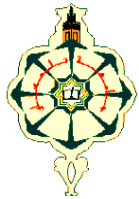




République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE (GEE)



Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de
MASTER en Télécommunication



Option : Réseaux et Systèmes de Télécommunication (RST)

Présenté par

Melle BILLAMI Hanane
Melle BENDAHMANE Raouida

THEME

Etude d'un réseau optique ADM 10Gbit/s

Soutenu en juin 2013 devant un jury composé de

Mr S. A. DJENNAS

Président

M. C. à l'université de Tlemcen

Mr S. M. BAHRI

Examineur

M. C. à l'université de Tlemcen

Mr M.ABRI

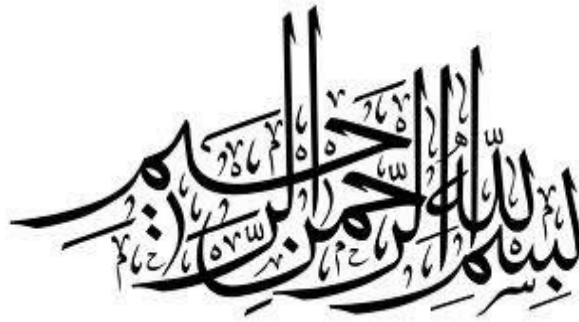
Examineur

M. C. à l'université de Tlemcen

Mr. A. R. BORSALI

Encadreur

M. C. à l'université de Tlemcen



A l'issue de ce travail, nous remercions, en premier lieu, le bon dieu de nous avoir donné la force et le courage de le mener à terme.

Ce PFE ne serait pas aussi riche et n'aurait pu voir le jour sans l'aide de notre encadreur Mr BORSALI Riad Ahmed d'avoir accepté d'être notre encadreur durant cette année, pour toute l'aide apportée, pour sa disponibilité, ses remarques fructueuses et ses directives précieuses, qui ont contribué efficacement à l'avancement de ce travail.

Je remercie les membres du jury, Monsieur S.A DJENNAS maitre de conférence à l'université de Tlemcen qui a bien accepté de présider le jury, Mr S.M BAHRI et Mr M ABRI maitres de conférences à l'université de Tlemcen pour l'honneur qu'ils nous font d'avoir bien voulu accepter de participer à ce jury .

Enfin, je tiens à remercier toute personne qui m'ont aidée de près ou de loin durant mon travail et en particulier tous mes amis de la promotion RST.

Dédicaces

Je dédie cet œuvre à la femme qui m'a enfanté, celle qui a sacrifié tout pour moi :

Son temps, son bonheur, sa santé : ma mère noyaux de mon esprit,

A mon père, source d'énergie pour ma réussite,

Ecole de mon éducation et principe de la vie,

Que dieu les préserve pour moi,

A mes adorables sœurs Ilhem, Farida, Wafae et Esma,

A mes neveux et nièces Imad, Djawed, Rym, Khalil, Ghina et Yasmine,

A mon binôme Raouida,

A toutes ma famille,

A tous ceux qui me sont chères,

A tous ceux qui m'aiment,

A tous ceux que j'aime.



Je dédie ce travail...

Hanane



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse,

Qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère,

À mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant

Toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie

À m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger,

Que dieu les gardes et les protège,

À mes adorables sœurs Nadéra, Wafaa et Norhene,

À mon cousin Karim,

À mon binôme Hanane,

À toutes ma famille,

À tous ceux qui me sont chères,

À tous ceux qui m'aiment,

À tous ceux que j'aime.



Je dédie ce travail...

Raouida



Sommaire

Introduction général.....	1
Chapitre 1 : Etude générale d'une liaison par fibre optique	
1.1. Introduction.....	4
1.2. Définition d'une liaison par fibre optique	4
1.2.1. Emetteur (source optique)	4
1.2.1.1. La diode DEL (électroluminescentes).....	5
1.2.1.2. La diode laser (DL).....	5
1.2.1.3. La différence entre la diode DEL et la diode DL.....	6
1.2.1.4. Modulateurs	7
1.2.2. Récepteurs	8
1.2.2.1. Photodiode PIN	8
1.2.2.2. Photodiode APD (Avalanche Photo Diode).....	9
1.2.3. Généralité sur les fibres optiques	10
1.2.3.1. Définition d'une fibre optique	10
1.2.3.2. Avantages et inconvénients des fibres optiques.....	10
1.2.3.3. Applications de la fibre optique.....	11
1.2.3.4. Composition d'une fibre optique	12
1.2.3.5. Fonctionnement d'une fibre optique	13
1.2.3.6. Différents types de fibres optiques	14
1.2.3.6.1. La fibre multimode	14
1.2.3.6.2. La fibre monomode	16
1.2.3.7. Les limitations physiques liées à la fibre	17
1.2.3.7.1. Affaiblissement dans les fibres optiques	17
1.2.3.7.2. La dispersion dans la fibre optique	18
1.2.3.8. La fibre idéale pour le haut débit	20
1.2.4. Composants optique.....	21
1.2.4.1. Les amplificateurs à fibre dopée (EDFA).....	21
1.2.4.1.1. Le choix de l'erbium.....	21
1.2.4.1.2. Principe de fonctionnement.....	21
1.2.4.1.3. Description.....	21
1.2.4.2. Les fibres de compensation(DCF).....	23
1.3. Conclusion.....	23
Chapitre 2 : Introduction aux réseaux optiques	
2.1. Introduction.....	25
2.2. Définition des réseaux	25

2.3.	Type de réseaux.....	26
2.3.1.	Le réseau local (LAN)	26
2.3.2.	Le réseau métropolitain (MAN)	27
2.3.3.	Le réseau longue distance (WAN).....	27
2.4.	Les réseaux optiques.....	27
2.4.1.	La topologie en bus	28
2.4.2.	La topologie en anneau	30
2.4.3.	La topologie en étoile	31
2.5.	Réseaux longue distance à fibre optiques.....	32
2.5.1.	Les réseaux sous-marins	33
2.5.2.	Réseaux terrestre	39
2.6.	Réseaux métropolitains(DWDM).....	43
2.7.	Réseau d'accès optique.....	45
2.8.	Le réseau d'interconnexion.....	46
2.8.1.	Description générale.....	46
2.8.2.	La protection des systèmes	46
2.8.3.	La protection du réseau.....	47
2.9.	Conclusion.....	50

Chapitre 3 : Etude d'un réseau optique en anneau.

3.1.	Introduction.....	52
3.2.	Description de l'outil de simulation.....	52
3.2.1.	Avantages du logiciel.....	54
3.3.	Présentation du réseau optique.....	55
3.3.1.	Effet de l'EDFA sur le réseau.....	55
3.3.1.1.	Générateur binaire.....	56
3.3.1.2.	Générateur NRZ.....	56
3.3.1.3.	Filtre de Bessel passe bas.....	57
3.3.1.4.	Atténuateur optique.....	57
3.3.1.5	Résultat de simulation.....	57
3.3.2.	Introduction de l'EDFA au système.....	59
3.3.3.	Introduction de la DCF et l'EDFA.....	63
3.4.	Conclusion.....	72
	Conclusion générale	73

Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma synoptique d'un système de transmission optique.....	4
Figure 1.2 : Spectre d'émission d'une DEL.....	5
Figure 1.3 : Spectre d'émission d'une DL.....	5
Figure 1.4 : Schémas de principe de laser.....	6
Figure 1.5 : la différence entre DEL et DL.....	7
Figure 1.6 : Modulation directe.....	7
Figure 1.7 : Modulation externe.....	8
Figure 1.8 : Photodiode PIN.....	9
Figure 1.9 : Structure d'une photodiode à avalanche APD.....	9
Figure 1.10 : Structure générale de la fibre optique.....	12
Figure 1.11 : Une section de la fibre optique.....	13
Figure 1.12 : Chemin parcouru par onde lumineuse dans une fibre optique.....	13
Figure 1.13 : Transmission d'une fibre optique.....	14
Figure 1.14 : Ouverture numérique d'une fibre optique.....	14
Figure 1.15 : La propagation du signal dans une fibre multimode à saut d'indice.....	15
Figure 1.16 : Etalement du signal optique dans une fibre multimodes à saut d'indice.....	15
Figure 1.17 : La propagation du signal dans une fibre multimode à saut gradient d'indice ...	16
Figure 1.18 : Etalement du signal optique dans une fibre multimodes a gradient d'indice...	16
Figure 1.19 : La propagation du signal dans une fibre monomode	17
Figure 1.20 : affaiblissement dans la fibre optique.....	18
Figure 1.21 : Les différentes causes de l'affaiblissement.....	18
Figure 1.22 : La dispersion d'une fibre optique.....	19
Figure 1.23 : La dispersion intermodale dans les trois types de fibre.....	19
Figure 1.24 : Eléments constitutifs de l'amplificateur EDFA.....	21
Figure 2.1 : Les différents réseaux existant.....	26
Figure 2.2 : les différentes topologies des réseaux.....	28
Figure 2.3 : Les stations émettent et reçoivent dans un sens.....	29
Figure 2.4 : Les stations émettent et reçoivent les données sur les deux sens à deux fréquences.....	29
Figure 2.5 : L'émission et la réception se font sur un bus unique.....	29
Figure 2.6 : Un réseau en anneau.....	30
Figure 2.7 : Anneau unidirectionnel.....	30
Figure 2.8 : Anneau bidirectionnel.....	31
Figure 2.9 : Le réseau en étoile.....	32
Figure 2.10 : Schéma du système de protection du réseau TAT 12/TAT 13.....	36
Figure 2.11 : Anneau SDH pour réseau terrestre longue distance.....	40
Figure 2.12 : Structure d'une trame STM-1.....	42
Figure 2.13 : Principe d'une liaison WDM/ DWDM.....	43
Figure 2.14 : Schéma d'un anneau.MIE : Multiplexeur d'Insertion-Extraction.....	48
Figure 2.15 : Le multiplexeur MIE.....	49

Figure 3.1 : Les fenêtres dans OptiSystem.....	53
Figure3.2 : Paramètres d'une fibre monomode.....	54
Figure3.3 : Liaison en anneau du premier système.....	55
Figure3.4 : Présentation du terminal.....	56
Figure3.5 : Format NRZ.....	56
Figure 3.6 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction de la longueur de la fibre.....	58
Figure 3.7 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction du débit.....	59
Figure3.8 : Liaison en anneau du deuxième système.....	60
Figure 3.9 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction de la longueur de la fibre.....	60
Figure 3.10 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction du débit.....	61
Figure 3.11 : Facteur de qualité Q en fonction de la longueur de la fibre.....	61
Figure 3.12 : Taux d'erreur binaire TEB en fonction de la longueur de la fibre.....	62
Figure 3.13 : Facteur de qualité Q en fonction du débit.....	62
Figure 3.14 : Taux d'erreur binaire TEB en fonction du débit.....	63
Figure3.15 : Liaison en anneau du troisième système.....	64
Figure 3.16 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction de la longueur de la fibre.....	64
Figure 3.17 : Facteur de qualité Q en fonction du débit.....	65
Figure 3.18 : Facteur de qualité Q en fonction de la longueur de la fibre.....	65
Figure 3.19 : Taux d'erreur binaire TEB en fonction de la longueur de la fibre.....	66
Figure 3.20 : Facteur de qualité Q en fonction du débit.....	66
Figure 3.21 : Taux d'erreur binaire TEB en fonction du débit.....	67
Figure 3.22 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction de la puissance émise.....	67
Figure 3.23 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction du nombre de terminaux.....	68
Figure 3.24 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction de la longueur de la fibre.....	68
Figure 3.25 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction du débit.....	69
Figure 3.26 : Facteur de qualité Q en fonction du débit.....	69
Figure 3.27 : Taux d'erreur binaire TEB en fonction du débit.....	70
Figure 3.28 : Etude comparative des formats RZ et NRZ sur Q en fonction de la longueur.....	71
Figure 3.29 : Etude comparative des formats RZ et NRZ sur le BER en fonction de la longueur.....	71

Introduction générale

L'industrie des télécommunications est actuellement en train de vivre une révolution, et celle-ci concerne aussi bien les concepteurs et les opérateurs que les utilisateurs. Le principal moteur de cette révolution est la croissance exponentielle du nombre d'utilisateurs d'internet. L'utilisation de courrier électronique et de fichiers professionnels, fait partie de notre quotidien.

A l'époque où les systèmes numériques les plus rapides véhiculent l'information à un débit de l'ordre de quelques dizaines ou centaines de Mbit/s sur des distances courtes, le câble coaxial remplissait parfaitement son rôle de support de transmission. L'apparition du multimédia, la téléphonie le trafic de données et internet ont été les facteurs clés d'une demande en bande passante toujours grandissante.

Les premières expériences de transmission optique datent la fin de XIX^{ème} siècle avec la modulation de l'intensité de la lumière par un signal acoustique. Faute de savoir guider efficacement la lumière jusqu'au destinataire. Utilisant le principe connu depuis longtemps des fontaines lumineuses, les fibres optiques, minces cheveux de verre très transparents, on fait l'objet d'applications décoratives, puis plus utilitaires.

Avant l'optique, ni les systèmes à câble coaxiaux, ni les systèmes micro-onde, ne permettaient de transmettre un débit supérieur à 100Mbit/s en moyenne. Le système coaxial le plus évolué était capable de transmettre un débit de 274Mbit/s, mais à condition de prévoir l'installation de répéteurs tous les kilomètres.

L'utilisation de la fibre optique puis des réseaux « tout-optique » a totalement révolutionné le monde des télécommunications. On arrive désormais à des systèmes de transmission de plus en plus performants, atteignant plusieurs Tbit/s sur plusieurs milliers de kilomètre.

La fibre optique et sa maîtrise n'ont cessé de se répandre et d'évoluer. Et, faute de pouvoir annihiler complètement ses défauts, la technologie est déjà en mesure de réduire grandement certains défauts marquants, comme la multimodalité qui limite le débit et qui est de mieux en mieux maîtrisée, notamment, des fibres à gradient d'indice. De plus, des outils très performants permettent de connaître avec précision les caractéristiques d'une fibre optique, et ses défauts éventuels : cassure, déformation intempestives et autres.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres. Dans le premier chapitre nous décrivons le principe d'une liaison par la fibre optique. Nous verrons ensuite les principaux composants de l'émetteur et du récepteur. Nous évaluons aussi les caractéristiques de chaque composant

présenté, en illustrant les principes de fonctionnement du système global. Pour finir ce chapitre nous verrons les avantages et les inconvénients des fibres optiques.

Le second chapitre aborde une définition des réseaux existants, les différentes topologies, les types de réseaux, les réseaux longue distance, la hiérarchie numérique ainsi que les réseaux d'accès optique.

Pour finir le dernier chapitre a pour objectif de présenter succinctement le logiciel de simulation OptiSystem permettant d'étudier le réseau optique en anneaux. Nous présentons trois systèmes différents avec des paramètres différents le premier système va être le système le plus simple puisqu'il contient que la fibre monomode, dans le deuxième système nous ajoutons des amplificateurs et pour le dernier système nous ajoutons des fibres compensatrices. Cette évolution nous a permis d'améliorer le système en termes de débit et de qualité du signal reçu. Enfin nous analyserons les résultats obtenus lors de la simulation.

Chapitre 1

Etude générale d'une liaison par fibre optique

1.1. Introduction

Trois scientifiques de la compagnie Corning Glass Works de New York, produisirent la première fibre optique qui peut être utilisée dans les réseaux de télécommunications. Leur fibre optique était en mesure de transporter 65000 fois plus d'information qu'un simple câble de téléphone. Le premier système de communication téléphonique optique fut installé au centre-ville de Chicago en 1977. On estime aujourd'hui plus de 80% des communications de longue distance sont transportées le long de plus de 25 millions de kilomètres de câble à fibre optique partout dans le monde.

L'apparition de la fibre optique a totalement révolutionné le monde des télécommunications. Il en résulte un bouleversement des réseaux de télécommunications précédents et un besoin de mettre en place de nouvelles structures.

Ce chapitre sera une description d'une liaison par fibre optique, les composantes d'un émetteur, le récepteur et ces caractéristiques, la composition de la fibre, ces différents types, ces avantages ainsi que ces inconvénients.

1.2. Définition d'une liaison par fibre optique

Le principe dans les communications optiques consiste à transporter de l'information sous forme lumineuse d'un point à un autre à travers un guide diélectrique. L'information à transmettre est convertie d'un signal électrique en signal optique grâce à un émetteur, elle est ensuite injectée dans une fibre optique. A la réception, le signal subira le traitement inverse à savoir la conversion optique-électrique grâce à un récepteur[2].

Globalement, une liaison optique est composée d'un émetteur et d'un récepteur reliés par une fibre optique (voir figure 1.1).

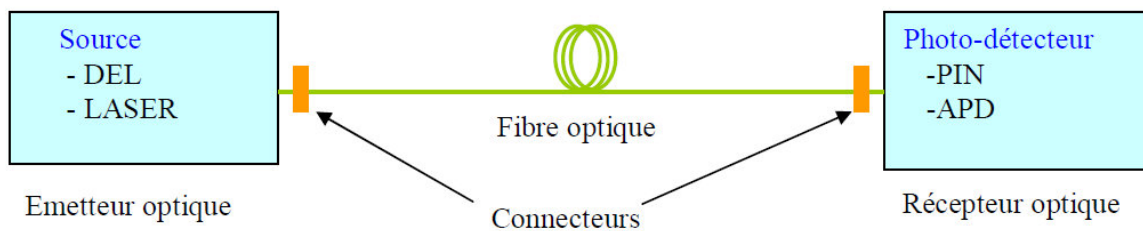


Figure 1.1 : Schéma synoptique d'un système de transmission optique.

Cependant, pour des grandes distances on utilise des répéteurs ou des régénérateurs pour conserver le niveau du signal nécessaire à la restitution de l'information. Dans ce qui suit nous allons définir chaque élément de cette liaison[2].

1.2.1. Emetteur (source optique)

Les sources optiques sont des composants actifs dans le domaine de la communication par fibre optique. Leur fonction fondamentale est de convertir une énergie électrique en une énergie optique (conversion électro-optique)[3].

En télécommunication optique la nécessité d'utiliser des bandes passantes de plus en plus larges impose le choix des sources à spectres réduits telles que les diodes laser (DL) et les diodes électroluminescentes (DEL), ces deux sources sont réalisées à partir de jonction PN polarisée en direct, le principe d'émission est dû à la recombinaison des paires électron-trou [3].

1.2.1.1. La diode DEL (électroluminescentes)

La diode électroluminescente (DEL) ou LED (Light Emitting Diode) est le composant émetteur le plus simple, qui réalise directement l'émission de photons par recombinaison des porteurs dans une hétérojonction polarisée en direct.

C'est une source incohérente et polychromatique, elle présente un spectre d'émission assez large et un diagramme de rayonnement moins directif, elle est utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très grandes bandes passantes. Elle a un spectre typique d'émission spontanée, continu et assez large d'où une forte sensibilité à la dispersion chromatique (voir figure 1.2) [3].

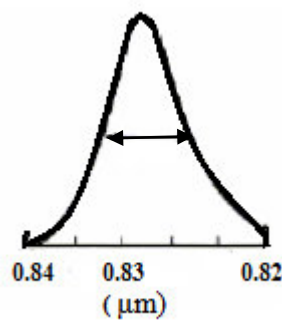


Figure 1.2: Spectre d'émission d'une DEL.

1.2.1.2. La diode laser (DL)

Laser est l'acronyme anglais de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (en français, amplification de la lumière par émission stimulée de radiations). La diode laser est une source cohérente et monochromatique, elle est utilisée dans les systèmes de transmission à très grande distance, elle est caractérisée par : une faible largeur spectrale et une bande passante importante. Le spectre est monomode longitudinal (voir figure 1.3) [3].

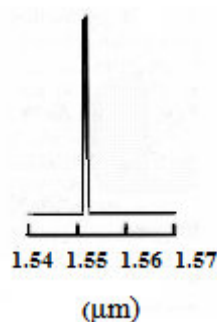


Figure 1.3 : Spectre d'émission d'une DL.

Le laser est composé de trois éléments essentiels (voir figure 1.4) :

- Le milieu actif.
- La pompe : source énergétique qui réalise l'inversion de population.
- La cavité, limitée par deux surfaces, l'une réfléchissante presque à 100%, l'autre à 98% de façon à laisser sortir le faisceau laser [3].

Cette cavité forme, avec le milieu actif, un amplificateur.

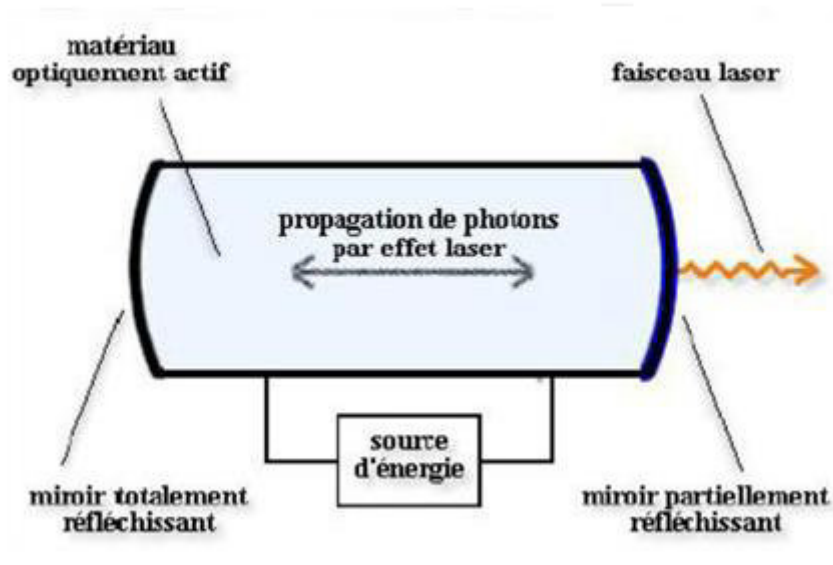


Figure 1.4 : Schémas de principe de laser.

Les lasers utilisent l'émission stimulée. On provoque, par l'intermédiaire d'un courant à haute densité, un important excès de porteurs qui rend possible une forte émission stimulée. Cet effet d'amplification est dû à une avalanche de photons [3].

La diode laser représente les caractéristiques suivantes :

- La source DL est cohérente et monochromatique.
- Largeur de spectre étroite, et la bande passante qui atteint quelques gigahertz
- Diagramme de rayonnement directif (émissions se font dans la même direction)
- Utilisée dans les systèmes de transmission à grand distance
- La densité de courant de seuil est de quelque dizaine de milliampères.

1.2.1.3. La différence entre la diode DEL et la diode DL

Pour montrer la différence entre diode électroluminescente et une diode laser, la figure illustre les courbes caractéristiques de la puissance lumineuse en fonction du courant (voir figure 1.5) [4].

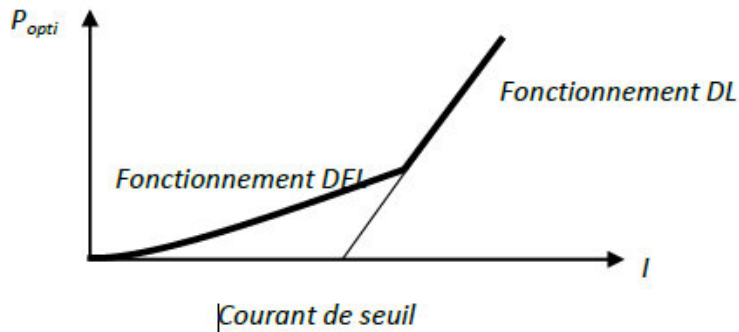


Figure 1.5 : la différence entre DEL et DL

1.2.1.4. Modulateurs

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les imprimer sur le signal à envoyer dans la fibre, c'est ce que l'on appelle une modulation, qui est une fonction essentielle de tout système de transmission. Pour réaliser la modulation d'émission, on a deux possibilités :

1.2.1.4.1. Modulation directe

C'est la propre source optique qui réalise la modulation en même que la transformation électrique-optique. La modulation du courant qui traverse un laser à semi-conducteur entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise. Il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser. Un inconvénient de cette méthode est que lorsque l'on module en amplitude le courant d'injection d'un laser est accompagné d'une modulation de fréquence parasite ou chirf. Ces effets, conjugués à la dispersion chromatique de la fibre, provoquent un élargissement de l'impulsion d'autant plus importante que la longueur de la fibre est grande (voir figure 1.6) [3].

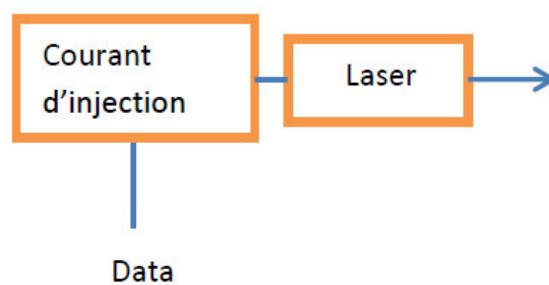


Figure 1.6 : Modulation directe.

1.2.1.4.2. Modulation externe

L'émetteur est alors constitué d'une source optique émettant une onde pure suivie d'un modulateur externe. Le courant d'injection du laser n'est plus modulé. La modulation externe

présente de nombreux avantages. Elle est plus rapide et permet donc d'envoyer des débits plus élevés (voir figure1.7) [3].

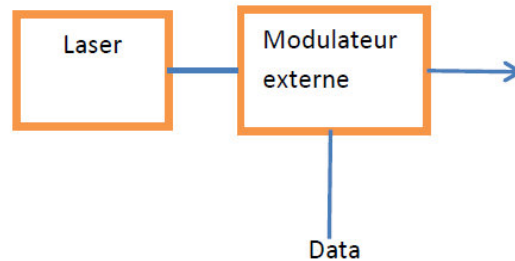


Figure1.7 : Modulation externe.

1.2.1.4.3. Comparaison

La modulation directe, plus simple et moins coûteuse est encore très utilisée si les données sont transmises à un débit de quelque Gbit/s, selon la qualité de laser. Mais au-delà de 5Gbit/s, les modulateurs ne sont pas parfaits et peuvent engendrer des défauts mais leur impact est moins important [3].

1.2.2. Récepteurs

Le photodétecteur est un composant essentiel dans les communications par fibres optiques. Son rôle est de traduire le signal optique envoyé par la fibre optique en signal électrique, qui sera traité par des dispositifs électroniques. Dans notre étude nous allons parler des photodétecteurs, les plus utilisés dans les systèmes de transmission par fibre optique qui sont les photodiodes PIN ou APD. [8]

1.2.2.1. Photodiode PIN

Positive Intrinsic Negative Photodiodes cette photodiode, polarisée en inverse, est réalisée à partir de trois couches de semi-conducteur. Deux couches fortement dopées P+ et N+ entre lesquels existe une couche de grande résistivité (presque intrinsèque) où il existe très peu de charges mobiles. Les photodiodes PIN sont les plus utilisés car elles sont peu coûteuses et simples à utiliser avec une performance satisfaisante (voir figure 1.8) [5].

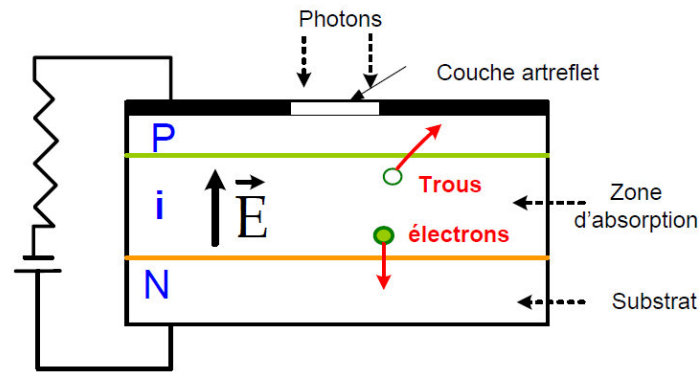


Figure 1.8: Photodiode PIN.

1.2.2.2. Photodiode APD (Avalanche Photo Diode)

Lorsque la puissance lumineuse reçue est très faible, les courants détectés sont peu élevés et se superposent au courant d'obscurité, conduisant à un mauvais rapport signal sur bruit. Pour augmenter ce dernier, il est nécessaire que le courant détecté soit plus important en utilisant d'autres types de photodiode, comme les photodiodes à gain interne de type avalanche.

La photodiode d'avalanche est une diode PIN dans laquelle est réalisée une amplification de puissance, cela permet d'extraire un signal électrique fort même pour une puissance lumineuse affaiblie. Les photodiodes à avalanche sont aussi utilisés grâce à leurs performances, leur gain important et leur réponse rapide mais elles sont plus coûteuses, difficiles à utiliser et nécessitant une polarisation inverse très forte (voir figure 1.9) [5].

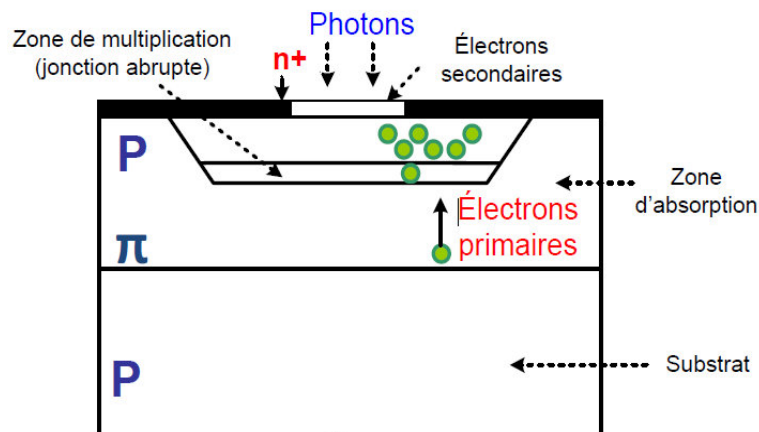


Figure 1.9 : Structure d'une photodiode à avalanche APD.

En télécommunications optique les détecteurs doivent :

- Offrir un bon couplage avec la fibre.
- Avoir une grande sensibilité à la longueur d'onde de fonctionnement.
- Avoir une bande passante convenable.
- Avoir une faible exigence du point de vue tension de source.

- Pas d'influence des conditions extérieures sur les caractéristiques.
- Avoir une grande fiabilité (bon rendement quantique) et un faible cout.
- Avoir un temps de réponse très court et un faible bruit additionnel [5].

1.2.3. Généralité sur les fibres optiques

Dans le système de première génération, il y avait la fibre multimode et les diodes laser à 0.9 μ m, leurs débit quelques Gb/S. Dans le système de la seconde génération il y avait la fibre unimodale, diodes lasers à 1,3 μ m, avec un débit de 10Gb/S. Tant dit que dans la troisième génération, il y avait les diodes lasers à 1,5 μ m, minimisation de l'atténuation, leur débit de 500 Gb/S. Et pour la quatrième et dernière génération, il y avait la possibilité d'utiliser plusieurs longueurs d'onde simultanément avec un débit de 100000Gb/S [6].

1.2.3.1. Définition d'une fibre optique

La fibre optique est vite apparue très intéressante pour le domaine de la télécommunication, c'est un fil transparent très fin qui peut être utilisée pour conduire de la lumière entre deux lieux distants de plusieurs centaines voire milliers de kilomètres, elle possède un grand nombre de propriétés remarquable qui en font un support physique excellent pour les télécommunications. Le signal lumineux transmis est codé par une variation d'intensité, Il est capable de transmettre une grande quantité d'information [6].

1.2.3.2. Avantages et inconvénients des fibres optiques

1.2.3.2.1. Les avantages

Les principaux avantages apportés par la fibre optique sont les suivants :

- ✓ Très large bande passante, de l'ordre de 1 GHz pour 1 km, qui permet le multiplexage sur un même support de très nombreux canaux, comme le téléphone, la télévision, etc.
- ✓ Grande légèreté, le poids d'un câble optique par unité de longueur, de l'ordre de quelques grammes au kilomètre, étant environ neuf fois plus faible que celui d'un câble conventionnel.
- ✓ Très faible atténuation, qui permet d'envisager un espacement important des points de régénération des signaux transmis. Le pas de régénération est supérieur à 10 km, alors que, sur du câble coaxial, il est de l'ordre de 2 à 3 km.
- ✓ Excellente qualité de la transmission. Une liaison par faisceau lumineux est, par exemple, insensible aux orages, aux étincelles et au bruit électromagnétique.
- ✓ Absence de rayonnement, ce qui rend son emploi particulièrement intéressant pour les applications militaires.
- ✓ Résistance à conditions environnementales adverses. Moins d'influence des liquides corrosifs, gaz et variations de température.
- ✓ Les prix de la fibre reste faible, car la matière de base utilisée, la silice (verre très pur composé de dioxyde de silicium), très abondante sur la terre [1].

Tous les avantages cités permettent de diminuer le coût d'installation. Par exemple, pour les grandes distances, on peut mettre la fibre optique avec les câbles de garde des tours d'haute tension.

1.2.3.2.2. Les inconvénients

L'emploi de la fibre optique présente quelques inconvénients qui permettent d'utiliser avec succès le câble cuivre :

- ✓ Difficultés de raccordement aussi bien entre deux fibres qu'entre une fibre et le module d'émission ou de réception. En laboratoire, on peut réaliser des connexions pour lesquelles les pertes sont inférieures à 0,2 dB. Sur le terrain, il faut appel à des connecteurs amovibles, qui demandent un ajustement précis et occasionnent des pertes supérieures à 1 dB. de ce fait, lorsqu'on veut ajouter une connexion à un support en fibre optique, il faut couper la fibre optique et ajouter des connecteurs très délicats à placer. Le passage lumineux électrique que l'on ajoute fait perdre les avantages de faible atténuation et de bonne qualité de la transmission.
- ✓ Dérivations difficiles à réaliser, l'affaiblissement qui découle dépassant souvent 5 dB. Ces dérivations sont pourtant nécessaires puisque les composants extrémité de l'accès optique sont le plus souvent actives et engendrent une panne définitive du réseau en cas de défaillance.
- ✓ Le multiplexage en longueurs d'onde, qui consiste à faire transiter dans une même fibre plusieurs longueurs d'onde en parallèle ou encore ce que l'on peut appeler plusieurs couleurs en même temps. La limite actuelle est de l'ordre de mille longueurs d'onde sur une même fibre optique. Avec mille longueurs d'onde, la fibre est totalement remplie, et de nouveaux progrès ne pourront être effectués sue si une découverte importante est réalisée pour augmenter encore le nombre de longueurs d'onde.
- ✓ Les interfaces électriques/optiques ainsi que les connecteurs sont d'un prix élevé.
- ✓ Dispersion chromatique (élargissement du signal entre le début et la fin de la fibre).
- ✓ Coût d'exploitation élevé [1].

1.2.3.3. Applications de la fibre optique

La fibre optique est utilisée par de nombreuses sociétés de télécommunications pour transmettre des signaux de téléphone, de la communication Internet, et les signaux de télévision par câble. En raison de beaucoup plus faible atténuation et de l'ingérence, la fibre optique a de gros avantages sur le fil de cuivre existantes dans des applications à forte demande et à long-distance. Cependant, le développement des infrastructures dans les villes a été relativement difficile et de longue haleine, et les systèmes de fibre optique sont complexes et coûteux à installer et à utiliser. En raison de ces difficultés, les systèmes de communication à fibre optique ont été principalement installés dans les applications longues distances, où ils peuvent être utilisés pour leur capacité de transmission complète, compensant l'augmentation des coûts. Depuis 2000, les prix des communications par fibre optique ont considérablement diminué. Le prix pour le déploiement de fibre optique jusqu'au domicile est actuellement devenu plus rentable que celle du déploiement d'un réseau à base de cuivre. Les prix chuté à

850 \$ par abonné en 2009 aux Etats-Unis et plus faible dans des pays comme les Pays-Bas, où les coûts sont faibles à creuser.

Depuis 1990, lorsque l'optique d'amplification des systèmes est devenue disponible dans le commerce, l'industrie des télécommunications a établi un vaste réseau de transport interurbain et transocéanique des lignes de communications à fibre. En 2002, un réseau intercontinental de 250.000 km de câbles sous-marins de communication avec une capacité de 2,56 Tb/s a été achevé, et bien que les capacités de réseau spécifiques soient des informations privilégiées, les rapports indiquent que les investissements dans les télécommunications capacité du réseau ont augmenté de façon spectaculaire depuis 2004.

Les opérateurs peuvent aussi accroître leurs réseaux sans devoir à chaque augmentation de trafic tirer un nouveau câble et la fibre optique ne coûtant pas beaucoup plus cher qu'un câble cuivre (rapport prix/performance) permet d'envisager des structures de type FTTC (Fibre To The Curb) ou FTTH (Fibre To The Home) afin d'amener des capacités de transmission le plus près possible de l'utilisateur final.

De plus, l'approche des opérateurs consistant aujourd'hui à bâtir leur réseau directement sur IP en dessus du protocole SDH ou DWDM est un signe révélateur de cette tendance des touts optiques et du tout IP. Ainsi, il apparaît certain que demain l'usage du multiplexage des longueurs d'onde deviendra un élément à part entière des réseaux locaux et distants [1].

1.2.3.4. Composition d'une fibre optique

Une fibre optique comprend un cœur de silice de haut indice de réfraction, d'une enveloppe de silice pure de plus faible indice de réfraction, le tout entouré d'une gaine protectrice répartie en plusieurs couches flexibles (voir figure1.10). Dans le domaine de télécommunication optique, le matériau privilégié est la silice très pure car elle présente des pertes optiques très faibles.

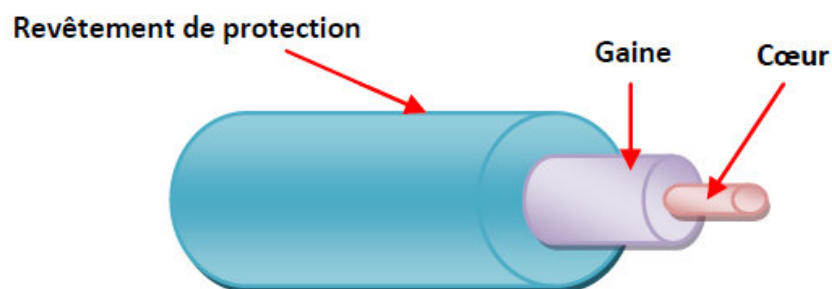


Figure1.10 : Structure générale de la fibre optique.

La fibre optique est composée de deux cylindres transparents. Le cylindre intérieur s'appelle cœur et l'extérieur s'appelle gaine. Ces deux cylindres sont protégés par un revêtement (protection mécanique et chimique) [5].

Le cœur c'est lui qui transporte le signal optique. On appelle n_1 l'indice du cœur. Pour la gaine sa fonction est de miroir, évite que le signal optique sorte du cœur en gardant les caractéristiques optiques. Pour réaliser cette fonction, il doit avoir un indice n_2 constant et un peu inférieur à l'indice du cœur et la séparation entre cœur et gaine (dioptre) doit être bien définie (voir figure 1.11).

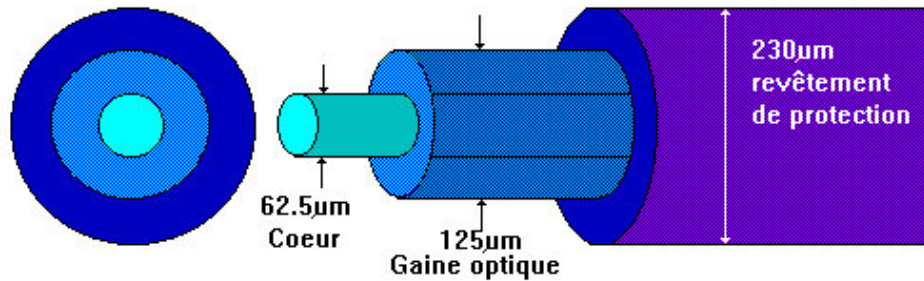


Figure1.11 : Une section de la fibre optique.

Les composantes ne sont pas parfaites. Il y a une petite partie du signal optique du cœur qui sort par la gaine. Il n'y a un phénomène de réflexion pure, on a alors réflexion plus réfraction qui entraîne des pertes dans la gaine (voir figure 1.12).

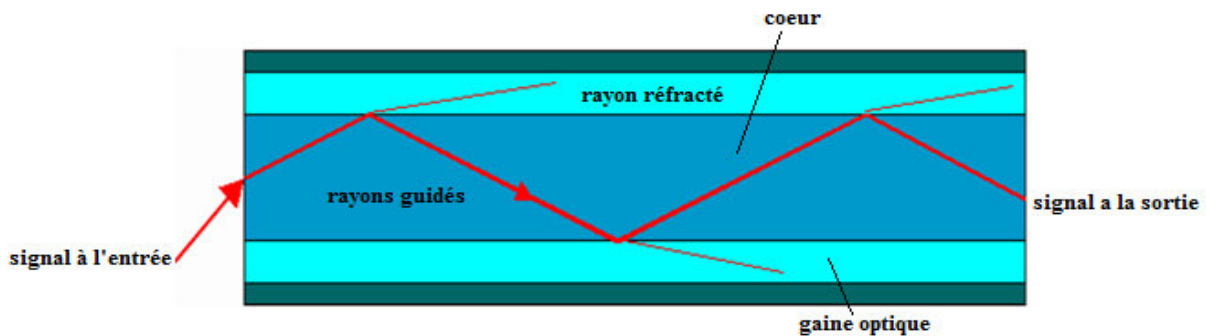


Figure1.12 : Chemin parcouru par onde lumineuse dans une fibre optique.

1.2.3.5. Fonctionnement d'une fibre optique

On dit qu'une fibre optique est capable de transmettre un mode (fibre optique monomode) ou plusieurs modes (fibre optique multimode). On appelle mode chaque angle d'injection le rayon dans la fibre optique (voir figure 1.13). Qu'une fibre optique soit monomode ou multimode dépend de la structure de la fibre et aussi de la longueur d'onde à transmettre. Chaque mode de transmission est indépendant et suit un chemin différent (et par conséquent, différents temps de transmission) [7].

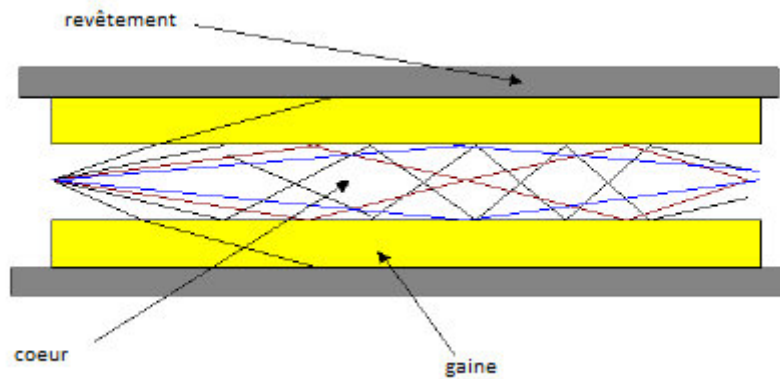


Figure 1.13 : Transmission d'une fibre optique.

On peut aussi parler de l'ouverture numérique qui est un paramètre très important qui nous renseigne sur la capacité qu'a une fibre pour propager les rayons optiques. On note que l'ouverture numérique est indépendante des dimensions de la fibre. L'ouverture numérique est notée par (voir figure 1.14) [7] :

$$ON = \sin \theta_{OL} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

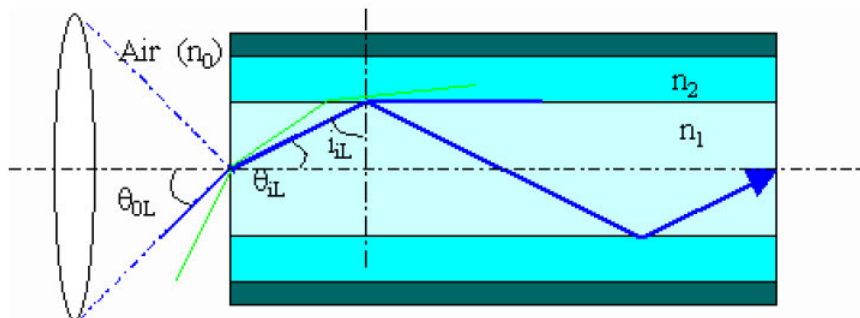


Figure 1.14 : Ouverture numérique d'une fibre optique.

1.2.3.6. Différents types de fibres optiques

Il existe deux types de fibre optique qui sont la fibre optique monomode et la fibre optique multimode qui elle a son tour est divisée en deux parties fibre multimode à saut d'indice et fibre multimode à gradient d'indice.

1.2.3.6.1. La fibre multimode

La fibre multimode a été la première utilisée. Elle est facile à utiliser (gros cœur) mais a une limitation de bande passante... Elle est donc réservée aux courtes distances : réseaux informatiques. La fibre optique est décomposée en deux parties :

a) La fibre à saut d'indice

Le cœur et la gaine présentent des indices de réfraction différents et constants. Le passage d'un milieu vers l'autre est caractérisé par un saut d'indice (fig.1.15-a). Le faisceau lumineux injecté à l'entrée de la fibre va atteindre la sortie en empruntant des chemins optiques différents (fig.1.15-b), ce qui se traduit par des temps de propagation différents et donc un étalement du signal transmis (fig.1.15), ce phénomène est appelé dispersion modale[4].

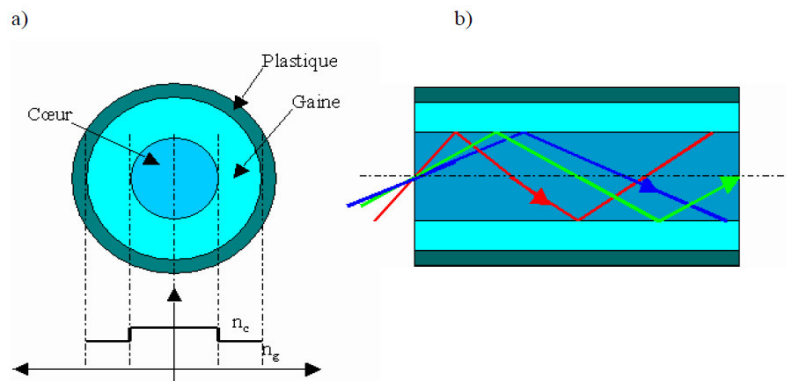


Figure1.15 : La propagation du signal dans une fibre multimode à saut d'indice :a) Section de profil d'indice d'une fibre multimode à saut d'indice ; b) Le chemin optique emprunté par les rayons lumineux.

Le spectre d'une fibre multimode à saut d'indice s'élargit à la réception comme le montre la figure 1.16.

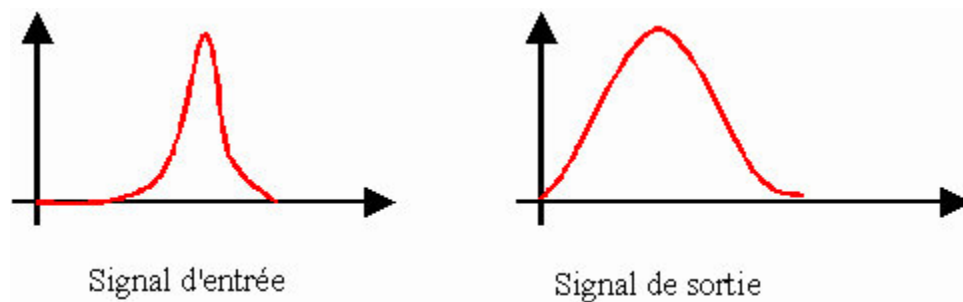


Figure1.16 : Étalement du signal optique dans une fibre multimode à saut d'indice.

Dans une fibre optique à saut d'indice a un diamètre du cœur $50\mu\text{m}$ ou $62.5\mu\text{m}$ le plus souvent, La gaine $125\mu\text{m}$ son ouverture numérique $\approx 12^\circ$, sa bande passante limitée : $<60\text{MHz.km}$ et une atténuation faible : 3dB/km à $0.85\mu\text{m}$ [4].

b) La fibre à gradient d'indice

Le cœur se caractérise par un indice variable qui augmente progressivement de n_1 à l'interface gaine-cœur jusqu'à n_2 au centre de la fibre (fig.I.17). la aussi les rayons lumineux vont emprunter des chemins différents, mais un choix judicieux du profil d'indice du cœur permet de tendre vers des temps de parcours voisins et donc réduire l'étalement du signal [4].

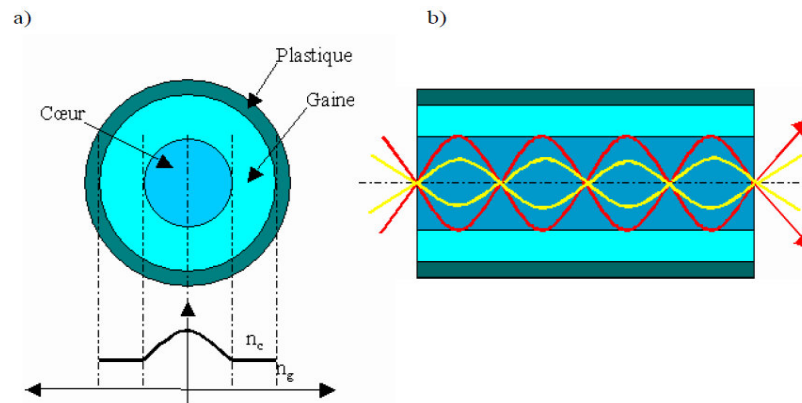


Figure 1.17 : La propagation du signal dans une fibre multimode à saut gradient d'indice : a) Section de profil d'indice d'une fibre multimode à gradient d'indice ; b) Le chemin optique emprunté par les rayons lumineux.

Le spectre d'une fibre multimode à saut d'indice s'élargie à la réception comme le montre la figure 1.18.

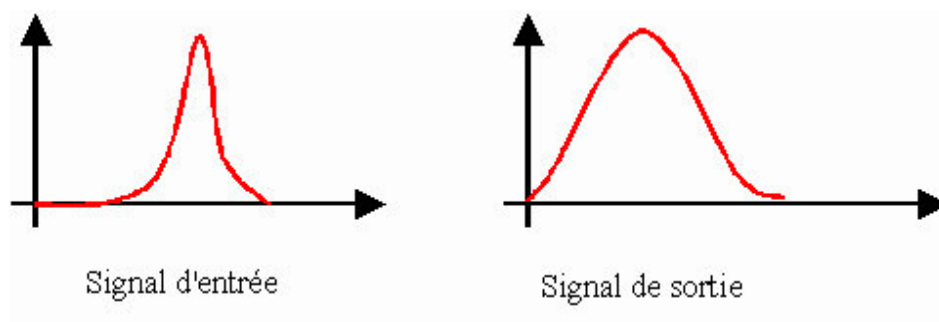


Figure 1.18 : Etallement du signal optique dans une fibre multimodes a gradient d'indice.

Caractéristiques similaires à la fibre multimode à saut d'indice (sauf la bande passante), elle remplace actuellement celle-ci car les coûts sont similaires. La vitesse de propagation étant plus faible au centre de la fibre, les écarts de temps de propagation entre les rayons sont nettement réduits et donc la bande passante augmentée.

La fibre a gradient d'indice à un diamètre du cœur $50\mu\text{m}$ ou $62.5\mu\text{m}$ le plus souvent, une gaine $125\mu\text{m}$, une bande passante de plusieurs GHz.km, une atténuation de 3dB/km à $0.85\mu\text{m}$ et 1.5dB/km à $1.3\mu\text{m}$ [4].

1.2.3.6.2. La fibre monomode

La fibre monomode dont le cœur est si fin que le chemin de propagation des différents modes est pratiquement directe. La dispersion modale devient quasiment nulle, il n'y a qu'un seul mode de propagation car les dimensions du cœur sont du même ordre que la longueur d'onde du signal et l'ouverture numérique très faible (voir figure 1.19) [4].

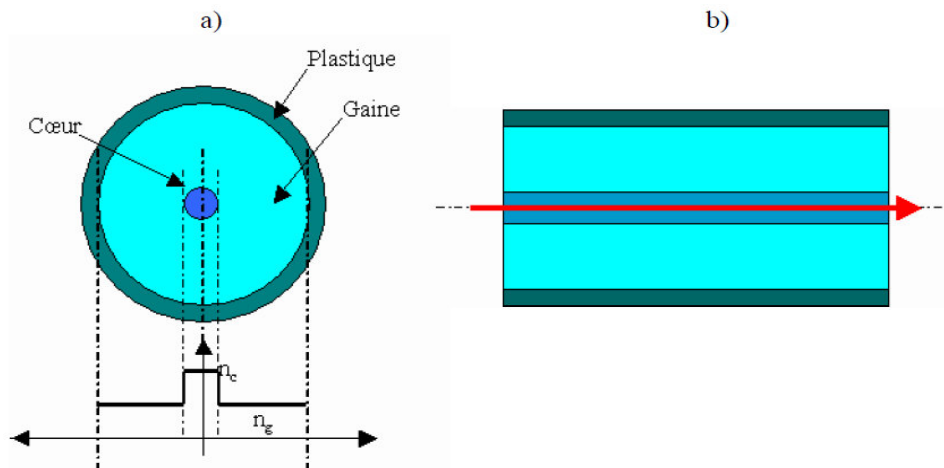


Figure 1.19 : La propagation du signal dans une fibre monomode : a) Section de profil d'indice d'une fibre monomode ; b) Le chemin optique emprunté par les rayons lumineux est unique.

Pour une fibre monomode son diamètre du cœur est de 5 à 10 μm le plus souvent. La gaine est 125 μm , elle a une bande passante très élevée (de l'ordre du THz.km), son atténuation est 0,5dB/km à 1,3 μm et 0,2dB/km à 1,5 μm , son raccordement très délicat.

Elle est utilisée essentiellement par les opérateurs de télécommunication. Actuellement des liaisons de 100 à 300km sans répéteurs sont possibles. La tendance est de réduire encore le cœur (vers 2 μm), de travailler dans la bande des 1,5 μm avec plusieurs longueurs d'ondes. La silice est dopée à l'ytterbium [4].

1.2.3.7. Les limitations physiques liées à la fibre

Les principales caractéristiques des fibres optiques sont l'atténuation, la dispersion chromatique et modale, la polarisation, que nous allons présenter par la suite.

1.2.3.7.1. Affaiblissement dans les fibres optiques

Un des problèmes les plus importants que posent les systèmes de transmission d'information est la perte de puissance dans le signal transmis, cet affaiblissement du signal est moins fort dans les systèmes optiques à base de fibre optiques que dans les systèmes électriques, Normalement l'affaiblissement dans une fibre optique est donnée en dB où dBm par kilomètre, cet affaiblissement n'est pas constant avec la fréquence du signal optique à transmettre. On définit comme fenêtres de transmission les intervalles de longueur d'onde où l'affaiblissement varie peu est présent un maximum local (figure 1.20) [7].



Figure1.20 : affaiblissement dans la fibre optique.

Les différentes causes de l'affaiblissement sont (figure 1.21) :

- ✓ Une courbure trop prononcée qui augmente les pertes par réflexion.
- ✓ L'affaiblissement par absorption atomique ou électronique. Elle est due aux impuretés. Région infrarouge.
- ✓ Par absorption moléculaire. Elle est aussi due aux impuretés du cœur. Région infrarouge.
- ✓ Par diffusion de Rayleigh. Elle est due aux variations de l'indice au niveau microscopique [7].

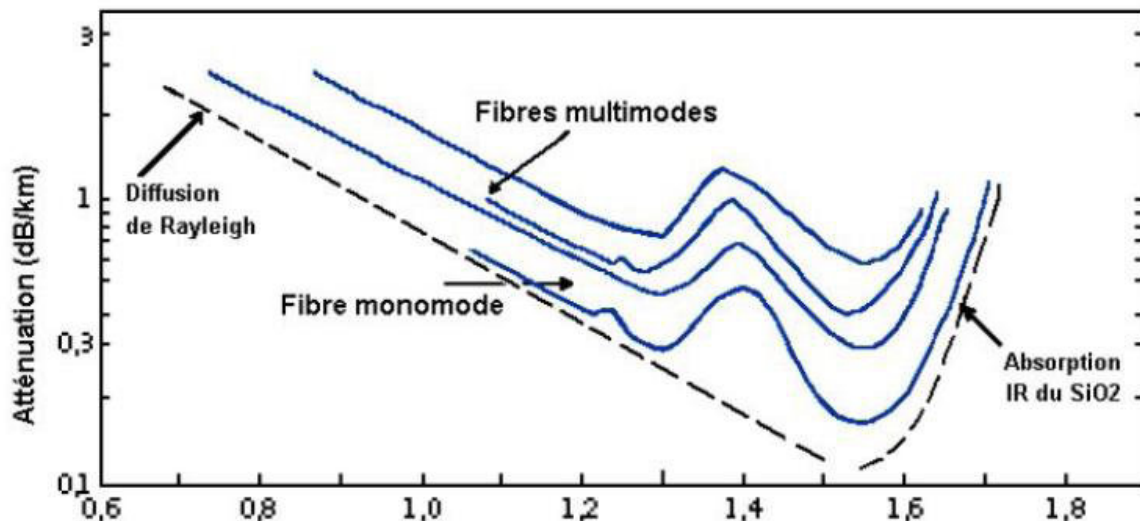


Figure1.21 : Les différentes causes de l'affaiblissement.

1.2.3.7.2. La dispersion dans la fibre optique

Quand on veut transmettre une impulsion sur une fibre optique, on produit l'impulsion avec un émetteur laser. Cette impulsion n'est pas idéale car elle présente une durée dans le temps. Dans une transmission idéale, on espère avoir à la sortie la même impulsion, mais cette impulsion a une durée plus grande que la durée initiale (voir figure 1.22) [7].

Il y a plusieurs causes pouvant expliquer ce phénomène :

- Dispersion intermodale.
- Dispersion chromatique.



Figure 1.22 : La dispersion d'une fibre optique.

a) Dispersion intermodale

Dans les fibres multimodes quand le signal transmis est composé de différents modes de propagation. Chaque mode de propagation suit un chemin différent dans la fibre, et a un temps de propagation différent. Quand on regarde le signal à la sortie, composé par les signaux transmis sur les différents modes, le signal a agrandi sa longueur temporelle (voir figure 1.23) [7].

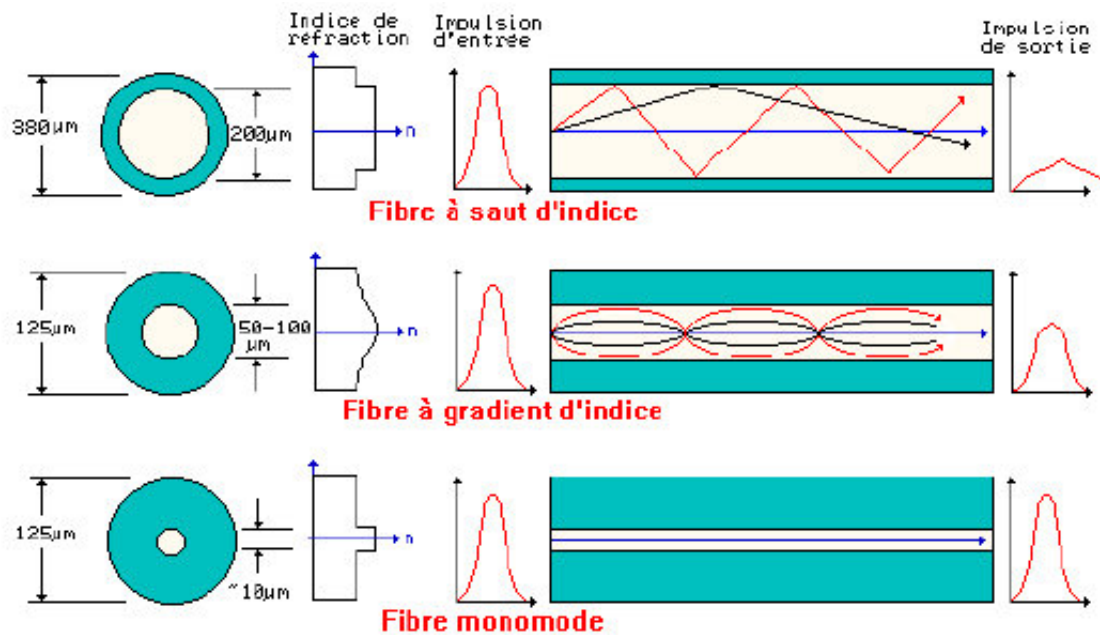


Figure 1.23 : La dispersion intermodale dans les trois types de fibre.

Dans les fibres monomode, il n'y qu'un seul mode de propagation donc il n'aurait aucun effet de dispersion intermodale, une valeur typique de dispersion intermodale dans une fibre à saut d'indice est d'environ de 30ns/km, alors que dans les fibres à gradient d'indice, on peut faire varier la vitesse du rayon en fonction du chemin pris en changeant la valeur de l'indice sur chaque point de la fibre. Une valeur typique pour ce type de fibre est d'environ de 60ps/km [7].

b) Dispersion chromatique

Les sources laser non idéales n'émettent pas sur une seule longueur d'onde. Elles ont alors une fonction DSP qui n'est pas une impulsion, elles émettent dans plusieurs longueurs d'onde près de la nominale. Il y a déjà une dispersion initiale sur la fréquence optique. Cette variation de la vitesse avec la fréquence va décomposer dans le temps le signal selon la fréquence, en augmentant la longueur temporelle de la sortie.

Ce type de dispersion apparaît dans le cas des fibres monomode et multimode. Elle est de l'ordre de ps/km. Il y a deux causes à prendre en compte :

- ✓ L'indice qui varie en fonction de la longueur d'onde (dispersion matériau).
- ✓ La vitesse de groupe qui varie avec longueur d'onde (dispersion guide d'onde) [7].

➤ Dispersion du matériau

Cette dispersion varie avec la longueur d'onde utilisée. Elle est faible et souvent négligeable devant la dispersion modale il est possible de construire des fibres pour lesquelles la dispersion du matériau s'annule pour une longueur d'onde particulière.

➤ Dispersion du guide d'onde

La constante de propagation du guide d'onde est légèrement dépendante de la longueur d'onde. La dispersion engendrée est très faible.

1.2.3.8. La fibre idéale pour le haut débit

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 (espacement 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 de mode 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 [1].

1.2.4. Composants optique

Il existe différents composants optiques qui sont nécessaire dans une liaison comme les amplificateurs optiques, les fibres compensatrices de dispersion ... Dans ce qui suit nous allons présenter ces composants.

1.2.4.1. Les amplificateurs à fibre dopée (EDFA)

L'amplificateur à fibre dopée EDFA (Erbium Dope Fibre Amplifier) est très rapidement passé au stade industriel : il est considéré aujourd'hui un dispositif clé de tous les réseaux actuels de télécommunications optiques. Ils sont les plus utilisés, permettent d'amplifier simultanément toutes les longueurs d'ondes, et de compenser les pertes subies lors de la propagation [3].

1.2.4.1.1. Le choix de l'erbium

L'intérêt de l'erbium dans les télécommunications optiques est qu'une de ses bandes d'émission, vers 1540 nm, correspond au minimum d'atténuation dans les fibres de silice. Cette bande peut être pompée à 1480 ou 980 nm, longueur d'onde où on sait réaliser des diodes lasers de pompe de puissance suffisamment forte [3].

1.2.4.1.2. Principe de fonctionnement

Son principe de fonctionnement est basé sur une portion de fibre monomode, dont le cœur est dopé avec des atomes d'erbium, et pompée optiquement avec un laser pour placer les ions de dopage dans un état excité. Lorsqu'un signal lumineux passe à travers cette portion dopée, il désexcite les ions en produisant un photon en tout point semblable au photon incident. Le signal lumineux a par conséquent été doublé. Par effet d'avalanche, l'augmentation du signal se fait jusqu'à la sortie de la section dopée de la fibre optique [3].

1.2.4.1.3. Description

Comme dans n'importe quel amplificateur, un amplificateur EDFA transforme l'énergie fournie par un système extérieur (pompe), et la restitue au signal pour l'amplifier. Un de ses avantages, est la simplicité du dispositif : Il se compose essentiellement d'une fibre active constituant le milieu amplificateur, et d'une pompe laser.

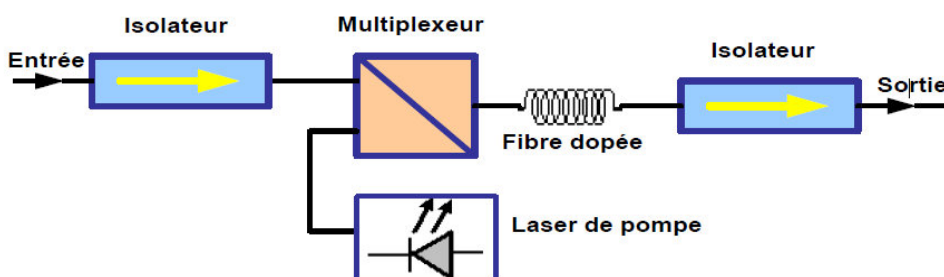


Figure 1.24 : Eléments constitutifs de l'amplificateur EDFA.

La figure (1.24) montre la configuration co-propagative d'un amplificateur EDFA, pour laquelle la lumière de pompe se propage dans le même sens que le signal utile. La configuration contra-propagative existe aussi, permettant la propagation de la lumière de pompe dans le sens contraire que celui du signal (dans ce cas le signal de pompe est injecté à l'extrémité de la fibre). La combinaison de ces deux configurations est également développée. Les différents constituants de l'EDFA sont :

- a) **Fibre dopée** La fibre dopée constitue l'un des principaux éléments de l'amplificateur optique. Elle représente le milieu dans lequel se réalise l'amplification grâce aux ions dopants qui la constituent. C'est une fibre monomode de quelques mètres de longueur, dont le cœur est dopé par des ions d'erbium. Le gain de l'amplificateur dépend fortement des paramètres optogéométriques de cette fibre, à savoir ; la concentration en ions d'erbium, la longueur de la fibre et le rayon de son cœur [3].
- b) **Pompe laser** Ce module constitue aussi un élément essentiel de l'amplificateur optique. C'est sur sa puissance qui est basé l'inversion de population favorisant l'amplification optique. La pompe est un laser à semi-conducteur, capable de produire de forte puissance en sortie, avec un faisceau monomodal pour garantir un bon couplage dans la fibre monomode.
Les longueurs d'onde de pompe choisies sont 980 et 1480 nm, un pompage simultané à 980 et à 1480 nm offre un avantage propre à chacune des longueurs d'onde : un bruit réduit à 1480 nm et une puissance de saturation élevée avec un bon rendement à 980 nm [3].
- c) **Multiplexeur** Il permet de coupler, d'injecter simultanément dans la fibre amplificatrice, le signal utile et celle de pompe respectivement aux longueurs d'onde λ_s et λ_p . Ce dispositif doit présenter une perte d'insertion faible aux deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système [3].
- d) **Isolateur** C'est un dispositif passif ne permettant la propagation du signal que dans un sens. Placé à l'entrée, il arrête l'ESA contra-propagative et protège le laser émetteur de signal. En général, les isolateurs empêchent les bruits et toutes perturbations pouvant rendre le milieu oscillant. Placé en sortie, dans les préamplificateurs optiques, les isolateurs limitent les pertes qui dégradent le facteur de bruit [3].

Les avantages d'un amplificateur à fibre dopée sont nombreux on peut les classer comme suit :

- Excellent couplage entre le milieu amplificateur et la fibre.
- Gain important.
- Pas de distorsions à hauts débits.
- Grande bande passante.
- Faible bruit.
- Amplification simultanée de plusieurs signaux en même temps.
- Peu sensible à la température.

Et parmi ces inconvénients :

- Nécessité d'un laser de pompe.
- Actuellement limité à la longueur d'onde 1550 nm.
- Difficulté d'intégration.

1.2.4.2. Les fibres de compensation(DCF)

La dispersion chromatique peut être compensée par un dispositif créant des fonctions de transfert inverse de celle d'une fibre standard, comme les fibres à compensation de dispersion (DCF, Dispersion Compensative Fiber). Elle consiste alors à introduire un tronçon de longueur adapté de cette fibre dont la dispersion est de signe opposé par rapport à celle de la fibre de ligne, mais il n'est pas possible de ramener la dispersion chromatique cumulée à zéro périodiquement simultanément sur toute une bande de plusieurs nanomètres en ajoutant simplement une seule et même valeur négative. La DCF est caractérisée par sa simplicité de mise en œuvre et sa bonne résistance aux éléments extérieurs, son avantage majeur est son caractère large bande, mais elle présente aussi des inconvénients comme les pertes linéiques non négligeables [5].

1.3. Conclusion

A la lecture de ce premier chapitre, nous pouvons dire que la fibre optique utilisée en tant que support de propagation pour la lumière est devenue un élément clé des télécommunications d'aujourd'hui. Mais la fibre optique est loin d'être un milieu de transmission idéal. Différentes sources de distorsion agissent sur les signaux envoyés ce qui rend difficile la tâche du concepteur. Seule une compréhension approfondie de ces sources de distorsion permettront de concevoir de systèmes plus robustes.

La fibre possède des qualités non négligeables comme support de transmission de l'information qui lui ont permis de s'imposer dans les réseaux de télécommunications. Et plusieurs de ses défauts semblent pouvoir se corriger (la dispersion chromatique par une fibre, l'atténuation,...).

Dans ce chapitre on a vu une description d'une liaison par fibre optique, les composantes d'un émetteur, le récepteur et ses caractéristiques, la composition de la fibre, ses différents types, ces avantages ainsi que ces inconvénients. Par la suite nous allons voir les types des réseaux existants ainsi que les différents réseaux optiques détaillés.

Chapitre 2

Introduction aux réseaux optiques

2.1. Introduction

L'aboutissement de nombreuses années de recherche de base pour obtenir d'une part des fibres présentant une atténuation compatible avec les exigences d'un réseau de télécommunications, d'autre part des composants et dispositifs suffisamment performants et fiables a permis l'apparition des premiers systèmes de transmission optique dès les années 90. Ils sillonnent désormais le monde entier, aussi bien sur terre que dans le domaine sous-marin.

Aujourd'hui, l'ère des télécommunications est en constante progression, l'intégration des services et la diversité des données échangées (voix, vidéo, données) exigent des systèmes d'être de plus en plus rapides afin de faire face à une demande de débits de plus en plus importants.

Pour comprendre l'origine de cette demande, il suffit de constater la croissance exponentielle du nombre d'utilisateurs d'Internet et des nombreux services apparus qui impliquent une importante consommation de bande passante (TV, téléphone, l'Internet, télévision numérique, télé-médecine, vidéoconférence) ainsi que tous les services offerts par la toile de l'Internet entre autres comme le E-commerce.

La saturation des réseaux existants a été un facteur principal menant les opérateurs de télécommunications à concevoir et à déployer des réseaux hauts débits, avec une grande qualité de service et des coûts aussi réduits que possible dans une concurrence loyale. Les systèmes actuels doivent répondre à toutes ces exigences pour faire face à la demande en bande passante et en débit. Nous allons parler dans ce chapitre sur les différents réseaux existants, sur les topologies existants ainsi que les réseaux d'accès optique.

2.2. Définition des réseaux

Un réseau est un ensemble de connexions entre plusieurs ordinateurs. Il permet à différentes machines d'accéder en commun à la plupart des ressources aussi efficacement que dans le cadre d'un système centralisé.

Les réseaux sont nés du besoin de relier des terminaux distants à un site central puis des ordinateurs entre eux et enfin des machines terminales, telles que stations de travail ou serveurs. Dans un premier temps, ces communications étaient destinées au transport des données informatiques. Aujourd'hui, l'intégration de la parole téléphonique et de la vidéo est généralisée dans les réseaux informatiques, même si cela ne va pas sans difficulté.

On distingue généralement quatre catégories de réseaux informatiques, différenciées par la distance maximales séparant les points les plus éloignés du réseau :

- Les réseaux personnels, ou PAN (Personal Area Network), interconnectent sur quelques mètres des équipements personnels tels que terminaux GSM, portables, organiseurs, etc...d'un même utilisateur.
- Les réseaux locaux, ou LAN (Local Area Network), correspondent par leur taille aux réseaux intra-entreprises. Ils servent au transport de toutes les informations numériques de l'entreprise. En règle générale, les bâtiments à câbler s'étendent sur plusieurs centaines de mètre. Les débits de ces réseaux vont aujourd'hui de quelques mégabits à plusieurs centaines de mégabits par seconde.

- Les réseaux métropolitains, ou MAN (Metropolitan Area Network), permettent l'interconnexion des entreprises ou éventuellement des particuliers sur un réseau spécialisé à haut débit qui est géré à l'échelle d'une métropole. Ils doivent être capables d'interconnecter les réseaux locaux des différentes entreprises pour leur donner la possibilité de dialoguer avec l'extérieur.
- Les réseaux étendus, ou WAN (Wide Area Network), sont destinés à transporter des données numériques sur des distances à l'échelle d'un pays, voire d'un continent ou de plusieurs continents. Le réseau soit terrestre, et il utilise en cas des infrastructures au niveau du sol, essentiellement de grands réseaux de fibre optique, soit hertzien, comme les réseaux satellite [17].

La figure 2.1 illustre sommairement ces grandes catégories de réseaux.

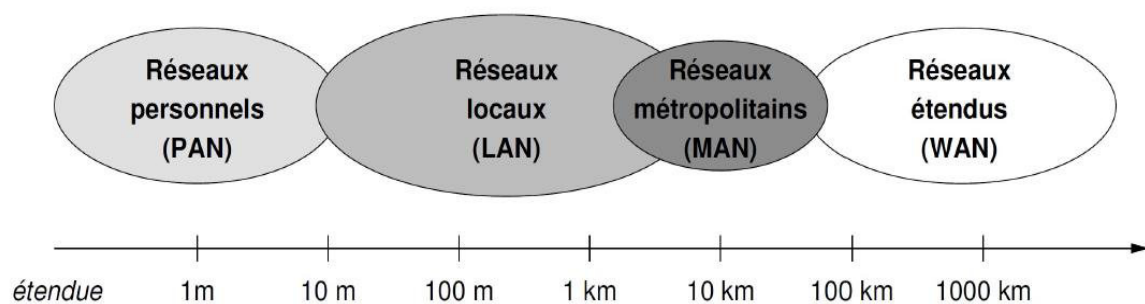


Figure 2.1 : Les différents réseaux existant.

2.3. Type de réseaux

On distingue quatre types de réseaux, suivant leurs tailles et leurs débits de transfert, au fait tous les réseaux sont des assemblages de réseaux locaux [15].

2.3.1. Le réseau local (LAN)

Il est également nommé réseau de distribution ou d'accès. C'est la dernière partie du réseau de télécommunication, celle qui relie l'abonné et le dernier autocommutateur. Sa longueur varie de 2 à 50 km et sa capacité est au plus du même ordre de grandeur que celle du réseau métropolitain.

Il est toujours constitué par une partie en fibre optique entre l'autocommutateur et la terminaison de réseau optique suivie d'une partie en conducteur métallique qui va jusqu'au terminal de l'abonné. Cependant, il est de plus en plus envisagé dans l'avenir de réduire la contribution de l'électrique pour aller vers le tout optique dans le but d'augmenter le débit disponible chez l'abonné [15].

2.3.2. Le réseau métropolitain (MAN)

Encore appelé réseau intermédiaire, le réseau métropolitain connaît en ce moment un véritable essor. Déployé entre le dernier autocommutateur à autonomie d'acheminement du réseau longue distance et une zone plus précise (arrondissement, campus, petite ville, ...), il possède un environnement souvent très complexe et divers. Fondamentalement, on peut distinguer les réseaux métropolitains structurants et métropolitains d'accès

Les réseaux métropolitains structurants sont généralement constitués d'anneaux de 80 à 150km de circonférence avec six à huit nœuds. En revanche, les réseaux métropolitains d'accès sont des anneaux de 10 à 40km de circonférence dotés de trois ou quatre nœuds avec des embranchements vers des sites distants. Suivant les réseaux ou les pays, ces chiffres peuvent varier considérablement. En particulier, il existe des différences notables entre les zones très peuplées d'Europe et d'Asie, où les distances seront inférieures, et les Etats-Unis où les applications métropolitaines s'apparentent à de véritables réseaux régionaux [15].

2.3.3. Le réseau longue distance (WAN)

Cette partie du réseau, parfois également appelée réseau structurant, représente la couche supérieure du réseau de télécommunications. Elle est comprise entre deux autocommutateurs à autonomie d'acheminement, qui ont pour rôle d'aiguiller les informations d'une région à une autre, de la zone de l'expéditeur vers celle du destinataire. La transmission de ces informations se fait désormais sur fibre optique à une longueur d'onde de 1,55 μ m et à un débit élevé qui ne cesse de s'accroître (les débits 2,5Gbits/s et 10Gbits/s sont déjà installés et le 40Gbits/s le sera très prochainement) [15].

2.4. Les réseaux optiques

Le très haut débit est une innovation technologiquement attractive, la plupart des intervenants dans le monde des télécommunications avance aujourd'hui la notion de réseau à « très haut débit ». Ils définissent cette offre comme la mise à la disposition des utilisateurs d'un réseau d'accès supportant des débits supérieurs à 100Mbit/s du réseau vers l'abonné (download) et supérieurs à 10Mbit/s de l'abonné vers le réseau (upload).

Les technologies du « haut débit » ne permettent pas d'atteindre ces débits d'information. Cela vaut pour les technologies xDSL, comme pour les technologies de l'internet mobile. Il est donc nécessaire d'utiliser une autre technologie : la fibre optique, mais qui ne rencontre pas de demandes réelles des particuliers aujourd'hui.

Les principaux opérateurs de réseau de télécommunications ont estimé que leur offre « très haut débit » ne pouvait pas être plus cher que l'offre « haut débit » standard. En effet le débit moyen estimé par foyer pour la mise en œuvre d'un raccordement au très haut débit reste toujours d'environ 30ko/s, soit environ 300 fois moins que le débit proposé par le très haut débit pour le flux descendant. Les besoins du consommateur sont aujourd'hui

satisfaits avec les technologies du « haut débit » renvoyant l'intérêt du « très haut débit », pour les particuliers, à un effet d'image [11].

Elle se rapporte à la disposition des équipements et des supports (voir la figure2.2). Il en existe cinq :

3. La topologie en bus.
4. La topologie en étoile.
5. La topologie en anneau.
6. La topologie hiérarchique (ou étoile étendue).
7. La topologie maillée.

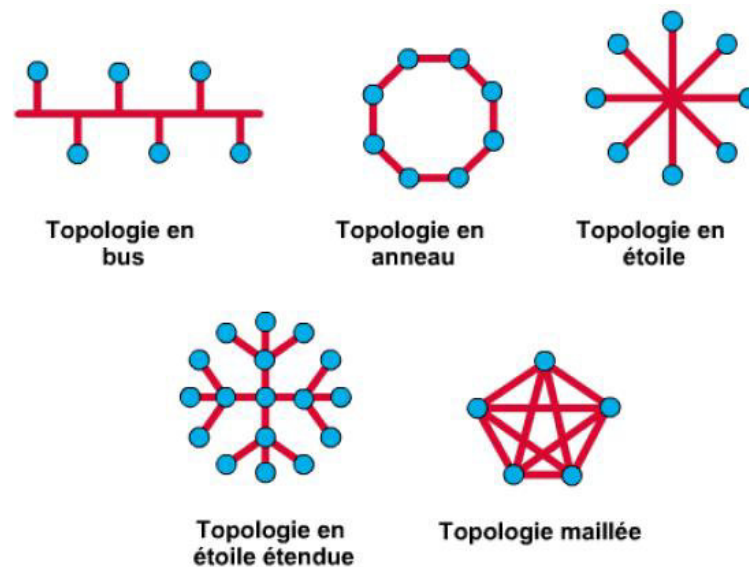


Figure 2.2 : les différentes topologies des réseaux.

2.4.1. La topologie en bus

Une topologie en bus désigne le fait que lors de l'émission de données sur le bus par une station de travail, l'ensemble des stations de travail connectées sur le bus la reçoivent. Seule la station de travail à qui le message est destiné la recopie [16].

2.4.1.1. La topologie en bus unidirectionnel

Cette topologie nécessite deux bus séparés, il en existe deux types:

Les stations émettent et reçoivent dans un sens sur un des deux bus et dans l'autre sur le second bus (voir la figure2.3)[16].

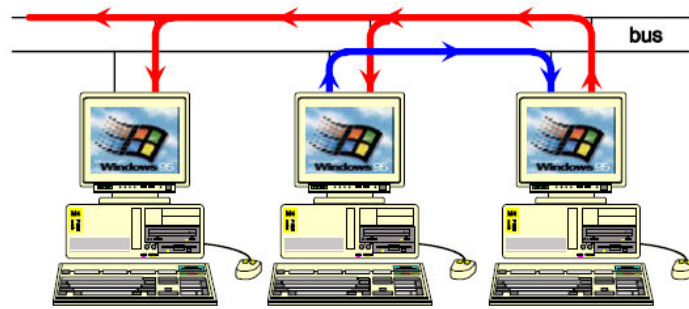


Figure 2.3 : Les stations émettent et reçoivent dans un sens.

Les stations émettent et reçoivent les données sur les deux bus grâce à deux fréquences séparées, une par bus (voir la figure 2.4)[16].

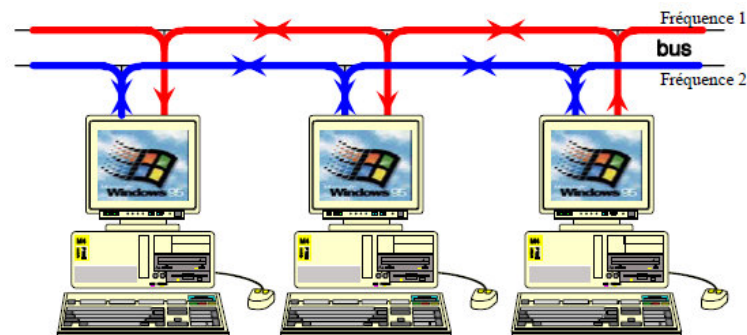


Figure 2.4 : Les stations émettent et reçoivent les données sur les deux sens à deux fréquences.

2.4.1.2. La topologie en bus bidirectionnel

L'émission et la réception se font sur un bus unique, mais non simultanément. Lorsqu'une station émet le signal se propage dans les deux sens (voir la figure 2.5).

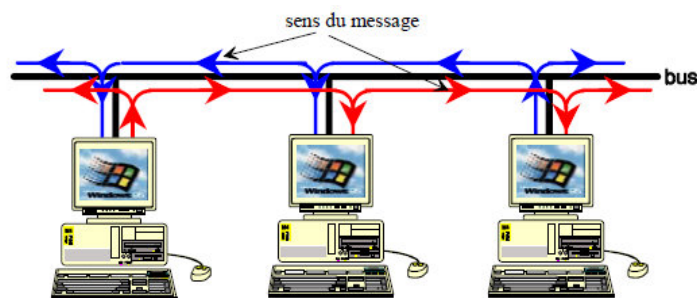


Figure 2.5 : L'émission et la réception se font sur un bus unique.

Cette technologie est utilisée par les réseaux Ethernet, Appletalk, et Token Bus d'IBM [16].

2.4.2. La topologie en anneau

L'information circule le long de l'anneau dans un seul sens. A chaque passage d'un message au niveau d'une station de travail, celle-ci regarde si le message lui est destiné, si c'est le cas elle le recopie (voir la figure 2.6).

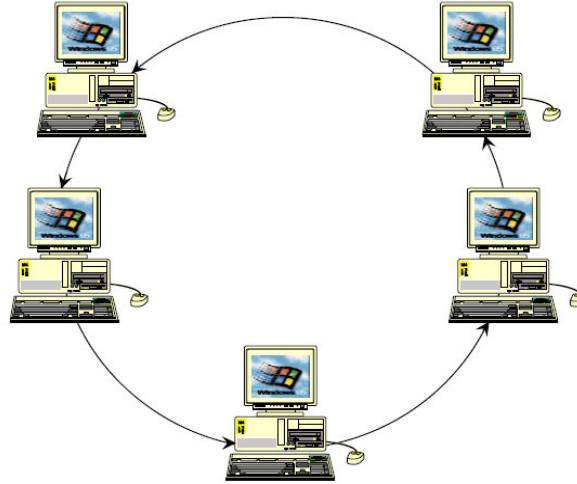


Figure 2.6 : Un réseau en anneau.

Cette technologie est utilisée par les réseaux Token Ring et FDDI (FiberDistributed Data Interface, réseau double anneaux)[16].

2.4.2.1. Architecture en anneau monofibre

Cette architecture dite aussi en anneau unidirectionnel présente l'inconvénient que le temps de transmission entre deux nœuds est différent selon le sens d'un flux. Le temps de transmission $B \rightarrow A$ est supérieur au temps de transmission $A \rightarrow B$. Comme les trames transmises contiennent des informations concernant les trames reçues (qualité de transport par exemple), les retards de détection peuvent être préjudiciables à la procédure des échanges, dans notre mémoire on a utilisé ce genre de type de réseau (voir la figure2.7) [13].

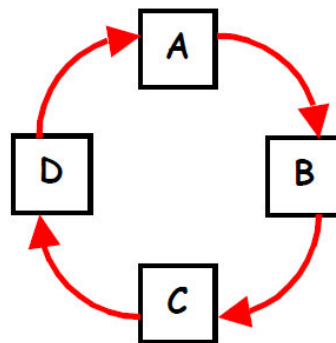


Figure 2.7 : Anneau unidirectionnel.

2.4.2.2. Architecture en anneau bidirectionnel

Cette architecture ne possède pas l'inconvénient de la configuration monofibre, elle est constituée d'une paire de fibre, chaque fibre transporte le trafic dans un sens. Elle permet aussi une meilleure gestion du trafic les différents tronçons du réseau.

Chaque nœud reçoit un flux de données, il extrait le trafic qui lui est réservé et l'achemine vers l'extérieur de l'anneau et relaie le reste du flux vers le nœud suivant. On peut aisément vérifier sur l'anneau le trafic est réparti de sorte que le flux transporté par chaque tronçon est égal à la somme des flux de 3 paires de nœuds, par exemple le tronçon A→B transporte le flux A→B mais aussi les flux E→B et A→C, imaginons que ce tronçon est arrivé à son débit max alors essayer (dans la mesure du possible) d'acheminer l'excédent du flux A→C sur l'autre fibre à travers les nœuds E et D. il faut tout de même remarquer que ces deux flux n'auront pas les mêmes délais et qu'il faut prendre les précautions nécessaires suivant la situation. Le conduit le plus court est dit conduit mineur. L'autre est désigné par conduit majeur (voir la figure 2.8) [13].

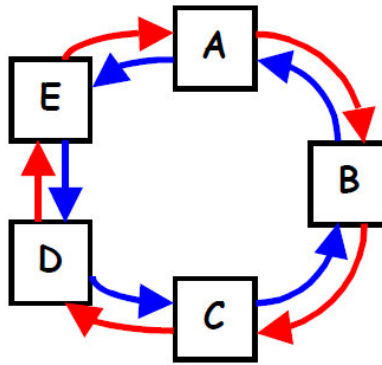


Figure 2.8 : Anneau bidirectionnel.

2.4.3. La topologie en étoile

L'ensemble des stations de travail est connecté à un concentrateur qui examine le contenu du message, qui le régénère, et qui le transmet qu'à son destinataire. C'est en réalité un réseau de "n" liaisons point par point, car il établit un circuit entre une paire d'utilisateurs (voir la figure 2.9) [16].

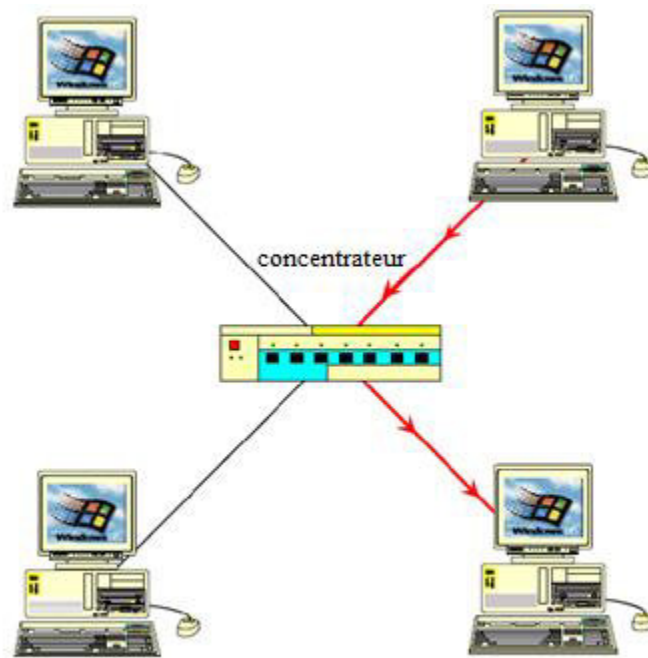


Figure 2.9 : Le réseau en étoile.

Cette technologie est utilisée pour les réseaux téléphoniques privée (PABX).

2.5. Réseaux longue distance à fibre optiques

On utilise le terme backbone pour désigner ce type de liaison, qui comprends des systèmes terrestres ou sous-marins destinés à véhiculer des signaux à haute vitesse sur des longues distances de plus de 1000Km, il s'agit de liaison pouvant utiliser des répéteurs pouvant régénérer le signal optique, constitué par des régénérateurs optoélectroniques 3R (Retiming, Reshaping, Regenerating), réalisent une amplification optoélectronique du signal avec une double conversion : un dispositif convertit le signal optique en un signal électronique, amplifie le signal électrique et le convertit en signal optique. Dans un système WDM, chaque canal requiert un répéteur 3R. En plus chaque répéteur est dépendant de la capacité du canal, donc il ne peut travailler que pour un canal donné un protocole donnée et a une rapidité de transmission fixée.

Par contre l'utilisation d'amplificateurs optiques élimine cette double convention et permet que la ligne de transmission soit indépendante de la rapidité de transmission, du protocole des données et du canal en longueur d'onde. L'amplificateur optique est dit transparent, il fonctionne sans convertir le signal dans le domaine électriques, propriétés sont très intéressantes puisque les augmentations de capacité des systèmes se traduiront seulement par un changement des terminaux émetteur-récepteur [10].

2.5.1. Les réseaux sous-marins

2.5.1.1. Introduction

Depuis l'installation des premiers câbles télégraphiques sous-marins, dans la manche dès 1852 et à travers l'Atlantique en 1864, l'histoire des câbles sous-marins a été constituée de quelques longues périodes pendant lesquelles le réseau sous-marin se développait de manière mesurée, tandis que la technologie utilisée mûrissait avec prudence. Ces périodes de calme étaient séparées par des percées ou des « révolutions » technologiques à l'issue desquelles l'ancienne technique était complètement abandonnée au profit de la nouvelle qui offrait toujours de plus grandes capacités ou une meilleure qualité de transmission pour un coût équivalent.

La première période, il y a cent ans, en pleine révolution industrielle, fut celle des câbles télégraphiques à un seul canal. Un important réseau de câbles fut posé pendant cette période, dont beaucoup gisent encore au fond de l'océan (et câbles). La deuxième période, qui s'étendit de 1950 à 1985, fut celle des câbles coaxiaux avec transmission analogique du trafic téléphonique. L'introduction des tubes électroniques à vide, puis plus tard des premiers amplificateurs à semi-conducteurs dans les répéteurs, permit à l'époque de transmettre des canaux de 4kHz de large multiplexés, dont le nombre crut de 36 à 4000 de 1950 à 1985, en utilisant des techniques de porteuse en haute fréquence. L'augmentation de la capacité rendit nécessaire l'augmentation du diamètre du câble coaxial et la réduction de l'espacement entre répéteurs, avec des conséquences importantes sur le coût du système. Comme pendant la période précédente, les câbles étaient alors essentiellement utilisés pour des applications point à point (par exemple Europe-Etats Unis) et un nouveau câble transatlantique était posé environ tous les quatre ans.

Cette époque vit également l'apparition des premiers satellites, qui devinrent très vite des concurrents sérieux du câble. Le premier satellite utilisé pour les transmissions intercontinentales fut lancé par INTELSAT en 1965 avec une capacité assez faible de 240canaux de 4kHz de largeur. Quoiqu'il en soit, la technologie des satellites fit assez rapidement des progrès importants, et la capacité d'INTELSAT V, lancé en 1981, atteignait déjà 10000circuits téléphoniques. Cette compétition donna lieu à d'innombrables comparaisons technico-économiques entre le câble et le satellite, avec des conclusions souvent ambiguës et parfois même contradictoires. Dans les faits, une relation de complémentarité se développa entre le câble et le satellite, liée à l'intérêt de pouvoir procéder à des restaurations mutuelles de trafic lorsqu'un des deux systèmes ne fonctionnait plus. Aujourd'hui, les deux types de technologie offrent des avantages bien distincts : les câbles sous-marins sont d'excellents candidats pour les transmissions point à point très haut débit, tandis que les satellites sont plus flexibles au niveau des accès et par exemple très adaptés pour les communications avec les mobiles ou la desserte de zone d'habitat dispersé. Notons enfin que le temps de propagation beaucoup plus faible sur la câble que sur le satellite (la distance est de 6500km pour un câble transatlantique au lieu de 72000km pour le satellite) rend moins critiques les problèmes d'écho.

L'apparition des fibres optiques dans les câbles sous-marins causa le déclin des câbles coaxiaux pour cette application et marqua le début de la troisième période. Cependant, l'énorme potentiel de la fibre optique ne fut pas de prime abord complètement exploité et ce n'est qu'avec l'apparition des amplificateurs optiques à fibre dopée (OADF), c'est-à-dire dans les années 1990, qu'il put l'être beaucoup mieux.

Dans ce paragraphe, nous nous focaliserons sur les applications des AOFD dans les systèmes sous-marins futurs, et sur tous les problèmes associés. Après avoir passé en revue les premières réalisations utilisations utilisant les fibres optiques et l'apparition de la notion de réseau, nous décrirons les contraintes de base associées à la conception d'un système sous-marin : excellente qualité de transmission, fiabilité élevée, durée de vie importante et contraintes de maintenance. Les conséquences importantes de phénomènes du « second ordre » (négligeables et négligés sur les systèmes précédents à plus bas débit) sur les liaisons amplifiées transocéaniques seront ensuite abordées. Nous ferons enfin le tour des solutions en cours de développement pour la première génération de systèmes amplifiés, et de celles qui pourraient être utilisées pour de futures générations à plus haut débit ou moins coûteuses [9].

2.5.1.2. Evolution des réseaux de câbles sous-marins à fibre optique

2.5.1.2.1. Les systèmes avec régénération à 1300 nm

Les premiers systèmes sous-marins optique utilisaient des régénérateurs optoélectroniques à un débit de 280Mbit/s (multiplexages de deux trains primaires à 140Mbit/s) fonctionnant dans la plage de longueur d'onde située autour de 1300nm (à cause des incertitudes à l'époque sur la fiabilité des lasers et sur les pertes par microcourbures de la fibre à 1550nm, et également parce qu'on ne disposait alors de manière industrielle ni de laser vraiment monomodaux fréquemment, ni de fibre à dispersion chromatique nulle à 1550nm).

Le système offrait ainsi une capacité équivalente à ce qui se faisait de mieux en termes de câbles coaxiaux tout en présentant un coût nettement inférieur, ceci étant dû essentiellement à la fois à des économies sur le câble lui-même (nettement moins volumineux en optique) et à l'augmentation de l'espacement entre répéteurs qui passe de 5km en transmission analogique sur câble coaxial à 50km en transmission numérique sur fibre optique. Qui plus est, puisqu'il est relativement aisé de disposer plusieurs fibres dans un câble, il était également facile de constituer des artères de transmission comportant un tronc commun et des parties terminales distinctes : ce fut la puissance des premières unités de branchement sous-marines et ainsi des premiers véritables réseaux sous-marins avec multiples points d'atterrissage.

Le câble transatlantique TAT8 (posé en a989), par exemple, utilisa pleinement ces possibilités en fournissant, sur un câble unique sur la majeure partie du chemin, deux liaisons, entre respectivement les Etats Unis et la France et les Etats Unis et la Grande Bretagne, et également une liaison directe France- Grande Bretagne. Un système à 420Mbit/s (trois fois 140Mbit/s) utilisant le même type de technologie fut également posé sur l'Atlantique suivante, avec des financements privés (PTAT1) [9].

2.5.1.2.2. Les systèmes avec régénération à 1550 nm

Peu de temps après ces premières réalisations fut conçu un nouveau type de système qui utilisait la fenêtre autour de 1550nm (atténuation réduite de la fibre entraînant un accroissement de la distance entre répéteurs) et des lasers réellement monomodaux (DFB) permettant de réduire l'impact de la dispersion chromatique sur la qualité de transmission. Ces innovations permirent d'augmenter le débit par fibre jusqu'à 560Mbit/s tout en divisant au moins par deux le nombre de répéteurs avec des avantages significatifs associés en terme d'investissement pour les opérateurs. Cette période, récente puisque nous parlons de la fin des années 1980, vit également l'apparition d'unités de branchement optoélectroniques (avec démultiplexage/multiplexage temporel électronique) permettant d'augmenter encore le nombre de branchements sans augmenter le nombre de paires de fibres (limité à trois dans les premiers systèmes du fait de l'espace disponible dans les répéteurs). Cette nouvelle avancée technique fut utilisée pour l'installation du câble transatlantique TAT9 posé en 1991 et reliant simultanément de manière flexible les Etats-Unis, le Canada, la France et la Grande-Bretagne.

Les avantages en terme de coût étaient tels alors que trois liaisons transatlantiques furent posées peu de temps après : le TAT10 (1992) et le TAT11 (1993) au même débit et le CANTAT3 (1994) reliant le Canada et la Grande-Bretagne au débit de 2,5Gbit/s. suivit alors une kyrielle de liaisons nouvelles reliant l'Europe à l'Afrique (SAT2, EURAFRICA, etc.), l'Amérique Centrale à l'Amérique du Sud, aux Etats-Unis et à l'Europe (COLOMBUS), et enfin le plus long câble optique du monde (17000km) le SEA-ME-WE2 (1994) qui relie l'Europe au Moyen-Orient et aux pays de l'Asie du sud-est tels que Singapour ou l'Indonésie tout en passant par l'Inde et le Srilanka. Cette liste incomplète omet les câblages sur le pacifique, eux aussi extrêmement nombreux (TPC4, TASMAN2, PACRIM, etc.) mais moins parlants pour les lecteurs européens.

Les satellites n'offrant alors plus d'augmentation de capacité comparable à celle des câbles, l'ancienne relation de complémentarité entre les deux systèmes disparut, et une sécurisation mutuelle du service ne fut plus possible. Les principes de restauration de trafic durent ainsi être prévus dans la conception du réseau sous-marin lui-même (par exemple, dispositifs de sécurisation mutuelle entre TAT8 et TAT9) [9].

2.5.1.2.3. Les systèmes avec amplification optique en ligne (dits « amplifiés »)

Depuis la fin des années 80, l'apparition des amplificateurs optiques à fibre ouvre encore aux câbles sous-marins de nouvelles potentialités dans les domaines techniques et économiques, comme par exemple la transparence vis-à-vis du débit des équipements immergés (le mot transparence est à prendre avec précaution car il n'implique pas ici une insensibilité au débit des performances de la ligne de transmission). L'amplification optique permet une importante croissance de la capacité (un facteur 8 pour la première génération amplifiée !) tout en simplifiant considérablement l'architecture des répéteurs.

La figure 2.11 illustre le principe de ce système de protection : chaque câble contient deux paires de fibres, l'une pour le trafic prioritaire et l'autre qui sert en temps normal au trafic non prioritaire et à la protection (figure 2.11a). Chacune de ces paires achemine un débit de 5Gbit/s bilatéral (dans chaque sens). Si l'un des deux câbles est hors service (par exemple en cas de coupure franche due à un bateau de pêche), tout le trafic prioritaire est alors transféré sur la paire de protection de l'autre câble, et ceci suffisamment rapidement pour éviter une coupure de communication. La figure 2.11b représente la nouvelle configuration obtenue lorsque le câble TAT13 est hors service. Un système de protection similaire sera également mis en service dans le pacifique Nord à la même époque (réseau TCP5) [9].

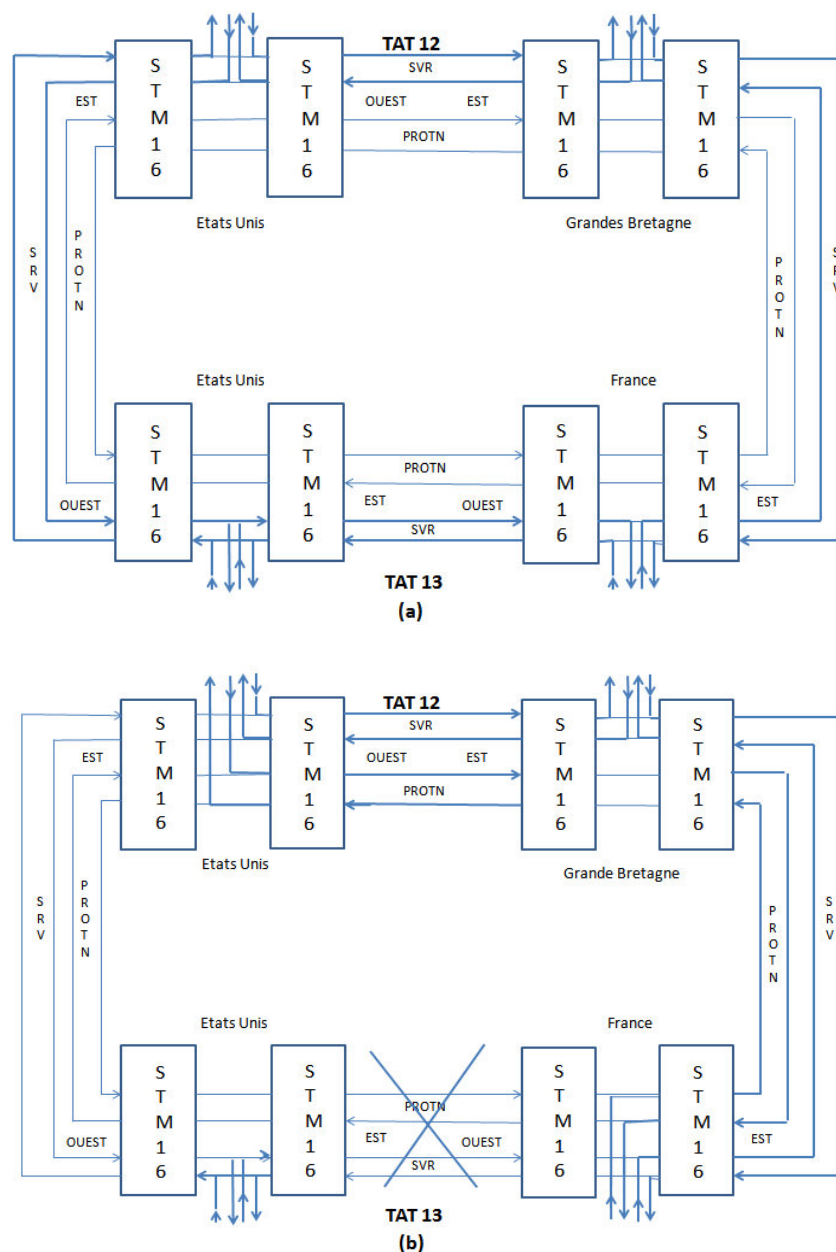


Figure 2.10 : Schéma du système de protection du réseau TAT 12/TAT 13.

SRV : paire de fibre affectée au trafic prioritaire (service). PROT N : paire de fibre affectée à la protection des lignes. Les lignes en gras correspondent au chemin suivi par le trafic prioritaire dans deux situations. a) mode normal de fonctionnement ; b) câble coupé sur TAT 13 (le trafic prioritaire de TAT 13 passe par TAT 12).

Pendant la première du développement des systèmes amplifiés, il apparut rapidement que les bénéfices potentiels des amplificateurs optiques n'étaient pas aussi évidents que prévu, ceci à cause notamment de l'accumulation de phénomène du « deuxième ordre » (du moins considérés comme tels auparavant) sur de grandes longueurs de fibre, qui entraîne des distorsions importantes sur le signal [9].

2.5.1.2.4. Evolution future vers des topologies en anneau

Afin de renforcer la sécurité des futurs systèmes sous-marins, des structures en anneau, que nous retrouverons dans la description des réseaux terrestres, ont été proposées. Le réseau serait alors constitué par un anneau sous-marin sur lequel se brancheraient des liaisons vers divers points de la côte. L'anneau lui-même, installé en haute mer, loin des zones à risque que sont les zones côtières (également zones de pêche) serait très peu vulnérable. Les liaisons entre l'anneau et la côte sont plus exposées, mais l'existence de plusieurs liaisons procure un effet de diversité qui garantit l'acheminement du trafic même en cas de coupure de l'une d'elles [9].

2.5.1.3. Les exigences élémentaires pour la conception des systèmes de transmission sur câble sous-marins

Voyons tout d'abord les contraintes élémentaires et traditionnelles associées à la conception des systèmes de transmission sur câble sous-marin. Ces systèmes doivent fournir une excellente qualité de transmission (meilleure que celle donnée par la recommandation CCITT G.826 pour les transmissions numériques à longue distance) et présenter une fiabilité largement supérieure à celle de tout autre type de système : l'objectif est typiquement d'avoir moins de trois pannes dues au système lui-même (les coupures accidentelles sont évidemment exclues) pendant toute la durée de vie du système, qui est de 25ans pour obtenir la qualité de transmission requise, il est nécessaire d'éliminer toutes les causes prévisibles de dégradation de la transmission qui pourraient advenir pendant la durée de vie du système. D'une part, il faut prendre en compte les mécanismes de dégradation potentiels dus au vieillissement tels que l'augmentation des pertes de la fibre ou l'augmentation du bruit : on le fait en introduisant des marges lors de la définition des caractéristiques du système. D'autre part il faut bien connaître les probabilités de panne inhérentes à la technologie retenue ou au processus de fabrication.

La dispersion des caractéristiques des composants due à la fabrication est également un paramètre important dans la conception (on sera par exemple amené à ranger les fibres dans les systèmes amplifiés pour maintenir une dispersion chromatique moyenne tolérable). Des marges doivent être affectées aux réparations potentielles : par exemple, toute réparation suivant une rupture de câble implique le rajout d'une longueur supplémentaire et donc une atténuation plus importante. Tout cela fait que les systèmes sous-marins doivent être posés avec des marges extrêmement importantes sur tous les paramètres critiques.

Pour satisfaire ces exigences sur la fiabilité des câbles sous-marins, il est nécessaire d'utiliser des composants à la fois fiables par nature et bien qualifiés. Certains éléments, dont

on ne peut assurer avec suffisamment de confiance la durée de vie, seront parfois disposés de manière redondante dans les répéteurs, avec une commande à distance pour le basculement en cas de défaillance. Dans les systèmes à 560Mbit/s émetteur possède par exemple quatre lasers. Les amplificateurs optiques sont également un élément clé : dans les systèmes TAT12 et TAT13 par exemple, les amplificateurs optiques des deux fibres Est Ouest et Est Ouest mettent en commun leurs pompes, ce qui garantit le fonctionnement des amplificateurs même en cas de défaillance de l'une d'elles [9].

Il est également nécessaire d'utiliser des composants dits « certifiés » (des composants sélectionnés sur la base de procédures bien définies pour minimiser la « mortalité infantile ») et de fabriquer, installer et maintenir le système en appliquant des règles d'assurance qualité extrêmement strictes. La définition des procédures de qualification, de certification et « d'assurance-qualité » représente d'ailleurs une partie non négligeable dans le coût de développement d'un nouveau système sous-marin. Les coûts de fabrication, du fait de l'utilisation de composants sélectionnés et choisis avant tout pour leur robustesse, sont eux aussi plus élevés que ceux de systèmes terrestres aux fonctionnalités équivalentes. Cet excédent de prix est évidemment à comparer avec le coût de réparations en haute mer et d'indisponibilités du système pouvant dépasser une quinzaine de jours : la différence justifie bien les grandes précautions prises à la conception.

Une maintenance efficace du système peut être obtenue par un système de supervision inclus dans les répéteurs associé à des instruments d'assistance à la réparation. Le système de supervision permet de rapatrier aux stations terminales des informations en provenance de la partie immergée et doit permettre la localisation (à l'échelle d'un pas de régénération ou d'amplification au minimum) immédiate des défauts. Les informations rapatriées permettent aussi de suivre de manière continue l'évolution d'un certain nombre de paramètres critiques de la ligne sous-marine : si un des paramètres dérive de manière inquiétante, il est alors possible de procéder à une réparation préventive (à un moment par exemple où le trafic est bas). Si les répéteurs sont équipés d'une redondance active (comme dans le cas des systèmes à 560Mbit/s), la supervision permet alors également d'envoyer des commandes à la ligne pour là aussi procéder à des corrections préventives. Les instruments d'assistance à la réparation consistent en :

1. Des équipements de surveillance présents en station et aussi sur les navires câbliers.
2. Des équipements pour couper le câble au fond de l'océan et pour le remonter à la surface.
3. Des équipements pour effectuer des soudures et des joints de câble en mer (par exemple, un joint universel a été conçu, qui permet de réparer et d'abouter n'importe quel type de câble présent dans TAT9).
4. Des équipements pour réinstaller le câble après réparation [9].

2.5.1.4. Le réseau terrestre interurbain

Des systèmes de transmission sur fibre optique transportant des débits de 4 x 140 et 16 x 140Mbit/s à longueur d'onde de 1,3 μ m (puis plus tard 1,55) ont été introduit dans le réseau interurbain au milieu de la décennie 1980-1990. Ils permettaient alors de gagner en débit et en

espacement entre répéteurs par rapport aux systèmes existants sur câble coaxial (la distance passait typiquement de 2 à 50km). Cette introduction de l'optique ne modifiait toutefois en rien la structure du réseau. C'est la hiérarchie numérique synchrone qui va conduire à imaginer des architectures de réseau entièrement nouvelles qui sont en train de se mettre en place dans les différents pays. Compte tenu des débits à transmettre, de la maturité de la transmission sur fibre optique et des avantages des systèmes optiques en termes de coût, toujours très inférieur à celui des systèmes sur câble coaxial et inférieur à celui des faisceaux hertziens pour les grandes capacités, la transmission optique jouera un rôle dominant dans le futur réseau terrestre.

Les bouleversements dans la structure des réseaux sont en grande partie imputables à l'apparition de la hiérarchie numérique synchrone, qui peut être mise en œuvre avec n'importe quel type de système de transmission. Mais la transmission optique, en permettant une réduction considérable du nombre de répéteurs-régénérateurs, apporte une simplification très importante dans la gestion du réseau. Dans certains cas particuliers cependant, par exemple dans les zones de montagne ou plus généralement en terrain difficile, les faisceaux hertziens peuvent se révéler plus intéressants que la fibre et des équipements hertziens compatibles avec la hiérarchie numérique synchrone sont d'ailleurs développés dans tous les pays [9].

2.5.2. Réseaux terrestre

Il s'agit de réseaux de quelque centaines de Km reliant des grands centres urbains reliés par des multiplexeurs d'insertion extraction MIE ,ADM, Add Drop Multiplexers qui permettent d'extraire des canaux et aussi d'en rajouter sur la liaison .La technologie DWDM s'adapte bien à ces réseaux est celle propre au SDH avec des boucles en double anneau permettant en cas de panne d'un anneau de diriger les signaux sur l'autre. Pour les systèmes DH à fibre optique, les débits sont typiquement $4 \times 155 \text{ Mb.s}^{-1}$ (STM-4) et $16 \times 155 \text{ Mb.s}^{-1}$ (STM-16) avec deux répéteur distants de plus de 80Km, ces réseaux sont flexible vis-à-vis de la demande : actuellement à $2,48 \text{ Gb.s}^{-1}$ (STM-16) ils pourront être augmentés, à l'aide du DWDM sur N canaux, à $N \times 2,48 \text{ Gb.s}^{-1}$ ou $N \times 10 \text{ Gb.s}^{-1}$.La figure illustre un anneau SDH pour réseau terrestre longue distance[10].

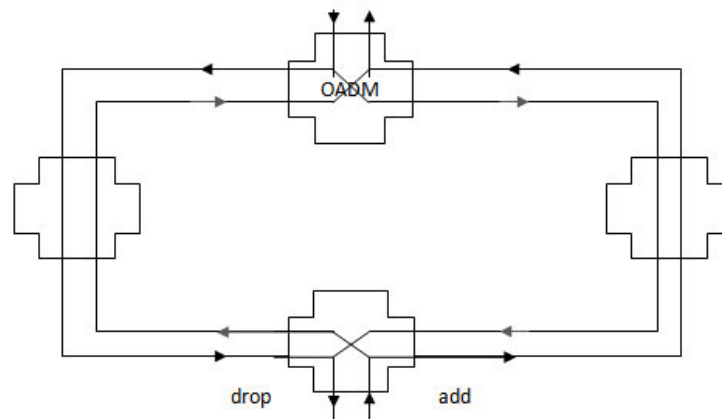


Figure2.11 : Anneau SDH pour réseau terrestre longue distance.

2.5.2.1. La hiérarchie numérique

Les débits acheminés sur les artères de transmission d'un réseau numérique ne pas quelconques. Jusqu'ici, les réseaux utilisent la hiérarchie numérique plésiochrone (étymologiquement « presque synchrone »), dont le niveau de base correspond en Europe à 2,048Mbit/s et les suivants sont obtenus par multiplexages successifs. On parle de multiplexage plésiochrone parce que les divers équipements travaillant dans le réseau ont la même fréquence nominale, mais ne sont pas synchronisés. Ainsi, le multiplexeur qui regroupe N trains à D_b Mbit/s doit comporter des dispositifs qui vont remettre en phase périodiquement les trains constituants, par insertion d'éléments binaires qui compensent le glissement de l'un par rapport à l'autre : cette addition d'éléments binaires supplémentaire explique le débit du train en sortie du multiplexeur soit un peu supérieur à ND_b Mbit/s. par exemple, le multiplexage de quatre trains à 2,048Mbit/s donne un train à 8,448Mbit/s, valeur supérieure à $4 \times 2,048=8,192$ Mbit/s (voir la figure 2.11).

L'énorme capacité de transmission offerte par la fibre optique et certaines limitations de la hiérarchie plésiochrone qui seront indiquées plus loin ont conduit à imaginer la « hiérarchie numérique synchrone » qui est universelle, ce qui était impératif compte tenu des besoins d'interconnexion croissants des réseaux de télécommunications. Déjà en 1985 avait été proposée aux Etats Unis une nouvelle structure de réseau appelé SONET (Synchronous Optical Network), à partir de laquelle des développements ultérieurs ont abouti à la hiérarchie numérique synchrone [9].

2.5.2.1.1. La hiérarchie numérique plésiochrone

Le tableau 2.1 donne les différents débits de la hiérarchie numérique plésiochrone (Plesiochronous Digital Hierarchy, PDH), avec la capacité correspondante en nombre de voies téléphoniques, dans les trois hiérarchies plésiochrones utilisées respectivement en Europe, en Amérique du Nord et au Japon.

Europe		Amérique du Nord		Japon	
Débit (Mbit/s)	Capacité	Débit (Mbit/s)	Capacité	Débit (Mbit/s)	Capacité
2,048	30	1,544	24	1,544	24
8,448	120	6,312	96	6,312	96
34,368	480	44,736	672	32,064	480
139,264	1920			97,728	1440

Tableau 2.1 : la hiérarchie numérique plésiochrone.

La hiérarchie numérique plésiochrone, apparue il y a une trentaine d'années avec la transmission numérique et la numérisation correspondante des réseaux de télécommunication, présente des limitations qui apparaissent aujourd'hui avec l'introduction de systèmes à très haut débit et que la transmission optique permet précisément de lever. En effet, dans un réseau, il est essentiel de pouvoir réaiguiller un train numérique transporté par un multiplex sur un certain itinéraire vers un autre itinéraire : c'est ce que l'on appelle la fonction de « routage ».

Avec la technique plésiochrone, il est nécessaire de démultiplexer pour se ramener à un niveau peut être traité, par exemple le 140Mbit/s, de « router » les différents trains à 140Mbit/s, puis de les multiplexer à nouveau pour un train qui sera transmis sur le nouveau système de transmission. On conçoit les contraintes qu'impose une telle procédure. De plus, les besoins de gestion des réseaux imposent de pouvoir disposer dans les trames de place pour insérer des informations de gestion du réseau ou de maintenance. Enfin, dernier inconvénient, il n'existe aucune normalisation pour les trains binaires au-delà du niveau le plus élevé de la hiérarchie, par exemple 140Mbit/s en Europe, si bien que les systèmes de transmission transmettant des débits supérieurs, multiples de 140Mbit/s, en peuvent ne pas être reliés directement [9].

2.5.2.1.2. La hiérarchie numérique synchrone

SONET (Synchronous Optical Network) a été désigné pour l'Amérique du nord a fin de transmettre en optique les signaux entre équipement, puis qu'il s'agit d'une transmission en optique pour les opérations d'amplification on est obligé de passer du domaine optique au domaine électromagnétique et une fois l'opération réalisé on passe de l'électromagnétique en optique.

Le SDH (Synchronous Digital Hierarchy) a été désigné pour la communauté internationale à fin de reprendre à des exigences de compatibilité avec SONET. SONET/SDH sont organisés en trames qui consiste en une entête et une charge, en réception des données les équipements SONET/SDH reçoivent le signal optique et le convertit en signal électrique pour traiter les trames. Le coté électrique du signal dans SONET est connu sous le nom STS (Synchronous Transport Signal) et le coté électrique de SDH est connu sous le nom STM (Synchronous Transport Module). Le côté optique de SONET/SDH est connu sous le nom de OC (Optical Carrier) [9].

Le tableau 2.2 donne les différents niveaux de la SDH ; le sigle STM signifie Synchronous Transport Module.

Nom	Débit en Mbit/s
STM-1	155,52
STM-4	622,08
STM-16	2488,32

Tableau 2.2: les niveaux de la hiérarchie numérique synchrone.

Le signal STM-1 est constitué par une trame, c'est-à-dire un motif, qui se répète à la fréquence de 8 kHz (sa durée est donc le 125µs) et contient 2430 octets, sous forme de neuf blocs de 270 octets. La fréquence de 8 kHz est on sait que la fréquence d'échantillonnage du téléphonique de bande égale à 4 kHz : elle n'est en conséquence pas liée à la SDH, mais à une normalisation antérieure. Dans la littérature, on représente habituellement la trame sous forme d'une matrice à 9 lignes et 270 colonnes. Chaque trame est divisée en un surdébit de section (SOH, Section Overhead) et un « conteneur virtuel » (VC, Virtual Container) qui correspond à une capacité de 150,34Mbit/s. le conteneur virtuel peut être vu comme une boîte dans

laquelle sera placé le signal à transmettre peut d'ailleurs en quelque sorte «flotter» à l'intérieur du conteneur, sa position temporelle étant repérée par un pointeur qui indique son début.(voir la figure 2.12)

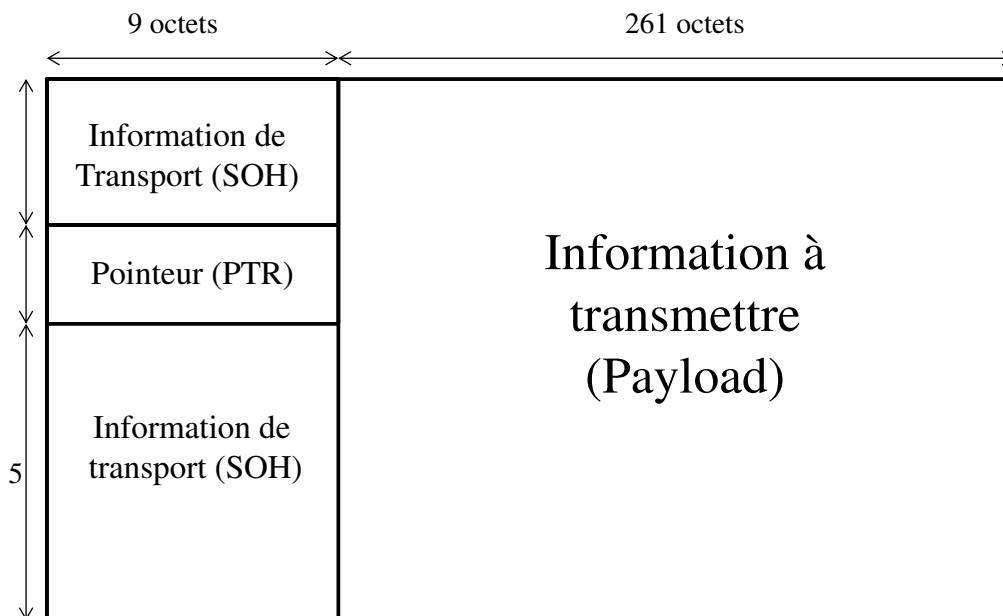


Figure 2.12 : Structure d'une trame STM-1.

Le conteneur peut transporter un train plésiochrone à 140Mbit/s, ce qui garantit la compatibilité de la nouvelle hiérarchie avec la hiérarchie numérique plésiochrone. Le surdébit contient des informations de gestion telles que les alarmes, le contrôle du taux d'erreur, etc. : contrairement au conteneur virtuel, il n'est pas transmis emprunté. Des groupes de modules peuvent être regroupés pour constituer un module d'ordre supérieur, par exemple quatre STM-1 synchronisés entre eux forment un STM-4 à 622Kbit/s. le STM-4 est constitué par une trame toutes les 125 μ s, chaque trame contenant quatre trames STM-1 multiplexées entre elles. Mais un module STM-4 peut également transporter un seul signal à débit élevé (typiquement autour de 600Mbit/s) au lieu de quatre signaux : on parle alors de conteneurs virtuels concaténés. Quatre STM-4 mis ensemble constituent un STM-16 au débit de 2,5Gbit/s.

Le multiplexage de quatre modules STM-1 pour obtenir un module STM-4 nécessite une synchronisation préalable des quatre STM-1 constituants qui s'effectue au moyen de pointeurs. Un avantage important attendu de la hiérarchie numérique synchrone est la possibilité, pour l'instant plutôt théorique, d'interconnecter des équipements de transmission provenant de différents constructeurs, ce que ne permet pas la hiérarchie numérique plésiochrone[9].

2.6. Réseaux métropolitains(DWDM)

Le multiplexage en longueur d'onde ou WDM (Wavelength Division Multiplexing) permet de transmettre simultanément sur la même fibre optique des signaux de deux ou plus longueurs d'onde. On peut faire l'analogie avec les techniques de radiodiffusion, par exemple en téléphonie mobile, on multiplexe des fréquences différentes, par FDM (Frequency Division

Multiplexing). Le grand intérêt du WDM est de multiplier la capacité de transmission d'une seule fibre optique utilisée en TDM par le nombre N de canaux en longueur d'onde. Cette technologie évite aussi d'installer des nouvelles fibres dans les systèmes existants. On utilise le terme DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) pour les systèmes multiplexés en longueur d'onde qui se situent dans la troisième fenêtre autour de 1550 nm avec un espacement dense entre canaux de 25GHz, 50GHz ou 10 GHz (voir la figure 2.13).

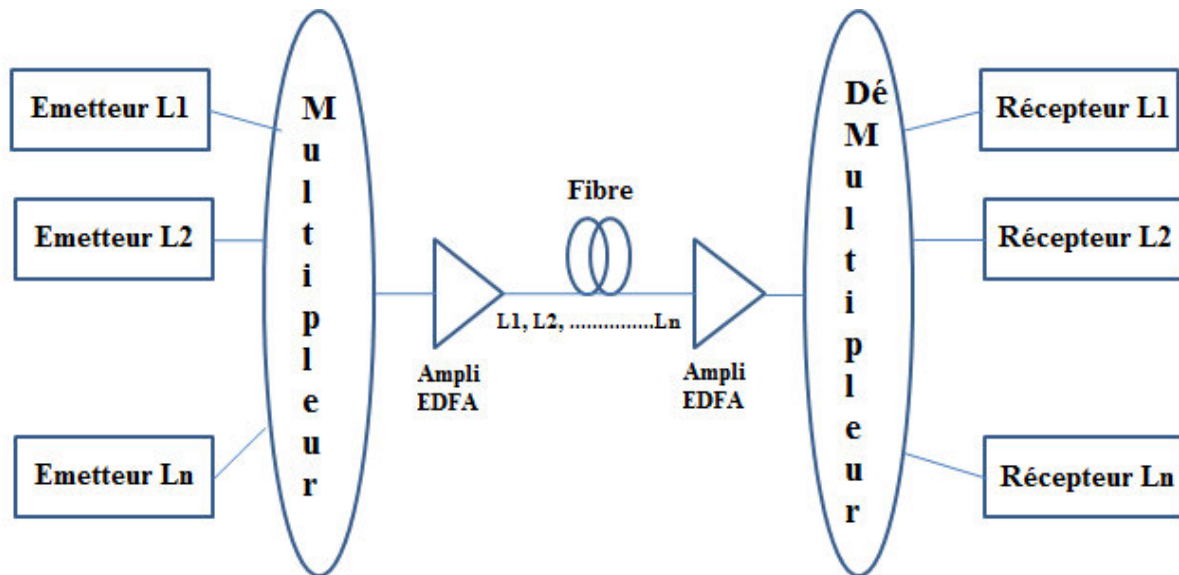


Figure 2.13 : Principe d'une liaison WDM/ DWDM.

Typiquement il s'agit de liaisons de 1 à 100Km mais la limite n'est pas stricte. Par exemple on peut considérer un réseau métropolitain comme un réseau qui dessert une grande ville et ses environs. Il s'agit de réseaux récents en constante évolution et croissance. Un réseau métropolitain doit être flexible et doit pouvoir fournir une forte capacité à tout client qui en fait la demande. Par exemple une Université pourra louer des canaux optiques de forte capacité dans n'importe quel format pour relier les différents bâtiments d'un campus. Les câbles comportent en général un. Les mêmes avantages que pour les systèmes à longue distance. Par contre les distances étant plus faibles on aura besoin de moins d'amplificateurs EDFA et réduit les problèmes de dispersion [10].

La technologie DWDM est dite dense (DWDM) lorsque l'espacement utilisé est égal ou inférieur à 100GHz. Des systèmes à 50GHz (0,4nm) et à 25GHz (0,2nm) permettent respectivement 80 et 160canaux optiques, ce qui, pour des espacements encore plus faibles, on parlera de U-DWDM (Ultra –Dense Wavelength Division multiplexing). Ainsi, des systèmes à 10 GHz(0,08nm) permettent d'obtenir 400canaux optiques.

Les systèmes WDM/ DWDM les plus commercialisés aujourd'hui comportent 8, 16, 32, 80 canaux optiques, ce qui permet d'atteindre des capacités de 80, 160, 320, 800Gb/s en prenant un débit nominal de 10Gb/s, on peut atteindre une capacité de 4000Gb/s (4Tera b/s) avec 400 canaux optiques à 10Gb/s, en technologie U-DWDM, un des composants clés du

WDM/ DWDM est l'amplificateur à fibre dopée erbium (EDFA) qui permet de compenser les pertes d'insertion dues aux multiplexage/ démultiplexage des longueurs d'onde.

Un système métropolitain DWDM typique dans utilisera la bande C avec des espacements entre canaux de 100GHz comprenant une trentaine de canaux à 2.48Gb.s^{-1} . Les nœuds seront constitués d'OADM et d'OXC. Beaucoup de composants optiques sont en train d'être adapté aux réseaux métropolitains. Par exemple les fibres optiques avec des pentes de dispersion plus faibles, inférieures à $0.05\text{ps. nm}^{-2}. \text{Km}^{-1}$, Permettent de limiter les variations de dispersion sur toute la bande spectrale. Des lasers accordables sont aussi intéressants pour ces applications [10].

Les topologies logiques (profils de trafic) des réseaux métropolitains diffèrent radicalement de celles des réseaux longue distance. Ces derniers correspondent pour l'essentiel à des lignes interurbaines point à point avec tout au plus un ou deux multiplexeurs d'insertion-extraction optiques (OADM) pour insérer et extraire le trafic en des points intermédiaires. Les réseaux métropolitains introduisent une infrastructure optique à haut degré de connectivité. Les anneaux métropolitains 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, à la différence, collectent en général le trafic de plusieurs nœuds pour le concentrer vers un nœud partagé avec un réseau métropolitain structurant.

La complexité de ce réseau ne se traduit pas uniquement par le haut degré de connectivité. A la différence des réseaux longue distance, les réseaux métropolitains doivent prendre en charge des formats, des protocoles et des débits de transmission très divers, mêlant les trafics de la hiérarchie numérique synchrone (SDH) ou du réseau optique synchrone (SONET) ou autres encore. Pour supporter cette diversité, ces réseaux sont souvent équipés de cartes transpondeurs multidébits universelles, acceptant n'importe quel débit de 100Mbits à 2,5Gbits/s, pouvant assurer ultérieurement le trafic à 10Gbits/s sans modification (exemple du récent réseau Alcatel 1696 Metro Span), et dans une transparence totale vis-à-vis de tous les formats et protocoles.

Dans ces réseaux intrinsèquement ouverts à n'importe quel type de signal, le multiplexage en longueur d'onde (WDM), dont une description ultérieure sera faite, trouve une application importante en luttant contre l'encombrement que cela peut procurer tout en réduisant le coût par service apporté. De la même manière, les amplificateurs optiques sont essentiels pour les applications de réseaux métropolitains structurants. Les pertes élevées dans la fibre (dues à l'interconnexion de courts tronçons de fibre) et le cumul des pertes associées aux transits tout optiques dans des nœuds successifs peuvent imposer en effet d'amplifier le signal optique. L'amplificateur optique peut représenter dans bien des cas une solution à moindre coût comparée à la régénération optique-électrique-optique [15].

2.7. Réseau d'accès optique

L'évolution du réseau d'accès vers l'optique est moins évidente. L'infrastructure en cuivre existante a représenté un investissement considérable. Les performances obtenues avec le Digital Subscriber Line DSL, sont satisfaisantes à l'heure actuelle.

La diversification des services offerts aux abonnés et l'augmentation de l'interactivité font que la demande au nouveau des terminaux domestique est en forte augmentation pouvant nécessiter l'emploi de fibre optique [10].

- Systèmes FTTB (Fiber To The Building) la fibre optique arrive au pied d'un immeuble d'affaire, il existe surtout dans les zones urbaines, ils s'intégreront dans les MAN, ce sont donc la fibre optique et la paire de cuivre qui sont utilisées pour que chaque abonné obtienne le très haut débit. Cette solution est moins coûteuse à mettre en œuvre mais elle ne permet pas d'ajuster facilement le débit.
- Systèmes FTTC (Fiber To The Curb) chaque nœud local possède un ADM qui prélève le signal optique sur une boucle utilisé aussi pour d'autres services. une fibre optique part du nœud local pour desservir un groupe d'utilisateurs.
- Systèmes FTTH (Fiber To The Home) devraient fournir une capacité beaucoup plus forte que les Systèmes DSL. Le problème est le cout des systèmes optiques une solution consiste en l'implantation de réseaux optiques passifs peu couteux, PON Passive Optical Network. Les progrès faits par les fibres optiques plastiques, en atténuation et en dispersion, devraient aussi aider au développement des réseaux optiques d'accès, il existe deux types :
 - Le FTTH dédié (point à point ou P2P) permet à chaque abonné de disposer de sa propre fibre de chez lui jusqu'au nœud de raccordement optique équipé par son fournisseur d'accès. Techniquement, c'est la solution la plus évolutive puisqu'il peut contrôler davantage les débits et augmenter si besoin la bande passante. Par contre, le FTTH dédié coûte plus cher et des barrières administratives peuvent gêner son déploiement.
 - Le FTTH partagé (point à multi-point ou GPON) est un dispositif différent. La fibre optique est partagée grâce à un répartiteur supplémentaire installé en amont, elle est divisée ensuite pour que chaque abonné obtienne le très haut débit. Cette solution est moins coûteuse à mettre en œuvre mais elle ne permet pas d'ajuster facilement le débit [14].

2.8. Le réseau d'interconnexion

2.8.1. Description générale

L'ossature du réseau interurbain est constituée dans sa partie « haute » par le réseau dit d'interconnexion dont les nœuds sont les très grands centres urbains (où sont localisés les principaux autocommutateurs) ainsi que les points de contact avec le réseau international (points frontières terrestres, stations terriennes de télécommunications par satellite, point d'arrivée des câbles sous-marins). Ce réseau a été équipé jusqu'au début des années 1990 avec des systèmes de transmission à 140Mbit/s sur câble coaxial et faisceaux hertziens, et 565Mbit/s sur câble coaxial. Aujourd'hui, il existe en fait deux réseaux d'interconnexion en

parallèle, l'un en câble coaxial et faisceaux hertziens, l'autre en fibre optique. Dans chacun des pôles de RIC se trouvent deux nœuds, un pour chacun des deux réseaux.

Dans le futur, les deux réseaux doivent se confondre et tous ces nœuds seront reliés entre eux par des systèmes de transmission à $1,55\mu\text{m}$ sur fibre standard (type G652 présentant une dispersion chromatique typique de $17\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ autour de $1,55\mu\text{m}$) avec un débit de $2,5\text{Gbit/s}$ (16 STM-1 à 155Mbit/s) comportant des répéteurs-régénérateurs avec un pas maximal de 94 km, dont l'installation a déjà commencé.

Cependant dans chacun des pôles subsisteront deux nœuds, pour des raisons de sécurité. L'évolution du réseau s'accompagnera d'une diminution du nombre de nœuds du réseau interurbain, en raison de l'introduction d'autocommutateurs à très grandes capacités et d'une augmentation corrélative de la taille des réseaux de transmission locaux. L'objectif final est un réseau comportant 20 pôles dits principaux et 25 pôles dits secondaires.

Compte tenu de son importance, le réseau d'interconnexion est très fortement sécurisé : il faut en effet se prémunir contre deux types de problèmes. D'abord, il faut prévoir le cas de défaillance d'un système de transmission : c'est la fonction de protection du système. Ensuite il faut permettre l'acheminement du trafic par un autre itinéraire en cas de coupure d'une artère du réseau : c'est la fonction de protection du réseau [9].

2.8.2. La protection des systèmes

Plusieurs principes de protection des systèmes sont envisageables. Dans la technique dite « un pour un », à côté de chaque système de transmission existe un système de secours qui peut être utilisé dans les conditions normales pour assurer un trafic non prioritaire. En cas de défaillance du premier système, une communication au niveau électrique envoie les signaux modulants vers l'émetteur optique du système de secours qui prend en charge le trafic et abandonne bien sûr l'acheminement du trafic non prioritaire. Cette technique peut être généralisée sous la forme « un pour N », avec un système de secours pour N systèmes, N étant habituellement égal à 4 ou 5. Dans la technique dite « un plus un », le signal à transmettre est envoyé en permanence sur deux émetteurs à la fois et le meilleur des deux signaux reçus est sélectionné en réception.

Le choix entre les techniques de multiplexage sur la fibre (multiplexage en longueur d'onde ou multiplexage temporel) est encore ouvert. Petit à petit des fibres transportant une seule longueur d'onde vont être équipées avec des systèmes en « un pour trois », « un pour quatre » ou « un pour cinq ». La technique pour transmettre N trains STM-16 pourra être le multiplexage en longueur d'onde ou le multiplexage temporel [9].

2.8.3. La protection du réseau

La protection du réseau est assurée par des équipements appelés répartiteurs placés dans les nœuds du réseau. Le répartiteur est un équipement à N entrées et N sorties, capable de relier chacune de ses entrées à chacune de ses sorties.

Aujourd'hui les répartiteurs en cours de développement, qui sont électronique, assurent le réarrangement au niveau des trains à 140 ou 155Mbit/s : un répartiteur $N \times N$ (N allant de 64 à 512 selon l'importance du nœud) recevant par exemple N trains numérique peut réaliser une correspondance entre ses entrées et se sorties qui permettra d'envoyer le train arrivé sur l'entrée i vers la sortie j . Dans l'hypothèse de systèmes de transmission à très haut débit (2,5 voire 10Gbit/s), le fait de travailler avec les trains à 140Mbit/s conduit à des répartiteurs extrêmement complexes et coûteux. Dans l'avenir, on peut imaginer que cette fonction de répartition soit assurée par des répartiteurs optiques qui commuteraient alors des porteuses optiques modulées au lieu de signaux électriques. C'est pourquoi sont aujourd'hui étudiés des répartiteurs optiques capables de travailler directement avec les trains STM-16 par exemple. On pourrait alors imaginer de réaliser la connexion entre une fibre arrivant sur une entrée et la fibre partant d'une autre sortie sans avoir besoin de revenir au niveau de 155Mbit/s.

Grâce à la possibilité de reconfiguration offerte par le répartiteur, il devient possible en cas de coupure d'un câble d'acheminer le trafic par un autre itinéraire qui est calculé compte tenu de la topologie du réseau [9].

2.8.3.1. Les réseaux de transmission locaux

Sur chacun des réseaux sectoriels se greffent des réseaux de transmission locaux, encore appelés «réseaux intra ZAA » (Zone à Autonomie d'Acheminement). L'introduction de l'optique dans le réseau de transmission local s'est faite depuis déjà une dizaine d'années. Les premiers systèmes transportant un débit de 34 Mbit/s et utilisant la fibre multimodale à $0,8\mu\text{m}$ ont été installés en 1982. Ils permettaient déjà d'augmenter considérablement la distance entre répéteurs (quelques dizaines de kilomètres) par rapport aux systèmes sur câble coaxial (typiquement 2 à 4km), ce qui, compte tenu des distances à couvrir, permettait dans un très grand nombre de cas des liaisons sans répéteurs. C'était un avantage considérable, car on économisait ainsi le coût du répéteur et l'on évitait les contraintes liées à sa surveillance et à la téléalimentation.

A partir de 1988, la fibre monomodale utilisée à la longueur d'onde de $1,3\mu\text{m}$ supplanta définitivement la fibre multimodale. Des systèmes à 2, 8, 34 et 140Mbit/s utilisant des diodes laser en émission et des photodiodes à avalanche en réception pour améliorer la sensibilité du récepteur furent alors développés et installés [9].

2.8.3.1.1. Structure du futur réseau de transmission local

Le bilan économique et la capacité des systèmes, comme dans le cas du réseau interurbain, incitent à l'installation de systèmes optiques, la technique hertzienne gardant toutefois un intérêt dans les zones difficiles. La hiérarchie numérique synchrone conduit à redéfinir également la structure du réseau régional qui sera constitué d'anneaux comme le réseau sectoriel. Chacun de ces réseaux est alimenté par deux nœuds interurbains de desserte (NID) placés sur la boucle du réseau sectoriel le réseau intra ZAA, le doublage des NID s'expliquant encore une fois par des impératifs de sécurité. On distingue dans le réseau de

transmission local deux niveaux, le réseau de jonction, directement en contact avec le réseau sectoriel et le réseau de desserte.

Comme les capacités requises sont plus faibles que dans le réseau sectoriel, les anneaux du réseau de transmission local, dont l'installation débute en 1994, acheminent un débit de 155 ou 4 x 155 Mbit/s, à la longueur d'onde de 1,3 μ m (1,55 μ m dans l'avenir). Des multiplexeurs d'insertion-extraction permettant d'insérer ou extraire des trains à 2 et 34Mbit/s dans le premier cas, 2, 34, 140 ou 155Mbit/s dans le second cas seront installés dans ces anneaux. L'espacement prévu entre deux MIE est de 45km à 1,3 μ m et sera de 80km à 1,55 μ m [9].

2.8.3.2. Les réseaux sectoriels

Les réseaux sectoriels constituent, à l'intérieur du réseau interurbain, la partie «basse » du réseau d'interconnexion. Ils seront équipés de systèmes de transmission avec une capacité de 16 x STM-1. La sécurisation y est assurée par la topologie elle-même, à base d'anneaux. Un anneau (figure 2.14) est constitué par deux fibres optiques, une pour chaque sens de transmission. Dans chaque nœud, un équipement appelé multiplexeur d'insertion-extraction (MIE ou Add and Drop multiplexer ADM en anglo-américain) permet d'insérer ou de prélever un train numérique. [9]

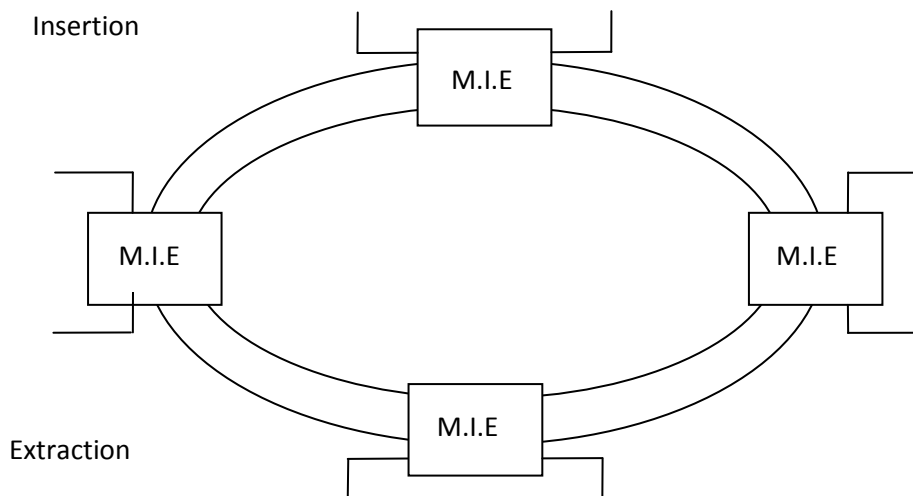


Figure 2.14: Schéma d'un anneau.

MIE : Multiplexeur d'Insertion-Extraction.

Les réseaux sectoriels seront équipés majoritairement d'anneaux à 2,5Gbit/s reliant les nœuds du réseau d'interconnexion aux autres villes importantes. Chaque réseau sectoriel est desservi par un pôle du réseau d'interconnexion grâce à un anneau qui, pour des réseaux de sécurisation, passe par les deux nœuds du pôle. Les multiplexeurs d'insertion-extraction installés dans ces anneaux sont capables d'insérer ou d'extraire des trains à 140 et 155Mbit/s. Comme les répartiteurs du réseau d'interconnexion, les multiplexeurs d'insertion-extraction de première génération seront des équipements électroniques. Dans le futur, des multiplexeurs d'insertion-extraction optiques sont envisagés : les fibres de l'anneau transmettent plusieurs

longueurs d'onde (anneau « multicolore ») et les MIE prélèvent ou insèrent des porteuses optiques modulées.

Dans les conditions normales, chaque nœuds reçoit le même signal par chacune des deux fibres et choisit le meilleur. Si l'un des câbles est coupé, le trafic continue à parvenir au nœud par l'autre. Il faut remarquer que la structure en anneau n'est en rien spécifique de l'optique : il est d'ailleurs prévu que certaines portions de boucles pourront être équipées de faisceaux hertziens, lorsque les conditions locales rendent la transmission radioélectrique plus intéressante que la transmission par câble (terrain difficile par exemple) [9].

Les multiplexeurs insertion-extraction (add-drop) sont utilisés pour réaliser les fonctions de transmission suivante (voir la figure 2.15) :

- Transfert du signal numérique synchrone de ligne entre ses accès 'Ouest' et 'Est'.
- Dérivation : insertion /extraction de signaux numérique plésiochrones et/ou synchrones dans le signal numérique synchrone présent à ses accès 'Ouest' et/ou 'Est'.
- Des fonctions de brassage de VC12 ont été introduites dans le MIE

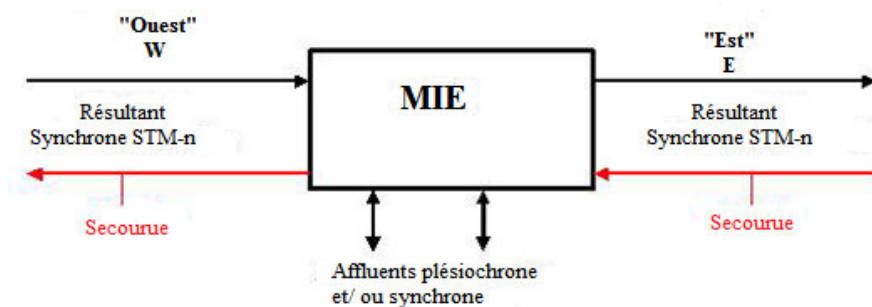


Figure 2.15 : Le multiplexeur MIE.

Le MIE contient la fonction de régénération qui permet la remise en forme uniquement par régénération du signal électrique et une surveillance de la section de la régénération. Pour de longue distance on installe un MIE sans cartes affluents pour régénérer le signal.

L'un des inconvénients majeurs du MIE est le nombre insuffisant d'accès à 2Mbit/s au niveau du châssis MIE alors que ce débit est le plus demandé, c'est pour cela que l'on utilise des MTS [12].

2.9. Conclusion

L'évolution des communications optiques a permis aux réseaux de télécommunications d'atteindre un niveau de performance extraordinaire et a grand ouvert les portes devant l'apparition de nouvelles disciplines qui visent l'amélioration de l'existence et la création de nouveaux dispositifs pour la transmission et le traitement du signal optique. La rapidité et l'importance des progrès réalisés dans le domaine des télécommunications entraînent de véritables bouleversements dans les structures des systèmes de transmission.

Nous avons parlé dans ce chapitre sur les différents réseaux existants, sur les topologies existants ainsi que les réseaux d'accès optique.

Nous avons définie dans ce chapitre les différents réseaux existant ainsi que les différents topologie, hiérarchie numérique PDH et SDH , les réseaux sous-marin , les réseaux terrestres , les réseaux d'accès et le multiplexeur insertion extraction .dans le chapitre suivant nous allons détailler plus les réseaux en anneau insertion extraction(MIE) qui sont la base de notre simulation.

Chapitre 3

Etude d'un réseau optique en anneau

3.1. Introduction

Le développement des télécommunications par fibre optique a multiplié les architectures des réseaux, les techniques de codage et les composants disponibles. La conception des systèmes associés est de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances de la liaison est important. Aussi, les outils de simulation constituent une assistance de plus en plus utilisés pour aider à trouver rapidement des solutions, aussi bien au niveau du composant qu'au niveau du système.

Cependant, contrairement à l'électronique et aux micro-ondes, il n'existe pas d'outils standards et bien admis dans le domaine des transmissions optiques. Il est apparu, récemment, sur le marché, un certain nombre de logiciels permettant la simulation de systèmes de communications optiques.

Ce chapitre est composé de trois parties :

- Présentation du logiciel de simulation (OptiSystem).
- Etude du réseau optique en anneau, qui est composé de la fibre monomode et amplificateur optique à fibre dopée en erbium
- Variation des paramètres du réseau, présentation des résultats de simulation avec interprétations et détermination des meilleurs paramètres possibles, comme le nombre de terminaux, la puissance émise et le débit de transmission.

3.2. Description de l'outil de simulation

OptiSystem, est un logiciel de conception, de tests et d'optimisation de n'importe quel type de liaison optique dans la couche physique d'un vaste spectre de réseaux optiques (MAN et WAN). Un niveau de système simulateur basé sur la modélisation réaliste des systèmes de communication par fibre optique, OptiSystem possède un environnement de simulation puissant et une définition vraiment hiérarchique de composants et systèmes. Ses capacités peuvent être facilement élargies avec l'ajout de l'utilisateur de composants et d'interfaces continu à une gamme d'outils largement utilisés [1].

Une interface utilisateur graphique complète contrôle la disposition de composants optiques, des modèles et graphiques de présentation. La bibliothèque des composants OptiSystem comprend des centaines de composants qui nous permettent de saisir les paramètres qui peuvent être mesurés à partir de dispositifs réels. Les utilisateurs peuvent incorporer de nouveaux composants basés sur des sous-systèmes définis par l'utilisateur des bibliothèques.

OptiSystem manipule des formats de messages mélangés pour les signaux optiques et électriques dans la bibliothèque composante.

Pour répondre aux besoins des chercheurs, ingénieurs télécoms optiques, des intégrateurs systèmes, des étudiants et une grande variété d'autres utilisateurs, OptiSystem satisfait à la demande d'évolution du marché de la photonique, c'est un outil puissant et facile à utiliser pour les systèmes optiques de conception [1].

C'est une application Xwindows, elle comprend essentiellement une fenêtre principale réparti en plusieurs parties (voir la figure 3.1) :

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

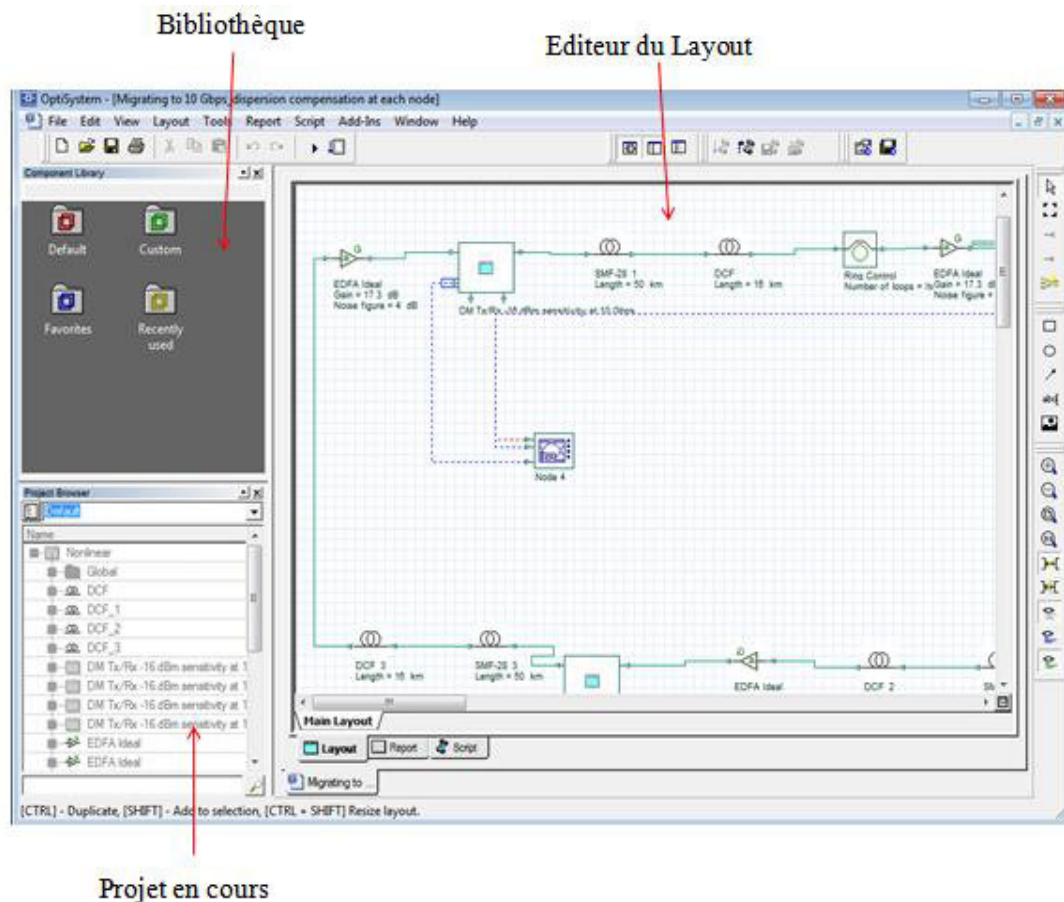


Figure 3.1 : Les fenêtres dans OptiSystem.

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

La figure 3.2 représente un exemple d'un composant optique de la bibliothèque d'OptiSystem, qui est dans notre cas une fibre monomode avec tous ces paramètres.

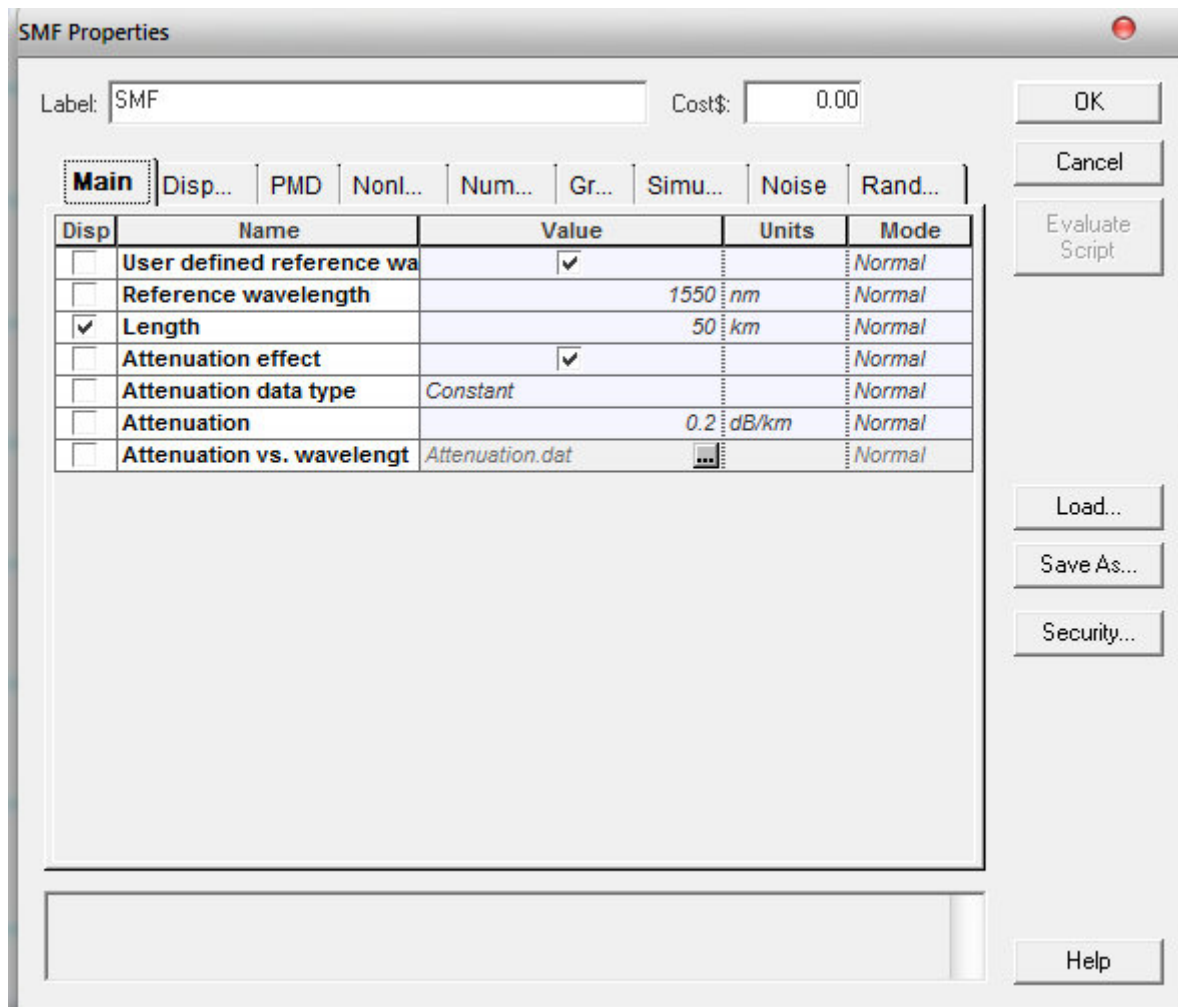


Figure3.2 : Paramètres d'une fibre monomode.

3.2.1. Avantages du logiciel

- Fournir un aperçu de performances du système mondial de fibres optiques.
- Evaluer les sensibilités des paramètres aidant aux spécifications de tolérance de conception.
- Présenter visuellement les options de conception à des clients potentiels.
- Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation approfondie du système.
- Fournir le balayage automatique des paramètres et d'optimisation.

OptiSystem permet l'automatisation et la conception de pratiquement n'importe quelle liaison optique dans la couche physique et analyse un large éventail de réseaux optiques. OptiSystem permet aux utilisateurs de planifier, tester et simuler :

- WDM/ TDM ou la conception du réseau CATV (CableTelevision).
- Conception d'anneaux SONET/ SDH.
- Conception de cartes de dispersion.
- Estimation des pénalités BER des systèmes avec différents modèles de récepteurs [1].

3.3. Présentation du réseau optique

Dans cette thèse, notre objectif est de concevoir un réseau en anneau. Réseau métro en topologie en anneau sont censés avoir des modèles de trafic plus dynamiques comparés à la plupart des réseaux long-courriers. Ils sont également censés avoir des nœuds optiquement transparents avec un nombre minimum de régénérations de puissance optique qui peuvent résulter de plusieurs facteurs :

- Perte dépendant de la longueur d'onde à fibre.
- Gain dépendant de la longueur d'onde dans les amplificateurs.
- La variation des pertes d'insertion canal à canal dans multiplexeurs/ démultiplexeurs.

Ces dégradation optiques s'accumulent le long de la fibre jusqu'à atteindre la fin de la liaison optique, en raison de la nature dynamique du réseau.

Les OADM introduisent une perte d'insertion qui contient deux parties : déterministes et aléatoires. En fait, la perte varie en fonction de la longueur d'onde. La perte de la fibre dépend du type de fibre et la longueur d'onde. La variation des types de commutateurs optiques et différentes longueurs de chemin dans le réseau se traduit par une perte aléatoire, ce qui est difficile à prédire.

3.3.1. Effet de l'EDFA sur le réseau

La figure 3.4 résume le schéma du premier système utilisé dans cette thèse, c'est un réseau en anneau, constitué de quatre terminaux, reliés par des fibres optiques ayant une atténuation de 0.25dB/km, une longueur d'onde de 1550nm et une longueur de 50km, sans autres composants optiques, avec un amplificateur de gain égal à 53dB placé juste à la sortie du terminal T2, et un analyseur TEB placé entre 2 terminaux qui nous donne les valeurs du facteur de qualité et du taux d'erreur binaire.

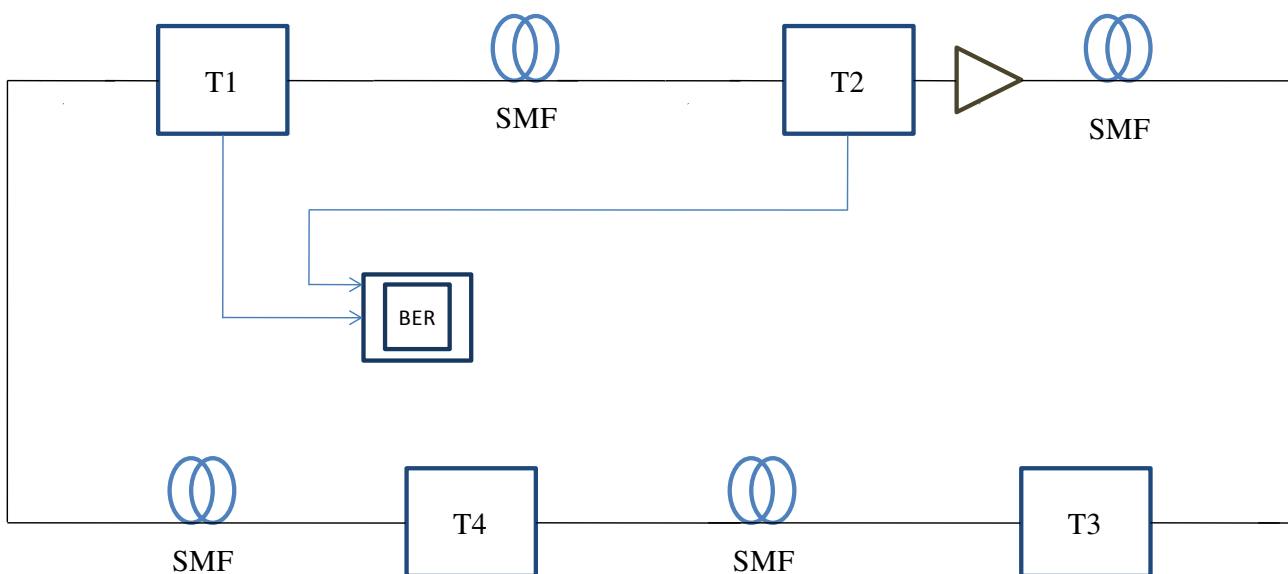


Figure3.3 : Liaison en anneau du premier système.

La figure 3.4 présente en détail chaque terminal.

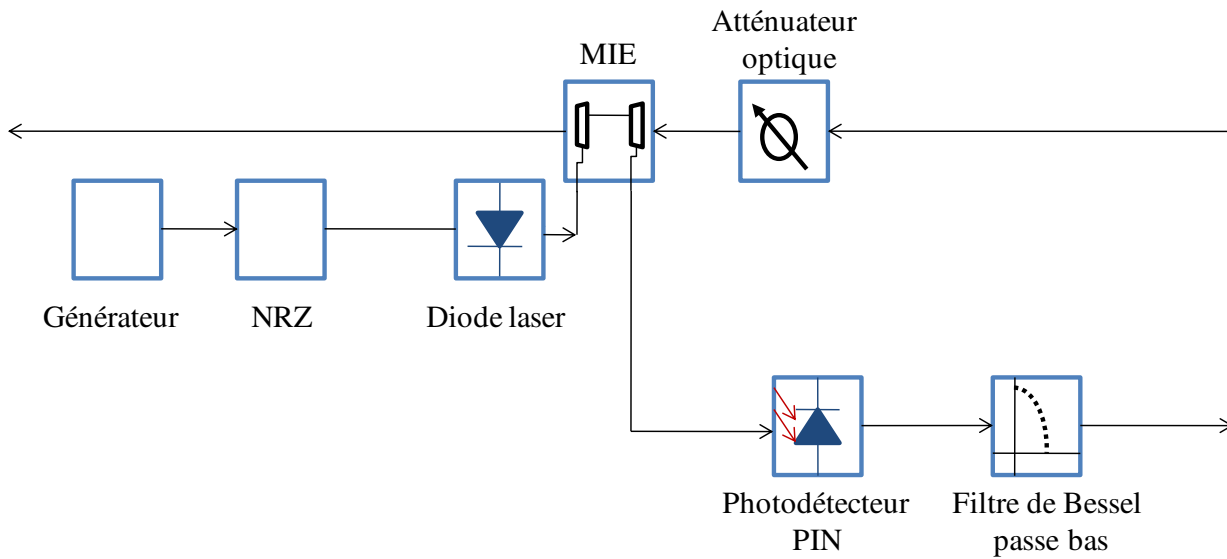


Figure3.4 : Présentation du terminal.

La plupart des composants du terminal sont définis au paravent, par exemple la fibre optique monomode (SMF : Signal Mode Fiber) a été présentée dans la partie (1.2.3.6.2), la fibre compensatrice de dispersion dans la partie (1.2.4.2), la diode laser dans la partie(1.2.1.2) avec une fréquence de 193.1THz et enfin le multiplexeur MIE qui a été présenté dans la partie(2.8.3.2). Il reste à définir les composants générateurs binaires, codeur NZR, atténuateur optique et filtre de Bessel.

3.3.1.1. Générateur binaire

C'est un générateur qui produit une suite de longueur connue, de « 0 » et de « 1 » logiques. Il est dit aléatoire car c'est une suite arbitraire. Cependant, lorsque la suite arrive à son terme, le générateur ne s'arrête pas de fonctionner. La séquence déjà transmise est à nouveau reproduite, d'où le qualificatif de pseudo-aléatoire, le débit utilisé est de 2,5Gbit/s[18].

3.3.1.2. Générateur NRZ

Dans le générateur NRZ, la donnée binaire « 1 » est associée à une impulsion optique de durée sensiblement égale au temps symbole (inverse du débit), la donnée « 0 » est associée à l'absence de signal. En pratique on n'a pas une absence totale de signal puisque le taux d'extinction n'est jamais infini [18].

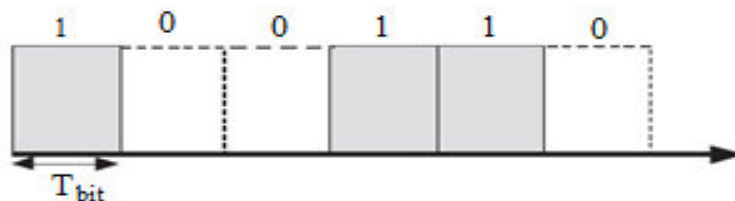


Figure3.5 : Format NRZ.

3.3.1.3. Filtre de Bessel passe bas

Le filtre de Bessel est un filtre polynômial « tout pôle » d'ordre supérieur dont la caractéristique principale est d'offrir un délai constant en bande passante. Concrètement, cela signifie que toutes les fréquences pures, en bande, le traversent en un temps rigoureusement égal. Le filtre de Bessel permet donc de minimiser la distorsion que subit un signal complexe lors d'une opération de filtrage. La fréquence de coupure de ce filtre est de 0,75Hz [20].

3.3.1.4. Atténuateur optique

L'atténuateur est un dispositif permettant de diminuer l'amplitude et l'énergie d'un signal à travers le medium (courant, tension ou plus souvent puissance), il provoque une atténuation importante dans les télécommunications. L'atténuation est de 3.8dB.

3.3.1.5. Résultat de simulation

Le travail que nous allons effectuer consiste principalement à faire varier les paramètres du réseau, comme la longueur de la fibre monomode, le débit, le nombre de terminaux et la puissance émise et de juger la qualité de la liaison.

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

3.3.1.5.1. Qualité de transmission d'une liaison

Pour définir la qualité d'une transmission optique, différents critères existent. Les deux principaux critères de qualité d'un signal transmis sont le taux d'erreur binaire BER et le facteur de qualité Q. Ces deux critères sont décrits dans la suite [18].

a) Le Taux d'Erreur Binaire (TEB)

Le taux d'erreur binaire s'exprime en puissance négative. La méthode, pour évaluer les performances d'un système, consiste à comparer les bits envoyés avec les bits reçus [19].

$$TEB = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombres de bits transmis}} \quad (3.1)$$

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

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

Le TEB habituellement accepté pour une transmission de bonne qualité est inférieur à 10^{-9} voir inférieur à 10^{-12} [18].

b) Le Facteur de Qualité

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

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

$$Q = \frac{(V_1 - V_0)}{(\sigma_1 - \sigma_0)} \quad (3.2)$$

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

On aura :

$$Q = \frac{(V_1 - V_0)}{2\sigma} = \frac{(V_T - V_0)}{\sigma} \quad (3.3)$$

Un autre paramètre utilisé pour quantifier la qualité de transmission est le facteur Q qui est relié au TEB par la formule suivante [18]:

$$\text{TEB} = \frac{1}{2} \left[\text{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (3.4)$$

Où erfc est la fonction d'erreur complémentaire.

En utilisant un format NRZ, un débit de 2,5Gbit/s, on aura le facteur de qualité, ainsi que le taux d'erreur binaire en fonction de la longueur du SMF présenté sur la figure 3.6.

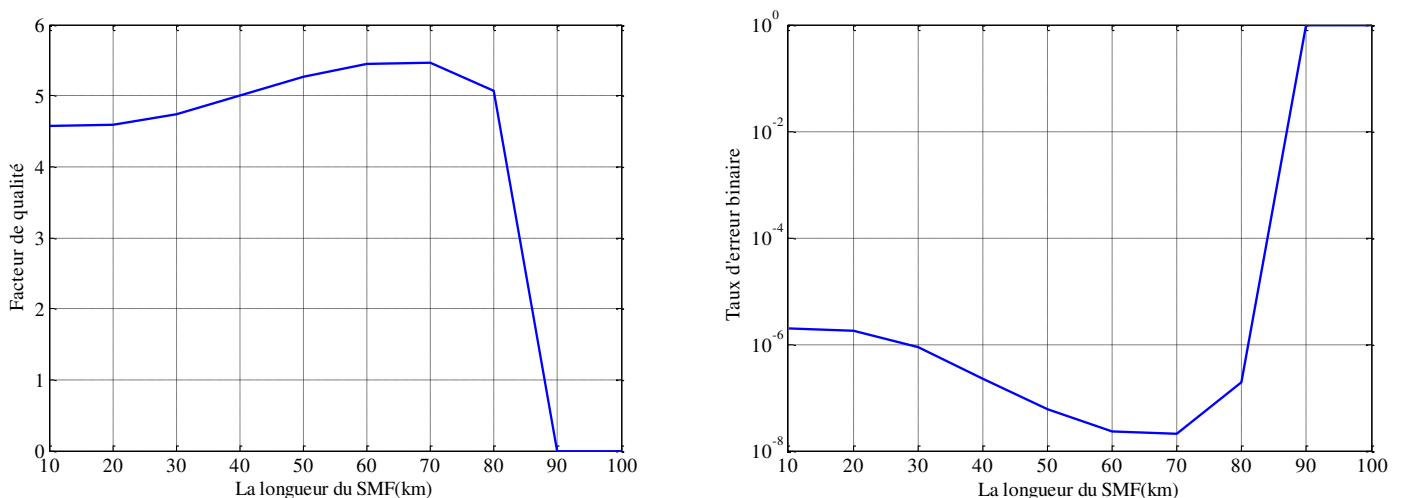


Figure 3.6 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction de la longueur de la fibre.

On note une amélioration de la qualité de transmission en augmentant la longueur de SMF, jusqu'à la longueur 80Km ou on note une dégradation avec un $TEB=10^{-7}$ et $Q=5$, pour ce qui est de la meilleure qualité de transmission, on l'obtient avec $L_{SMF}=70$ Km avec un $TEB \approx 10^{-8}$ et $Q=5,4$, les résultats ne sont pas satisfaisant, car on n'a pas atteint l'objectif 10^{-10} , et on est obligé d'apporter des changements à ce réseau pour atteindre l'objectif fixé.

Pour confirmer ces changements, on a effectué une autre étude, qui est la qualité de transmission en fonction du débit, pour $L_{SMF}=50$ Km, les résultats sont présentés sur la figure 3.8.

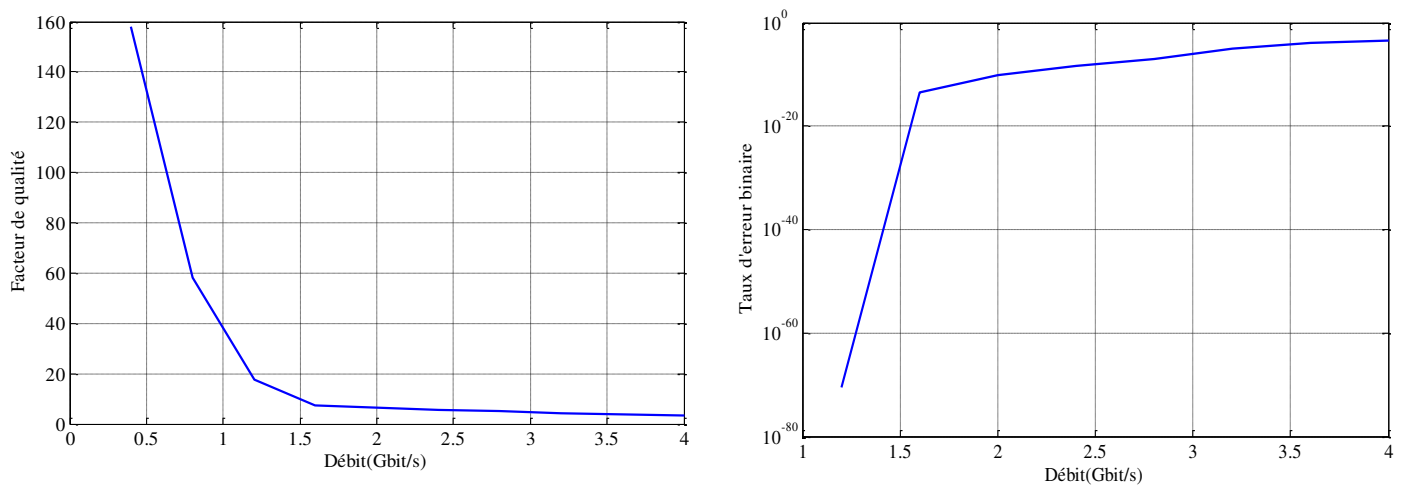


Figure 3.7 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction du débit.

Malgré le fait qu'on obtient un meilleur TEB avec 10^{-70} pour un débit de 1.2Gbit/s reste que la liaison peut être améliorée, dans ce sens on va tester une autre configuration par la suite.

3.3.2. Introduction de l'EDFA au système

La figure 3.8 schématise la nouvelle configuration du réseau avec l'ajout de deux amplificateurs EDFA, permettant ainsi de compenser les pertes des 4 terminaux, tout en gardant les mêmes paramètres des autres composants utilisés du premier système.

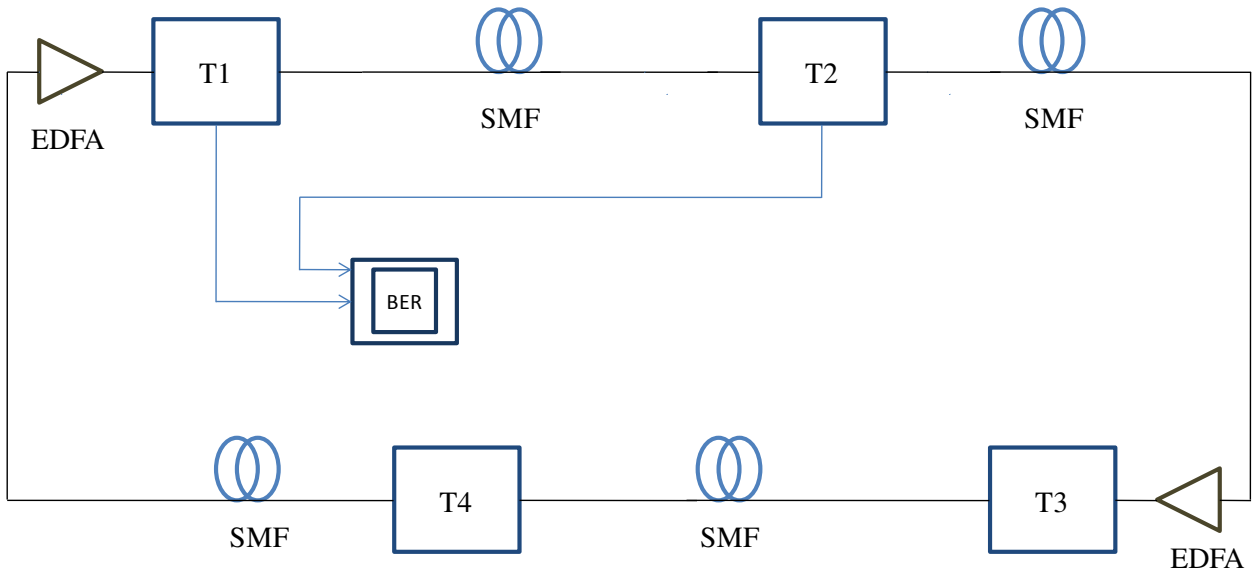


Figure 3.8 : Liaison en anneau du deuxième système.

Dans un premier temps on va faire varier la longueur de la fibre monomode entre deux terminaux consécutifs (figure 3.9) en suite on fait varié le débit et on va juger de la qualité du réseau, pour voir l'effet des amplificateurs EDFA.

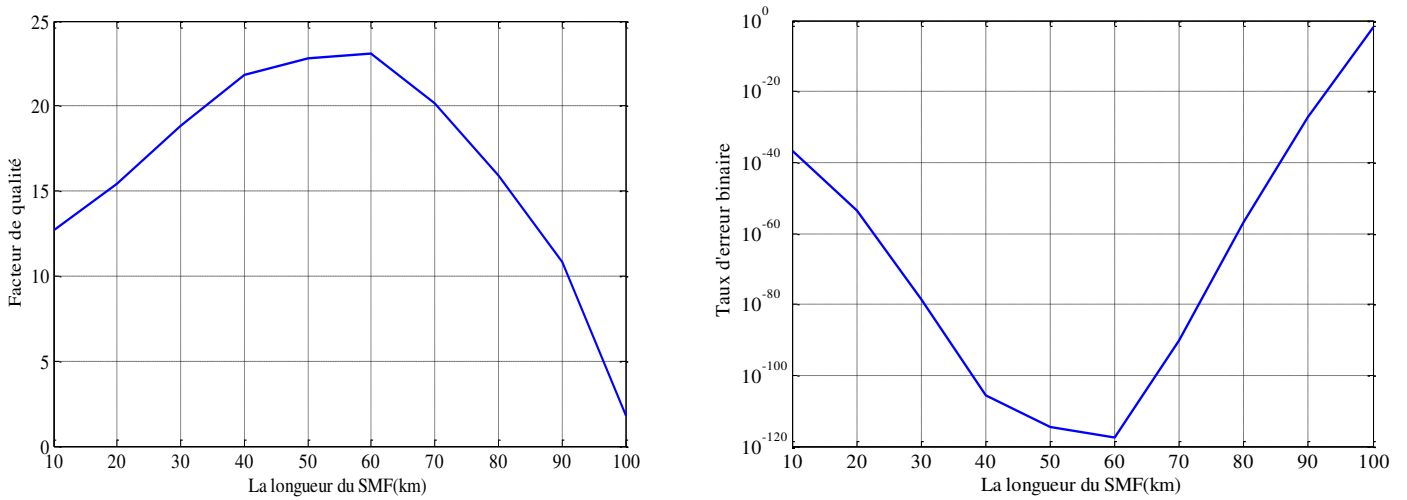


Figure 3.9 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction de la longueur de la fibre.

On note sur la figure ci-dessus que le meilleur résultat ($Q=23.1$, $TEB=10^{-118}$) est pour une longueur de la fibre de 60 km, on note aussi qu'au-delà de 90 km, la qualité de la liaison se dégrade considérablement avec un $TEB > 10^{-10}$.

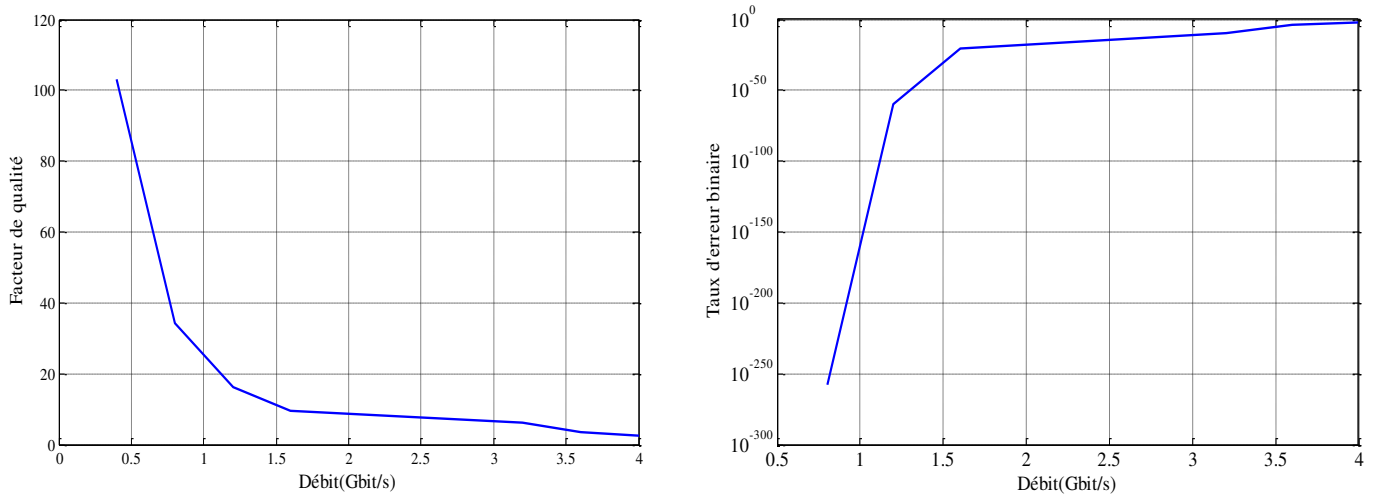


Figure 3.10 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction du débit.

On note une chute du facteur de qualité qui est inversement proportionnel au débit et une augmentation du TEB, peut atteindre un débit maximal de 2,5Gbit/s pour une bonne qualité du signal reçu ($TEB=10^{-10}$).

On va comparer cette configuration avec la première configuration, les résultats sont présentés sur les figures 3.11, 3.12, 3.13 et 3.14.

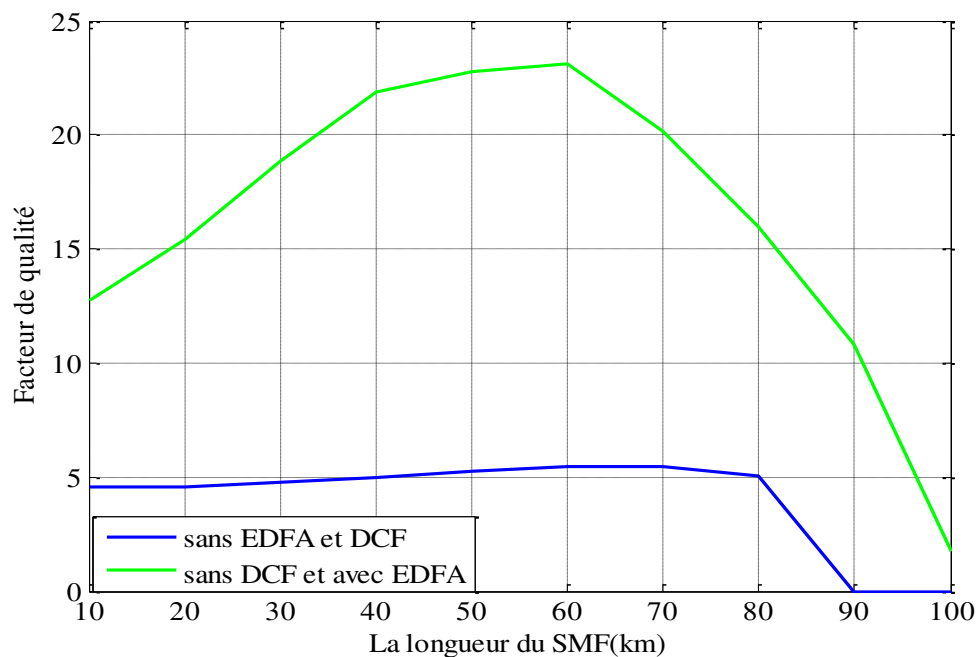


Figure 3.11 : Facteur de qualité Q en fonction de la longueur de la fibre.

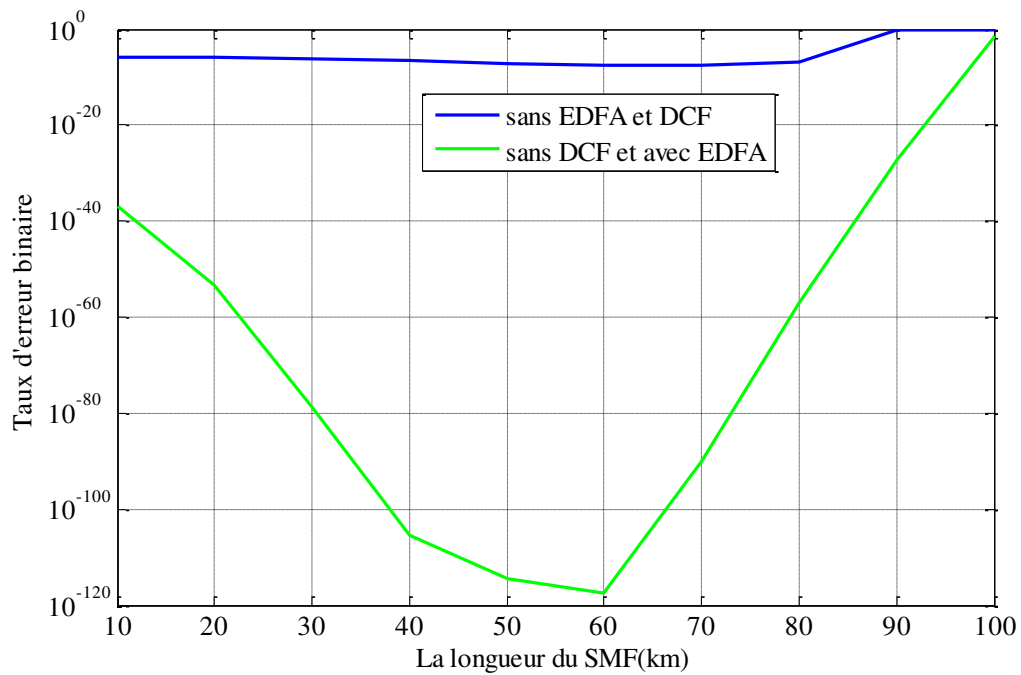


Figure 3.12 : Taux d'erreur binaire TEB en fonction de la longueur de la fibre.

Les deux première courbes montrent un clair avantage pour le deuxième système avec des taux d'erreur de 10^{-120} .

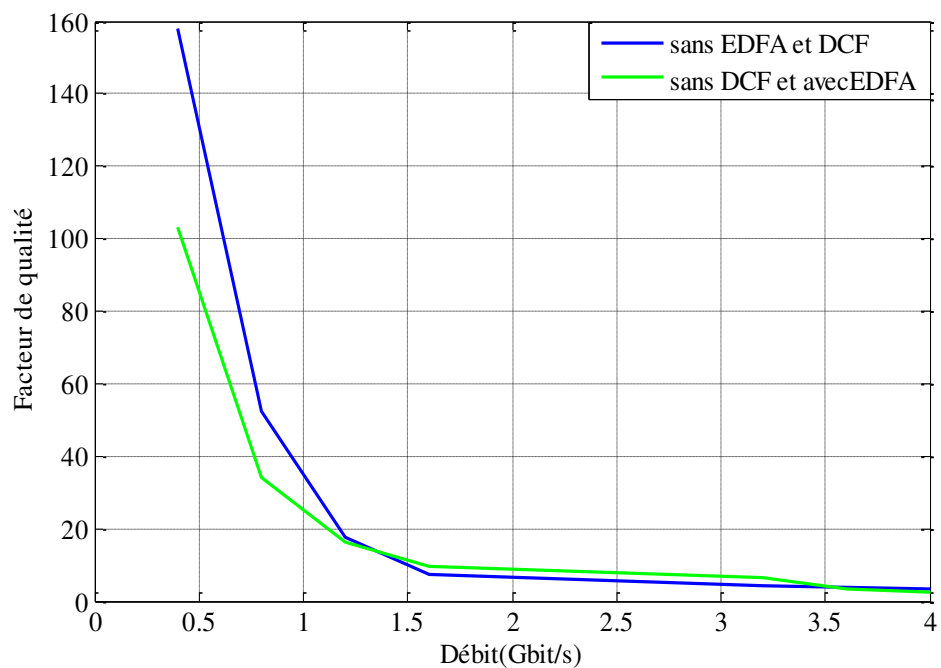


Figure 3.13 : Facteur de qualité Q en fonction du débit.

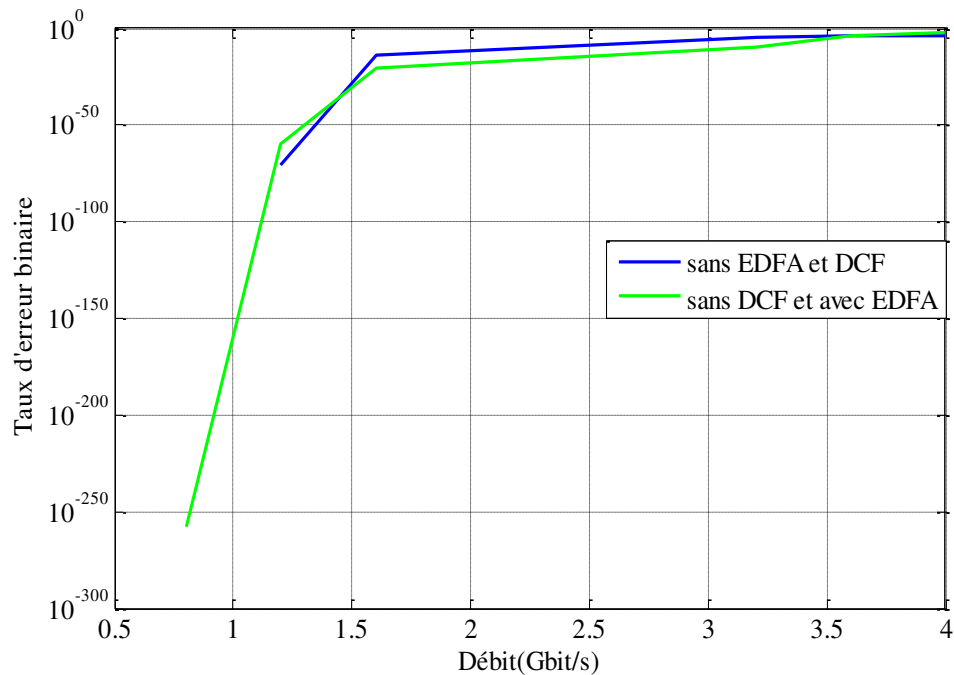


Figure 3.14 : Taux d'erreur binaire TEB en fonction du débit.

D'après les figures 3.13 et 3.14, concerne le bas débit (<1,2Gbit/s) ou on a un meilleur résultat pour le premier système, par contre dès que le débit devient important, le deuxième système est légèrement meilleur, on peut dire donc que l'EDFA à améliorer le système en terme de débit et de distance on va essayer d'introduire une fibre compensatrice de dispersion dans le système et voir son effet.

3.3.3. Introduction de la DCF et l'EDFA

La figure 3.15 schématise une autre configuration du réseau avec l'ajout de deux autre amplificateurs pour donner quatre en tout, et de quatre DCF. Entre deux terminaux consécutifs on trouve une fibre optique SMF, un amplificateur EDFA et enfin une fibre DCF.

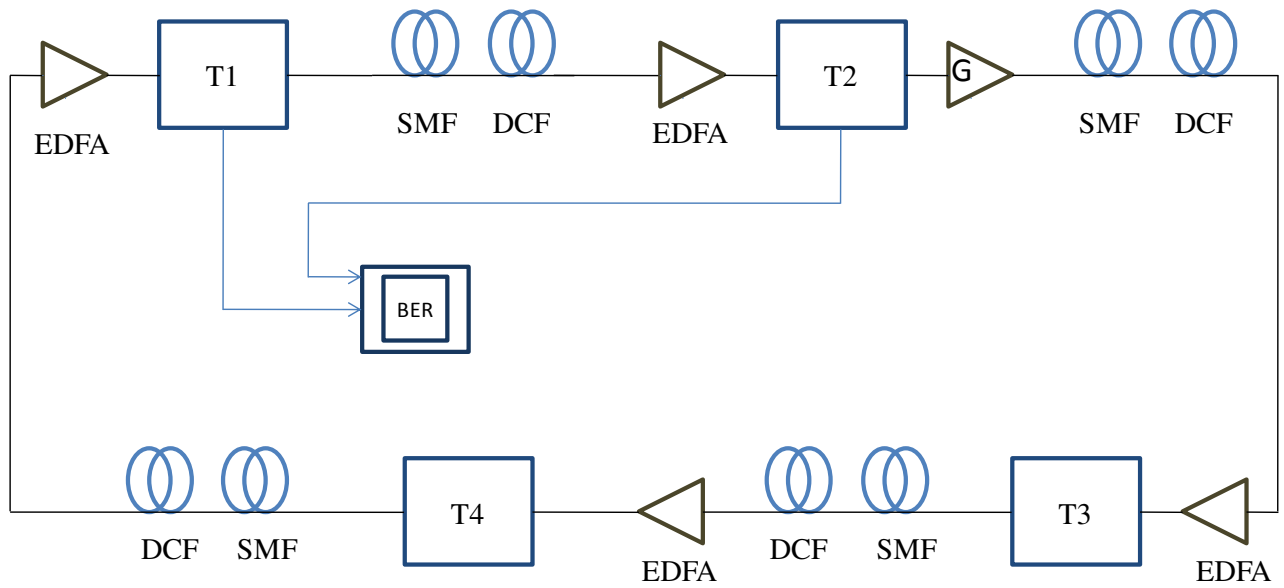


Figure3.15 : Liaison en anneau du troisième système.

En fixant le débit à 2,5Gbit/s et en variant la longueur de la fibre SMF on obtient le tracé de la figure 3.16.

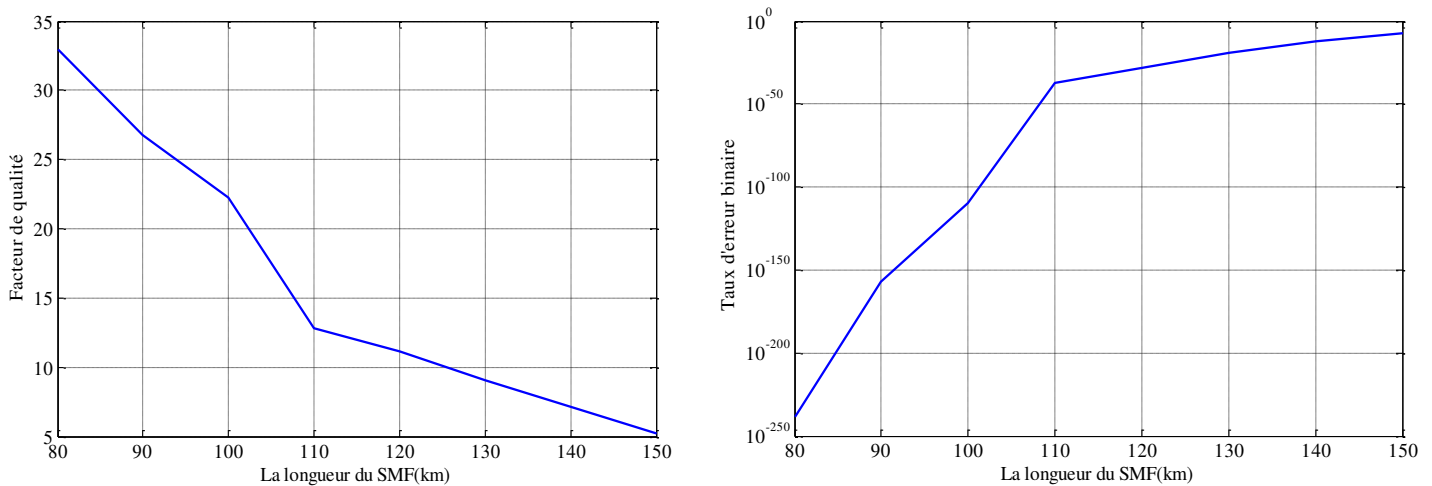


Figure 3.16 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction de la longueur de la fibre.

La figure 3.16 illustre de manière simple l'effet de la longueur de la liaison sur la qualité du signal, de ce fait plus on augmente la longueur plus le facteur de qualité diminue et le TEB augmente. la distance maximal avec le débit de 2,5Gbit/s est de 150km.

La figure 3.17 présente le changement de débit en fixant la longueur de la fibre SMF à 50km.

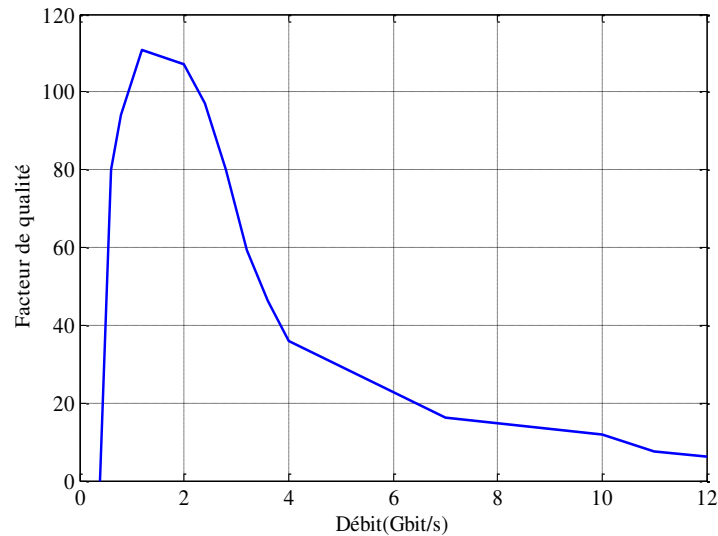


Figure 3.17 : Facteur de qualité Q en fonction du débit.

D'après la figure 3.17 on remarque une augmentation du facteur de qualité jusqu'à un débit de 1,2Gb/s, ensuite il y a une dégradation du facteur. Le débit maximal est atteint pour 11Gb/s, dans ce cas le facteur de qualité est de l'ordre de 7.

Dans la partie suivante nous allons comparer entre les trois configurations (figures 3.18, 3.19, 3.20 et 3.21).

Les deux premières figures (3.18 et 3.19) présente l'effet de la variation de la longueur de la fibre SMF sur la qualité de transmission.

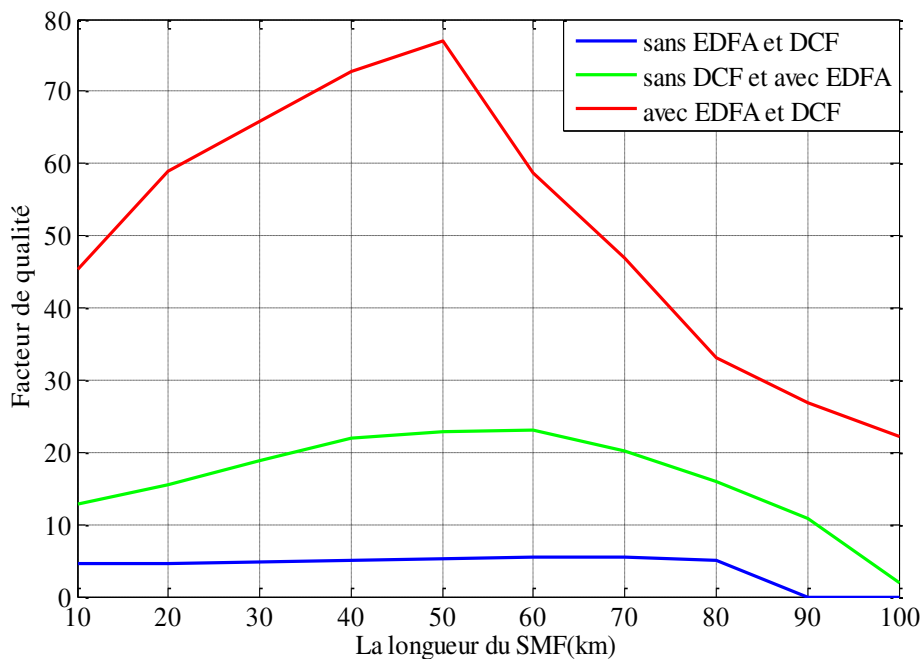


Figure 3.18 : Facteur de qualité Q en fonction de la longueur de la fibre.

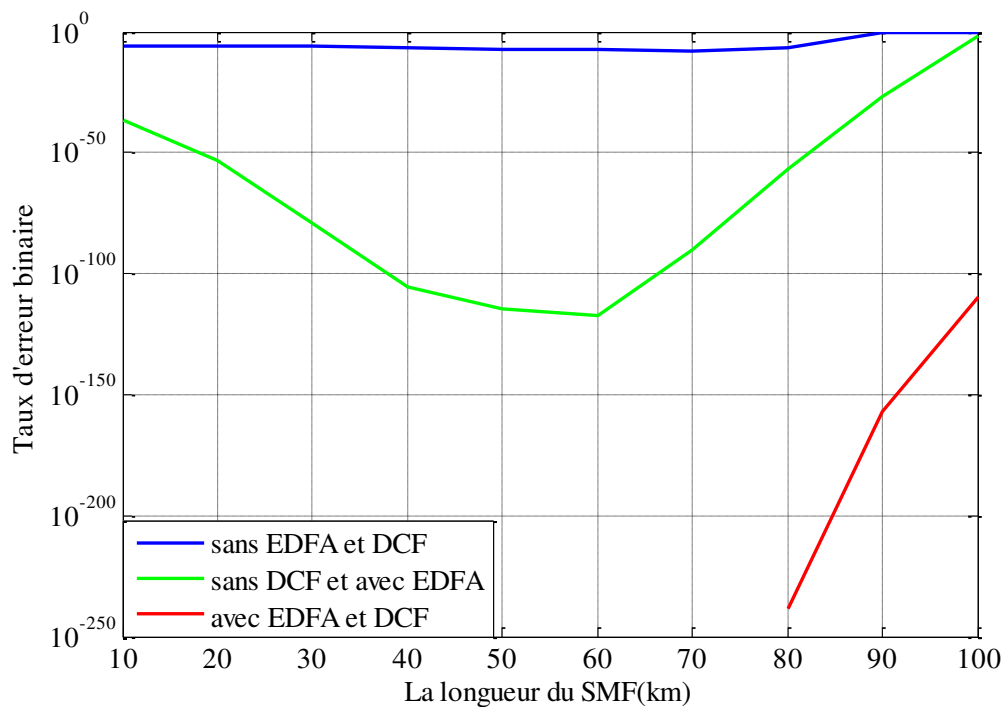


Figure 3.19 : Taux d'erreur binaire TEB en fonction de la longueur de la fibre.

Si on se réfère à la première figure (facteur de qualité) on peut dire que pour les trois courbes, la meilleure qualité de transmission correspond à 50km, en réalité ce n'est pas la distance réelle entre deux terminaux consécutifs, mais il faudrait rajouter la longueur de l'amplificateur EDFA, qui est en général négligeable, et surtout celle de la fibre compensatrice DCF, qui est de 1/5 la longueur de la fibre SMF, donc pour une longueur de fibre de 50km, on aura une distance entre terminaux de 60km.

Les figures (3.20 et 3.21) présentent la qualité de transmission en fonction du débit.

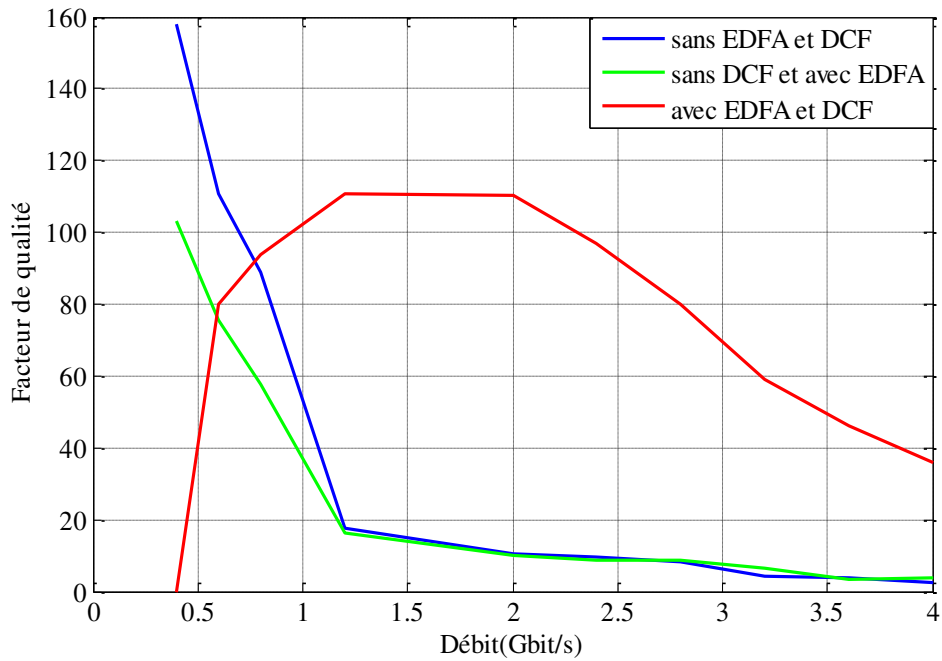


Figure 3.20 : Facteur de qualité Q en fonction du débit.

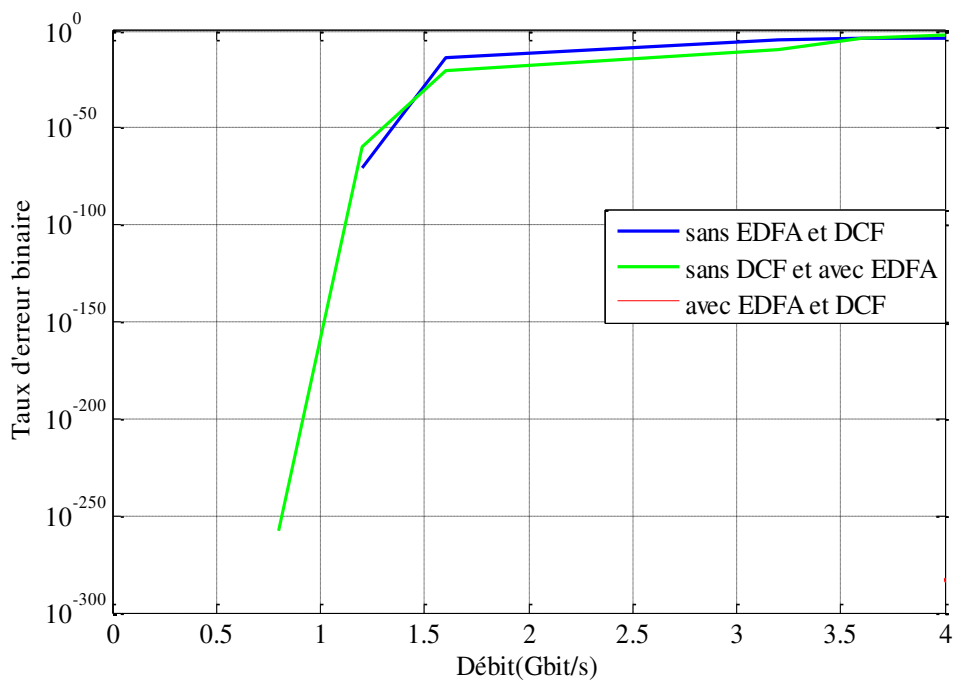


Figure 3.21 : Taux d'erreur binaire TEB en fonction du débit.

Nous remarquons qu'avec un débit inférieur à 0.8Gbit/s la liaison sans DCF et EDFA est meilleure par contre le système avec EDFA et DCF est meilleur pour des débits supérieurs. On note aussi que le premier système peut être utilisé jusqu'à un débit de 1,5Gbit/s (bonne qualité de transmission) le second jusqu'à 3,5Gbit/s alors que le dernier peut aller à des débits beaucoup plus importants (de l'ordre de 16Gbit/s).

Nous avons fixé par la suite le débit à 10Gbit/s et faire varier la puissance émise, les résultats sont présentés sur la figure 3.22.

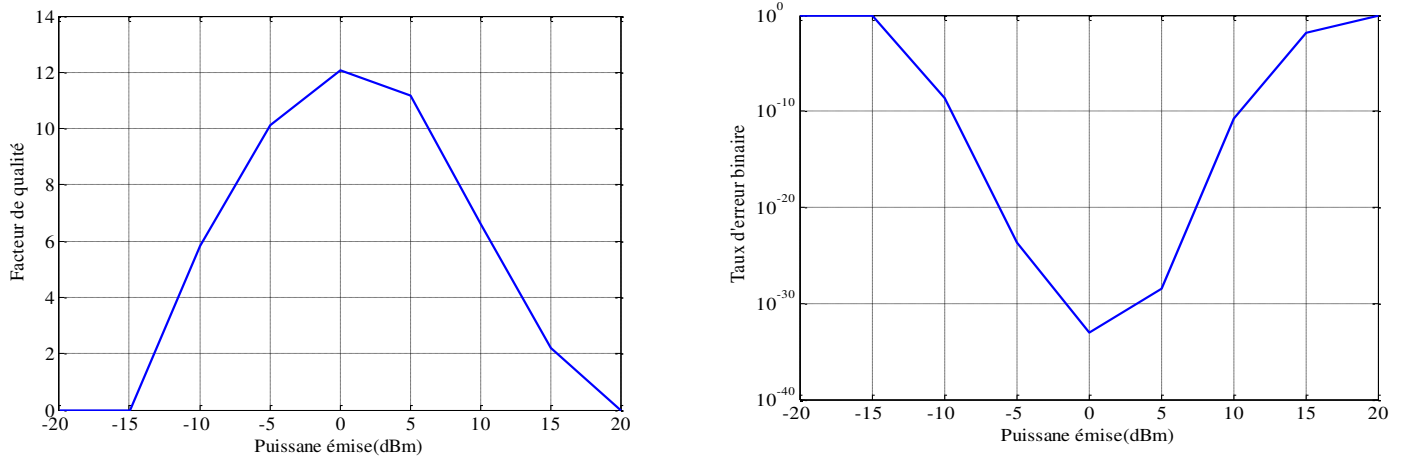


Figure 3.22 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction de la puissance émise.

Le résultat obtenu sur la figure 3.22 montre que plus la puissance émise augmente, plus le facteur Q s'améliore jusqu'à ce que la puissance atteigne 0dBm où l'on observe un pic maximal de 12 pour le facteur de qualité et un pic minimal de 10^{-34} pour le BER après la qualité se dégrade. Pour une bonne qualité de transmission on doit émettre une puissance entre -10dBm et 10dBm.

La figure suivante présente le facteur de qualité et le TEB en fonction du nombre de terminaux.

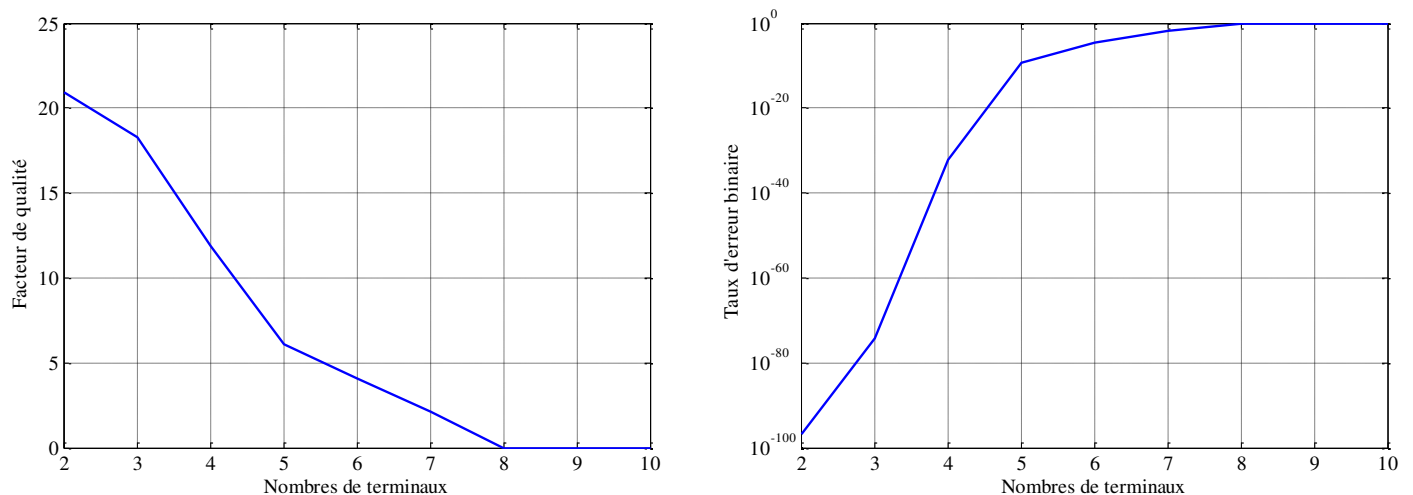


Figure 3.23 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction du nombre de terminaux.

Les résultats obtenus sur la figure 3.23 montre que plus on augmente le nombre de terminaux, plus le facteur Q diminue ainsi on peut aller jusqu'à quatre terminaux en ayant une bonne qualité de transmission, à partir de 5 la qualité de dégrade considérablement, ce qui

justifie l'utilisation en générale de quatre terminaux pour ce genre de réseau. Par la suite on va essayer de changer de code de RZ à NRZ et de voir d'effet que ça a sur le système.

La figure 3.24 présente la variation de la longueur avec un débit de 10Gbit/s.

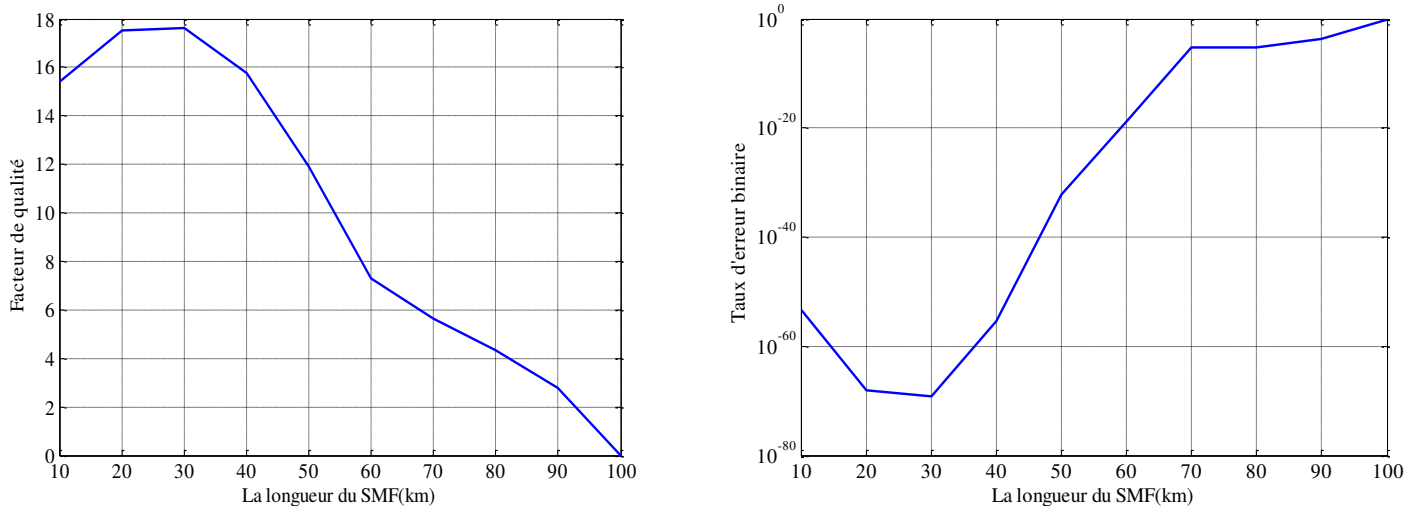


Figure 3.24 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction de la longueur de la fibre.

On note une légère amélioration au début de la courbe jusqu'à atteindre $L=30\text{km}$, et là, là où la qualité du signal se détériore, cette détérioration est amissible jusqu'à 70km, et au-delà de cette valeur le TEB est supérieur à 10^{-10} , ce qui n'est pas acceptable.

Dans les figures suivantes nous allons présenter le facteur de qualité et le TEB en variant le débit.

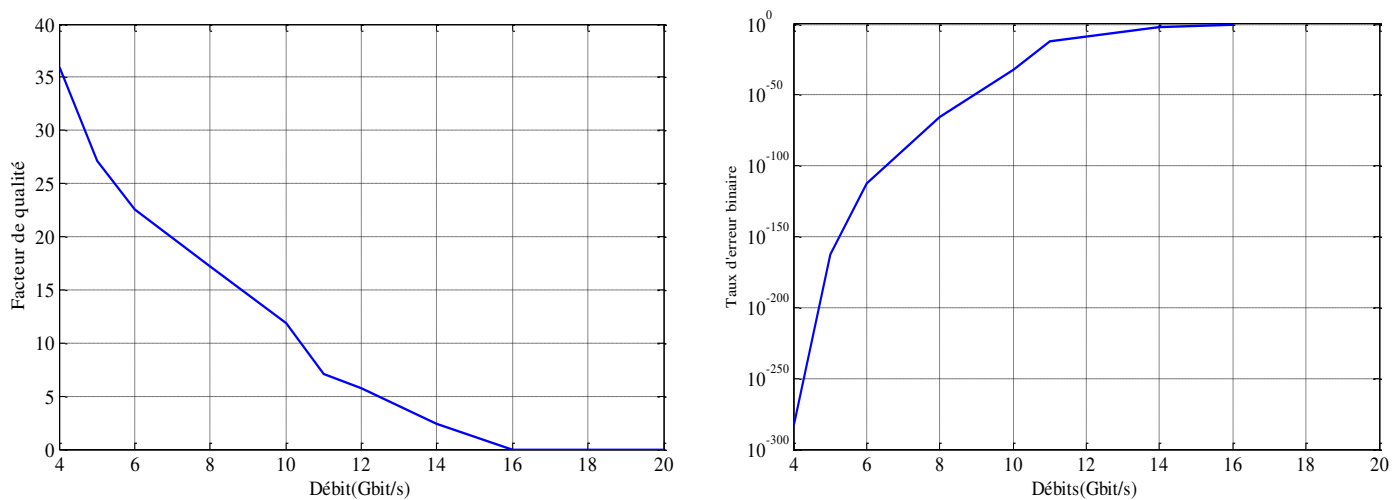


Figure 3.25 : Facteur de qualité Q et taux d'erreur binaire TEB en fonction du débit.

Le résultat obtenue sur la figure 3.25 montre que plus on augmente le débit plus le facteur de qualité diminue et le TEB augmente, pour atteindre un débit acceptable de 11Gbit/s (pour un $\text{TEB}=10^{-10}$).

La figure 3.26 présente la variation du débit avec une longueur de 50km.

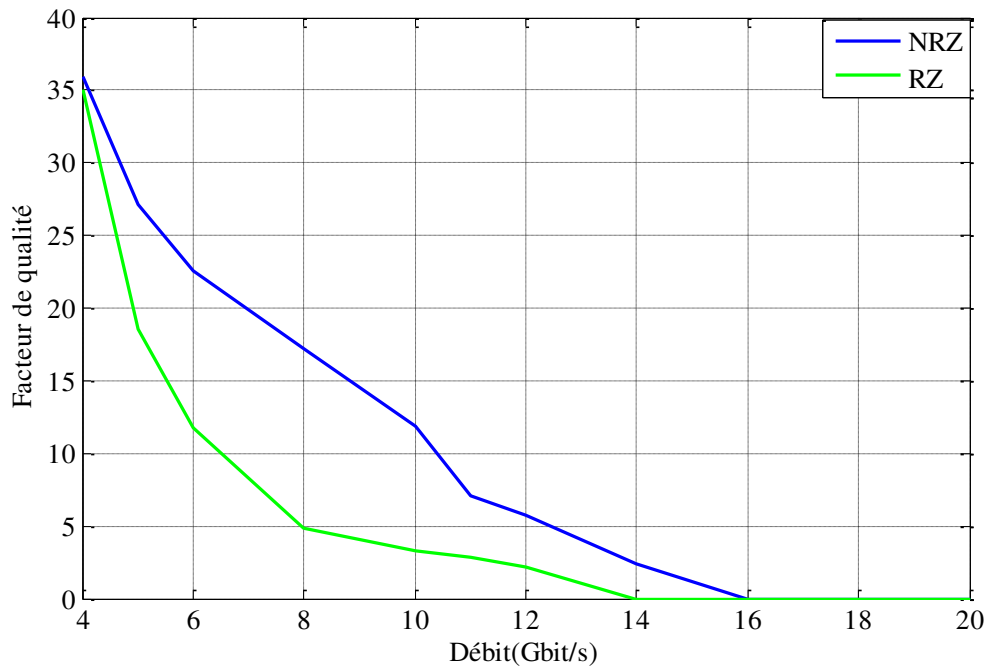


Figure 3.26 : Facteur de qualité Q en fonction du débit.

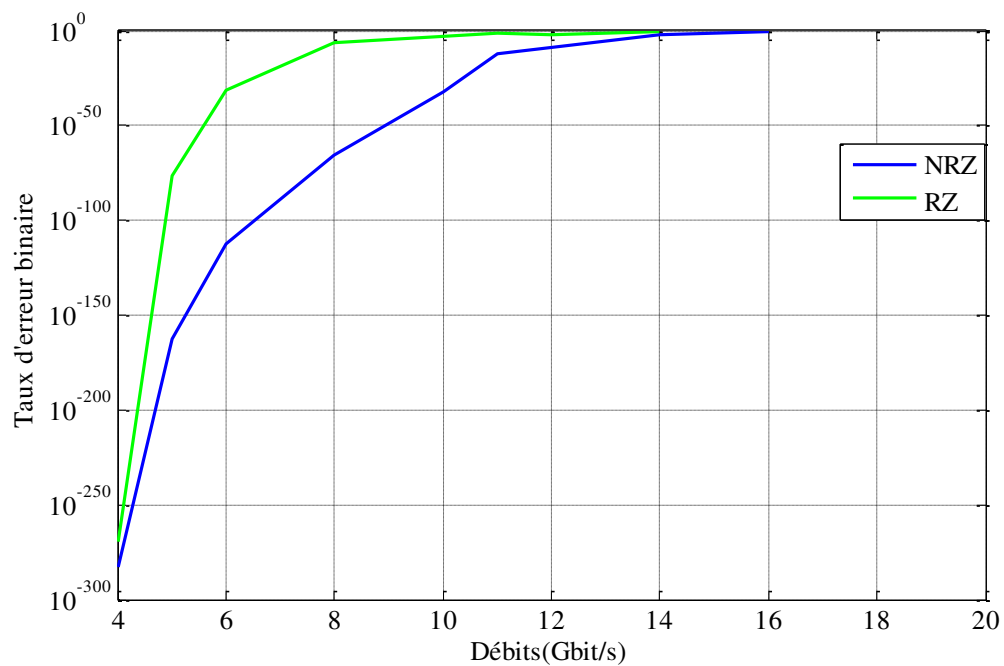


Figure 3.27 : Taux d'erreur binaire TEB en fonction du débit.

Nous constatons sur les figures 3.26 et 3.27 que plus le débit augmente moins le facteur Q est bon pour les deux formats. Nous observons que le facteur de qualité du format RZ décroît plus rapidement que celui du NRZ qui s'annule à partir de 14 Gbit/s pour RZ et à 16 Gbit/s pour NRZ.

On note aussi qu'avec RZ le débit maximale qu'on peut atteindre est de 10 (pour $TEB=10^{-10}$) avec NRZ.

Les deux figures suivantes nous donnent le facteur de qualité et le TEB en fonction de la longueur de SMF.

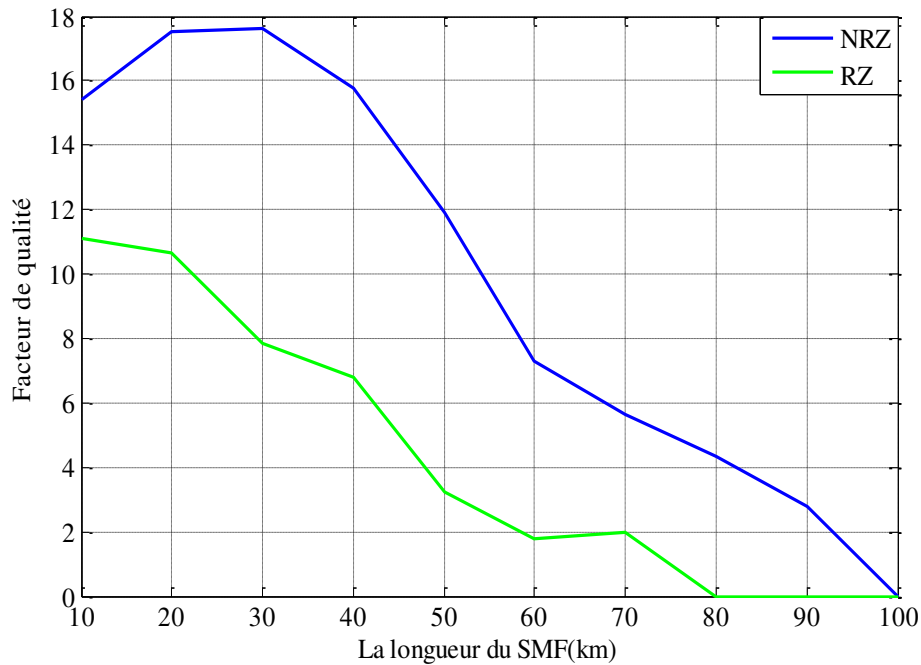


Figure 3.28 : Etude comparative des formats RZ et NRZ sur Q en fonction de la longueur.

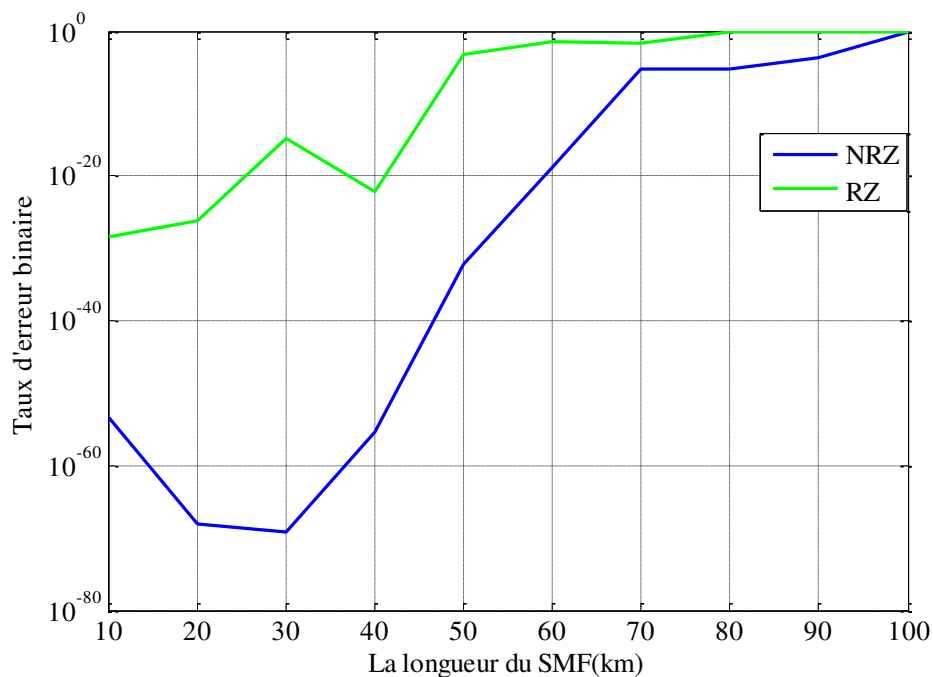


Figure 3.29 : Etude comparative des formats RZ et NRZ sur le BER en fonction de la longueur.

Nous constatons d'après les deux figures 3.28 et 3.29 que le meilleur facteur Q est celui du format NRZ et cela quelque soit la longueur de SMF. Pour ce qui est des longueurs maximale on obtient 17 avec NRZ et 11 avec RZ.

D'après les résultats obtenus dans la simulation on constate que l'ajout de deux EDFA améliore le système, on a ensuite ajouté dans le dernier système deux autres EDFA et quatre DCF, pour une bonne qualité de transmission il faut fixer la distance 50km, une puissance à 3 ou 0dBm, le meilleur format est NRZ, avec l'utilisation de 4 terminaux ainsi qu'un débit de 10Gbit/s.

3.4. Conclusion

Notre travail nous a permis d'étudier un réseau optique en anneau composé de multiplexeur à d'insertion/extraction optique (MIE), d'amplificateur optique EDFA et de fibre compensatrice DCF. En premier lieu on a ajouté deux amplificateurs EDFA qui ont permis d'améliorer le système en termes de débit et de distance. En deuxième lieu on a ajouté deux autres amplificateurs et quatre fibres compensatrices DCF pour avoir une bonne qualité de transmission. L'étude de ces liaisons a permis de tirer une conclusion sur la démarche à mettre en œuvre pour la réalisation d'un réseau par fibre optique en anneau avec un très haut débit de transmission, une distance assez importante entre terminaux et une puissance nécessaire qui permet de faire parvenir le signal à l'émetteur tout en respectant le facteur de qualité et le taux d'erreur binaire en télécoms optiques.

Conclusion générale

L'évolution des communications optiques a permis aux réseaux de télécommunications d'atteindre un niveau de performances extraordinaires et a ouvert les portes devant l'apparition de nouvelles disciplines qui visent l'amélioration de l'existant et la création de nouveaux dispositifs pour la transmission et le traitement du signal optique.

De nos jours, des débits d'informations de plus en plus élevés sont demandés aux supports de transmission et en particulier les fibres optiques. En revanche, des efforts considérables sont nécessaires pour le développement de la fibre optique permettant d'avoir le minimum de perte et de dispersion.

Le développement de la fibre optique nécessite la maîtrise de ses aspects théoriques d'un côté et des méthodes de mesures d'un autre côté. En effet, les méthodes de mesure peuvent être utilisées à la fabrication, au câblage et même à l'installation.

Comparés aux fibres optiques monomodes, les fibres multimodes présentent des problèmes de caractérisation énormes, ce qui rend leurs méthodes de mesure très coûteuse. D'un autre côté les fibres monomodes sont plus utilisées dans les télécommunications compte tenu de leurs avantages par rapport aux fibres multimodes. L'objectif de ce travail consiste à étudier un réseau optique ADM pour un débit global de 10Gbit/s.

Tout d'abord ce travail nous a permis de renforcer et enrichir nos connaissances théoriques dans le domaine de communications optique. En effet, comme vous avez pu le constater, la partie théorique de notre rapport occupe une place très importante.

La première partie de ce travail a été consacrée à l'étude théorique d'une liaison par fibre optique en précisant ces composants et en citant ces différents types, dans la deuxième partie nous avons parlé des réseaux existants ainsi que les différents réseaux optiques détaillés, la dernière partie est une description exacte de notre réseau, nous avons effectué une série de simulation en agissant sur des facteurs de liaison optique comme la longueur de la fibre optique monomode (SMF), la puissance émise et le débit de la liaison. On a aussi introduit en premier lieu deux amplificateurs EDFA et en deuxième lieu deux autres amplificateurs et quatre DCF permettant ainsi une amélioration considérable de la liaison. Ceci nous a conduits à dire que la meilleure qualité d'une liaison optique est atteinte à une longueur de 50km avec un débit de 10Gbit/s.

Bibliographie

- [1] M.Aichi et W.Aichi, « les solutions WDM /DWDM pour les télécoms haut débit », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master en télécommunication, Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, Promotion 2011.
- [2] S.Haroun Ibrahim et M.Ould Mahmoud, « Etude du budget optique d'une liaison longue distance et à haut débit », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en télécommunication, Institut des télécommunications Abdelhafid Boussouf-Oran, Promotion 2005/2006.
- [3] A.Belkhira et S.Mokrani, « L'amplification optique et son intérêt majeur dans les réseaux de télécommunications », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en télécommunication, Institut National des télécommunications et des technologies de l'information et de la communication, Promotion juin 2010.
- [4] H.Habbar et K.Djelidi, « Liaison optique à haut débit », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en télécommunication, Institut National des télécommunications et des technologies de l'information et de la communication, Promotion juin 2004.
- [5] A.Dellal et E.Essafi, « Etude de l'amplification dans les systèmes de transmission par fibre optique », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en télécommunication, Institut National des télécommunications et des technologies de l'information et de la communication, Promotion juin 2010.
- [6] T.Fettouhi, « Etude et planification d'un réseau de transport optique », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master en télécommunication, Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, Promotion juin 2009.
- [7] M.Hamroune et A.Harhouz, « Etude et caractérisation de la commutation optique », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en télécommunication, Institut des télécommunications Abdelhafid Boussouf-Oran, Promotion 2005.
- [8] Pierre Lecoy, «Télécom sur fibres optiques», 3ème édition revue et augmentée.
- [9] Irène et Michel Joindot et douze co-auteurs, « Les télécommunications par fibres optiques ».
- [10] Zeno Toffano, « Composants photoniques et fibres optiques », Ellipses édition Marketing S.A., 2001.
- [11] http://ec.europa.eu/information_society/policy/ecomms/doc/library/public_consult/nga/i2c_thd.pdf.
- [12] Ivain Kesteloot et Stéphane Rzetelny et Eric Jullien, « Nouvelles Technologie Réseaux :SDH ».
- [13] <http://www.oumnad.123.fr/RTCP/SDH.pdf>
- [14] <http://www.ariase.com/fr/guides/fibre-optique.html>.

- [15] Bouchou et Hamouda, « Ingénierie des réseaux optiques », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en télécommunication, Institut National des télécommunications et des technologies de l'information et de la communication, Promotion 2010.
- [16] http://repo.zenk-security.com/Protocoles_reseaux_securisation/Le_reseau_en_general.pdf
- [17] F. Cherfaoui et C. Zemani, « Liaison par fibre optique à haut débit », Promotion.
- [18] S. Kimbiri et P. Kpemissi eyana, « Etude d'une liaison multipléxée RZ/NRZ 16x40 Gbit/s », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master en télécommunication, Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, Promotion juillet 2012.
- [19] Olivier Gautheron, « Câbles sous-marins de télécommunication à fibre optique », édition 2011.

Glossaire

A

ADM: Add Drop Multiplexeurs.

AOFD: Authentication Object Directory File.

APD: Avalanche Photo Diode.

B

BER: Bit Error Rate.

D

DCF: Dispersion Compensative Fiber.

DFB: Distributed Feed- Back.

DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing.

E

EDFA: Erbium Dope Fibre Amplifier.

F

FMD: Frequency Division Multiplexing.

FFDI: Fiber Distributed Data Interface.

FTTB: Fiber To The Building.

FTTC: Fiber To The Curb.

FTTH: Fiber To The Home.

L

LAN: Local Area Network.

LASER: Light Amplifier Simulated Emission Radiated.

LED: Light Emitting Diode.

M

MAN: Metropolitan Area Network.

MIE: Multiplexeur d'Insertion-Extraction.

N

NID: Noeud Interurbain de Desserte.

NRZ: Non-Return-to-zero.

O

OADM: Optical Add/Drop Multiplexer.

ODFA: Optical Doped Fiber Amplifiers

OptiSystem : Optical Communication System Design.

P

PAN: Personal Area Network.

PDH: Plesiochronous Digital Hierarchy.

PIN: Positive Intrinsic Photodiode.

PON: Passive Optical Network.

R

RZ: Return-to-zero.

3R: Retiming Reshaping Regenerating.

S

SDH: Synchronous Digital Hierarchy.

SMF: Signal Mode Fiber.

SOH: Section Over Head.

SONET: Synchronous Optical Network.

STM: Synchronous Transport Module.

T

TAT: Trans-ATlantic cable.

TDM: Time Division Multiplexing.

U

U-DWDM: Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing.

V

VC: Virtuel Container.

W

WAN: Wide Area Network.

WDM: Wavelength Division Multiplexing.

Z

ZAA: Zone à Autonomie d'Acheminement.

Résumé

La capacité des réseaux optiques de transport d'information évolue et continuera à évoluer à un rythme très rapide suite à l'émergence de nouveaux services de plus en plus demandeurs en bande passante (messagerie, mobile, services multimédia en ligne,.....). Plus la technologie avance, plus tous ces moyens de communiquer évoluent. Nous sommes passés du bas débit au haut débit, qui a permis de faire passer plus rapidement les données, l'augmentation de ces débits est donc synonyme de rapidité et de transfert plus volumineux. Le réseau optique à grande distance utilise aujourd'hui largement la fibre optique. La fibre optique va peu à peu remplacer les câbles téléphoniques. Elle permet de répondre à la problématique du haut débit, mais elle permet aussi le développement de nouveaux services.

Le but de ce mémoire est d'étudier un réseau optique ADM, et de déterminer la meilleure qualité de transmission possible. Il nous a fallu, pour atteindre ce but étudier et définir les paramètres optimaux du réseau optique tel que la longueur de la fibre monomode, la puissance émise, le débit de transmission et le nombre de terminaux.

Mots- clés : Réseau optique en anneau, Multiplexeur à Insertion/Extraction optique, Facteur de qualité et Taux d'Erreur Binaire.

ABSTRACT

The capacity of optical network to transport information is changing and will continue to change at a rapid pace due to the emergence of new services increasingly demanding of bandwidth (messaging, mobile, multimedia services online). As technology advances all the ways of communicating change. We went from low speed data rate to high speed data rate, which has to pass data more quickly; increasing data rate means rapidity and larger transfer capacity. The optical network uses now widely optical fiber, it replaces gradually the telephone cables. It answers to the problem of broadband, but it allows also the development of new services.

The purpose of this work is to study an ADM optical network, and determine the best quality of transmission possible. To achieve this study we need the optimum parameters of the network such as the length of the single-mode fiber, the transmitted power, the data rate of transmission and the number of terminals.

Keywords : Optical ring network, Optical Add and Drop Multiplexing, Quality factor and Bit Error Rate.