



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'électronique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électronique
Option : Instrumentation
Communication

Thème

*Liaison par fibre optique à haut
débit*
Etude des liaisons polychromatiques

Encadré par :
Mr Y. ATTAF

Etudié par :
M^{elle} Thinhinane BENEDINE
M^{elle} Fatma BESSEDIK

Promotion 2010-2011

Remerciements

Nous remercions الله pour le courage et la patience qu'il nous a donnée afin de mener ce projet a terme.

Nous tenons à exprimer nos remerciements avec un grand plaisir et un grand respect à notre promoteur Mr Y.ATTAF, Sa disponibilité et Ses précieux conseils nous ont permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.

Nous tenons à remercier vivement, toutes les personnes qui ont contribué pour nous éclairer pendant notre cursus universitaire.

Nous remercions les membres du jury qui nous ont fait l'honneur de bien vouloir juger notre travail.

Nos sincères sentiments vont à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet. En particulier nos chères familles et nos amis(es).

THINHINANE & FATMA



Dédicaces

Je dédie ce travail :

A la personne la plus chère à mes yeux, à ma mère qui a tout sacrifié pour ses enfants, qui a veillé à notre éducation, qui, sans elle je ne serai pas ce que je suis ;

A mon père que j'adore, en signe de reconnaissance pour tous les sacrifices, lui qui m'a supporté et m'a donné la force d'être aujourd'hui ce que je suis ;

A mon cher KARIM, pour son soutien et son encouragement tout au long de ce mémoire ainsi qu'à toute sa famille ;

A ma sœur KAHINA et son mari MOULOUD ;

A ma sœur HASSINA , à qui je souhaite la réussite et que j'adore ;

A ma chère petite sœur MANEL ;

A mon binôme et très chère amie FATMA ainsi qu'à toute sa famille ;

A mes très chères amies: MERJEM, KARIMA, LYNDIA, NAIMA

A toutes les personnes qui m'aime et que j'aime.

THINHINANE



Dédicaces

Je dédie ce travail :

A la personne la plus chère à mes yeux, à ma mère qui a tout sacrifié pour ses enfants, qui a veillé à notre éducation, qui, sans elle je ne serai pas ce que je suis ;

A mon père que j'adore, en signe de reconnaissance pour tous les sacrifices, lui qui m'a supporté et m'a donné la force d'être aujourd'hui ce que je suis ;

A ma sœur GHALIA et son mari AHMED ainsi leurs filles RYMA et AMEL;

A mes sœurs FADILA et NAIMA que j'adore ;

A mes frères AMAR et MOHAMED que j'adore ;

A mon binôme et très chère amie THINHINANE ainsi qu'à toute sa famille ;

A toutes les personnes qui m'aime et que j'aime.

FATMA

Sommaire

Introduction générale	1
I. Système de transmission sur fibre optique à haut débit	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Les fibres optiques	4
I.2.1 La réflexion totale interne.....	4
I.2.2 Propagation de la lumière dans une fibre.....	5
I.3 Système de transmission sur fibres optiques.....	7
I.3.1 liaison numérique sur fibres optiques.....	7
I.3.1.1 L'interface optique d'émission	8
I.3.1.2 Le support de transmission : la fibre optique.....	8
a - Structure de la fibre optique	8
b - Les différents types de fibres optiques	9
1-Fibre multimodes à saut d'indice.....	9
2-Fibre multimodes à gradient d'indice.....	10
3-Fibre monomode.....	11
c- Utilisation.....	12
d- Les applications de la fibre monomode.....	12
e- Avantages et inconvénients des fibres optiques	13
e.1- les avantages	13
e.2- les inconvénients.....	14
I.3.1.3 Interface optique de réception.....	14
I.3.2 Description de la liaison.....	14
I.3.3 Système à amplification optique dans la transmission point à point.....	16
I.4 Technique pour les transmissions à haut débits.....	17
I.4.1 Principe du WDM.....	17
I.5 Evolution de la capacité de transmission	18

I.6 Evolution des services	18
---	----

II : Description générale d'une liaison point à point

II.1 Introduction	21
II.2 La liaison point à point optique	21
II.2.1 Introduction	21
II.2.2 Conversion de signaux électro-optique.....	22
II.3 Les composants de base d'une liaison optique	23
II.3.1 L'émetteur optique	24
a-Source optique.....	24
a.1 Diode électroluminescente (DEL).....	25
a.2 Diode laser (DL).....	26
a.3 La différence DEL/DL.....	28
b- Différents types de laser.....	29
b.1 Laser à homojonction.....	29
b.2 Laser à double hétérojonction.....	30
c- Caractéristiques principales.....	30
c.1 Mode de propagation.....	30
c.2 Caractéristique en puissance.....	30
c.3 Diagramme de rayonnement.....	31
c.4 Spectre d'émission	31
d- Choix de la source	31
e- Module laser.....	32
II.3. 2. Modulateur de la lumière.....	33
II.3. 2.1 Modulation directe	34
II.3. 2.2 Modulation externe	34
II.3.3 Multiplexeur/démultiplexeur en longueur d'onde.....	35
II.3.3.1-Introduction.....	35

II.3.3.2-Principe	35
II.3.4 Canal de transmission	36
II.3.4 .1 la fibre optique.....	36
II.3.4 .2 Caractéristiques de transmission	37
II.3.4 .3 Raccordement des fibres optique.....	37
II.3.4 .4 Type de raccordement	37
a. Les raccords fixes.....	38
a.1 la soudure	38
a.2 Le collage	38
a.3 Le sertissage	38
b. Les raccords semi-fixes	38
c. Les raccords démontables	39
II.3.4 .5 Répéteur ou régénérateur de signal.....	39
II.3.5 Le récepteur optique.....	40
II.3.5.1 Photodétecteur.....	40
II.3.5.2 Les différents types de Photodétecteur.....	41
a. Les photodiodes (PIN).....	41
b. Photodiode à avalanche (APD).....	41
c. Comparaison PIN, APD	42
II.4 Composants optiques.....	42
II.4.1 Introduction.....	42
II.4 .2 Isolateur.....	42
II.4.3 Les coupleurs.....	43
II.4.4 Les filtres optiques.....	44
III. Limitation des performances des systèmes de transmission à haut débit	
III.1 Introduction.....	46
III.2 Sources et bruit des sources.....	46

III.3	L'atténuation.....	47
III.3.1	Atténuation totale.....	47
III.3.2	Mécanismes de l'atténuation.....	47
III.3.3	Absorption.....	48
III.3.4	Diffusion.....	49
III.3.4.1	Diffusion de RAYLEIGH	49
III.3.4.2	Diffusion due aux défauts de la fibre.....	49
III.3.5	Atténuation par connexion.....	50
III.3.5.1	Diamètres du cœur différent.....	50
III.3.5.2	Ouvertures numériques différentes.....	50
III.3.5.3	pertes d'épissurage.....	51
III.4	Limitations en bande passante	53
III.4 .1	Dispersion modale de polarisation (PMD).....	53
III.4 .2	Dispersion Chromatique	54
III.4.3	Effets non linéaires dans les fibres	57
III.4.4	Réponse électronique : Effet Kerr Optique.....	57
III.4.5	Réponse moléculaire : Diffusion Raman stimulée.....	57
III.4.6	Mélange à quatre ondes.....	58
III.5	Le bruit du récepteur.....	59

IV. les nouvelles technologies pour les liaisons à haut débit

IV.1	Introduction.....	61
IV.2	Modules de compensation de dispersion.....	62
IV.2.1.	Fibre à dispersion décalée.....	62
IV.2.2.	La fibre SSMF.....	64
IV.2.3.	La fibre NZDSF.....	64
IV.2.4	La fibre DCF.....	65

IV.2.5	Le compensateur de dispersion de mode de polarisation	65
IV.2.6	Les codes correcteurs d'erreurs (FEC).....	66
IV.3	L'amplification optique et le multiplexage en longueur d'onde.....	67
IV.3.1	Une révolution technologique.....	67
IV.3.2	La technologie WDM / DWDM.....	68
IV.3.2.1	Multiplexage temporel TDM	68
IV.3.2.2	WDM	69
a.	Le principe de multiplexage.....	69
IV.3.2.3	DWDM.....	72
a-	Le multiplexage en longueurs d'onde (DWDM) maximise l'utilisation de la bande passante de la fibre.....	73
b-	Les avantages de la transmission DWDM.....	74
IV.3.3	L'amplification en ligne des systèmes de communication optique.....	74
IV.3.3.1	Introduction.....	74
IV.3.3.2	Intérêt de l'amplificateur optique.....	75
IV.3.3.3	Caractéristiques des amplificateurs optiques à fibre dopée à l'ERBIUM (EDFAs).....	76
IV.3.3.4	Caractéristiques des amplificateurs optiques à semi-conducteurs.....	79
IV.3.3.5	Etude comparative.....	80
IV.3.3.6	Contraintes des systèmes amplifiés.....	81
IV.3.3.7	Conclusion.....	82
IV.4	Le soliton, une solution aux distorsions de propagation.....	82
IV.4.1	DEFINITION du SOLITON	83
IV.4.2	Le soliton moyen.	83
IV.4.3	Caractéristiques importantes des solitons	83
IV.4.4	Le soliton, une solution aux distorsions de propagation.....	84
IV.4.5	Phénomène de base.....	85

v. Calcul de liaison

V.1	Introduction.....	87
V.2	Caractéristiques d'une liaison.....	87
V.3	Conception.....	88
V.4	Bilan d'une liaison par fibre optique.....	89
V.4.1	Affaiblissement total de propagation	91
V.4.2	Longueur maximum d'un canal non dispersif.....	92
V.4.3	Influence de la bande passante sur la longueur de la liaison.....	92
V.5	Liaison numérique.....	94
V.5.1	Codes de transmission.....	94
a.	Introduction.....	94
b.	Choix du code de transmission.....	94
c.	Représentation des signaux codes.....	95
d.	Particularités des différents codes.....	96
V.5.2	Relation entre bande passante et débit.....	97

Introduction Générale

Les premières expériences de transmission optique datent de 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, ces moyens ne sont pas développés pour la transmission, mais donnent naissance à l'enregistrement optique du son.

Utilisant le principe connu depuis longtemps des fontaines lumineuses, les fibres optiques, minces cheveux de verre très transparents, ont fait l'objet d'applications décoratives, puis plus utilitaires (éclairage et endoscopie où l'atténuation n'est pas un paramètre critique). Partie en 1960 de 1000dB/Km, l'atténuation est descendue à 20 dB/Km en 1975, puis 0,2dB/Km en 1984. Actuellement on sait fabriquer des fibres ayant une atténuation inférieure à 0,2 dB/Km.

L'apparition du laser depuis 1960 a permis d'envisager la transmission d'information à distance, sur le principe des faisceaux hertziens, à des fréquences beaucoup plus élevées (de l'ordre de 10^{14} Hz).

Déjà envisagées par les théoriciens, les transmissions sur fibres optiques deviennent un objectif réaliste à partir de 1966 lorsque furent fabriquées les premières fibres de silice.

Le développement spectaculaire dans le domaine des télécommunications a été rendu possible grâce à la maîtrise des diodes lasers à semi-conducteur, qui allient les performances des lasers à la facilité d'emploi des composants électroniques, et grâce aux progrès dans la technologie de fabrication des fibres optiques, permettant une très faible atténuation et une résistance mécanique suffisante.

L'apparition des câbles, connecteurs et composants passifs performants, et la mise à disposition des procédés industriels de raccordement, ont également été indispensables des 1978 furent installés des systèmes travaillant avec une longueur d'onde optique de

Introduction Générale

0,8 μ m, acheminant un débit compris entre 50 et 100 Mbits/s avec un espacement entre répéteurs de 100Km.

La seconde génération de système de transmission sur fibre optique, apparue dans les années 1980, découle directement de la mise au point de la fibre monomode et du laser à semi-conducteur à 1.3 μ m, longueur d'onde pour laquelle la dispersion chromatique est minimale.

Des débits supérieurs à 1Gbits/s avec un espacement entre répéteurs de plusieurs dizaines de kilomètres, sont alors atteints. Les portées de ces systèmes sont limitées par les pertes de fibre 0,5dB/Km dans le meilleur cas, et l'idée apparaît alors de développer des sources émettant à la longueur d'onde de 1.55 μ m pour laquelle l'atténuation est minimale en utilisant des fibres à dispersion décalée avec un débit supérieur à 2Gbits/s.

Dans tous les pays, on considère aujourd'hui que les futurs réseaux d'interconnexion seront optiques, utilisant des systèmes capables de transmettre des débits de plusieurs Gbits/s (actuellement des Tbits/s), car dans le domaine des liaisons internationales, les câbles sous-marins en fibre optique, dont le premier TAT8, a été posé en 1989, ont permis d'augmenter la capacité, mais aussi l'espacement entre répéteurs. Mais malgré des progrès très importants, les répéteurs révélaient des difficultés à utiliser, et en particulier à insérer en lignes. Si pour cela il y avait l'idée des amplificateurs optiques (amplificateurs à fibre dopée)

L'amplification optique à fibre dopée, annoncée en 1987 constitue aujourd'hui un dispositif clé des futurs systèmes optiques. Aisé à insérer en lignes, il sera possible d'accroître la capacité de transmission sans changer la configuration physique du réseau de transport. Les futures générations de câbles sous-marins qui franchiront les 6500 Km de l'atlantique ne comporteront plus aucun répéteur-régénérateur, mais seulement des amplificateurs optiques à intervalles réguliers de 100 km. De plus ils permettent de compenser les pertes introduites par les coupleurs, les commutateurs etc. ; et de distribuer le signal à un grand nombre d'utilisateurs, car la bande passante est énorme, ce qui permet d'envisager l'amplification simultanée de plusieurs porteuses optiques juxtaposées dans le spectre, constituant ce que l'on appelle un multiplex.

Introduction Générale

Ainsi naît le concept de multiplexage en longueur d'onde (WDM : Wavelength Division Multiplex) ; qui consiste à superposer sur une même fibre des signaux optiques de différentes longueur d'ondes, il permet d'augmenter la capacité de transmission des informations au meilleur coût, et contribuer au développement croissant des télécommunications optiques.

Enfin avec plus de 10 millions de kilomètres fabriqués par an, les fibres optiques sont désormais une technologie à maturité, qui se diffuse dans les domaines d'application de plus en plus vastes.

I.1 Introduction

L'objectif de tout système de transmission est de transmettre une information le plus loin possible (atténuation la plus faible possible) avec la plus grande bande passante possible. Et pour cela l'utilisation de la fibre optique comme support de transmission semble le moyen le plus fiable comparée aux autres supports de transmissions existants.

I.2 Les fibres optiques

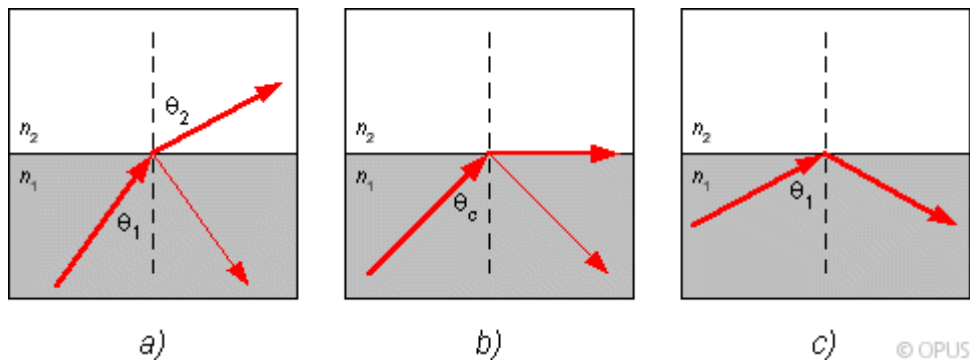
I.2.1 La réflexion totale interne

Le principe de la réflexion totale interne est à la base de la propagation des ondes lumineuses dans la fibre optique. D'après ce principe, lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu à un autre dont l'indice de réfraction est plus faible, il peut être réfléchi. De plus, lorsque l'angle d'incidence du rayon lumineux est plus grand que l'angle critique, la lumière est réfléchie en totalité et il n'y a aucune perte de lumière (**figure 1.1**).

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

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad 1-1$$

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

**Figure I.1 :**

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

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

$$n = \frac{c}{v} \quad 1-2$$

La lumière voyage donc plus rapidement dans un matériau avec un indice de réfraction plus petit. Il est à noter que l'indice de réfraction du vide est de 1. On dit aussi que l'indice de l'air est égal à 1 puisque la vitesse de la lumière dans l'air est à peu près égale à celle dans le vide. En comparaison, l'indice de réfraction de l'eau est de 1,33. Notez bien que l'indice de réfraction est une quantité qui n'a pas d'unité, puisqu'il s'agit d'un rapport entre deux vitesses, et qu'il est toujours plus grand ou égal à 1.

1.2.2 Propagation de la lumière dans une fibre

Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre sans perte, en empruntant un parcours en zigzag (**figure 1.2**).

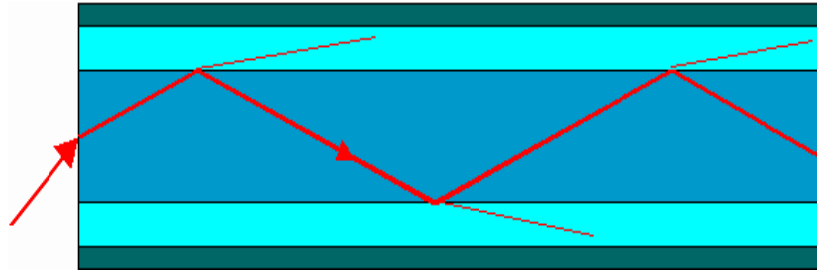


Figure I.2: Chemin parcouru par un rayon lumineux dans une fibre optique.

La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec très peu de pertes même lorsque la fibre est courbée.

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

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

1-3

Le second est l'ouverture numérique de la fibre (*N.A.* pour *Numerical Aperture*), (**Figure I.3**). Concrètement, ce paramètre est le sinus de l'angle d'entrée maximal de la lumière dans la fibre pour que la lumière puisse être guidée sans perte. Cet angle est mesuré par rapport à l'axe de la fibre.

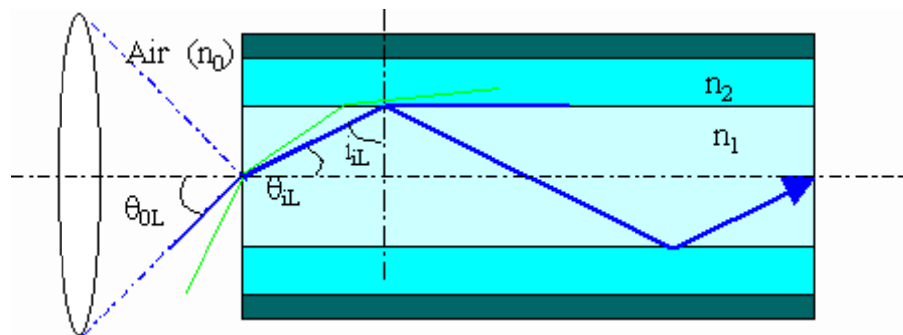


Figure I.3: Ouverture numérique d'une fibre optique

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

1-4

Afin de faciliter l'injection de la lumière dans la fibre à l'entrée, on a intérêt à avoir l'angle limite \varnothing_{0L} le plus grand possible. Ceci s'obtient pratiquement en choisissant des indices n_1 et n_2 très proches.

1.3 Système de transmission sur fibres optiques

1.3.1 liaison numérique sur fibres optiques

La grande majorité des liaisons sur fibres optiques (F.O) sont naturellement les liaisons numériques (**figure 1.4**), car la faible atténuation et la grande bande passante des fibres optiques permettent en effet de jouer un rôle très important dans les transmissions numériques. Les fibres optiques constituent l'infrastructure du réseau à longue distance (WAN : Wide Area Network), qui a utilisé d'abord les échelons des hiérarchies numériques plésiochrones (2, 8, 34, 140, 560 Mbits/s pour les systèmes européens), et se déploie maintenant selon la hiérarchie numérique synchrone SDH sous la norme SONET (Synchronous Optical Network), les principaux débits sont à 155,622 Mbits/s, et 2,5Gbits/s.

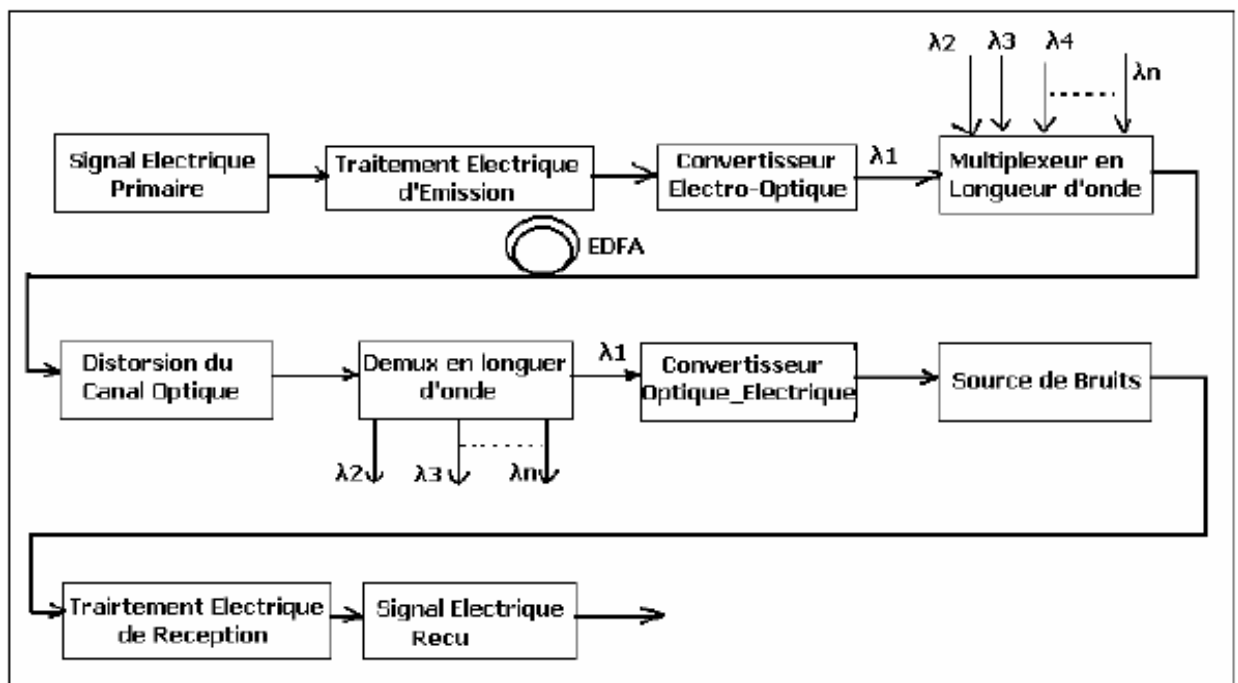


Figure I.4 : Structure générale d'un système de transmission sur fibre

1.3.1.1 L'interface optique d'émission

Elle a pour rôle de transformer le signal électrique en signal optique. Elle contient principalement le composant optoélectronique d'émission, qui peut être une diode électroluminescente (DEL) ou une diode laser (DL). L'interface contient également des circuits d'adaptation et de protection ; elle est reliée au câble soit par une embase de connecteur, soit par une fibre amorce qu'il faut raccorder.

La modulation est en générale une modulation d'intensité lumineuse obtenue par la modulation du courant qui traverse la diode d'émission.

Les systèmes pratiques utilisant des sources à semi-conducteur émettant autour des longueurs d'ondes $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$ (pour les courtes distances), $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ ou $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, selon le type de la liaison optique (distance, débit).

1.3.1.2 Le support de transmission : la fibre optique

a- Structure de la fibre optique

Une fibre optique est semblable à un câble coaxial sans tresse métallique. Le **figure 1.5** donne le schéma d'une fibre optique. Au centre de la fibre se trouve le cœur en verre, à l'intérieur duquel se propagent les signaux lumineux. Le cœur d'une fibre multimode à un diamètre d'environ 50 microns, il est équivalent à l'épaisseur d'un cheveu humain. Celui d'une fibre monomode varie entre 9 et 10 microns.

Le cœur de la fibre optique est entourée d'une gaine en verre présentant un indice de réfraction plus faible que celui du cœur de façon à conserver toute la lumière dans le cœur. un revêtement protecteur en plastique enveloppe la gaine en verre. Généralement les fibres optiques sont regroupées en un faisceau de fibre à l'intérieur d'un tube ou d'une gaine protectrice externe : c'est le câble à fibre optique.

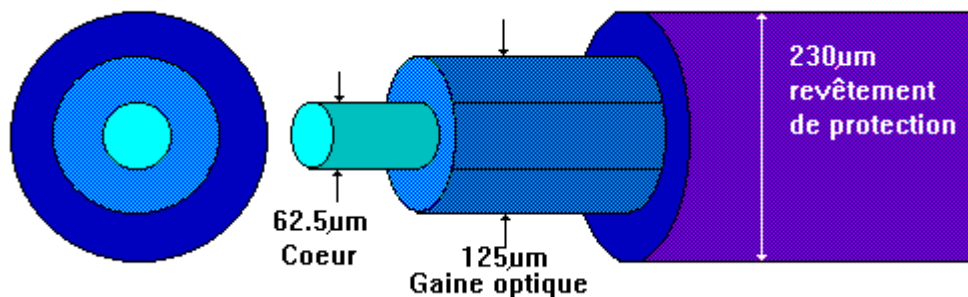


Figure I.5 : Structure d'une fibre optique

b-Les différents types de fibres optiques

Suivant les modes de propagations qu'elles utilisent, les fibres optiques peuvent être classées en 3 catégories:

1-Fibre multimodes 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. I.6-a). Le faisceau lumineux injecté à l'entrée de la fibre va atteindre la sortie en empruntant des chemins optiques différents (fig. I.6-b) ce qui se traduit par des temps de propagation différents et donc un étalement du signal transmis (fig. I.7). Ce phénomène est appelé dispersion modale.

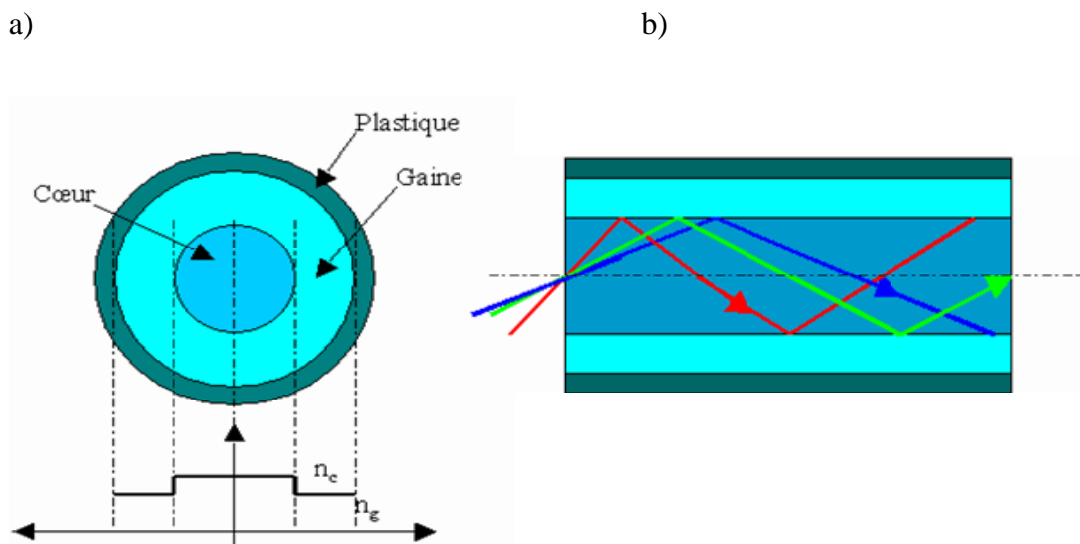


Figure I.6: a) section et profil d'indice d'une fibre multimodes à saut d'indice

b) chemins optiques empruntés par les rayons lumineux

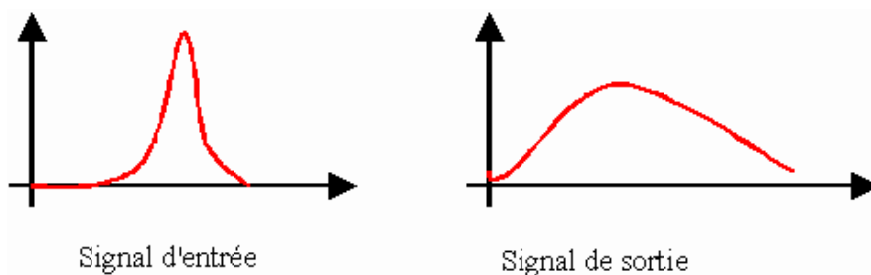


Figure I.7: Etalement du signal optique dans une fibre multimodes à saut d'indice.

2-Fibre multimodes 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.8). Là aussi les rayons lumineux vont emprunter des chemins différents, mais un choix judicieux du profil d'indice du cœur permet de tendre vers des temps de parcours voisins et donc réduire l'étalement du signal (fig. I.9).

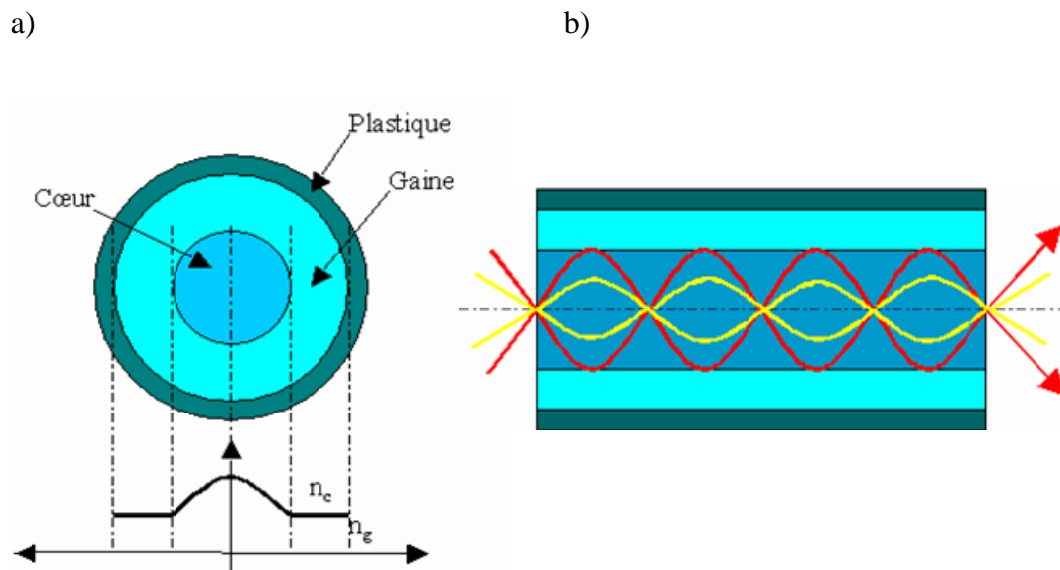


Figure I.8: a) section et profil d'indice d'une fibre multimodes à gradient d'indice;

b) chemins optiques empruntés par les rayons lumineux.

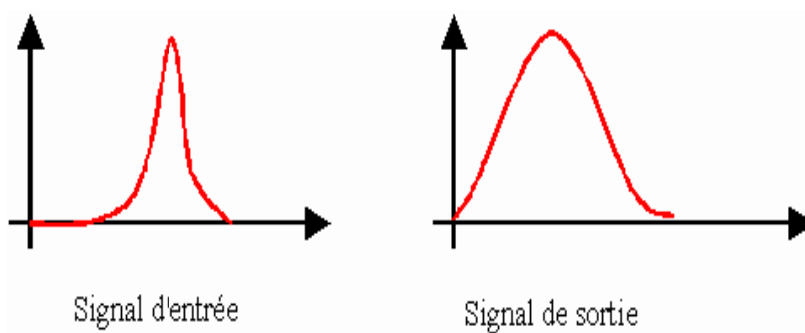


Figure I.9: Etalement du signal optique dans une fibre multimodes à gradient d'indice

3-Fibre monomode

Le nombre de modes se propageant dans une fibre optique est donné par la relation :

$$m = \frac{2d}{\lambda} \cdot ON \quad 1.5$$

Avec : d : le diamètre du cœur de la fibre et λ : La longueur d'onde de la lumière utilisée.

ON : l'ouverture numérique de la fibre.

En choisissant d suffisamment faible, il est possible d'avoir un seul mode de propagation ($m=1 \Leftrightarrow$ fibre monomode). Le chemin de propagation est ainsi unique et parallèle à l'axe de la fibre (fig. I.10). Théoriquement le signal injecté en entrée va atteindre la sortie sans aucune déformation. C'est ce type de fibre qui présente les plus grandes performances mais son coût est relativement élevé par rapport aux fibres multimodes.

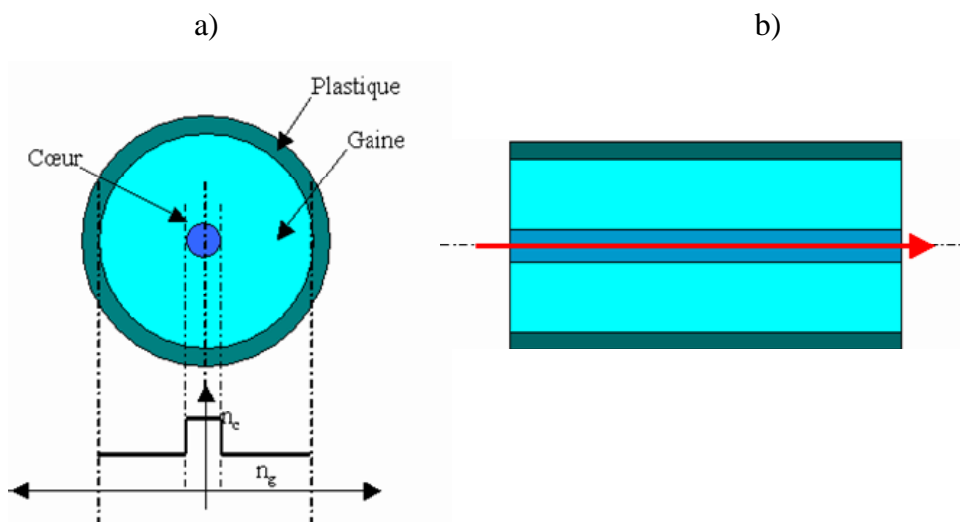


Figure I.10: a) section et profil d'indice d'une fibre monomode;
b) le chemin optique emprunté par les rayons lumineux est unique.

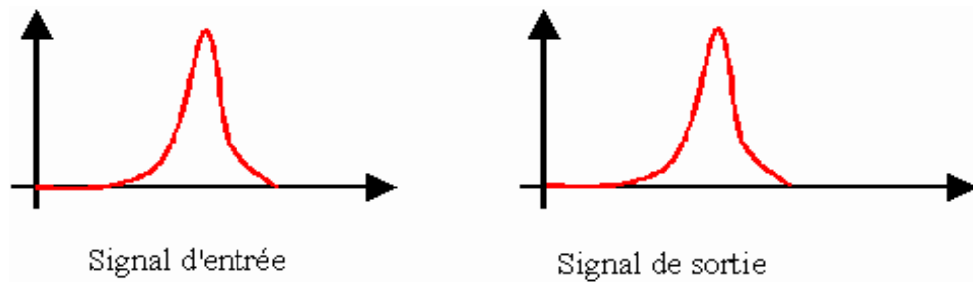


Figure II.11: Etalement du signal optique dans une fibre monomode.

La fibre monomode dont le cœur est si fin que le chemin de propagation des différents modes est pratiquement direct. La dispersion modale devient quasiment nulle.

La bande passante transmise est presque infinie (>10 GHz/Km). cette fibre est utilisée essentiellement pour les communications à grande distance.

Le petit diamètre du cœur (10 μ m) nécessite une grande puissance d'émission, donc des diodes au laser qui sont relativement onéreuses.

c- Utilisation

Fibre unimodale	Fibre multimode
Faible dispersion	Forte dispersion
Connexion délicate	Connexion facile
Faible atténuation	Forte atténuation
Hauts débits, longues distances	Réseaux locaux

d- Les applications de la fibre monomode

Les applications de la fibre optique monomode sont nombreuses, les plus connues concernent :

- Les télécommunications, pour la réalisation des réseaux hauts débit à grande distance en technologie WDM, SDH, ATM.

- L'audiovisuel, pour la réalisation des réseaux câblés de télévision en association avec le câble coaxial utilisé pour le raccordement de l'abonné.
- La médecine, ou la fibre optique est notamment utilisée :
 - En chirurgie, pour transporter le faisceau laser jusqu'au tissus à traiter.
- En endoscopie, pour éclairer l'intérieur du corps et transmettre les images jusqu'au médecin.
- L'éclairage (muséographique, architectural, espaces d'agrément publics ou domestiques).
- La décoration/illumination de piscine, bassins, fontaines.
- La signalétique d'orientation de l'information (panneaux de signalisation et enseignes).
- La signalisation routière (rond points, séparation de voies de circulation).

e- Avantages et inconvénients des fibres optiques

e.1- les avantages

Ils sont nombreux, on peut les classer comme suit :

- Performances de transmission : très faible atténuation, très grande bande passante, multiplexage possible de plusieurs signaux ; elles permettent aux systèmes d'avoir une portée et une capacité très supérieurs à celles des câbles conducteurs.
- Avantage de mise en œuvre : très petite taille, grande souplesse, faible poids, appréciable aussi bien en télécommunications que pour le câblage en informatique, aéronautiques, applications industrielles.
- Sécurité électrique : isolation totale entre terminaux, utilisation possible en en ambiance explosive ou sous forte tension.
- Sécurité électromagnétique : la fibre optique n'est pas sensible aux parasites et n'en crée pas elle-même.
- Avantage économique : contrairement à l'idée encore répandue, le cout globale d'un système sur fibre optique est de plus en plus souvent inférieur à celui d'un système sur cuivre.

e.2- les inconvénients

- La fibre optique ne permet pas le transport d'énergie.

Les répéteurs doivent être alimentés séparément, soit localement, soit par second câble électrique, soit par un câble mixte optique et électrique.

- Perte de raccordement entre différents composants optiques du système.

Parmi les pertes de raccordement on trouve :

- Pertes de couplage à la source : une partie seulement de la puissance émise par le laser sera captée par la fibre à cause de la désadaptation entre eux.
- Pertes d'épissure : elle est due à cause d'une discontinuité des rayons, une erreur d'espacement, une erreur d'excentrement, une erreur d'alignement angulaire.

1.3.1.3 Interface optique de réception

Elle contient une photodiode qui convertit le signal optique reçu en signal électrique. Elle est suivie d'un préamplificateur compensant l'atténuation de la fibre optique, cette opération est réalisée par des différentes photodiodes telles que les photodiodes PN, PIN et les photodiodes à avalanche.

La détection dans cette interface peut se faire soit :

Détection directe : on a une relation linéaire entre le courant électrique détecté et la puissance optique captée.

Détection cohérente : consistant à faire battre, comme en radio, le signal reçu avec un oscillateur local. La détection cohérente a suscité un très important effort de recherche entre 1980 et 1990, en raison des gains en sensibilité de réception qu'elle pouvait apporter. Cette technique a perdu la plus grande partie de son intérêt avec l'arrivée des amplificateurs optiques à fibre.

1.3.2 Description de la liaison

La Figure 1.12 représente la liaison étudiée à titre d'exemple. L'émetteur est une source lumineuse, modulée de la manière suivante (modulation par tout ou rien) : une impulsion de durée T correspond au symbole binaire "1", l'absence de lumière correspond au symbole binaire "0". Après propagation dans un tronçon de fibre monomodale, de facteur de transmission en puissance A_1 , la lumière pénètre dans l'amplificateur optique monomodal transverse de gain en puissance G , on appelle N_s le

nombre moyen de photons par impulsion de durée T injectés dans l'amplificateur (c'est-à-dire que la puissance correspondante est $N_s h \nu_s / T$). Le signal amplifié est alors injecté dans un deuxième tronçon de fibre de facteur de transmission en puissance A_2 . Au signal amplifié se superpose le bruit d'émission spontanée amplifiée (ESA).

La lumière arrivant sur le récepteur traverse un filtre optique de largeur de bande B_0 supérieure à la bande du signal, et dont le rôle est d'éliminer une partie de l'ESA dont le spectre est en général beaucoup plus large que celui du signal. La lumière ainsi filtrée est détectée par une photodiode de rendement quantique η , supposée ne pas présenter de courant d'obscurité.

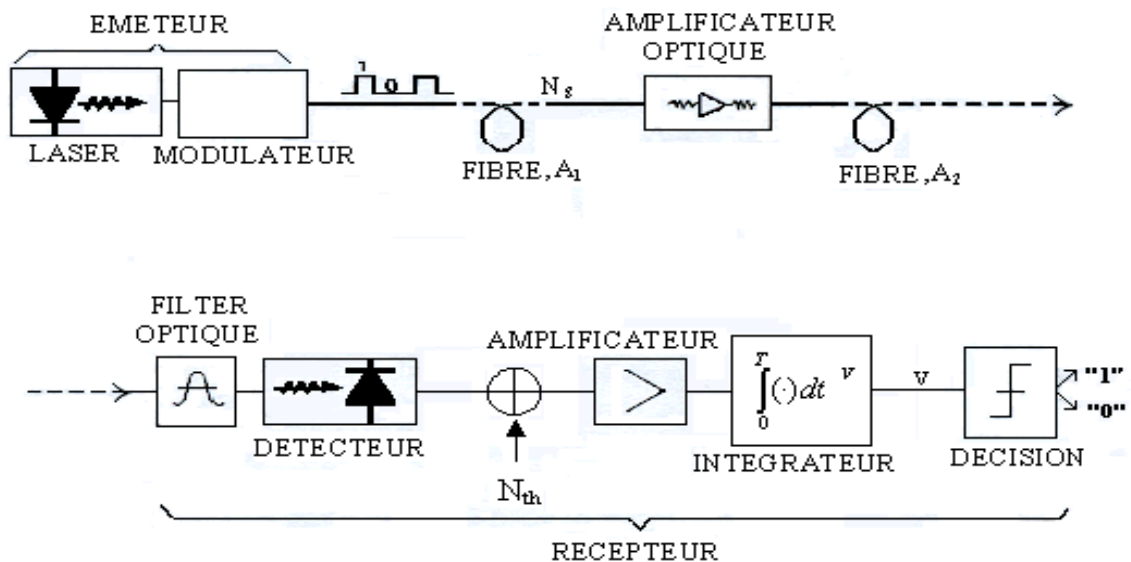


Figure 1.12: Schéma d'un système de communication optique comportant un amplificateur optique

Le photocourant émis par la photodiode est alors amplifié, puis intégré par un intégrateur parfait, dont la sortie est proportionnelle au nombre d'électrons N émis par le photorécepteur pendant la durée T d'un symbole.

L'intégrateur est suivi d'un détecteur à seuil qui permet de prendre la décision.

I.3.3 Système à amplification optique dans la transmission point à point

En transmission point à point, l'amplification optique peut également être utilisée :

En préamplificateur (**Figure I.13.a**), juste avant la détection ; on recherche alors le plus faible excès de bruit, afin de se rapprocher de la limite quantique.

En « booster » juste après l'émission (**Figure I.13.b**) ; il faut maximiser la puissance de saturation et le rendement quantique. En associant le booster à l'émission et le préamplificateur en réception, on réalise des liaisons atteignant 350 Kmsans amplification intermédiaire.

En ligne ; comme amplificateur intermédiaire (**Figure I.13.c**) en mettant en cascade plusieurs amplificateurs ; dans les liaisons très longues distances.

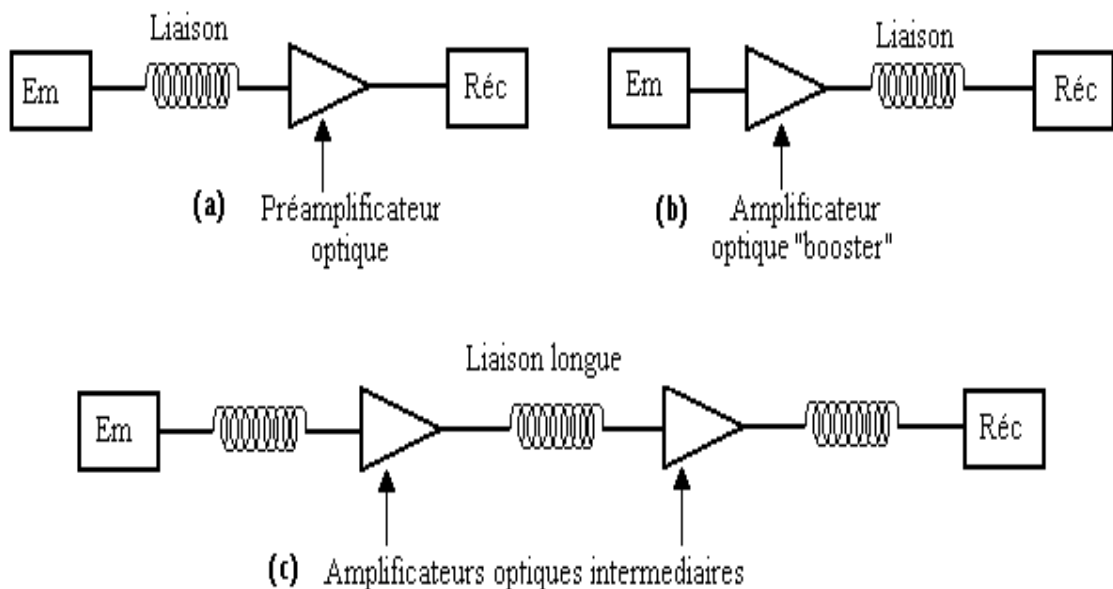


Figure I.13 : Différents systèmes de transmission à amplification optique

- (a) avec préamplificateur optique à la réception
- (b) avec amplificateur de puissance à l'émission
- (c) avec amplificateurs optiques intermédiaires

I.4 Technique pour les transmissions hautes débits

La croissance spectaculaire du trafic Internet et téléphonique oblige les opérateurs de réseau à augmenter toujours la capacité de transmission de leur réseau terrestre en fibre optique. Il faudra offrir des capacités de plusieurs Gigabits sur une seule fibre, en utilisant le multiplexeur en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing).

I.4.1 Principe du WDM

Le principe du WDM consiste à transmettre simultanément sur une même fibre plusieurs signaux, provenant de sources diverses, chacun étant véhiculé par une longueur d'onde différente. Les systèmes actuels autorisent 4, 8, 16,32 et même 64 canaux optiques différents. Par exemple chacune pouvant supporter 2,5Gbits/s, on obtient alors des débits de 10, 40,80 et même 160Gbits/s.

A partir de différentes sources émettant chacune à une longueur d'onde propre, de regrouper et d'injecter ces canaux dans une seule fibre sans qu'il y ait de mélange entre eux au cours de la propagation.

A l'extrémité de la fibre, il suffit de séparer ces longueurs d'ondes et de les envoyer sur autant de détecteurs différents pour retrouver les signaux électriques initiaux.

Il faut noter qu'il existe des sources émettant simultanément plusieurs longueurs d'onde.

La capacité du système de transmission à WDM a augmenté parallèlement avec l'augmentation du débit par canal en multiplexage temporel (TDM) de 2,5Gbits/s à 10Gbits/s.

La technologie WDM est dite DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) lorsque l'espacement utilisé est égal ou inférieur à 0,8 nm ou lorsque plus de 16 canaux sont utilisés. Un système à 16 canaux de 2.5Gbits/s, soit 40Gbit/s permet l'acheminement de 500000 conversations téléphoniques. Il faut également s'attendre à un accroissement du débit offert sur chaque canal qui pourrait rapidement atteindre 10Gbit/s.

I.5 Evolution de la capacité de transmission

L'augmentation de la capacité de transmission des fibres optiques (**Figure 1.14**) a été rendu possible grâce à des avancées technologiques marquantes (qui seront étudiées dans le chapitre IV) telle que :

- La fibre monomode à faibles pertes.
- Les fibres à dispersion décalée.
- Les diodes lasers fonctionnant à 1.55 μ m.
- L'amplificateur à fibre dopée.
- La technique du multiplexage WDM

Année	Capacité (Gbits/s.km)
1978	10
1983	100
1989	500
2002	100 000

Figure 1.14: Augmentation de la capacité de transmission des fibres

I.6 Evolution des services

En 2030, il est attendu que la vitesse de transmission soit plusieurs centaines de fois supérieure qu'aujourd'hui (Figure 1.16). Les prévisions les plus optimistes prévoient qu'il sera possible de transmettre des données à 1 TB/s de et vers les particuliers.

D'autres prétendent que 70% du réseau sera encore à 1 Gb/s. Quoi qu'il en soit, l'augmentation de la vitesse favorisera l'émergence du télé-travail, un des facteurs favorisant le développement des télécommunications.

L'introduction de l'ISDN, suivi par l'ADSL a permis d'augmenter les vitesses de transmission. Aujourd'hui, la vitesse est de 2 Mb/s.

Vitesse de
transmission

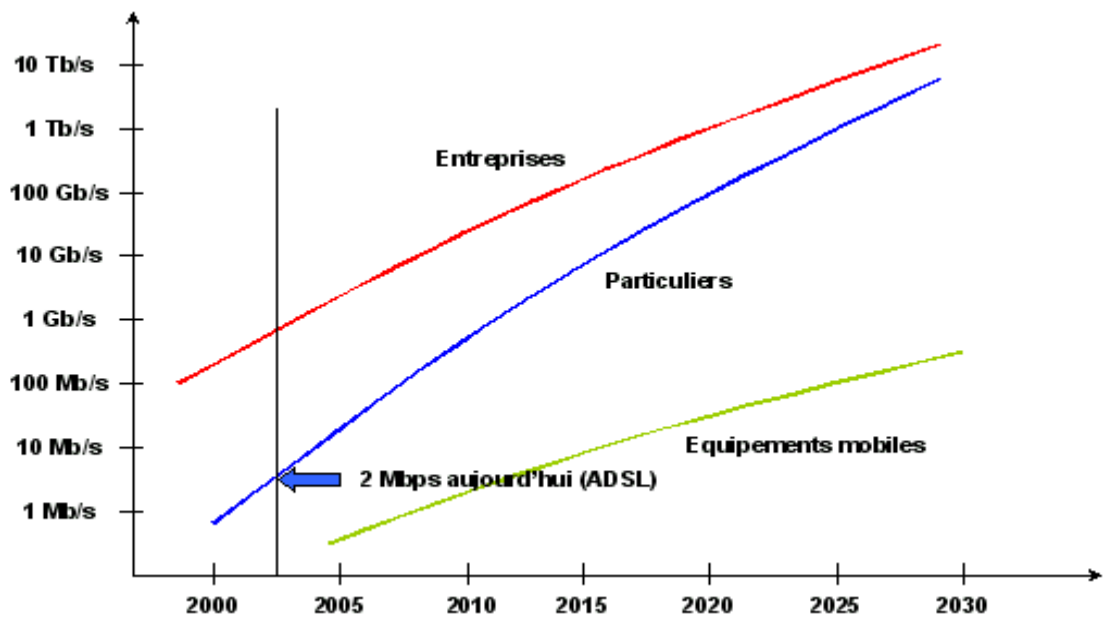


Figure 1.15 : Evolution du trafic de données.

La croissance de la bande passante va entraîner le développement de nouveaux composants avec de nouvelles fonctions. Le développement de composants, de modules et de systèmes pour les télécommunications optiques est lié aux développements des services (particuliers, entreprises). L'évolution des services et des applications/technologies associées est cependant un cercle vicieux. La demande des utilisateurs est généralement un besoin immédiat. La mise en place des services et applications est généralement rapide mais l'augmentation des débits plus élevés à la connexion se fait plutôt sur le moyen terme. L'infrastructure, elle, se fait sur le très long terme et les services et les applications dépendent à leur tour de l'infrastructure.

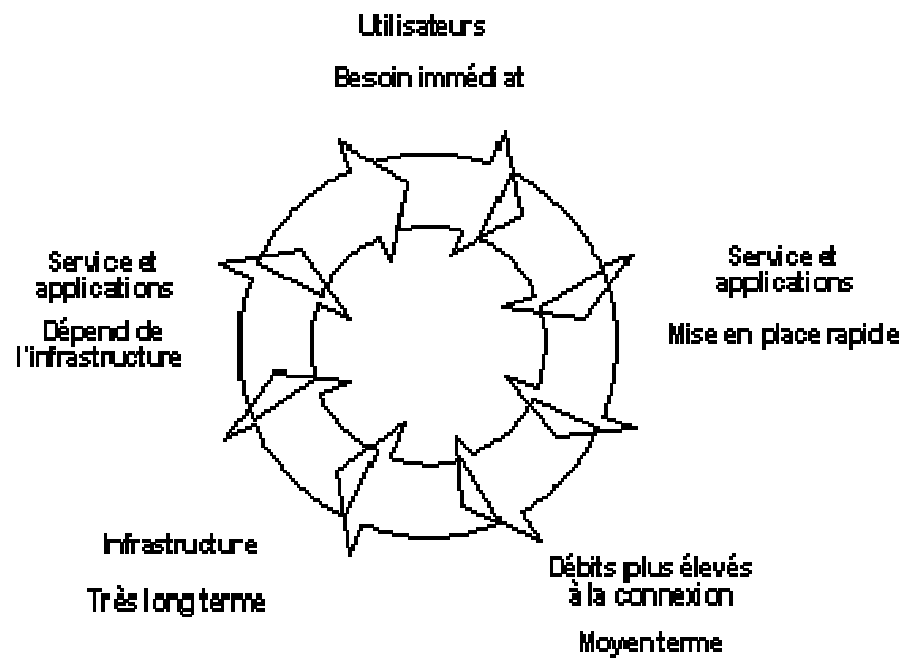


Figure 1.17 : Evolution des services

II.1 Introduction

Les transmissions par fibres optiques sont devenues techniques courantes et éprouvées dans le domaine des télécommunications. Dans les réseaux interurbains, régionaux et inter-centraux, l'utilisation de guides d'ondes optiques représente le mode de transmission le plus fiable et le plus économique lorsque il s'agit d'acheminer des débits élevés sur de grandes distances, mais aussi des nombres élevés de canaux.

La conception des systèmes de transmissions par fibre optique nécessite la connaissance des caractéristiques de fonctionnement des sous ensembles impliqués. Ainsi le concepteur doit prendre en considération des combinaisons variées des composants optoélectroniques et de techniques de modulation afin d'obtenir les performances souhaitées pour la liaison.

II.2 la liaison point à point optique :

II.2.1 Introduction :

Une liaison point à point optique se compose d'un émetteur, d'un multiplexeur/démultiplexeur, d'une ligne de transmission et d'un récepteur. La ligne de transmission est composée par les fibres optiques et les amplificateurs optiques qui substituent les régénérateurs électriques (figure. II.1).

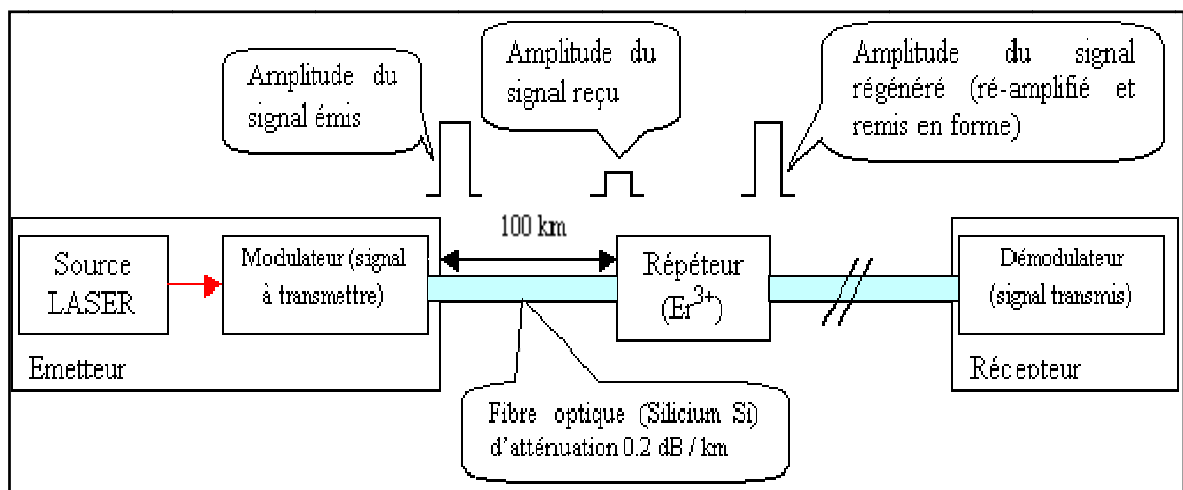


Figure. II.1: liaison optique point à point.

II.2.2 Conversion de signaux électro-optiques :

Pour la transmission des signaux lumineux électro-optiques par fibres optiques il faut, aux deux extrémités de la fibre, des éléments émetteurs et récepteurs capables de convertir des signaux électriques en signaux lumineux et réciproquement (figure. II.2).

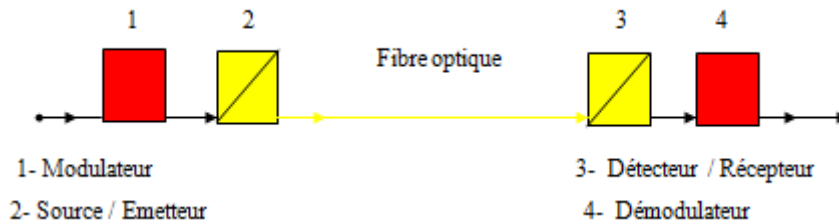


Figure. II.2 : principe d'un système de transmission à fibre optique.

Du côté émetteur, un signal électrique module l'intensité d'une source lumineuse. Le signal optique est couplé dans la fibre et arrive du côté récepteur où un détecteur optique retransforme le signal optique en signal électrique.

Les semi-conducteurs possèdent deux niveaux énergétiques pour les électrons, à savoir la bande de valence et la bande de conduction, séparées l'une de l'autre par l'intervalle de bande E_g (énergie gap) (figure. II.3).

Un photon injecté dans le semi-conducteur cède son énergie h à un électron dans la bande valence, moyen par lequel celui-ci est élevé dans la bande de conduction à un niveau énergétique supérieur. Le photon disparaît et l'électron laisse une place vide, appelé « trou ».

Il s'agit d'une interaction électro-optique, l'absorption (figure II.3(a)).

Les électrons peuvent retomber spontanément dans les « trous » de la bande de valence si la bande de conduction contient déjà des électrons en excès ; dans ce cas les semi-conducteurs peuvent émettre un photon par chaque électron. Ce processus est appelé recombinaison radiative des paires électron-trou, car il ya une recombinaison des porteurs excessifs (électrons excessifs et trou) (figure II.3(b)). On parle d'émission spontanée ou luminescence.

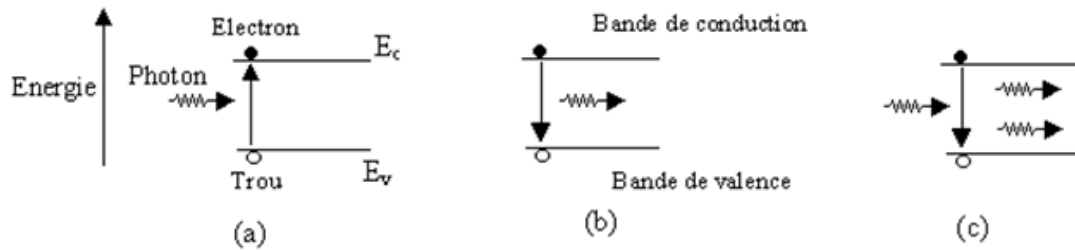


Figure II.3 : Schéma des processus (a) d'absorption (b) d'émission spontanée (c) d'émission stimulée ou une paire électron trou interagit avec un photon.

En revanche, on parle d'émission stimulée quand des photons présents dans le semi-conducteur excitent des porteurs à effectuer une recombinaison radiative, c'est-à-dire qu'ils émettent des photons, ce qu'il faut noter, dans ce cas, c'est que le rayonnement émis est identique, en longueur et en phase, au rayonnement excitant (figure II.3(c)).

Ces trois effets apparaissent toujours simultanément, mais il y a prédominance d'un seul d'entre eux et cela peut être exploité techniquement. Ainsi l'absorption trouve son application dans la photodiode, l'émission spontanée dans la diode électroluminescente et l'émission stimulée dans la diode laser.

Il faut noter qu'un semi-conducteur est appelé de type N, si le courant électrique est conduit surtout par les électrons (porteurs négatifs). Sinon le semi-conducteur est appelé de type P, et le courant électrique est alors conduit par les trous (porteurs positifs), ce qui veut dire qu'il y a un manque d'électrons au semi-conducteur, une combinaison de deux couches, l'une est formée d'un semi-conducteur de type P et l'autre de type N, c'est-à-dire une jonction-PN (PN-jonction) forme une diode.

II.3 Les composants de base d'une liaison optique :

Un système de transmission optique se compose de:

- Un émetteur.
- Multiplexeur/démultiplexeur.
- Une ligne de transmission.
- Un récepteur.

II.3.1 L'émetteur optique :(figure II.4)

Les systèmes de transmission par fibre optique nécessitent des émetteurs optiques qui doivent remplir certaines conditions :

- Faible encombrement.
- Fonctionnement à température ambiante.
- Commande par circuits à semi-conducteurs.
- Capacité à moduler la lumière émise à haute fréquence.
- Spectre d'émission étroit.
- Puissance d'émission importante.
- Grande durée de vie.

Les composants d'émission de lumière qui satisfont le mieux a ces critères sont des composants à semi-conducteurs et se regroupent en deux catégories : les diodes électroluminescentes et les diodes lasers.

Le choix d'émetteur pour une communication optique s'est porté essentiellement sur les semi-conducteurs vus leurs faibles dimensions et leurs grandes fiabilités de transmissions.

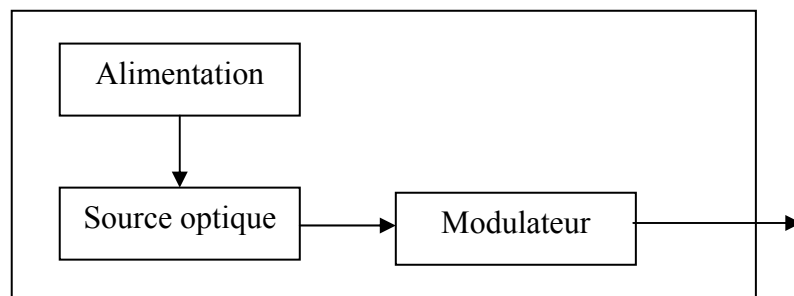


Figure II.4 : Structure d'un émetteur optique.

a- Source optique

Pour que le semi-conducteur puisse émettre des photons par émission spontanée ou stimulée, il faut que des porteurs excessifs soient amenés au semi-conducteur. On obtient ceci en injectant des porteurs de charge via une jonction-PN. Le processus de l'injection de porteurs et l'émission résultante est appelé luminescence à injection. En pratique ce processus trouve ses applications sous forme de sources lumineuses (émetteurs) par exemple les diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes laser (DL).

a.1 Diode électroluminescente (DEL)

Une diode semi-conductrice qui émet de la lumière par émission spontanée, est appelée diode électroluminescente.

Les diodes électroluminescentes de structure simple, ou homojonction, présentent deux inconvénients majeurs : la lumière générée est émise dans toutes les directions d'où pertes importantes et la largeur de signal émis est grande, environ **40nm**. Par contre, leurs avantages sont une grande facilité de " pilotage " et une durée de vie de l'ordre 10^5 à 10^7 heures.

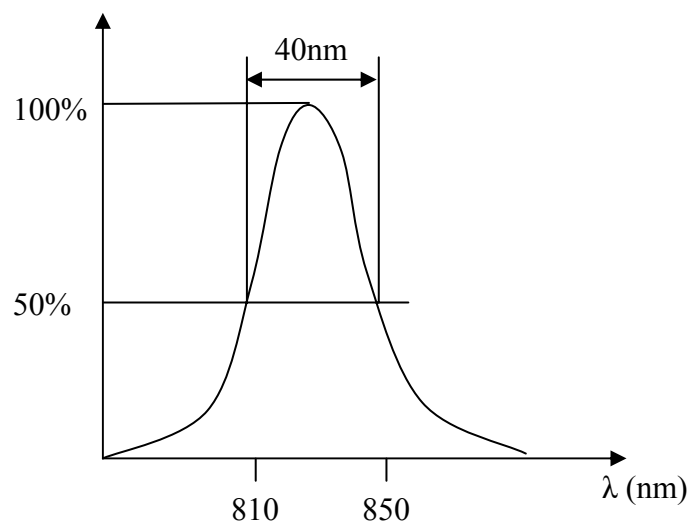


Figure. II.5 : caractéristique spectrale d'une DEL.

La qualité de conversion du courant électrique en lumière est décrite par le rendement quantique, qui désigne le rapport entre le nombre de photons émis par unité de temps et le nombre de charges transportées à travers la jonction-PN de la diode semi-conductrice.

Rendement quantique

Le rendement quantique est défini comme étant le rapport entre le nombre de photons créés et le nombre d'électrons injectés.

$$\eta_q = \frac{\text{Nombre de photons créés}}{\text{Nombre d'électrons injectés}} \quad \text{II.1}$$

L'absence d'amplification limite ce rendement quantique, les recombinaisons (électron-trou) qui se produisent, ne sont pas toutes radiatives à cause des imperfections de la structure cristalline et de la présence d'impuretés.

Ordre de grandeur

- **DEL** à homojonction : $\eta_q \leq 50\%$
- **DL** à double hétérojonction : $60\% \leq \eta_q \leq 80\%$

Comme le rendement quantique décroît avec des températures croissantes, il faut éviter un échauffement de la zone de recombinaisons et en conséquence il faut donc assurer le dégagement de la chaleur par une conformation appropriée de la diode DEL.

La longueur d'onde de lumière dégagée est un autre paramètre important relatif au fonctionnement de la diode DEL. Elle est surtout déterminée par l'intervalle de bande E_g et la relation suivante est applicable :

$$\lambda = \frac{1,24}{E_g} \quad \text{II-2}$$

λ Longueur d'onde, en μm

E_g intervalle de bande, en eV

$$h\nu = 1.24$$

La valeur de E_g d'une diode à l'arséniure de gallium (GaAs) est de 1,43 eV

et $\lambda = 0.89 \mu\text{m}$

Pour le phosphore d'indium (InP) $E_g = 1,35 \text{ eV}$ et $\lambda = 0,92 \mu\text{m}$.

a.2 Diode laser (DL)

La diode laser (DL) (Figure **II.6**) est une autre source lumineuse, utilisant l'émission stimulée.

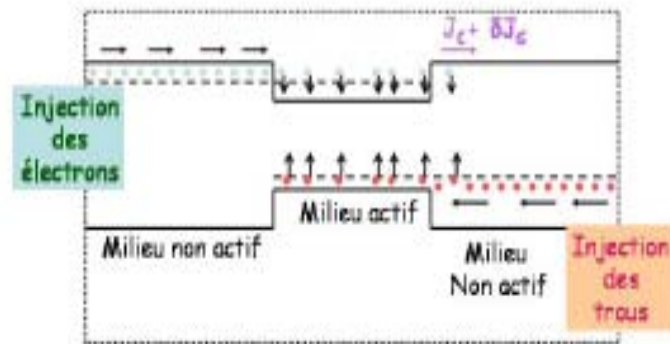


Figure II. 6: représentation schématique d'une diode laser

Les deux faces « miroir » de la diode laser sont des surfaces de cristal naturel, résultant du clivage du cristal semi-conducteur, recouverts d'une couche protectrice.

« LASER » est l'abréviation de « Light Amplification by Stimulated Emission of Rayonnement » (amplification de la lumière par une émission stimulée de rayonnement).

Dans une diode laser on provoque, par l'intermédiaire d'un courant à haute densité, un important excès de porteurs qui rend possible une émission stimulée.

Cet effet d'amplification, dû à une avalanche de photons, est supporté par un résonateur optique qui est généralement constitué par deux miroirs semi transparents à faces planes et parallèle.

Les diodes laser se caractérisent par l'étrécissement de la longueur d'onde qu'elles émettent, le spectre émis se compose de plusieurs raies centrées autour de la longueur d'onde principale (Figure II.7).

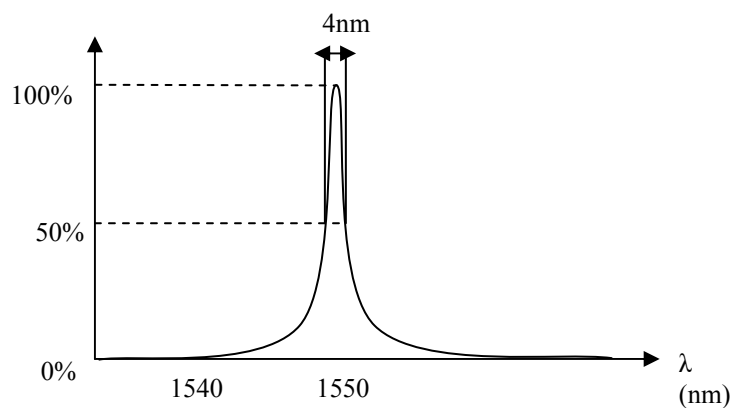


Figure.II.7 : diode laser, caractéristiques spectrales

a.3 La différence entre les diodes DEL et DL

Pour montrer la différence entre une diode électroluminescente et une diode laser, la figure II.8 illustre les courbes caractéristiques de la puissance lumineuse en fonction du courant.

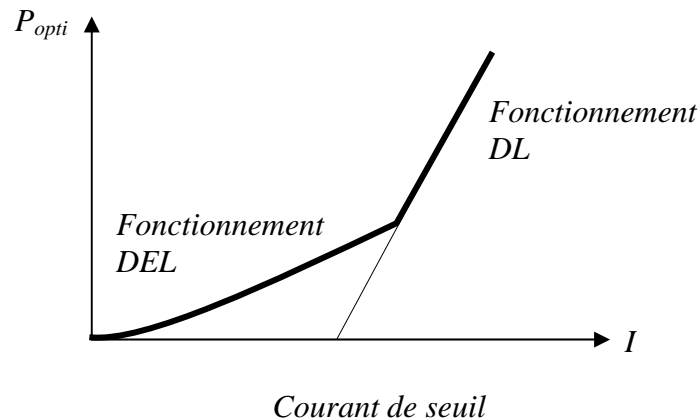
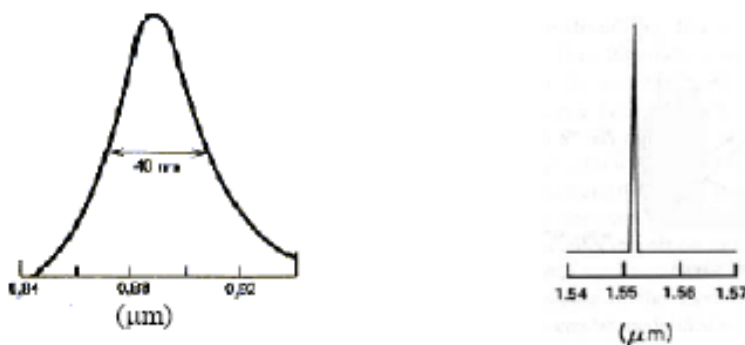


Figure II. 8: Fonction de transfert du LASER

Au fur et à mesure qu'augmente le courant de la diode on atteint un seuil où l'amplification de la lumière au cristal compense les pertes provoquées par l'affaiblissement et les radiations. Au-dessus de ce seuil une forte émission laser commence. Contrairement à la DEL et à sa large répartition spectrale, l'émission de la diode laser a lieu en une ou quelques raies spectrales. (Figure II. 9).



(a) Spectre d'émission d'une DEL

(b) Spectre d'émission d'une DL

Figure II.9 : spectre d'émission d'une source optique

La largeur d'un spectre d'émission est habituellement indiquée sous forme de largeur spectrale (à mi-hauteur du pic) $\Delta\lambda$ ou comme largeur spectrale effective $\Delta\lambda_{\text{eff}}$. La relation suivante est vérifiée pour un spectre gaussien :

$$\Delta\lambda = \sqrt{\ln 4} \cdot \Delta\lambda_{\text{eff}} \approx 1,18 \cdot \Delta\lambda_{\text{eff}}$$

$$\text{Ou } \Delta\lambda_{\text{eff}} \approx 0,85 \cdot \Delta\lambda \quad \text{II.3}$$

Le rayonnement par émission stimulée d'une diode laser est spatialement cohérent, ce qui n'est pas le cas pour une DEL. Comparé à celui de la DEL, le lobe de rayonnement est beaucoup plus étroit et ceci facilite un couplage particulièrement efficace du rayonnement dans la fibre.

b- Différents types de laser

b.1 Laser à homojonction

La première génération de laser a été réalisée à partir d'une homojonction PN à base d'AsGa fonctionnant à une longueur d'onde voisine de $0,85 \mu\text{m}$.

(Figure II. 10)

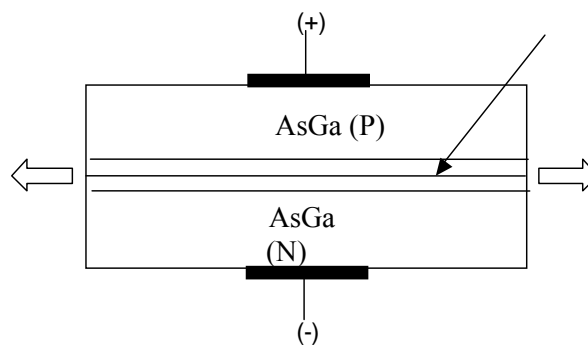


Figure II. 10 : LASER à homojonction PN

Ce type de laser présente des courants de seuil important ($I > 10A$), ce qui provoque un échauffement important de la jonction et entraîne sa détérioration. Dans ces conditions, ce laser ne peut pas fonctionner en continu, il est surtout utilisé en régime impulsionnel.

b.2 Laser à double hétérojonction

La deuxième génération de laser qui est apparue est celle des lasers à double hétérojonction fonctionnant avec des courants de seuils beaucoup plus faibles. Cette génération de laser peut être utilisée en régime continu (Figure II.11)

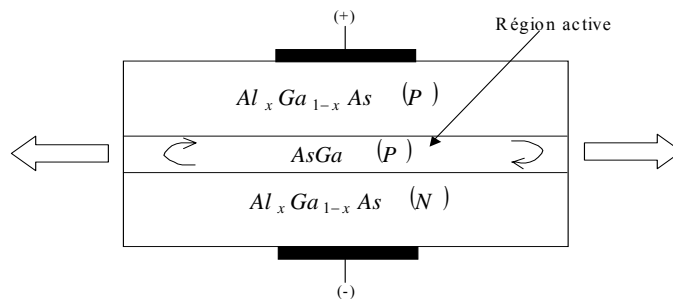


Figure II.11: Laser à double hétérojonction

c- Caractéristiques principales

c.1 Mode de propagation

Dans la cavité du laser, les ondes stationnaires qui s'établissent donnent naissance à deux types de modes :

- Des modes longitudinaux qui s'établissent le long de la cavité.
- Des modes latéraux qui s'établissent dans le plan transversal.

c.2 Caractéristique en puissance

L'évolution de la puissance optique fournie par le laser en fonction de son courant de polarisation ne présente pas une bonne linéarité. Cette non linéarité rend délicate l'utilisation de ce type de source dans les transmissions analogiques (Figure II. 12)

Le courant de seuil, très sensible à la température, est donné par :

$$I_{seuil} = I_0 \exp \frac{T}{T_0} \quad \text{II-4}$$

Où T et T_0 représente la température de fonctionnement et la température absolue.

L'augmentation de la température T entraîne une modification du courant de polarisation ce qui nécessite l'utilisation d'un dispositif de régulation de la température

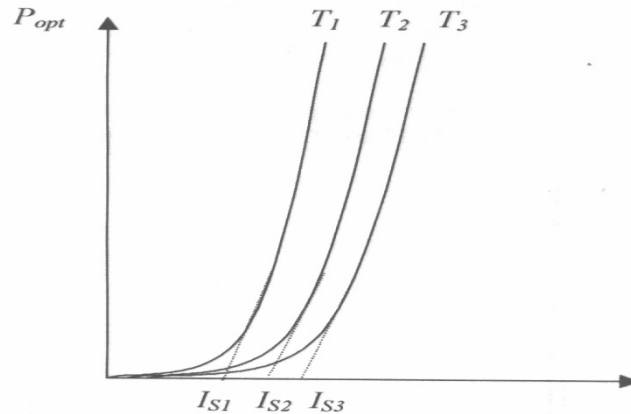


Figure II. 12 : Caractéristique de transfert pour différentes températures

c.3 Diagramme de rayonnement

Le rayonnement de l'onde optique issue des 'ouvertures' réalisées dans les miroirs concerne les modes longitudinaux.

c.4 Spectre d'émission

La cavité existante dans le laser est responsable de la discrétisation des modes de résonance. La qualité et la longueur de la cavité ont une influence directe sur la largeur de chaque mode de résonance (laser multimode) ainsi que sur leur espacement.

Augmentation du facteur de qualité \Rightarrow diminution de la largeur spectrale.

Augmentation de la longueur du laser \Rightarrow diminution de l'espacement entre modes.

d - Choix de la source :

Le débit de l'information, lié à l'intervalle de temps minimum entre bits successifs est limité par la dispersion chromatique de la fibre. En effet, la source lumineuse émettrice n'étant pas rigoureusement monochromatique, ses différentes composantes spectrales se propagent à des vitesses différentes, ce qui entraîne un élargissement

temporel des impulsions. Pour minimiser cet effet, il faut soit se placer dans la région spectrale où la dispersion chromatique de la fibre est minimale soit utiliser une source extrêmement chromatique, et si possible les deux à la fois.

L'utilisation de sources extrêmement monochromatiques rend possibles des techniques de transmission cohérente dans laquelle l'information est codée non plus sur l'intensité (par modulation d'intensité) mais sur la phase de l'onde (modulation de phase). La lecture de l'information est assurée en mélangeant le signal avec le faisceau d'un autre laser qui joue le rôle d'oscillateur local (détection homodyne ou hétérodyne).

L'utilisation de diodes lasers (DL) semble donc idéale pour les télécoms optiques. Cependant, les DLs sont des structures complexes et nécessitent des systèmes d'asservissement (boucles de contre-réaction) pour assurer le contrôle en température, de la longueur de la cavité (pour certaines DLs), des vibrations, etc... Un apport d'énergie électrique supplémentaire est aussi indispensable afin d'atteindre le seuil laser. Tout ceci permet d'obtenir une largeur de raie très fine, une cohérence de la source, ainsi qu'une stabilité relativement importante, mais le coût de revient est élevé. L'utilisation d'une source incohérente telle qu'une DEL est possible mais reste réservée aux transmissions sur de courtes distances en raison de non monochromaticité de celle-ci (dispersion dans la fibre notamment).

La cohérence et la monochromaticité (concepts intimement liés) d'une source telle qu'une DL amène une plus grande finesse aux télécoms optiques, mais aussi une plus grande complexité des traitements du signal et donc du matériel pour le traiter.

e- Module laser

L'exploitation pratique des diodes lasers requière la combinaison de plusieurs groupes de fonction. Ceux-ci sont logés dans un boîtier étanche. L'unité assemblée est appelée module laser ou tête optique.

La figure II.13 montre la structure schématisée d'un module laser. La construction modulaire assure une adaptation simple de la DL à la partie liaison de transmission. L'adaptation optique est réalisée dans le module : on accouple de façon optimale (l'ajustage de la fibre est nécessaire) une courte fibre amorce (pigtail) à la surface rayonnante et on la fait sortir de manière étanche du boîtier.

Le groupe de fonction servant au réglage de température est particulièrement important. Pour cela, on utilise, entre autre, des éléments Peltiers.

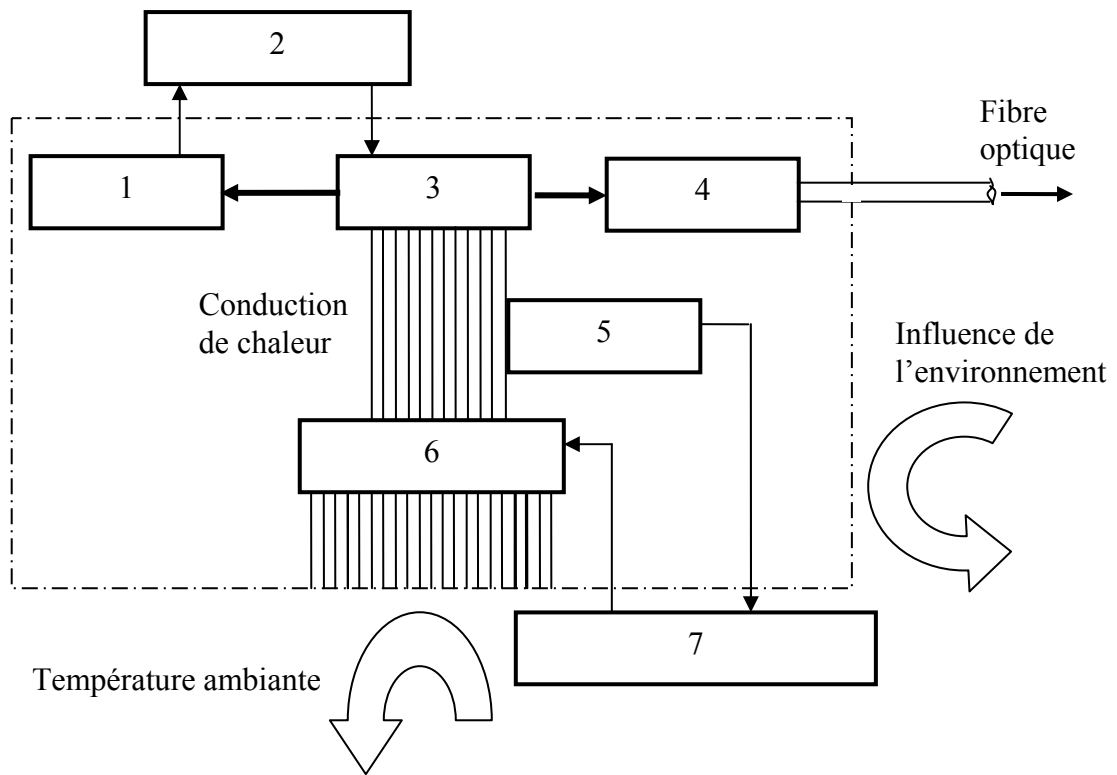


Figure.II.13 : principe de construction modulaire d'un module laser

- | | |
|---------------------------|-------------------------------------|
| 1 Diode de contrôle. | 2 Réglage électrique et modulation. |
| 3 Diode laser (DL). | 4 Adaptation optique. |
| 5 Thermistance. | 6 Élément peltier. |
| 7 Réglage de température. | |

I1.3.2. Modulateur de la lumière

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

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

On peut moduler ces sources de deux manières différentes.

I1.3.2.1 Modulation directe : on agit sur le courant de jonction qui provoque l'effet laser. En première approximation, la puissance optique délivrée varie linéairement en fonction du courant.

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

I1.3.2.2 Modulation externe : le champ émis par la source n'est pas modulé et passe par un circuit optique spécial où l'on peut provoquer une modulation de phase ou d'amplitude. Les modulateurs d'amplitude ne présentent aucune propriété de linéarité mais introduisent beaucoup moins de conversion amplitude-fréquence. Le signal modulé envoyé dans la fibre est donc nettement moins affecté par ce phénomène mais également moins puissant que dans le cas de la modulation directe.

Le principe physique utilisé dans ces modulateurs externes est soit la variation de l'indice de réfraction soit la variation de l'absorption (dispositifs à base de semi-conducteurs).

- Pour les **modulateurs électroréfractifs**, le matériau utilisé est le niobate de lithium (LiNbO_3) dans une configuration d'interféromètre de Mach-Zehnder en onde guidée. La phase de l'onde lumineuse est modifiée dans un des bras au rythme de la tension appliquée au matériau de ce bras. Il en résulte, après recombinaison des deux ondes, des interférences constructives ou destructives suivant la tension appliquée.

- Pour les **modulateurs électroabsorbants**, à base de semi-conducteur, la modulation de la puissance lumineuse résulte directement de la variation de l'absorption du matériau avec le champ électrique.

II.3.3 Multiplexeur/démultiplexeur en longueur d'onde

II.3.3.1-Introduction

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

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

II.3.3.2-Principe :

Disposant des sources émettant à des longueurs d'ondes différentes $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$, on a la possibilité de les coupler à une même fibre optique. A l'autre extrémité de la fibre, les signaux $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ seront séparés spatialement vers des détecteurs différents. Le composant d'entrée devra introduire dans la fibre avec le minimum de pertes possible, les signaux issus de sources différentes: c'est un multiplexeur. Le composant effectuant l'opération symétrique est un démultiplexeur (**Figure II.14**).

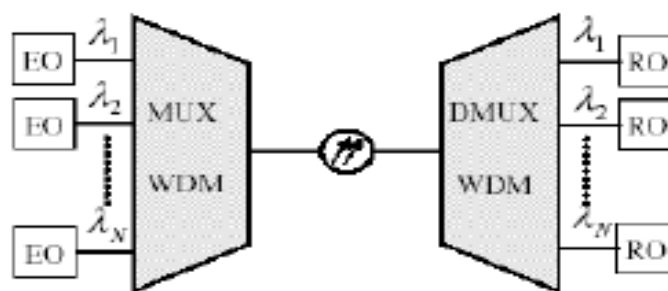


Figure II.14 : Multiplexeur/Démultiplexeur en longueur d'onde

II.3.4 Canal de transmission :

II.3.4.1-la fibre optique :

Une fibre est un guide d'onde optique permettant de conduire la lumière sur une grande distance, ce guide est constitué de deux diélectriques:

- Un diélectrique interne : le cœur d'indice de réfraction n_1 .
- Un diélectrique externe : la gaine d'indice de réfraction n_2 légèrement inférieure à celui du cœur.



Figure. II.15 : Constitution générale d'une fibre optique.

Fibre monomode (9/125)

Fibre dans laquelle un seul faisceau lumineux circule à la longueur d'onde considérée.

Le cœur d'une fibre monomode est de faible diamètre (typiquement $9 \mu\text{m}$) (figure II.16).



Figure II.16 :Fibre monomode

Coeur : Silice, $\varnothing=9\mu\text{m}$

Gaine optique: Silice, $\varnothing= 125 \mu\text{m}$

Revêtement de protection:Matériau plastique ($\varnothing=250 \mu\text{m}$)

II.3.4.2 Caractéristiques de transmission : (figure II.17)

_ La fibre monomode est utilisée pour les liaisons à débits importants, pour les longues distances supérieures à 1km ou pour les réseaux nécessitant peu de points de raccordement.

_ La fibre monomode est très performante. La bande passante permet de transmettre un très grand nombre d'informations.

_ L'ouverture numérique faible (0,113) nécessite une source lumineuse cohérente (Laser).

_ Le cœur d'un diamètre faible nécessite des manipulations relativement délicates ainsi qu'un matériel de haute précision.

	Données optiques				Données géométriques		
	Affaiblissement max. (dB/Km)		Dispersion chromatique max. (ps/nm.km)		Ø de champ de mode 1550 nm (µm)	Ø gaine silice (µm)	Ø revêtement primaire (µm)
	1300 nm	1550 nm	1300 nm	1550 nm			
Fibre 9/125	0,45	0,28	3,5	18	9,3±0,5	125 ± 3	245 ± 10

Figure II.17 : Caractéristiques de transmission d'une fibre monomode

II.3.4.3 Raccordement des fibres optiques

Le raccordement des fibres optiques pour les transmissions à grande distance est indispensable, cela nécessite de les couper à la longueur appropriée à chaque répéteur et de les connecter à d'autres composants.

Lorsque les câbles optiques ont été mis en place, vérifiés par un réflectométrie, pour détecter des dégâts éventuels que la fibre aurait pu subir lors du tirage, il ne reste plus qu'à poser les connectiques appropriées. Soit de type connecteurs ou des épissures, qui permettent de réaliser ce raccordement.

II.3.4.4 Type de raccordement

Selon la nature de la liaison à établir, on peut distinguer trois types de raccordements :

- les raccordements fixes.
- les raccordements semi-fixes.
- les raccordements démontables.

a. Les raccordements fixes

Ce sont des raccordements qu'il ne sera plus possible d'ouvrir une fois qu'ils sont posés, leur destination principale est la mise bout à bout de plusieurs câbles optiques afin de constituer des liaisons à grande portée.

Trois techniques sont utilisées dans ce type de raccordement :

a.1 la soudure :

La soudure est une technique de raccordement fixe la plus récente, cela consiste à chauffer les deux extrémités de la fibre de manière que la silice atteigne son point de fusion. On obtient ainsi une soudure sans apport de matériau.

Les épissures par fusion présentent des pertes d'insertion très faibles moins de 0.1 dB, pas de réflexion parasite et encombrements très réduits.

a.2 Le collage :

Le principe est de noyer dans la colle deux fibres positionnées l'une en face de l'autre. Pour cela on utilise un centreur en élastomère translucide dans lequel une rainure est gravée.

Ce type de raccordement présente un affaiblissement voisin de 0.1 dB.

a.3 Le sertissage :

Le sertissage est un moyen d'épissurer deux fibres qui est simple d'utilisation, et qui assure une bonne protection. Il existe différents types de sertissage, suivant les fabricants qui les ont développés, le principe de fonctionnement est toujours le même.

Le sertissage présente l'avantage d'être facile et rapide, la qualité reste tout de même très bonne, les pertes typiques sont de l'ordre de 0.1 dB.

b. Les raccordements semi-fixes :

Ce type de raccordement est un moyen qui permet de mettre les deux fibres bout à bout d'une façon non permanente. On trouve dans cette catégorie de raccordement dans :

- Le domaine optique: utilisé pour effectuer des mesures comme la vérification du tirage d'un câble avant la mise en place de la connectique définitive.
- Le bornier optique: se présente sous forme d'un raccordement modulaire.

- L'adaptateur pour fibre nue.

c. Les raccordements démontables :

On utilise dans ce type de raccordement, les connecteurs qui réalisent un raccordement avec une bonne résistance mécanique, utilisé en un nombre de manœuvres importantes, il est généralement constitué de deux fiches et d'un raccord ou d'une embase et d'une fiche, les connecteurs sont utilisés aux extrémités de la liaison pour le raccordement aux équipements d'émission et de réception et dans les répartiteurs optiques.

Aujourd'hui les connecteurs pour fibres monomodales ont une perte d'insertion moyenne inférieure à 0.5dB.

II.3.4.5 Répéteur ou régénérateur de signal

Il existe deux solutions d'ingénierie d'un répéteur :

- solution électro-optique : le faible signal optique reçu est converti en signal électrique par un photo-détecteur, est électriquement amplifié et module un faisceau LASER en sortie (conversion électrique-optique) (**figure II.18**)
- solution purement optique : le faible signal reçu est mélangé avec le signal issu d'un LASER optique et est amplifié par un amplificateur optique à base d'ions Er^{3+} (**figure II.19**).

Exemple : Dans le cas d'une liaison transatlantique Paris-New York, 60 à 70 répéteurs sont nécessaires.

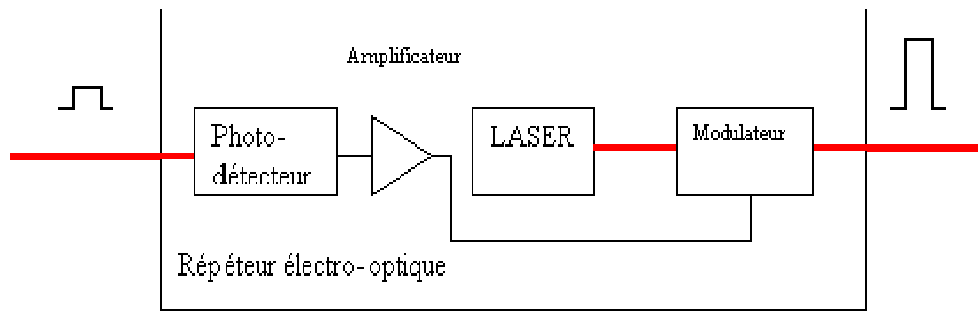


Figure II.18: Répéteur électro-optique

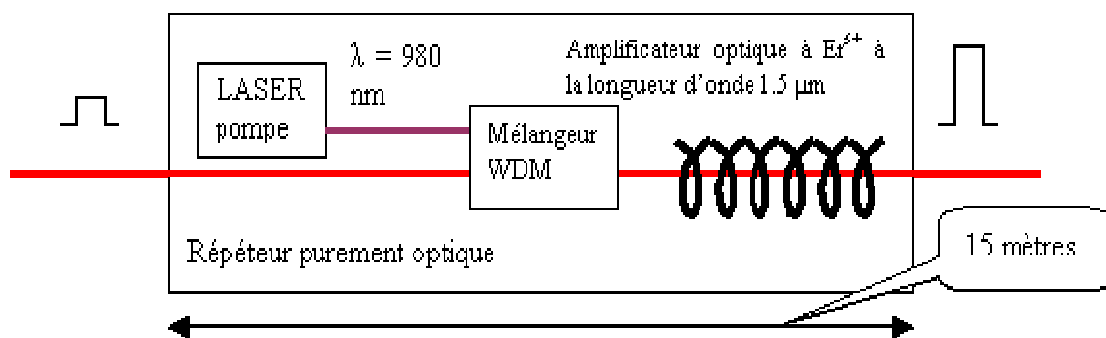


Figure II.19: Répéteur purement optique

II.3.5 Le récepteur optique

Le but du récepteur est d'extraire avec des moyens fiables l'information transmise à partir du signal optique reçu.

II.3.5.1 Photodétecteur

Le Photodétecteur est un composant essentiel dans les communications par fibres optiques. Son rôle est de convertir en énergie électrique la puissance optique reçue (photons).

En télécommunications optiques les détecteurs doivent avoir :

1. une grande sensibilité.
2. une grande bande passante
3. un faible bruit additionnel.

II.3.5.2 Les différents types de photodétecteur

a. Les photodiodes (PIN)

Cette photodiode polarisée en inverse, est réalisée à partir de trois couches de semi-conducteur. Deux couches fortement dopées P+ et N+ entre les quels existe une couche de grande résistivité (presque intrinsèque) où il existe très peu de charge mobiles.

Les paramètres importants, qui caractérisent une photodiode PIN dépendent du matériau et de structure.

b. Photodiode à avalanche (APD)

Lorsque la puissance lumineuse reçue est très faible (quelque nm), les courants détectés sont peu élevés (quelques nA) 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 l'effet de multiplication par impact qui est le principe des photodiodes à gain interne de type avalanche.

(Figure II. 20).

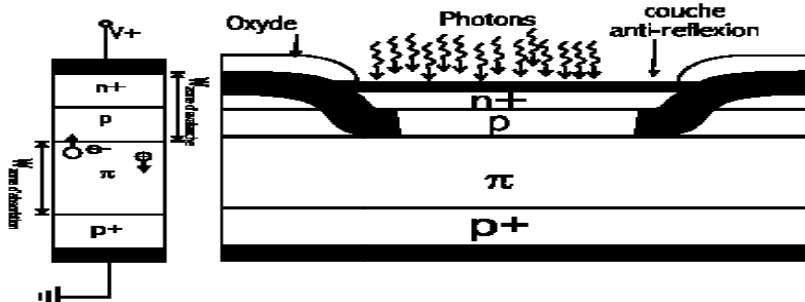


Figure II. 20: Schéma d'une photodiode à avalanche.

C. Comparaison entre PIN, APD :

Caractéristiques	PIN	APD
Technologie	simple	complexe
Mise en œuvre	simple	délicate
Gain interne	non	Oui (gain d'avalanche)
Tension de polarisation	faible	élevée
Courant d'obscurité	faible	moyenne
Facteur d'accès de bruit	non	oui

II.4 Composants optiques

II.4.1 Introduction

Le développement rapide de la technologie fibre optique dans les télécommunications et en instrumentation a nécessité un besoin croissant de composants actifs et passifs en optique guidée. Par exemple des composants optiques tels que les coupleurs source-fibre, les épissures, les connecteurs, les coupleurs directionnels, les multiplexeurs, les commutateurs et modulateurs sont des éléments essentiels pour les transmissions et les capteurs.

- Dans les lignes de transmission par câbles optiques et raccordements point à point, les extrémités des câbles se terminent par des connecteurs ; ceux-ci doivent être compatibles avec les dimensions des interfaces des diodes émettrices et réceptrices.

II.4.2 Isolateur

En pratique comme en électricité, un isolateur est un dispositif passif non réciproque qui a une faible atténuation dans un sens et une forte atténuation dans l'autre sens. Il a donc une entrée et une sortie et fonctionne comme une 'diode optique', ne laissant passer la lumière que dans une direction.

L'inclusion d'un isolateur s'impose dès que le système dans lequel est utilisé l'amplificateur présente des réflexions de l'ordre de $1/10G$ où G est le gain maximum de l'amplificateur (pratiquement, l'isolateur est nécessaire dès que le gain excède 25 dB).

Au-delà, le niveau d'ESA augmente (dégradation du rapport signal sur bruit) et peut saturer le gain de l'amplificateur (réduction du gain).

De plus l'isolateur en entrée arrête l'ESA contrapropagative et protège le laser d'émission du signal. Il prévient également les oscillations laser au sein de l'amplificateur en atténuant tout signal ou bruit provenant d'une réflexion au delà de l'amplificateur.

En sortie, il protège de l'ESA contrapropagative d'un amplificateur situé en aval, et prévient également l'oscillation induite par une réflexion. Il est préférentiellement placé en sortie dans les préamplificateurs pour limiter les pertes en entrée qui dégradent le facteur de bruit. Récemment, des isolateurs ont été placés entre deux parties amplificatrices permettant d'atteindre des gain importants (supérieurs à 50dB).

II.4.3 Les coupleurs :

Ces sont des composants pour points d'accès utilisés dans les réseaux à fibres optiques. Ils servent à connecter des portions de fibres optiques entre elles, en raison d'assurer un bon transfert de puissance et de minimiser toutes sortes de pertes. Pour que les coupleurs permettent une diffusion efficace d'informations, ils doivent satisfaire à deux conditions fondamentales :

- Leur panne ne doit pas perturber le système auquel ils donnent accès.
- Le prélèvement de données en un point ne doit pas soutirer plus de quelques pour-cent de la puissance transmise.

Il existe plusieurs formes de coupleurs, telles que les coupleurs étoiles qui disposent de N entrées et N sorties, les coupleurs séries qui disposent de deux entrées et une sortie ou inversement, les coupleurs en T et les coupleurs en Y.

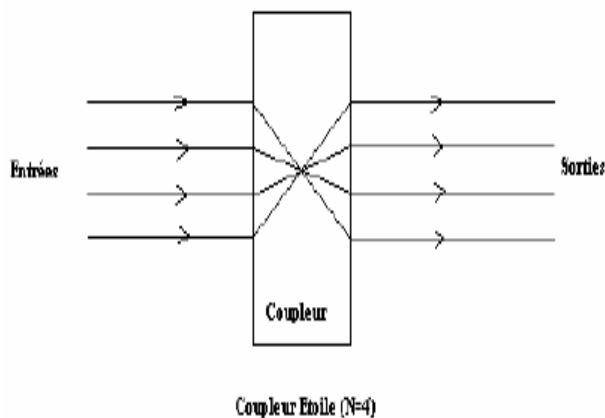


Figure II.21 : Coupleur étoile.

Le coupleur se compose de guides constituant ses entrées et ses sorties. En effet, la figure suivante présente un exemple de coupleurs à deux entrées et une sortie.

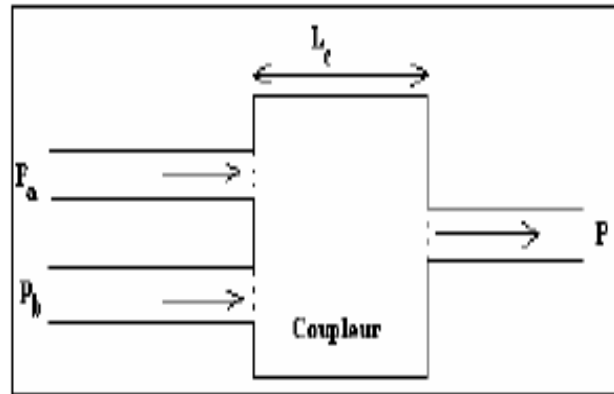


Figure II. 22 : coupleur à deux entrées et une sortie

Les puissances P_a et P_b injectées dans les deux guides du coupleur ont pour expressions :

$$P_a = \sin^2(k.z)$$

$$P_b = \cos^2(k.z)$$

Où z : Direction de propagation de la lumière le long du coupleur.

Et k : Coefficient de couplage entre les modes des deux guides d'ondes.

Pour assurer le transfert de toute la puissance optique, le coupleur doit avoir

$$\text{une longueur } L_c : L_c = \frac{\pi}{2k}$$

II.4.4 Les filtres optiques

Le filtrage a pour but de limiter l'occupation spectrale d'un signal. La séparation spectrale est réalisée en réfléchissant une certaine gamme de longueurs d'onde et en transmettant les autres. On caractérise donc le filtre par sa bande passante, c'est-à-dire le domaine de fréquences (ou de longueurs d'onde) pour lequel il laisse passer la lumière et par sa bande atténuée, c'est-à-dire le domaine de fréquences (ou de longueurs d'onde)

Chapitre II: Description générale d'une liaison optique point à point

pour lesquelles il réfléchit la lumière incidente. Ces deux domaines spectraux peuvent être très larges notamment pour les filtres passe-haut et passe-bas.

Les fibres optiques possèdent de nombreuses qualités pour transmettre une grande quantité d'informations sur de longues distances. Plusieurs de leurs défauts ont été énumérés (par exemple la dispersion chromatique) et des solutions sont proposées pour les corriger (fibres de compensation). Sont apparus sur le marché depuis quelques années des amplificateurs optiques pour remédier à l'atténuation du signal dans les fibres.

III.1 Introduction

Le signal transmis est dégradé sous l'effet de plusieurs phénomènes :

— le bruit du récepteur d'une part, celui apporté par les amplificateurs en ligne, d'autre part.

— les défauts de propagation qui peuvent eux-mêmes se diviser en défauts linéaires (dispersion chromatique, dispersion modale, dépolarisation) et non-linéaires (effet Raman stimulé, effet Kerr, instabilité de modulation). Certains de ces défauts se manifestent même en présence d'une seule porteuse et leur effet peut être traité canal par canal dans le cas d'un système WDM. D'autres au contraire n'apparaissent qu'en présence de plusieurs porteuses (mélange à quatre ondes).

Les effets non linéaires ne sont devenus importants qu'avec l'apparition d'amplificateurs à fibre et ceci pour deux raisons :

— les puissances injectées dans la fibre ont atteint des valeurs élevées (plusieurs dizaines de dBm). Ces valeurs peuvent paraître modestes, mais il ne faut pas oublier que le paramètre critique est la densité surfacique de puissance dans la fibre, qui est égale au rapport de la puissance transmise à l'aire efficace du mode, c'est-à-dire l'aire sur laquelle est concentrée l'énergie. Rappelons qu'elle est typiquement de quelques dizaines de μm^2 ($50 \mu\text{m}^2$ pour une fibre standard). Une puissance de 20 dBm (100 mW) correspond alors à une densité de $2 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$.

— comme les effets linéaires, les effets non-linéaires se cumulent le long d'une liaison amplifiée.

Effets linéaires et non linéaires ne peuvent pas en général être séparés, puisque la modulation de phase induite par l'effet Kerr modifie la sensibilité du signal à la dispersion chromatique.

Le calcul des performances d'un système dans le cas le plus général où tous les phénomènes agissent simultanément ne peut se faire qu'à l'aide de logiciels de simulation complexes.

III.2 Sources et bruit des sources

Comme tout oscillateur électromagnétique, un laser ne délivre jamais une onde sinusoïdale parfaite. Celle-ci est affectée par des bruits d'amplitude et de phase qui contribuent à dégrader les performances des systèmes de communication. Les

fluctuations d'amplitude sont habituellement caractérisées par le bruit relatif d'intensité (RIN Relative Intensity Noise), défini comme le rapport de la densité spectrale de puissance des fluctuations de puissance normalisée à la puissance moyenne émise. Si la puissance émise est exprimée comme $\langle P \rangle + \Delta P$ où $\langle P \rangle$ est la puissance moyenne et ΔP la fluctuation aléatoire autour de celle-ci, $\text{rin}(f)$ est défini comme :

$$\text{rin}(f) = \frac{1}{(\langle P \rangle)^2} \int \langle \Delta P(t) \Delta P(t - \tau) \rangle \exp(-2i\pi f \tau) d\tau \quad \text{III.1}$$

Et le paramètre utilisé en pratique est $\text{RIN}(f)$ défini comme $10 \log \text{rin}(f)$, exprimé en dB·s ou dB/Hz. Les meilleurs lasers aujourd'hui disponibles présentent des valeurs de RIN inférieures à -155 dB/Hz au double de leur courant de seuil et les fluctuations d'amplitude ne sont pas un facteur limitatif pour les systèmes de communication numérique à haut débit. En revanche, dans les systèmes utilisant des multiplex de sous-porteuses en modulation analogique, le bruit d'intensité des lasers est un paramètre très critique, et c'est la mise au point de ces systèmes qui a suscité des efforts de recherche importants pour produire des lasers avec de très faibles valeurs de RIN.

III.3 Atténuation

III.3.1 Atténuation totale

Si l'on injecte une puissance lumineuse P_0 à l'extrémité d'une fibre, on ne récupère qu'une fraction P_1 de P_0 à l'autre extrémité. L'atténuation de la fibre est le rendement exprimé en décibel sous la forme :

$$A \text{ (dB)} = 10 \log (P_1/P_0) \quad \text{III.2}$$

III.3.2 Mécanismes de l'atténuation

Deux phénomènes, explicités ci-dessous et dont les effets se cumulent, participent à l'atténuation de la lumière par la fibre (**figure III.1**) :

- l'absorption P_3 .
- la perte P_2 , due à la diffusion de RAYLEIGH, aux imperfections de la fibre, au couplage des modes ou venant de sa mise en œuvre (câblage par exemple).

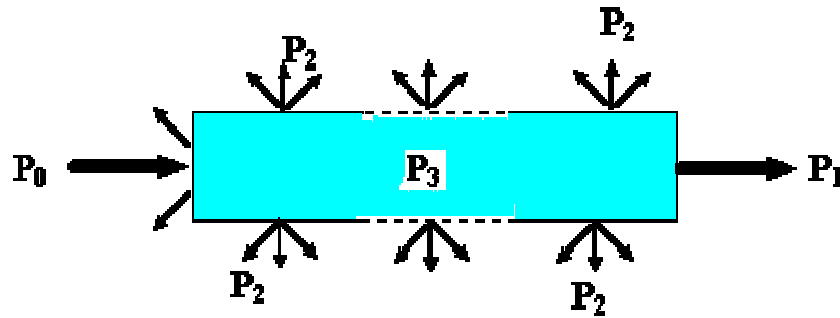


Figure : III.1 Pertes dans la fibre

P_0 = puissance injectée dans la fibre.

P_1 = puissance récupérée à l'autre extrémité.

P_2 = puissance diffusée.

$P_3 = P_0 - (P_1 + P_2)$ puissance absorbée par la fibre.

III.3.3 Absorption

Sous l'influence d'un photon d'énergie suffisante, un électron peut être porté à un niveau d'énergie supérieur à celui où il se trouvait. Une partie de l'énergie du rayonnement incident est ainsi absorbée par le matériau (**figure III.2**).

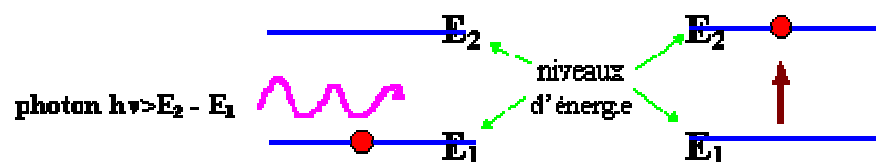


Figure : III.2 Phénomène d'absorption

Cette interaction rayonnement matière s'applique au matériau constituant la fibre (absorption intrinsèque), mais aussi aux impuretés qu'elle contient et qui sont la conséquence du mode de fabrication (ion Fe^{3+} , OH^- , etc. ...) (Absorption extrinsèque). A titre d'exemple, un taux d'impuretés de quelques pm d'ions Fe^{3+} entraîne, à 850 nm, une atténuation de 130 dB/km ; on comprend donc la nécessité de fabriquer des matériaux extrêmement purs.

III.3.4 Diffusion

III.3.4.1 Diffusion de RAYLEIGH

Elle provient des variations de l'indice de réfraction du matériau sur des longueurs inférieures à la longueur d'onde de la lumière ; elle se traduit par une perte de puissance lumineuse inversement proportionnelle à λ^4 (loi de Rayleigh).

$$\alpha_{Ray}(dB) = 10 \log [\exp(\gamma_R)] \quad \text{III.3}$$

γ_R est le coefficient de diffusion de Rayleigh, dépend des matériaux (m^{-1}).

Dans le Cas de la silice SiO_2

$$\gamma_R (m^{-1}) = 1,895 \cdot 10^{-28} / \lambda^4. \quad \text{III.4}$$

Longueur d'onde λ (μm)	Atténuation α_{Ray} (dB/km)
0,85	1,58
1,30	0,29
1,55	0,14

Tab : III.3 : l'atténuation de Rayleigh dans la silice (SiO_2) en fonction de la longueur d'onde.

III.3.4.2 Diffusion due aux défauts de la fibre

Les variations locales du diamètre du cœur, micro courbures, vont faire qu'un certain nombre de rayons vont subir une réfraction dans la gaine, entraînant une perte d'énergie. Cette perte d'énergie est d'autant plus grande que les rayons sont plus inclinés par rapport à l'axe, on définit "l'atténuation différentielle" comme la différence d'atténuation entre un rayon axial et un rayon incliné de θ par rapport à l'axe.

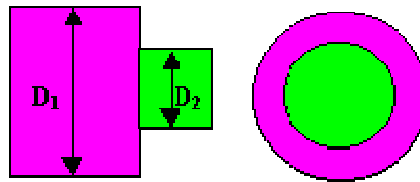
III.3.5 Atténuation par connexion

Une liaison à fibre optique nécessite toujours un couplage source-fibre ou fibre-détecteur, celui-ci est réalisé par des connecteurs d'extrémité. Une liaison peut également nécessiter le raccordement de fibres entre elles. Cette connexion peut être démontable (connecteurs fibre à fibre) ou permanente (épissurage, jointage). Toute interconnexion doit causer le minimum de pertes.

III.3.5.1 Diamètres de cœur différents

Pour cette manipulation, on utilisera la fibre monomode, de diamètre $10 \mu\text{m}$ et une fibre multimode de diamètre $50 \mu\text{m}$. Si l'on suppose, en première approche, l'énergie répartie de manière homogène dans les fibres, l'affaiblissement, dans le sens de transmission gros cœur vers petit cœur, est :

$$A = 20 \log D_2 / D_1 \quad \text{III.5}$$



III.3.5.2 Ouvertures numériques différentes

Soit ON_F l'ouverture numérique de la fibre, ON_E l'ouverture numérique de l'émetteur (diode) et ON_R celle du récepteur (photodiode).

Les pertes à l'émission sont données par :

$$P_{ONe} = 20 \log \left(\frac{ON_F}{ON_E} \right) \quad \text{III.6}$$

Et à la réception par :

$$P_{ONs} = 20 \log \left(\frac{ON_R}{ON_F} \right) \quad \text{III.7}$$

Ce calcul n'est valable que si $ON_R < ON_F$ et que $ON_F < ON_E$. Dans le cas contraire, les pertes seront nulles.

$$\text{Avec } ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{III.8}$$

III.3.5.3 Pertes d'épissurage

La réalisation de fibres de plusieurs km résulte toujours de la mise bout à bout de tronçons plus courts. A chaque jonction, le raccordement entre deux tronçons va présenter 4 types de défauts tous combinables entre eux (**figure III.4**)

1 Pertes liées à l'écart axial

Ces pertes sont données en fonction de la distance (l) entre les deux fibres, de l'indice de réfraction des fibres (n), du diamètre des fibres (D) et de la longueur d'onde utilisée

$$\text{(figure III.4. (b)) : } P_{ax} \text{ (dB)} = -10 \log \left(1 + \left(\frac{l \cdot \lambda}{2 \pi n D} \right)^2 \right) \quad \text{III.9}$$

2 Pertes liées à l'écart radial

Ces pertes sont données par l'expression :

$$P_{rad} \text{ (dB)} = 10 \log \left(\exp \left(- \frac{d^2}{D^2} \right) \right) \quad \text{III.10}$$

Où d est la distance entre les axes des deux fibres (figure III.4. C).

3 Pertes liées à l'écart angulaire

Ces pertes sont données par l'expression (figure III.4.(d)) :

$$P_{ang} \text{ (dB)} = 10 \log \left(\exp \left(- \left(\frac{\pi \cdot n D \alpha}{2} \right)^2 \right) \right) \quad \text{III.11}$$

4 Pertes de Fresnel

Ces pertes sont liées à l'écart entre l'indice de la fibre (n_1) et celui du milieu où baigne la face d'entrée de la fibre (n_0). Elles sont données par l'expression:

$$P_F = 10 \log_{10} \left(\frac{4 n_0 n_1}{(n_0 + n_1)^2} \right) \quad \text{III.12}$$

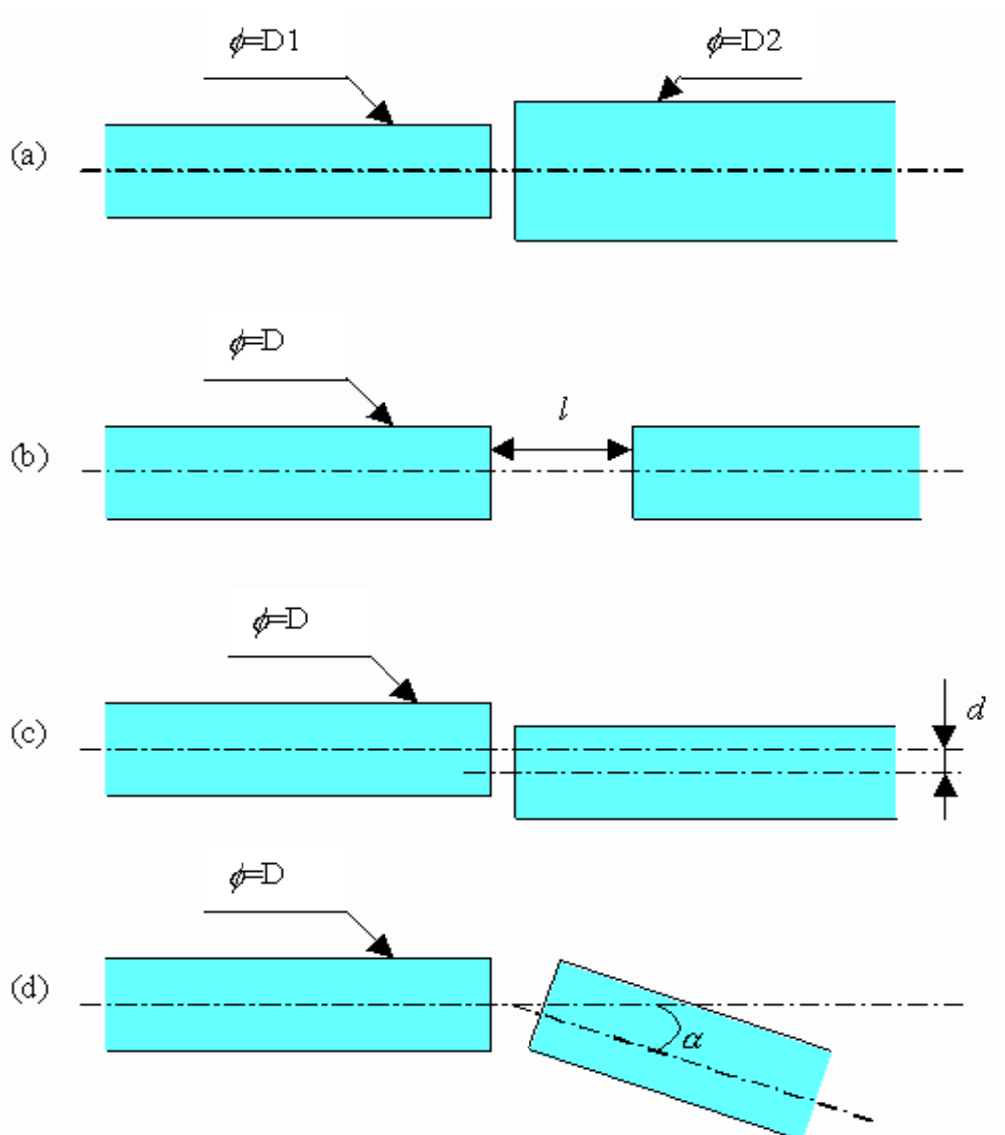


Figure:III.4 : Origine des pertes d'épissurage

III.4 Limitations en bande passante

La bande passante d'une fibre optique détermine la quantité d'informations qu'elle peut accepter, en d'autres termes, son débit. Le mécanisme qui limite la bande passante d'une fibre est appelé dispersion.

III.4.1 Dispersion modale de polarisation (PMD *Polarization Mode Dispersion*)

Une fibre monomodale au sens où on l'entend habituellement autorise la propagation d'un seul mode (LP_{01}), mais ce mode est dégénéré, c'est-à-dire qu'il peut se décomposer en deux modes de base indépendants ayant des polarisations orthogonales.

L'ellipticité (une fibre réelle n'est jamais parfaitement circulaire), ainsi que les contraintes extérieures entraînent une biréfringence dont les axes changent de manière aléatoire le long de la fibre. Il en résulte un couplage entre les deux modes de base, si bien que lorsqu'une impulsion est envoyée dans la fibre, deux impulsions séparées par un retard aléatoire sont reçues à l'extrémité, donnant lieu à un phénomène d'écho, générateur d'interférence entre symboles.

La valeur moyenne de ce retard (aléatoire) caractérise la dispersion modale de polarisation (*Polarization Mode Dispersion* PMD) : dans une fibre à fort couplage de modes, elle varie comme la racine carrée de la longueur et s'exprime en conséquence en ps / \sqrt{Km} . Dans une fibre à maintien de polarisation au contraire, le retard est une fonction linéaire de la distance.

Des évaluations de la sensibilité des systèmes à la dispersion modale de polarisation ont été effectuées : une valeur maximale de un dixième du temps symbole en codage NRZ a été avancée comme la limite à ne pas dépasser, mais, s'agissant d'un phénomène aléatoire, il faut être extrêmement prudent. Il faut mentionner que les progrès récents dans les procédés de fabrication des fibres conduisent des valeurs de dispersion modale de polarisation inférieures à $0,2 ps / \sqrt{Km}$.

Les sources optiques étant généralement polarisées, la PMD affecte les transmissions par fibre et devient gênante pour des communications à 10 Gbit/s se propageant sur plus de 200 km. Elle peut néanmoins être compensée au premier ordre par un traitement électrique du signal.

On peut dire aujourd'hui que les progrès des techniques de fibrage permettent de surmonter pour les fibres posées aujourd'hui le problème de la PMD pour les débits et

les distances usuellement rencontrés, mais le problème reste essentiel. Les techniques de compensation, qui doivent nécessairement être adaptatives, n'en sont qu'à leurs débuts, mais font aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches.

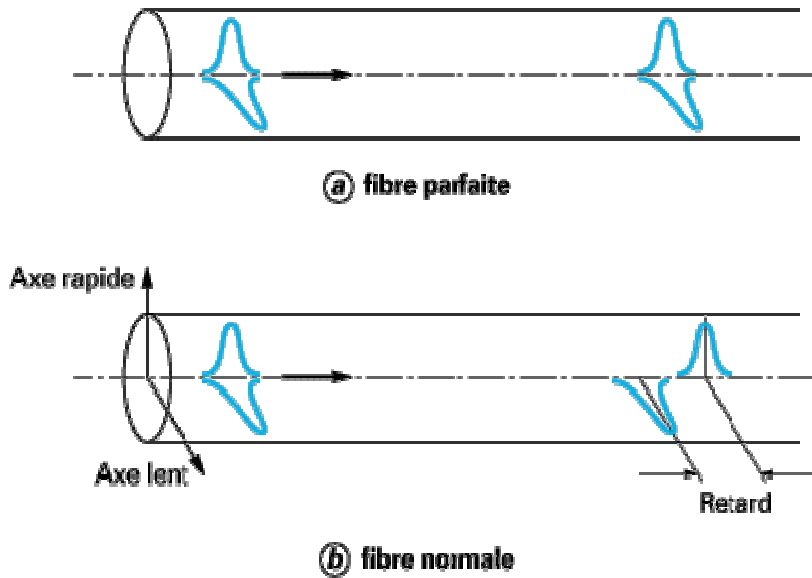


Figure III.5 illustration des effets de la dispersion modale de polarisation (PMD)

III.4 .2 Dispersion Chromatique :

Une fois connues les pertes encourues lors de la propagation d'un signal, on s'intéresse maintenant à ce qui se passe lorsqu'un signal polychromatique se propage dans la fibre. La caractéristique fondamentale liée à ce processus est la dispersion chromatique.

Un matériau (ici, la silice) est dit dispersif lorsque son indice de réfraction dépend de la longueur d'onde. Dans ce cas, les différentes composantes spectrales du signal à transmettre ne se propagent pas à la même vitesse. Il en résulte une modification du profil temporel du signal au cours de la propagation (**Figure III.6**)

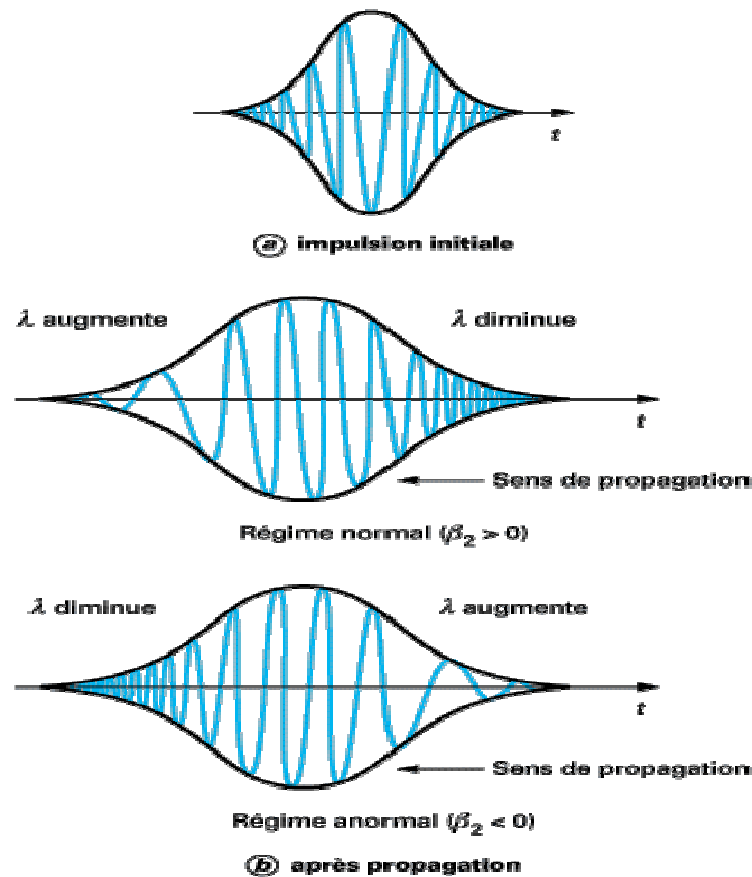


Figure III.6 Impact de la dispersion chromatique sur une impulsion

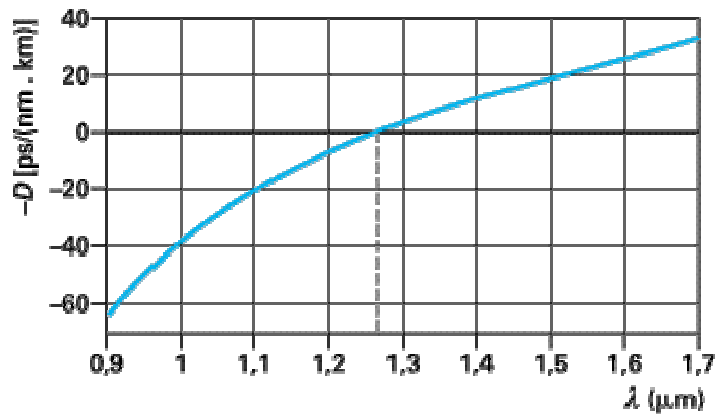
Le paramètre rendant compte de cet effet, appelé D et exprimé en ps/(nm.km), est défini par :

$$D = \frac{d(v_g^{-1})}{d\lambda} \quad \text{III.13}$$

Où v_g est la vitesse de groupe.

Les fibres "standard" (normalisation ITU-T G. 652) installées dans les réseaux de communication présentent un zéro de dispersion ($D(\lambda_{ZD})=0$) à la longueur d'onde $\lambda_{ZD}=1310$ nm. De plus, la variation du paramètre D en fonction de la longueur d'onde est tracée en figure III.7. Toutefois, pour les longueurs d'onde comprises entre 1250 nm et 1660 nm, une approximation de la valeur de D est donnée par :

$$D \approx -122 \cdot (1 - \lambda / \lambda_{ZD}). \quad \text{III.14}$$



Noter le zéro pour $\lambda = 1,27 \mu\text{m}$

Figure III.7: Dispersion d'une fibre standard.

Au vu de la courbe ci-dessus, on remarque que la dispersion chromatique a une faible influence sur des communications autour de $1,3 \mu\text{m}$ alors qu'elle devient un obstacle pour des transmissions rapides à $1,55 \mu\text{m}$. Le choix de la seconde fenêtre de télécommunications (autour de $1,3 \mu\text{m}$), en 1983, résulte du compromis entre l'atténuation et la dispersion chromatique. Cependant, dès 1985, l'apparition de fibres ayant un zéro de dispersion à 1550 nm dites DSF (pour Dispersion Shifted Fibre—normalisation ITU-T G. 653), obtenues grâce à une modification du profil de l'indice du cœur de la fibre, semble remettre en cause le choix précédent. L'arrivée des amplificateurs à fibre et la meilleure compréhension des effets non linéaires limitent l'emploi des fibres DSF comme nous le verrons par la suite.

Enfin, on estime que la distance maximale de propagation en présence de dispersion chromatique est donnée par $\cong 1 / (DB^2)$ où B est le débit (exprimé en bit/s) soit 1000 km (respectivement 60 km) pour des communications à $2,5 \text{ Gb/s}$ (10 Gb/s) à $1,55 \mu\text{m}$. L'introduction de filtres dispersifs ou de fibres de dispersion inverse sur la ligne de transmission permet de compenser totalement cet effet sous réserve que la conception de ces derniers soit adaptée à la liaison à compenser et tienne compte de la variation de D avec la longueur d'onde.

III.4.3 Effets non linéaires dans les fibres

Bien que le coefficient NL soit très petit dans la silice, les effets NL sont observables pour des puissances de l'onde dans la fibre relativement faibles. Ceci à cause des très petites dimensions des fibres (coeur) et des pertes très faibles (<1dB/km).

Les effets NL se voient surtout dans les fibres monomodes, et se traduit par :

=> Une atténuation du signal en fonction de l'augmentation de $P_{\text{transmise}}$

=> Une création de nouvelles longueurs d'onde à partir du signal

Bien souvent la fibre devient impropre à la transmission.

Une figure de mérite pour l'efficacité des effets NL dans un tel milieu est le produit IL_{eff} où I est l'intensité optique et L_{eff} la longueur effective de la zone d'interaction (c'est-à-dire la longueur du milieu dans lequel on a tenu compte des pertes). Si la lumière

est focalisée en un point de rayon ω_0 , alors
$$I = \frac{P}{\pi\omega_0^2}$$

Avec P puissance optique incidente.

III.4.4 Réponse électronique : Effet Kerr Optique

Sous l'action d'un champ lumineux intense, l'indice de réfraction d'un milieu transparent accuse une variation considérée en première approximation comme locale et instantanée. Cette modification provient de la création de dipôles induits dans le matériau par déplacement du centre de gravité des charges électroniques négatives par rapport à celui des charges nucléaires positives. Ce phénomène non linéaire est connu sous le nom d'effet Kerr optique.

III.4.5 Réponse moléculaire : Diffusion Raman stimulée

Les effets non linéaires électroniques gouvernés par la susceptibilité d'ordre 3 sont élastiques dans le sens où il n'y a pas d'énergie échangée entre le rayonnement et le milieu diélectrique, celui-ci jouant alors un rôle passif. Une autre classe d'effets non linéaires inélastiques résulte d'un transfert d'une partie de l'énergie du rayonnement au milieu diélectrique, celui jouant ainsi un rôle actif.

Les diffusions Raman et Brillouin stimulées sont deux de ces phénomènes intervenant dans les fibres. Elles correspondent à l'excitation résonnante, par

l'application d'un champ lumineux intense, de niveaux de vibrations moléculaires pour la diffusion Raman (phonons optiques) et hypersonores pour la diffusion Brillouin (phonons acoustiques). Ces effets non linéaires impliquent la génération et le transfert d'énergie vers d'autres fréquences optiques, décalées de la fréquence du phonon par rapport à la fréquence d'excitation (GHz pour le Brillouin et THz pour le Raman). Ils présentent un accord de phase automatique car ils proviennent de l'amplification résonante du bruit de diffusion spontanée Raman ou Brillouin.

La diffusion Brillouin stimulée résulte de vibrations collectives acoustiques et transfère une partie de l'énergie de pompe au matériau, en créant alors une onde rétrodiffusée.

Ce phénomène est négligeable en régime picoseconde car son temps de réponse est de l'ordre de la nanoseconde. Elle sera par conséquent absente de toutes les études présentées dans ce manuscrit où les largeurs spectrales utilisées sont plus grandes que l'inverse du temps de réponse Brillouin.

La diffusion Raman stimulée associée aux modes vibrationnels de la molécule possède un temps de réponse dans les fibres de l'ordre de 50-100 fs [10] suivant la géométrie et les dopants apportés. Elle intervient dans les fibres optiques à partir d'un seuil de puissance pour lequel l'effet Kerr est déjà important (de l'ordre de 30 à 40 p radians de déphasage non linéaire en pratique)

III.4.6 Mélange à quatre ondes

Ce phénomène qui se manifeste lorsque plusieurs porteuses optiques se propagent simultanément dans une fibre est générateur de produits d'intermodulation, de manière très semblable à ce qui se produit dans les systèmes radioélectriques. Par exemple, la non-linéarité du troisième ordre crée des battements entre trois porteuses aux pulsations w_1 , $w_2 = w_1 + Dw$ et $w_3 = w_1 + 2Dw$ et engendre des produits d'intermodulation aux pulsations $pw_1 + qw_2 + rw_3$ où p, q, r sont des entiers tels que $|p| + |q| + |r|$ soit égal à 3. Ainsi, le produit d'intermodulation à la pulsation $2w_2 - w_1 = w_3$ va perturber le signal transmis sur le canal à la pulsation w_3 .

L'effet du mélange à quatre ondes (FWM *Four Waves Mixing*) est d'autant plus important que la puissance transportée par les différentes porteuses est élevée, que l'espacement entre canaux est faible et que la dispersion chromatique est faible. Un autre

facteur important est la polarisation relative des différentes porteuses en interaction : dans le cas de deux porteuses, l'effet minimal est obtenu lorsque leurs deux états de polarisation sont orthogonaux. Dans le cas d'un multiplex, il n'y a pas de règle simple pour dire quelle est la configuration optimale.

La figure III.8 représente un multiplex de porteuses à l'entrée et à la sortie d'une fibre en présence de mélange à quatre ondes. De chaque côté du spectre initial apparaissent les raies correspondant aux produits d'intermodulation. Les raies tombant à l'intérieur du spectre initial ne sont pas visibles, car elles retombent sur des canaux existants.

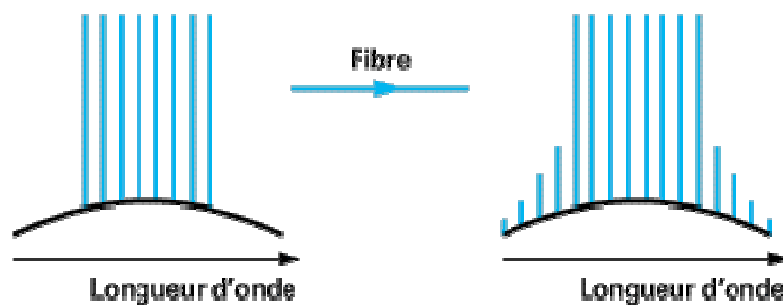


Figure III.8 Illustration de l'effet du mélange à quatre ondes sur un multiplex de porteuses optiques

C'est pourquoi une fibre à faible dispersion, comme la G.653, est moins favorable en ce qui concerne le mélange à quatre ondes, en particulier pour les canaux situés près de la longueur d'onde de dispersion nulle. C'est un problème particulièrement critique pour des opérateurs qui ont fait le choix de la fibre G.653, en raison de ses meilleures caractéristiques en régime linéaire, à une époque où n'existaient ni les amplificateurs à fibre, ni le multiplexage en longueur d'onde, et veulent aujourd'hui introduire cette dernière technique dans leurs réseaux.

III.5 Le bruit du récepteur

Le récepteur optique convertit la puissance optique incidente P_{in} en un courant à travers une photodiode. La relation $I_p = R P_{in}$ suppose que la conversion n'introduit pas de bruit. Cependant, ce n'est pas le cas même pour un récepteur parfait. Les mécanismes de

bruit fondamentaux sont : le bruit quantique, le bruit thermique, le bruit d'obscurité et les bruits d'amplificateurs.

Le bruit quantique provient de la structure angulaire de la lumière arrivant sur la photodiode (photons). Il impose donc la limite ultime du rapport signal sur bruit (ou du taux d'erreur) que l'on peut obtenir avec une liaison optique, car cette limite est engendrée par la nature de la lumière elle-même. Son expression est la suivante :

$$\langle i_q^2 \rangle = 2 e M^{2+x} S \Phi B \quad \text{III.15}$$

Avec e la charge de l'électron, M le gain de la photodiode, x le coefficient d'excès de bruit, S la sensibilité de la photodiode, Φ le flux énergétique reçu par la photodiode et B la bande passante unilatérale du récepteur.

Le bruit thermique est engendré par la résistance de charge R dans le cas d'une structure préamplificatrice à haute impédance et par la résistance de contre réaction R dans le cas d'une structure préamplificatrice à transimpédance. Son expression est la suite :

$$\langle i_T^2 \rangle = 4 K T R^{-1} B \quad \text{III.16}$$

Avec k la constante de Boltzmann, T la température de la résistance de charge et R la valeur de la résistance de charge.

Le bruit d'obscurité est engendré par le courant continu d'obscurité circulant dans la photodiode. Son expression est la suivante pour une photodiode à avalanche (et pour une photodiode PIN, il suffit de faire $M=1$) :

$$\langle i_0^2 \rangle = 2 e I_{os} B + 2 e I_{ov} M^{1+x} B \quad \text{III.17}$$

Avec I_{os} est le courant d'obscurité de surface et I_{ov} le courant d'obscurité de volume.

Les bruits d'amplificateurs sont engendrés par l'amplificateur lui-même, ils dépendent de sa technologie. En particulier, le premier étage d'amplification est le plus important, et c'est lui qui conditionne en majeure partie le bruit total. On décompose le bruit de l'amplification en deux sources indépendantes, une source de tension de bruit en série avec l'entrée de l'amplificateur noté $\langle v_A^2 \rangle$ et une source de courant de bruit $\langle i_A^2 \rangle$ en parallèle sur l'entrée.

IV.1 Introduction

Les technologies clés pour la transmission point à point à grande distance de grande capacité comprennent :

- Des amplificateurs optiques à faible bruit, de grande puissance, à large bande et à gain plat.
- Une fibre optique optimisée et des techniques de gestion de la dispersion afin d'obtenir des infrastructures pérennes et une transmission tolérant les effets de la propagation.
- Des composants électroniques et optoélectroniques rapides pour les équipements émetteurs et récepteurs.
- La compensation de la dispersion de mode de polarisation (PMD).
- Des modules de compensation de dispersion compatibles avec de larges bandes passantes optiques.
- Une technologie de traitement optique rapide pour régénération 2R-3R, autorisant une régénération efficace mais peu coûteuse par comparaison avec les équipements d'émission-réception jumelés.
- Des équipements à très haut débit binaire (60 Gbit/s et au-delà) mettant en œuvre le multiplexage temporel électronique (ETDM) conjointement avec le multiplexage temporel optique (OTDM).
- Une nouvelle génération de technique de correction d'erreurs directe pour faciliter la transmission en présence de bruit.
- Un format de modulation optimisé pour une grande efficacité spectrale (vers 1 bit/s/Hz).
- Des filtres optiques à formes d'amplitude et de phase bien définies pour un filtrage très étroit (plus étroit que la bande passante de canal (WDM)).
- égalisateur de gain dynamique (permettra par exemple de faire de la pré-compensation et de l'égalisation des signaux WDM).

Mais, au-delà de la transmission, l'optique est également appelée à jouer un rôle croissant dans d'autres éléments des réseaux optiques. Dans un premier temps, c'est la fonction de commutation spatiale qui apparaît la plus nécessaire, que cela soit pour les besoins de sécurisation du réseau ou des brasseurs optiques de taille moyenne (réseaux métropolitains) ou de très grande taille (réseau grande distance).

Des fonctions plus évoluées, comme par exemple la conversion de longueur d'onde, la régénération optique, la commutation rapide, etc...sont encore à l'état de recherche au niveau des systèmes, même s'il semble que les progrès technologiques importants aient été réalisés sur ces composants, et que l'intérêt de la part des équipementiers pour ces fonctions soit grandissant.

IV.2 Modules de compensation de dispersion

IV.2.1. Fibre à dispersion décalée

La dispersion des fibres ordinaires en silice s'annule autour de $1,3 \mu\text{m}$. La capacité de transmission est alors la plus grande possible ; malheureusement, ce n'est pas là que l'atténuation est la plus faible.

Pour les transmissions à grande distance, on a besoin à la fois d'une grande capacité et d'une atténuation minimale (précisément pour franchir ces grandes distances). On a donc cherché à déplacer le point de dispersion nul vers $1,55 \mu\text{m}$. On dit que ce genre de fibre est à dispersion décalée.

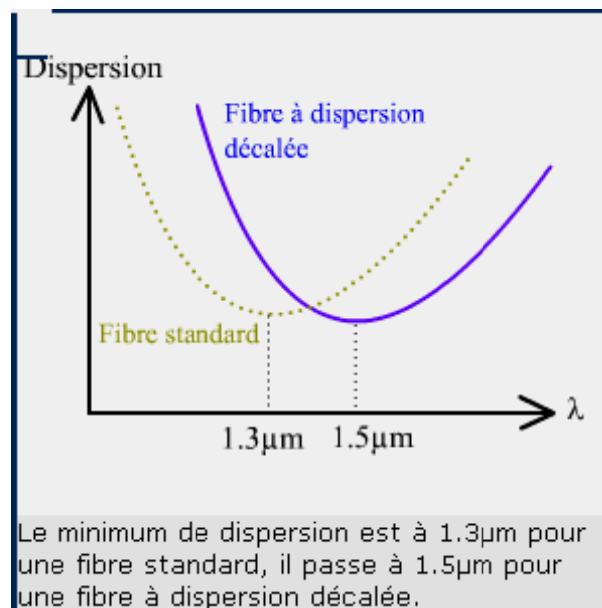


Figure IV.1 : fibre à dispersion décalée.

Il faut donc compenser une dispersion matériau d'environ $20 \text{ ps}/(\text{nm.km})$. En principe cela peut se faire en diminuant V et en augmentant le saut d'indice. On ne peut pas trop diminuer V afin de garder un confinement correct. Avec $V=1,5$, d'où $V(BV)''=1$,

on doit prendre $n_c - n_g \approx 0,01$. Une telle valeur soulève des problèmes technologiques parce qu'elle correspond à un fort dopage pour le cœur. Les propriétés de dilatation thermique du cœur et de la gaine sont alors assez différentes pour engendrer de grandes contraintes internes autour de l'interface cœur-gaine qui fragilisent la fibre, créent des défauts internes et augmentent les pertes de diffusion. On relâche ces contraintes en utilisant des profils d'indices en triangle sans discontinuités.

Il existe aussi des fibres à dispersion plate pour lesquelles la dispersion totale reste très faible, de l'ordre de 1 ps/(nm.km), sur une centaine de nanomètres ou plus. Ces fibres demandent un modelage précis de la fonction de dispersion modale, que l'on peut obtenir avec un profil d'indice à plusieurs gaines.

Normes G.652 et G.653

Les "recommandations" G.652 et G.653 de l'IUT (l'Union Internationale des Télécommunications) sont en fait des normes internationales pour les fibres monomodales pour les réseaux de télécommunications. Elles portent sur les paramètres géométriques, mécaniques et optiques des fibres et sur les tolérances admissibles. La norme G.652 concerne les fibres optimisées pour $\lambda_0 = 1,31 \mu\text{m}$ et la norme G.653 les fibres à dispersion décalée, optimisée pour $\lambda_0 = 1,55 \mu\text{m}$. On retrouve des valeurs communes, comme le diamètre extérieur de 125 μm , ou une dispersion totale inférieure à 3,5 ps/(nm.km) dans l'intervalle $|\lambda - \lambda_0| < 0,025 \mu\text{m}$. Les valeurs de la largeur de mode w , de l'atténuation α , de la longueur d'onde de coupure λ_c du mode LP_{11} changent :

G.652 : $9 < w < 10$ et $\alpha < 1 \text{ dB / km}$ à $\lambda = 1,31$; $1,1 < \lambda_c < 1,28$;

G.653 : $7 < w < 8,3$ et $\alpha < 0,5 \text{ dB / km}$ à $\lambda = 1,55$; $\lambda_c < 1,27$;

(Toutes les longueurs sont en micromètres).

Les systèmes de ligne sont constitués par une fibre de ligne et une fibre de compensation de dispersion (DCF). Cette dernière est généralement utilisée dans les systèmes fonctionnant à 10 Gbit/s ou plus. La gestion de la dispersion chromatique le long de la ligne est un aspect important de la conception des systèmes de transmission longue distance. Il existe deux types principaux de fibres de ligne :

- La fibre monomode standard (SSMF).
- La fibre à dispersion décalée non nulle (NZDSF).

IV.2.2. La fibre SSMF

La fibre monomode standard, dite à saut d'indice, est caractérisée par une grande dispersion et une atténuation modérée. La fibre la plus courante, conforme à la recommandation G.652 de l'UIT-T, a un cœur dopé au GeO_2 ; elle a une dispersion chromatique typique d'environ $+17$ ps/nm/km à 1550 nm et une atténuation d'environ 0,2 dB/km. Une SSMF évoluée possède un cœur de silice pure et l'on utilise une gaine enterrée pour obtenir le profil d'indice. Cette fibre à cœur de silice pure (PSCF), conforme à la recommandation G.654 de l'UIT-T, a une faible atténuation (0,18 dB/km) et une dispersion chromatique un peu plus grande ($+20$ ps/nm/km). La SSMF est intéressante à cause de sa faible atténuation. De plus, elle est bien adaptée à la transmission WDM en raison de sa grande résistance aux effets non linéaires, qui résulte principalement de la forte dispersion chromatique, laquelle réduit les interactions entre les canaux.

IV.2.3. La fibre NZDSF

La forte dispersion chromatique de la fibre standard présente un inconvénient évident : au débit de transmission de 10 Gbit/s et au-dessus, il faut une grande quantité de DCF, ce qui augmente les coûts et impose l'utilisation de schémas d'amplification spécifiques. On a donc développé une nouvelle famille de fibres de ligne dont la dispersion chromatique est suffisante pour éviter les interactions entre les canaux, tout en étant moindre que celles de la SSMF, afin de réduire la quantité de DCF nécessaire. Ces fibres ont un profil d'indice complexe qui donne une dispersion chromatique bien définie et faible. Comme la dispersion chromatique est faible mais non nulle, on appelle cette fibre une fibre à dispersion décalée non nulle ; cette fibre est conforme à la recommandation G.655 de l'UIT-T. À noter que l'ancienne fibre à dispersion décalée (DSF) G.653 est source de problèmes lorsqu'on passe au WDM car sa dispersion chromatique est incontrôlée et peut être trop faible. Ce type de DSF se distingue nettement de la NZDSF plus récente. Il existe différentes variantes de NZDSF, qui se distinguent par leur dispersion chromatique, leur aire effective et leur pente de dispersion chromatique. L'atténuation de la NZDSF est généralement du même ordre que celle de la SSMF, alors que sa dispersion chromatique se situe généralement entre 4 et 8 ps/nm/km. La NZDSF a une aire effective comprise entre 50 et 72 μm^2 , alors que

celle de la SSMF est de $80 \mu\text{m}^2$. Par conséquent, dans la NZDSF, les effets non linéaires apparaissent pour des puissances de signal plus faibles que dans la SSMF. La fibre Teralight™ a une dispersion chromatique modérée d'environ $+8 \text{ ps/nm/km}$ et une aire effective d'environ $65 \mu\text{m}^2$. La fibre Teralight™ a déjà été utilisée en laboratoire pour la transmission de 150 canaux à 10 Gbit/s et 128 canaux à 40 Gbit/s sur trois tronçons de 100 km dans les bandes C et L.

IV.2.4. La fibre DCF

La fibre DCF a pour but de compenser la dispersion chromatique de la fibre de ligne. Elle compense également la pente de la dispersion chromatique, de sorte que toutes les longueurs d'onde de la fenêtre WDM subissent la même dispersion chromatique totale. Les principaux paramètres sont les suivants :

- Une dispersion chromatique fortement négative et une faible atténuation sont bénéfiques.

La dispersion chromatique typique est inférieure à -80 ps/nm/km , tandis que l'atténuation typique est inférieure à $0,5 \text{ dB/km}$. En général, l'atténuation est d'environ 8 dB pour un module qui peut compenser la dispersion chromatique de 80 km de fibre G.652 standard (environ 1360 ps/nm/Km).

- La compensation de pente de dispersion chromatique de la fibre de ligne est une caractéristique essentielle pour les systèmes WDM. Une fibre DCF qui compense la pente de la SSMF est maintenant disponible. La compensation de la pente de la NZDSF est plus difficile car elle nécessite un très grand rapport entre la dispersion et la pente. C'est pourquoi une fibre DCF compensant la pente de la NZDSF n'est apparue que tout récemment.

- La PMD (la dispersion de mode polarisation) doit être faible car la DCF est utilisée pour les systèmes à haut débit.

IV.2.5. Le compensateur de dispersion de mode de polarisation

La dispersion de mode de polarisation (PMD) résulte de la biréfringence des fibres causée par les imperfections géométriques ou les contraintes pendant la fabrication. La PMD déforme le signal modulé optique dans le domaine temporel, ce qui conduit parfois à des erreurs de transmission. Bien que la PMD soit soigneusement contrôlée par les fabricants de fibre, elle peut entraîner d'importantes pénalités de transmission pour un nombre relativement important de liaisons transportant du trafic à

10 Gbit/s et constituera un problème critique pour le trafic à 40 Gbit/s. Le compensateur de PMD permet d'obtenir une tolérance trois fois plus grande vis-à-vis de la PMD. En outre, ce dispositif peut être utilisé à n'importe quel débit.

La figure IV.1 compare les pénalités de transmission avec et sans compensateur de PMD. Les résultats ont été recueillis pendant plusieurs semaines avec un signal optique à 10 Gbit/s transmis sur plus de 100 km de fibre enterrée avec 40 ps de PMD totale. Comme on peut le voir, le compensateur de PMD réduit considérablement les pénalités de transmission.

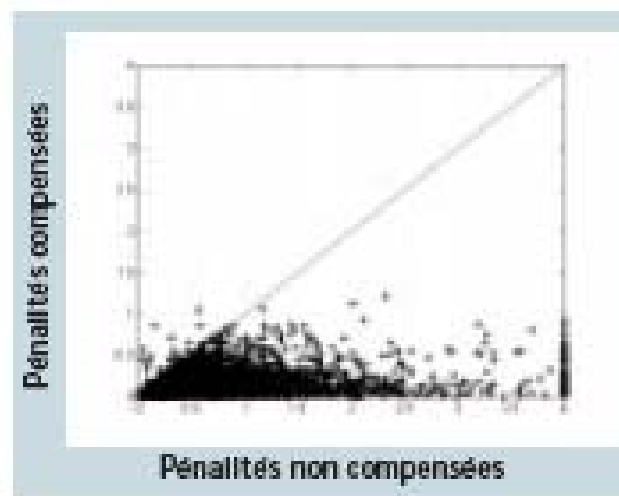


Figure IV.2 – Pénalités de transmission avec et sans compensation de PMD

IV.2.6. Les codes correcteurs d'erreurs (FEC)

Le principe de la correction d'erreurs directe (FEC) consiste à appliquer un code spécifique aux données émises ; cela nécessite une certaine augmentation du débit. Côté réception, un décodeur peut traiter les données reçues et corriger les erreurs. On utilise couramment le code de Reed-Solomon 239/255. Côté émission, 239 octets sont codés en 255 octets – soit une augmentation de 7% du débit. Côté réception, le décodeur peut corriger les erreurs avec une efficacité impressionnante. Comme le montre la figure IV.2 le TEB d'entrée, qui est égal à 10^{-4} , est ramené à 10^{-12} après correction. La pente de correction est très importante et un TEB de 10^{-5} , après correction, est ramené à 10^{-20} .

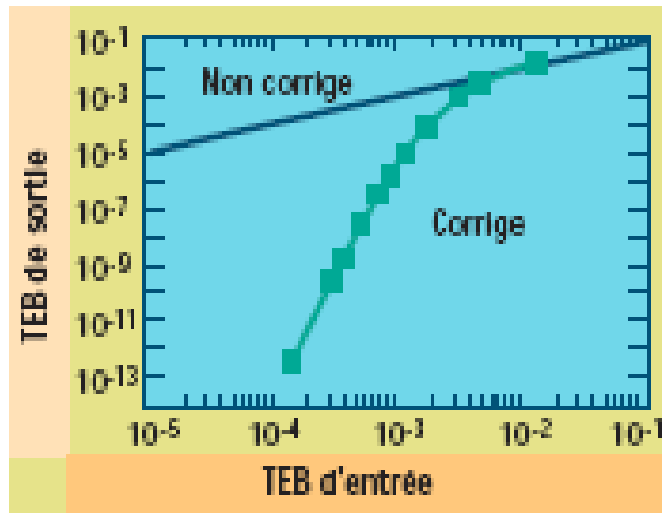


Figure IV.3 – Correction

d'erreurs par code de Reed-Solomon 239/255

Le nombre d'erreurs consécutives qu'il est possible de corriger dépend du code et du multiplexage.

Dans le cas du code de Reed-Solomon, on peut généralement corriger 512 erreurs consécutives. Les codes FEC permettent de concevoir des systèmes avec un rapport signal/bruit optique plus favorable et donc d'augmenter la longueur du système et le pas d'amplification. Le TEB dû aux dégradations de transmission est ramené par les codes FEC à une valeur négligeable (10^{-20}) et sa qualité en est donc améliorée. Un certain nombre de systèmes à fibre optique d'Alcatel mettent déjà en œuvre des codes FEC. Un système à 622 Mbit/s l'avait fait pour la première fois en 1992. Aujourd'hui, cette technologie est utilisée pour les systèmes à 10 Gbit/s et 40Gbit/s.

IV.3 L'amplification optique et le multiplexage en longueur d'onde

IV.3.1 Une révolution technologique

L'évolution des systèmes de transmission optique a connu une véritable révolution avec la mise au point et le développement industriel des amplificateurs optiques dès la fin des années 80. Utilisant un mécanisme de transfert de puissance entre une pompe optique et le signal dans une fibre dopée à l'erbium, ces amplificateurs ont permis de contrôler sans conversion optoélectronique la puissance des signaux transmis et de compenser les pertes subies lors de la propagation. De conception relativement simple et disposant de performances en termes de bruit proches du minimum théorique, ils furent d'abord

exploités pour accroître la portée optique des systèmes mono longueur d'onde par simple substitution aux régénérateurs électroniques, mettant du même coup fin aux espoirs fondés sur l'application de la réception cohérente. Mais la véritable révolution est venue des avantages que cette technologie pouvait procurer en association avec le multiplexage en longueur d'onde (WDM – Wavelength Division Multiplexing).

Le multiplexage en longueur d'onde (WDM) est l'une des technologies majeures ayant servi de tremplin à l'essor mondial rapide de l'Internet ces dernières années. Parallèlement à l'augmentation du débit par canal en multiplexage temporel (TDM) de 2.5Gbit/s à 10Gbits/s et à 40Gbit/s, le WDM est basé sur la multiplication de la capacité de transmission de fibre optique par la combinaison de deux à 160 canaux sur une même fibre.

IV.3.2 La technologie WDM / DWDM

IV.3.2.1. Multiplexage temporel TDM

Le multiplexage TDM consiste à imbriquer temporellement différents canaux de communication en trame successives. Le multiplexage temporel revient à superposer les flots d'information des différents canaux en les décalant les uns par rapport aux autres. Cela nécessite une synchronisation précise. A la réception chaque canal temporel est démultiplexé puis acheminé vers sa destination. On peut réaliser les fonctions de multiplexage/ démultiplexage temporels avec des circuits intégrés ultra-rapides (40Gbit/s) (**figure IV.4**).

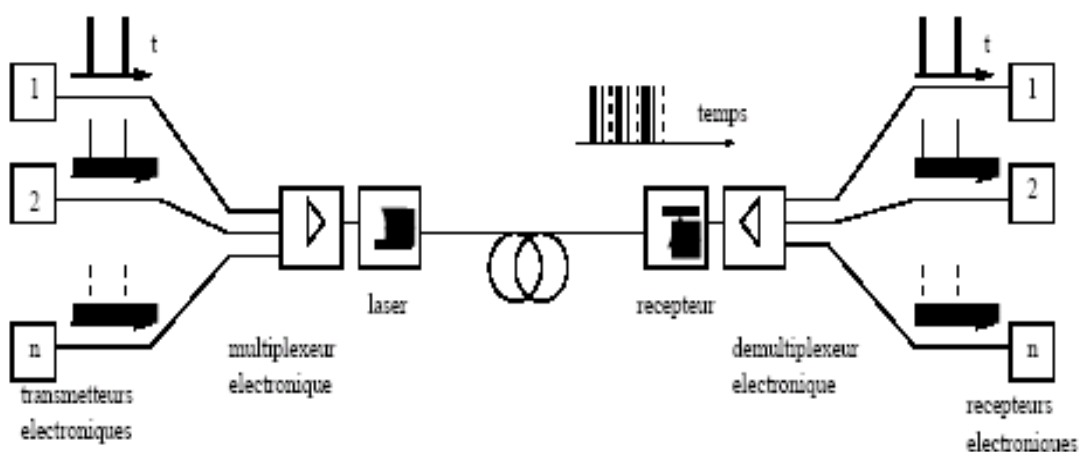


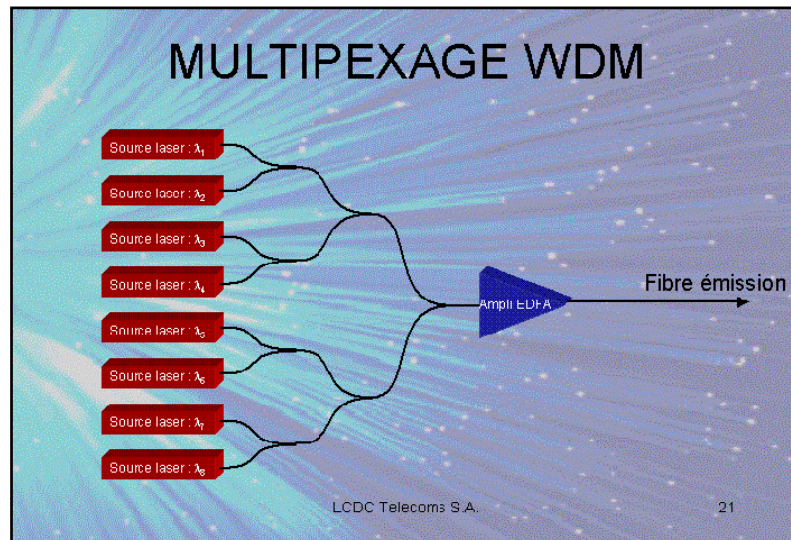
Figure IV.4 : multiplexage temporel TDM

IV.3.2.2 WDM

Lorsqu'il est nécessaire de moduler une grande quantité d'information sur une seule porteuse, il faut une largeur de bande plus grande. Pour maintenir un taux d'erreur constant, la puissance reçue doit être plus grande également. D'où pour une puissance d'entrée donnée, la distance de transmission est diminuée. Il existe une autre méthode qui consiste à utiliser un certain nombre de porteuses, chacune ayant une longueur d'onde différente. De cette façon, la largeur de bande de modulation de chaque porteuse peut être réduite tout en maintenant la même largeur de bande totale et une grande distance de transmission. C'est la technique du multiplexage de longueur d'onde ou WDM (Wavelength Division Multiplexing) en anglais. Bien évidemment, dans les réalisations de multiplexage en longueur d'onde, les sources optiques utilisées doivent être stables.

a. Le principe de multiplexage

Le multiplexage en longueur d'onde repose sur l'envoi d'ondes lumineuses multiples (fréquences) dans une même fibre optique. L'information est transmise par chaque onde, appelée voie, par modulation d'intensité (ou d'amplitude) ou par modulation de phase. À la réception, un prisme optique ou un dispositif semblable sépare les fréquences de manière à extraire séparément l'information transmise par chaque voie. Un signal numérique binaire, plus précisément un signal de modulation d'intensité par tout ou rien, peut également être acheminé par chaque voie individuelle, bien qu'on s'attende à un débit binaire plus faible qu'avec la modulation d'intensité ou de phase. Comme dans le multiplexage par répartition en fréquence (MRF) de type classique utilisé pour les transmissions de signaux électriques ou radio, on peut mélanger les porteuses sur un seul support car la lumière d'une fréquence donnée ne brouille pas celle d'une autre fréquence à l'intérieur de l'ordre linéaire d'approximation.



EDFA : Amplificateur à Fibre Dopée à l'Erbium

Figure IV.5 : Schéma de principe du multiplexage WDM

Cette technologie est née de l'idée d'injecter simultanément dans la même fibre optique plusieurs trains de signaux numériques à la même vitesse de modulation, mais chacun à une longueur d'onde distincte. Ainsi, à l'émission, on multiplexe n canaux au débit nominal D . A la réception, on démultiplexe le signal global $n \times D$ en n canaux nominaux.

Le WDM permet de multiplexer, c'est-à-dire de mélanger, plusieurs longueurs d'onde, ou signaux, dans une même fibre. Le gain est bien évidemment conséquent et est proportionnel au nombre de canaux que la fibre permet de véhiculer.

La norme ITU-T G692 définit la plage de longueurs d'ondes dans la fenêtre de transmission de 1530 à 1565 nm et un espacement normalisé entre deux longueurs d'ondes de 1,6 ou 0,8 nm.

Le multiplexage de longueur d'onde se fait exclusivement sur fibre monomode.

Lorsque l'espacement utilisé entre deux longueurs d'ondes est égal ou inférieur à 0,8 nm ou lorsque plus de 16 canaux sont utilisés, on parle alors de DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Des tests ont déjà été effectués avec des espacements de 0,4, 0,2 et 0,1 nm.

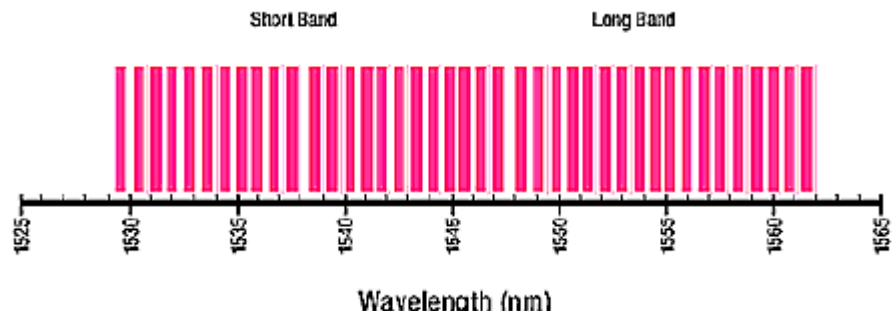


Figure IV.6 peigne des fréquences en DWDM

Aujourd'hui, il est possible d'atteindre des débits pouvant aller de 10 à 400 Gbits/s. En effet, il existe des systèmes proposant de 4 à 160 canaux optiques à 2,5 Gbit/s par canal. Un système à 16 canaux de 2,5 Gbit/s (soit 40 Gbit/s) permet l'acheminement de 500 000 conversations téléphoniques simultanément sur une seule paire de fibre optique.

WDM et plus précisément DWDM apporte une réelle solution aux pénuries de bande passante. Jusqu'à présent le développement des réseaux de télécommunications était basé sur l'utilisation de technologies de type SONET/SDH/TDM. Mais avec l'arrivée de cette technologie, on peut désormais multiplier par 16 la bande passante de réseaux optiques traditionnels.

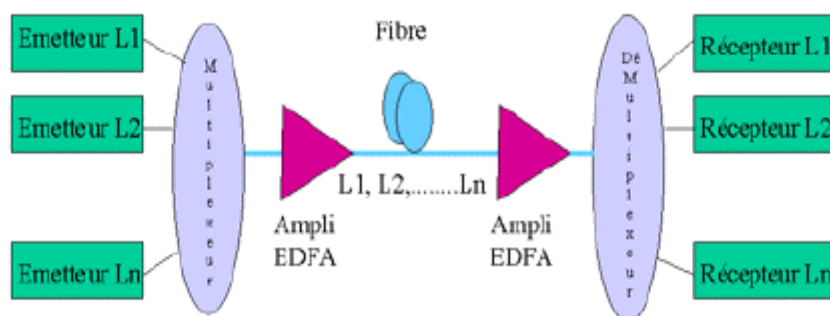


Figure IV.7 principe d'une liaison WDM/DWDM

Chapitre IV: les nouvelles technologies pour les liaisons à haut débit

A chaque multiplexage ou démultiplexage de longueur d'onde, il y a des pertes appelées pertes d'insertion. Pour compenser ces pertes et également réduire le bruit, on utilise un amplificateur à fibre dopée erbium, EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier).

Mais il y a d'autres perturbations qui déforment le signal. En effet, des phénomènes non linéaires se produisent lors de la propagation du signal dans la fibre. Il apparaît des risques de diaphonie et de mélange des canaux. C'est pourquoi la technologie WDM nécessite des amplificateurs tous les 50 à 100 km.

Chaque train de signaux numériques, après multiplexage, est véhiculé sur sa propre longueur d'onde comme sur une seule fibre.

Ces trains peuvent donc être de débits et de formats différents.

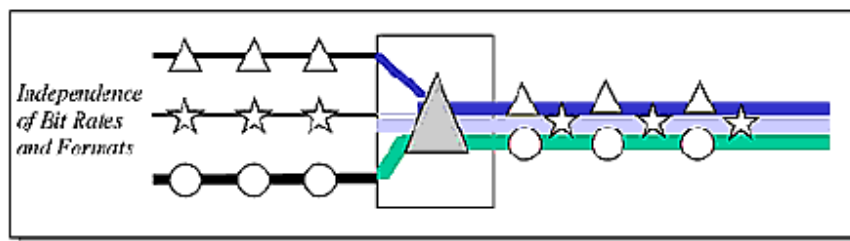


Figure IV.8 Indépendance des débits et formats de chaque canal en WDM

IV.3.2.3 DWDM

Dans les systèmes de transmission par fibre optique les différents composants peuvent se répartir par fonctions : transmission, multiplexage, amplification, commutation. Parmi les évolutions intéressantes on note, l'usage de diodes lasers (analogue à celle des lecteurs de disques compacts), qui produisent une lumière très fine très bien adaptées aux fibres monomodes (performantes car évitent mieux l'effet de dispersion).

Pour améliorer la capacité de transport d'information, on procède à différents types de multiplexage en longueur d'onde. A l'entrée, le multiplexage permet d'injecter sur la même ligne plusieurs signaux de différentes longueurs d'onde.

Il est possible ainsi de transmettre plus de 10 Tbits/s sur une seule fibre optique, avec passage de 256 ondes simultanées de 40 Gbits/s chacune.

Les progrès sont rendus possibles grâce aux avancées dans l'optique, les composants optoélectroniques, le traitement du signal. En plus des usages conventionnels (câbles sous-marins et terrestres), on trouve parmi les secteurs à fort potentiel de développement, les réseaux locaux et les réseaux métropolitains à haut débit.

a- Le Multiplexage en longueurs d'onde (DWDM) maximise l'utilisation de la bande passante de la fibre

La technique WDM (Wavelength Division Multiplexing), en français le multiplexage en longueurs d'ondes, a été développé afin de pouvoir exploiter au mieux la gigantesque bande passante de la fibre optique. En WDM, le « gâteau » de la bande passante est divisé en « tranches », et dans chacune de ces tranches, on insère une longueur d'onde ou « couleur » qui porte un signal binaire.

Toutes les couleurs sont transmises ensemble (multiplexées optiquement) dans la fibre. En réception, des filtres optiques séparent les couleurs utilisées, puis chaque couleur est démodulée individuellement pour en extraire sa capacité.

L'espacement entre couleurs (espacement entre deux « tranches du gâteau ») dépend des techniques de transmission et de filtrage. La taille de la couleur (largeur de la « Tranche du gâteau ») est directement liée à la capacité transmise (plus la capacité est grande, plus la tranche doit être large : une tranche de 12,5 GHz, un dixième de nanomètre, ne saurait contenir plus de 12,5 Gbit/s).

La lettre « D » (D pour dense) du terme DWDM se rapporte aux améliorations récentes dans les techniques de filtrage qui permettent de « densifier » le nombre de « couleurs ».

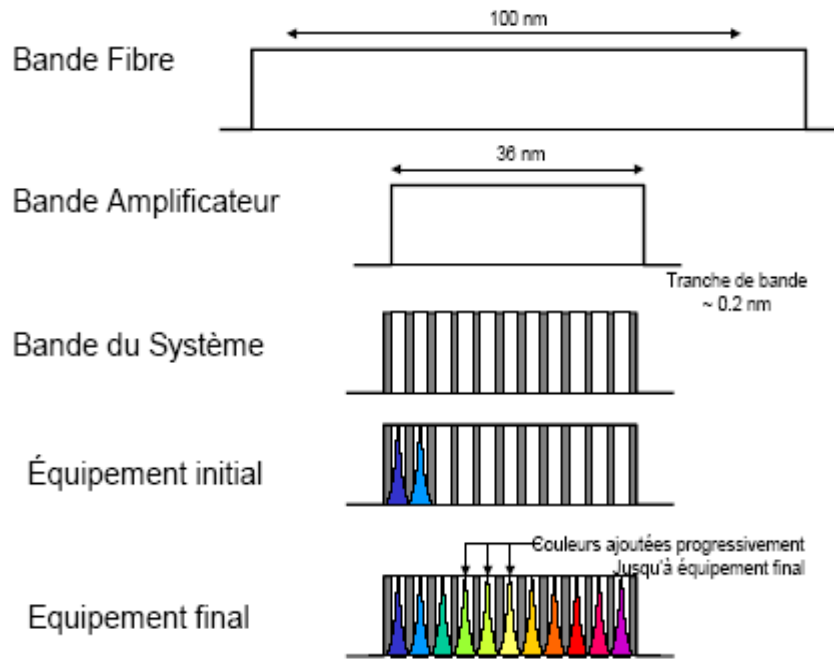


Figure IV.9| utilisation de la bande passante de la fibre

b. Les avantages de la transmission DWDM :

La gigantesque capacité potentielle de la fibre (un maximum de 12,5 Tbit/s) est divisée en tranches de capacité de taille plus raisonnable et exploitable par l'électronique des équipements terminaux : Les circuits intégrés au Silicium ne sauraient traiter des capacités de l'ordre de 1 Tbit/s. Les tranches de capacité utilisées à l'heure actuelle sont 2,5 Gbit/s et 10 Gbit/s et 40 Gbit/s.

Le DWDM est très souple d'emploi. Un équipement terminal distinct termine chaque couleur. On peut ainsi augmenter progressivement la capacité au fil des besoins en installant les équipements terminaux de nouvelles couleurs.

IV.3.3 L'amplification en ligne des systèmes de communication optique

IV.3.3.1 Introduction

Un des souhaits d'un concepteur de systèmes de transmission est de pouvoir allonger au maximum la distance séparant un émetteur optique du récepteur optique. La technologie a évolué dans cette direction en passant de la fibre multimode à la fibre monomode, supprimant ainsi la dispersion intermodale et en passant de la longueur

d'onde de 1330 nm à 1550 nm, minimisant ainsi l'atténuation. Celle-ci demeure pourtant la première limitation des liaisons à longue distance.

Dès lors que la distance sur laquelle on doit transmettre devient supérieure à la portée du système, on est obligé d'utiliser des répéteurs régénérateurs optoélectroniques qui convertissent le signal optique en signal électrique, le régénèrent et le convertissent à nouveau en signal optique en vue de le transmettre vers un autre répéteur ou terminal de ligne.

Le régénérateur optoélectronique comprend un laser, une photodiode et un grand nombre de circuits intégrés.

Tous ces composants devant fonctionner à grands débits sont chers, complexes, délicats à réaliser et à interfacer. Malgré les progrès incontestables de l'électronique à large bande, il y a lieu de penser que le développement de ce type de régénérateurs à des débits supérieurs à 2.5 Gbits/s sera coûteux. Pourtant, les besoins en débit ne cessent d'augmenter. Cette course à la capacité semble devoir se ralentir pour des raisons technologiques liées à la faisabilité des régénérateurs optoélectroniques; d'où le grand engouement vers les systèmes non régénérés avec l'utilisation de l'amplification optique.

IV.3.3.2. Intérêt de l'amplificateur optique

L'amplificateur optique est un dispositif qui assure l'amplification du signal tout en restant dans le domaine optique. Deux types d'amplificateurs optiques ont aujourd'hui des applications clairement identifiées : l'amplificateur optique à semiconducteurs et l'amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium. Ces deux types d'amplificateurs optiques fonctionnent sous le même principe physique : un faisceau lumineux incident est amplifié grâce à un apport extérieur d'énergie appelé pompage.

L'amplificateur optique présente de nombreux intérêts qualitatifs par rapport au répéteur régénérateur qui doit être conçu pour un débit bien spécifique. En effet, dans un amplificateur optique, la bande passante n'est plus limitée par l'électronique et peut atteindre plusieurs centaines de gigahertz. L'amplificateur optique offre l'avantage d'amplifier les signaux dont la longueur d'onde correspond à leur plage de sensibilité sans tenir compte du débit de transmission et du format de modulation utilisé. Cependant, l'amplificateur optique ne régénère pas le signal et n'effectue pas non plus la mise en forme du signal à amplifier ; il amplifie le signal au même titre que son bruit

associé. L'amplification optique peut avoir lieu en trois points d'une liaison qui correspondent aux trois applications principales d'un amplificateur optique comme indiqué à la figure

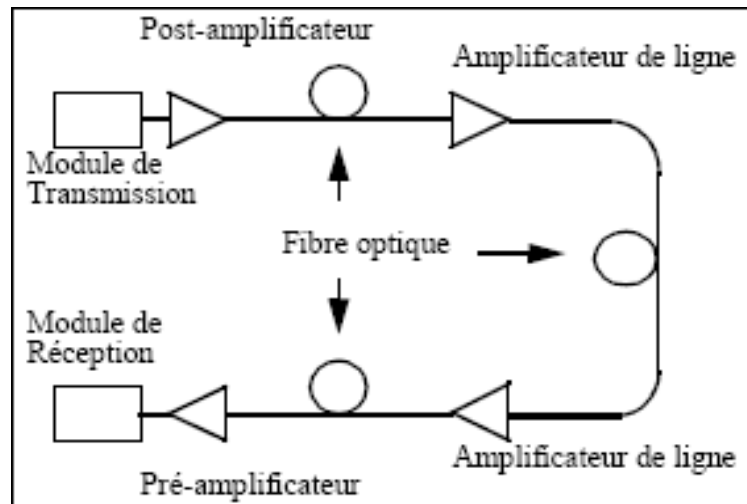


Figure IV.10 : Applications de l'amplificateur optique.

L'objectif des études de système est l'identification des points de fonctionnement possibles pour le débit à transmettre et la longueur de la liaison. Le post-amplificateur placé à la sortie du module de transmission a pour rôle d'augmenter la puissance de sortie de l'émetteur et donc d'accroître d'autant le budget total de la liaison. Les amplificateurs en ligne ont pour fonction de compenser l'atténuation du signal par la fibre et les différentes pertes encourues. Le pré-amplificateur situé à l'entrée du module de réception permet d'augmenter en même temps la sensibilité du récepteur et le budget de la liaison ; ici la minimisation du facteur de bruit est très recherchée.

IV.3.3.3. Caractéristiques des amplificateurs optiques à fibre dopée à l'ERBIUM (EDFAs)

Le milieu amplificateur est le cœur d'une fibre optique monomode dopée avec des ions de terre rare. Pour l'amplification autour de 1550 nm, fenêtre de faible atténuation des fibres optiques en silice, les dopants sont des ions Er^{3+} . Le pompage est réalisé optiquement par couplage dans la fibre optique d'un flux lumineux puissant provenant d'une diode laser de pompe. Les longueurs d'onde de pompe sont celles qui permettent les transitions vers les états excités de l'erbium. 980 et 1480 nm sont les deux longueurs d'onde de pompe les mieux adaptées et, les diodes lasers à ces

longueurs d'onde sont disponibles. La comparaison de leur intérêt respectif montre que le pompage à 980 nm permet une inversion de population maximale et introduit un minimum de bruit, tandis que le pompage à 1480 nm est aujourd'hui le mieux maîtrisé avec des puissances élevées de pompage et de saturation.

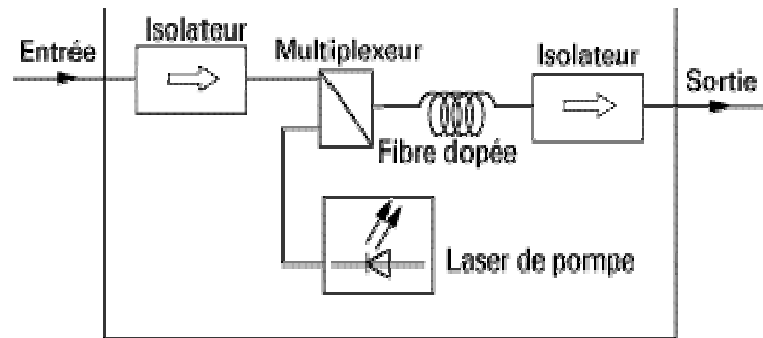


Figure IV.11 : Configuration d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium avec pompage optique

La figure IV.11 donne un exemple de configuration de ce type d'amplificateur. L'EDFA consiste en un morceau de fibre optique monomode dopée, de longueur d'environ 10 - 20 m et d'un laser de pompe. La lumière provenant de la pompe excite les ions Er^{3+} au niveau d'énergie supérieur, ce qui permet de réaliser l'inversion de population. Le multiplexeur optique sélectif en longueur d'onde effectue le couplage dans la fibre dopée à l'erbium du signal à transmettre et du signal de pompe; celui-ci doit présenter une perte d'insertion faible aux deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système. Les isolateurs optiques permettent d'éviter les oscillations et d'assurer la stabilité des caractéristiques de gain en bloquant tous les faisceaux lumineux susceptibles de revenir en aval. Le signal de pompe peut être couplé dans la fibre en co-propagation ou en contre-propagation.

La figure IV.12 met en évidence une large bande passante permettant une amplification simultanée de plusieurs signaux multiplexés en longueur d'onde. Le multiplexage en longueur d'onde permettra d'augmenter la capacité sans rendre le système plus complexe.

La transmission d'impulsions de type soliton est une alternative permettant d'éviter la déformation des signaux le long de la ligne.

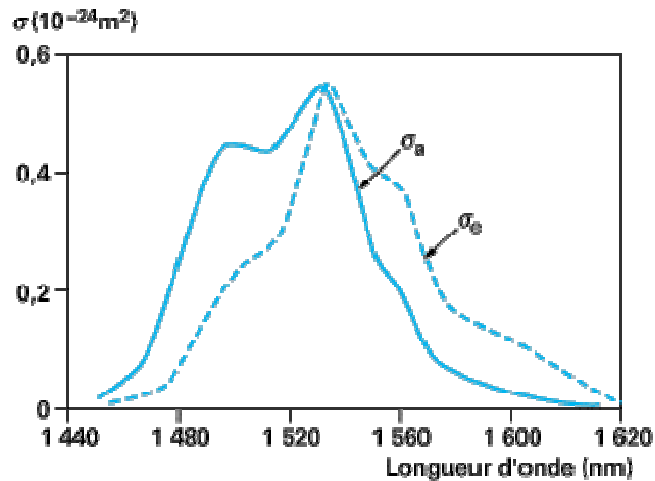


Figure IV.12 : Sections efficaces d'émission et d'absorption de l'ion erbium dans une matrice de verre fluoré

Une courbe caractéristique de gain en fonction de la puissance d'entrée est tracée sur la figure IV.13. Pour les faibles puissances d'entrée, le gain est constant et le régime de fonctionnement est linéaire : on parle alors de gain en petit signal. À forte puissance, l'amplificateur commence à saturer, c'est-à-dire que la puissance de sortie augmente de moins en moins avec la puissance d'entrée et tend vers une valeur asymptotique. La saturation d'un amplificateur optique est produite par la diminution de l'inversion de population : il y a de moins en moins d'ions excités.

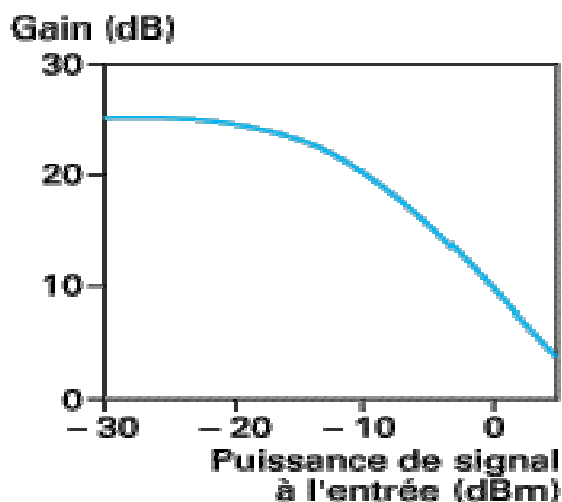


Figure IV.13 Gain en fonction de la puissance de signal entrant dans un amplificateur optique

IV.3.3.4 Caractéristiques des amplificateurs optiques à semi-conducteurs

En principe, tout laser à semi-conducteurs peut servir d'amplificateur optique. Il suffit d'enlever les miroirs et d'y injecter de la lumière d'une source externe comme dans l'amplificateur à fibre. Les travaux sur l'amplification optique à semi-conducteurs datent d'au moins une quinzaine d'années et ils sont mis à profit depuis longtemps dans le domaine des lasers de puissance. Les applications couvrent une gamme de longueurs d'onde assez étendue incluant 1330 et 1550 nm.

En pratique, les amplificateurs optiques à semi-conducteurs souffrent des problèmes sérieux qui constituent leurs limites pour certaines applications. Ils permettent d'obtenir un gain élevé jusqu'à 30 dB selon le semi-conducteur, la longueur d'onde du signal amplifié et le courant de polarisation et ce, sur une large bande passante (30 - 50 nm).

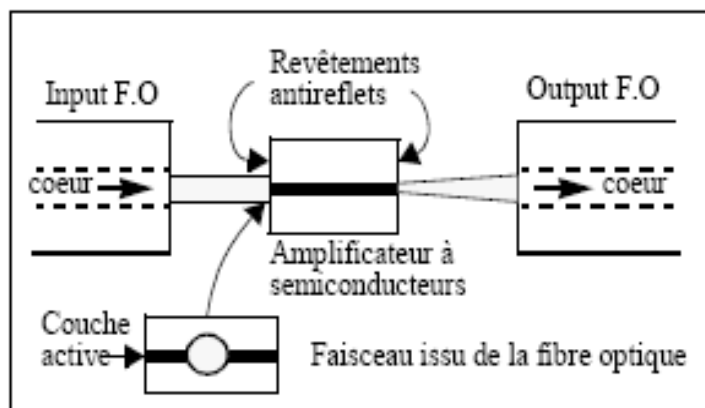


Figure IV.14 : Configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteurs.

La figure IV.14 donne une configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteurs. Les deux facettes de l'amplificateur sont recouvertes d'un revêtement antireflet afin de diminuer les réflexions de la lumière vers l'intérieur du circuit intégré. La lumière incidente entre dans le circuit, elle est amplifiée et sort par l'autre bout pour être couplée dans la fibre. Idéalement, il n'y a pas de réflexion du signal vers l'amplificateur. Les pertes de couplage du faisceau incident dans l'amplificateur sont très élevées, car le diamètre du faisceau est supérieur à l'épaisseur de la couche active. En plus, le gain de l'amplificateur dépend de la polarisation de la

lumière incidente; ce qui est difficilement contrôlable, car les fibres optiques monomodes standards ne sont pas à maintien de polarisation.

Le gain est aussi simulé en fonction de la puissance du signal d'entrée variant de -16 dBm à -2 dBm (figure IV.15). On remarque une bonne sensibilité du gain aux faibles puissances du signal incident. Le gain est presque constant pour les faibles puissances traversant l'amplificateur.

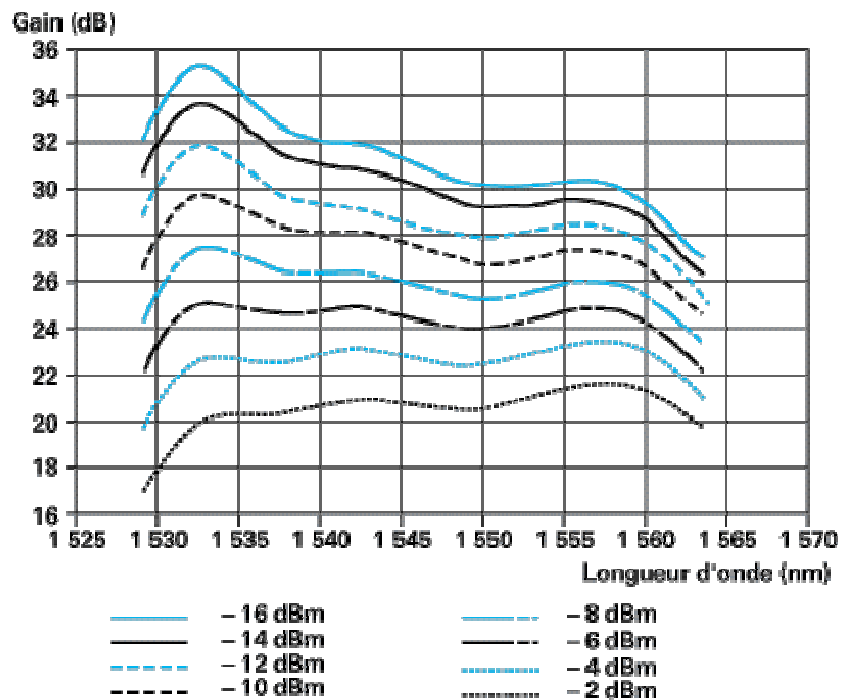


Figure IV.15 : Spectre du gain d'un amplificateur optique pour différentes puissances du signal entrant

IV.3.3.5 Etude comparative

Les amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium fonctionnent mieux que leurs homologues à semi-conducteurs et présentent plusieurs caractéristiques qui les rendent plus attrayants quant à leur utilisation dans les systèmes de transmission optique à grandes distances et à débits élevés. Ils introduisent de faibles pertes d'insertion et ils ont une très faible distorsion du signal. En effet, le signal à l'entrée est presque similaire à celui qui en sort. La diaphonie et le bruit sont faibles et de plus, ils sont insensibles à la polarisation de la lumière incidente. La supériorité du gain et de la puissance de saturation, les faibles pertes d'insertion et la réduction du facteur de bruit conduisent à préférer les EDFAs aux amplificateurs optiques à semi-conducteurs pour les

applications de post-amplification, d'amplification en ligne et de pré-amplification. Cependant, les EDFAs sont limités à l'amplification du signal autour de 1550 nm, ce qui constitue leur principale limitation intrinsèque. Les amplificateurs à semi-conducteurs présentent quant à eux l'avantage d'amplifier des signaux sur une plus grande gamme de fréquences. De plus, les amplificateurs à semi-conducteurs se prêtent à l'intégration monolithique, ce qui est difficilement réalisable avec les EDFAs

IV.3.3.6 Contraintes des systèmes amplifiés

Les limites des systèmes non régénérés à grandes distances sont imposées par le bruit, la puissance de saturation des amplificateurs optiques et par les phénomènes non linéaires inhérents à la propagation dans la fibre.

L'augmentation du débit binaire entraîne une dégradation du rapport signal sur bruit en raison de l'élargissement de la bande électrique de réception. Cette augmentation de débit accroît outre l'influence des phénomènes non linéaires, principalement l'effet Kerr du fait de la réduction de la durée de l'intervalle de temps binaire et de l'encombrement spectral accru du signal. Le multiplexage en longueur d'onde de plusieurs canaux à débit binaire moins élevé est une alternative attrayante permettant de repousser les limites précitées. Mais il faudrait au départ maîtriser l'espacement entre les canaux.

Le passage de la longueur d'onde 1330 nm correspondant au zéro de dispersion à 1550 nm où le coefficient de dispersion est d'environ 18 ps/km.nm est un autre facteur limitatif surtout à de grandes distances ou même à des débits élevés. Les nouveaux systèmes de communication optique devant être réalisés à cette longueur d'onde, la compensation de la dispersion constitue une étape importante à franchir.

L'utilisation des fibres optiques monomodes à dispersion décalée permet actuellement de minimiser l'effet de la dispersion dans la dégradation du signal. Donc les systèmes à 1550 nm ne seront plus limités par la dispersion.

L'émission stimulée est à l'origine de l'amplification optique d'un faisceau de photons incidents. Quant à l'émission spontanée, elle peut être amplifiée à son tour par l'émission stimulée: il s'agit alors d'émission spontanée amplifiée (ASE), à l'origine du bruit des amplificateurs optiques. Contrairement à l'émission spontanée, l'ASE dépend de la longueur d'onde et de la puissance de pompe injectée dans la fibre. Elle se comporte comme un bruit vis à vis du signal utile. Ce bruit est un facteur qui limite la

mise en cascade des amplificateurs optiques puisqu'à chaque étage d'amplification, s'ajoute le bruit local au bruit amplifié créé par l'étage précédent. L'ASE accumulée est proportionnelle au gain de chaque amplificateur et à leur nombre. Son spectre est celui de l'émission spontanée modifiée par le profil de gain de la chaîne amplificatrice. Le photocourant résultant de l'ASE peut être approximé par:

$$I_{ASE} = 2\eta n_{sp} m(G-1)B_0$$

Avec n_{sp} le facteur d'émission spontanée, m le nombre d'amplificateurs, G le gain de chacun d'eux, η l'efficacité de couplage pouvant prendre en compte les pertes de transmission entre le dernier amplificateur et le récepteur, B_0 la bande passante optique et e la charge d'un électron.

Dans un système amplifié de longueur totale L et d'espacement entre amplificateurs successifs d , le nombre d'amplificateurs m est donné par $m = L/d$, et le gain de chaque amplificateur est $G = (G_{total})^{1/m}$. Il est évident que le photocourant dû à l'émission spontanée amplifiée est minimisé si d tend vers zéro ; ce qui améliore le rapport signal sur bruit.

IV.3.3.7 Conclusion

En plus des avantages qualitatifs des amplificateurs optiques (OAs), par rapport aux répéteurs régénérateurs constitués d'un grand nombre de composants électroniques, ceux-ci permettent de réduire le coût global des installations, car le coût de maintenance est réduit par la diminution du nombre d'éléments. L'augmentation de la puissance d'émission grâce à l'emploi du post-amplificateur renforcée par l'utilisation du pré-amplificateur engendre un accroissement de la portée possible des systèmes non régénérés. L'utilisation de la fibre à dispersion décalée (recommandation G.653 de l'UIT-T) présente l'avantage de repousser la limitation due à la dispersion chromatique. Les amplificateurs optiques s'adaptent à l'évolution du réseau vers les hauts débits jusqu'à quelques dizaines de Gbits/s.

IV.4 Le soliton, une solution aux distorsions de propagation

Pour avoir une liaison optique à haut débit, plus l'utilisation de la technologie WDM/DWDM, il est possible de générer des ondes impulsives stables qui ont la

propriété de pouvoir se propager sur de grandes distances dans un milieu non linéaire et dispersif sans grande modification et qui sont par conséquent idéales pour la transmission de données par fibres optiques. Ces ondes sont appelées solitons optiques.

IV.4.1. DEFINITION du SOLITON

C'est une onde localisée ou paquet d'ondes qui se propage sans déformation et conserve ses caractéristiques (forme et vitesse) après collision avec une autre onde du même type. Le suffixe "on" représente l'aspect particulière de l'onde.

IV.4.2. Le soliton moyen.

Un soliton n'existe que s'il y a compensation exacte entre non linéarité et dispersion. La dispersion peut être contrôlée mais elle a un niveau donné sur toute la ligne. La non-linéarité est contrôlée par la puissance, mais avec les pertes l'amplitude diminue au fur et à mesure de la propagation. On peut faire en sorte qu'à l'entrée de la ligne il y ait un soliton, mais le long de la ligne l'amplitude va diminuer de sorte qu'avec les pertes le soliton se détruira. On a montré que malgré ces pertes on peut injecter dans la ligne une impulsion qui restera globalement un soliton. La puissance diminue le long de la ligne et on l'amplifie, si la puissance moyenne correspond à la puissance qu'il faut pour obtenir un soliton idéal, alors, tout se passe comme si c'était un soliton idéal, si la puissance est trop faible la dispersion "étale" l'impulsion et s'il y a une puissance trop élevée à l'entrée il manque de la dispersion, l'impulsion se "rétrécit" et accroît la dispersion.

Le phénomène soliton est très stable, c'est une sorte d'attracteur. Pour que le soliton moyen existe il faut que la distance entre deux amplificateurs soit supérieure à la longueur de dispersion qui correspond à la longueur à laquelle la largeur de l'impulsion s'est étalée d'un facteur racine de 2 (par convention).

IV.4.3. Caractéristiques importantes des solitons

La vitesse de l'onde, de la vague, dépend de son amplitude et si plusieurs vagues entrent en collision, les vagues ressortent non perturbées avec la même vitesse et la

même forme qu'avant la collision. Un soliton est une onde capable de se déplacer sur une très grande distance sans se déformer, en conservant sa forme exacte et sa vitesse. Il faut que le milieu de propagation soit dispersif et non linéaire.

IV.4.4. Le soliton, une solution aux distorsions de propagation

Pour une fibre optique de dispersion et de non-linéarité données, la recherche d'un équilibre entre les deux effets conduit naturellement à une relation entre l'intensité de l'impulsion et son spectre. Il en résulte une impulsion particulièrement stable puisque son spectre et sa forme temporelle sont simultanément stabilisés, dès lors que les pertes de la fibre sont supposées exactement compensées par le gain des amplificateurs optiques. L'enveloppe d'une telle impulsion, appelée soliton, résulte d'une parfaite symbiose entre la lumière et la fibre, alors parfaitement adaptées l'une à l'autre dans une sorte de résonance permettant une relative insensibilité à toute sollicitation perturbatrice. Le bénéfice en est une robustesse du soliton aux fluctuations locales de gain et de dispersion, la propagation de l'impulsion restant pour l'essentiel gouvernée par les valeurs moyennes de ces paramètres.

La figure IV.16 illustre l'aspect fondamentalement solitaire du soliton : le soliton le plus à gauche, isolé, se propage sur 14 000 km, sans déformation notable, alors que le couple de droite se déforme par attraction et répulsion.

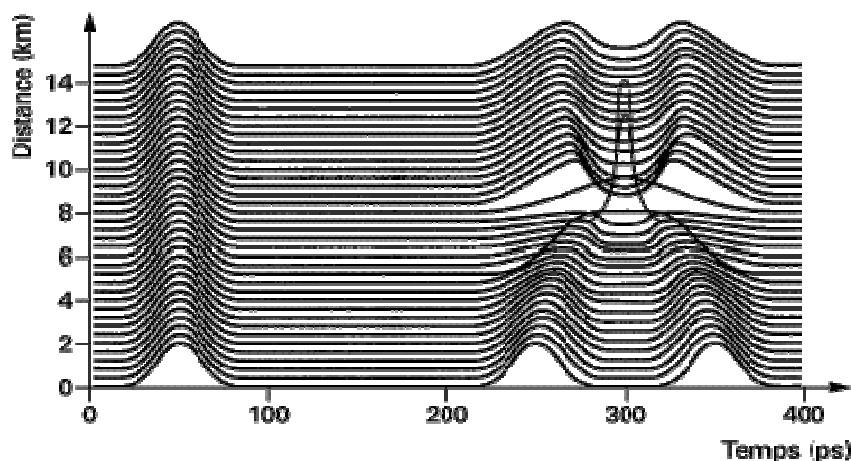


Figure IV.16: Propagation sur une distance de 14 000 km de la forme d'onde soliton associée à la séquence 1011

IV.4.5. Phénomène de base

La transmission par solitons s'appuie dans son principe sur l'existence d'un régime stable de propagation d'impulsions isolées, de forme et de puissance particulières choisies de telle sorte que les effets dus à la dispersion chromatique et à l'automodulation de phase (effet Kerr) se compensent. Cet équilibre garantit ainsi l'invariance des caractéristiques de l'impulsion le long de la fibre supposée sans pertes, quelle qu'en soit la longueur. L'idée fondamentale est donc d'utiliser les effets non linéaires pour stabiliser la propagation alors qu'on cherche à les minimiser en transmission conventionnelle.

Si b_2 (coefficient de dispersion) est positif, le temps de propagation de groupe augmente avec la fréquence et le front avant (resp. arrière) se propage plus (resp. moins) vite, si bien que l'impulsion s'élargit continuellement au cours de la propagation : c'est ce qui se produit sur la fibre standard. Lorsque b_2 est au contraire négatif, les phénomènes linéaires et non linéaires induisent des effets opposés et l'impulsion commence par se rétrécir avant de s'élargir à nouveau. La non-linéarité, combinée avec la dispersion, peut ainsi jouer un rôle bénéfique en réduisant la largeur des impulsions transmises.

Le soliton est la solution à la recherche d'un équilibre stable dans ce régime de propagation. Plus précisément, le soliton est une impulsion de forme générique :

$$A(z, T) = \sqrt{P_c} \frac{1}{ch} \left(\frac{t}{\tau} \right)$$

Dont on peut montrer qu'elle vérifie l'équation de Schrödinger sans pertes ($a = 0$) à condition que P_c , puissance crête, et t , largeur caractéristique de l'impulsion, soient liées par une relation:

$$\tau^2 P_c = f(\beta_2, \gamma)$$

Son existence théorique a été mise en évidence dès 1973 et a été confirmée expérimentalement par la propagation d'impulsions de largeur voisine de la picoseconde sur quelques centaines de mètres en 1980.

D'une part, le soliton n'existe comme il vient d'être dit que sur une fibre idéale sans pertes, d'autre part, comme la somme de deux solutions d'une équation non linéaire n'en est pas une solution, celle qui a été trouvée correspond à un soliton isolé. Or, en pratique, toutes les fibres présentent des pertes compensées périodiquement par des

Chapitre IV: les nouvelles technologies pour les liaisons à haut débit

amplificateurs, au prix de l'addition de bruit, et l'on souhaite transmettre un train d'impulsions, pas une impulsion unique.

V.1 Introduction

Le secteur des télécommunications s'est considérablement développé depuis quelques années. Dans ce contexte, les télécommunications optiques occupent une place de choix pour le transport des données sur des distances dépassant quelques Km. La combinaison de sources lasers rapides émettant dans le proche infra-rouge (principalement autour de $\lambda = 1,55\mu\text{m}$), d'amplificateurs optiques, et les qualités propres de la fibre optique (pertes faibles : $\approx 0,2$ dB/km vers $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, et dispersion chromatique acceptable), ont rendu cette évolution possible. A ceci s'ajoute la possibilité de "combiner" les signaux optiques véhiculés par la fibre via la technique du multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing ou WDM), qui permet d'atteindre des débits binaires de quelques Térabits par seconde transportés par une unique fibre.

Le bilan de liaison dans un système de communication par fibres optiques s'étudie de la même manière que n'importe quel système de transmission.

Ce bilan de liaison permet de déterminer la distance maximum de transmission correspondant à la séparation maximum entre répéteurs (régénérateurs). Cette distance est limitée par :

- L'affaiblissement de propagation
- La diminution de la bande passante le long de la fibre, diminution due à la dispersion totale.

V.2 Caractéristiques d'une liaison

La liaison est d'abord définie par ses caractéristiques externes :

- Signal à transmettre (fréquence, code, niveaux, ...).
- Distance de transmission.
- Dégradation admise de la qualité du signal transmis (taux d'erreur, rapport signal à bruit).
- Environnement, voies de service, etc.

Ses différents éléments sont ensuite déterminés à partir des considérations ci-dessus, d'une manière générale :

- La nature du signal détermine l'émetteur et le récepteur.

- La qualité requise nécessite un flux énergétique minimal à l'entrée du récepteur; la fréquence en ligne, la distance, déterminent le conducteur optique.
- Des itérations affinent les solutions possibles.
- Des considérations pratiques et économiques arrêtent le choix final.

Toutefois, ce processus un peu trop général conduit à de trop nombreuses solutions, combinaisons de tous les éléments décrits :

- Fonctionnement à 0,8 μm , ou à 1,3 μm , ou à 1,5 μm .
- Emetteur à diode électroluminescente ou à diode laser.
- Détecteur PIN ou à avalanche.
- Fibre multimode ou unimodale.
- etc.

Heureusement, les propriétés précises de ces divers composants permettant le plus souvent de restreindre le nombre de solutions à examiner a priori :

- Une diode électroluminescente ne peut être utilisée dans la pratique au-delà de 50 MHz.
- Une fibre multimode à échelon d'indice a une bande passante faible à cause de sa forte dispersion modale.
- L'affaiblissement linéique d'une fibre optique est nettement plus grand vers 0,8 μm qu'à 1,3 μm ou 1,5 μm .
- etc.

Il est alors plus aisé d'établir une solution au problème posé.

V.3 Conception

La méthodologie de conception d'un système n'est pas une suite logique ou figée d'opérations de définition. L'optimisation complète, en accord avec les impératifs fixés par l'utilisateur, impose le passage en revue des différentes solutions possibles : types de modulation, d'émetteur, de câble et de récepteur.

A priori, on peut commencer indifféremment par la sélection de l'émetteur, du câble ou du récepteur et analyser quelle est l'incidence du choix de cet élément sur les

autres. Toutefois, suivant une habitude bien établie, la démarche débute par la définition du récepteur et peut schématiquement se décomposer suivant quatre phases :

1-on retient le type de modulation et de codage le plus simple (modulation d'intensité avec un signal analogique, code NRZ avec un signal numérique).

2- on définit le récepteur le plus simple et on calcule la puissance minimale à l'entrée conduisant au rapport signal/bruit ou au taux d'erreurs imposés. En fonction des exigences sur la restitution (récupération d'horloge imposée ou non) et le contrôle du message numérique (mesure éventuelle en ligne de la qualité de la transmission), il faudra éventuellement changer le code de transmission.

3-on choisit la source de lumière en accord avec les exigences sur une bande passante et la fiabilité .si les conditions de distorsion non linéaire ne peuvent êtres satisfaites avec la modulation d'intensité, il faut envisager une correction ou changer la modulation, on revient alors au point 2.

4-on calcule les pertes de transmission et la bande passante autorisée et on en déduit le type de fibre. Le choix du câble se fait essentiellement en respectant le compromis : coût / résistance aux conditions d'environnement (température, pression, chocs ...) et de pose (tirage en conduit, déroulage en caniveaux). En plus, il faut tenir compte de l'éventuel supplément d'atténuation apporté par le câblage.

Si l'affaiblissement linéique trouvé est trop faible pour être réalisé, il faut revenir sur le choix des composants (PDA au lieu de PIN, LSC) ou de la modulation, puis reprendre la conception aux étapes 2. ou 3. Si malgré cela, l'atténuation demeure trop faible, on pourra introduire un ou plusieurs répéteurs intermédiaires ou bien, si la liaison est à caractère expérimental, transmettre au voisinage de 1,3 μ m.

Si la bande passante, ramenée au kilomètre, est incompatible avec les fibres actuellement disponibles, il faut envisager un changement de modulation, une égalisation dans le récepteur (on revient au point 2.) ou encore, si la liaison est à caractère expérimental, l'utilisation de fibres monomodes et/ou de composants fonctionnant autour de 1,3 μ m(on revient au point 2.).

V.4 Bilan d'une liaison par fibre optique

Une liaison de transmission par fibres optiques est constituée d'une source lumineuse (DL ou DEL) qui convertit le signal électrique en signal lumineux. Ce signal,

injecté dans une fibre (SI ou GI) se propage avec une certaine atténuation et une certaine dispersion. A la sortie de la fibre, le signal optique est converti en un signal électrique à l'aide d'un photodétecteur (PIN ou APD).

A cause de l'impossibilité de fabriquer des longueurs de fibres importantes, il est nécessaire de réaliser des épissures entre fibres ce qui produit des pertes supplémentaires.

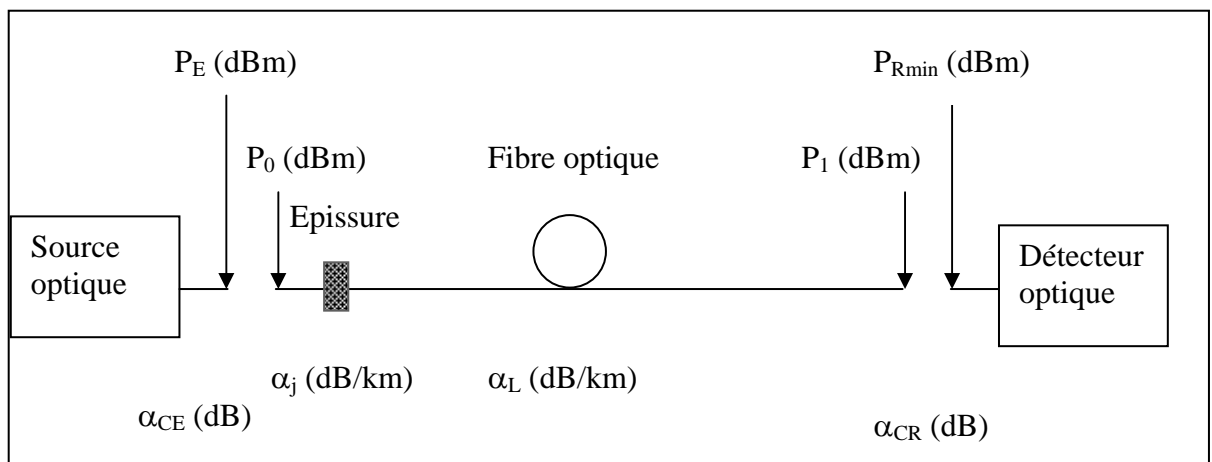


Figure.V.1 : liaison par fibre optique sans répéteur (régénérateur) avec des présentation des différentes puissances et atténuation.

Puissance mise en jeu :

- P_E : Puissance rayonnée par la source.
- P_0 : Puissance injectée dans la fibre.
- P_1 : Puissance à la sortie de la fibre.
- P_{Rmin} : Puissance minimum captée par le détecteur correspondant au seuil de réception pour un rapport S/N ou TEB donné.

Affaiblissements :

- α_{CE} : Affaiblissement de couplage entre la source et la fibre.
- α_j : Affaiblissement des différentes jonctions (fixes et mobiles).

- α_L : Affaiblissement linéaire de la fibre.
- α_{CR} : Affaiblissement de couplage entre la fibre et le détecteur.

V.4.1 Affaiblissement total de propagation :

Pour déterminer cet affaiblissement on suppose que le canal de transmission est non dispersif (canal théorique), il est constitué d'une fibre qui ne présente aucune dispersion (chromatique et modale).

Affaiblissement total

Connaissant la puissance émise par source optique ainsi que la puissance reçue, il est possible de déterminer les pertes totales admises qui seront réparties entre les différents éléments du canal (couplage, fibre, épissures).

$$\alpha_{Tot} = 10 \log \frac{P_E}{P_R}$$

Les pertes totales, exprimé en dB, sont données par la relation suivante :

$$\alpha_{Tot} = \alpha_{CE} + (\alpha_J + \alpha_L)L + \alpha_{CR}$$

Où L est la longueur totale de la fibre.

L'utilisation des systèmes de transmission jusqu'aux limites de leurs capacités n'est pas conseillée. Il faut toujours tenir compte des différentes perturbations dans le fonctionnement (dérive en température, remplacement des composants,...) pour assurer un fonctionnement stable. C'est la raison pour laquelle, lors de la conception d'une liaison par fibres optiques, il est nécessaire d'inclure dans le bilan de liaison une certaine marge de sécurité M (entre 5 et 10 dB).

La marge de sécurité doit être plus importante pour les systèmes utilisant des diodes laser que ceux utilisant des diodes DEL. Ceci s'explique par le fait que les caractéristiques des diodes laser sont beaucoup moins stables en température.

En tenant compte de la marge, la puissance émise s'écrit :

$$P_E = P_{R \min} + \alpha_{TOT} + M$$

Rappelons que $p_{R \min}$ dépend en analogique, du rapport signal à bruit et en numérique, du débit et du taux d'erreur.

V.4.2 Longueur maximum d'un canal non dispersif

Connaissant les caractéristiques de la liaison, la marge imposée, il est facile de déterminer la portée maximum de ce type de canal.

$$L_{SD} = \frac{P_E - P_{R \min} - M - \alpha_{CE} - \alpha_{CR}}{\alpha_J + \alpha_L}$$

V.4.3 Influence de la bande passante sur la longueur de la liaison

Du point de vue bande passante, la fibre optique se comporte comme une association de deux filtres passe-bas placé en cascade.

Ces deux filtres sont caractérisés par leurs fréquences de coupure qui dépend de la longueur de la fibre et qui correspond à la bande passante modale et à la bande passante chromatique.

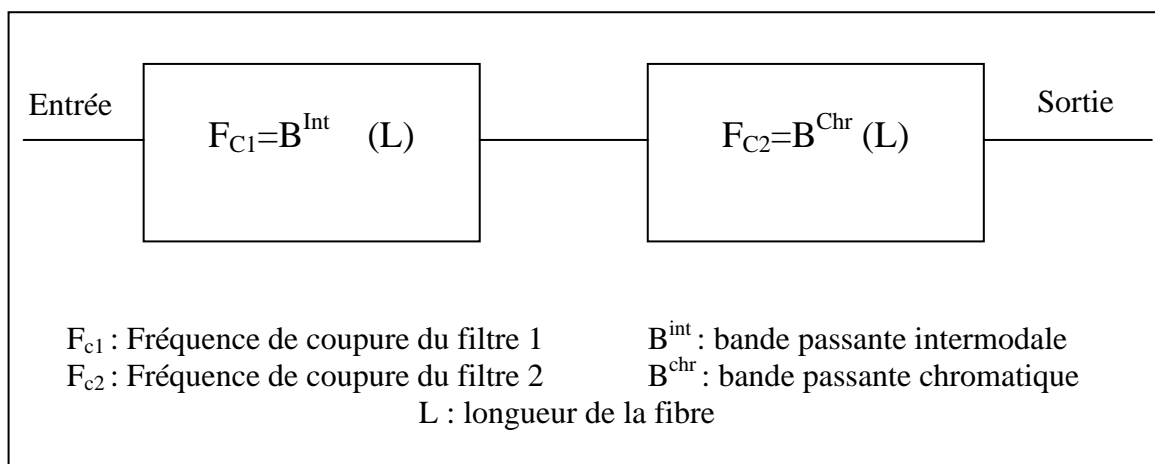


Figure.V.2 : Comportement de la fibre du point de vue bande passante

Lorsque l'on veut transmettre le long d'une fibre optique un système de bande passante B_{sys} il faut toujours veiller à ce que, pour la longueur choisie, la bande passante du système ne soit pas limitée par celle de la fibre.

Autrement dit, les deux filtres ne doivent en aucun cas limiter la bande passante du système, ce qui conduit à la vérification simultanée des deux inégalités suivantes.

$$\left. \begin{array}{l} B_{\text{sys}} \leq B^{\text{Chr}}(L) \\ B_{\text{sys}} \leq B^{\text{Mod}}(L) \end{array} \right\} \Rightarrow \text{Longueur choisie correcte.}$$

La portée maximum d'une liaison réelle dépend de l'atténuation totale du canal et de la limitation de la bande passante due aux différentes dispersions.

La détermination de la portée maximum d'un canal réel (dispersif) se fait de la manière suivante :

- Une fois que la longueur totale a été déterminée (absence de dispersion) on vérifie, pour cette longueur, si la bande passante de la fibre est suffisante pour être correctement transmise.
- A partir de cette longueur, on calcule les différentes bandes passantes (Bande chromatique, Bande modale et bande totale).
- On compare la bande passante totale de la fibre avec celle du système de transmission. Ceci conduit à deux possibilités :
 - $B_{\text{Globale}} \geq B_{\text{sys}} \Rightarrow$ la longueur calculée permet une transmission correcte du signal.
 - $B_{\text{Globale}} < B_{\text{sys}} \Rightarrow$ la longueur choisie ne permet pas de transmettre correctement le signal. Il faut, dans ce cas, rechercher la plus faible bande passante (B^{int} et B^{chr}).

Le calcul de la nouvelle longueur maximum (canal dispersif) se fait à partir de la relation suivante :

$$L = \text{Min}(L_{SD}, L_{AD})$$

L_{SD} : longueur de la liaison non dispersive.

L_{AD} : longueur de la liaison dispersive.

V.5 Liaison numérique

1. Codes de transmission

a. Introduction

Transmettre un signal numérique consiste à reconstituer, à la réception, le signal original et à en extraire l'horloge (phase et fréquence). Cette horloge est utilisée aussi bien pour des opérations de décision que pendant les opérations de conversion (numérique-analogique) et éventuellement lors du multiplexage.

Au cours de sa propagation, le signal numérique subit une détérioration (élargissement de l'impulsion) due au caractère dispersif de la fibre. Cet élargissement se traduit par le phénomène d'interférences intersymboles.

La qualité d'une liaison numérique est caractérisée par le taux d'erreur qui est donné par :

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

b. Choix du code de transmission

Il dépend d'un certain nombre de paramètres :

- **Spectre en bande de base**

Il doit satisfaire aux spécifications suivantes :

- Un encombrement minimum.
- Une transmission nulle en continu.

L'encombrement minimum permet de réduire le bruit à la réception et éventuellement de réaliser un multiplexage en longueur d'onde.

La polarisation des éléments actifs du récepteur oblige à découpler la source de polarisation à l'aide de capacités bloquant ainsi toute composante continue. Pour éviter tout problème de transmission, il est important que le signal transmis n'ait pas de composante continue.

- **Récupération du rythme**

Elle est nécessaire lors de la prise de décision (1 ou 0) et également lors de la régénération du signal numérique. Il faut donc que le code en ligne choisi permette la récupération du signal d'horloge.

- **Contrôle automatique du taux d'erreur**

Pour que ce contrôle puisse se faire sans interruption de la transmission, il faudrait que le code utilisé soit redondant.

c. Représentation des signaux codes

Parmi les codes les plus utilisés nous citerons les codes NRZ et CMI dont la représentation est donnée par le tableau suivant :

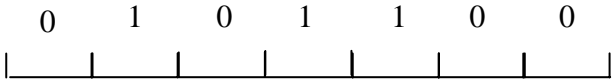
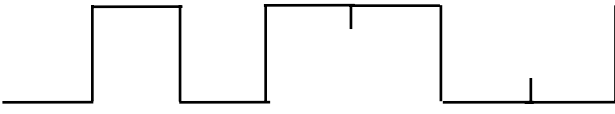
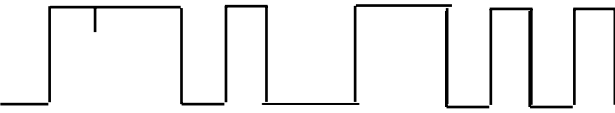
Séquence à transmettre	
Signal codé NRZ	
Signal codé CMI	

Tableau V.3 : Représentation des signaux codés NRZ et CMI.

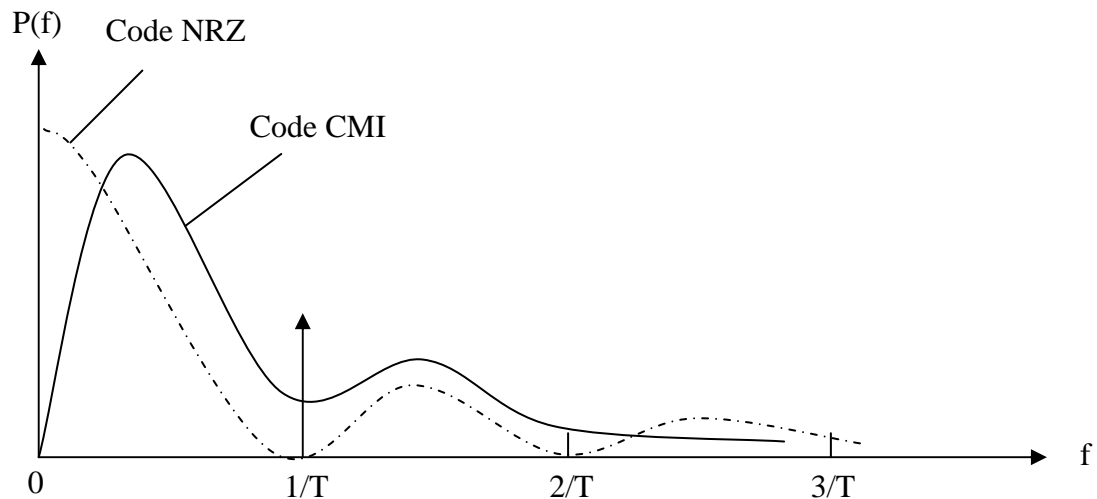


Figure V.4 : Densité spectrale de puissance des codes NRZ et CMI

Code NRZ	Code CMI
$0,86/T$	$170/T$

Tableau V.5 : Bande de fréquence contenant 90 % de la puissance.

d. Particularités des différents codes

Code NRZ

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

Code CMI

- Ne transmet aucune énergie en continu.
- Présente une raie d'horloge dans le spectre.

V.5.2 Relation entre bande passante et débit

La bande passante et le débit sont liés par la relation suivante :

$$B_{\text{sys}} (\text{MHz}) = \eta D (\text{Mbit} / \text{s})$$

Où η est le facteur d'efficacité du code, il est donné par :

Code	NRZ	CMI
Efficacité	0,7	1,4

Tableau v.5 : Efficacité des codes NRZ et CMI.

∞ Conclusion ∞

Après cette étude, nous avons sorti avec des résultats importantes parmi lesquelles:

- ✎ L'étude des liaisons point à point optique nécessite une étude sur chacun des éléments intervenants dans la chaîne de transmission, ce qui permet de voir les caractéristiques du signal transmis.
- ✎ la fibre permette le transport de débits nettement supérieurs à ceux que peuvent véhiculer les autres supports, et ceci avec une meilleure qualité de transmission.
- ✎ Les composants optiques sont les moteurs de la révolution des réseaux optiques qui tendent vers le tout-optique avec ses optimums performances (énorme capacités, défauts optimisés,...).
- ✎ Le développement des télécommunications à haut débit par fibre optique nécessite la mise au point de dispositifs de plus en plus rapides, à large bande et fonctionnant dans la plage spectrale des amplificateurs à Erbium
- ✎ Mais, les performances des systèmes des communications optiques haut débit ($\geq 10\text{Gb/s}$) se trouvent influencées par les effets linéaires (dispersion chromatique, dispersion modale de polarisation, atténuation) et non linéaires (effet Kerr et effet Raman) de la fibre optique.
- ✎ ce projet de fin d'études, présente ainsi, des résultats théoriques concernant l'influence de ces effets sur la transmission haut débit sur fibre optique.

On peut sans trop se tromper dire que la fibre optique est à la base de l'explosion des communications planétaires modernes.

∞ Résumé ∞

✎ Dans le but d'approximer le lecteur au monde des télécommunications optiques et présenter les systèmes récents dans ce nouveau monde, notre travail vient d'approfondir beaucoup plus en mettant sous l'étude les liaisons point à point par fibre optique à haut débit.

✎ Pour cela, nous avons fait une étude théorique répartie sur cinq chapitres : nous avons commencés par une introduction générale sur l'histoire de la fibre optique, ensuite un chapitre sur le monde des télécommunications optiques en montrant leurs systèmes de transmission et ses développements importants, on a attaqué dans le deuxième chapitre les liaisons point à point polychromatiques par une description des éléments de la chaîne de la liaison, dans le chapitre III on a fait une analyse sur les problèmes et les défauts apparaissant le long de la liaison en limitant ses performances, automatiquement dans le chapitre IV nous avons soulignés les solutions et les technologies exploités pour optimiser plus en plus les performances de ces liaisons. Enfin on a terminé par une conclusion générale.

Glossaire

APD (Avalanche PhotoDiode)

ATM (Asynchrone Transfert Mode)

DCF (Dispersion Compensation Fiber)

DSF (Dispersion Shifted Fibre)

DWDM (dense wavelength division multiplexing)

EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)

ETDM (Electronique Time Division Multiplexing)

FWM (Four Waves Mixing)

FEC (Forward Error Code)

LAN (Local Area Network)

LASER (Light Amplification by Simulated Emission of Radiation)

LED (Light Emitting Diode)

MAN (Metropolitan Area Network)

MZ modulateur Mach-Zehnder

NZDSF (Non Zero Dispersion Shift Fiber)

OXC (Optical Cross Connect)

OADM (Optical Add/Drop Multiplexer)

OTDM (Optical Time Division Multiplexing)

PIN (Positives Intrinsic Negative photodiodes)

PMD (Polarisation Mode Dispersion)

PSCF (Pure Silica Core Fiber)

PDA (Photodiode à Avalanche)

RIN (Relative Intensity Noise)

SDH (Synchronous Digital Hierarchy)

SMF (Signal Monomode Fiber)

SSMF (Standard Singel Monomode Fiber)

SONET (Synchronous Optical Network)

TDM (Time Division Multiplexing)

TDMA (Time Domain Medium Access)

TEB (Taux d'erreur binaire)






WAN (Wade Area Network)

WDM (Wavelength Division Multiplexing)







3R (Retiming Reshiping Regenerating)

BIBLIOGRAPHIE

LIVRES :

- | | | | |
|---|---|---------|-------|
|  | [L1] câble à fibres optiques
Gunther Mahlke / Peter Gossing | SIEMENS | 1989. |
|  | [L2] Transmission par fibre optique
Sidi Ali Mebarek Zerouk | OPU | 2001. |
|  | [L3] optoélectronique
E.ROSENCHER et B.VINTER | MASSON | 1998. |
|  | [L4] technique des ingénieurs
I et M. JOINDOT | TE 7115 | 1999. |
|  | [L5] Les télécommunications
par fibres optiques
I.et M. JOINDOT | DUNOD | 1996. |

THESES Et PFE:

- | | | | |
|---|--|--------|------|
|  | [T1] Communications optiques à très haut débit
Jérôme LAURENT | France | 2004 |
|  | [T2] Amplification et conversion paramétriques, décalage et suppression de fréquences, par processus Kerr et Raman dans les fibres optiques
Thibaut SYLVESTERE | France | 2002 |
|  | [T3] Mise évidence des effets non linéaire d'une liaison tout optique haut débit
Projet de fin d'étude | Tunis | 2002 |
|  | [T4] Etude des performances d'un photorécepteur dans une chaîne de télécommunication optique comportant un amplificateur optique à fibre dopé
Projet de fin d'étude (IGE:22) | ITO | 2002 |
|  | [T5] Etude de raccordement des composant le système a fibre optique
Projet de fin d'étude (IGE:22) | ITO | 2002 |
|  | [T6] Etude sur amplification en ligne des systèmes de communication optique
Projet de fin d'étude (IGE:23) | ITO | 2003 |

📄 [T7] **Routage optique dans les liaisons a haut débit WDM-DWDM**
Projet de fin d'étude (IGE:23) ITO 2003

📄 [T8] **Etude d'une liaison par fibre optique à haut débit « technologie WDM »**
Projet de fin d'étude(ING ELN) FGEI UMMTO 2010

Revues, Internet et ouvrages généraux :

🌐 [S1] www.unice.fr

🌐 [S2] <http://www.telcite.fr/index.htm>

🌐 [S3] www.palms.univ-rennes1.fr.

🌐 [S4] http://michaud.chez.tiscali.fr/intro_fibre.html

🌐 [S5] <http://www.htrr.ups-tlse.fr/pedagogie/cours/fibre/fotheori.htm>

🌐 [S6] http://opt-fibres.phys.polymtl.ca/Fibres_html/node1.html

