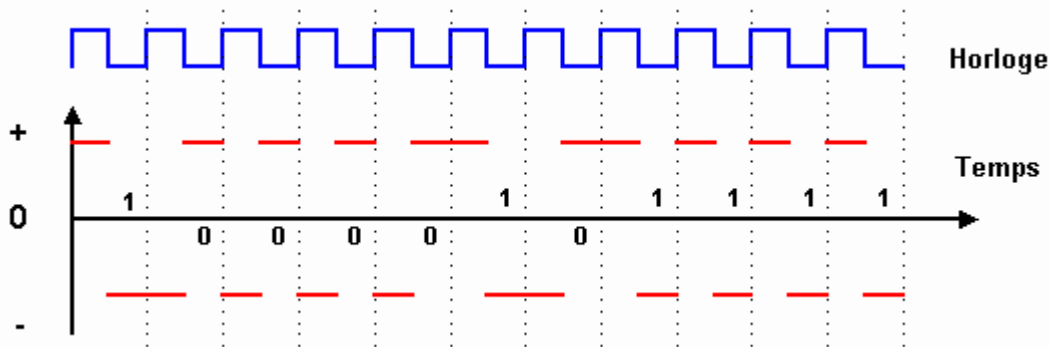


Figure II.6 Codage Manchester.

La synchronisation des échanges entre émetteur et récepteur est toujours assurée, même lors de l'envoi de longues séries de 0 ou de 1. Par ailleurs, un bit 0 ou 1 étant caractérisé par une transition du signal et non par un état comme dans les autres codages, il est très peu sensible aux erreurs de transmission.

La présence de parasites peut endommager le signal et le rendre incompréhensible par le récepteur, mais ne peut pas transformer accidentellement un 0 en 1 ou inversement

II.3 Les modulations numériques de base [1]

On distingue deux grandes classes de modulation :

- Les modulations linéaires, pour lesquelles l'enveloppe complexe du signal modulé dépend linéairement du signal modulant. A cette famille appartiennent les modulations d'amplitude ASK de phase PSK et les modulations combinées d'amplitude et de phase QAM.
- Les modulations non-linéaires sont représentées essentiellement par la modulation de fréquence MDF.

II .3.1 Modulation de fréquence ou FSK (Frequency Shift Keying)

Dans la modulation de fréquence chaque élément binaire à transmettre sera associée à une certaine fréquence de l'onde porteuse, cette modulation est utilisée pour des transmissions à faible débit sur le réseau téléphonique commuté.

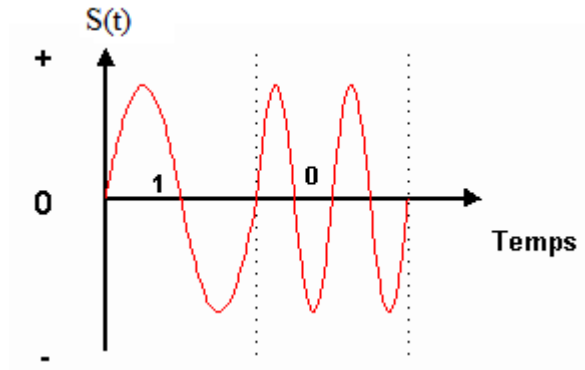


Figure II.7 Modulation FSK

II .3.2 Modulation de phase ou PSK (Phase Shift Keying)

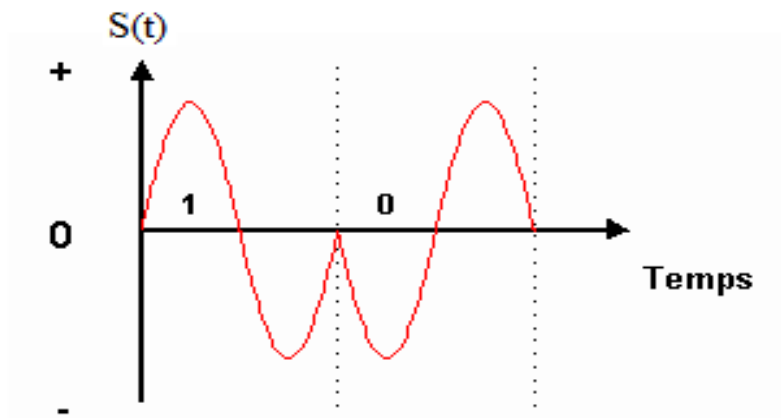


Figure II.8 Modulation PSK.

La modulation de phase associe à un code binaire une valeur de la phase de la porteuse. La vitesse peut être facilement augmentée en utilisant un code binaire sur 2, 3 bits ou plus sans augmentation de la fréquence de la porteuse.

II.3.3 Modulation d'amplitude ou ASK (Amplitude Shift Keying)

La modulation d'amplitude s'applique en faisant varier l'amplitude du signal en fonction des bits à coder. Par exemple :

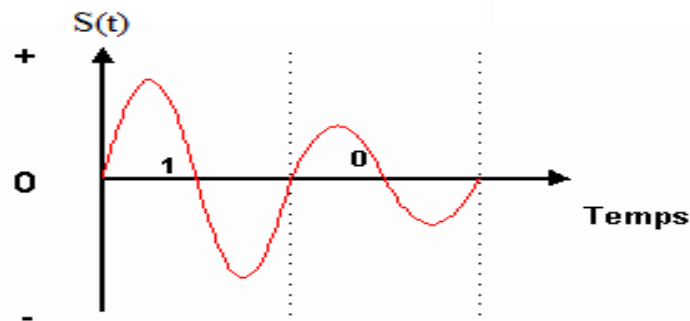


Figure II.9 Modulation ASK.

II .3.4 Modulation QAM

La modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation) ou modulation d'amplitude en quadrature de phase est une technique qui emploie une combinaison de modulation de phase et d'amplitude. Elle est largement employée dans les modems pour leurs permettre d'offrir des débits binaires élevés.

Prenons par exemple un signal modulé QAM avec 3 bits transmis par baud. Une telle modulation requiert donc 2^3 soit 8 combinaisons binaires différentes. Dans notre exemple, nous prendrons 2 amplitudes combinées avec 4 décalages de phase différents. La table de correspondance pourra être du type :

Groupe de bit	Amplitude	Décalage de phase
000	1	0
001	2	0
010	1	$\frac{1}{4}$
011	2	$\frac{1}{4}$
100	1	$\frac{1}{2}$
101	2	$\frac{1}{2}$
110	1	$\frac{3}{4}$
111	2	$\frac{3}{4}$

Tableau II.1 Les combinaisons d'amplitudes et de phases.

Exemple de codage de la suite binaire 1 0 0 0 1 0 1 1 1 1 0 à partir de la table ci-dessus :

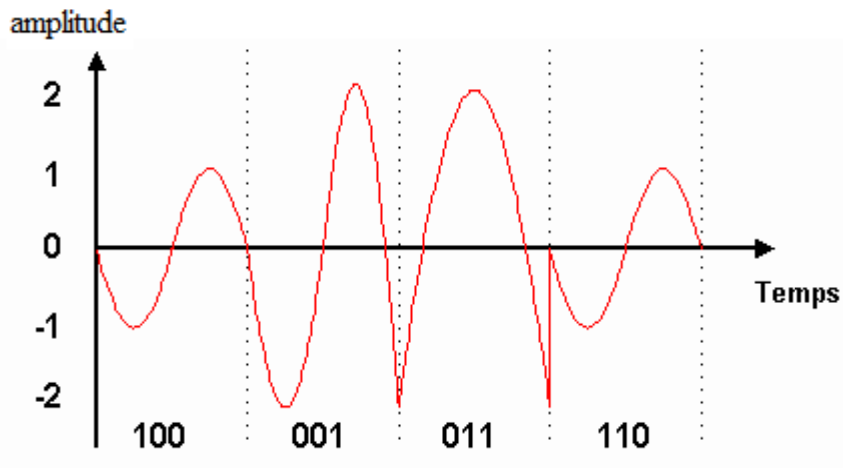


Figure II.10 Modulation QAM

Les combinaisons possibles en modulation QAM sont souvent représentées par une constellation de points représentant chacun un groupe de bits.

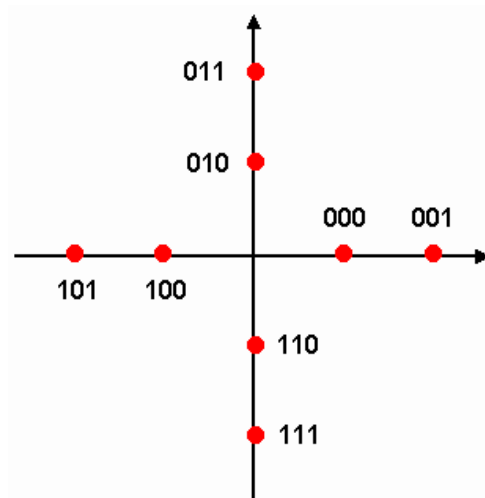


Figure II.11 Exemple de constellation QAM8 (3 bits par baud)

Par exemple l'ADSL est modulé en QAM sur 15 bits au maximum. 32768 combinaisons d'amplitudes et de décalages de phase sont donc nécessaires.

II .4 Types de transmission [15]

II .4.1 Transmission asynchrone

- Les transmissions asynchrones se réalisent pour des systèmes de transmission possédant chacun une horloge différente
- En transmission asynchrone, La transmission n'est pas donc continue mais par paquets séparés par des "silences"

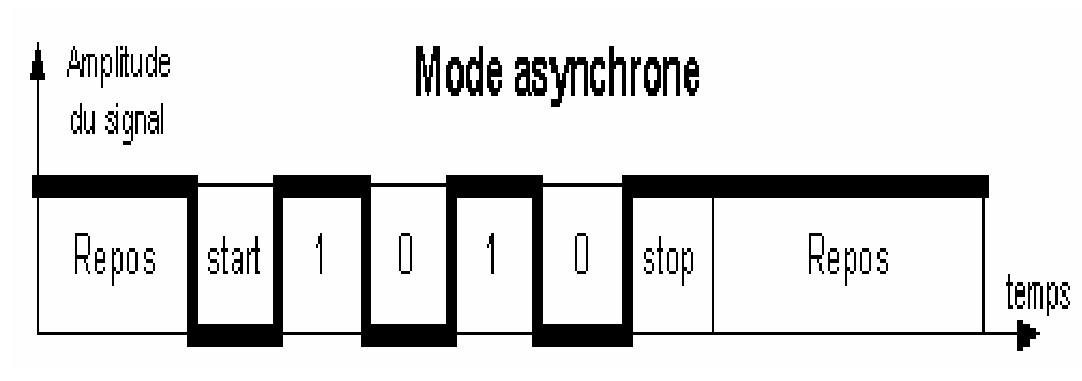


Figure II.11 illustration d'une transmission asynchrone.

Exemple : transmission asynchrone PDH.

- Le bit de Start indique le début d'émission d'un caractère.
- Eventuellement un bit de parité (permet la détection d'erreurs).
- Un à deux bits de stops.

II .4.2 Transmission synchrone

Dans ce mode de transmission, l'émetteur et le récepteur sont synchronisés par la même horloge. Les données sont transmises, les unes après les autres (pas d'intervalles de temps entre des données transmises).

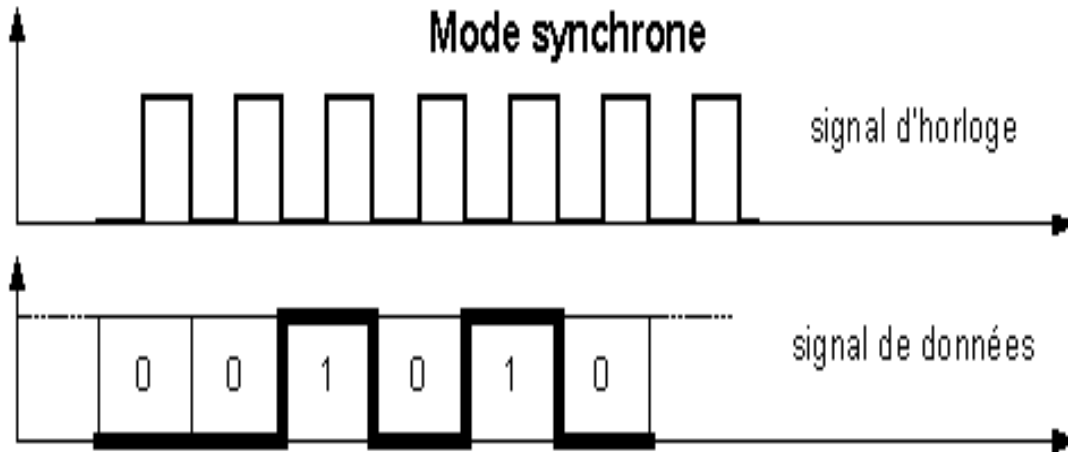


Figure II.12 illustration d'une Transmission synchrone.

II.5 Hiérarchie numérique [15]

Le réseau de transmission numérique actuel est basé sur l'utilisation de la hiérarchie numérique dite "Plésiochrone". Cette technique s'est montrée, au fil des années, quelque peu limitée. En effet, l'évolution des débits des différents services, les besoins en flexibilité du réseau de transmission, la nécessité d'améliorer les fonctions d'exploitation-maintenance, l'augmentation continue de la capacité de transmission sur fibre optique et le besoin d'interconnexion entre opérateurs à des débits élevés et normalisés, tous ces éléments ont montré les limitations de la hiérarchie actuelle et ont conduit à la normalisation de la hiérarchie numérique synchrone SDH (synchronous digital hierarchy).

II.5.1 La Hiérarchie Numérique Plésiochrone (PDH)

Le système PDH est le système de transmission numérique fondé sur le débit d'une voie téléphonique (64Kb/s). Le multiplexage de voies téléphoniques consiste par conséquent en un multiplexage temporel synchrone par caractère de 8 bits.

PDH repose sur deux hiérarchies différentes définies dans des recommandations d'UIT-T :

En Amérique du nord et au Japon la hiérarchie utilise le multiplexage de 24 canaux (soit 24 octet auxquels est ajouté un bit de synchronisation) soit un débit de 1.544Mb/s (recommandation G.733).

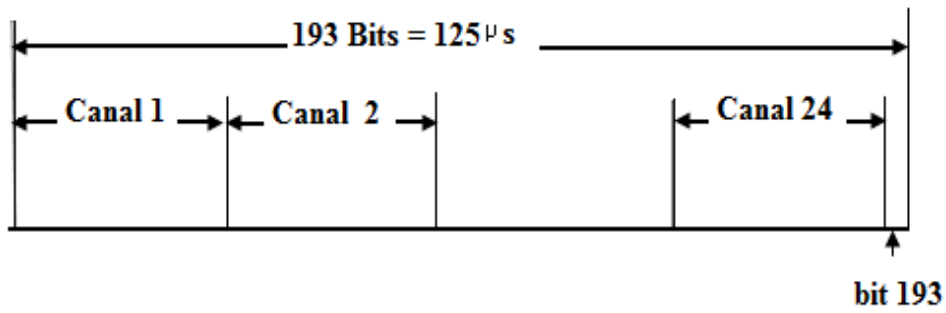


Figure II.13 Multiplexage G.733 (USA et Japon)

En Europe, elle utilise un multiplexage de 32 canaux (soit 32 octets), soit un débit de 2.048 Mb/s (recommandation G.732). (Figure II.14)

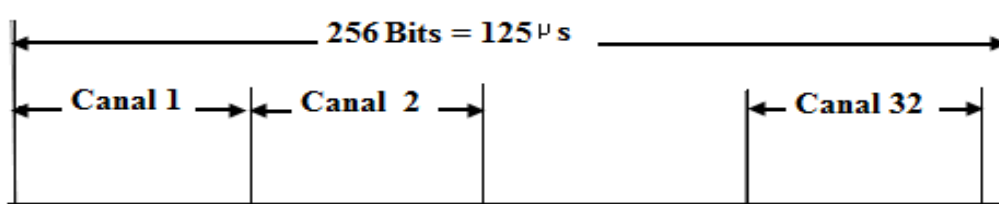


Figure II.14 Multiplexage G.732 (Europe)

La hiérarchie PDH comprend cinq niveaux appelés ordres

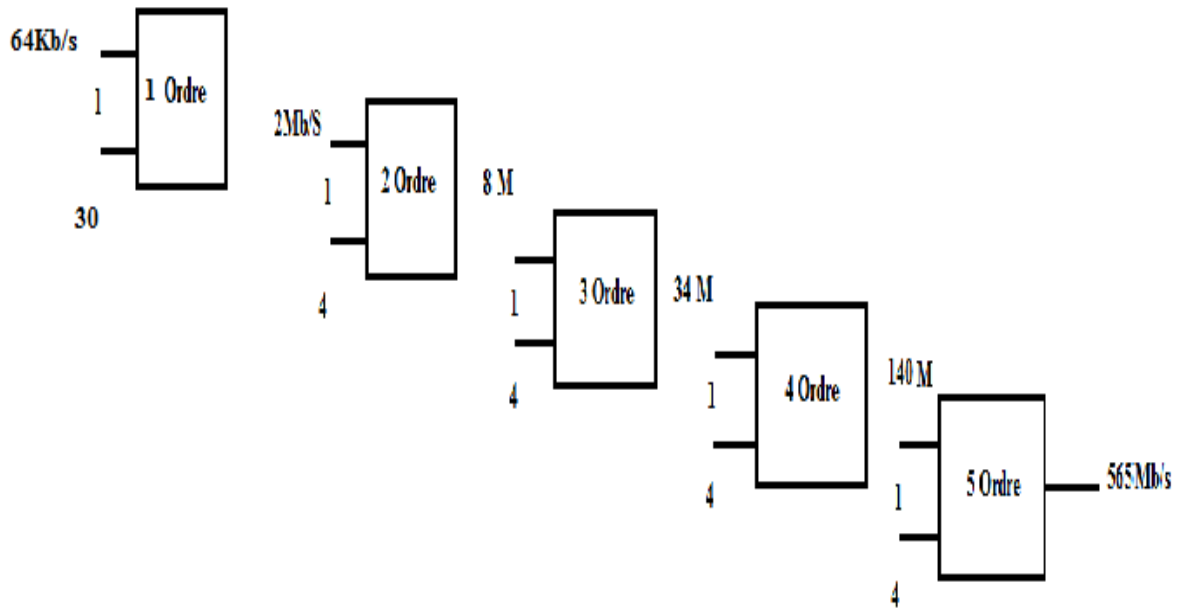


Figure. II.15 Les cinq niveaux de PDH

II.5.2 La Hiérarchie N

Le système SDH Fondé sur les concepts de SONET (Synchronous Optical Network), proposés par Bellcore en 1985, constitue une évolution importante des réseaux de transmission. Les travaux de normalisation ont été lancés en 1986 au CCITT.

En 1988, un premier consensus permettait de définir les principes de base de la SDH. Les travaux n'ont pas cessé depuis et se poursuivent aujourd'hui en particulier sur les architectures du réseau, sa modélisation et sa gestion.

La SDH introduit de nouvelles possibilités dans les réseaux de transmission :

- Souplesse accrue par la possibilité d'extraire ou d'insérer directement un signal constituant du multiplexage de ligne.
- Facilités d'exploitation-maintenance : des débits importants sont réservés à ces fonctions.
- Possibilité d'évolution vers des hauts débits : les trames synchrones haut débits sont construites par multiplexage synchrone de l'entité de base. Cette entité de base définit implicitement toutes les trames haut débit, la limitation n'est plus que technologique.
- Interconnexion de systèmes à haut débit facilitée par la normalisation de la trame de ligne et des interfaces optiques correspondantes

- Architectures de réseaux assurant la sécurisation contre les défauts de ligne ou d'équipement.

II.5.2.1 La trame de base

La structure de multiplexage s'articule autour d'une trame de base organisée en octets : le signal STM-1 (Synchronous Transfer Module d'ordre 1). Cette trame (figure II.16) possède les caractéristiques suivantes :

- longueur totale : 2 430 octets.
- durée de 125 microsecondes (fréquence de répétition de 8 kHz).
- débit résultant : 155,520 Mbit/s.

Cette trame représentée ci-dessous comporte trois zones réservées respectivement à :

- la capacité utile (2 349 octets, soit 150,336 Mbit/s).
- le surdébit de section (SOH : Section Overhead), et le SOH se divise en deux niveaux de gestion à savoir le RSOH et le MSOH.

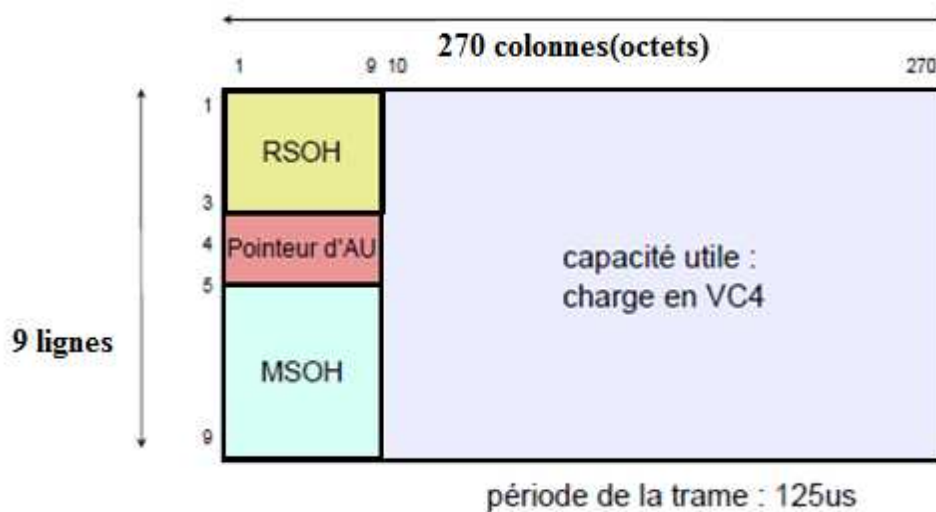


Figure II. 16 La trame de base STM1.

- **le pointeur (POH)**

Pour la norme SDH Les niveaux sont organisés hiérarchiquement en STM – n (Synchronous Transport Module, niveau n). Tandis que pour la norme SONET, les niveaux sont classés en OC : Optical Container (tableau. II.2).

SDH	SONET	DEBIT
STM - 1	OC - 3	155 Mb/s
STM - 2	OC - 12	622 Mb/s
STM - 16	OC - 48	2.5 Gb/s
STM - 64	OC - 192	10 Gb/s
STM - 128	OC - 348	20 Gb/s
STM - 256	OC - 768	40 Gb/s

Tableau .II.2 Les niveaux de la norme SDH/SONET

II.5.2.2 Principe de multiplexage

- **Le conteneur virtuel**

Les signaux à transporter dans le réseau de transmission synchrone sont tout d'abord enveloppés dans un "conteneur". A chaque conteneur est associé un surdébit de conduit (POH pathover head) réservé à l'exploitation de ce conduit. Le conteneur et son surdébit associé forment un "conteneur virtuel" (VC : virtual container). Il est important de noter que ce sont ces conteneurs virtuels qui sont gérés dans le réseau SDH indépendamment des signaux qu'ils transportent. La taille des différents VC est adaptée au transport des signaux de la hiérarchie Plésiochrone (VC11 : 1,5 Mbit/s, VC12 : 2 Mbit/s, VC2 : 6 Mbit/s, VC3 : 45 Mbit/s, VC4 : 140 Mbit/s).

- **La structure de multiplexage :**

La structure de multiplexage normalisée définit les règles qui permettent d'assembler les conteneurs virtuels. Le multiplexage des signaux affluents pour former le multiplex haut débit s'effectue en deux étapes (figure II.17) :

- multiplexage de VC d'ordre inférieur (VC11, VC12, VC2 et VC3) dans les VC d'ordre supérieur (VC4 en Europe, VC3 aux Etats-Unis et au Japon).

- multiplexage des VC d'ordre supérieur (VC4 en Europe) pour former le signal résultant haut débit. La trame haut débit, appelée STM-N est obtenue en multiplexant N trames de base par entrelacement direct d'octets.

A chaque étape de multiplexage correspond un niveau de pointeur. Le multiplexage se fait en une seule étape lorsque l'on veut acheminer un signal à 140 Mbit/s.

Le conteneur virtuel avec le pointeur forme une unité administrative AU (Administrative Unit). Les unités administratives sont de deux niveaux possibles : AU3 et AU4 en fonction du débit. Le niveau STM 4 et STM 16 sont formés respectivement de 4 et 16 trames de base STM1

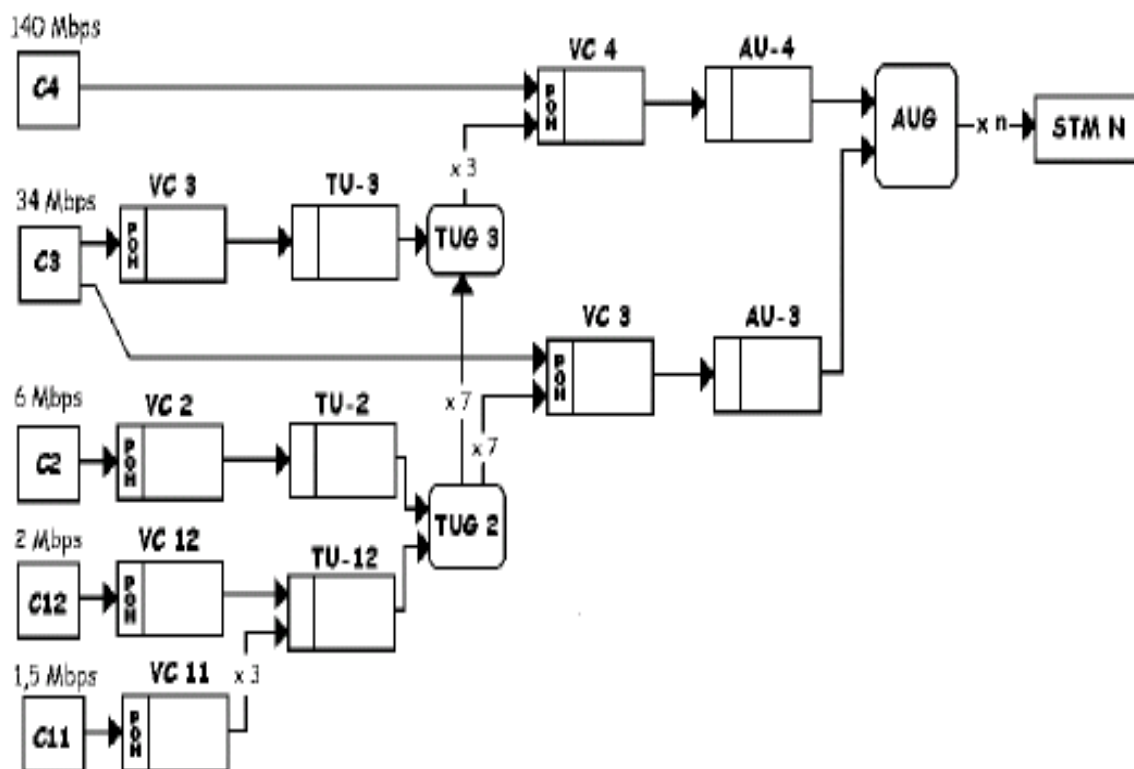


Figure II.17 structure de multiplexage SDH

II.6 Les techniques de multiplexage [14]

Lorsque plusieurs liaisons de données sont nécessaires entre deux sites, il est généralement plus économique d'utiliser une seule ligne partagée sur laquelle seront transmis les messages des différents équipements plutôt que de réaliser autant de liaisons points à points.

II .6.1 Multiplexage temporel TDM

Le multiplexage TDM (Time Division Multiplexing) ou MRT (Multiplexage à répartition dans le temps) consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant et à tour de rôle pour chaque utilisateur. Le multiplexage TDM permet aussi d'échantillonner les signaux de différentes voies à faibles débits et de les transmettre successivement sur une voie à haut débit en leur allouant la totalité de la bande passante.

Le multiplexage TDM permet de regrouper plusieurs canaux de communications à bas débits sur un seul canal à débit plus élevé.

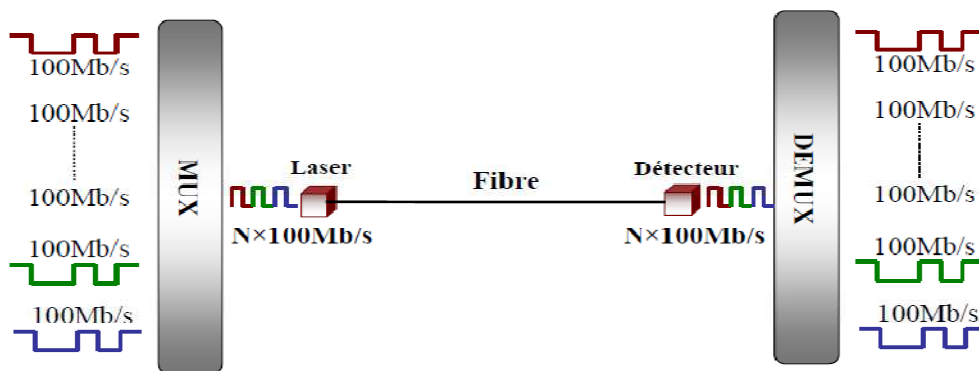


Figure II.18 Schéma de principe d'un multiplexage à répartition dans le temps.

II.6.2 Multiplexage fréquentiel (FDM, Frequency Division Multiplex)

C'est la technique la plus ancienne qui était la seule lorsque le téléphone était purement analogique. A chaque interlocuteur, ou chaque message, est alloué une bande de fréquence. En pratique le message est utilisé pour moduler (à l'origine en amplitude, parfois avec suppression de porteuse) une fréquence porteuse. Les différentes porteuses ainsi modulées sont juxtaposées et l'ensemble transmis sur le canal.

A la réception des filtres sélectifs isolent les différentes porteuses qui sont démodulées.

Si les fréquences porteuses sont parfaitement connues ou restituées, il est possible d'effectuer une démodulation cohérente (synchrone).

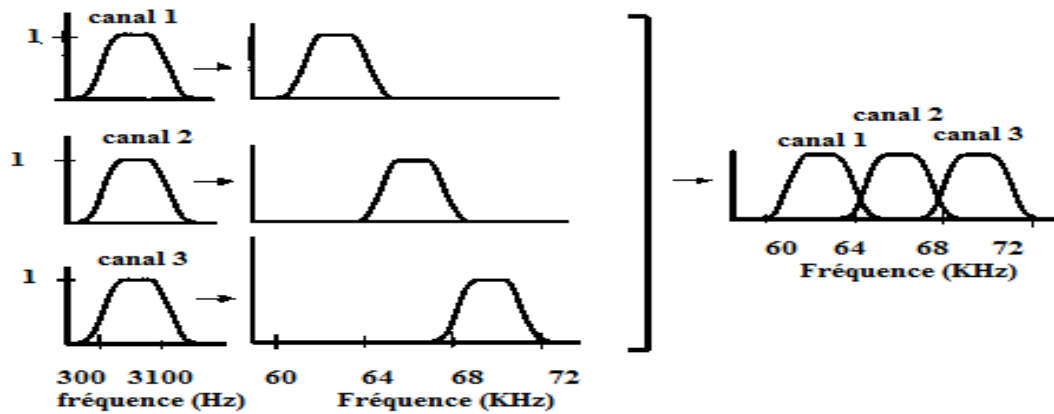


Figure II.19 Multiplexage fréquentiel FDM.

II. 6.3 Multiplexage WDM/DWDM

A l'inverse de la technologie TDM qui n'utilise qu'une seule longueur d'onde par fibre optique, la technologie WDM (Wavelength Division Multiplexing) met en œuvre un multiplexage de longueurs d'onde. L'idée est d'injecter simultanément dans une fibre optique plusieurs trains de signaux numériques sur des longueurs d'ondes distinctes.

La fibre optique se prête bien à ce type d'usage car sa bande passante est très élevée : de l'ordre de 25 000 GHz. Elle présente donc un fort potentiel au multiplexage de très nombreux canaux sur de longues distances.

La norme ITU-T G692 définit la plage de longueurs d'ondes dans la fenêtre de transmission de 1530 à 1565 nm. L'espacement normalisé entre deux longueurs d'ondes est de 1,6 ou 0,8 nm. La fibre optique utilisée est de type monomode.

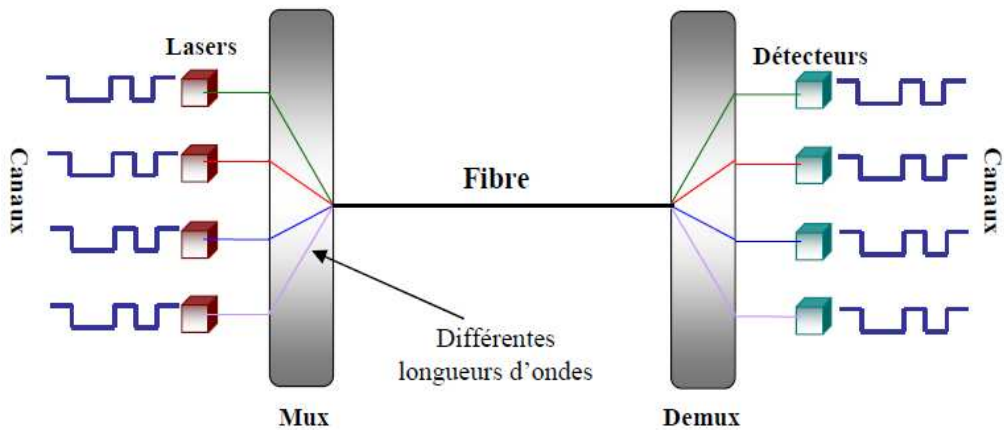


Figure II.20 Schéma synoptique de principe d'un multiplexage WDM.

La technologie WDM est dite DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) lorsque l'espacement utilisé est égal ou inférieur à 0,8 nm ou lorsque plus de 16 canaux sont utilisés. Des tests ont déjà été effectués avec des espacements de 0,4 et 0,2 nm.

Conclusion

L'objectif de la transmission est de faire transporter les données (voies, images,.....etc.) d'une source vers une destination, en minimisant au maximum les pertes, c'est pour cela que la transmission numérique synchrone est la plus adaptée. Ce sont d'une part les amplificateurs optiques, et d'autre part, un nouveau principe de multiplexage-démultiplexage en longueur d'onde nommé WDM, ce dernier permet de transporter plusieurs signaux sur une seule fibre optique qui sera l'objet du chapitre prochain.

CHAPITRE III
TECHNOLOGIE WDM.

Introduction

La demande croissante de la part des opérateurs pour de nouveaux services de télécommunication à large bande, a été à l'origine des travaux sur les réseaux optiques synchrones. Les premiers résultats concernant les réseaux optiques synchrones (SONET) ont été publiés aux Etats-Unis fin 1986, toute la difficulté de la normalisation a été de trouver un compromis entre les intérêts américains, européens et japonais afin de garantir l'interconnexion des différents réseaux des opérateurs.

C'est finalement un débit de 51,84Mb/s qui a été retenu pour former le premier niveau STS-1 (Synchronous Transport Signal, level). En février 1988, en Corée, des accords internationaux ont abouti à une nouvelle série de recommandations :

- G 707 (Synchronous Digital Bit Rate).
- G 708 (Network Node Interface For the synchronous digital hierarchy).
- G 709 (Synchronous Multiplexing Structure).

Ces accords sur la SDH (Hiérarchie Numérique Synchrone) furent ratifiés par le CCITT. La SDH pallie les principaux défauts du PDH (Plésiochrone digital hiérarchie) et supporte des débits très élevés.

Elle garantit la transmission dans une même trame des services de types et débit différent (paroles, images, communications multimédia, interconnexion des réseaux locaux, RNIS large bande, mode de transmission ATM).

Les réseaux SDH les plus déployés sont aujourd'hui des réseaux combinant les niveaux STM 1, STM-4 et STM-16.

- STM-1 : avec un débit de 155.52Mbits/s.
- STM-4 : avec un débit de 622.08Mbits/s.
- STM-16 : avec un débit de 2488.32Mbits/s.
- STM : Synchronous Transport Module (Module de Transport Synchrone).

Avec l'avènement du réseau de communication Internet au milieu des années 90, la demande en terme de bande passante qui ne cessera pas d'augmenter du fait de l'importance des tailles de fichiers de données transmises (voix, images, vidéos, ...). En effet, la popularité et la facilité d'accès à ce réseau ont impliqué une demande en bande passante doublant approximativement tous les 6 à 9 mois. Le défi consistait donc à trouver un nouveau concept capable d'intégrer et de gérer cette demande en pleine évolution.

L'introduction du multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexer) permet d'accroître la capacité de transmission des fibres en multipliant les longueurs d'onde transmises dans une même fibre, cela tout en utilisant le réseau existant.

Au début de l'année 1997, le nombre de longueurs d'onde maîtrisée dans une même fibre était de 2 à 4. En 1998, il existait commercialement des versions de multiplexeurs optiques de 8 à 16 voies et on parlait déjà de 32 voies. On ne parle alors plus de simple WDM mais de DWDM (Dense WDM). Fin 1999, il existe des versions commerciales à 64 voies. Des expériences, sur le terrain réussi pour 96 voies et des testes en laboratoire pour plus de 130 voies.

Le multiplexage en longueur d'onde est une technologie de transport indépendante des protocoles utilisés : tout signal qui peut être transmis sur une fibre optique peut être multiplexé avec un autre signal. Ainsi, on peut trouver sur une même fibre de la voix dans des trames SDH, de la vidéo dans des cellules ATM, des données dans des trames IP, etc.

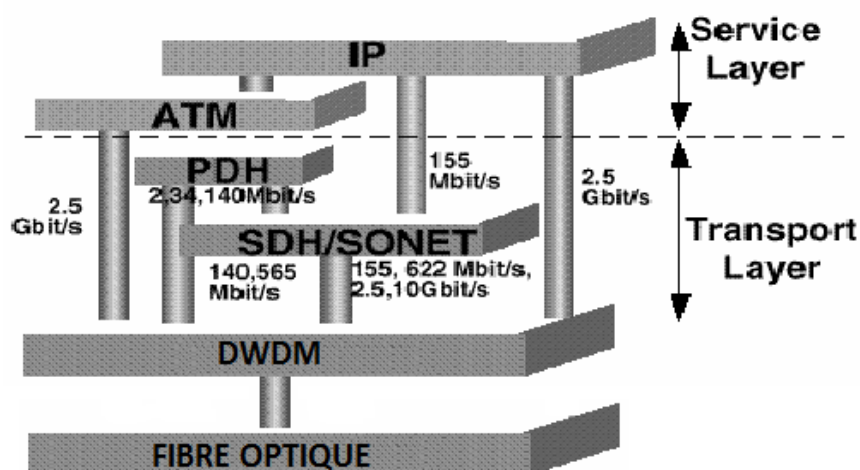


Figure III.1 Combinaison entre les différentes couches de services et transports.

Aujourd'hui, l'utilisation couplée de SDH et WDM permet d'obtenir des réseaux optiques intégrant les points forts de SDH : fiabilité des transmissions et gestion de la bande passante. Ces réseaux sont actuellement en pleine expansion partout dans le monde.

III.1 Principe de base

Le principe de la technologie WDM consiste à injecter simultanément dans une même fibre optique plusieurs trains de signaux numériques à la même vitesse de modulation, mais chacun à une longueur d'onde (ou couleur) différente, ce qui donne la configuration suivante :

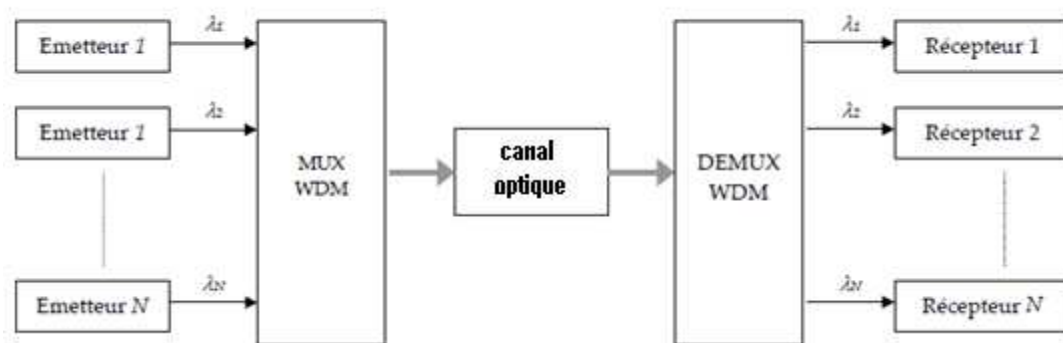


Figure III.2 Principe d'une liaison WDM.

À l'émission, on multiplexe N canaux (ou couleur) au débit nominal D; à la réception on démultiplexe le signal global $N \times D$ en N canaux. Chaque fibre transporte donc un multiple de N canaux, ce qui est équivalent en terme de capacité à N fibres transportant chacune un canal.

Il est facile de voir que cette approche permet d'augmenter la capacité d'un réseau de manière importante en présentant le gros avantage d'exploiter les fibres existantes sans modifier l'infrastructure. La courbe d'affaiblissement en fonction de la fréquence permet de définir des fenêtres de transmission autour des 1310 et 1550 nanomètre dans lesquelles un seul canal numérique est acheminé. L'industrie et l'exploitation étaient sensibilisées par les points sensibles représentés par la tenue au câblage, la régularité géométrique de la fabrication de la fibre et des connecteurs, la dispersion du mode de polarisation (PMD), etc. cette technologie était encore pénalisée par l'existence, dans la fibre, d'un pic d'affaiblissement créé par les ions OH dans la bande E qui astreignait à séparer les deux fenêtres de transmission lors de l'amplification. Progressivement, furent résolus la sujétion du pic OH pour toutes les fibres, et les effets non linéaires qui apparaissent entre canaux de transmission

voisins lorsque la portée est étendue et que le nombre de canaux sur la même fibre est augmenté. Les bandes de transmission sont classées aujourd'hui par l'UIT-T selon la terminologie suivante :

- Bande O : de 1260 à 1360 nm (original) ;
- Bande E : de 1360 à 1460 nm (extended)- position du “ pic d'eau“ ;
- Bande S : de 1460 à 1530 nm (short wavelength) ;
- Bande C: de 1530 à 1565 nm (conventional);
- Bande L: de 1565 à 1625 nm (long) ;
- Bande U: de 1625 à 1675 nm (ultra long wavelength).

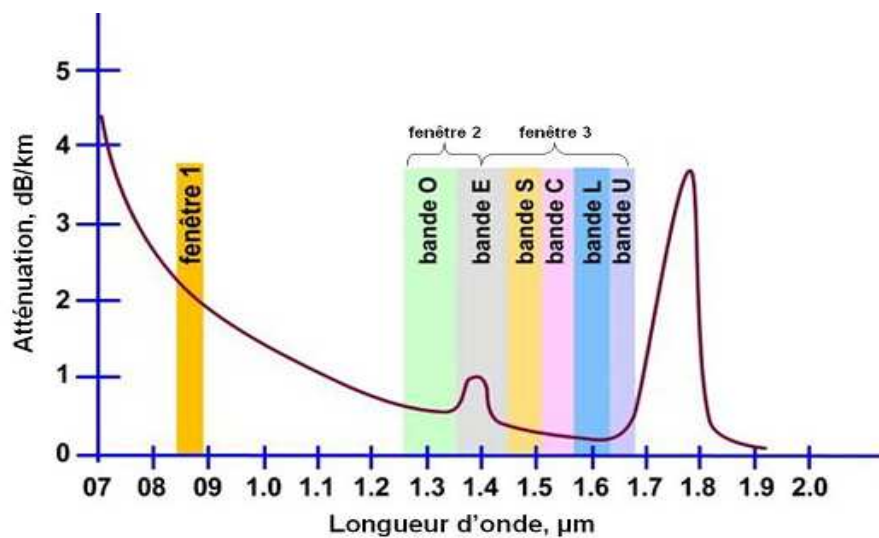


Figure.III.3. Courbe d'atténuation de la silice incluant les fenêtres de transmission.

III. 2 Développement des capacités [9]

Pour augmenter la capacité totale d'un système WDM, il est possible de jouer sur le débit transporté par chaque canal ou sur le nombre de canaux, voir sur les deux en même temps.

- **Augmentation de débit par canal**

Les progrès de l'électronique rapide, l'intégration des composants électroniques et optiques, permettent de traiter dans les équipements d'extrémités, des débits de plus en plus élevés. Si les premiers systèmes WDM travaillaient avec des débits de 2,5Gbit/s, rapidement des transmissions à 10Gbit/s sont apparues pour atteindre aujourd'hui des débits de 40Gbit/s

par canal. Mais cette augmentation du débit rend le signal de plus en plus sensible aux défauts de la propagation, tant linéaires que non linéaires. Ainsi, la dispersion chromatique autour de 16,5ps/ (nm.km) à 1550nm pour une fibre de type SMF-28(Single Monomode Fiber), néfaste à la transmission d'information, ne pourra plus être négligée et des solutions de compensation de dispersion devront être trouvées et développées. De même l'apparition de puissance injectée plus élevée ainsi que la dispersion modale de polarisation seront aussi des facteurs de dégradation très importants et leurs impacts devront être maîtrisés.

- **Augmentation du nombre de canaux(DWDM)**

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

III.3 Composants pour WDM [5]

La Figure III.4 ci-dessous 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-démodulateurs (ou modems) à chaque voie, ainsi qu'en multiplexeurs et 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 à des fins de transmission alors que les démultiplexeurs séparent ces mêmes signaux à des 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, sans oublier les amplificateurs optiques qui sont à l'origine d'une grande révolution dans les domaines des télécommunications.

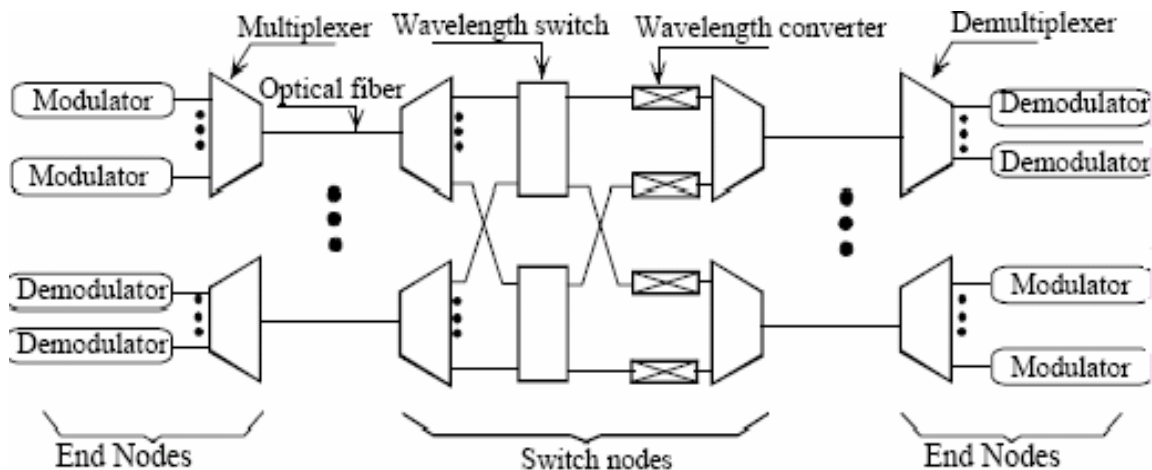


Figure III.4 Principales composantes d'un réseau DWDM.

III .3.1 Sources optiques pour WDM [6]

Depuis le début des années 1990, le développement des télécommunications par fibres optiques est en plein essor. Simultanément, les différentes architectures de réseaux envisagées soulèvent de nouvelles difficultés auxquelles tentent de répondre les différents groupes de recherche. En particulier, au niveau des sources optiques, la mise au point d'un laser, capable à lui seul, de produire des impulsions de différentes longueurs d'onde apparaît comme un pas décisif vers l'intégration et l'amélioration des performances.

Les lasers multicolores fournissent maintenant des longueurs d'onde précises et stables permettant la transmission simultanée de 200 canaux à haut débit sur une même fibre. La dérive de longueur d'onde ne dépasse pas $\pm 0,1$ nm en 15 ans dans la plage de température propre aux télécommunications (de -5°C à $+ 70^{\circ}\text{C}$).

Il est actuellement possible de fabriquer des émetteurs laser avec un espacement de 0,4 nm entre longueurs d'onde adjacentes du peigne de l'UIT-T. Cela correspond à un espacement des fréquences de 50 GHz. Des procédés à longueurs d'onde multiples permettent maintenant d'obtenir jusqu'à huit canaux en une seule étape de traitement et donc une plus grande capacité de puces laser par plaque. Pour réduire au minimum le coût global du système

en compensant les pertes dans les multiplexeurs passifs WDM, des lasers plus efficaces offrant des puissances jusqu'à 40mW on été développés.

III. 3. 2 Les convertisseurs en longueurs d'ondes [6]

A la périphérie d'un réseau optique il faut convertir un signal entrant, Sonet-SDH OC3, OC12, OC48, OC192, Gigabit Ethernet en un signal DWDM, lui associer une longueur d'onde qui va le représenter dans le réseau optique. En sortie on réalise l'opération inverse. Les convertisseurs sont indépendants du protocole ; il existe une interface Sonet-SDH et une interface pour les débits de 100 Mbs à 1.5 Gbs. Ces convertisseurs peuvent être intégrés à l'équipement source (routeur IP, commutateur ATM), ou à l'équipement DWDM « transponder »

III. 3. 3 les multiplexeurs/démultiplexeurs optiques [1]

Le multiplexage optique regroupe côte à côte des signaux occupant des bandes de fréquence différentes, tandis que la fonction réciproque, le démultiplexage, permet de séparer des signaux occupant des bandes de fréquences différentes. Ces dispositifs sont donc des éléments essentiels dans les systèmes de transmission utilisant plusieurs longueurs d'ondes sur une même fibre. Les multiplexeurs optiques peuvent être classés en trois catégories principales selon la technique utilisée :

- Multiplexage à filtre optique.
- Multiplexage à coupleur sélectif.
- Multiplexage à réseau de diffraction.
- Multiplexage à réseau de Bragg.

III.3.3.1 multiplexage à filtre optique

Les filtres permettent la séparation spectrale en réfléchissant une certaine gamme de longueurs d'ondes et en transmettant les autres. En caractérisera par conséquent le filtre par sa bande passante, c'est-à-dire le domaine de fréquence (ou de longueur d'onde) pour lesquelles il laisse passer la lumière et la bande atténué c'est-à-dire le domaine de fréquence (ou de longueur d'onde) pour lesquelles il réfléchit la lumière incidente. Ces deux domaines spectraux peuvent être très larges notamment pour les filtres passe-haut et passe-bas utilisé couramment. Deux types sont utilisés, les filtres dichroïques et les filtres Fabry-Pérot.

- **Les filtres dichroïques :** Ces dispositifs présentent un pic de réflexion à une longueur d'onde donnée. Il est possible d'accroître le domaine de réflexion en empilant des couches successives et d'obtenir ainsi des filtres passe haut et passe bas. Les filtres dichroïques sont donc constitués par un empilement des couches diélectrique d'indice alternativement haut et bas. Le filtre est caractérisé par son coefficient de transmission T en bande passante, et son coefficient de réflexion R en bande atténuée.

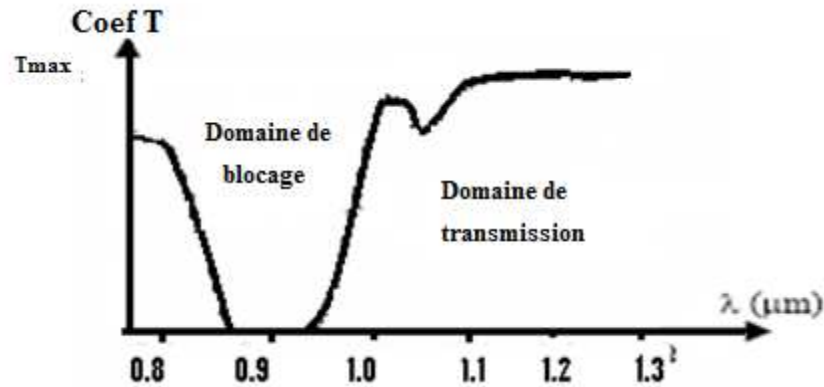


Figure III.5. Courbe de transmission d'un filtre dichroïque (0,8/1,3 μm).

- **les filtres Fabry-Pérot**

Il présente un pic de transmission étroit autour d'une longueur d'onde λ_0 et les domaines spectraux adjacents sont réfléchis. La largeur du pic à mi-hauteur est liée au rapport des indices et au nombre de couches constituant l'empilement de base. Pour accroître la raideur du filtre on peut répéter l'empilement pour constituer un assemblage à deux ou trois cavités. Les profils spectraux adaptés aux transmissions sur fibre optique nous conduisent à des empilements à trois ou quatre cavité.

- **Utilisation de ces deux types de filtres**

Une application est la réalisation de la fonction démultiplexage optique qui effectue une séparation chromatique sur une ligne de transmission à fibre optique. Une solution adoptée sur certains dispositifs est le dépôt du filtre sur l'extrémité d'une fibre optique.

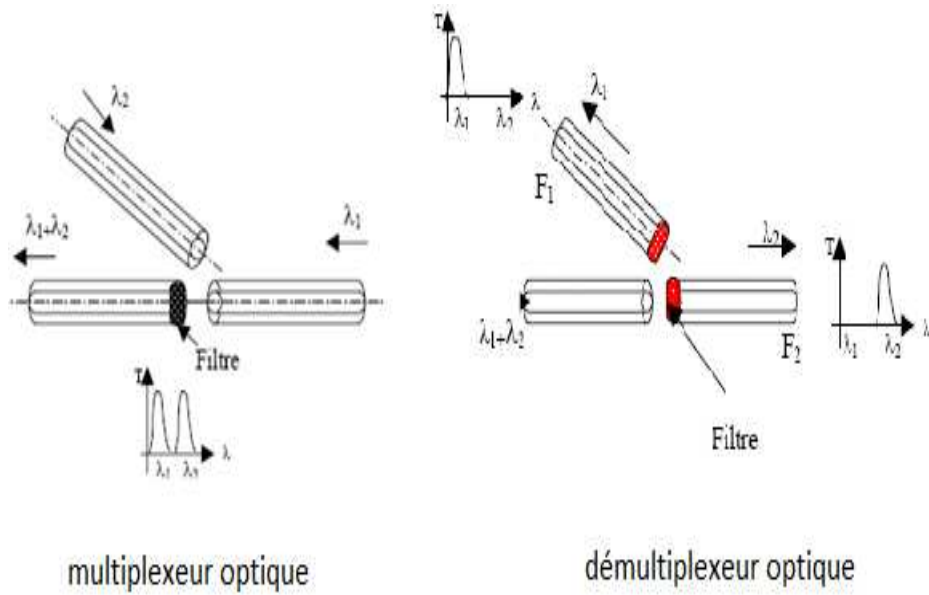


Figure III.6 multiplexeur/démultiplexeur à filtre optique.

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

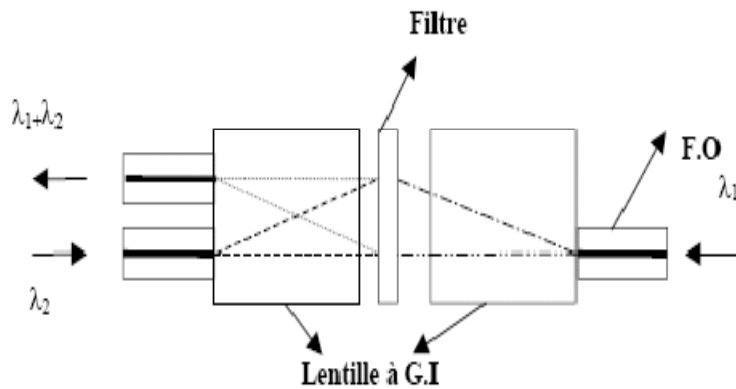


Figure III.7 Multiplexeur à filtre avec lentille à G.I

III .3. 3.2 Multiplexage à coupleur sélectif [1]

Dans les réseaux de fibre optique, les coupleurs permettent de distribuer le signal optique reçu vers plusieurs fibres ou acheminent le signal de plusieurs fibres vers une seule. Ils sont utilisés également pour prélever une partie de la puissance optique afin de surveiller sa stabilité ou pour mesurer des réflexions.

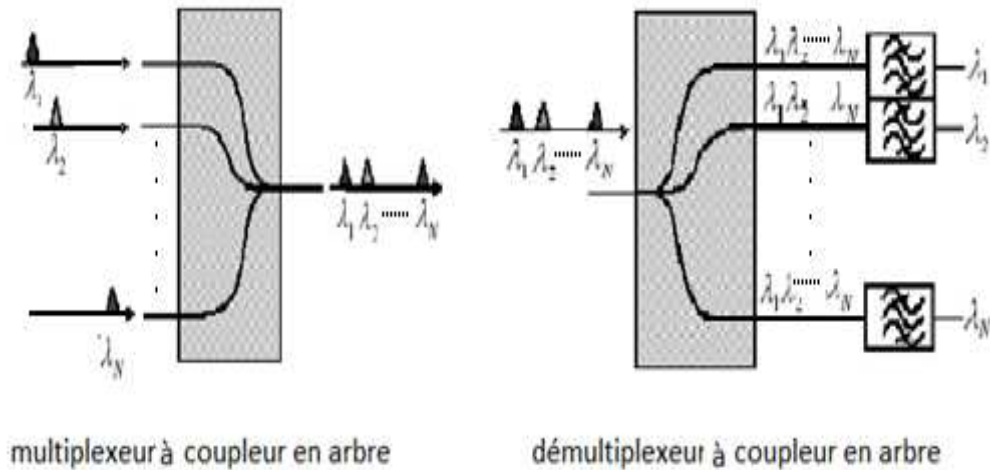


Figure III.8 Multiplexeur/Démultiplexeur à coupleur en arbre.

III.3.3.3 multiplexage/Démultiplexage à réseau de réfraction [14]

Grâce au caractère dispersif du réseau, un faisceau polychromatique incident est décomposé en composantes spectrales qui peuvent être isolées. Les faisceaux émergents seront couplés dans des fibres optiques installées dans le plan focal d'une lentille. On se trouve en présence d'un démultiplexeur en longueur d'onde.

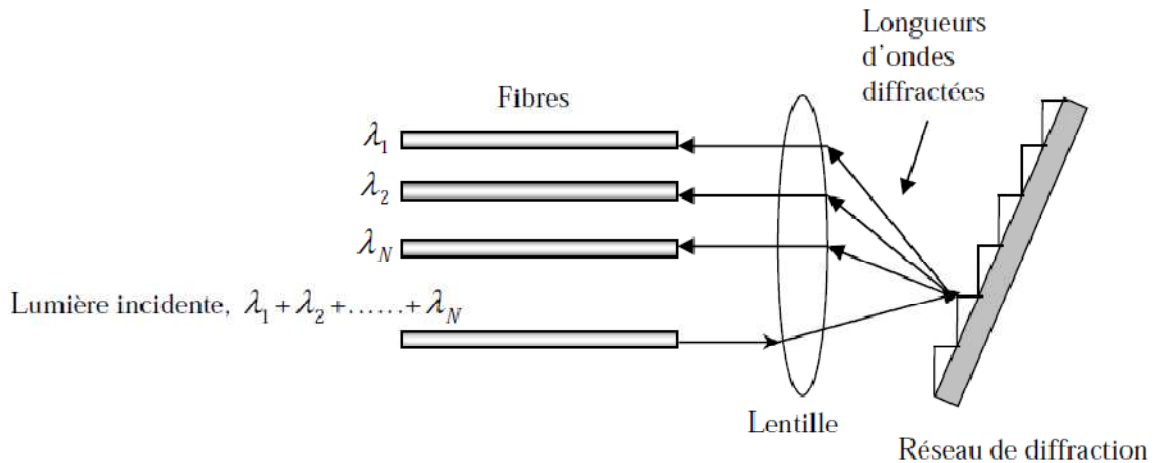


Figure III.9 Démultiplexeur en longueur d'onde à réseau de diffraction.

III.3.3.4 multiplexage/Démultiplexage à réseau de Bragg [14]

Le multiplexage de plusieurs longueurs d'onde sur une fibre (WDM) permet non seulement d'accroître la capacité des lignes, mais facilite aussi la redistribution du signal. Pour cela la technologie des réseaux de Bragg se révèle d'un grand intérêt. Le réseau de

Bragg consiste en une variation périodique de l'indice de réfraction du cœur de la fibre s'il s'agit d'un réseau de Bragg sur fibre ou bien de l'indice de réfraction du guide s'il s'agit d'un réseau de Bragg sur guides d'ondes qui sont les milieux dans lesquels se propage le signal.

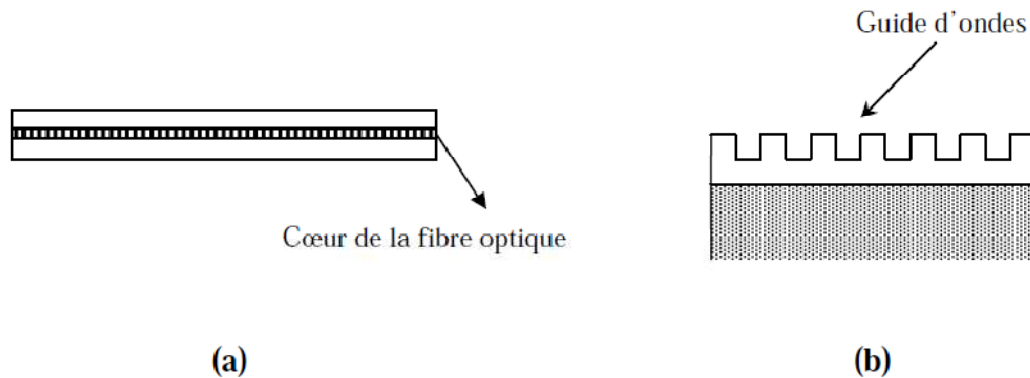


Figure III.10 Réseau de Bragg : (a) intégré dans une fibre optique (b) intégré dans un guide d'ondes.

III.3.4 L'impact du design des fibres optiques dans le cadre d'une transmission WDM [9]

III.3.4.1 Les paramètres cruciaux à gérer

Le domaine des communications optiques est aujourd'hui caractérisé par une augmentation de la demande en terme de capacité de transmission. Cependant, il persiste certaines limitations inhérentes à la fibre elle-même. La sensibilité aux défauts de propagation augmente avec le débit, que ce soit pour les effets linéaires dus à la dispersion chromatique et la dispersion de mode de polarisation de la fibre, ou les effets non linéaires essentiellement induits par l'effet Kerr. Nous présenterons dans la suite de ce chapitre ces facteurs qui limitent la capacité d'une transmission optique en termes de débit et de distance et qui dépendent de la fibre optique elle-même.

III.3.4.1.1 La dispersion chromatique

Lorsqu'une impulsion se propage en régime linéaire dans une fibre optique, cette dernière subit un phénomène de dispersion qui se traduit physiquement par un étalement temporel :

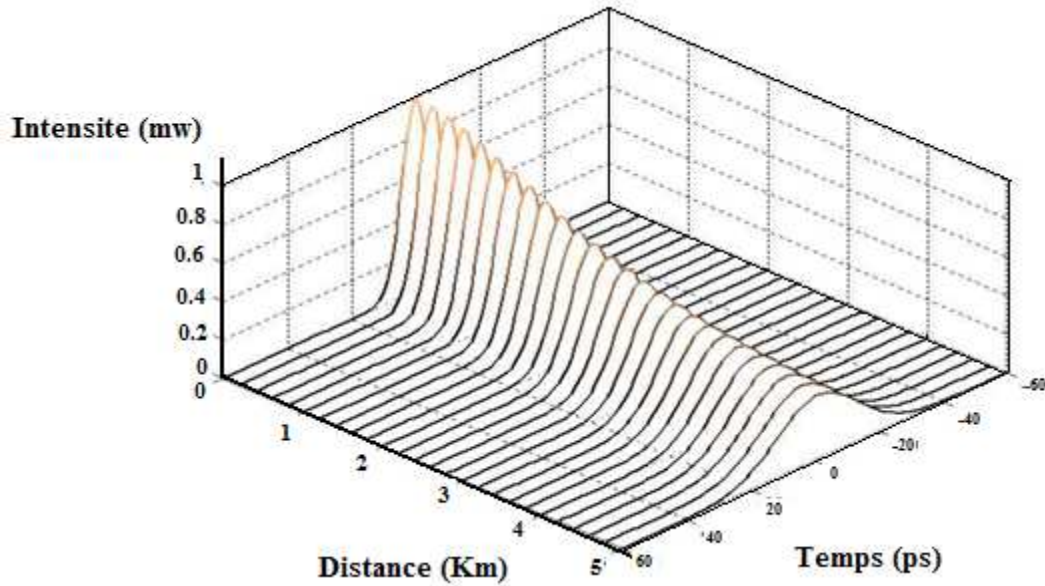


Figure III.11 Elargissement d'une impulsion au cours de la propagation.

Dans le cas où l'impulsion est gaussienne, on peut évaluer simplement sa nouvelle largeur au moyen de la dispersion des vitesses de groupe (β'') est donnée par la formule:

$$T = T_0 \sqrt{1 + \left(\frac{2|\beta''|z}{T_0^2} \right)^2} \quad (\text{III.1})$$

Avec T_0 la largeur de l'impulsion gaussienne de départ.

On exprime communément la dispersion chromatique comme étant la somme de la dispersion du matériau et de la dispersion du guide :

$$D_{ch} = D_{guide} + D_{mat} \quad (\text{III.2})$$

Avec : D_{guide} (dispersion du guide), D_{mat} (dispersion du matériau), D_{ch} (dispersion chromatique).

Cette grandeur s'exprime pour les fibres en ps/(nm.km), traduisant une différence de temps de propagation entre deux fréquences (en ps) pour 1nm d'écart en longueur d'onde et pour 1km de propagation.

○ **La pente de la dispersion chromatique :** Sachant que les systèmes WDM travaillent sur toute une bande de longueur d'onde, il est primordial de connaître l'évolution de la dispersion chromatique sur tout le spectre. C'est pourquoi une caractéristique importante pour ces réseaux est la valeur de la pente de dispersion chromatique. Elle est exprimée en ps/(nm².km). De gros efforts de conception sont mis en œuvre pour gérer ce phénomène de plus en plus critique avec la montée en débit.

III.4.1.2 La dispersion modale de polarisation (PMD)

La PMD affecte les transmissions par fibre et devient gênante pour des communications à 40 Gb/s se propageant sur plus de 200 km. La valeur de cette dispersion est faible, mais pas forcément négligeable devant la dispersion chromatique. Pour les fibres modernes standard, la PMD est typiquement de l'ordre de 0,05ps/km^{1/2}.

III.4.1.3 Les effets non-linéaires [10]

La technique DWDM est très utilisée dans les systèmes de transmission actuels pour accroître la capacité d'une ligne. Cependant, en plus des effets linéaires (dispersion et PMD), on voit apparaître de nouveaux effets non-linéaires qui viennent perturber le signal à transmettre.

Ces phénomènes engendrent des transferts d'énergie, donc d'informations, d'un canal sur l'autre. Les premiers sont des manifestations de l'effet Kerr on distingue : l'automodulation de phase (SPM) et dans le cas d'une propagation multi-canal : le mélange à quatre ondes ou FWM pour Four-Wave Mixing, la modulation de phase croisée ou XPM pour Cross-Phase. Le dernier est l'effet Raman auto-induit (SI-SRS pour Self-Induced Stimulated Raman Scattering).

L'automodulation de phase affecte une onde modulée en amplitude. Elle a pour effet d'introduire un déphasage non-linéaire dans le champ tout en gardant constant l'amplitude de ce dernier à travers la fibre. Il apparaît alors un retard de phase du sommet de l'impulsion par rapport à ses flancs car leurs vitesses de propagation sont différentes. Ce déphasage varie en

fonction de l'intensité du champ et de la distance de propagation et implique un élargissement de fréquences au cours de la propagation dans la fibre.

Dans le contexte du WDM cet effet peut alors créer de la diaphonie entre les canaux (ou cross-talk), comme l'illustre la figure III-12 et donc détériorer le signal :

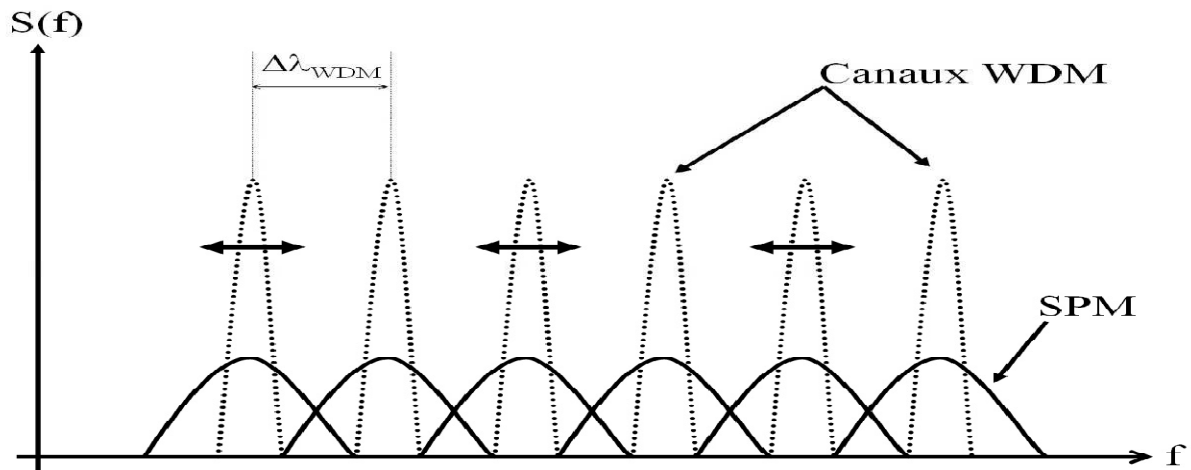


Figure III.12 Influence néfaste de l'automodulation de phase dans le contexte du WDM.

[9]]

Nous venons de voir que l'automodulation de phase se traduit par une modulation de fréquence parasite responsable d'une augmentation de la fréquence instantanée à l'avant de l'impulsion. Si on inclut le phénomène de la dispersion chromatique, deux cas sont alors à différencier :

- Si la dispersion est normale, la tête de l'impulsion se propage encore plus rapidement tandis que l'arrière se propage encore plus lentement. La conjugaison de l'effet Kerr et de la dispersion chromatique aggrave donc l'élargissement de l'impulsion.
- Si la dispersion est anormale, on a la conséquence inverse, à savoir que l'élargissement spectral provoque un rétrécissement temporel. Il est alors possible de retrouver une situation d'équilibre puisque les deux phénomènes agissent de façon opposée. On parle alors d'une propagation de soliton. Ce phénomène n'apparaît que pour des puissances d'injection suffisamment importantes (qq's dizaines de mW).

Ainsi, pour des puissances d'injection inférieures à quelques milliWatts, les effets non linéaires n'apparaissent pas et seule la dispersion chromatique est présente produisant l'étalement temporel classique de l'impulsion. Lorsque les puissances atteignent quelques dizaines de milliWatts, les deux phénomènes linéaire et non linéaire cohabitent et peuvent se compenser pour donner un auto-confinement temporel.

Le FWM génère deux nouvelles composantes spectrales à partir d'une seule ou deux longueurs d'onde initiales. Dans le cas du WDM, le signal émis constitue un peigne de longueurs d'onde équidistantes. Les longueurs d'onde générées sont des combinaisons linéaires des longueurs d'onde initiales. On va donc avoir ici une superposition des nouvelles composantes et des longueurs d'onde à transmettre. Sur la Figure III-13, on les a représentées en fonction des fréquences ω_1 , ω_2 , ω_3 et ω_4 . Le FWM va donc être à l'origine d'un phénomène de diaphonie, c'est-à-dire de superposition de signaux contenant des informations différentes.

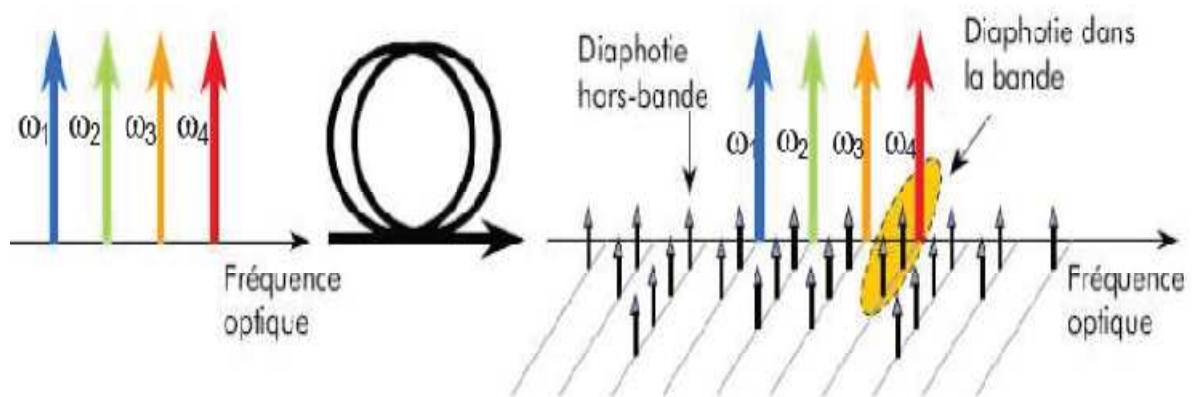


Figure III.13 Schéma Illustratif du FWM [10]

Dans le cas de la XPM, la phase du signal est modulée proportionnellement à la puissance des canaux voisins. La dispersion se charge alors d'augmenter l'intensité du bruit sur les symboles.

Sur la Figure III.14, on voit toutes les 20 ps l'évolution d'un signal à 10 Gbit/s ayant pour voisin un autre signal à la même fréquence portant des informations différentes.

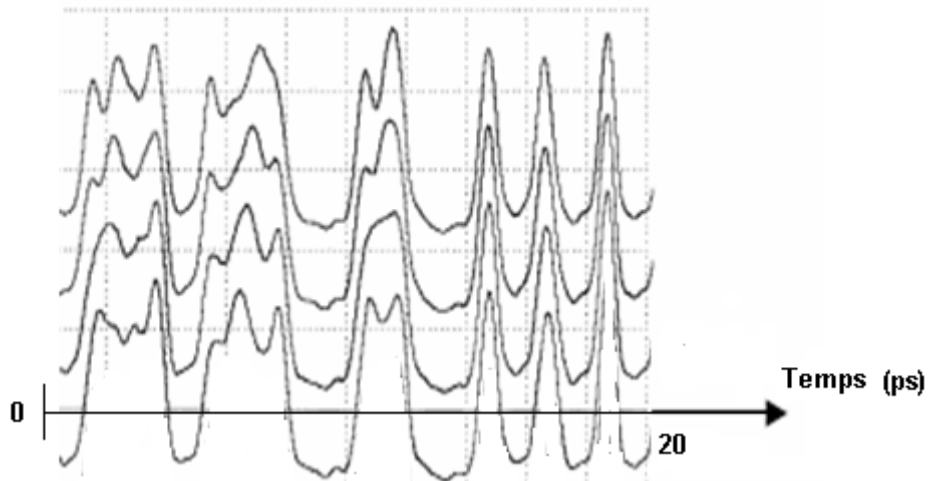


Figure III.14 Illustration de la modulation XPM [10]

L'effet Raman auto-induit est aussi un autre effet non-linéaire possible. Quand la puissance dans une fibre augmente, on voit apparaître un transfert d'énergie des faibles longueurs d'onde vers les plus grandes. Ceci est illustré dans le cas suivant (Figure.III 15) : 32 canaux équidistants à 10 Gbit/s se propagent dans 100 km de fibre à dispersion particulière.

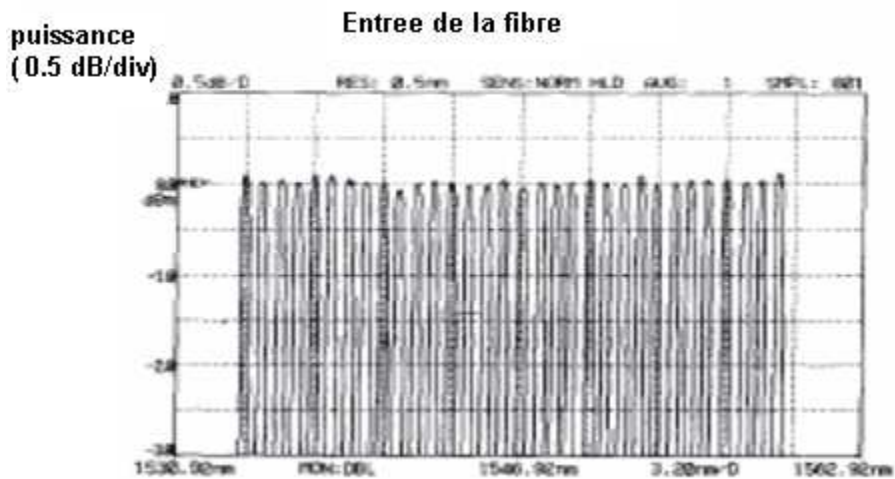


Figure.III 15 Signal à l'entrée de la fibre [10]

Suivant la puissance à l'entrée de la ligne, on peut avoir des variations importantes de l'amplitude des canaux (Figure.III 16). Dans le cas où la puissance d'entrée par canal est -10

dBm, les variations entre les plus basses et les plus grandes longueurs d'onde sont de 0.7 dB. Quand la puissance augmente jusqu'à 5.6 dBm par canal, ces variations sont très importantes et atteignent 2.3 dB.

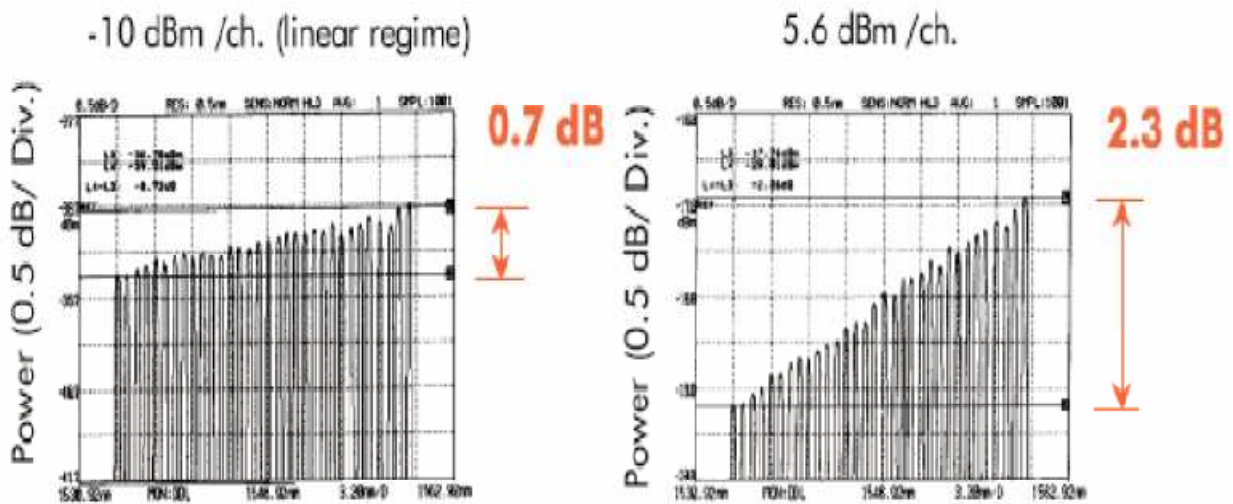


Figure.III 16 Signal après propagation en fonction de la puissance incidente [10]

- **Bilan des impacts dans le contexte WDM**

Ce sont surtout les effets non linéaires XPM et SPM qui dégradent la qualité de la transmission. Pour réduire le FWM, il suffit d'éviter que les trois canaux qui génèrent l'onde parasite, se propagent à la même vitesse, c'est à dire que la dispersion chromatique de la fibre soit non nulle. En revanche, dans le cas de la modulation de phase parasite générée par effet Kerr, il est préférable de réduire la dispersion chromatique cumulée le long de la liaison afin d'éviter la distorsion des impulsions.

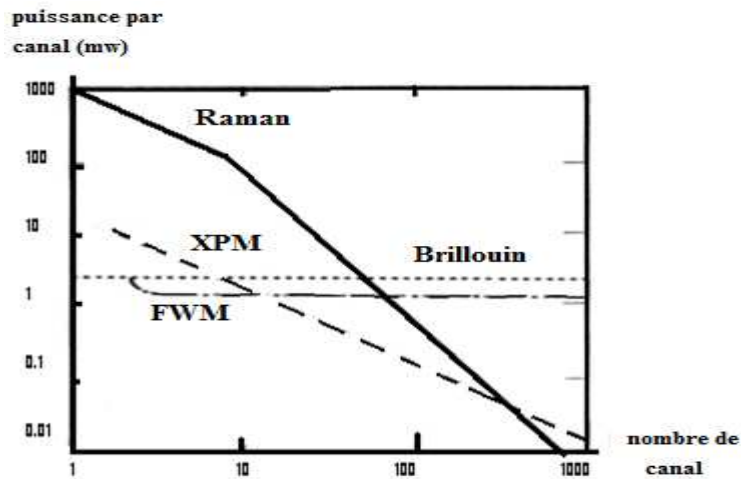


Figure III.17. Bilan de l'impact des effets non linéaires dans le contexte WDM.

Un autre point à prendre en compte concerne la politique menée par les opérateurs de réseau. En effet aujourd'hui, c'est la course à la capacité qui prévaut. Comme nous l'avons vu, pour augmenter la capacité d'un câble de transmission, une des possibilités est d'augmenter le nombre de longueur d'onde par fibre. Or si nous voulons conserver une même bande de longueur d'onde sans en changer les bornes (exemple bande C), cela passe par une réduction de l'espacement entre canaux noté $\Delta\lambda$. (technique DWDM). Dans ce cas, un problème apparaît puisque la différence des vitesses de groupe aux diverses longueurs d'ondes est proportionnelle à cet écart $\Delta\lambda$. Donc, plus l'espacement $\Delta\lambda$ sera faible, plus les vitesses de groupes seront proches et plus la longueur sur laquelle les impulsions se chevaucheront sera importante générant des effets non linéaires pénalisant pour la qualité du signal. C'est pourquoi, l'augmentation du nombre des voies a pour conséquence une amplification des effets non linéaires limitant les distances sur lesquelles le signal peut parcourir sans subir de trop fortes dégradations.

III.4.2 La fibre optique idéale pour les hauts débits

Avec la montée en débit, les fibres optiques qui composent les nouveaux et futurs réseaux optiques doivent présenter les qualités suivantes : accepter le plus de canaux optiques possibles (espacements serrés), accepter la montée en débit et la croissance par canal ainsi que l'utilisation de puissances optiques fortes. Pour répondre à ces exigences, la fibre doit posséder :

- Une surface effective large (pour réduire les effets non linéaires)

- Un coefficient de D_{ch} élevé (pour réduire les effets non linéaires du type mélange à quatre ondes) mais assez faible aussi (pour réduire l'étalement temporel) compromis à trouver.
- Peu de variation de la D_{ch} dans la gamme de longueur d'onde utilisée (pente de D_{ch} faible).
- Valeur de la PMD et de l'atténuation minimale (pour le débit et l'espacement des amplificateurs et régénérateurs).
- Un coût faible.

Cette liste met en évidence les enjeux du haut débit qui se portent surtout sur trois grandeurs la surface effective, la valeur de la D_{ch} ainsi que sa pente, valeurs entre lesquelles des compromis devront être trouvés.

III.3.4.3 Les diverses familles des fibres optiques

Depuis les années 80, de nombreuses fibres ont été développées et conçues pour répondre aux besoins de capacités des lignes de transmissions optiques. Ces fibres sont classées selon la norme internationale ITU-T. Les fibres de ligne qui sont mises en avant pour le WDM sont soit celles déjà installées du type G.652 (regroupant les fibres unimodales ayant une D_{ch} nulle au voisinage de 1300nm) soit celles plus récemment développées du type G.655 (regroupant les fibres unimodales à dispersion décalée non nulle ou NZ-DSF pour Non-Zero Dispersion-Shifted-Fiber).

Les fibres G.652 sont classées en trois catégories (A, B et C). La G.652 A est la fibre classique qui permet le transport de débit à 2,5 Gbit/s dans les bandes O, C, et S. La fibre G.652 B permet des canaux en DWDM à 10Gbit/s dans les bandes O, C, L et S. La fibre G.652 C est plus performante et elle est employée dans les bandes O, E, C, L et S. Les autres fibres sont peu utilisées. La G.653 (fibre à dispersion décalée) est employée pour les transmissions dans la bande C. La G.654, à cause de son faible affaiblissement linéique, est réservée aux liaisons sous-marines pour 1300 et 1550 nm. Les fibres G.655 (fibre à dispersion décalée non nulle- NZ DSF) sont dédiées au 40 Gbit/s ou N fois 40 Gbit/s en DWDM (la G.655A avec un espacement intercanal de 200 MHz la G.655B avec un espacement inter

canal de 100 MHz et avec une limitation de 400 Km et la 655C, en 100 MHz mais pour les liaisons supérieures à 400 Km). La fibre G.656 utilise le multiplexage en longueur d'onde dans les bandes S, C et L.

III .3.5 Multiplexeur à insertion extraction optique [1]

Les **OADM** (Optical Add/Drop Multiplexers) sont des dispositifs optiques qui peuvent être utilisés pour effectuer les opérations d'insertion et d'extraction des différentes longueurs d'onde dans la fibre optique entre l'émetteur et le récepteur.

Le module optique d'insertion extraction contient un démultiplexeur pour séparer les différentes longueurs d'onde et un commutateur optique OXC (Optical Cross-Connect) dans ce cas c'est un dispositif à quatre terminaux, qui échange le signal de porteuse et un multiplexeur qui combine les différentes longueurs d'onde 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 figure III.18, on a représenté 3 canaux de commutateurs 2*2 (deux entrées et deux sorties).

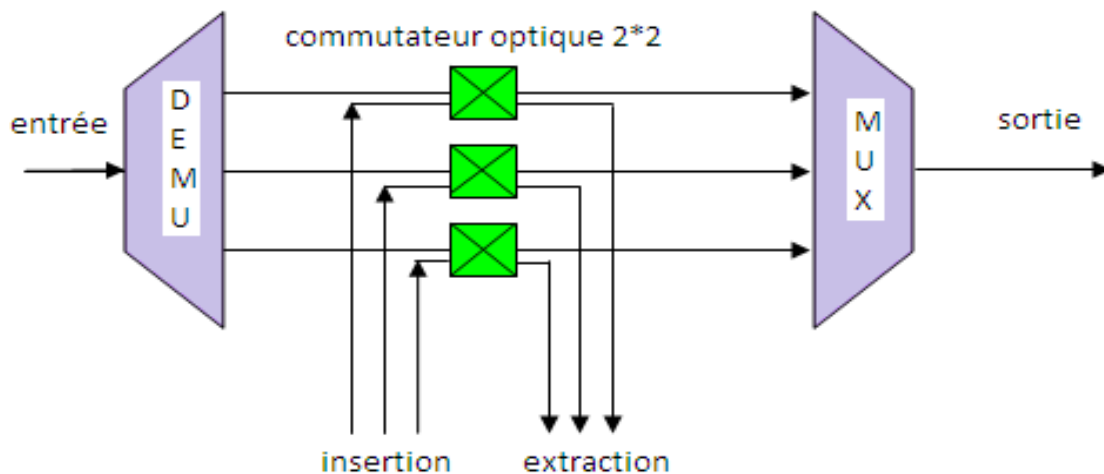


Figure III.18. Principe d'un OADM.

On distingue deux types d OADM

- **OADM fixe** : Il représente la première génération de multiplexeurs à Insertion/Extraction Optique. Les longueurs d'ondes à insérer/extraire sont fixes. Ces OADM sont utilisés dans des liaisons point à point longues distances.

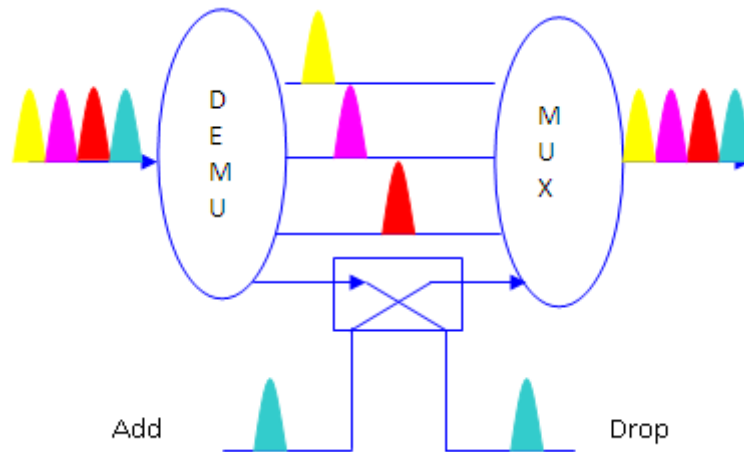


Figure.III 19 OADM Fixes

- **OADM dynamique** : A l'inverse des OADM statiques, les OADM dynamiques (figure III.20) peuvent être reconfigurés (on peut changer la valeur de la longueur d'onde à extraire/insérer).

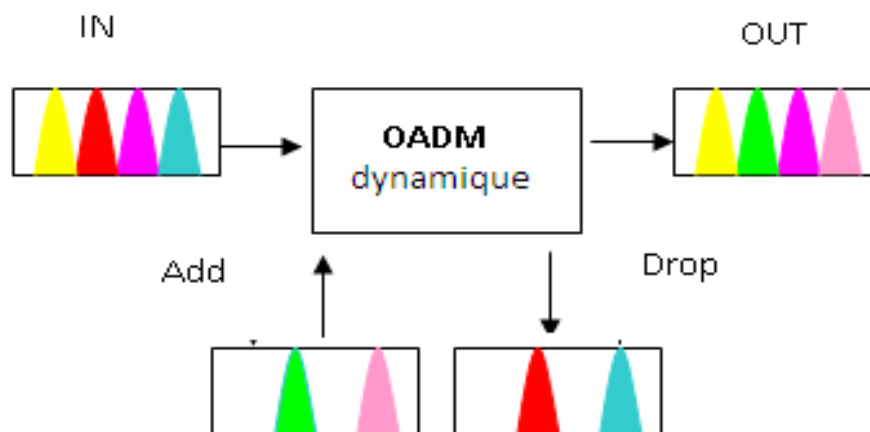


Figure III.20 OADM Dynamique

III.3.6 Les brasseurs optiques OXC (Optical Cross Connect)

Les brasseurs optiques sont typiquement utilisés à la jonction de grands réseaux de types métropolitains, régionaux ou longue distance, et servent à rediriger le trafic d'une fibre vers une autre. La "matrice de redirection" peut être figée par construction ou reconfigurable par l'utilisation de techniques variées comme les MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), ou des commutateurs optiques à commande électriques (commutateur électro-holographique, à cristaux liquides). Parmi les technologies reposant sur l'utilisation de la micromécanique, une seule est aujourd'hui réellement opérationnelle : celle des micros miroirs 2D. Elle permet de réaliser des brasseurs reconfigurables mais les temps de mutation sont de l'ordre de quelques millisecondes. Ils permettent de gérer l'équilibrage du réseau mais réagissent trop lentement pour être utilisés dans un processus de routage.

En revanche, les brasseurs dont la configuration repose sur des technologies sans mouvement (macroscopique) ont des temps de réaction de l'ordre de la micro voire même de la nanoseconde.

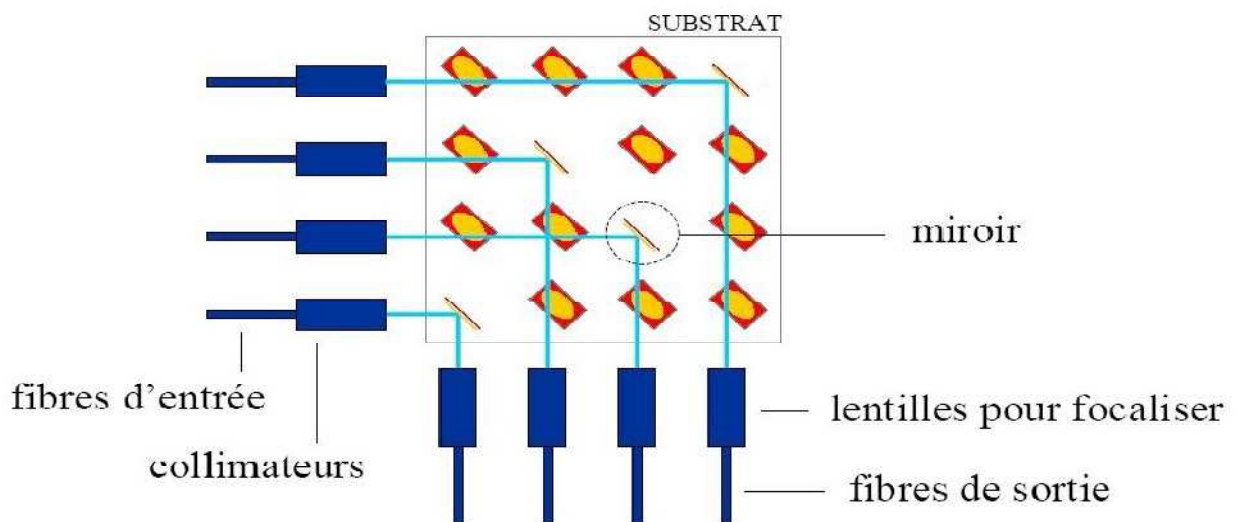


Figure III .21 Exemple de brasseur réalisé à base de micros miroirs 2D.

III .4 les réseaux WDM [12]

Maintenant que nous savons comment véhiculer plusieurs canaux via un même support, il nous faut nous intéresser aux différentes organisations possibles de la communication entre plusieurs interlocuteurs c'est-à-dire nous préoccuper de la notion de réseaux.

Notre étude concernant les réseaux WDM, nous nous concentrons uniquement sur les réseaux de haut niveau (WAN et MAN). Dans ce cas, l'incorporation du multiplexage en longueur d'onde apparaît inévitable, mais plusieurs architectures, plus ou moins sophistiquées, restent envisageables :

- les réseaux fixes où les émetteurs sont reliés à un certain nombre de récepteurs mais aucune modification possible des interconnexions établies,
- les réseaux adressés en longueur d'onde. Ils cherchent à introduire une plus grande flexibilité au niveau des interconnexions en utilisant la longueur d'onde comme système d'adressage des informations.

III.4.1 Réseaux fixes

Nous commençons la présentation des réseaux par les réseaux fixes. Ceux-ci sont en fait les premières configurations qui ont été étudiées et démontrées.

De façon générale, on classe ce genre d'architectures selon deux catégories :

- **les liaisons point-à-point**

Dans ce cas, il s'agit de multiplier la capacité de transmission entre deux points du réseau par application directe de la technique de multiplexage en longueur d'onde, soit augmenter le nombre de porteuses optiques. Leur déploiement est tout spécialement survenu dans les liaisons transocéaniques (câble TAT-12/13) et forme la base de la standardisation actuelle.

- **les réseaux optiques passifs**

(ou PON pour *Passive Optical Network*). Dans ces configurations, on cherche à établir des transmissions entre plusieurs nœuds grâce à l'utilisation de composants optiques capables de combiner ou d'extraire plusieurs faisceaux de lumière d'une fibre, les coupleurs. La philosophie de l'interconnexion est basée sur le système broadcast and select déjà utilisé pour diffusion de la radio ou de la télévision : chaque nœud émet ses informations vers tous les autres nœuds à une longueur d'onde spécifique et reçoit les informations qu'il désire grâce à un filtrage fréquentiel adéquat.

III.4.2 Réseaux adressés en longueur d'onde

Bien qu'ils utilisent de façon plus efficace la bande passante de la fibre, les réseaux fixes présentent l'inconvénient de ne pas pouvoir s'adapter à grande échelle et de gérer l'acheminement des données au niveau électrique. Le routage en longueur d'onde intervient pour combler ces lacunes. Dans ces systèmes, la longueur d'onde, vecteur des informations, définit aussi le chemin emprunté entre l'émetteur et le récepteur. Leur mise en place requiert l'installation, en plus des sources optiques de longueur d'onde précise, de composants sélectifs en longueur d'onde aux différents noeuds du réseau fibré :

- les multiplexeurs optiques à insertion/extraction OADM et permettent l'insertion d'un nouveau message en employant la même longueur d'onde,
- les routeurs OXC pour ou répartiteurs/brasseurs, ils effectuent la commutation d'un signal de longueur d'onde donnée arrivant par une certaine fibre, vers une fibre de sortie.

Si l'on restreint son application à des télécommunications de niveau mondial (WAN), le routage en longueur d'onde n'exige pas de flexibilité au niveau optique car les points d'accès restent connectés de façon définitive et les trafics d'informations subissent peu de fluctuations. Les opérations d'extraction/insertion et de routage en longueur d'onde s'effectuent alors grâce à un câblage physique et à des composants passifs. Dans ce cas, la source optique la plus appropriée reste la source idéale des réseaux fixes. Cependant, dès qu'on souhaite étendre l'utilisation de la technologie WDM aux réseaux d'échelle inférieure (MAN voire LAN), il faut prendre en compte le fait que les variations de trafic y sont plus importantes et de fréquence aléatoire. Afin d'optimiser le transfert des données, il devient intéressant d'introduire une reconfigurabilité de la couche optique.

III.5 Conclusion

Dans le cadre des transmissions à haut débit du WDM, trois caractéristiques majeures de ces fibres se distinguent : la valeur de la dispersion chromatique et son évolution (ou pente) ainsi que l'aire effective. En effet, pour accroître les performances des réseaux optiques, il est nécessaire de contrôler la dispersion chromatique des fibres de ligne pour toutes les longueurs d'onde mises en jeu mais aussi de limiter l'influence des effets non linéaires néfastes à la transmission d'information par l'augmentation de l'aire effective. Pour ce faire, de nouvelles fibres de ligne ont été conçues portant le nom de NZ-DSF. Mais l'augmentation des canaux et des puissances d'injection avec la technique du multiplexage dense ou DWDM a pour

conséquence de multiplier les taux d'erreur par élément binaire malgré l'utilisation de ces nouvelles fibres.

Les réseaux optiques répondent bien aux demandes d'augmentation des débits des utilisateurs. L'utilisation d'un grand nombre de longueurs d'onde, à des vitesses pouvant atteindre 40 puis 160 Gbit/s, permet de satisfaire aisément la demande actuelle. Le potentiel de croissance des débits devrait permettre de suivre facilement la demande. Cependant, la surcapacité, qui aura été fondamentalement utilisée ces dernières années, ne devrait plus être de mise. Bientôt, tous les cœurs de réseau utiliseront de la fibre optique. Il reste d'importants progrès à accomplir pour arriver à un réseau tout optique, dans lequel les signaux sous forme lumineuse seraient transportés de bout en bout sous la forme de paquets. Le passage par des équipements électriques est encore aujourd'hui nécessaire, surtout lorsqu'il faut traverser plusieurs réseaux successifs.

CHAPITRE IV

APPLICATION

Introduction

ALGERIE TELECOM a le statut d'une entreprise publique, sa naissance remonte au 5 aout 2000, après une restructuration visant le secteur des postes e télécommunications Algériens, séparant ainsi les domaines d'activités postales de ceux des Télécommunications.

ALGERIE TELECOM effectue ses transmissions en utilisant plusieurs réseaux dont :

- Réseaux public de transmission de données par paquets X25 (DZPAC) 7600 accès ;
- Backbone national de transmission à 10 Gbits/s(SDH) et 10Gbits/s (WDM) ;
- Backbone régional de transmission à 2.5 Gbits/s ;
- Réseau national rural : 103 réseaux intégrant plus de 1500 localités ;
- Plus de 1000 communes rattachées en fibre optique.

Dans se qui suit, nous allons montrer les différentes étapes de mise en service des liaisons de transmission par fibre optique au sein du centre CA2 d' ALGERIE TELECOM de la wilaya de Tizi-Ouzou. Les différentes étapes à suivre sont :

- La pose de la fibre optique.
- Configuration des équipements.
- Test de la liaison optique.

IV.les différentes étapes de la mise en service

IV.1. pose de la fibre

A ALGERIE TELECOM, il existe différentes services spécialisés dont le CEL (centre d'entretien de ligne). Il s'occupe de la mise en service de la fibre optique en respectant certains critères, à savoir l'étude de faisabilité et la mise de la fibre à une profondeur nécessaire (80 cm) en mettant à 40 cm de la surface de la terre un gréage avertisseur.

En raison de leur poids peu important et de leur grande flexibilité, les câbles à fibres optiques sont souvent plus faciles à poser que leurs homologues en cuivre, tout en obéissant aux mêmes règles générales de tirage suivantes:

- **Température de pose:** la pose est déconseillée lorsque la température descend en dessous de 5°C, lorsque la température ambiante est élevée, il faudra veiller à ne pas blesser la gaine qui est alors plus molle.
- **Manchonnage:** une précaution qu'il est impératif de prendre est de munir les deux extrémités du câble de manchons étanches, destinés à éviter au câble de prendre l'eau.
- **Sur-longueur:** il est également nécessaire de prévoir une sur-longueur de câble pour les opérations de montage et d'épissures. Cette sur-longueur devra être de 5 à 10 mètres par extrémité.
- **Rayon de courbure :** le rayon de courbure minimal autorisé lors de la pose est supérieur à celui permis après la pose. Il est lié à la force de traction et augmente proportionnellement avec cette force.
- **Force de traction:** les forces de traction nécessaires au tirage des câbles optiques sont souvent inférieures à celles requises pour les câbles traditionnels. Par contre les câbles optiques sont très sensibles aux à-coups qui peuvent modifier leur performance.

IV.1.1 La pose en extérieur

IV.1.1.1.Pose en fouille ouverte

La pose des câbles dans le sol fait l'objet d'une réglementation dont les principaux points sont :

- Les câbles doivent être protégés contre les dégradations résultant du tassement des terres, du choc des outils métalliques à main et éventuellement de l'action chimique due aux éléments du sol.
- La profondeur minimale de pose sera de 0,6 m dans le cas de terrain normal et de 1 mètre sous les voies de roulement.
- Une précaution sera de ne jamais faire cheminer des câbles l'un au-dessus de l'autre (une intervention sur le câble inférieur devenant une opération délicate sinon impossible).

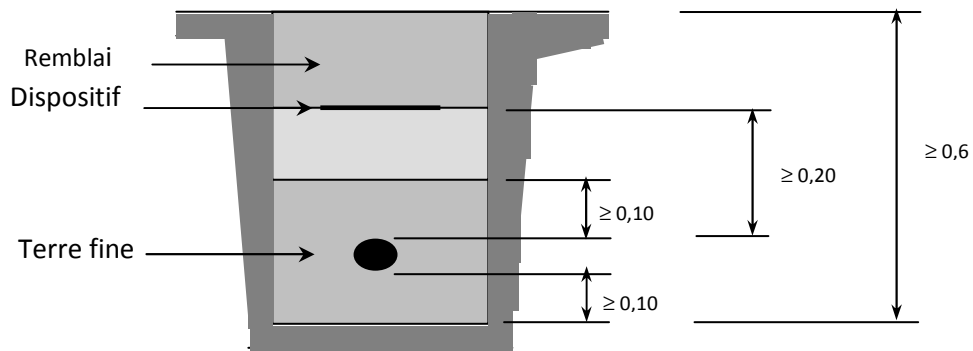


Figure IV.1. Pose en fouille ouverte.

IV.1.1.2. Pose en fourreaux

La pose en fourreaux ou tubes est une solution qui offre des avantages pour les extensions ultérieures. Les câbles à fibres optiques pourront cheminer avec des câbles d'autres types.

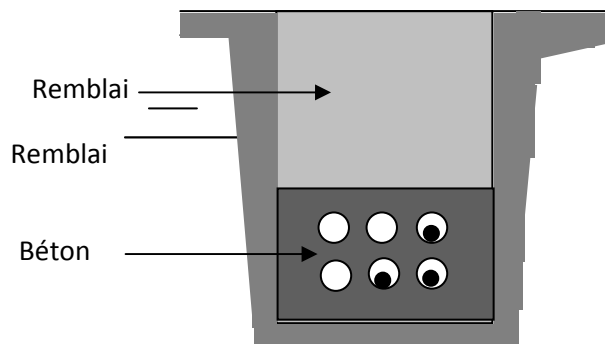


Figure IV.2. Pose en fourreaux.

IV.1.1.3 Pose en caniveaux de surface

La technique du caniveau de surface est particulièrement adaptée dans le cas de cheminement le long d'une voie de communication (chemin de fer, autoroutes, etc.). Le type de câble déroulé dans le caniveau sera déterminé par la nature des câbles voisins et sera en général un type avec protection anti-rongeurs.

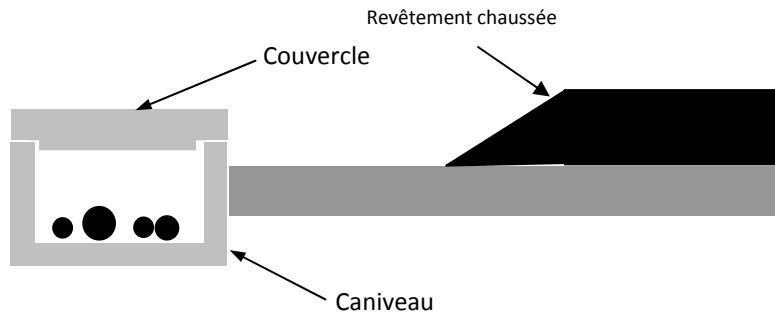


Figure IV.3. Pose en caniveaux de surface

IV.1.1.2 Le tirage en intérieur

Le tirage en intérieur s'effectue de manière identique à celle des câbles électriques. Il est indispensable de respecter les rayons de courbure minimaux ainsi que de ne pas dépasser les forces de traction admissible.

- **Pose en chemin de câbles :** Dans ce type de pose il faut particulièrement veiller à repérer les câbles optiques de manière visible afin d'éviter leur écrasement par des câbles posés ultérieurement. On doit également veiller au respect des rayons de courbure et éviter les angles vifs dans les courbes.

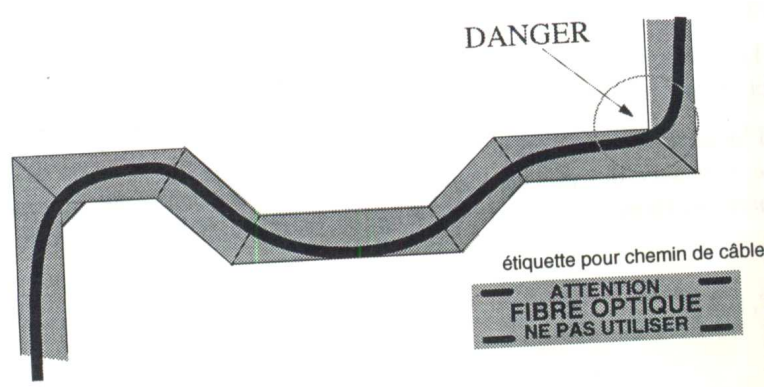


Figure II.4. Pose en chemin de câble.

- **Pose en goulotte :** La pose en goulotte se fera de manière identique à celle en chemins de câbles. Les goulottes pouvant avoir des dimensions plus petites. Il est impératif de surveiller de près les coudes, plus particulièrement dans les coins des pièces.



Figure II.5. Pose en goulotte.

IV1.3. Le couplage optique

Il existe un nombre de connecteurs pour le couplage optique. Les plus répandus sont les connecteurs ST et SC. Pour les réseaux FDDI, on utilise les connecteurs doubles MIC. Il faut encore citer les connecteurs SMA (à visser) et les connecteurs FCPC utilisés pour la fibre monomode.



Figure IV.6. Connecteurs en fibre optique.

Il y a plusieurs manières pour coupler la fibre optique:

- Le couplage mécanique de deux connecteurs mis bout à bout au moyen d'une pièce de précision. Le dessin ci-dessous montre l'union de deux connecteurs ST, mais il existe des coupleurs ST/SC ou ST/MIC.
- Le raccordement par Splice mécanique qui est utilisé pour les réparations à la suite de rupture ou pour raccorder une fibre et un connecteur déjà équipé de quelques centimètres de fibre que l'on peut acquérir dans le commerce (Pig tail).

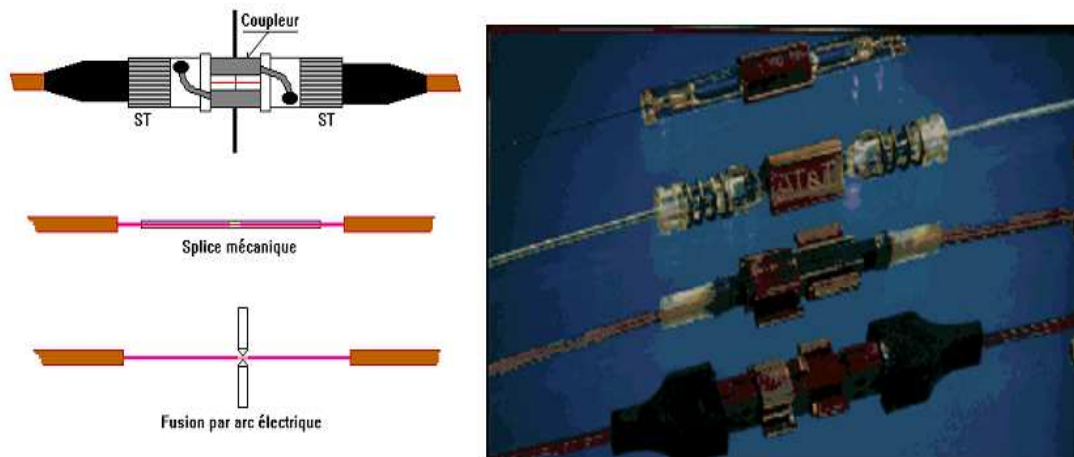


Figure IV.7. Trois exemples de connexions en fibre optique.

IV.2. configuration SDH service [16]

Cette partie décrit comment configurer des services SDH sur l'iManager d'Optix T2000.

IV.2.1. cahier des charges

Dans cet exemple on a besoin de quatre NE (Network Equipment), utilisant quatre optix 155/622. Le tableau suivant présente les différents services échangés par les NEs.

Services	Nombre de services EI	Protection de service
NE1 <-> NE2	8	OUI
NE1 <-> NE3	6	OUI
NE1 <-> NE4	4	NON
NE2 <-> NE3	2	OUI
NE2 <-> NE4	7	NON
NE3 <-> NE4	4	NON

Tableau IV.1. Les différents services échangés par les NEs

IV.2.2. Planification

On se base sur les données du cahier des charges, On a les étapes suivantes a suivre :

- Schématiser le réseau SDH.
- Allouer une adresse IP a chaque NE.
- Information sur les cartes des NE.
- Connexion des fibres optiques.
- Attribution des timeslot.
- Traçage de l'horloge.

IV.5.2.1.Réseau SDH

Le schéma du réseau est donné par la figure suivante :

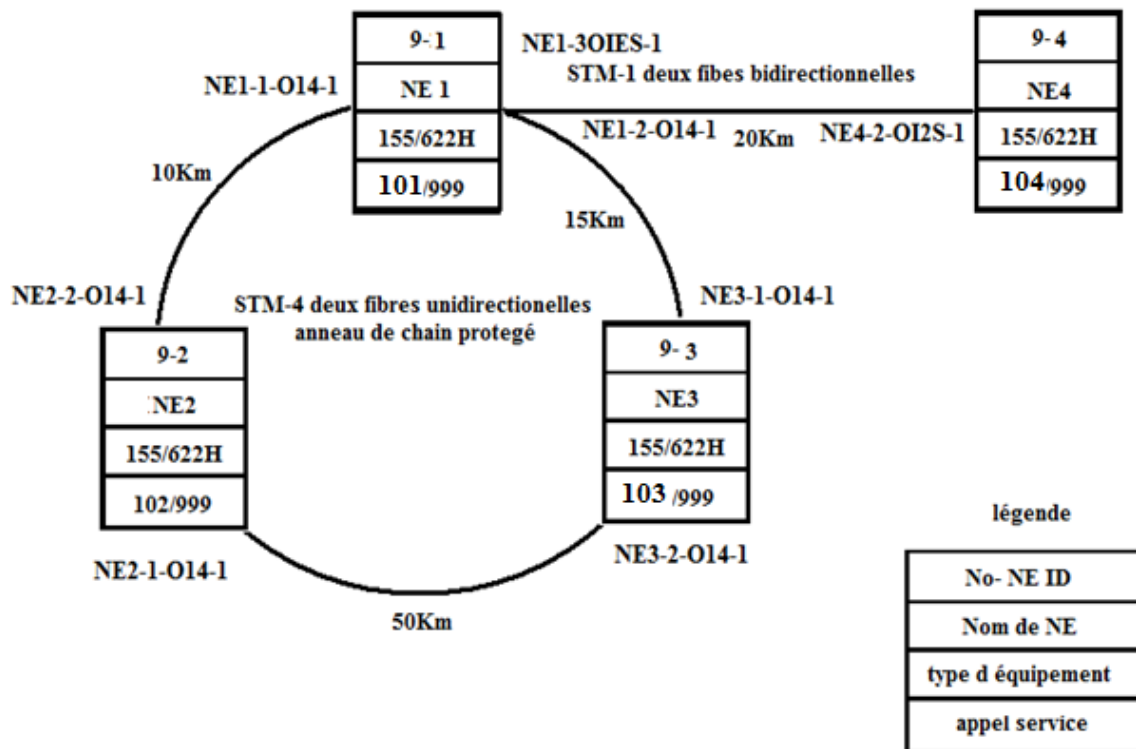


Figure IV.8. Schéma synoptique du réseau SDH.

IV.5.2.2. Adresse IP

Cette étape consiste à attribuer à chaque équipement une adresse IP.

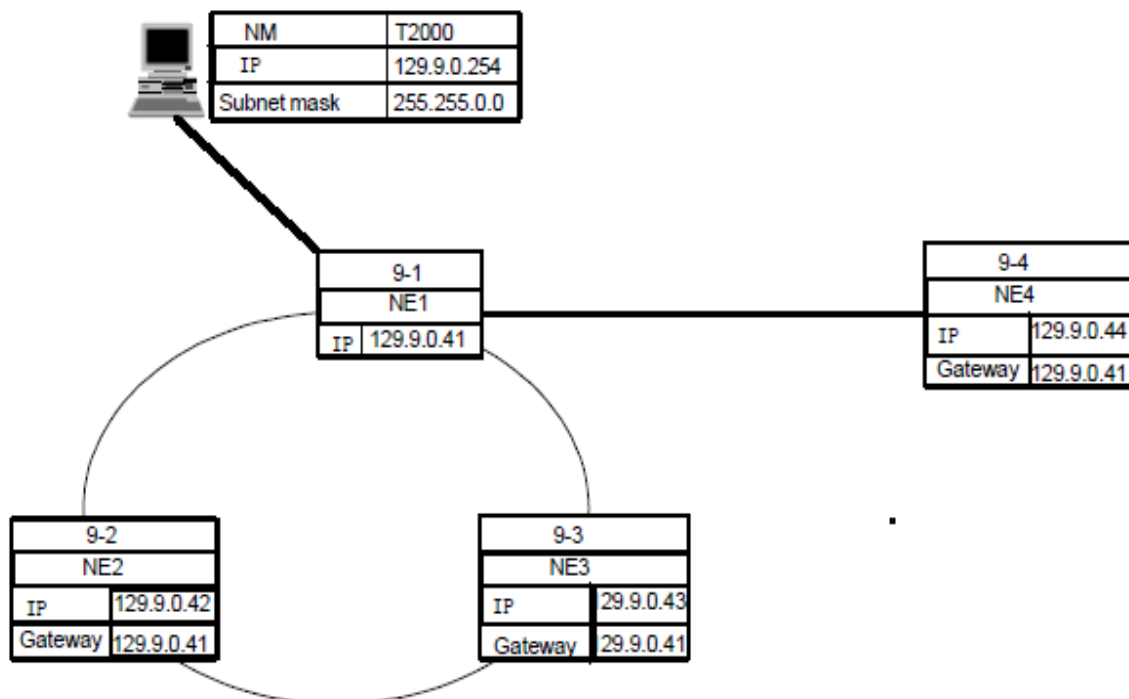


Figure IV.9. Schéma synoptique des adresses IP de chaque NE.

IV.5.2.2.3 Information sur les cartes

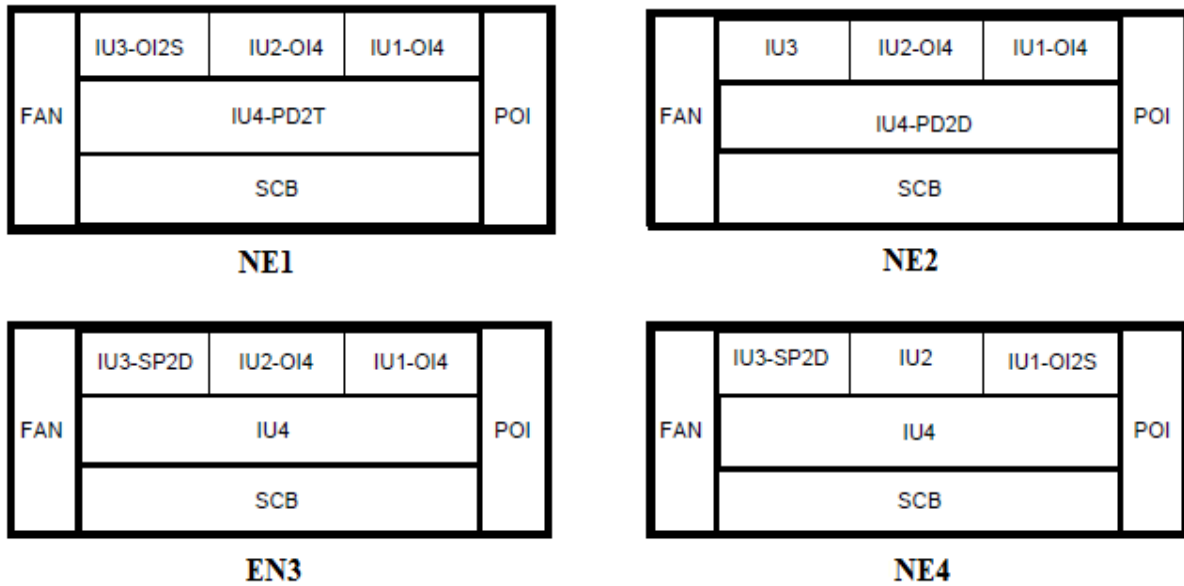


Figure IV.10. Schéma synoptique des cartes de chaque NE.

IV.5.2.2.4. Connexion des fibres optiques

Le tableau suivant montre les différentes connexions par fibre optique entre les différents NEs

les informations de la sation locale				les informations de la sation opposée			
NE name	Slot	Board name	Port No.	NE name	Slot	Board name	Port No.
NE1	IU1	OI4	1OUT	NE2	IU2	OI4	1IN
	IU1	OI4	1IN		IU2	OI4	1OUT
NE2	IU1	OI4	1OUT	NE3	IU2	OI4	1IN
	IU1	OI4	1IN		IU2	OI4	1OUT
NE3	IU1	OI4	1OUT	NE1	IU2	OI4	1IN
	IU1	OI4	1IN		IU2	OI4	1OUT
NE4	IU1	OI2S	1OUT	NE1	IU3	OI2S	1IN
	IU1	OI2S	1IN		IU3	OI2S	1OUT

Tableau IV.2. Connexion des fibres entre les différents NE.

IV.5.2.2.5 Allocation des timeslot

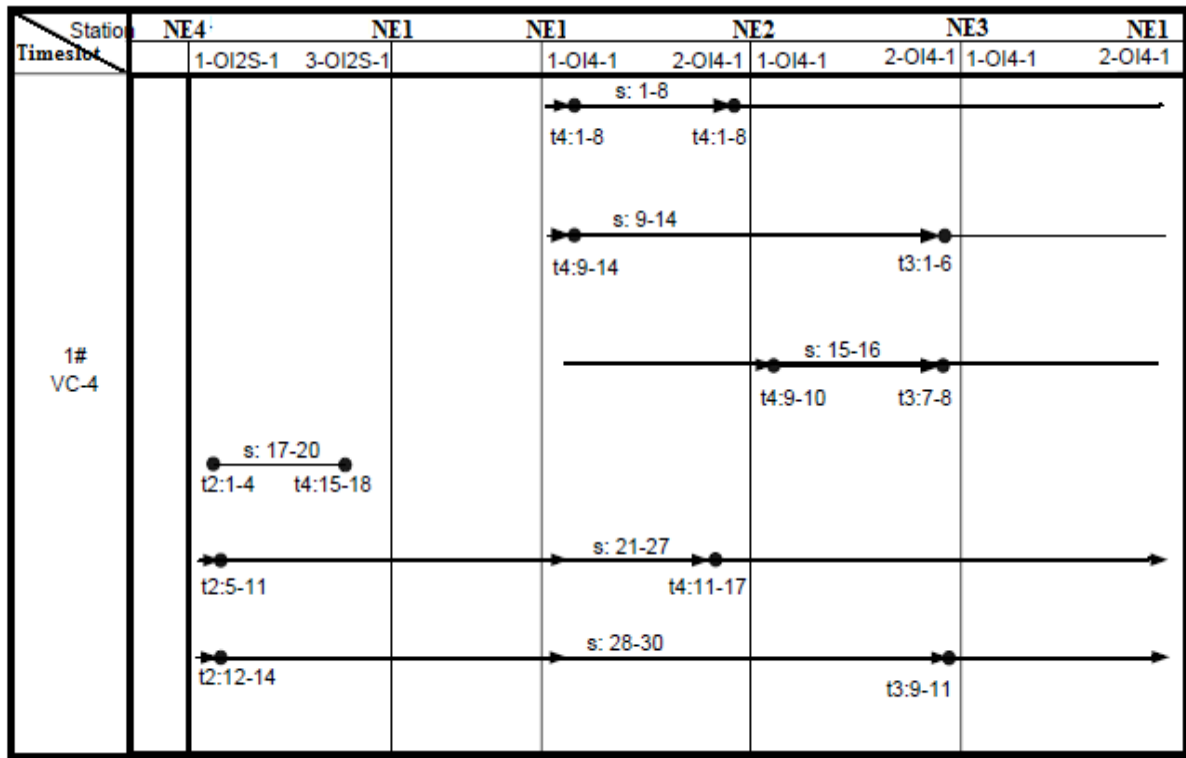


Figure IV.11.allocation des timeslot aux différents NE.

Dans la **Figure IV.12** t3 et t4 indiquent les cartes dans les slots IU3 et IU4 respectivement, le numéro après tn indique le numéro du chemin E1. Par exemple, "t4 :1-8 " indique les chemins E1 1-8 de la carte dans le slot 4.

Les nombres au-dessus du trait horizontal indiquent le numéro du timeslot occupé par des chemins E1. Pour l'exemple, "S:1-8" indique que le chemin E1 occupe des timeslot 1-8 d'un VC-4.

IV.5.2.2.6. Traçage de l'horloge

L'OptiX 155/622H peut tracer l'horloge externe BITS (Building Integrated Timing Supply), ligne horloge, horloge de tributaire et horloge interne. Un réseau doit tracer au moins deux horloges dans le but de protection. Habituellement, l'horloge de tributaire n'est pas utilisée en tant que horloge de référence du sous-réseau. Dans cet exemple, les NEs dans l'anneau de protection sont moins de six, ainsi, tout les NEs peuvent tracer l'horloge primaire dans la même direction. Le tableau suivant énumère la priorité de source d'horloge dans NE1-NE4.

NE	Première source d'horloge	Première source d'horloge
NE1	source d'horloge externe(BITS)	source d'horloge interne
NE2	2-OI4-1	source d'horloge interne
NE3	2-OI4-1	source d'horloge interne
NE4	1-OI2S-1	source d'horloge interne

Tableau IV.3. Sources d'horloge pour les différents NE.

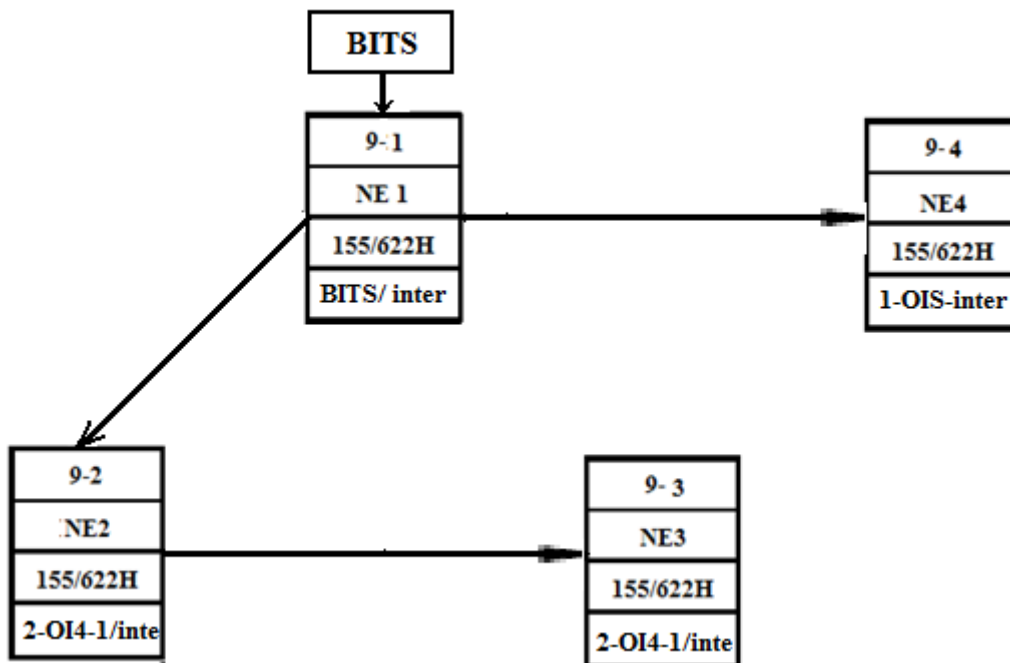


Figure IV.12. Acheminement d'horloge entre les différents NEs

IV2.3. Préparations des différentes liaisons

Avant de commencer la configuration des différents services avec le T2000, il faut auparavant vérifier les aspects suivant :

Coté NE : les différentes stations sont bien installées, et sont correctement connectées entre elles. (via les fibres).

Coté T2000 : - le logiciel T2000 et le hardware est installé correctement.

IV.2.4. Configuration d'un OptiX 155/622H (metro 1000)Huawei(CA2/HASNAOUA) :

Cet exemple consiste à montrer les différentes étapes de configuration d'un multiplexeur de la marque HUAWEI (voir annexe D), et le logiciel qui nous permet de travailler dessus est le T 2000. Les différentes étapes de configuration sont :

IV.2.4.1 Lancement du T 2000 (serveur et client)

Ces étapes permettent d'établir la connexion avec l'équipement, en insérant un nom (ADMIN) et un mot de passe (T 2000).



Figure IV.13. Fenêtre de lancement de T2000.

IV.2.4.2 Recherche de l'équipement

Elle est obtenue en cliquant sur « file » en suite « search for NE » puis « Start »

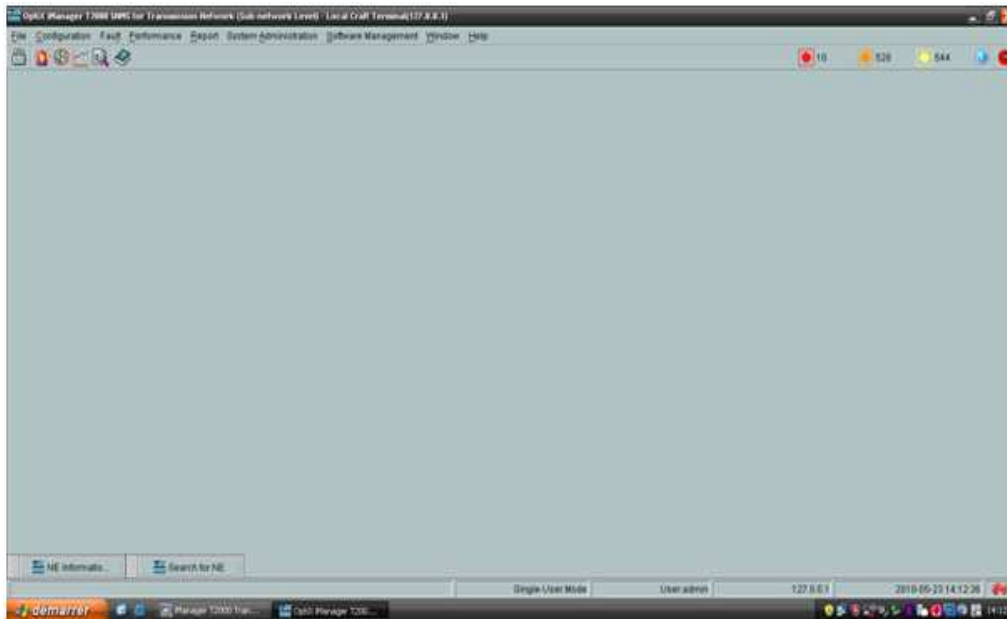


Figure IV.14. Fenêtre de la recherche de l'équipement.

IV.2.4.3 Configuration de l'équipement

Cette configuration se fait en suivant les étapes suivantes

- **Create** : en cliquant sur l'option « Create » de la figure précédente, une autre fenêtre s'affiche afin d'insérer un « user name » et un « password », permettant d'accéder à la fenêtre contenant les différentes options notamment celle de configuration.

- **Mode de configuration** : le mode de configuration de l'équipement se divise en trois choix :
 - **Manuel configuration** : nous permet de configurer manuellement l'équipement ;
 - **Copy NE data** : nous permet de copier la configuration directement à partir d'un autre fichier.
 - **Upload** : cette étape nous permet d'extraire l'ancienne configuration de l'équipement pour d'éventuels changements.

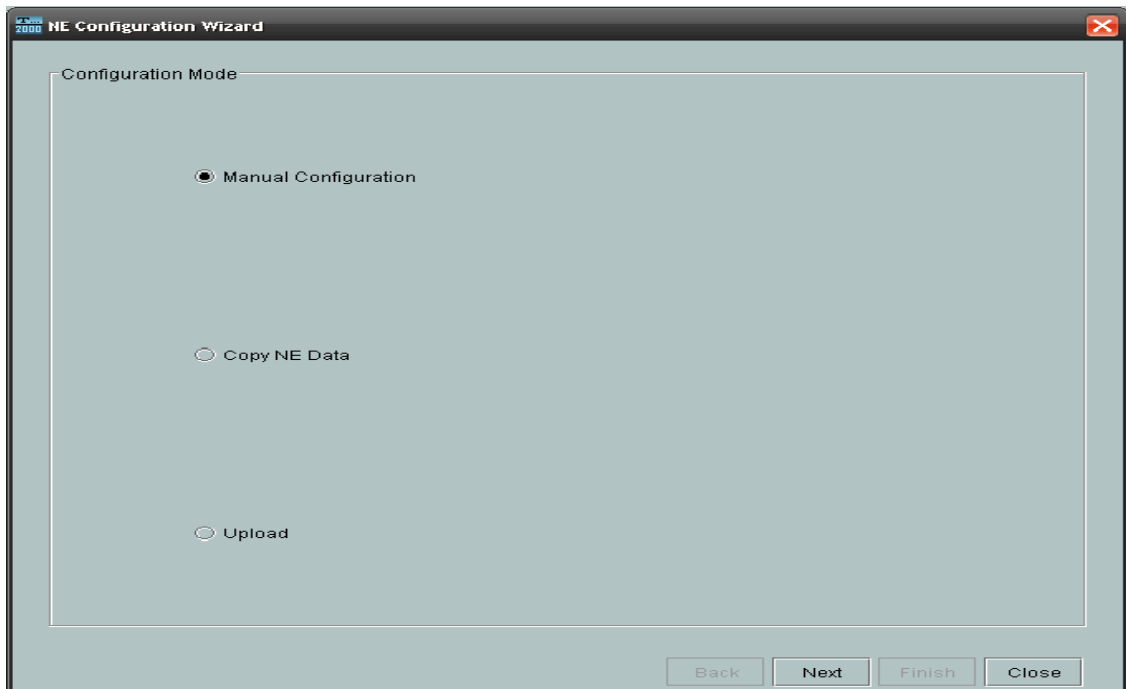


Figure IV.15. Les différents modes de configuration.

La création et l'identification de tous les NEs, se fait en donnant a chaque fois les informations correspondantes à chaque NE.

Par exemple pour NE1:

ID: 1

Extended ID: 9

Name: NE1

Gateway Type: IP Gateway

IP Address: 129.9.0.1

Port: 1400

NE User: root (default)

Password: password

Leave "Preconfiguration" unselected

Les mêmes étapes seront suivies pour la création des autres NEs (NE2-NE3-NE4).

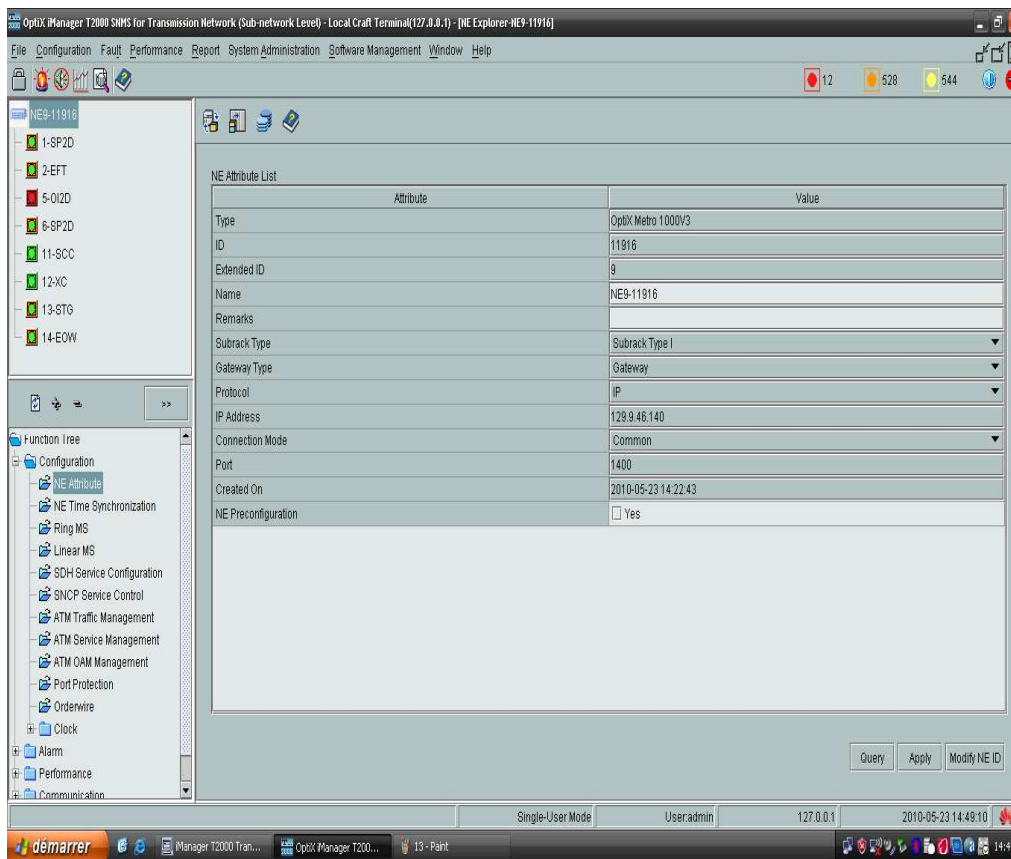


Figure IV.16. Création de NE1.

IV.2.4.4. Configuration des différentes cartes

Dans le menu principal en sélectionne [view/main topology view], tout les NEs créés apparaissent, en commence par NE1, en cliquant sur NE1, on sélectionne la configuration manuelle , un diagramme représentant les cartes existantes dans l' OptiX 155/622H apparaît, en se basant sur les informations données dans la figure IV.10. sur le diagramme des cartes, on sélectionne les slot et les cartes correspondante. On termine cette étape par une vérification. On répète la même chose pour la configuration des cartes des autres NEs (NE2, NE3, NE4).

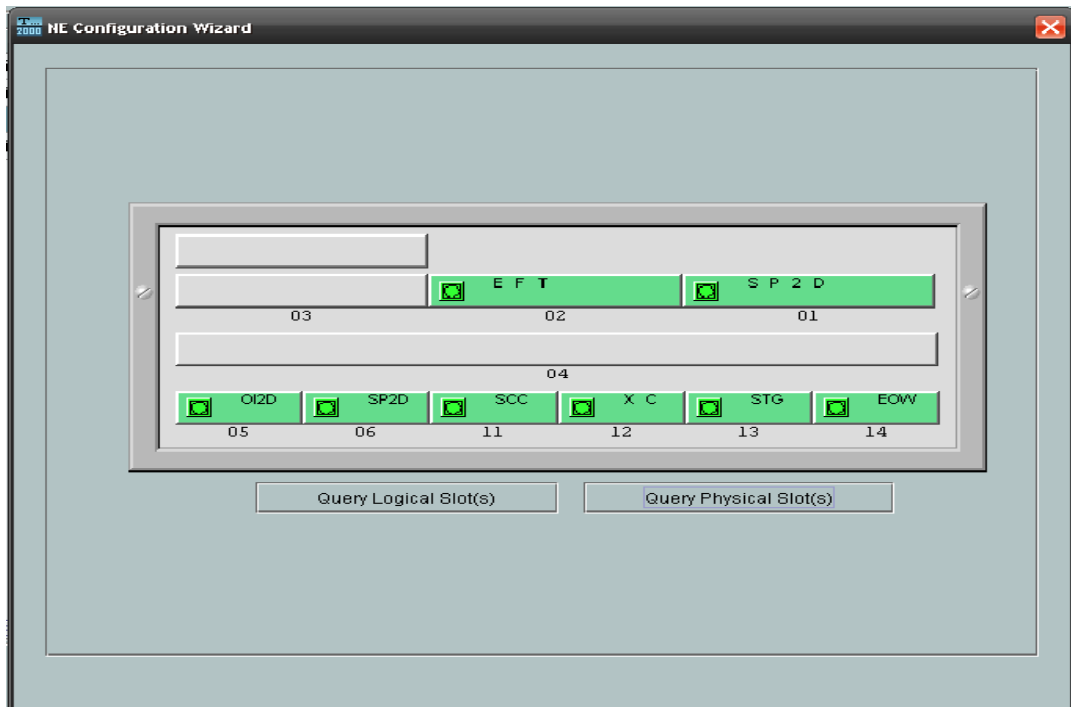



Figure IV.17. Configuration des différentes cartes.

IV2.4.5. Création des différentes liaisons entre les NEs

Avant de commencer cette étape, il faut s'assurer que toutes les connections sont bien faites, de bien choisir les cartes et les interfaces. Pour créer les différentes liaisons entre les différents NEs, on se réfère au tableau IV.2.

Dans le menu principale, on clique sur l'icône , on sélectionne NE1 comme étant la source. Pour « select fiber source, on sélectionne 3-OI2S comme source de la carte et le port 1 comme le port source. Même chose coté du NE4 (récepteur) 1-OI2S comme carte réceptrice est le port1 comme récepteur port.

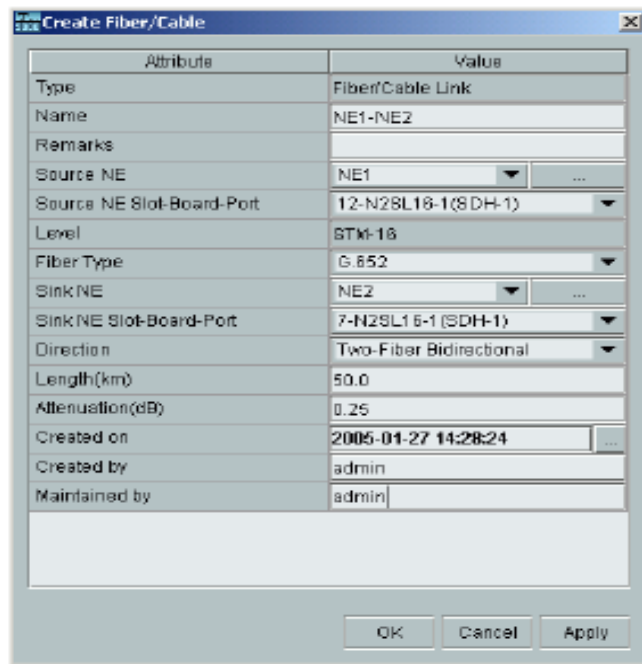


Figure IV.18. Création des différentes liaisons entre les NEs.

Dans la fenêtre de dialogue (figure IV-17), on fait entrer les attribues de la fibre et on clic sur « Apply ».On répète les même opérations pour créer les autres liaisons entre les NEs restants et cela on se basant sur les données du tableau. IV.2.

IV.2.4.5.Création d'une topologie sous-réseau

Dans cette partie on crée une topologie sous-réseau, on donne un nom pour le sous réseau crée, et on sélectionne tout les NEs (NE1,NE2,NE3,NE4) se trouvant dans « not selected object » pour les ajoutés dans « selected object »

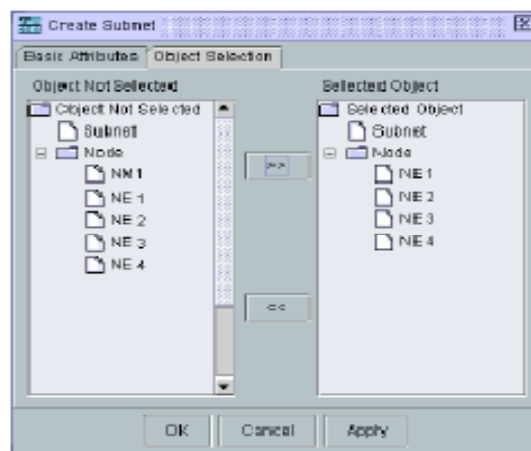


Figure IV.19. Création d'une topologie sous réseau.

IV.2.4.7.Création d'un sous réseau avec protection

Pour cela on entre dans « create protection subnet », on fait entrer le nom du sous réseau donnée auparavant, on sélectionne la capacité (un anneau STM-4, 2 fibres unidirectionnel).En fin on ajoute NE1,NE2,NE3 au sous réseau avec protection ainsi créer.

IV.2.4.8. Création d'une liaison point-à-point sans protection (NE1-NE4)

Même démarche à suivre, à la différence de choisir une capacité : STM-1.

IV.2.4.9.Création de service SDH

Pour créer un service de NE1 par exemple, on suit les étapes suivantes :

On sélectionne NE1 ensuite [configuration/NE Explorer] dans le menu principal et [configuration/SDH service configuration] pour afficher la fenetre « cross connection configure »

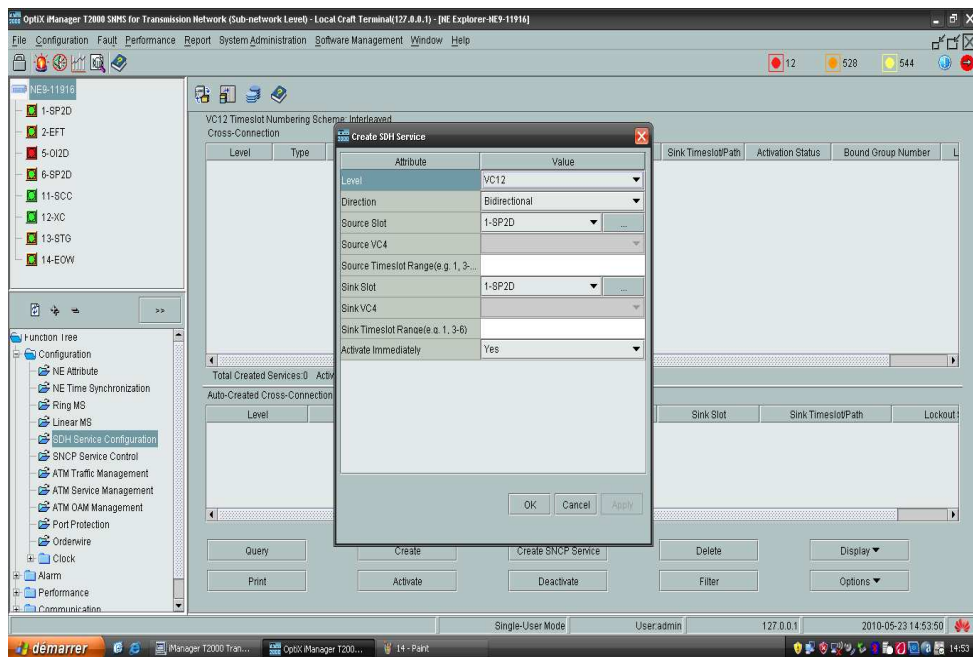


Figure IV.20. Création de service SDH.

En fonction des allocations des timeslot présenté dans la figure 1-4, on crée le service E1 de NE1 à NE2, du port 1-8 sur le slot IU4 au timeslots 1-8 dans le premier VC4 de l'interface optique de la carte sur le slot IU1.

On clic sur « create » pour pouvoir entrer les paramètres suivants dans la fenetre « create SDH Service »

- Service level : VC12
- Direction : bidirectional
- Source slot : 4-PD2T.
- Source Timeslot : 1-8.
- Sink slot : 1-OI4-1.
- Sink VC4 : VC4-1.
- Sink timeslot : 1-8.
- Activate immediately : yes.

On clic sur « Apply »

Ensuite, la même chose de NE1 à NE3 , de NE2 à NE3 en passant par NE1, de NE1 à NE4, de NE4 vers NE2 en passant par NE1 et enfin de NE4 vers NE3 en passant par NE1. Ainsi on termine de créer les cross-connect sur NE1, on passe à NE2 et ainsi de suite.

IV.2.4.10. Configuration de la ligne service

Une ligne de service sera crée entre les différents NEs

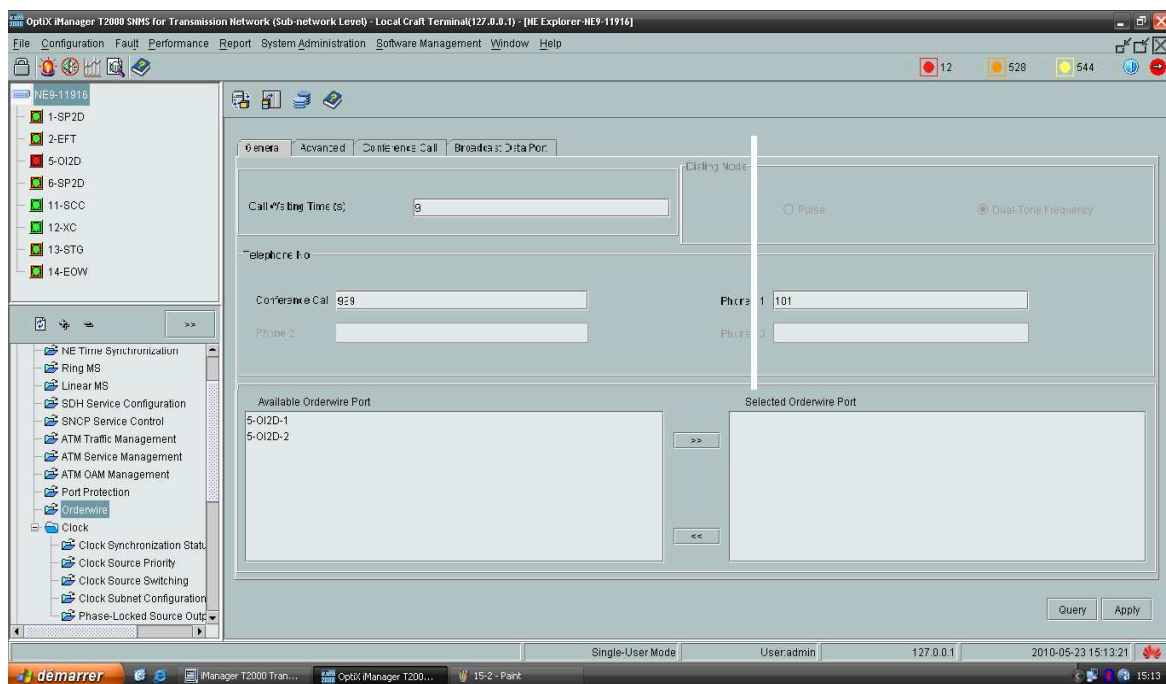


Figure IV.21. Configuration de la ligne service.

IV.3. Teste de la liaison optique

IV.3.1. Appareil Emission/Réception

Il s'agit de l'un des appareils des teste des liaisons optiques utilisés au centre CA2 d'ALGERIE TELECOM est « ACTERNA OLP-55 » (optecal power meter) ; voir annexe.

Cet appareil est conçu pour tester tous les systèmes optiques (affaiblissement) dans les conditions optimales. Ce dernier est alimenté par une batterie composée de quatre piles de type AA et la conception robuste du boîtier antichoc et anti-éclaboussure garantissent une grande autonomie sur le terrain, même dans les conditions de travail les plus extrêmes. Le fonctionnement sur secteur via un adaptateur AC.

Principe de la mesure

Le principe de la mesure de l'affaiblissement dans une fibre optique s'effectue à l'aide des appareils (Emission/Réception). Il consiste à envoyer un signal optique d'une longueur d'onde choisit 1550 nm avec un affaiblissement de 0db/Km, à l'autre extrémité (récepteur) on récupère le signal émis avec une certaine atténuation qui sera affiché sur l'écran.

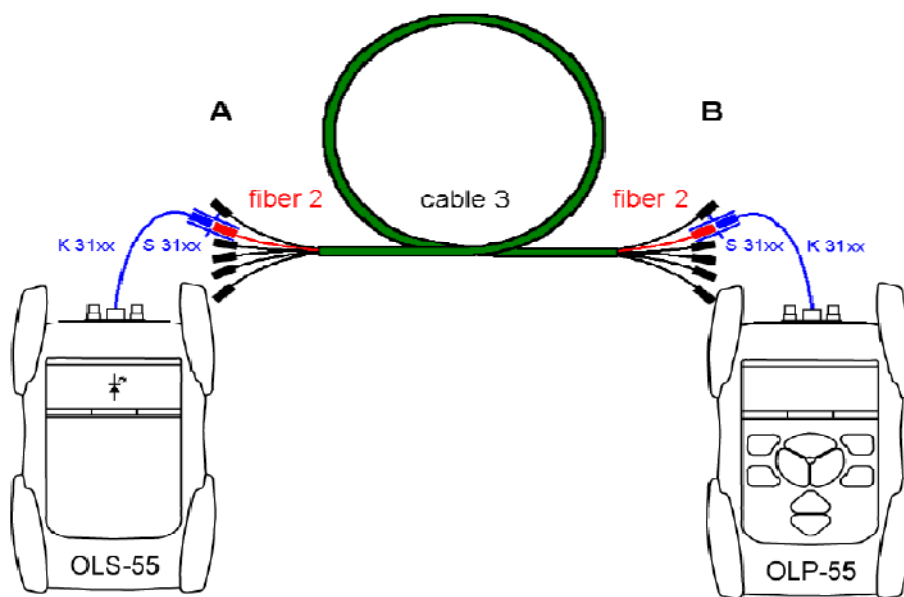


Figure IV. 22. Principe de la mesure par Appareil Emission/Réception.

IV.3.2. Le réflectomètre

Le réflectomètre est un appareil de mesure qui permet d'effectuer une analyse détaillée d'une liaison à fibre optique lors de la mise en service (mauvaise jonction, contrainte,.....), il permet de localiser avec précision les événements et défauts présents sur le lien de calculer leur atténuation. De plus, l'appareil effectue toutes ses mesures depuis une seule extrémité ce qui permet de simplifier le test.

Principe de la mesure

Le réflectomètre optique temporel consiste à injecter une impulsion lumineuse à une extrémité de la fibre optique, à analyser et à observer au même endroit l'intensité optique qui parcourt la fibre dans le sens inverse de propagation de l'impulsion. Le signal détecté (puissance en fonction de la distance : $P_r = K.P_o e^{-2.a.l}$) est de la forme exponentiel décroissant. Elle est due au phénomène de rétrodiffusion, avec superposition des pics dus aux réflexions sur les extrémités de la fibre ou discontinuité d'indice.

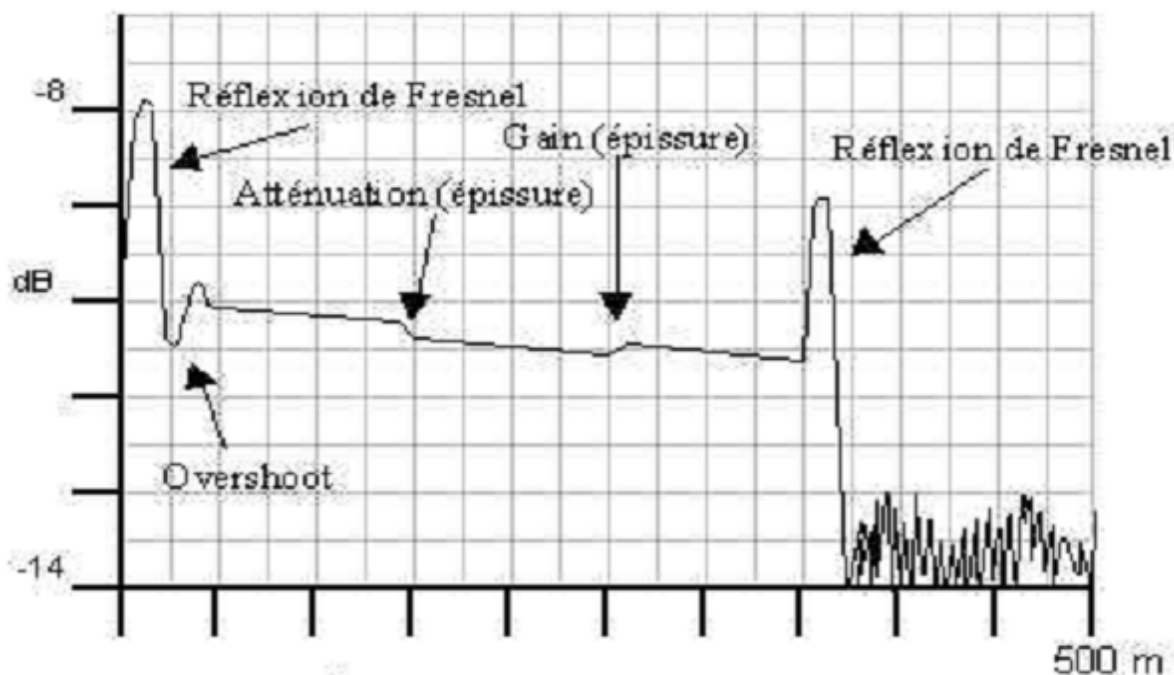


Figure IV.23. Réponse impulsionnelle du réflectomètre.

IV.3.3.Liaison électrique

L'appareil qui permet de mesurer le taux d'affaiblissement (erreur) d'une ligne électrique est l'analyseur de transmission (PF4).

Principe de la mesure

Le principe de la mesure est basé sur la génération d'un signal électrique de débit allant de 2 Mbit /s à 140 Mbit. Par ailleurs, le test se fait en effectuant un bouclage à la réception, ainsi on peut commencer le test en envoyant un signal électrique sans erreur ($E=0$) qu'on va récupérer à la réception avec un taux d'erreur qui peut être :

- $E \geq 10^{-7}$: la liaison est bonne ;
- $E=10^{-6}$: indication du problème ;
- $E=10^{-3}$: la liaison est mauvaise ;

Conclusion

Au niveau du CA2 de Tizi-Ouzou, plusieurs liaisons sont utilisées, on trouve des liaisons 155/622 Mbits/s, 2.5 Gbit/s et 10 Gbit/s. les liaisons hauts débits (par exemple celle qui relie CA2 et Alger via Boumerdes) sont obtenus en multiplexant 8 canaux de 10 Gbit/s. les capacités de ces liaisons peuvent être amélioré en augmentant le nombre de longueurs d'ondes injectées.

CONCLUSION GENERALE

Au terme de cette étude nous avons constaté que pour répondre aux besoins de débits toujours plus élevés, la capacité des systèmes de transmission optique peut être multipliée par l'emploi simultané de plusieurs canaux centrés sur des longueurs d'onde différentes (WDM), situées dans la plupart des cas dans la troisième fenêtre de transmission de la silice, autour de $1,55 \mu\text{m}$.

L'augmentation du débit d'une ligne de transmission optique peut se faire soit en augmentant le débit par canal, soit en mettant en jeu un plus grand nombre de canaux(DWDM), voir les deux en même temps.

Aujourd'hui l'utilisation couplée de SDH et WDM permet d'obtenir des réseaux optiques intégrant les points forts de SDH à savoir la fiabilité de transmission et la gestion de la bande passante, ces réseaux sont aujourd'hui en pleine expansion dans le monde.

Enfin, cette étude effectuée au centre d'amplification d'Algérie Telecom de Tizi-Ouzou nous a permis d'élargir nos connaissances dans le domaine des transmissions optiques, et d'acquérir une expérience pratique sur la planification d'un petit réseau SDH, ainsi que la mise en service des équipements de transmission SDH via fibre optique (huawei), tel que OPTIX 155/622 (metro 1000), OPTIX OSN 3500. Ces derniers permettent de construire des liaisons SDH et WDM.

LISTE DES TABULATIONS

Tableau II.1. Les combinaisons d'amplitudes et de phases.

Tableau II.2. Les niveaux de la norme SDH/SONET

Tableau IV.1. Les différents services échangés par les NEs

Tableau IV.2. Connexion des fibres entre les différents NE.

Tableau IV.3. Sources d'horloge pour les différents NE.

Tableau V.1. Caractéristiques des différents types de fibres optiques.

Tableau V.2. Caractéristiques de la fibre optique monomode.

Tableau V.3. Caractéristiques du réflectomètre.

Tableau V.4. Les services supportés par l'Optix 155/622H.

Tableau V.4. Les spécifications technique du OptiX 155/622H (metro 1000).

GLOSSAIRE

A

ADM	Add Drop Multiplexer (multiplexeur à insertion extraction).
AFDE	Amplificateur à Fibre optique Dopée Erbium.
AMI	Alternate Mark Inversion code
AOSC	Amplificateurs Optiques à Semi Conducteur.
AT	Algerie Telecom.
ATM	Asynchrone Transfert Mode (mode de transfert asynchrone).
ASK	Amplitude shift modulation.

B

BACKBONE	réseau fédérateur sur lequel est connecté l'ensemble des réseaux ou sous-réseaux.
BIT	Binary digit.
BITS	Building Integrated Timing Supply.

C

CCITT	Comité Consultatif International du Téléphone et Télégraphe.
CEL	Centre d'Entretien de Lignes.
CL	Centre Local de rattachement.

D

DEL	Diode Electroluminescent.
DGD	Differential Group Delay.
DL	Diode Laser.
DNU	Do Not Use.
DSF	Dispersion Shifted Fiber.

E

E1	European Digital Signal.
EA	Electro-absorption.
Ethernet	Norme définissant la transmission de données par câble.

ETSI European Telecommunications Standards Institutes.

F

FDM Frequency Division Multiplexing.

FH Faisceaux Hertziens.

FO Fibre Optique.

FOSI Fibre optique à Saute d'Indice.

FSK Frequency Shift Modulation

FWM Four Wive Modulation.

H

HDBn High Density Binary.

Hz Hertz (cycle par second).

I

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IES Interferences intersymbiles

IP Internet Protocol.

ISO International Standard Organization.

ISDN International Service Digital Network.

IT Interval du Temps.

L

LAN Local Area Network.

LASER Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

LED Light Emitting Diode.

LEO Low Earth Orbit.

LO Low Order

M

MAN Metropolitan Area Network.

MEMS Micro-Electro Mechanical Systems.

MIC Modulation par Impulsion Codée.

N

NE Network Element.

NRZ Non Remise à Zéro.

NRZI Non Remise à Zéro Inverted.

NZ-DSF Non-Zero Dispersion-Shifted-Fiber).

O

OADM Optical Add/Drop Multiplexer.

OC Optical Carrier (SONET).

OXC Optical Cross-Connect.

P

PDA Photodiode à Avalanche.

PDH Pleisiochronous Digital Hierarechy.

PMD Dispersion Modale de Polarisation.

PON Passive Optical Network.

PSK Pulse Shift Modulation.

Q

QAM Quadrature Amplitude Modulation.

R

RNIS Réseau Numérique à Intégration de Services.

RTC Réseau Téléphonique Commuté.

S

SDH Hiérarchie numérique plésiochrone.

SMF Single Monomode Fiber

SOH Section Over Head.

SONET Synchronous Optical NETWORK.

STM Synchronous Transfert Module d'ordre n.

SPM Shift Pulse Modulation.

T

TDM Time Division Multiplexing.

U

UIT Union International des Télécommunications.

V

VC-n Conteneur Virtuel level n.

W

WAN Wide Area Network

WDM Wavelength Division Multiplexing.

X

XPM Cross Phase Modulation.

3R Retiming Reshiping Regenerating

LISTE DES FIGURES

Figure.1. Architecture typique d'un réseau de télécommunication.

Figure I.2. Schéma de principe d'une liaison optique.

Figure I.3. Un laser est un oscillateur composé d'un milieu amplificateur (A) et d'une boucle de contre-réaction (CR).

Figure I.4. Schéma des processus d'émission spontanée (a), d'absorption (b) et d'émission stimulée (c).

Figure I.5. Caractéristique Puissance-Courant d'un laser.

Figure I.6. Modulation directe d'une diode laser.

Figure I.7. Synoptique de la modulation directe.

Figure I.8. Synoptique de la modulation externe.

Figure I.9. Structure d'une fibre optique.

Figure I.10. Ouverture numérique d'une fibre optique

Figure I.11. Profil d'une fibre monomode à saut d'indice.

Figure I.12. Atténuation spectrale d'une fibre standard en fonction de la longueur d'onde.

Figure I.13. Effet de la dispersion chromatique : le signal qui se propage s'élargit.

Figure I.14. Variation de la dispersion en fonction de la longueur d'onde pour une fibre standard (SMF) et une fibre à dispersion décalée (DSF)

Figure I.15. Illustration de la différence du temps de propagation des deux modes.

Figure I.16. Schéma d'un récepteur de données à détection directe.

Figure I.17. Courbes de sensibilité et de rendement selon les longueurs d'onde pour divers matériaux.

Figure I.18. Photodiode PIN.

Figure I.19. Photodiode à avalanche en Silicium.

Figure I.20. Configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteur

Figure I.21. Amplificateur optique à fibre dopée a l'erbium avec pompage optique.

Figure II.1. l'échantillonnage et la quantification d'un signal analogique $S(t)$.

Figure II.2. Compression du signal avec la loi A.

Figure II.4. Codage HDBN.

Figure II.5. Codage NRZI.

Figure II.6. Codage Manchester.

Figure II.7. Modulation FSK.

Figure II.8. Modulation PSK.

Figure II.9. Modulation ASK.

Figure II.10. Modulation QAM.

Figure II.11.Exemple de constellation QAM8(3 bits par baud).

Figure II.12.Illustration d'une transmission asynchrone.

Figure II.13. Illustration d'une transmission synchrone.

Figure II.14. Multiplexage G.733 (USA et Japon)

Figure II.15. Multiplexage G.732 (Europe).

Figure II.16. Les cinq niveaux PDH.

Figure II.17. La trame de base STM1.

Figure II.18. Structure de multiplexage SDH

Figure II.19. Schéma de principe d'un multiplexage à répartition dans le temps.

Figure II.20. Multiplexage fréquentiel FDM.

Figure II.21. Schéma synoptique de principe d'un multiplexage WDM.

Figure III.1. Combinaison entre les différentes couches de services et transports.

Figure III.2. Principe d'une liaison WDM.

Figure III.3. Courbe d'atténuation de la silice incluant les fenêtres de transmission.

Figure III.4. Principales composantes d'un réseau DWDM.

Figure III.5.Courbe de transmission d'un filtre dichroïque.

Figure III.6. Multiplexeur/démultiplexeur à filtre optique

Figure III.7. Multiplexeur à filtre avec lentille à G.I

Figure III.8. Multiplexeur/Démultiplexeur à coupleur en arbre.

Figure III.9. Démultiplexeur en longueur d'onde à réseau de diffraction.

Figure III.10. Réseau de Bragg : (a) intégré dans une fibre optique (b) intégré dans un guide d'ondes.

Figure III.11. Elargissement d'une impulsion au cours de la propagation.

Figure III.12. Influence néfaste de l'automodulation de phase dans le contexte du WDM.

Figure III.13. Schéma Illustratif du FWM.

Figure III.14. Illustration de la modulation XPM.

Figure III.15. Signal à l'entrée de la fibre

Figure III.16. .Signal après propagation en fonction de la puissance incidente.

Figure III.17. Bilan de l'impact des effets non linéaires dans le contexte WDM.

Figure III.18. Principe d'un OADM.

Figure III.19. OADM Fixes

Figure III.20. OADM Dynamique

Figure III.21. Exemple de brasseur réalisé à base de micro miroirs 2D.

Figure IV.1. Pose en fouille ouverte.

Figure IV.2. Pose en fourreaux.

Figure IV.3. Pose en caniveaux de surface

Figure IV.4. Pose en chemin de câble.

Figure IV.5. Pose en goulotte

Figure IV.6. Connecteurs en fibre optique

Figure IV.7. Trois exemples de connexions en fibre optique

Figure IV.8. Schéma synoptique du réseau SDH.

Figure IV.9. Schéma synoptique des adresses IP de chaque NE.

Figure IV.10. Schéma synoptique des cartes de chaque NE.

Figure IV.11. Allocation des timeslot aux différents NE.

Figure IV.12. Acheminement d'horloge entre les différents NEs.

Figure IV.13. Fenêtre de lancement de T2000.

Figure IV.14. Fenêtre de la recherche de l'équipement.

Figure IV.15. Les différents modes de configuration.

Figure IV.16. Création de NE1.

Figure IV.17. Configuration des différentes cartes.

Figure IV.18. Création des différentes liaisons entre les NEs.

Figure IV.19. Création d'une topologie sous réseau.

Figure IV.20. Création de service SDH.

Figure IV.21. Configuration de la ligne service.

Figure IV.22. Principe de la mesure par Appareil Emission/Réception.

Figure IV.23. Réponse impulsionnelle du réflectomètre.

Figure V.1. Modèle OSI

Figure V.2. Backbone national nord.

Figure V.3.Backbone national est.

Figure V.4.Backbone national ouest.

Figure V.5. Backbone national sud.

Figure V.6. Synchronisation du réseau national Backbone 10 Gbits/S (boucle est).

Figure V.7. Backbone métropolitain d'Alger.

Figure V.8. Interconnexion des clients d'AT.

Figure V.9. Réseau international.

Figure V.10. Réseau international d'AT par câble fibre optique.

Figure V.11. Appareil d'émission /réception.

Figure V.12. Appareil réflectomètre.

Figure V.13. Exemple de fenêtre observée sur le réflectomètre.

Figure V.14. Vues de face et d'arrière d'OptiX 155/622H.

Figure V.15. Vue arrière du convertisseur d'UPM.

Figure V.16. Plateforme De Transport Du MSTP (Multi-Service).

ANNEXE

ANNEXE A : fibre optique

1- Caractéristiques des différents types de fibres optiques :

Matériaux	Plastique (POF)	Silice (cœur) Silicone (gaine)	Toute silice			
			Type	Saut D'indice	Saut D'indice	Saut D'indice
Diamètre Cœur (□m)	930 (Ou plus)	200 (Ou plus)	100	50	62.5	8.3
Diamètre Gaine (□m)	1000 (Ou plus)	380 (Ou plus)	140	125	125	125
Atténuation (dB/Km)	200	5 à 10	1 à 5 850 nm	3à 850nm 1à 1300nm	1.2à1300 nm	0.5à1560nm
Logeurs d'ondes d'utilisation	450/700 nm	700/1000 nm	800/1500 nm	800/1300 nm	1300 nm	1100/1560 nm
Ouverture numérique	0.5	0.4	0.28	0.20	0.27	0.1
B.P(MHz.Km)	10	20	50	500	300	10000
débit	38.4 Kbit/s	10 Mbit/s	100 Mbit/s	300 Mbit/s	100 Mbit/s	2 à 5 Gbit/s
applications	éclairage transmission locale	Réseaux locaux	Transmission courte Distance Réseaux LAN	Télécoms Moyenne distance	Réseaux locaux et privés	Télécoms longues distances Réseau MAN et WAN

Tableau V-1-Caractéristiques des différents types de fibres optiques.

2- Caractéristiques de la fibre optique monomode :

Types de fibre monomode :	G 625	G 653	G 655	G 657
---------------------------	-------	-------	-------	-------

Année de mise en service	1983	1985	1994	2005
Longueur d'onde de coupure en nm	1310	1550	1550	1260/1625
Affaiblissement 1285-1330 nm en dB/Km	< 0.4	< 0.4	< 0.5	< 0.35
Affaiblissement 1550 nm en dB/Km	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.21
Dispersion chromatique 1285-1330 en ps/nm.Km	< 3.5	< 23	< 23	< 3.5
Dispersion chromatique 1550 en ps/nm.Km	< 19	< 3.5	< 3.5	< 18
Dispersion du mode de polarisation en ps/Km p ^{1/2}	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.2
Longueur d'onde de coupure en câble	1150/1280	1050/1350	1450	1260

Tableau V-2-caractéristiques de la fibre optique monomode.

Annexe B

1- Modèle OSI :

Le modèle OSI (Open Système Interconnection) définit de quelle manière les ordinateurs et les périphériques en réseau doivent procéder pour communiquer.

- Il spécifie le comportement d'un système dit ouvert.
- Les règles de communication constituent les protocoles normalisés.
- Le modèle OSI est normalisé par l'ISO.

1-1 Description du modèle :

Le modèle OSI qui date des années 1980 se décompose en 7 parties appelées couches.

- Chaque couche est responsable de l'un des aspects de la communication.
- Une couche de niveau N communique avec les couches N+1 par le biais d'une interface.
- Une couche inférieure transporte les données vers la couche supérieure sans en connaître la signification.
- Les couches N de deux systèmes communiquent à l'aide de protocoles de communication communs.

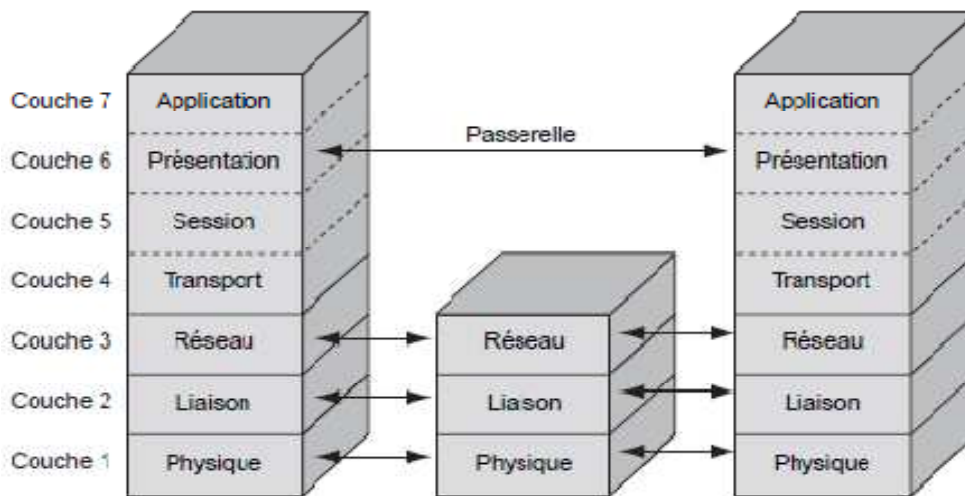


Figure V.1. Modèle OSI

1-2 Les différentes couches du modèle :

Le modèle OSI comporte 7 couches :

Niveau 1 : couche physique

Elle s'occupe de la transmission (d'échange) des bits sur un canal de communication, elle se charge de l'adaptation du signal au support de transmission, elle gère le type de

transmission (synchrone ou asynchrone) et s'il y a lieu, elle met en œuvre les mécanismes de modulation et démodulation du signal.

Niveau 2 : couche liaison

L'unité d'échange de cette couche est la trame, elle définit les règles d'émission et de réception des données à travers la connexion physique de deux systèmes et elle doit transmettre les données sans erreurs et déterminer la méthode d'accès au support.

Cette couche permet aussi de mettre en œuvre la détection et la correction des erreurs, d'établir et de contrôler la liaison au niveau logique.

Niveau 3 : couche réseau

L'unité d'échange de cette couche est le paquet. Elle permet de gérer l'acheminement des données en assurant le routage (choix du trajet) des paquets de données, elle assure également la traduction des adresses logiques en adresse physiques.

Niveau 4 : couche transport

Elle fournit un service de transport de bout ne bout, elle assure également les services qui n'ont pas été pris en compte par les couches inférieurs (gestions des erreurs, routage...) et elle permet de multiplexer plusieurs flux sur le même support.

Cette couche permet aussi de segmenter les messages en paquets numérotés en tant qu'émetteur, et récepteur, elle reconstitue les messages en plaçant les paquets dans l'ordre.

Niveau 5 : couche session

C'est la première couche orientée traitement, elle permet l'ouverture et la fermeture d'une session de travail entre 2 systèmes distants et assure la synchronisation du dialogue, elle permet aussi de définir le mode de transmission (half-duplex, full-duplex) et de gérer la chronologie du dialogue afin de mettre en place des procédures de reprise.

Niveau 6 : couche présentation

Elle permet de transcrire les données en format compréhensible par les deux systèmes, d'assurer la mise en forme de l'information pour qu'elle soit accessible à l'utilisateur et d'effectuer les fonctions de codages, compression, cryptage et décryptage.

Niveau 7 : couche application

Elle fournit des services utilisables sur le réseau par les applications installées. Les principaux services sont :

- Transfert de fichiers (FTP).
- Messagerie ou courrier électronique.
- Lecture de pages internet (http).
- Accès à distance.

2. Modulateurs externes

Plusieurs types de modulateurs externes sont disponibles. On peut citer : le modulateur électro-absorbant. (MEA) et le Mach-Zehnder (MZ).

2-1 Modulateur électro-absorbant

Le principe du modulateur à électro-absorption consiste à pouvoir commander l'absorption du matériau par une tension. Cette technique est basée sur les phénomènes électro-absorbants. En particulier ceci est obtenu par l'utilisation de l'effet Franz-Keldysh dans lequel le gap d'un semiconducteur se trouve modifié sous l'action d'un champ électrique extérieur. Ce champ appliqué produit une absorption commandée en tension, comme un interrupteur.

En d'autres termes, un modulateur électro-absorbant en onde guidée est assimilable à une diode PIN dont la région intrinsèque contient le matériau électro-absorbant. Un champ électrique est appliqué au matériau électro-absorbant en polarisant la diode PIN en inverse. En régime absorbant le modulateur se comporte comme une photodiode, avec génération de photocourant.

Les grandeurs qui caractérisent les performances d'un modulateur électro-absorbant sont le taux d'extinction lié à l'absorption en fonction de la tension appliquée, l'atténuation en mode passant, la bande passante et le facteur de couplage phase-amplitude.

2-3 Modulateur d'amplitude à base de Mach-Zehnder (MZ)

Modulation de l'intensité lumineuse par variation de phase transformée en variation d'intensité par un système interférométrique.

La lumière est divisée par un coupleur en Y dans deux guides. L'écartement de ces deux guides est tel que le couplage par onde évanescente est négligeable. Elle se recombine ensuite

dans un deuxième coupleur en Y suivant la différence de phase, les deux faisceaux optiques interfèrent de manière constructive ou destructive. La modulation d'amplitude est obtenue par interférence des deux faisceaux optiques dont les phases sont contrôlées par l'intermédiaire du champ électrique appliqué. En effet, ce dernier entraîne une modification de l'indice de réfraction du matériau Δn sur la longueur L du guide d'ondes (effet électro-optique) ce qui modifie la propagation de l'onde optique par ajout d'un déphasage traduit par une variation de la phase de l'onde optique. Un retard entre les deux faisceaux permet de moduler l'amplitude de la lumière résultante.

ANNEXE C : réseaux de communication d'ALGERIE TELECOM

1 .Introduction

Pour répondre a la montée en débit qui se pose actuellement ALGERIE TELECOM se doit de faire évoluer la couche SDH telle qu'elle est déployée vers DWDM. Une telle évolution du réseau doit se faire dans la continuité en essayant de rentabiliser les infrastructures en fibres optiques et systèmes déjà installés.

1.1. Réseaux de télécommunication d'ALGERIE TELECOM

A - description du réseau

ALGERIE TELCOM (AT) a un réseau multiservices pouvant supporter les services nécessaires a une activité d'opérateur de télécommunication en interne et en externe ; a savoir : internet, vidéo, échange de données en temps réel, transfert de fichiers,

communication multimédia, interconnexion des réseaux locaux d'entreprise et la téléphonie fixe et mobile.

AT en tant qu'opérateur des opérateurs, modernise son réseau de télécommunication par mise en œuvre des backbone fibre optique de grande capacité DWDM parallèlement au réseau SDH en faisceaux hertziens pour satisfaire les besoins des opérateurs entrants, les banques, les entreprises, et tous les utilisateurs afin de contribuer au développement national.

AT, par le dimensionnement du réseau algérien, tient compte non seulement des prévisions de trafic mais aussi de l'aspect sécurisation, supervision et synchronisation pour une sauvegarde totale du trafic. Et pour une meilleure qualité de service et par souci d'une prise en charge efficace de sa clientèle a mis en place son (call centre) à la disposition de tous.

B. architecture du réseau

Le backbone algérien fibre optique est constitué de :

- Deux systèmes d'anneaux SDH parallèles à (10 Gbits/s et 2.5 Gbit/s) reliant les trois grandes villes Alger-Oran-Constantine en bouclant le trafic par la côte et les hauts plateaux.
- Un système d'anneau SDH à 2.5 Gbit/s pour la connexion du grand sud.
- Une passerelle à 10 Gbit/s entre Boughezoul et Laghouat pour l'interconnexion du backbone nord et backbone sud.
- Une boucle DWDM à 80 Gbit/s.
- Des boucles régionales à 2.5 Gbit/s (est ouest sud).

Les figures suivantes représentent l'architecture du réseau backbone d'ALGERIE TELECOM.

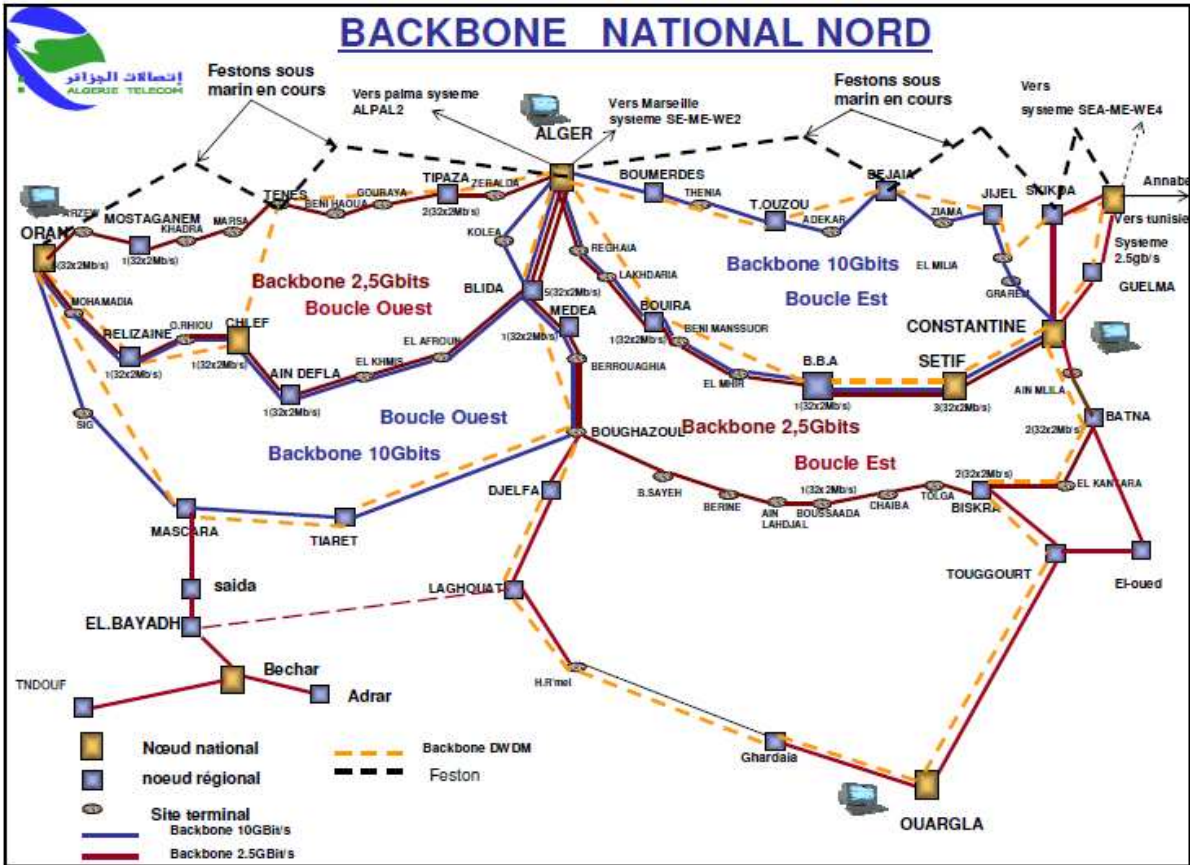


Figure V.2. Backbone national nord

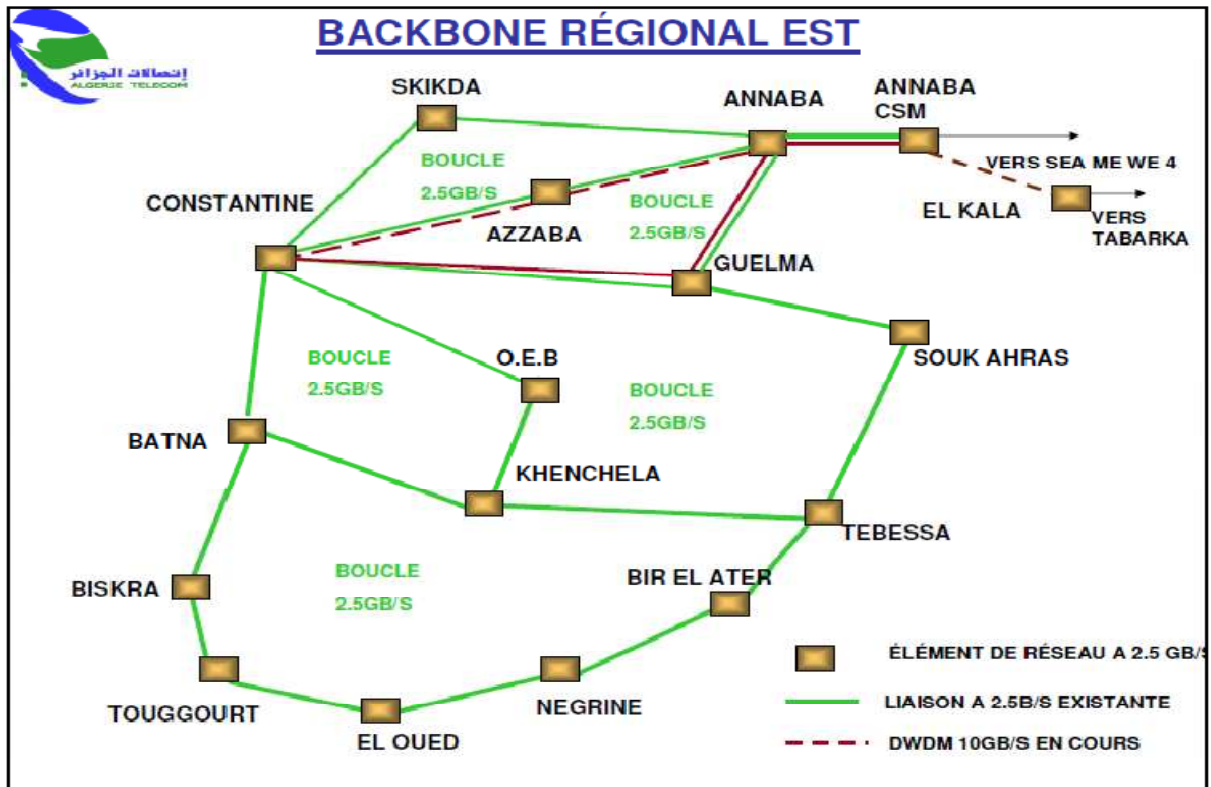


Figure V.3. Backbone national est.

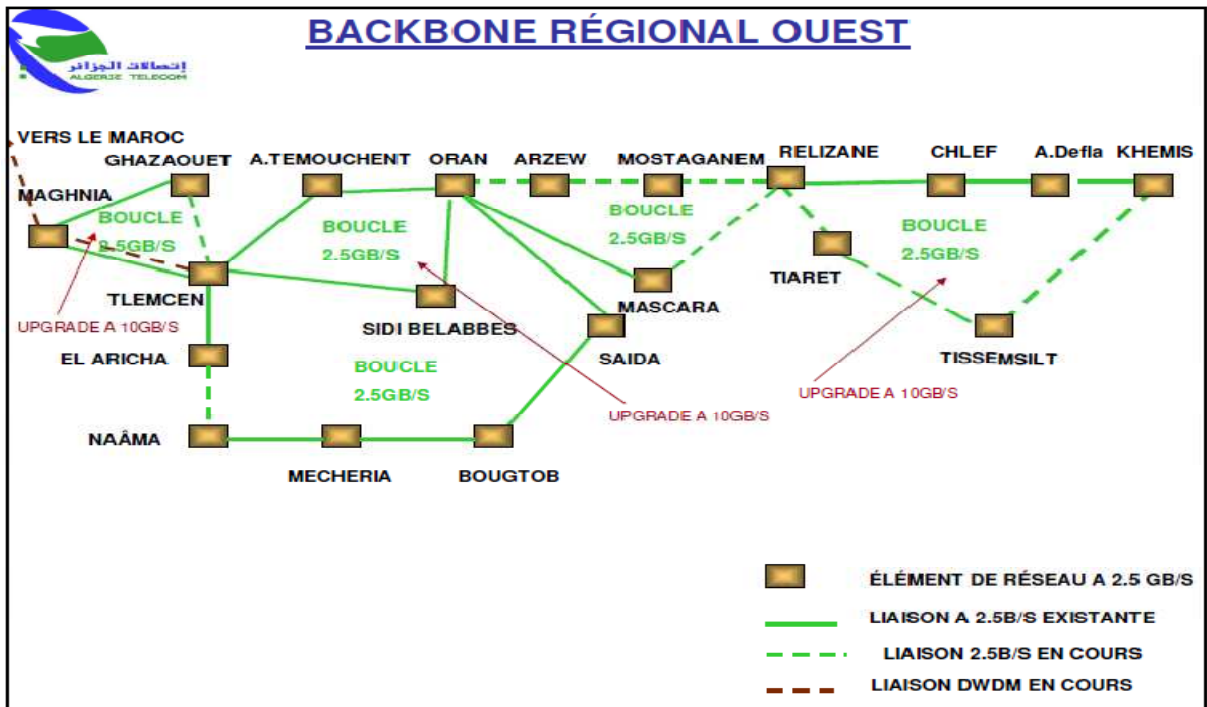


Figure V.4.Backbone national ouest

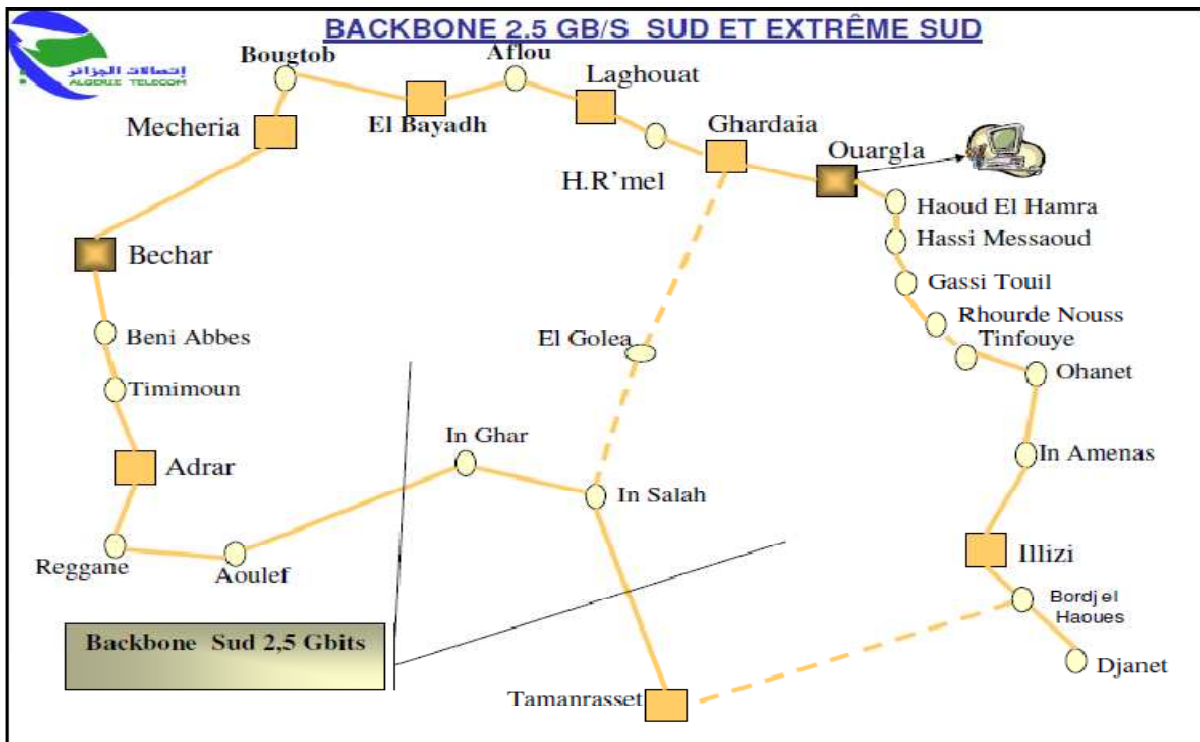


Figure V.5. Backbone national sud

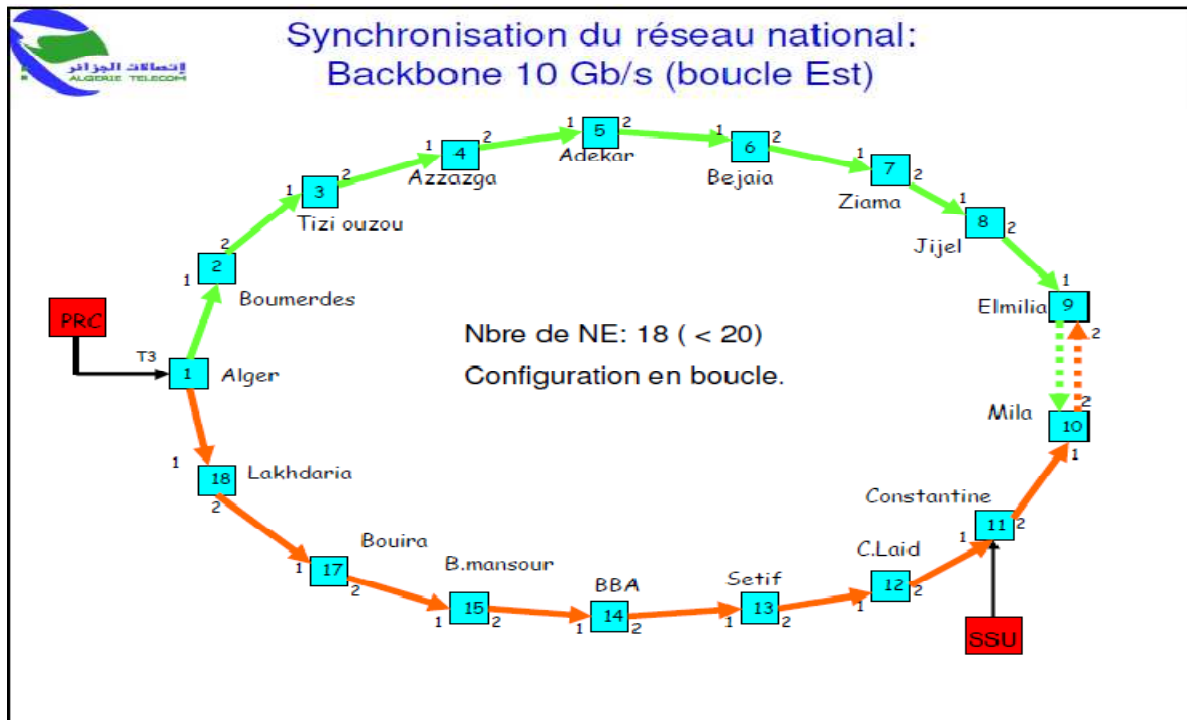


Figure V.6. Synchronisation du réseau national Backbone 10 Gbits/S (boucle est)

A l’instar des réseaux développés, **ALGERIE TELECOM** a mis en œuvre une infrastructure maillée en fibres optiques afin de préparer les accès aux réseaux des technologies de l’information et de la communication.

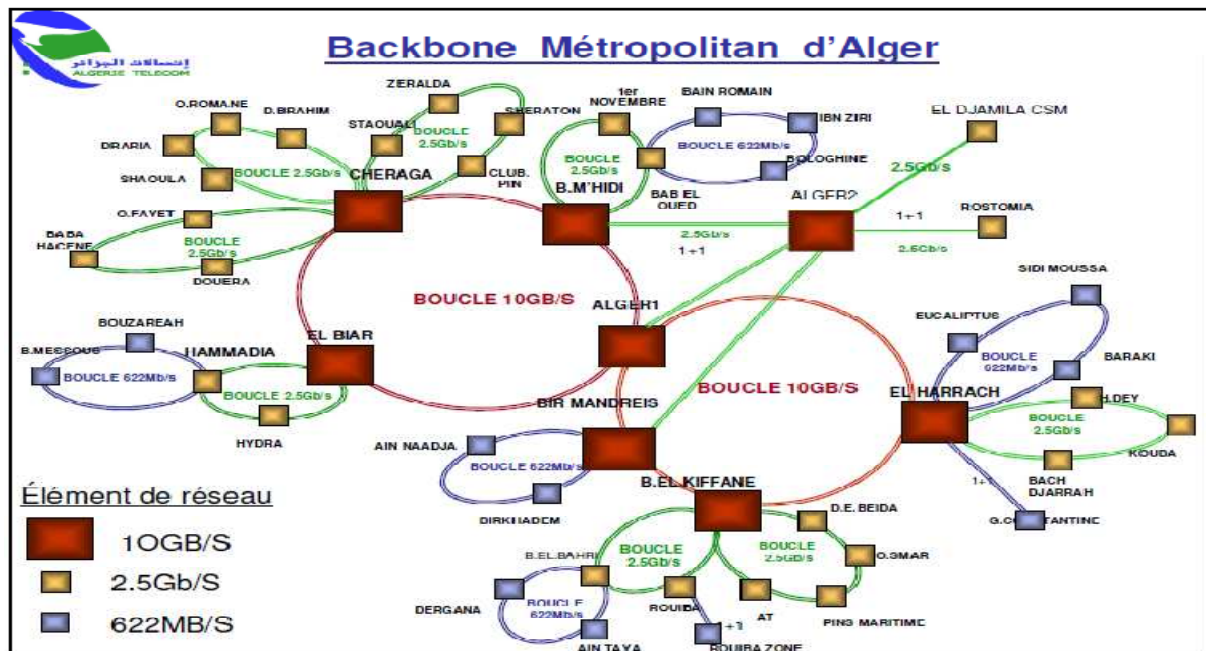


Figure V.7.Backbone métropolitain d’Alger

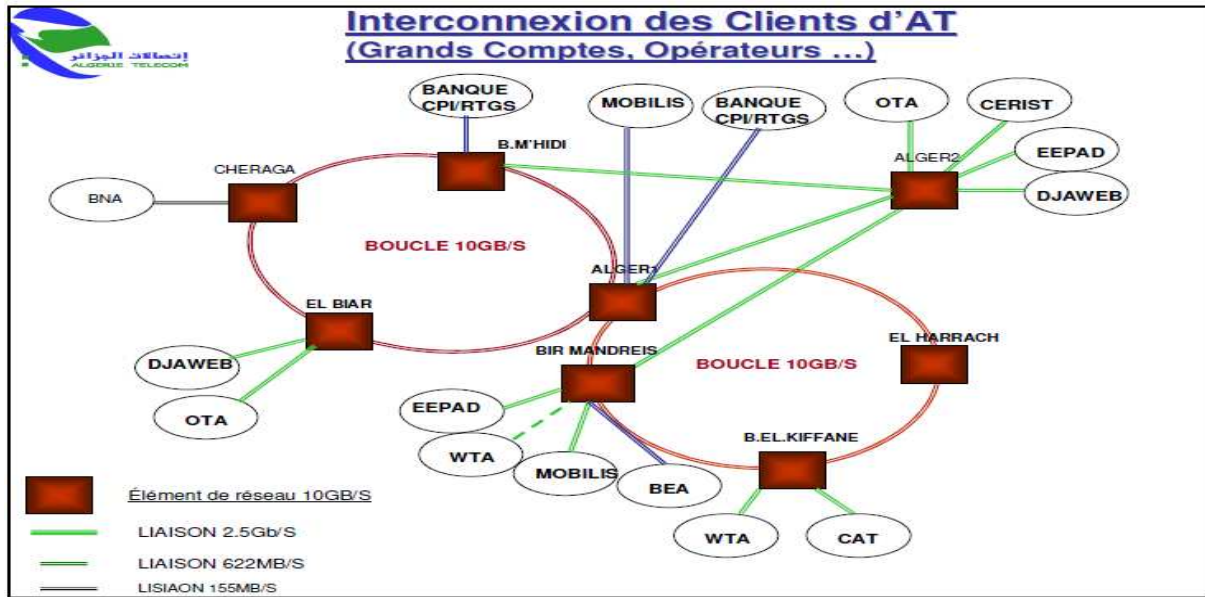


Figure V.8. Interconnexion des clients d'AT

Liaison par câble sous marin international :

- Réseau SEA-ME-WE2, capacité potentielle: 565 Mbit/s (7600 Circuits) mise en service : Juin 1994.
- Alger - Palma (Espagne) ALPAL2, capacité potentielle : 2.5 Gbit/s extensible à 10 Gbit/s selon la technologie SDH et la technique DWDM. Mise en service commerciale: Mai 2002. Upgrade 10Gb/s fin Juillet 2006
- Réseau SEA ME WE 4 capacité potentielle a 60gb/s extensible a 640gb/s selon la technologie SDH et la technique DWDM. (Multiplexage par Longueur d 'Onde). Mise en service commerciale 22 Novembre 2005

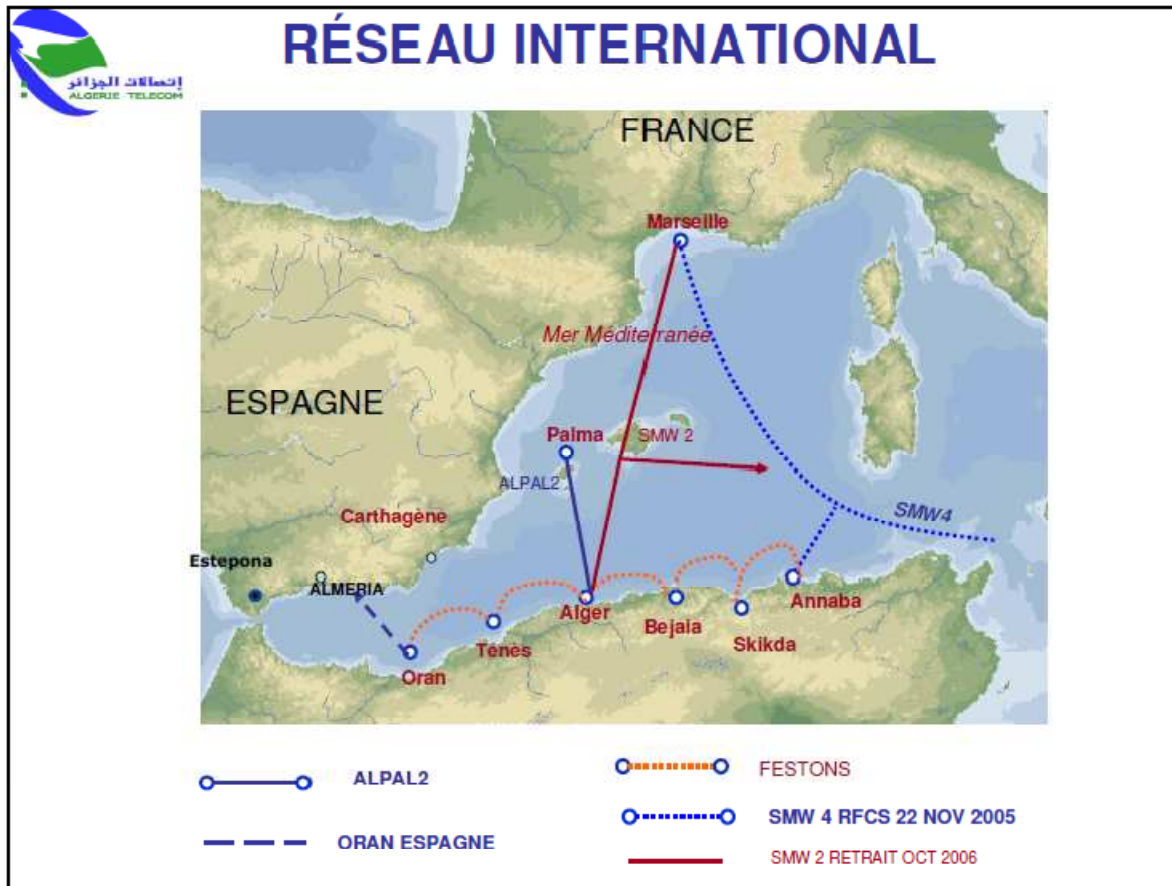


Figure V.9. Réseau international

- Liaison en service: ALGERIE – MAROC, capacité potentielle: 2.5GB/S et six (06) fibres de réserves disponibles.
- Liaison en service: ALGERIE – LYBIE, capacité potentielle: 622 Mbit/s et six (06) fibres de réserves disponibles.
- Liaison en service: ALGERIE – TUNISIE, capacité potentielle: 622 Mbit/s avec six (06) fibres de réserves extensible à 2.5gb/s.

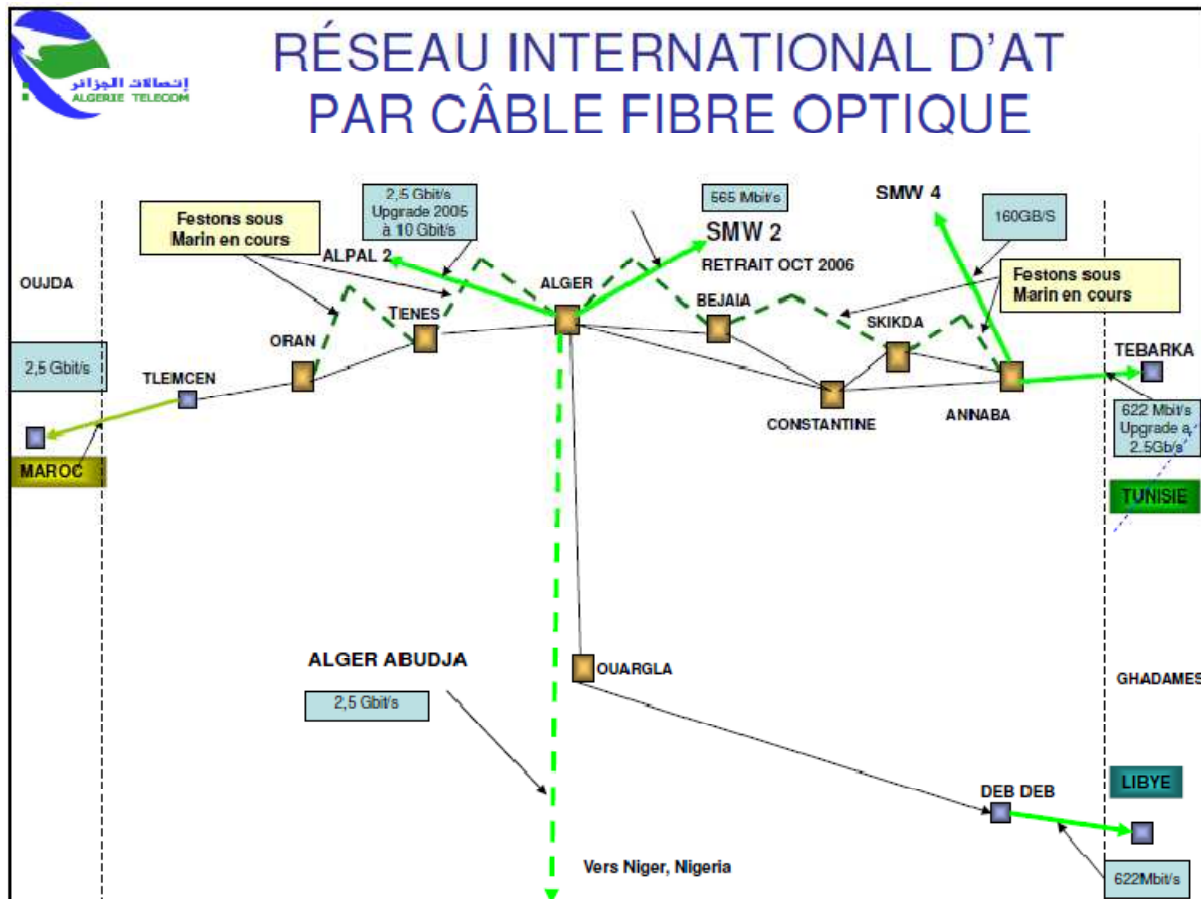


Figure V.10. Réseau international d'AT par câble fibre optique

ANNEXE D Appareil de mesure et testes au niveau du CA2 d'ALGERIE TELECOM

1.Appareil d'Emission Réception

Dans un réflectomètre, un générateur d'impulsions commande une diode laser qui a pour charge d'envoyer dans la fibre de fortes impulsions lumineuses. Le signal réfléchi vers l'entrée de la fibre est séparé du signal émis par un coupleur.

Une photodiode est utilisée comme détecteur. L'intensité reçue est d'abord moyennée, puis transformée par une fonction logarithmique afin de permettre ensuite la représentation en dB du signal rétrodiffusé, La courbe de rétrodiffusion de la fibre à analyser apparaît alors sur l'écran de visualisation, permettant d'évaluer les différentes causes de pertes en niveau du signal rétrodiffusé.



Figure. V.11. Appareil d'émission /réception.

Caractéristiques principales

- Dynamique du signal : 45dB, permet de mesurer des défauts situés à une distance de 190 Km.
- Temps de réponse : 10 s pou une distance de 190 Km.
- Longueurs d'onde : 1310, 1450, 1550, 1625nm
- Mesures de pertes de Fresnel.
- Mesure des caractéristiques de dispersion chromatique.

2.Réfectomètre






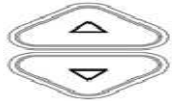
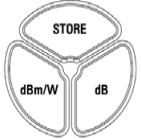
7. Clavier.	
	<p>Longueur d'onde</p> <p>Sélectionner une longueur d'onde dans la liste affichée.</p>
	<p>Recto-éclairage</p> <p>Active le recto-éclairage de l'écran</p>
	<p>Menu précédent</p> <p>Retourne au niveau de menu précédent</p>
	<p>Menu/enregistrement</p> <p>Ouvre le menu et sélectionne une option.</p>
	<p>Sous /hors tension</p> <p>Met l'appareil Sous /hors tension</p>
	<p>Haut/bas</p> <p>Fait défiler vers le haut /bas</p>
	<p>Store : Enregistrer les valeurs affichées,</p> <p>Dbm/W : changement de l'unité.</p> <p>Db : active le mode d'affichage du niveau de puissance relative.</p>

Tableau V.3.caractéristiques du réflectomètre.

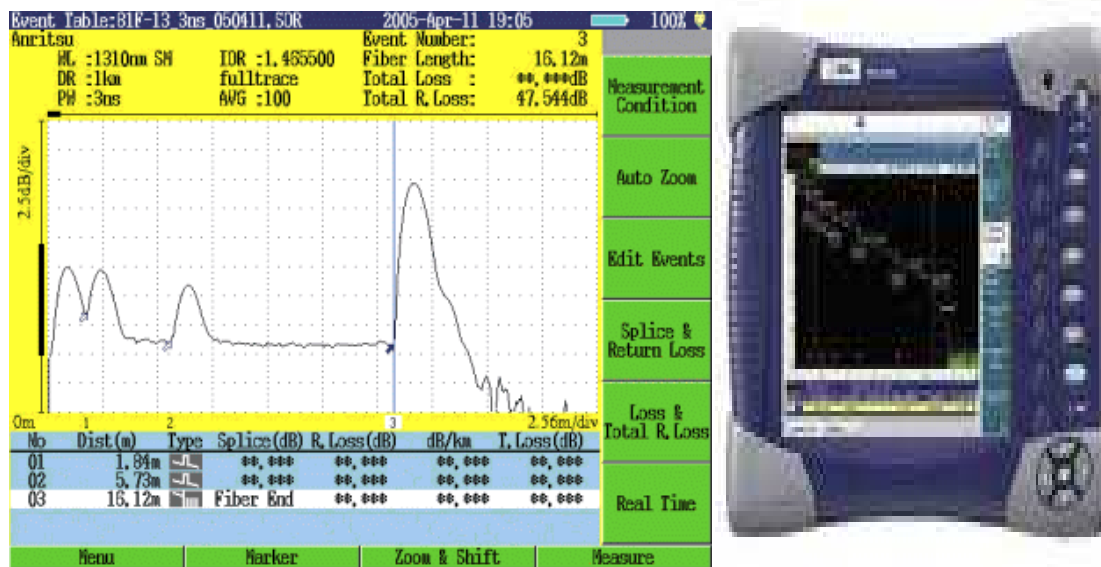


Figure V.14.exemple de fenêtre observée sur le réflectomètre.

-L'échelle logarithmique:

*L'axe vertical est gradué en décibels

*L'axe horizontal est gradué en temps ou en distance.

ANNEXE E: Equipment the OptiX 155/622H (metro 1000)

Huawei

Le système d'OptiX 155/622H développé par Huawei est une nouvelle génération d'équipement de transmission compatible du multi-service STM-1/STM-4. Il soutient la transmission STM-1/STM-4 synchrone et optique et la mise à niveau en ligne.



Figure V.15. Vues de face et d'arrière d'OptiX 155/622H

Supported service and quantity

Service type	Maximum access quantity for single equipment
SDH	14 x STM-1(o), 6 x STM-1(e), or 3 x STM-4
PDH	80 x E1, 64 x E1/T1, 6 x E3, or 6 x DS3
Ethernet	20 x FE(e), 4 x FE(o), or 2 x GE(o)
ATM	4 x 155 Mbit/s
64 kbit/s	4 x Nx64 kbit/s (N≤31)

Tableau V.4. Les services supportés par l'Optix 155/622H.

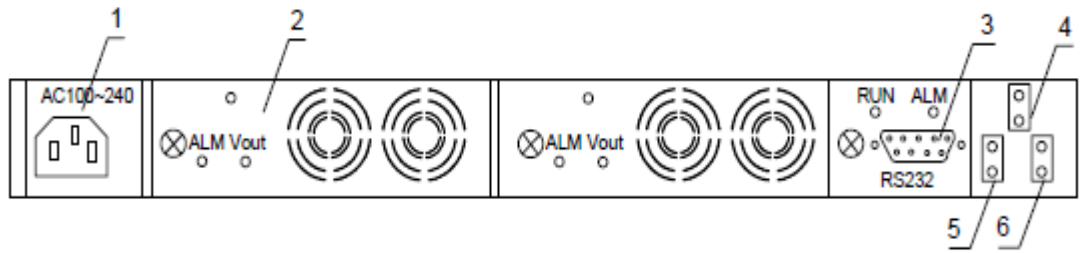


Figure V.16. Vue arrière du convertisseur d'UPM

- 1. Entrée AC.
- 2. Passage d'échappement du redresseur module/air.
- 3. interface de Communication.
- 4. Interface de la batterie.
- 4.5.Charge .

Tout les multiservices (SDH de soutien de Mini-CSAD de Huawei`s OptiX, Elles offrent (PDH atmosphère, IP/ Transmission et gestion d'Ethernet) sur la même plateforme. (Fig.2)



Figure V.17. Plateforme De Transport Du MSTP (Multi-Service)

Dans l'OptiX 155/622H, l'unité de croix-relier est l'unité de noyau, aidée par l'unité d'interface de CSAD, unité d'interface de PDH/Ethernet, unité d'horloge, SCCL Le schéma suivant montre la structure de l'OptiX 155/622H.

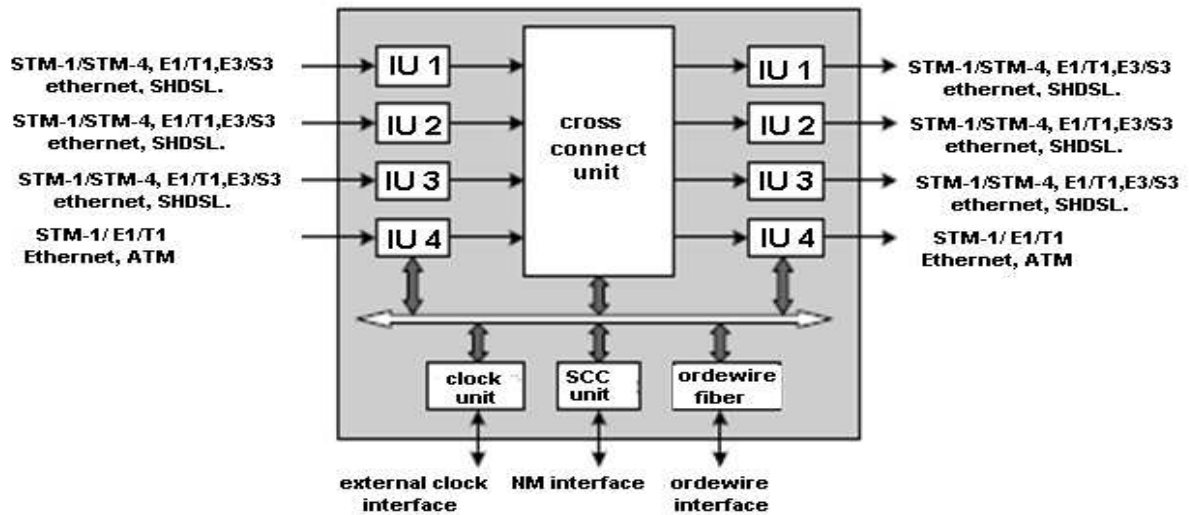


Figure V.18. la structure de OptiX 155/622H (metro 1000).

Les différentes cartes d'un Optix 155/622H

The OptiX 155/622H provides seven physical slots to accommodate boards.



OptiX 155/622H slot layout

Boards of the OptiX 155/622H

Board	Full name	Slot	Interface type
OI2S	1-channel STM-1 optical interface board	IU1, IU2, IU3	1e-1, S-1.1, L-1.1, L-1.2, SC/PC
OI4	1-channel STM-4 optical interface board	IU1, IU2, IU3	1e-4, S-4.1, L-4.1, L-4.2, SC/PC
SP2D	16-channel E1 electrical interface board	IU2, IU3	120 ohm/75 ohm E1 interface
PD2T	48-channel E1 electrical interface board	IU4	120 ohm/75 ohm E1 interface
SCB	System control board	SCB	Provide 2 external clock input and output interfaces, 1 NM interface, 1 orderwire interface, 4 data interfaces, 4 input Boolean interfaces and 2 output Boolean interfaces.

Agrégation	STM-1/STM-4
Services accessibles	3 x STM-4, 6 x STM-1 4 x ATM 155M 80 x E1 64 x T1 6 x E3/T3 6x STM-1 (E) 12 x 10M/100M Ethernet 2x Nx64K (Two V.35/V.24/X. 21/RS-449/EIA-530 and two framed E1) 8x G.SHDSL
Topologie réseau	Point-to-point, chaine, anneau, et réseaux de mailles.
Alimentation D'énergie	220V AC(100~200V) -48V Dc(-38.4~-72v) +24V DC(+18~+36V)
Puissance Consommation	82 W (entièrement équipés)
Poids	8 kilogrammes (entièrement équipés)
Dimension	436mm (w) ,293mm(D) ,86mm(H)
Mécanisme de protection	Protection auto curative de CSAD (Raccordement De Sous-réseau Protection, MSSPRing, etc.) Protection d'anneau de l'atmosphère VP Protection d'anneau d'Ethernet

Tableau V.5.les spécifications technique du OptiX 155/622H (metro 1000).



Bibliographie



[1] JOINDOT, Irène et Michel, Les Télécommunications par fibres optiques, Collection Technique et scientifique des Télécommunications, Editions Dunod,

[2] Zeno Toffano, Optoélectronique : Composants photoniques et fibres optiques, Edition Ellipses.

[3] LECOY Pierre, Télécommunication optiques, Paris : Edition Hermès, 1992.

[4] « Les Techniques de l'ingénieur », Techniques de l'ingénieur, Paris, 1999.

[5] SHAOWEN Song, université Wilfrid-laurier Canada, IEEE Canadian Review-Summer/été, 1999.

[6] G.Chretien Revue des télécommunications d'alcatel-3 eme trimestre 2000.

Les composants optiques pour le nouveau millénaire.

[7] VERNEUIL jean-louis, « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s », Thèse de doctorat de l'université de Limoges, 2003.

[8] BOUDRIOUA Nassima « Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD », Thèse de doctorat de l'université Paul Verlaine-Metz, 2007.

[9] GEROME Frédéric, « Conception et caractérisation de fibres compensatrices de dispersion chromatique pour application aux liaisons optiques WDM » Thèse de doctorat de l'université de Limoges, 2005.

[10] LE CREN Élodie, « Etude de composants absorbants saturables à semi-conducteurs à multi-puits quantiques dopés au fer pour la régénération de signaux optiques à très hauts débits d'information », Thèse de doctorat de l'université de Rennes I, 2004.

[11] Stéphane DELLIER, « Contributions à la conception des circuits micro-ondes », Thèse de doctorat de l'université de Limoges, 2005.

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

[13] ZOUINE Younes « Contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant la technique CDMA », Thèse de doctorat de l'université de Limoges, 2005.

[14] GOURMALA Ouassila, « Etude et réalisation des réseaux de Bragg pour des applications photoniques », Thèse de Magister Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, 2006.

[15] « étude et application de la transmission SDH via fibre optique », Thèse d'ingénieur promotion 2009, Université Mouloud Mammeri Tizi-ouzou (ELN 16- 2009), présenté par BOUBRIK Nacer, CHEMEK Said, FERHANI Samia.

Sites internet :

[16] <http://www.huawei.com>