

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT TELECOMMUNICATION

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
en vue de l'obtention
du DIPLOME D'INGENIEUR

Spécialité : Télécommunication
Option : Transmission – Réseau – Commutation

par : RASOLOFOARINALA Miandrisoa

LIAISONS PAR FIBRES OPTIQUES

Soutenu le vendredi 25 février 2005 devant la Commission d'Examen composée de :

Président :

M. RANDRIAMITANTSOA Paul Auguste

Examineurs :

M. BOTO Andrianandrasana Jean Espérant

M. RAMORASATA Joseph Raphaël

M. RANDRIARIJAONA Lucien Elinio

Directeur de mémoire :

M. RANDRIANTSIRESY Ernest

REMERCIEMENTS

Je rends grâce à Dieu pour sa bonté, de m'avoir donné la force et la santé durant la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à adresser mes vifs remerciements aux personnes suivantes sans qui ce travail de mémoire n'aurait pas pu être réalisé :

Monsieur RANDRIANOELINA Benjamin, Professeur, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), pour ces cinq années d'études.

Monsieur RANDRIAMITANTSOA Paul Auguste, Professeur, Chef du Département Télécommunication à l'ESPA, qui me fait l'honneur de présider le Jury de ce mémoire;

Monsieur, M. RANDRIANTSIRESY Ernest, Directeur de ce mémoire qui, malgré ses lourdes responsabilités, m'a toujours prodigué ses conseils. Je tiens à lui adresser toute ma gratitude ;

Monsieur BOTO Andrianandrasana Jean Espérant, Assistant, Enseignant Chercheur au sein du Département Télécommunication à l'ESPA, de bien vouloir examiner le présent mémoire;

Monsieur, M. RAMORASATA Joseph Raphaël, Assistant, Enseignant Chercheur au sein du Département Télécommunication à l'ESPA, de bien vouloir examiner le présent mémoire;

Monsieur RANDRIARIJAONA Lucien Elino, Assistant, Enseignant Chercheur au sein du Département Télécommunication à l'ESPA, membre du Jury ;

Tous les enseignants et personnel de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo et ceux du Département Télécommunication particulièrement, sans leurs efforts notre formation n'aurait pas pu atteindre cette étape.

Je n'oublierai pas ma famille pour leurs soutiens bienveillants et leurs encouragements lors de la réalisation de ce mémoire. Plus particulièrement, à mes parents pour leurs sacrifices durant ces longues années afin que je puisse finir mes études.

Tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	i
NOMENCLATURE	iv
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I . GENERALITES SUR LA FIBRE OPTIQUE	2
<i>I.1 Introduction</i>	<i>2</i>
<i>I.2 Propagation dans la fibre optique</i>	<i>2</i>
I.2.1 Propagation d'ondes lumineuse	2
I.2.2 Loi de Descartes.....	3
I.2.3 Angle limite et condition de guidage	3
I.2.4 Ouverture numérique (ON).....	4
<i>I.3 Différents types de fibre.....</i>	<i>5</i>
I.3.1 Fibre multimode	5
I.3.1.1 Fibre multimode à saut d'indice	5
I.3.1.2 Fibre multimode à saut d'indice	6
I.3.2 Fibre monomode.....	7
I.3.3 Comparaison entre fibre multimode et monomode.....	7
<i>I.4 Dispersion des fibres.....</i>	<i>8</i>
I.4.1 Dispersion intermodale	8
I.4.2 Dispersion chromatique	9
<i>I.5 Atténuation de fibres optiques.....</i>	<i>10</i>
I.5.1 Atténuation intrinsèque	10
I.5.1.1 Diffusion.....	10
I.5.1.2 Absorption	11
I.5.2 Pertes aux raccordements.....	11
I.5.2.1 Causes des pertes.....	11
I.5.2.2 Calculs des pertes.....	12
I.5.3 Pertes par courbure et microcourbure	12
I.5.3.1 Causes des pertes.....	12
I.5.3.2 Effet des courbures	13
I.5.3.3 L'effet de microcourbures.....	13
<i>I.6 Fenêtre de transmission</i>	<i>14</i>
<i>I.7 Avantages de l'utilisation de la fibre optique.....</i>	<i>14</i>
<i>I.8 Optimisation des fibres optiques.....</i>	<i>14</i>
CHAPITRE II . LIAISONS PAR FIBRES OPTIQUES	17
II.1 Structure d'une liaison point à point par fibres optiques	17
II.2 Interface optoélectronique d'émission	17

II.2.1 La diode électroluminescente.....	18
II.2.1.1 Principe de l'émission de lumière dans un semi-conducteur	18
II.2.1.2 Principe des diodes DEL	18
II.2.1.3 Caractéristiques des diodes DEL.....	19
II.2.1.4 Rendement d'une diode	20
II.2.2 Diode LASER	23
II.2.2.1 Principe du laser.....	23
II.2.2.2 Spectre d'émission	24
II.2.2.3 Bruit des lasers	25
II.2.3 Techniques de modulation	26
II.2.3.1 La modulation directe.....	26
II.2.3.2 La modulation externe.....	27
II.3 Interface optoélectronique de réception	28
II.3.1 Photodiodes PIN.....	28
II.3.1.1 Principe.....	28
II.3.1.2 Sensibilité.....	29
II.3.1.3 Courant d'obscurité.....	30
II.3.1.4 Temps de réponse.....	30
II.3.2 Photodiodes à avalanche (PDA).....	30
II.3.2.1 Principe.....	30
II.3.2.2 Structure	30
II.3.2.3 Tension de claquage	31
II.3.2.4 Coefficient de multiplication	31
II.3.3 Bruits des photodiodes.....	32
II.3.3.1 Bruit de grenaille ou bruit quantique	32
II.3.3.2 Bruit des diodes à avalanche	32
II.3.3.3 Bruit thermique	33
II.3.3.4 Puissance équivalente de bruit.....	33
II.3.4 La détection	33
II.3.4.1 La détection directe.....	34
II.3.4.2 La réception hétérodyne	34
II.3.5 Rapport signal sur bruit en sortie du récepteur.....	35
II.4 Les répéteurs ou amplificateurs.....	36
II.4.1 Différents types des amplificateurs optiques	37
II.4.1.1 Les amplificateurs à semi-conducteur (AOSC)	37
II.4.1.2 Les amplificateurs à fibre dopée (EDFA)	38
II.4.1.3 Les amplificateurs Raman.....	39
II.4.2 Comparaison des amplificateurs	40
II.4.3 Utilisation de l'amplificateur optique.....	41
II.5 Techniques de multiplexage.....	41
II.5.1 Le multiplexage temporel (TDM).....	42

II.5.1.1 Multiplexage temporel optique (OTDM).....	43
II.5.1.2 Multiplexage Temporel Electronique (ETDM).....	44
II.5.2 Le multiplexage en longueur d'onde (WDM).....	45
II.5.3 Le multiplexage en longueur d'onde combiné au multiplexage temporel.....	46
II.5.4 L'accès multiple à répartition de codes (CDMA).....	47
II.6 Bilan de liaisons par fibres optiques.....	47
II.6.1 Puissances maximale et minimale de réception.....	48
II.6.2 Atténuation due à la dispersion	48
II.6.3 Portées maximales (en kilomètres) des liaisons par fibres optiques	49
 CHAPITRE III . ANALYSE ET ETUDE DE PERFORMANCE DES LIAISONS PAR FIBRES	
OPTIQUES	50
III.1 Présentation de MATLAB	50
III.1.1 Fonctions de Matlab pour les graphiques	51
III.1.2 Génération des signaux.....	51
III.2 Présentation du logiciel.....	52
III.2.1 Partie bilan de liaison.....	52
III.2.1.1 Exemple du calcul :.....	53
III.2.1.2 Programme correspondant à ce calcul.....	54
III.2.1.3 Programme donnant les courbes de dispersion et atténuation chromatique.....	57
III.2.2 Partie comparaison avec un autre support de transmission.....	59
III.2.2.1 Exemple d'application	60
III.2.2.2 Visualisation du signal reçu	63
 CONCLUSION.....	65
 ANNEXE 1 : Caractéristiques de quelques fibres optiques monomodes.....	66
 ANNEXE 2 : Le FDDI.....	67
 ANNEXE 3 : Programme donnant la fenêtre d'accueil.....	68
 BIBLIOGRAPHIE	73

NOMENCLATURE

λ	Longueur d'onde
n_2	Indice de réfraction de la gaine
λ_o	Longueur d'onde dans le vide
τ_r	Durée de la transition radiative
τ_{nr}	Durée de vie de transition non radiative
e_t	Excentrement transversal
n	Indice de milieu
P_E	Puissance émise
ρ_a	Rendement d'absorption
ρ_c	Rendement de l'angle critique
ρ_F	Rendement lié aux pertes de Fresnel.
c	Vitesse de la lumière dans le vide
i_1	Angle formé par le rayon réfléchi
i_2	Angle formé par un rayon réfracté
θ_{0L}	Angle incident limite à l'entrée de la fibre
i_{iL}	Angle limite
A	Atténuation
α_{mono}	Atténuation linéique
B_{El}	Bande de fréquence électrique
B_{Opt}	Bande de fréquence optique
q	Charge de l'électron
T	Coefficient de transmission
h	Constante de Planck
i_D	Courant d'obscurité
i_s	Courant du signal
i	Courant total dans la photodiode
I	Courant traversant la diode
D_α	Désalignement d'angle α

D	Défectivité
a	Diamètre du cœur
$2w_0$	Diamètre du mode
Δn^+	Différence absolue d'indice entre le cœur dopé germanium et la silice pure
Δ	Différence relative d'indice
D_G	Dispersion due au guide
D_M	Dispersion due au matériau
D_e	Écartement longitudinal
E_c	Énergie dans la bande de conduction
E_v	Énergie dans la bande de valence
E_g	Énergie dans la bande interdite
$F(M)$	Fonction croissante du gain M ou facteur d'accès de bruit
f	Fréquence
F_c	Fréquence de coupure
V	Fréquence réduite
M	Gain d'avalanche
n_0	Indice de réfraction de l'air
n_1	Indice de réfraction du cœur
$\Delta\lambda$	Largeur spectrale de la source
M_F	Marge de fonctionnement
M_s	Marge de sécurité
$\langle i_q^2 \rangle$	Moyenne du bruit quantique
$\langle i_A^2 \rangle$	Moyenne quadratique du bruit de l'amplificateur
$\langle i_s^2 \rangle$	Moyenne quadratique du courant de bruit
n_e	Nombre d'électrons
k_0	Nombre d'ondes dans le vide
N	Nombre de mode

n_p	Nombre de photons émis
$D(\lambda)$	Paramètre de dispersion chromatique
α	Paramètre de profil d'indice
A_R	Perte aux raccordements
α_c	Perte transitoire à l'entrée de la courbure dans une fibre multimode
P_o	Puissance optique
P_R	Puissance reçue
R_c	Rayon critique
ρ_{cr}	Rendement de l'angle critique
ρ_{qL}	Rendement quantique de luminescence
ρ_q	Rendement quantique interne
S	Sensibilité
S_A	Surface active
T_{mo}	Taux de modulation optique
V_B	Tension de claquage inverse
v	Vitesse de la lumière dans un matériau d'indice n
$P_{R\max}$	Puissance maximale admissible
ON	Ouverture numérique
DL	Diode laser
RZ	Retour à Zero
IT	Intervalle de temps
TDM	Time Division Multiplexing
IOP	Interface optique de réception
IOE	Interface optique d'émission
DEL	Diode électroluminescente
PEB	Puissance équivalente de bruit
WDM	Wavelength Division Multiplexing
RIN	Relative Intensity Noise
PDA	Photodiode à avalanche

LASER	Ligth Amplification by Stimulated Emission of Radiation
FDDI	Fiber Data Distributed Interface
CDMA	Code Division Multiple Access
OTDM	Optical Time Division
ETDM	Electronic Time Division Multiplexing
AOSC	Amplificateur Optical semi conductor.

INTRODUCTION

Les télécommunications ont connu durant ces vingt dernières années des bouleversements sans précédents. Longtemps, les avancées les plus significatives ont été obtenues par le développement des réseaux hertziens. Aujourd'hui, même s'ils présentent d'indéniables avantages grâce à leur souplesse tel la mobilité de l'utilisateur et la couverture complète de zones à très faible densité humaine, ils utilisent des fréquences qui les condamnent à ces applications « marginales ». L'accroissement récent des besoins en communications, essentiellement dû à l'émergence du réseau Internet, nécessite la mise en place de technologies capables d'assurer des transmissions à très haut débit. En effet, le réseau Internet, ouvert aux structures commerciales depuis 1990, voit son trafic doubler tous les cinq mois. L'idée de transporter les informations à l'aide des ondes lumineuses est née car, grâce à leur fréquence plus élevée elles peuvent transporter une quantité accrue d'informations.

L'invention du laser, a permis d'expérimenter des transmissions à travers l'atmosphère. Malheureusement en raison de la diffusion et de l'absorption du faisceau par les particules gazeuses et des turbulences atmosphériques qui induisent des fluctuations aléatoires de l'indice de réfraction de l'air, les communications sont extrêmement difficiles. Il est donc nécessaire d'imaginer un autre milieu de transmission dans lequel l'onde lumineuse est guidée et se propage avec beaucoup moins de perturbations. Cette innovation a été rendue possible lors la découverte des fibres optiques.

La fibre optique est un support de transmission formé par des guides diélectriques. Nous nous intéresserons donc à la fibre optique qui a connu de nombreuses avancées depuis ses débuts et en annonce de bien plus prometteuses encore : la multiplicité des paramètres, qui jouent sur l'efficacité de la fibre, fait que l'on peut sans cesse améliorer les performances de celle-ci.

C'est dans cette mesure que nous avons retenu le thème de ce mémoire « l'étude des liaisons par fibres optiques » pour nous exposer ses avantages et ses performances.

Notre étude se subdivise en trois chapitres : d'abord nous parlerons des généralités sur la fibre optique, ensuite nous étudierons les éléments constitutifs d'une liaison par fibre optique et enfin nous lancerons une simulation qui fera état d'une liaison par fibre optique et comparera cette liaison à un support de transmission.

CHAPITRE I. GENERALITES SUR LA FIBRE OPTIQUE

I.1 Introduction [1]

La fibre optique est un guide diélectrique permettant de conduire la lumière sur une grande distance. Elle est constituée de 3 éléments (Figure 1.1) :

- le cœur dans lequel se propage l'onde lumineuse ;
- la gaine utilisée pour assurer la réflexion de l'onde lumineuse dans le cœur ;
- la couche protectrice ou revêtement plastique.

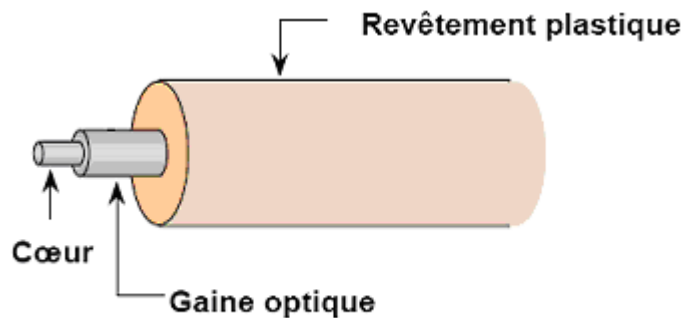


Figure 1. 1 : Structure d'une fibre optique

I.2 Propagation dans la fibre optique [2] ,[3] ,[4]

I.2.1 Propagation d'ondes lumineuse

Lorsqu'un faisceau lumineux heurte obliquement la surface qui sépare deux milieux plus ou moins transparents, il se divise en deux : une partie est **réfléchi**e tandis que l'autre est **réfractée** c'est-à-dire transmise dans le second milieu en changeant de direction.

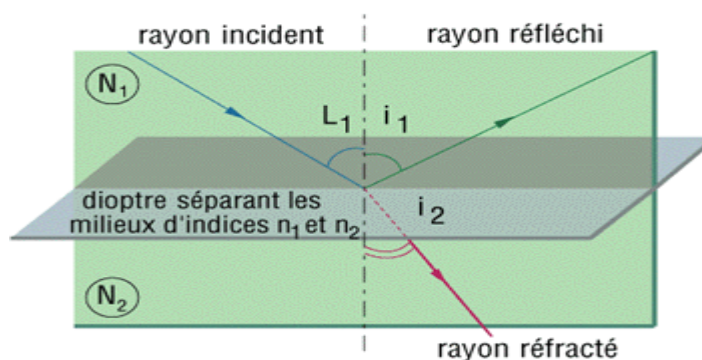


Figure 1. 2 : Principe de propagation d'onde lumineuse

La vitesse de la lumière dans un matériau d'indice n est donnée par la formule :

$$v = \frac{c}{n} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{I.1})$$

Pour guider la lumière, la fibre utilise le phénomène **de réflexion totale** qui se produit à l'interface de deux milieux d'indices différents. Ces deux milieux sont définis par le cœur et la gaine. L'indice de réfraction de la gaine doit être inférieur à celui du cœur.

I.2.2 Loi de Descartes

Un faisceau lumineux qui heurte la surface séparant deux milieux transparents et d'indice de réfraction différent, n_1 et n_2 se divise en deux rayons :

- un rayon réfléchi formant un angle i_1 par rapport à la normale à l'interface des deux milieux ;
- un rayon réfracté avec un angle i_2 par rapport à la même normale.

D'après la **loi de Descartes**, les trois rayons (incident, réfléchi et réfracté) sont dans le même plan et sont liés par les relations :

$$n_1 \sin(L_1) = n_1 \sin(i_1) \quad (I.2)$$

soit $L_1 = i_1$, L_1 étant l'angle d'incidence.

$$n_1 \sin(L_1) = n_2 \sin(i_2) \quad (I.3)$$

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2) \quad (I.4)$$

I.2.3 Angle limite et condition de guidage

Si $n_2 < n_1$, il est théoriquement possible d'avoir $i_2 = \frac{\pi}{2}$. Dans ce cas il n'y a pas réfraction. On

notera i_{iL} l'angle du rayon incident correspondant à $i_2 = \frac{\pi}{2}$

La loi de Descartes devient alors :

$$n_1 \sin(i_{iL}) = n_2 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = n_2 \quad (I.5)$$

$$\text{d'où } i_{iL} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

i_{iL} est appelé **angle limite**

La condition de guidage dans le cœur est donnée par la relation :

$$i_1 \geq \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (I.6)$$

si cette condition n'est pas vérifiée alors le rayon est réfracté dans la gaine de la fibre optique

I.2.4 Ouverture numérique (ON)

La figure 1.3 montre que pour qu'un rayon lumineux arrive à la sortie de la fibre, il doit subir plusieurs réflexions tout au long de la fibre. A chaque réflexion une partie de la lumière est réfractée et donc absorbée par la gaine. Le rayon finit alors par être complètement atténué. Cependant il est possible de choisir l'angle d'incidence pour qu'il n'y ait pas de réfraction, soit $i_i > i_{iL}$. Par conséquent, le rayon injecté à l'entrée arrivera à la sortie sans aucune atténuation. On définit alors l'**ouverture numérique** d'une fibre optique, en fonction de l'angle d'incidence limite i_{iL} , qui permet d'assurer une **transmission sans pertes théoriques**.

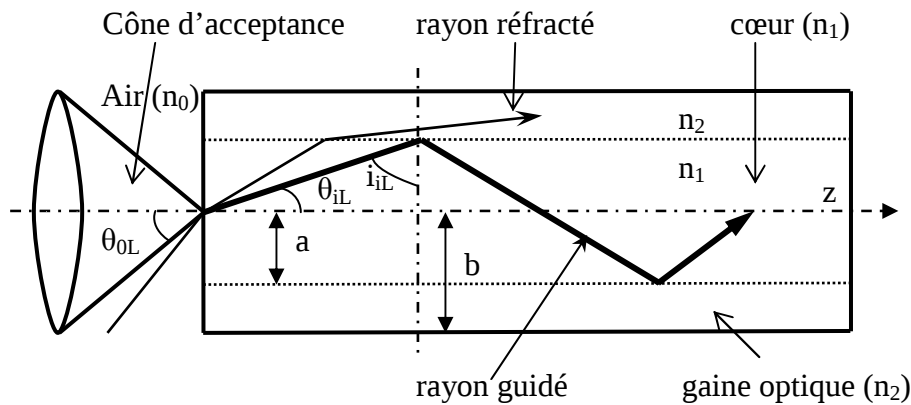


Figure 1. 3 : Propagation d'onde dans une fibre optique

Soit n_1 l'indice de réfraction du cœur, n_2 celui de la gaine et n_0 celui de l'air ($n_0=1$). On cherche l'angle incident θ_{0L} à l'entrée de la fibre correspondant à l'angle limite i_{iL} .

D'après la loi de Descartes on a :

$$n_0 \sin(\theta_0) = n_1 \sin(\theta_1) \quad (I.7)$$

avec $\theta_1 = \frac{\pi}{2} - i_i$ et $n_0 = 1$.

$$\text{Soit } \sin(\theta_{0L}) = n_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - i_{iL}\right) = n_1 \cos(i_{iL}) = n_1 \sqrt{1 - \sin^2(i_{iL})}$$

$$\text{Or } i_{iL} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

$$\text{D'où } \sin(\theta_{0L}) = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (I.8)$$

L'ouverture numérique (ON) d'une fibre est ainsi définie par :

$$ON = \sin(\alpha_{\max}) = n_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{\text{lim}}\right) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{I.9})$$

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

I.3 Différents types de fibre [5], [6], [7],[8]

Suivant le nombre de modes N des ondes lumineuses qui peut se propager dans la fibre, la fibre est dite :

- multimode quand $N = 1$;
- monomode quand $N \neq 1$.

I.3.1 Fibre multimode

La fibre multimode a un diamètre de cœur de l'ordre de 50 à 200 μm . Plusieurs chemins de propagation y sont possibles. Suivant le type de profil d'indice, il y a la fibre à saut d'indice et la fibre à gradient d'indice

I.3.1.1 Fibre multimode à saut d'indice

Dans cette fibre, le cœur est homogène et d'indice n_1 . Il est entouré d'une gaine optique d'indice n_2 inférieur à n_1 . Le faisceau lumineux injecté à l'entrée de la fibre va atteindre la sortie en empruntant des chemins optiques différents. Ce qui se traduit par de temps de propagation

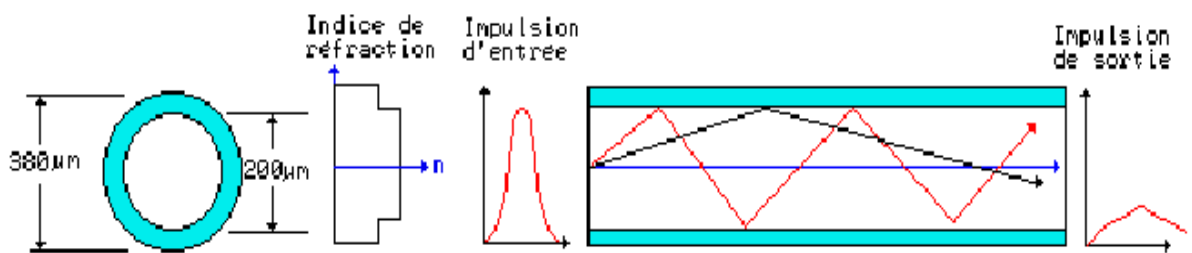


Figure 1. 4 : Fibre multimode à saut d'indice

On définit le paramètre V appelé fréquence réduite donnée par :

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (\text{I.10})$$

avec λ_0 longueur d'onde dans le vide [m]

a diamètre du cœur [μm]

Le nombre de modes N dans ce type de fibre est égal à :

$$N = \frac{V^2}{2} \quad (\text{I.11})$$

I.3.1.2 Fibre multimode à saut d'indice

Dans cette catégorie le cœur n'est plus homogène : la valeur de l'indice décroît progressivement depuis l'axe du cœur jusqu'à l'interface cœur-gaine, suivant la loi :

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta(r/a)^\alpha} \quad (\text{I.12})$$

avec : r distance à l'axe

α paramètre de profil d'indice

Δ différence relative d'indice

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (\text{si } n_1 - n_2 \ll n_1) \quad (\text{I.13})$$

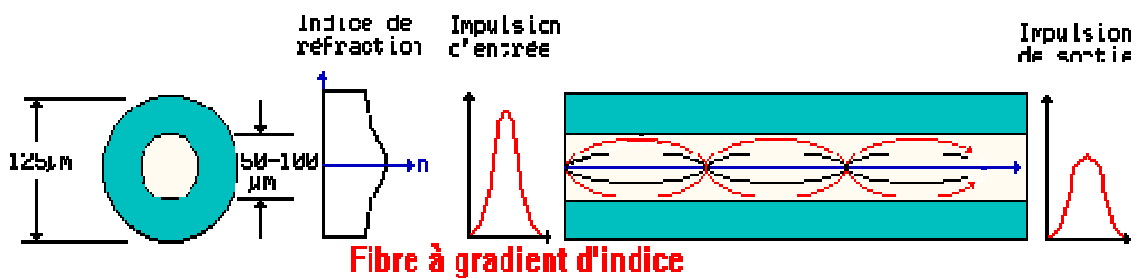


Figure 1.5 : Fibre à gradient d'indice

Les rayons lumineux vont aussi 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 de réduire l'étalement du signal.

La trajectoire des rayons lumineux est incurvée quand on se rapproche de la gaine.

Le nombre de modes N dans ce fibre est donné par :

$$N = \frac{\alpha}{\alpha + 2} \frac{V^2}{2} \quad (\text{I.14})$$

Remarques :

- Pour une fibre à gradient d'indice parabolique α vaut 2, N vaut $\frac{V^2}{4}$.
- L'avantage essentiel de ce type de fibre est de minimiser la dispersion du temps de propagation entre les rayons sans utiliser une ouverture numérique trop faible.

I.3.2 Fibre monomode

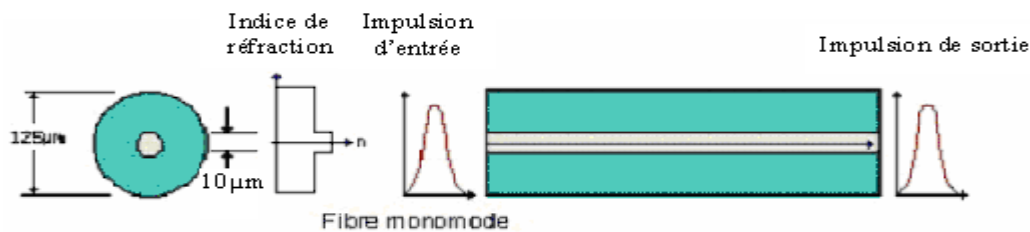


Figure 1.6 : Fibre monomode

La fibre monomode classique est une fibre à saut d'indice, avec la condition sur la fréquence réduite V :

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405 \quad (\text{I.15})$$

La fibre monomode présente deux avantages considérables qui sont :

- une grande bande passante ;
- une faible atténuation.

Le fait qu'un seul mode se propage limite la dispersion chromatique qui se traduit par une variation de l'indice en fonction de la longueur d'onde. La propagation d'un seul mode limite également l'atténuation en fonction de la longueur d'onde ce qui permet d'augmenter la distance entre les répéteurs de lignes. En ajustant les paramètres optoélectroniques des guides diélectriques qui constituent la fibre, il est possible de les optimiser pour une longueur d'onde donnée. Mais cela se traduit généralement par l'obtention d'un diamètre de cœur très faible générant des problèmes de raccordement.

I.3.3 Comparaison entre fibre multimode et monomode

- La fibre multimode a été la première à être utilisée. Elle est facile à utiliser (gros cœur

~ tolérances élevées). Cependant elle présente une limitation intrinsèque de bande passante. Elle est réservée aux courtes distances notamment en réseaux informatiques.

➤ La fibre monomode, quant à elle, a une bande passante théoriquement infinie. Elle requiert des composants chers et des tolérances faibles. Elle est devenue la solution universelle des systèmes de télécommunications.

I.4 Dispersion des fibres [1], [3],[10], [11],[15]

La dispersion se manifeste par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation. Ce qui diminue la bande passante.

Il existe deux types de dispersion :

- intermodale ;
- chromatique.

I.4.1 Dispersion intermodale

Ce type de dispersion est très important pour la fibre multimode mais négligeable pour la fibre monomode. L'énergie lumineuse injectée à l'entrée de la fibre est répartie entre différents modes. Ces derniers se propagent dans le cœur avec la vitesse :

$$v_m = \frac{c}{n_1} \sin \theta_m \quad (I.16)$$

v_m composante suivant l'axe de propagation de la vitesse

Pour le mode le plus lent : $\theta = \theta_{lim}$,

$$\text{alors} \quad v_{lim} = \frac{c}{n_1} \sin \theta_{lim} \quad (I.17)$$

Pour le mode le plus rapide : $\theta = \frac{\pi}{2}$,

$$\text{alors} \quad v_{max} = \frac{c}{n_1} \quad (I.18)$$

Après un trajet d'une distance L, le décalage est :

- pour une fibre à saut d'indice

$$\Delta\tau = \frac{L}{c} \frac{n_1(n_1 - n_2)}{n_2} \quad (I.19)$$

En posant $\Delta = \frac{(n_1 - n_2)}{n_2}$, la différence relative d'indice $\Delta\tau$ devient :

$$\Delta\tau = \frac{L n_1}{c} \cdot \Delta \quad (\text{I.20})$$

- pour une fibre à gradient d'indice

$$\Delta\tau = \frac{L n_1}{c} \cdot \frac{\Delta^2}{8} \quad (\text{I.21})$$

I.4.2 Dispersion chromatique

Pour un mode donné, la variation de l'indice avec la longueur d'onde impose un élargissement du signal qui est important dans la fibre monomode.

La vitesse de propagation moyenne d'une impulsion est égale à la vitesse de groupe du mode fondamental. Le problème vient de ce que le temps de propagation de groupe varie avec la longueur d'onde alors que les sources de rayonnement lumineux ne sont pas rigoureusement monochromatiques.

Il y a deux causes à prendre en compte :

- l'indice qui varie en fonction de la longueur d'onde (dispersion matériau) ;
- la vitesse de groupe qui varie avec la longueur d'onde (dispersion guide d'onde).

Sa valeur par unité de longueur vaut :

$$\Delta\tau_c = (D_M + D_G) \Delta\lambda \quad (\text{ps/km}) \quad (\text{I. 22})$$

$\Delta\lambda$ largeur spectrale de la source (nm)

D_M dispersion due au matériau (ps/nm/km.)

D_G dispersion due au guide (ps/nm/km.)

Posons $D(\lambda) = (D_M + D_G)$, le paramètre de dispersion chromatique qui s'exprime en $\text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$ et qui doit être compris entre les valeurs définies par les relations données par l'UIT-T G.652 :

$$\frac{S_{0\max}}{4} \cdot \left(\lambda - \frac{\lambda_{0\max}^4}{\lambda^3} \right) \leq D(\lambda) \leq \frac{S_{0\max}}{4} \cdot \left(\lambda - \frac{\lambda_{0\min}^4}{\lambda^3} \right) \quad (\text{I.23})$$

avec : $S_{0\max} = 0,093 \text{ ps.nm}^{-2}.\text{km}^{-1}$

$$\lambda_{0\min} = 1300 \text{ nm}$$

$$\lambda_{0\max} = 1324 \text{ nm}$$

La figure 1.7 représente la variation du facteur de dispersion chromatique typique d'une fibre

de type G.652, pour $\lambda_{0\min} = 1300 \text{ nm}$.

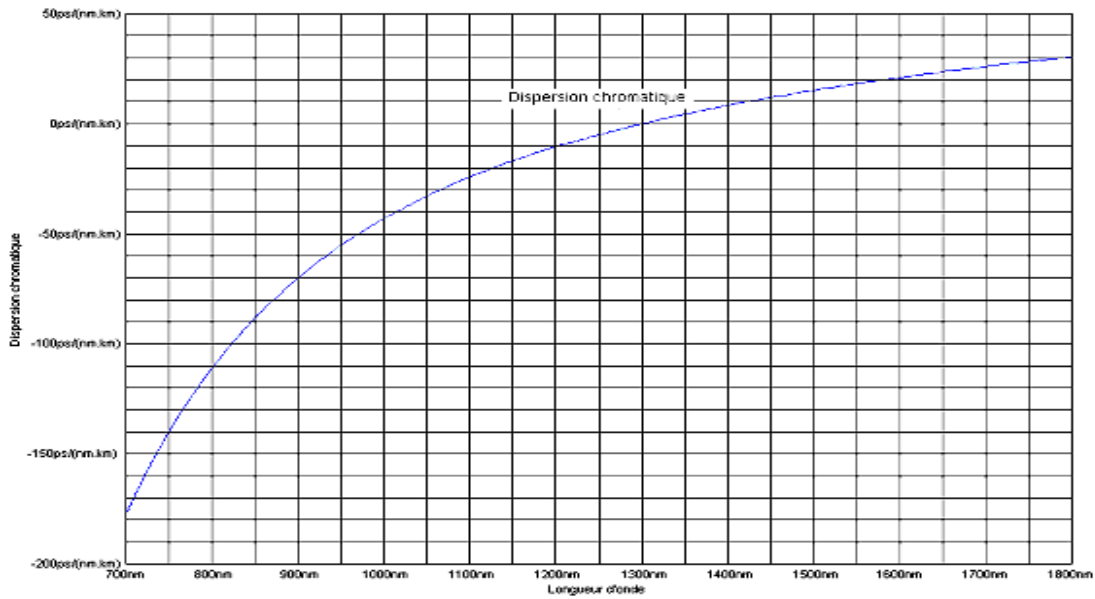


Figure 1. 7 : Facteur de dispersion chromatique d'une fibre monomode

I.5 Atténuation de fibres optiques [3], [5], [7]

I.5.1 Atténuation intrinsèque

Dans les conditions théoriques, la puissance optique reste guidée dans le cœur, mais subit une atténuation de $10^{-\alpha z/10}$. Cela est due à deux phénomènes physiques dans le matériau : la diffusion et l'absorption.

I.5.1.1 Diffusion

La diffusion Rayleigh est due à l'interaction de l'onde avec la matière, qui la diffuse d'une manière relativement isotrope. On l'observe dans tous les milieux désordonnés (verres, liquides, gaz) à cause des fluctuations de densité sur des distances très courtes.

Cette diffusion est proportionnelle à λ^{-4} . Par exemple, pour une fibre silice à cœur dopé au germanium, on obtient numériquement :

$$\alpha_D = (0,75 + 66 \Delta n^+). \lambda^{-4} \quad [\text{db/km}] \quad (\text{I.24})$$

avec : λ en microns,

Δn^+ est la différence absolue d'indice entre le cœur dopé au germanium et la silice pure.

Cette dépendance incite à travailler à des longueurs d'ondes élevées donc dans l'infrarouge.

I.5.1.2 Absorption

Elle peut être identifiée par :

- les transitions électroniques, qui se situent dans l'ultraviolet, et que les fibres en silice ne transmettent donc pas ;
- les vibrations moléculaires de la silice qui présentent un spectre complexe dans l'infrarouge. Elles entraînent une remontée rapide de l'atténuation à partir de $1,7\mu\text{m}$. Cette limite d'utilisation en transmission se situe plus loin pour des verres plus lourds tels que les fluorures ;
- des pics d'absorption sélectifs par diverses impuretés dont le plus important est dû aux liaisons OH à $1,39\mu\text{m}$. Il est progressivement réduit par l'amélioration de la technologie de fabrication. En effet une teneur résiduelle en eau de l'ordre de 10^{-7} est nécessaire pour ne pas être gêné par le pic.

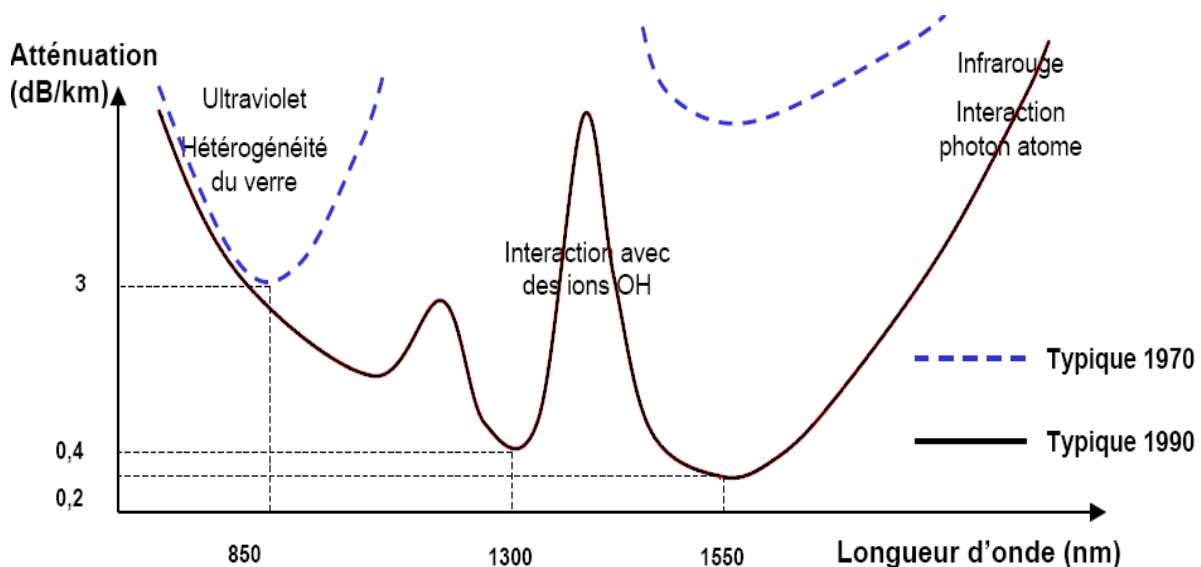


Figure 1. 8 : Atténuation spectrale de la fibre

I.5.2 Pertes aux raccordements

I.5.2.1 Causes des pertes

Lorsqu'on raccorde bout à bout, par épissure ou à l'aide d'un connecteur, deux fibres optiques, on voit apparaître des pertes ponctuelles dues à 3 types de causes :

- réflexion de Fresnel aux deux interfaces verre-air (au total 8 %). Dans le cas où

l'on utilise des connecteurs, on peut éviter cette réflexion en utilisant un liquide adaptateur d'indice (qui de plus protège les faces des fibres). Une autre technique consiste à polir les faces des fibres en biais pour éviter que la lumière réfléchie retourne dans la fibre ;

- différence entre les paramètres de deux fibres (en principe identiques, ce qui n'est pas le cas en pratique à une certaine tolérance près) ;
- mauvais positionnement relatifs : excentrement transversal, désalignement angulaire, écartement longitudinal.

I.5.2.2 Calculs des pertes

Pour les fibres multimodes, ces pertes peuvent être estimées par un calcul géométrique (intégrale de recouvrement entre les cônes d'acceptance des deux fibres). Toutefois, ces calculs supposent une répartition uniforme de la puissance, et ne sont pas, de ce fait précis. De plus, un raccordement mal fait perturbe la répartition des modes, donc la propagation, sur une distance qui peut être longue.

Pour les fibres monomodes, le coefficient de transmission T d'une fibre à l'autre est obtenu par une intégrale de recouvrement entre les champs E_1 et E_2 , supposés gaussiens, des deux fibres :

$$T = \frac{\left| \iint_{x,y} E_1(x,y) \cdot E_2^*(x,y) \cdot dx \cdot dy \right|^2}{\iint_{x,y} |E_1(x,y)|^2 dx \cdot dy \cdot \iint_{x,y} |E_2(x,y)|^2 dx \cdot dy} \quad (I.25)$$

La perte est égale à :

$$A_R = 10 \log 1/T \quad [\text{dB}]. \quad (I.26)$$

I.5.3 Pertes par courbure et microcourbure

I.5.3.1 Causes des pertes

A l'entrée d'une section courbée, il y a augmentation de l'angle θ qu'un rayon fait avec l'interface cœur-gaine. Les modes d'ordre élevé sont alors réfractés. Les modes d'ordre plus faibles voient leur atténuation augmenter par le couplage avec les modes réfractés. Dans le cas des fibres monomodes, le mode fondamental devient à fuite.

Il existe aussi un cas où l'on observe une déformation locale de l'interface sous l'effet d'une contrainte, l'axe restant rectiligne. On parle alors de microcourbure.

I.5.3.2 Effet des courbures

En pratique, l'effet d'une courbure locale est négligeable lorsque le rayon de courbure R est grand devant un rayon critique R_c donné empiriquement par :

Pour les fibres multimodes :

$$R_c = \frac{2a \cdot n_1^2}{ON^2} \quad [\text{cm}] \quad (\text{I.27})$$

Pour les fibres monomodes :

$$R_c = 20 \frac{\lambda}{(n_1 - n_2)^{3/2}} \left(2,75 - \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{-3} \quad [\text{cm}] \quad (\text{I.28})$$

Lorsque R n'est pas trop proche de R_c , la perte transitoire à l'entrée de la courbure dans une fibre multimode, due au filtrage spatial, vaut environ :

$$\alpha_c = 10 \log \left[\frac{R}{R - R_c} \right] \quad [\text{dB}] \quad (\text{I.29})$$

Dans les deux cas, on remarque qu'une forte différence d'indices permet d'être moins sensible aux courbures ainsi qu'aux microcourbures. C'est aussi le cas d'un petit diamètre de cœur.

L'ordre de grandeur de ce rayon critique est de quelques centimètres, ce qui implique des précautions lors de la pose des câbles. On peut cependant tolérer une perte locale sur une liaison courte lorsqu'il n'est pas possible de trouver un autre chemin pour le câble.

I.5.3.3 L'effet de microcourbures

Il est plus complexe. Il dépend de l'amplitude des déformations mais aussi de leurs répartitions spatiales. La perte augmente avec la contrainte appliquée à la fibre mais d'une façon dépendante de la manière dont cette contrainte crée une déformation. Elle est en général étalonnée expérimentalement.

L'atténuation linéique due aux mêmes microcourbures pour une fibre donnée, à partir de l'atténuation mesurée sur une fibre de référence, est

$$\alpha_{\text{mono}} = 0,05 \cdot \alpha_{\text{multi}} \cdot k_0^4 \cdot w_0^6 \cdot \frac{ON^2}{a_m^2} \quad (\text{I.30})$$

a_m et ON se rapportent à la fibre multimode, w_0 à la fibre monomode. Cette formule permet de comparer deux fibres, quel que soit leur type, mais leurs caractéristiques mécaniques (diamètres

extérieurs et matériaux) doivent être les mêmes. Les fibres monomodes sont plutôt moins sensibles que les fibres multimodes à gradient d'indice.

Pour réduire les microcourbures par amortissement des contraintes et pour empêcher la propagation de fissures, il faut que les fibres aient des revêtements de protection.

I.6 Fenêtre de transmission [2], [7], [15]

Compte tenu des courbes d'atténuation montrées sur la Figure 1.8, et de dispersion chromatique ainsi que des performances des composants optoélectroniques disponibles, on définit 3 fenêtres de transmission :

- la 1^{ère} fenêtre ($0,8 - 0,9\mu\text{m}$) ne correspond pas à un minimum d'atténuation (2 à 3dB/km) ni de dispersion, mais à l'optimum d'utilisation des matériaux les mieux maîtrisés (silicium et GaAs) ;
- la 2^e fenêtre (vers $1,3\mu\text{m}$) correspond à un minimum relatif d'atténuation (0,4 à 0,5 dB/km) mais demande des composants plus coûteux, et l'annulation de la dispersion chromatique y est plus délicate.
- la 3^e fenêtre (vers $1,55\mu\text{m}$) est le minimum absolu d'atténuation (0,15 à 0,2 dB/km) mais demande des composants plus coûteux, et l'annulation de dispersion chromatique est plus délicate.

I.7 Avantages de l'utilisation de la fibre optique [7], [8], [9]

Les principaux avantages de l'utilisation de la fibre optique comme support de transmission sont :

- Transmission large bande et débits binaires élevés ;
- Affaiblissement minimisé : nombre de répéteurs très réduits et fortement espacés (60 km au minimum) ;
- Immunité électromagnétique ;
- Faible sensibilité aux facteurs extérieurs (température, humidité...) ;
- Faible encombrement et faible poids.

I.8 Optimisation des fibres optiques [1], [4]

D'après ce qu'on a vu dans le paragraphe I.5, le diamètre du cœur et la différence d'indice ont des influences contradictoires sur les différentes causes d'atténuations. Les tableaux I.1 et I.2 récapitulent ces effets.

Si on augmente	Les pertes				La dispersion intermodale
	intrinsèques	aux raccordements	par courbure	par microcourbure	
le diamètre de cœur $2a$	=	↓	↑	=	=
l'ouverture numérique	↑	↓	↓	↑	↑

Tableau 1 1 : Tableau récapitulatif pour une fibre multimode

Si on augmente	Les pertes						La dispersion chromatique à 1,55 μm
	intrinsèques	aux raccordements			par courbure	par microcourbure	
		e _t	D _α	D _e			
le diamètre de cœur 2a	=	↓	↑	↓	↑	=	=
n ₁ – n ₂	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↑

Tableau 1 2 : Tableau récapitulatif pour une fibre monomode

Un compromis dépendant des conditions d'utilisation telles que courbures, contraintes, distance entre les raccordements et qualité de ceux-ci. est donc à trouver.

Pour les fibres multimodes, il se traduit par un choix parmi les standards existants. Pour le concepteur de fibres monomodes, il permet de déterminer la valeur optimale du diamètre et de la différence d'indice en fonction de l'utilisation de la fibre.

C'est ainsi que, pour un câble sous-marin où les épissures sont espacées mais où les courbures (dues à l'enroulement en hélice des fibres) et microcourbures peuvent être non négligeables, l'optimum correspond à un petit diamètre de cœur et une différence d'indice relativement élevée.

Dans des câbles terrestres interurbains, les courbures et microcourbures sont faibles mais les épissures sont moins espacées et on aboutit à la conclusion inverse.

Enfin, les réseaux locaux qui ont à la fois beaucoup de courbures et de raccordements font appels à des fibres multimodes de diamètre et d'ouverture numérique élevés.

Dans ce chapitre, on a cité les différents types de fibres optiques tels que les fibres monomodes et les fibres multimodes. On a entamé aussi les causes des pertes multiples dans les fibres notamment l'absorption et la diffusion par les impuretés ou par les défauts d'interface coeur-gaine, la diffusion de Rayleigh, la dispersion chromatique due aux vitesses différentes de signaux lumineux de longueurs d'onde différentes, la dispersion intermodale résultant des temps de propagation différents selon les modes, les courbures et les micro-courbures de la fibre, la diffusion et la réflexion aux épissures. Cependant, les fibres optiques possèdent de nombreuses qualités pour transmettre une grande quantité d'informations sur de longues distances.

CHAPITRE II. LIAISONS PAR FIBRES OPTIQUES

II.1 Structure d'une liaison point à point par fibres optiques [1]

Une liaison point à point par fibres optiques comprend :

- les fibres optiques elles-mêmes, contenues dans un câble qui la protège et qui peut comporter un grand nombre de fibres. Il en existe une grande variété, correspondant à autant de besoins et d'applications différents. Le raccordement des câbles entre eux et aux interfaces est l'un des principaux problèmes pratiques de mise en œuvre des liaisons,

- l'interface optique d'émission constituée du composant optoélectronique d'émission (diode laser ou diode électroluminescente) qui effectue la conversion électrique / optique, ainsi que les circuits permettant son fonctionnement correct et l'adaptation du signal,

- l'interface optique de réception constituée d'une photodiode qui effectue la conversion inverse, de ses circuits de polarisation et d'un préamplificateur compensant l'atténuation de la fibre optique.

Lorsque la longueur de la liaison le nécessite, on y insère un ou plusieurs répéteurs, utilisés pour amplifier le signal.

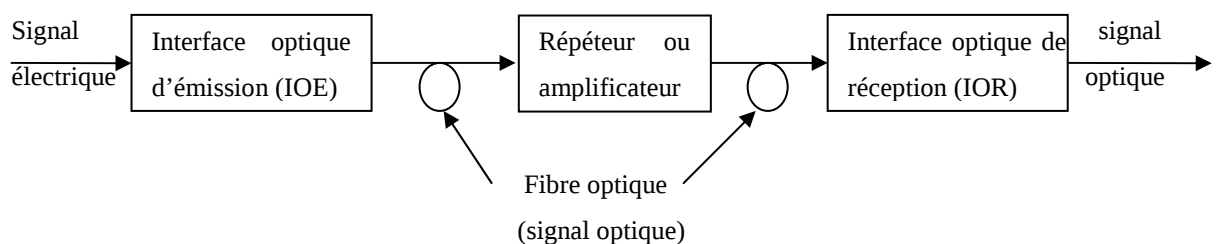


Figure 2. 1 : Liaison point à point par fibres optiques

II.2 Interface optoélectronique d'émission [12], [13], [14], [19], [21]

Dans les systèmes de transmission par fibres optiques, on utilise comme source optique des composants semi-conducteurs : leurs dimensions sont bien adaptées au diamètre du cœur de la fibre. La technologie des semi-conducteurs permet la production en grande quantité de produits fiables. Son rôle est de convertir le signal électrique en signal lumineux.

Les émetteurs peuvent être de deux types :

- les diodes électroluminescentes (DEL) ;
- les diodes laser (DL).

II.2.1 La diode électroluminescente

II.2.1.1 Principe de l'émission de lumière dans un semi-conducteur

Dans un semi-conducteur, les électrons peuvent transiter entre la bande de valence et la bande de conduction : soit si la bande interdite n'est pas trop importante ; soit en présence d'impuretés créant des niveaux intermédiaires dans cette bande interdite. L'énergie nécessaire à ces électrons pour passer d'un niveau à un autre est au minimum égale à l'énergie de cette bande interdite :

$$E_C - E_V = E_g \quad (II.1)$$

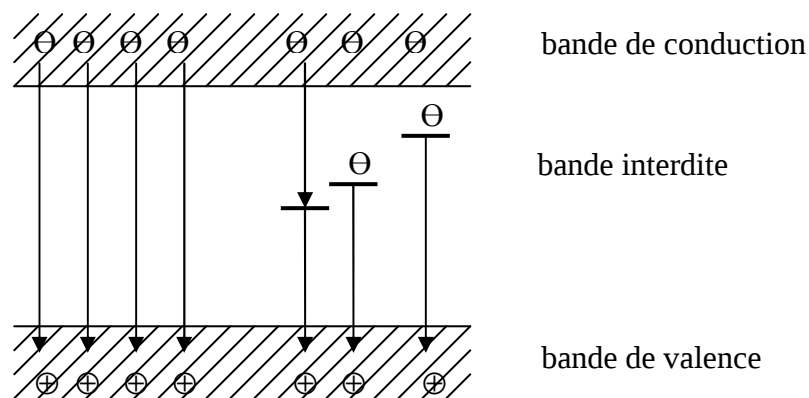


Figure 2. 2 : Transition dans un semi-conducteur

Ces transitions correspondent à une recombinaison des niveaux tendant à combler les trous de la bande de valence par la transition des électrons en provenance de la bande de conduction.

Une méthode, pour générer ces transitions, consiste à créer artificiellement des trous dans la bande de valence (dopage). La transition de la bande de conduction à la bande de valence est alors assurée par un apport d'énergie extérieur (polarisation externe). C'est le cas des semi-conducteurs. Ce type de transition peut être soit **non radiatif**, auquel cas il n'y a pas émission de lumière, soit **radiatif** : il y a alors émission de rayonnement et c'est le cas des diodes électroluminescentes. Les transitions radiatives peuvent être naturelles ou stimulées.

II.2.1.2 Principe des diodes DEL

La base des diodes DEL est la jonction pn qui est constituée d'un semi-conducteur ayant en contact une zone dopée n et une zone dopée p. Lorsque la jonction pn est traversée par un courant direct, une émission spontanée de photon, due à la recombinaison de paires électron-trou, se produit.

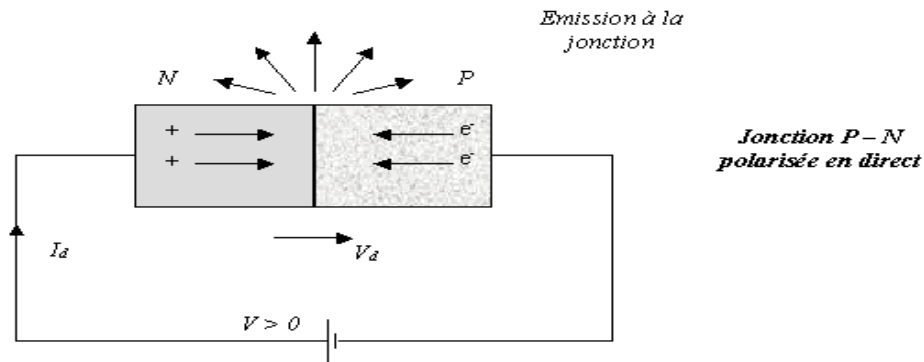


Figure 2. 3 : Jonction pn polarisé en direct

II.2.1.3 Caractéristiques des diodes DEL

II.2.1.3.1 Ouverture numérique

L'ouverture numérique correspond à l'angle moitié dans lequel 90 % de l'énergie lumineuse de la diode est émise.

$$ON = \sin\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \quad (\text{II.2})$$

II.2.1.3.2 Caractéristique d'émission

La caractéristique d'émission en fonction du courant pour la diode DEL est linéaire dans une gamme allant de quelques milliampères jusqu'à une centaine de milliampères (Figure 2.4). En delà de cette gamme, le rendement quantique d'émission est faible à cause du phénomène de courant non radiatif ; au-delà il se produit un phénomène de saturation dû à l'échauffement du semi-conducteur ou à un accroissement de l'absorption des photons par le matériau.

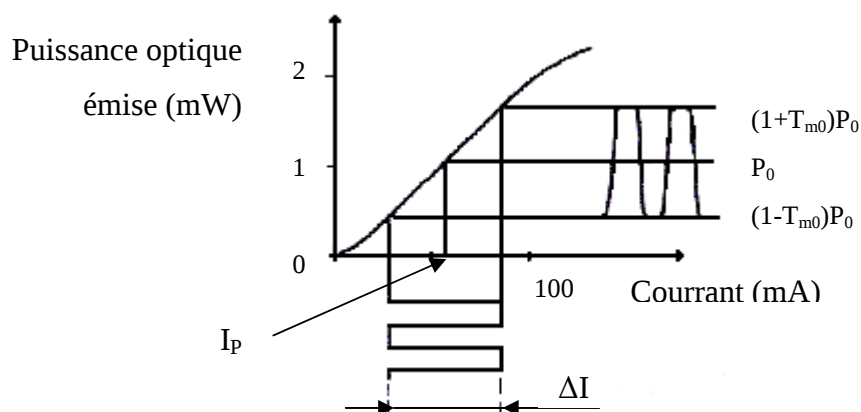


Figure 2. 4 : Caractéristique d'émission d'une diode DEL

$$T_{mo} = \frac{\Delta P}{2P_0}, \text{ taux de modulation optique.}$$

II.2.1.3.3 Spectre d'émission

La longueur d'onde du rayonnement émis est liée à la largeur de la bande interdite du matériau :

$$f = \frac{E_c - E_v}{h} = \frac{c}{\lambda} \quad (\text{II.3})$$

où f est la fréquence émise.

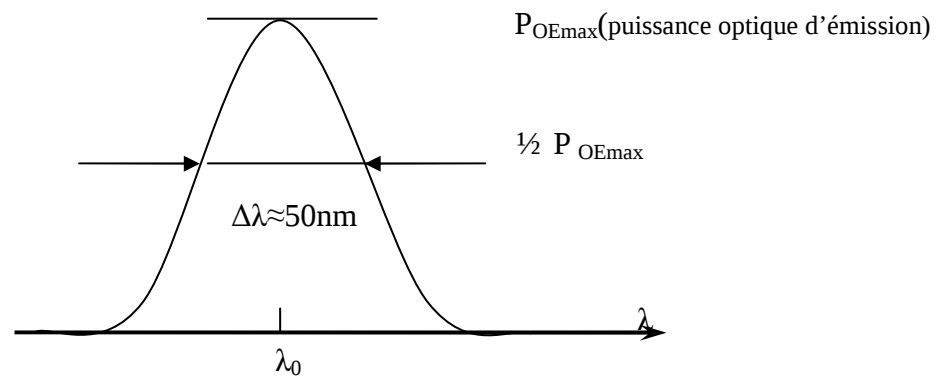


Figure 2. 5 : Spectre d'émission

Cette émission n'est pas rigoureusement monochromatique, ce qui provient de deux faits principaux :

- la présence d'impuretés dans le matériau remplace les niveaux discrets du matériau par des bandes d'énergie ;
- toutes les longueurs d'ondes émises ne sont pas transmises de la même manière dans le matériau ni avec la même amplitude.

En outre, lorsque la température croît, il y a glissement de la fréquence d'émission vers l'infrarouge.

II.2.1.4 Rendement d'une diode

II.2.1.4.1 Rendement optique

Le rendement optique est le produit des différents rendements liés aux pertes optiques.

$$\rho_{opt} = \rho_a \cdot \rho_F \cdot \rho_{cr} \quad (\text{II.4})$$

avec ρ_a rendement d'absorption
 ρ_F rendement lié aux pertes de Fresnel.
 ρ_c rendement de l'angle critique

II.2.1.4.2 Rendement lié aux pertes de Fresnel

Le passage de la lumière d'un milieu à un autre, d'indices différents, se traduit par des pertes à l'interface appelées pertes de Fresnel. Le rendement lié aux pertes de Fresnel est donné par :

$$\rho_F = \frac{4n_1n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (\text{II.5})$$

II.2.1.4.3 Rendement de l'angle critique

Le passage de la lumière d'un milieu à un autre est lié à une loi de la réfraction définissant l'angle limite qui, une fois dépassée, se traduit par une réflexion dans le milieu d'émission. La loi de Descartes donne :

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \quad (\text{II.6})$$

l'angle critique est défini par $\theta_2 = 90^\circ$.

$$\sin(\theta_c) = n_2/n_1 \quad (\text{II.7})$$

avec la condition $n_2 < n_1$.

On appelle rendement de l'angle critique le rapport :

$$\rho_{cr} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad (\text{II.8})$$

II.2.1.4.4 Rendement d'absorption

Lors de son transit à travers le matériau, le flux de rayonnement issu de la jonction est absorbé suivant une loi exponentielle liée à la distance parcourue dans le matériau.

$$\text{Soit} \quad \rho_a = \exp(-kx) \quad (\text{II.9})$$

où x est la distance parcourue dans le matériau et k la constante d'absorption.

II.2.1.4.5 Rendement quantique

- Rendement quantique de luminescence

Le rendement quantique de luminescence est donné par :

$$\rho_{qL} = \frac{R_r}{R_T} \quad (\text{II.10})$$

Le taux de recombinaison R est proportionnel au nombre de porteurs excédant à l'équilibre dans la bande de conduction sur la durée de vie de cet excès de porteurs.

Dans le cas d'une zone p, on a par exemple :

$$R_T = \frac{n - n_0}{\tau} \quad (\text{II.11})$$

avec
$$\tau = \frac{\tau_{nr} \cdot \tau_r}{\tau_{nr} + \tau_r} \quad (\text{II.12})$$

$$R_r = \frac{n - n_0}{\tau_r} \quad (\text{II.13})$$

où τ_{nr} la durée de vie de transition non radiative ;
 τ_r la durée de la transition radiative ;
 n_0 le nombre de porteurs à l'équilibre;
 n le nombre total de porteurs.

D'où :
$$\rho_{qL} = \frac{\tau_{nr}}{\tau_{nr} + \tau_r} \quad (\text{II.14})$$

Pour que ce rendement tende vers 1, il faut que la durée de vie de la transition radiative soit la plus courte possible. Ce rendement, habituellement de 40 %, décroît avec la température.

- Rendement quantique interne

Le rendement quantique interne définit le nombre de photons émis par électron injecté au niveau de la jonction pn.

$$\rho_q = \frac{\text{photons}}{\text{électrons}} \quad (\text{II.15})$$

Soit I le courant traversant la diode, on a :

$$I = n_e \cdot q \quad (\text{II.16})$$

où q est la charge de l'électron et n_e le nombre d'électrons. La puissance émise par la diode s'exprime en watts telle que :

$$P = n_p \cdot E_g \quad (\text{II.17})$$

où $E_g = hc/\lambda$

n_p le nombre de photons émis.

Le rendement quantique interne s'écrit alors :

$$\rho_q = \frac{P}{I} \cdot \frac{q\lambda}{hc} = \frac{P}{I} \frac{\lambda(\text{nm})}{1240} \quad (\text{II.18})$$

où P est exprimé en watts et I en Ampère.

L'état actuel de technologie permet la fabrication de DEL ayant un rendement d'émission de l'ordre de 20 à 200 mW/A si toutes les pertes optiques de Fresnel et par réflexion totale interne sont minimisées. Dans ce cas, on arrive à injecter une centaine de microwatts dans la fibre standard 50 / 125 μm . Elle se comporte approximativement comme un filtre passe-bas du premier ordre. Sa bande passante croît avec le courant de polarisation et décroît quand on augmente le taux de modulation.

Pour la transmission sur fibres optiques en silice on utilise les DEL. Il existe une norme pour ce type de transmission, la norme FDDI (Fiber Data Distributed Interface), sur de courtes distances dans les réseaux locaux de type Ethernet jusqu'à 100Mb.s^{-1} à une longueur d'onde $\lambda = 1300\text{ nm}$.

Sur fibre optique polymère on utilise des DEL émettant dans le rouge à 630 nm et dans le vert à 540 nm. Du fait de leur spectre large, les DEL ne peuvent pas être utilisées dans les transmissions par fibres optiques sur une longue distance à cause du problème de la dispersion de la fibre optique comme on l'a déjà vu au premier chapitre.

II.2.2 Diode LASER

II.2.2.1 Principe du laser

Le principe du laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) est la combinaison de deux éléments essentiels :

- un amplificateur d'ondes lumineuses ;
- une boucle de réaction formant un résonateur.

L'amplificateur utilise les propriétés de l'émission stimulée d'un photon par une particule excitée. L'exploitation de cette émission stimulée nécessite une modification importante du milieu : l'inversion la plus importante possible de ses populations actives. L'émission stimulée s'accompagne de la création d'un photon. Si on s'arrange pour que la durée de vie τ des électrons

soit suffisamment longue pour ne pas perturber le phénomène, on aura une émission induite plus forte que l'absorption : c'est l'effet laser. Ce photon ainsi créé a même direction, même phase, même polarisation et même fréquence que le photon incident.

Le résonateur est une cavité optique dans laquelle l'onde lumineuse se réfléchit et s'amplifie. Le plus utilisé est le résonateur de Fabry-Pérot constitué de deux miroirs plans dont l'un est semi-transparent.

Les diodes laser sont des semi-conducteurs dans lesquels on a recréé un milieu amplificateur avec sa cavité résonnante et dont l'inversion de la population est réalisée par un courant. Tant que l'on reste en dessous d'une valeur seuil de ce courant, la diode laser se comporte comme une diode électroluminescente classique ; dès que le seuil est atteint, l'inversion de population est réalisée et l'effet laser est déclenché (Figure 2. 6).

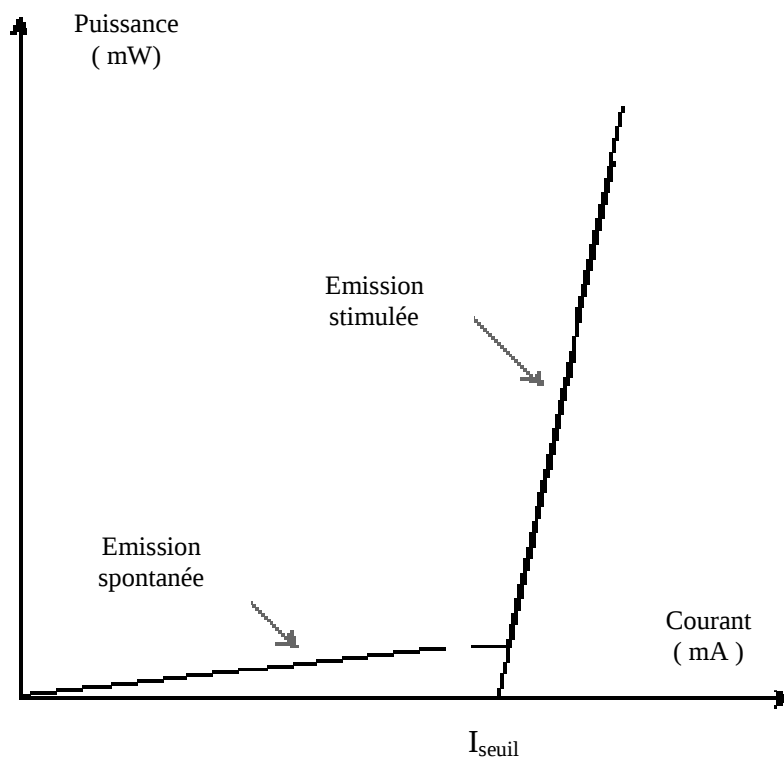


Figure 2. 6 : Puissance émise par une diode laser.

II.2.2.2 Spectre d'émission

Pour une diode laser, la largeur à mi-puissance est de quelques nanomètres ; ceci n'est vrai que pour un courant supérieur au courant de seuil.

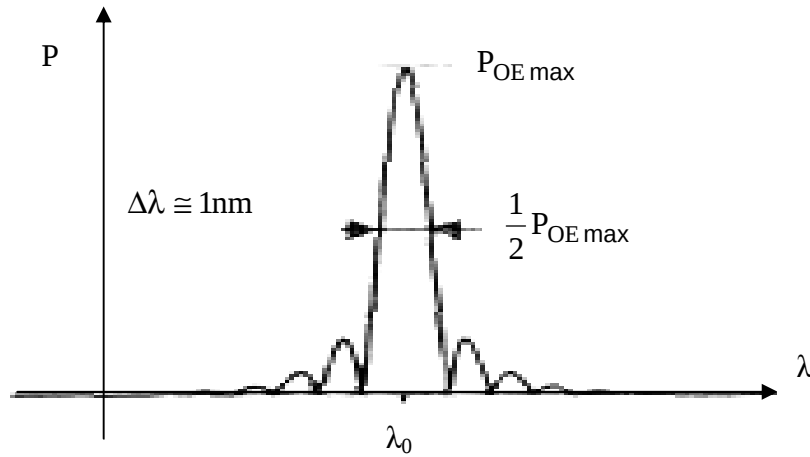


Figure 2. 7 : Spectre d'émission d'un laser

II.2.2.3 Bruit des lasers

Un laser à semi-conducteur constitue un générateur de fréquences optiques particulièrement imparfait et affecté par des bruits d'amplitude et des bruits de fréquence. Ces fluctuations imposent une limite ultime aux performances de n'importe quel système optique de communication. Ce bruit est provoqué par l'émission spontanée dans la diode laser.

Le bruit d'amplitude ou d'intensité à une certaine fréquence est caractérisé par le RIN (Relative Intensity Noise) défini par le rapport entre la densité spectrale des fluctuations de la puissance optique $\langle \Delta P \rangle$ et le carré de cette puissance. On utilise habituellement la quantité $RIN(f)$, expression en décibels de $rin(f)$, exprimant la puissance relative dans une bande de 1 Hz en dB/Hz.

$$RIN(f) = 10 \log rin(f) \quad (II.19)$$

$$rin(f) = \frac{\langle \Delta P(f) \rangle^2}{P(f)^2} \quad (II.20)$$

Par suite du couplage entre électrons et photons dans la cavité du laser, le spectre des fluctuations relatives de puissance n'est pas blanc, donc le RIN n'est pas constant : aux fréquences basses (de 0 à 10 kHz), c'est un bruit en $1/f$, suivi d'un palier jusqu'à plusieurs centaines de MHz, puis d'un pic (au-delà de 1 GHz) dont le maximum correspond à la fréquence de résonance, puis une décroissance rapide. Cependant, un laser est souvent caractérisé par une valeur de RIN moyen pour une bande de fréquences de données.

Sa forme dépend également du courant de polarisation. Le maximum du bruit d'intensité se situe au seuil, indiquant le changement des propriétés de la lumière émise par le laser lorsque l'émission stimulée l'emporte sur l'émission spontanée.

Des valeurs très basses de RIN (< -150 dB/Hz) sont nécessaires dans les liaisons optiques analogiques.

Le bruit de fréquence ou de phase est dû à des fluctuations de phase, qui entraînent des fluctuations de fréquence et qui se manifestent par une largeur de raie non nulle. Deux mécanismes principaux contribuent aux fluctuations de phase. Le premier provient des photons émis spontanément qui changent aléatoirement la phase du champ optique. Le second résulte de l'effet des porteurs qui, par l'intermédiaire du gain et de l'indice de réfraction changent la longueur du chemin optique et par conséquent la phase du champ optique.

II.2.3 Techniques de modulation

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

II.2.3.1 La modulation directe

Un des principaux avantages de l'utilisation des lasers à semi-conducteur pour les systèmes de télécommunications par fibres optiques réside dans le fait qu'il est possible de les moduler facilement : la modulation du courant qui les traverse entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise. Cette technique est appelée modulation directe. Ainsi, il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser.

Cette solution de modulation directe requiert assez peu de composants. En dehors de la source optique, le laser, seuls un générateur de courant et un driver sont nécessaires. Le premier va émettre à un débit donné une séquence de données, expression de l'information à transmettre. Le second a pour rôle de commander la source optique au niveau des puissances émises (en fixant les valeurs du courant d'alimentation). Pour cela, il modifie et transforme les niveaux du courant issu du générateur.

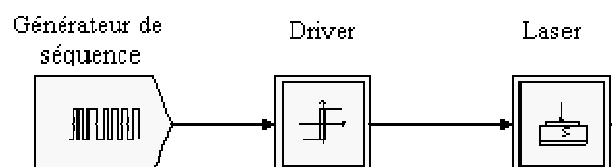


Figure 2. 8 : Synoptique de la modulation directe

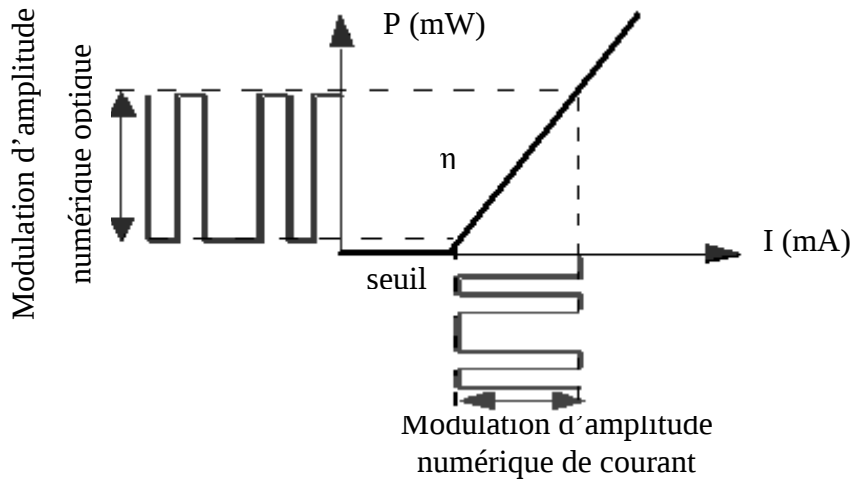


Figure 2. 9 : Modulation directe d'une diode laser.

La modulation directe connaît beaucoup d'avantages, en particulier le faible coût de mise en oeuvre. Mais elle comporte aussi des limites. Les lasers en sont souvent la cause. Leur temps de réaction, les oscillations, le bruit créé font que la modulation directe engendre, pour les hauts et très hauts débits, certaines dégradations sur le signal optique modulé. A cela, la modulation externe constitue un remède.

II.2.3.2 La modulation externe

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

La modulation est effectuée sur une onde pure et constante et par un composant indispensable : le modulateur externe. Celui-ci est commandé par une tension externe $v(t)$, modulée et représentative de l'information à transmettre. Cette tension appliquée au modulateur a pour propriété de modifier le facteur de transmission en intensité à la sortie. Le signal optique continu émis par le laser alimenté par un courant constant est donc peu dégradé. En traversant le modulateur, il subit les modifications du facteur de transmission et le signal de sortie se trouve modulé selon $v(t)$. Un driver est souvent présent entre les données et le modulateur afin de fixer les niveaux de $v(t)$ et de choisir les modifications du facteur de transmission.

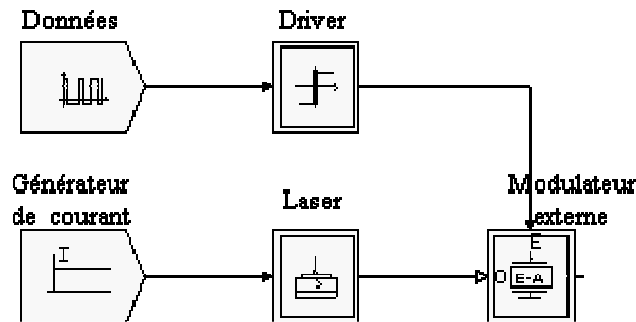


Figure 2. 10 : Synoptique de la modulation externe.

La modulation directe, plus simple et moins coûteuse est encore très utilisée si les données sont transmises à un débit de quelques gigabits/s, selon la qualité du laser. Mais au-delà de 5 Gbits/s, la modulation externe est indispensable pour maintenir une qualité de transmission correcte. Cependant, les modulateurs ne sont pas parfaits et peuvent engendrer des défauts mais leurs impacts sont moins importants.

II.3 Interface optoélectronique de réception [16], [17], [18]

L'interface optoélectronique de réception, dans une liaison par fibre optique, est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique, en lui apportant le minimum de dégradation. Ce rôle est tenu par le photodétecteur. Deux variantes de photodétecteur sont fréquemment utilisées dans une liaison par fibre optique :

- la photodiode PIN ;
- la photodiode à avalanche (PDA).

II.3.1 Photodiodes PIN

II.3.1.1 Principe

La photodiode PIN est une photodiode classique dans laquelle on a inséré, entre les deux zones de porteurs, une région à forte résistivité (zone intrinsèque I). Dans cette zone, on appauvrit la quantité de porteurs libres en la faisant travailler sous tensions (Figure 2 11).

Lorsque la jonction est polarisée en inverse, la zone déplétée augmente et les porteurs majoritaires sont incapables de la traverser : le seul courant (I_s), dit de seuil, qui subsiste est dû à la traversée des porteurs initialement minoritaires

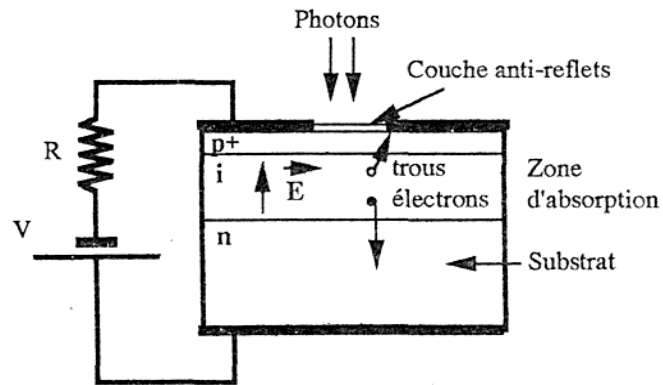


Figure 2. 11 : Photodiode PIN

II.3.1.2 Sensibilité

La sensibilité S exprimée en A / W , relie la puissance lumineuse P au photocourant i_s :

$$i_s = S \cdot P \Rightarrow S = \frac{\eta_e \cdot q}{h\nu} \quad (\text{II.21})$$

avec : q charge de l'électron,

η_e rendement quantique externe

La puissance du signal électrique, en i_s^2 , est donc proportionnelle au carré de la puissance optique : il s'agit d'une détection quadratique.

Dans le domaine de sensibilité, S augmente avec λ , puis chute à l'approche de la coupure. Il y a donc une longueur d'ondes de sensibilité maximale (Figure 2.12)

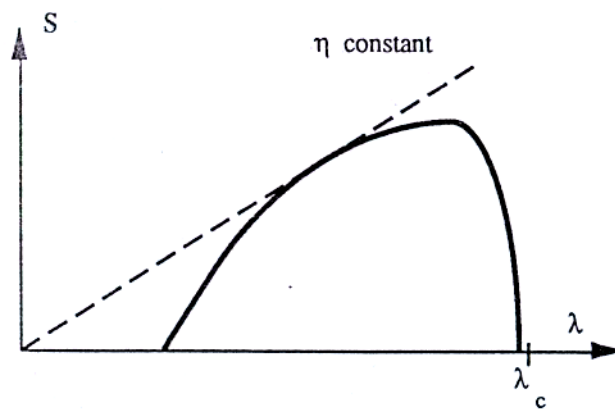


Figure 2. 12 : Sensibilité spectrale d'une photodiode.

II.3.1.3 Courant d'obscurité

Le courant d'obscurité i_D , qui circule dans la jonction en absence d'éclairement, a des origines multiples : génération thermique dans la zone I, courant de surface, courant de fuite. Il dépend beaucoup du matériau et augmente avec la température suivant une loi en $\exp(-E/kT)$.

Le courant total dans la photodiode est donc :

$$i = S \cdot P + i_D \quad (\text{II.22})$$

Le photocourant ne dépend pas de la tension de claquage, par contre certaines composantes du courant d'obscurité augmentent avec cette tension. En absence de polarisation, i_D s'annule mais non i_s . La diode se comporte en générateur qui tire son énergie de la lumière reçue (effet photovoltaïque) mais dont le temps de réponse est élevé.

II.3.1.4 Temps de réponse

Le temps de réponse de la photodiode doit être très bref ; il est limité d'une part par la capacité de jonction, qui est réduite si on élargie la zone d'absorption, d'autre part par le temps de transit, qui est réduit si on le rétrécit. Un compromis est donc à trouver. En pratique, on prend une épaisseur de la zone intrinsèque voisine de la profondeur d'absorption.

On améliore le temps de réponse en augmentant la tension de polarisation inverse, ce qui réduit la capacité et le temps de transit. On atteint couramment 0,5 ns.

II.3.2 Photodiodes à avalanche (PDA)

II.3.2.1 Principe

Le signal reçu étant souvent très faible, il est nécessaire d'amplifier le photocourant. On fait suivre la photodiode d'un amplificateur, mais le bruit de celui-ci est souvent prépondérant. Aussi a-t-on parfois intérêt à utiliser un composant à gain interne, la photodiode à avalanche ou PDA.

Son principe est l'ionisation en chaîne, par impact, des porteurs, sous l'effet d'un champ électrique très intense. C'est l'effet d'avalanche qui, s'il n'est pas contrôlé, aboutit au claquage de la jonction.

II.3.2.2 Structure

Dans ce type de photodiodes utilisant des champs électriques très importants, deux points sont à considérer : le champ électrique doit être reparti d'une façon homogène et il faut que le matériau

soit le plus homogène possible ; d'une façon générale, il faut éviter de créer des zones qui risquent d'engendrer des phénomènes de claquage de la diode (Figure 2.13).

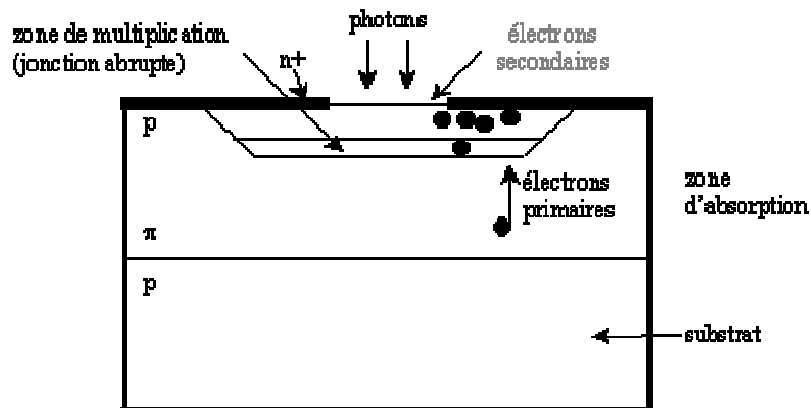


Figure 2. 13 : Photodiode à avalanche $p\pi pn$

II.3.2.3 Tension de claquage

La tension de claquage inverse V_B , dépend du matériau mais aussi de la structure de la photodiode, puisque c'est la valeur du champ électrique qui provoque le claquage. Elle est élevée (130 à 300 V) dans le silicium, et beaucoup plus faible dans le germanium.

II.3.2.4 Coefficient de multiplication

Appelé aussi gain d'avalanche et noté M , c'est le rapport entre le nombre moyen de porteurs secondaires créés par ionisation, et le nombre de porteurs primaires provenant de la photodétection.

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_B} \right)^n} \quad (\text{II.23})$$

où V : tension de polarisation

V_B : tension de claquage

n : facteur dépendant des dopages

d'où une croissance d'abord lente, puis de plus en plus rapide au voisinage de V_B (Figure 2.14)

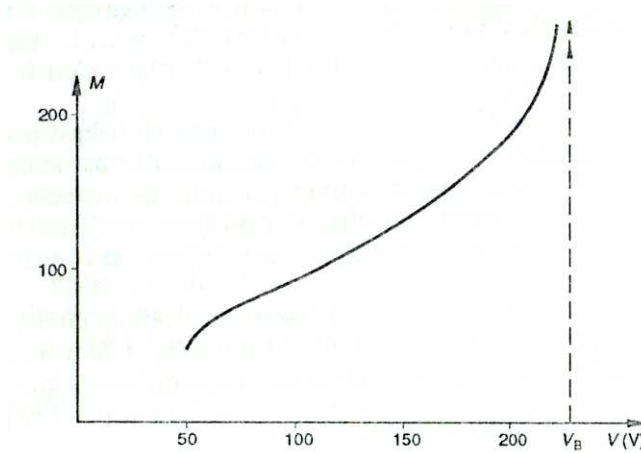


Figure 2. 14 : Gain des photodiodes à avalanche

II.3.3 Bruits des photodiodes

II.3.3.1 Bruit de grenaille ou bruit quantique

Comme dans toute jonction pn polarisée en sens inverse, un bruit de grenaille apparaît dans la photodiode, du fait de la répartition aléatoire des instants de génération des paires électron-trou.

Le bruit de grenaille ou bruit quantique a une valeur quadratique moyenne $\langle i_q^2 \rangle$ et une densité spectrale constante :

$$\frac{d\langle i_q^2 \rangle}{df} = 2q \cdot i \quad (\text{II.24})$$

où i : le courant dans la photodiode

Ce bruit quantique constitue la limite théorique à la capacité des systèmes de transmission.

II.3.3.2 Bruit des diodes à avalanche

Dans les photodiodes à avalanche, un excès de bruit apparaît du fait de la multiplication.

La densité spectrale du courant de bruit de la PDA est donnée par :

$$\frac{d\langle i_q^2 \rangle}{df} = 2q \cdot i_D \cdot M^2 \cdot F(M) \quad (\text{II.25})$$

avec M : gain d'avalanche,

$F(M)$: fonction croissante du gain M , dit facteur d'accès de bruit

i_D : courant d'obscurité non multiplié

II.3.3.3 Bruit thermique

Ce bruit, lié à l'agitation thermique, qui apparaît dans tout conducteur quelque soit sa nature. Son expression pour une résistance de charge R_c est :

$$\langle i_{th}^2 \rangle = \frac{4kT}{R_c} \cdot \Delta f \quad (II.26)$$

II.3.3.4 Puissance équivalente de bruit

On peut caractériser le bruit par la puissance équivalente de bruit PEB , puissance optique qui produirait dans une bande de 1Hz un courant de signal de même puissance que le bruit, soit :

$$PEB = \frac{\sqrt{\langle i_b^2 \rangle}}{M \cdot S_\lambda \cdot \sqrt{\Delta f}} \quad [W/\sqrt{Hz}] \quad (II.27)$$

où $\langle i_b^2 \rangle$ moyenne quadratique du courant de bruit dans une largeur de bande Δf

S_λ sensibilité qui est le courant fourni par la photodiode pour une puissance optique reçue de 1 W

M gain d'avalanche.

Sur une surface active S_A du composant, on définit la détectivité D , caractéristique du matériau, telle que :

$$D = \sqrt{S_A} / PEB \quad [\sqrt{Hz} \cdot cm / W] \quad (II.28)$$

II.3.4 La détection

Comme il existe plusieurs méthodes pour écrire l'information sur le signal lumineux, il existe différentes techniques pour la récupérer. Néanmoins, le photodétecteur est toujours nécessaire pour convertir le signal optique en électrique. Pour simplifier, nous pourrions le comparer à un compteur de photons et un générateur d'électrons. La première méthode de détection est appelée directe. Elle consiste en la conversion, grâce à une photodiode, des fluctuations de puissance optique porteuses de l'information en fluctuations de courant électrique. D'autres méthodes dites cohérentes (détecteurs hétérodynes), dans lesquelles la porteuse optique est modulée en amplitude, en phase ou en fréquence et démodulée dans un détecteur qui réalise une fonction de mélange, seront abordées.

II.3.4.1 La détection directe

Pour extraire le signal qui module en amplitude une onde, on peut le redresser, ou plus généralement le faire passer dans un dispositif non linéaire, tel qu'une diode. Un signal basse fréquence, le signal modulant et des harmoniques sont alors émis. Les harmoniques peuvent être éliminées par filtrage, dans la mesure où la fréquence de l'onde porteuse est très grande devant la fréquence maximale du spectre du signal modulant. Ce procédé est classiquement appelé détection directe.

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

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

II.3.4.2 La réception hétérodyne

La technique de détection directe, que nous venons de présenter, a été, historiquement la première utilisée dans les récepteurs radioélectriques. A partir des années 1930, on a vu se développer la réception hétérodyne.

Le signal reçu et un signal issu d'un oscillateur local sont couplés pour réaliser une combinaison linéaire des signaux présents sur ses deux entrées. Une des deux sorties attaque le photomélangeur. Le signal détecté est filtré dans un filtre centré autour de la fréquence intermédiaire.

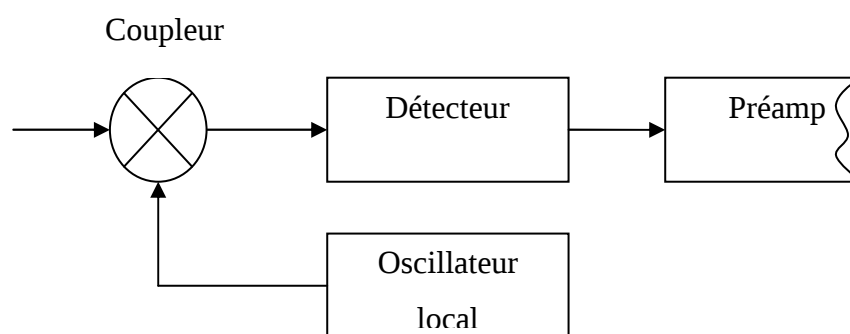


Figure 2. 15 : Schéma du photodétecteur en détection hétérodyne.

La plus grosse contrainte porte sur la stabilité des sources.

En effet, l'oscillateur local ne délivre pas un signal sinusoïdal pur car il est affecté par des bruits d'amplitude et de phase qui se traduisent par une modulation parasite du signal en fréquence intermédiaire.

II.3.5 Rapport signal sur bruit en sortie du récepteur

A la sortie du récepteur optique et après un filtrage passe-bas de 0 à Δf ; le rapport signal sur bruit vaut :

$$\frac{S}{B} = \frac{i_s^2}{\langle i_B^2 \rangle} = \frac{(M \cdot S_\lambda \cdot P)^2}{\langle i_q^2 \rangle + \langle i_E^2 \rangle} \quad (\text{II.29})$$

avec $\langle i_E^2 \rangle = 4kT\Delta f \left(\frac{1}{R_P + R_C} \right) + \langle i_A^2 \rangle$ (II.30)

où $\langle i_A^2 \rangle$ est la moyenne quadratique du bruit de l'amplificateur

$\langle i_E^2 \rangle$ représente le bruit, indépendant du signal, dû aux circuits électroniques.

i_s est le courant du signal

$\langle i_S^2 \rangle$ est la moyenne quadratique du courant de bruit

$\langle i_q^2 \rangle$ est la moyenne du bruit quantique.

En pratique deux cas se présentent (Figure 2.22) :

- si la puissance optique incidente P et le gain M de la PDA sont faibles (ou avec un photodiode PIN), le bruit de l'électronique, indépendant du signal, est prépondérant, et on a :

$$\frac{S}{B} = \frac{(M \cdot S \cdot P)^2}{\langle i_E^2 \rangle} \quad (\text{II.30})$$

Le rapport signal sur bruit augmente comme P^2 et M^2 :

- si P et/ou M sont élevés, le bruit quantique est prépondérant :

$$\frac{S}{B} = \frac{S \cdot P}{2q \cdot F(M) \cdot \Delta f} \quad (\text{II.31})$$

Le rapport signal / bruit augmente toujours, mais moins vite, avec P , et décroît avec M en M^{-x} , puisque l'excès de bruit lié à la multiplication devient prépondérant et augmente plus vite que le signal.

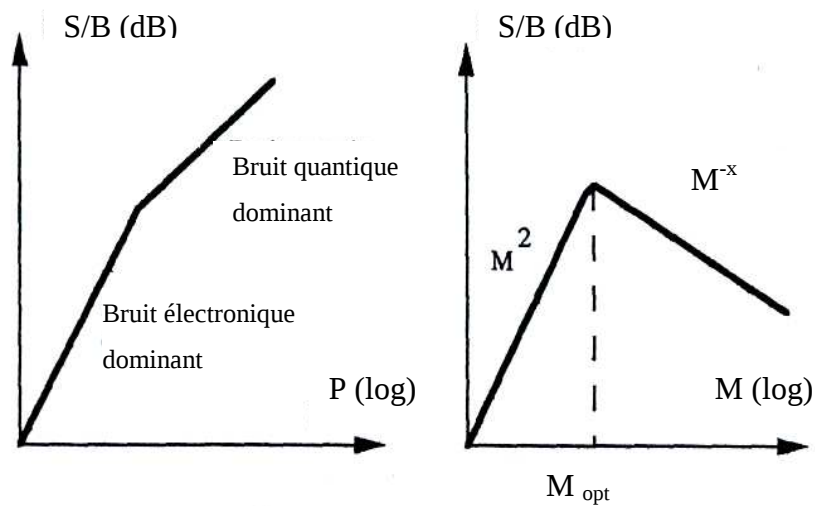


Figure 2. 16 : Rapport signal sur bruit en sortie du récepteur

II.4 Les répéteurs ou amplificateurs [3], [7]

Le répéteur comporte une interface optique de réception et une autre servant pour l'émission. Ces interfaces sont reliées par des circuits d'amplification et de régénération. Or le principal élément de la liaison est la fibre optique, vue au 1^{er} chapitre, elle offre une très grande capacité de transport, plus grande que les convertisseurs optique-électronique et les composants électroniques. D'où l'idée de traiter le plus souvent possible le signal lumineux avant sa conversion électrique. Pour cela, de nombreux progrès ont été réalisés sur les composants optiques pour avoir des amplificateurs optiques.

L'évolution des systèmes de transmission optique a connu une révolution avec la mise au point et le développement industriel des amplificateurs optiques à la fin des années 80. Trouvant désormais des fibres optiques à dispersion chromatique faible, la principale contrainte de ce support de transmission était devenue l'atténuation des signaux durant la propagation. Or le photodétecteur émettra un courant de qualité, codant correctement l'information à transmettre, seulement si le photocourant n'est pas noyé dans le bruit, et donc la puissance optique reçue est suffisamment importante. L'amplification optique devient alors une alternative aux complexes répéteurs-régénérateurs optoélectroniques. Elle permet de compenser ces pertes et de contrôler régulièrement la puissance optique des signaux. Il est désormais possible de transmettre le signal optique sans conversion sur une distance beaucoup plus importante.

L'amplification optique est à l'origine d'une véritable révolution dans le domaine des télécommunications, vus les avantages que cette technologie procure en association avec le multiplexage en longueur d'onde (WDM). En effet, cette amplification peut intervenir sur

l'ensemble des N longueurs d'onde d'un multiplex, sans distorsion du signal utile. Il évite donc une conversion opto-électronique et une amplification électrique sur chaque canal.

L'amplification optique repose sur le phénomène d'émission stimulée.

II.4.1 Différents types des amplificateurs optiques

II.4.1.1 Les amplificateurs à semi-conducteur (AOSC)

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

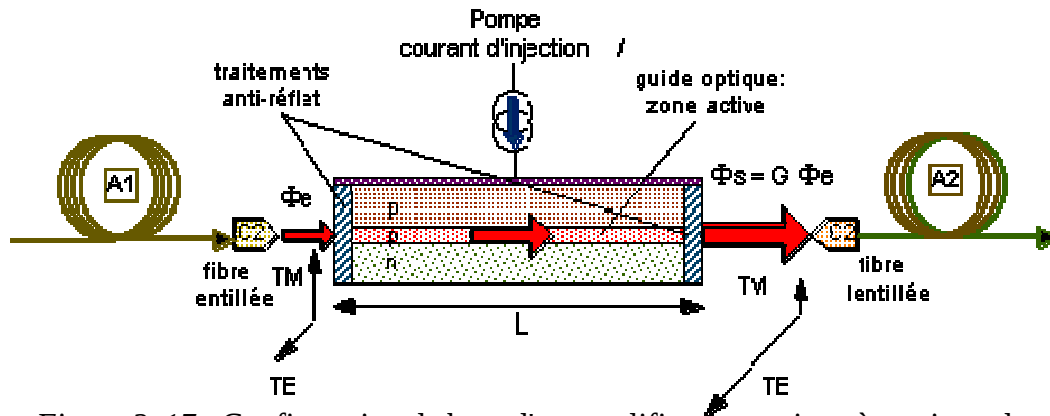


Figure 2. 17 : Configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteur.

La lumière incidente entre dans le circuit est amplifiée et sort par l'autre extrémité¹ pour être couplée dans la fibre. Idéalement, il n'y a pas de réflexion du signal dans l'amplificateur. Les principales caractéristiques des AOSC sont :

- Un gain élevé (jusqu'à 30 dB) selon le semi-conducteur, la longueur d'onde, le courant injecté et la puissance du signal incident ;
- Une puissance de saturation en sortie autour de 5 - 10 mW ;
- Une bande passante optique importante, de l'ordre de 5 THz (soit environ 40 nm autour de 1550 nm) ;
- Les non-linéarités sont particulièrement importantes dans les conditions de saturation du gain ;

- C'est de loin le dispositif amplificateur le plus compact qui existe, avec un rendement (rapport gain à la consommation électrique) record. De plus, sa technique de fabrication est compatible avec l'intégration monolithique de nombreux autres composants actifs et passifs, ce qui offre des perspectives attrayantes en matière de traitement optique du signal, et aussi probablement en terme de coût ;
- Les pertes de couplage du faisceau incident dans l'amplificateur sont élevées, en raison de la supériorité du diamètre du faisceau sur l'épaisseur de la couche active du semi-conducteur.

II.4.1.2 Les amplificateurs à fibre dopée (EDFA)

Le milieu amplificateur est cette fois-ci le coeur d'une fibre optique monomode dopée avec des ions de terres rares. Pour que la fibre ne soit pas absorbante, mais amplificatrice, il faut l'associer à un pompage optique. Un multiplexeur permet de coupler le flux lumineux puissant provenant d'une diode laser de pompe et le signal à l'intérieur de la fibre. Les longueurs d'onde de pompe doivent permettre des transitions vers les états excités des ions de terres rares et créer l'inversion de population. La suite du processus de l'amplification est identique à celle vue dans le paragraphe précédent.

L'ensemble module de pompe, multiplexeur et fibre dopée forme l'amplificateur le plus rudimentaire. La longueur de fibre est généralement comprise entre 10 et 20 mètres. Pour l'amplification autour de 1550 nm, fenêtre spectrale la plus utilisée car de faible atténuation des fibres optiques en silice, les dopants sont des ions Erbium Er^{3+} . On parle alors d'Amplificateur à Fibre Dopée à l'Erbium (AFDE ou EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier en anglo-américain). 980 et 1480 nm sont les deux longueurs d'onde de pompe les mieux adaptées à l'EDFA. Et des diodes lasers à semi-conducteur sont disponibles à ces longueurs d'onde (lasers en AlGaAs pour le 980 nm et lasers en InGaAsP pour le 1480 nm). Le multiplexeur optique, sélectif en longueur d'onde, doit présenter une perte d'insertion faible à ces deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système. Des isolateurs présents à chaque extrémité en assurent aussi la stabilité en bloquant tous les faisceaux lumineux susceptibles de revenir en aval. Le signal de pompe peut être couplé dans la fibre en co-propagation (mêmes sens pour le signal et le signal de pompe) afin de réduire le facteur de bruit ou en contre-propagation (sens opposés du signal de pompe sur le signal utile) favorisant ainsi une plus forte puissance de saturation. Mais afin d'augmenter et uniformiser dans la fibre dopée l'inversion de population et donc l'amplification du signal, un double pompage aux deux extrémités peut également être réalisé. La Figure 2.24 représente la configuration d'un de ces amplificateurs à fibre dopée.

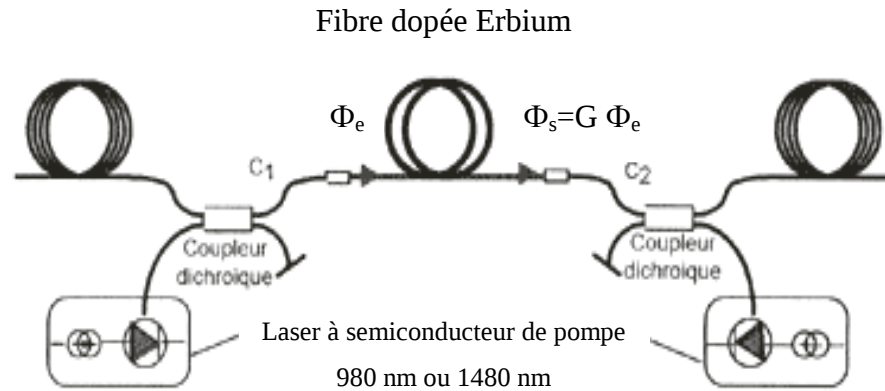


Figure 2. 18 : Configuration d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium.

Le premier EDFA est apparu en 1986. Mais du fait qu'il semblait pouvoir répondre à un grand nombre de critères, son développement a été très rapide et il fut introduit dans la plupart des longues liaisons de télécommunications. Ses performances dépendront bien entendu de la concentration d'ions à terres rares dans la fibre, du pompage, de la puissance du signal à l'entrée de l'amplificateur, de la longueur d'onde du signal, de la longueur de la fibre, et autres paramètres encore. Par exemple, le facteur de bruit croît avec la longueur d'onde. Ou encore un pompage à 980 nm permet une inversion de population quasi totale et introduit un minimum de bruit alors que le pompage à 1480 nm est mieux maîtrisé et procure des puissances de pompage et de saturation plus élevées. Il y a donc un choix à faire entre le gain et le bruit.

En général, nous pouvons définir pour les EDFA un gain se situant dans la fourchette 25 à 45 dB et des puissances de saturation allant de 1 à 10 mW (0 à 10 dBm). Le gain diminue avec la puissance d'entrée du signal, alors qu'il augmente avec la puissance de pompe, jusqu'à atteindre la saturation. Le rendement, défini comme le rapport du gain (dB) à la puissance de pompe injectée dans la fibre (en mW), est donc maximal autour de la saturation. Enfin, les EDFA ont une large bande passante (1530-1560 nm) pour laquelle le gain est quasiment identique ; ce qui rend intéressant ces amplificateurs dans la perspective d'amplifier simultanément plusieurs signaux multiplexés en longueurs d'onde.

II.4.1.3 Les amplificateurs Raman

Avec l'accroissement des canaux dans la fibre, la bande spectrale offerte par les amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium, limitée au maximum à 40 nm, peut s'avérer être un facteur pénalisant.

Ce constat a relancé les études sur de nouvelles méthodes permettant l'augmentation de la bande spectrale

De nouveaux amplificateurs optiques tels que les amplificateurs Raman prennent une part non négligeable dans les systèmes de télécommunications. Ils sont basés sur le principe de la diffusion Raman, qui est un effet non linéaire à deux photons dans lequel un photon de pompe est absorbé et un photon de plus faible énergie est émis en même temps qu'un phonon. Ce phénomène peut être spontané, s'il n'y a pas de photon signal, ou stimulé par la présence d'un photon signal. Ainsi, dans le cas de l'amplificateur Raman, l'onde incidente, dite onde de pompe, stimulée par l'onde signal, va créer une autre onde signal, et un phonon. L'amplification est alors réalisée

Comme pour les autres amplificateurs optiques, celui-ci a besoin d'une source externe, une source optique. Des lasers YAG sont les plus souvent utilisés dans ce cas, en émettant une longueur d'onde inférieure à celle du signal. L'avantage principal de ces lasers est d'être accordables sur une très grande plage de longueurs d'onde

Le gain obtenu peut atteindre quelques dizaines de décibels, mais une saturation qui s'accompagne d'une forte dégradation du rapport signal sur bruit (l'émission spontanée continuant à être amplifiée) peut apparaître. La limite en puissance est due à la génération d'une onde autre que l'onde signal lors de la diffusion Raman.

II.4.2 Comparaison des amplificateurs

L'amplificateur à semi-conducteur n'apparaît que très peu dans un système de transmission, car il présente aujourd'hui des caractéristiques assez peu favorables, au regard des EDFA. On notera cependant qu'il est le meilleur candidat à 1,3 μm . De plus, il se prête à l'intégration monolithique, ce qui est difficilement réalisable avec les EDFA.

L'apparition de ces derniers a néanmoins eu des conséquences fondamentales. Ils ont permis de fabriquer un milieu de propagation sans perte sur une très grande distance dans les systèmes de transmission travaillant à 1,55 μm . En les insérant périodiquement, ils trouvent leur application dans les liaisons sous-marines. Ils introduisent de plus faibles pertes d'insertion, une faible distorsion du signal, un gain plus important et sont insensibles à la polarisation de la lumière incidente contrairement aux AOSC. Ceci conduit à préférer les EDFA. Leur plus gros défaut est leur limite à amplifier uniquement autour de 1550 nm.

II.4.3 Utilisation de l'amplificateur optique

Le choix d'un amplificateur optique doit cependant se faire en fonction de son rôle. Il peut servir d'amplificateur de puissance en émission (booster), de préamplificateur en réception ou d'amplificateur en ligne. Selon l'utilisation qui en est faite, les paramètres diffèrent. On demandera par exemple à un amplificateur de puissance d'être capable à délivrer une puissance de sortie élevée et ses caractéristiques de bruit seront assez peu critiques, tandis qu'un préamplificateur doit être le moins bruyant possible. L'amplificateur en ligne sera un compromis à tout cela afin à la fois de ne pas dégrader la qualité du signal transmis et allonger la distance de transmission.

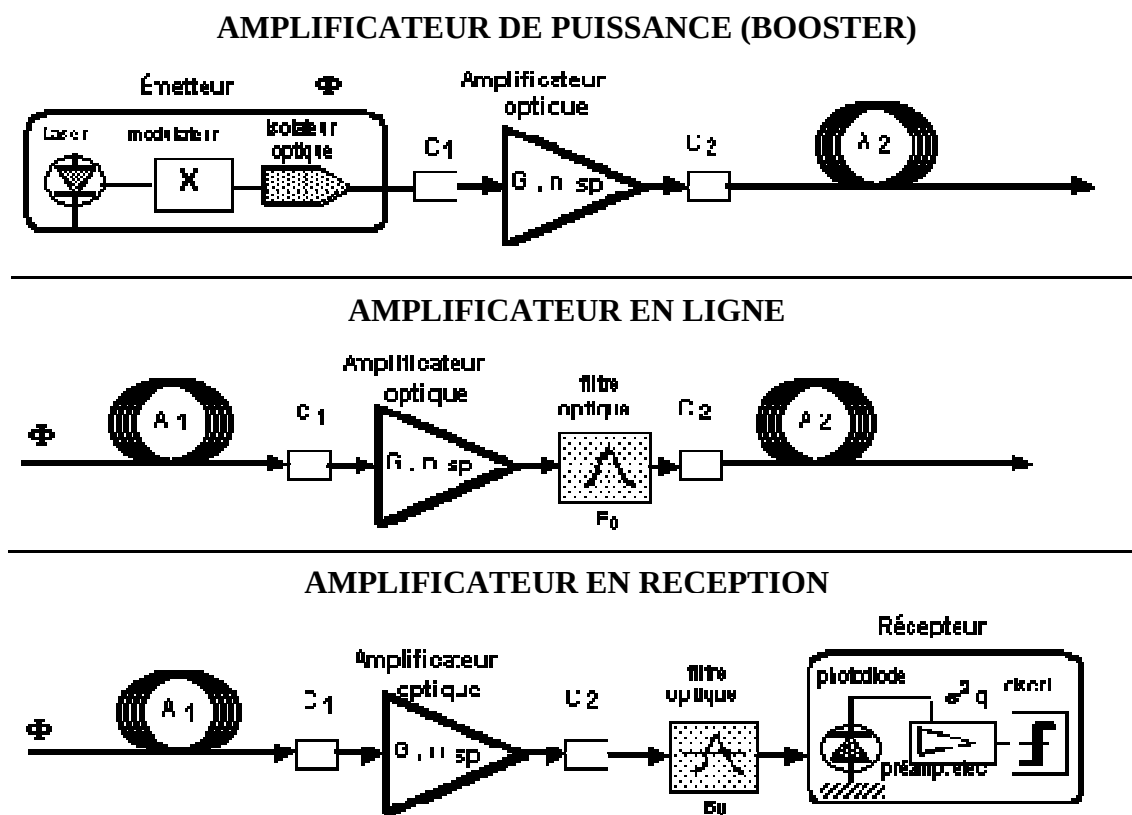


Figure 2. 19 : Configuration des amplificateurs optiques

II.5 Techniques de multiplexage [3],[7]

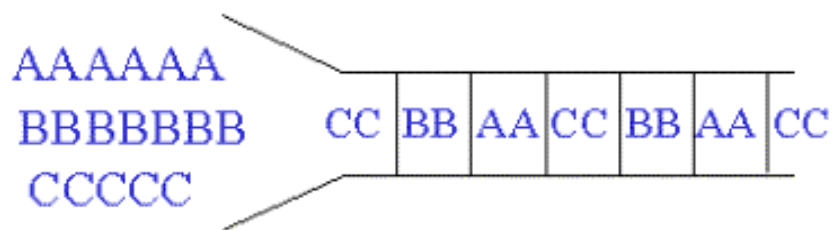
Les fibres optiques possèdent, dans la fenêtre spectrale généralement utilisée, une bande utilisable très importante (environ 15 THz autour de la longueur d'onde 1,55 μm). Théoriquement, les débits qui peuvent être transmis sont donc extrêmement élevés. C'est d'autant plus intéressant

qu'aujourd'hui le nombre et la taille des informations échangées sont de plus en plus importants. Néanmoins, actuellement, le traitement électronique des signaux électriques avant modulation et après détection n'atteint pas de telles fréquences. C'est pourquoi diverses solutions ont été imaginées pour profiter des capacités de la fibre optique et donc d'augmenter le transfert d'informations sur un même canal. Dans la plupart des cas, le principe reste identique : utiliser N signaux au débit D équivalent en terme de capacité à un signal au débit $N \cdot D$, irréalisable à l'heure actuelle. C'est ce qu'on appelle le multiplexage, et les débits transportés seraient désormais plus importants. Le signal concentré des flux d'origines diverses est appelé signal multiplex. Pour conserver l'intégrité de chaque signal sur le canal, le multiplexage introduit, entre les signaux, une séparation temporelle, spatiale ou fréquentielle.

II.5.1 Le multiplexage temporel (TDM)

Le multiplexage TDM (Time Division Multiplexing, multiplexage à répartition temporelle (MRT)) consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant, ceci à tour de rôle pour chaque utilisateur (Figure 2.21). L'allocation de cette bande passante se fait en divisant l'axe du temps en périodes de durée fixe, et chaque utilisateur ne va transmettre que pendant une de ces périodes déterminée (Figure 2.22). Un intervalle de temps fixe (IT) est successivement assigné à une source.

Le multiplexage TDM permet alors de regrouper plusieurs canaux de communications à bas débits sur un seul canal à débit plus élevé (par exemple, conception d'un débit 40 Gbits/s, à partir de 4 séquences à 10 Gbits/s).



Chaque intervalle de temps IT est affecté à une voie

Figure 2. 20 : Répartition des périodes dans le cas d'un multiplexage **TDM**.

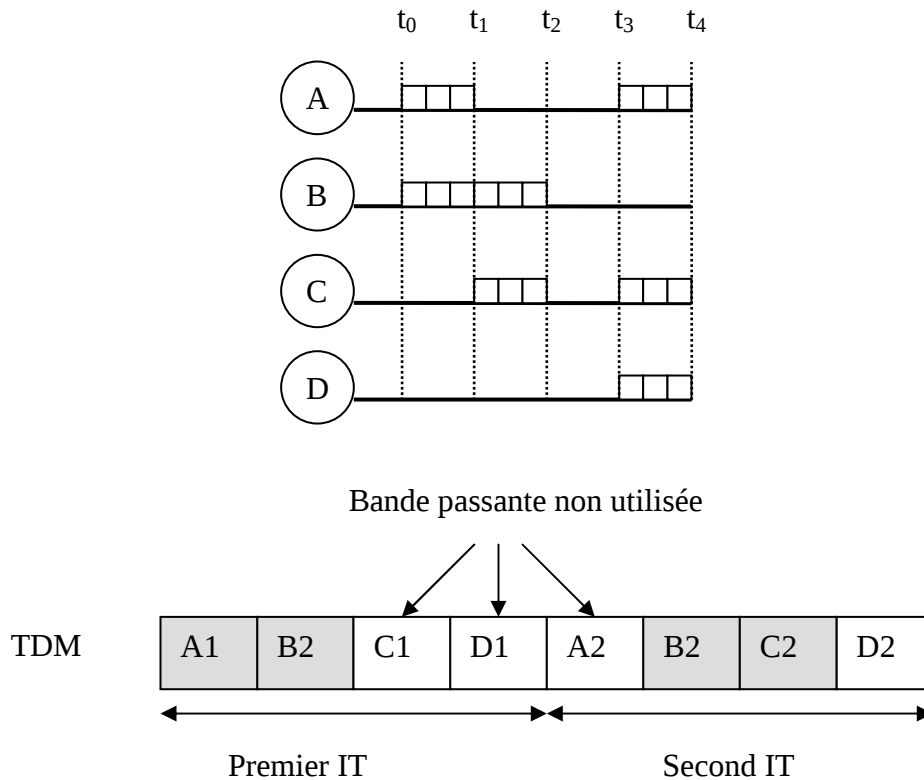


Figure 2. 21 : Représentation d'un multiplex TDM (4 voies vers 1)

II.5.1.1 Multiplexage temporel optique (OTDM)

Le multiplexage temporel peut être réalisé optiquement (OTDM, Optical Time Division Multiplexing). L'émetteur est constitué de N sources optiques en parallèle modulées au débit D_b bits/s. Cette technique nécessite que les signaux optiques soient ensuite codés de type RZ pour que les impulsions codées aient désormais une durée inférieure à T_b/N et que le multiplexage optique puisse se faire sans recouvrement optique.

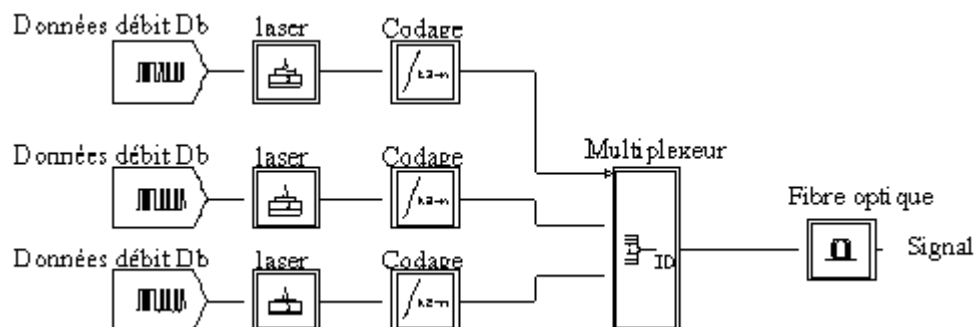


Figure 2. 22 : Synoptique d'un multiplexage OTDM.

Le multiplexage optique temporel n'est pas utilisé uniquement pour accroître les débits transmis. Il fournit aussi une technique d'accès utilisable dans les réseaux locaux. Le temps est partagé entre les différents utilisateurs : chacun d'eux dispose d'une tranche temporelle pour émettre. Les différents signaux sont assemblés pour être transmis sur une porteuse optique unique.

II.5.1.2 Multiplexage Temporel Electronique (ETDM)

L'OTDM a son équivalent en électronique, l'ETDM (Electronic Time Division Multiplexing). Dans le cas de l'ETDM, le codage RZ et l'assemblage des données se font électriquement (Figure 2.23).

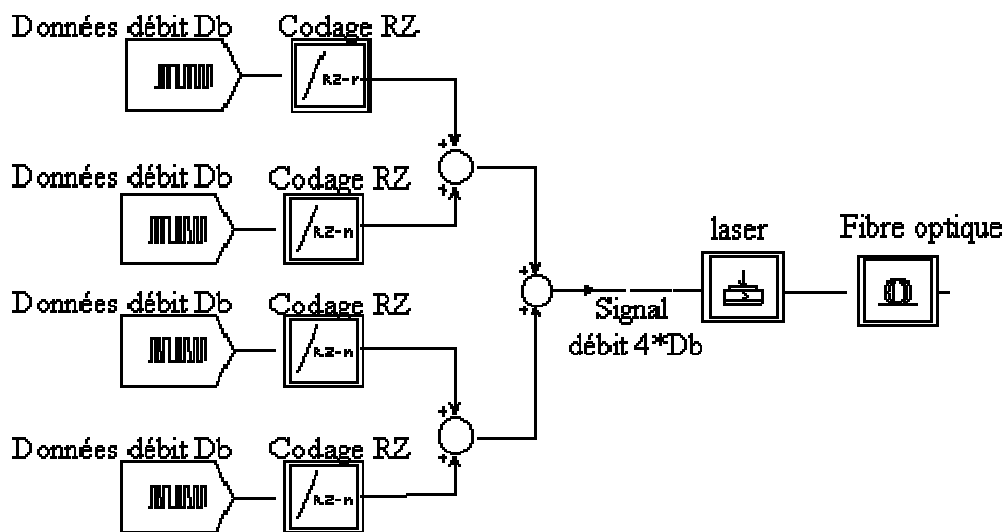


Figure 2. 23 :Synoptique du multiplexage ETDM.

Le haut débit obtenu est ensuite utilisé pour la modulation du courant de polarisation d'une diode laser et il n'y a qu'un seul signal lumineux émis. Cette étape est schématisée sur la Figure 2.24 par la présence de trois circuits électroniques et d'un multiplexeur électronique (circuit rapide).

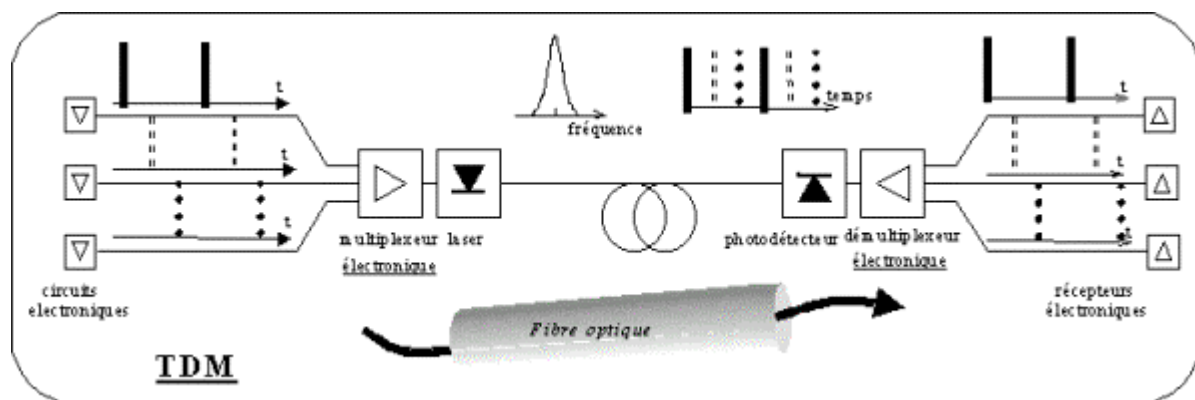


Figure 2. 24 :Schéma de principe du multiplexage ETDM

Outre le multiplexage temporel, il existe d'autres méthodes pour concentrer N signaux dans un seul canal.

II.5.2 Le multiplexage en longueur d'onde (WDM)

Le multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing, WDM), consiste à envoyer dans une seule fibre N porteuses optiques à différentes longueurs d'onde transmettant chacune un débit D_b . Ce n'est plus l'axe du temps qui est découpé en périodes pour chaque utilisateur mais la bande passante. Et chaque sous-bande est affectée à une voie (Figure 2.25). Ainsi plusieurs transmissions peuvent être faites simultanément, chacune sur une bande de fréquences particulières. Ce procédé est encore appelé multiplexage en fréquence (Frequency Division Multiplexing, FDM). Ces deux termes recouvrent la même notion, mais par habitude, on parle de multiplexage en longueur d'onde lorsque la séparation entre deux canaux est relativement grande (typiquement plus de 1 nm), tandis que l'on parle de multiplexage en fréquence lorsque cet écart est relativement petit.

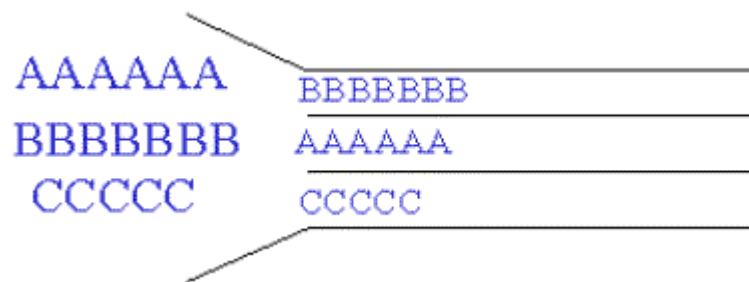


Figure 2. 25 : Répartition des sous-bandes dans le cas d'un multiplexage DM

L'utilisation du multiplexage WDM nécessite un ensemble de diodes laser émettant à des longueurs d'ondes différentes mais assez proches (dans le voisinage des 1550 nm), et de multiplexeur/démultiplexeur optiques pour combiner/séparer l'ensemble des signaux optiques dans/de la fibre. La Figure 2.26 représente un exemple d'une liaison utilisant le multiplexage WDM.

Afin d'assurer une bonne qualité de transmission du multiplex dans la fibre, il est important de déterminer l'espacement minimum à respecter entre les longueurs d'onde émises par chacune des sources. Cette grandeur dépend de plusieurs choses : qualité de la fibre, qualité des multiplexeur/démultiplexeur, longueur de transmission, qualité des sources et débit des données de chaque source.

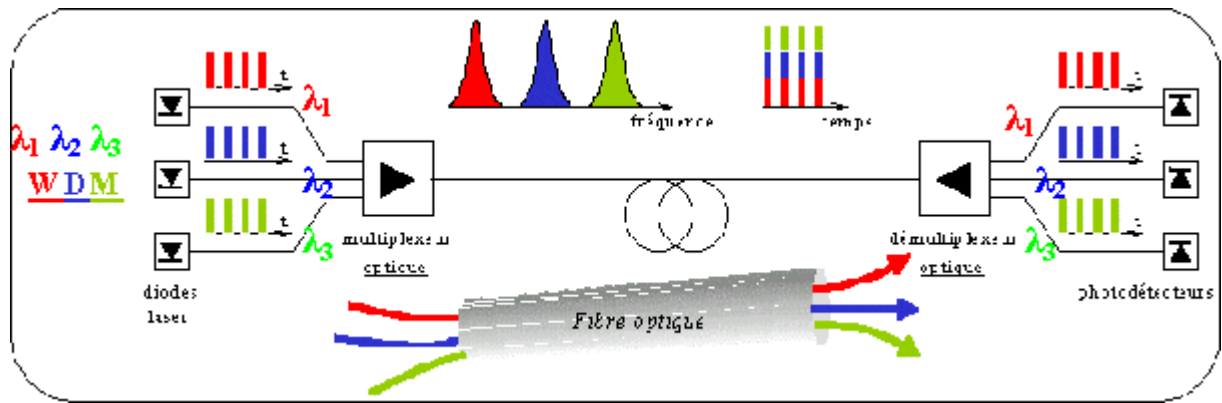


Figure 2. 26 : Schéma de principe du multiplexage WDM

La fibre optique transporte alors un débit numérique égal à $N * D_b$. Cette dernière est souvent définie comme la capacité du système.

L'intérêt premier du WDM est de permettre le transport de débits d'informations très importants sur une même fibre, à destination de plusieurs utilisateurs. On trouve aujourd'hui des systèmes à $4 * 10$ Gbits/s, $16 * 10$ Gbits/s. Dans un futur proche, des systèmes à 40 Gbits/s par longueur d'onde seront installés. Mais le véritable point de départ du développement des systèmes de transmission WDM s'est fait lorsqu'il a été associé à l'amplification optique. En effet, l'apparition des amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (EDFA) a permis l'amplification simultanée de l'ensemble des N canaux d'un multiplex, sans distorsion du signal utile. Envoyer N canaux dans une fibre optique plutôt que N fibres devenait un avantage économique indiscutable. Si, il y a encore peu de temps, l'espacement entre canaux était de l'ordre de 1nm, le terme de DWDM (Dense DWDM) est maintenant utilisé. En effet, avec l'apparition, sur le marché, de lasers accordables de très bonne qualité, l'espacement entre les longueurs d'onde a pu être progressivement réduit, et est descendu à 0,8 nm ou 0,4 nm.

Une seconde application du WDM concerne les réseaux locaux. Chaque abonné se voit alors attribuer une longueur d'onde, c'est à dire une "couleur". Cette méthode présente l'avantage de permettre une évolution continue du réseau par l'adjonction de nouveaux services ou de nouveaux abonnés simplement par insertion d'une nouvelle longueur d'onde.

II.5.3 Le multiplexage en longueur d'onde combiné au multiplexage temporel

Il est à noter que rien n'empêche à chaque signal de modulation d'une diode laser issu d'une étape de multiplexage temporel dans le domaine électronique, d'être ensuite multiplexé avec d'autres signaux à d'autres longueurs d'onde. Associer TDM et WDM est d'ailleurs la situation la plus

fréquente. Dans ce cas, après démultiplexage optique et photodétection, une étape de démultiplexage temporel permet la restitution des signaux temporels bas débit.

II.5.4 L'accès multiple à répartition de codes (CDMA)

L'Accès Multiple à Répartition par Code (noté aussi Code Division Multiple Access, CDMA) est basé sur l'affectation d'un code à chaque station ou utilisateur. Chaque bit correspondant au 1 est remplacé par une séquence de M créneaux, différente pour chaque utilisateur et définie comme la signature (le code) de celui-ci. Un nombre important de messages peut donc être envoyé sur une même ligne de transmission. Le destinataire possédant la bonne " clé " pourra décoder le signal qui lui est adressé parmi toutes les informations transmises

II.6 Bilan de liaisons par fibres optiques [12]

La puissance du signal qui doit être envoyé dans la fibre optique dépend des caractéristiques de bruit du récepteur, de la bande passante, des pertes de connecteurs et celles de transmission dans le câble.

La puissance reçue P_R est donnée par la relation en décibels :

$$P_R = P_E - A_{\text{Absorption}} - A_{\text{Dispersion}} - P_{\text{Epissures}} - P_{\text{Connecteurs}} \quad (\text{II.32})$$

avec P_E puissance émis
 A atténuation
 P perte

Cette puissance reçue doit être supérieure au seuil de réception $S_{(\text{TEB})}$ pour un taux d'erreur binaire TEB donné, avec une certaine marge de fonctionnement M_F , et inférieure à la puissance maximale admissible $P_{R_{\text{max}}}$, sous peine de dégradation, avec une marge de sécurité M_S .

$$S_{(\text{TEB})} + M_F \leq P_R \leq P_{R_{\text{max}}} \quad (\text{II.33})$$

II.6.1 Puissances maximale et minimale de réception

Le fabricant indique en général deux caractéristiques de puissance d'émission : l'une est la puissance minimale $P_{E\min}$, qui correspond à la valeur garantie en fin de vie, et l'autre à la puissance maximale $P_{E\max}$.

En conséquence, en appelant A_{totale} l'atténuation totale, la puissance de réception doit être comprise entre les valeurs :

$$S_{(\text{TEB})} + M_F \leq P_R \leq P_{R\max} - M_S \leq P_{E\min} - A_{\text{totale}} \leq P_{E\max} - A_{\text{totale}} \quad (\text{II.34})$$

avec $A_{\text{Total}} = A_{\text{Absorption}} + A_{\text{Dispersion}} + P_{\text{Epissures}} + P_{\text{Connecteurs}}$

II.6.2 Atténuation due à la dispersion

Comme nous l'avons vu dans le 1^{er} chapitre, la dispersion chromatique et intermodale sont deux caractéristiques particulières de la fibre qui produisent un élargissement temporel de l'impulsion. En supposant une impulsion de densité spectrale gaussienne, les bandes de fréquence électrique B_{El} et optique B_{Opt} occupées par le signal à 50% de puissance sont données par les relations :

$$B_{\text{El}} = 0,614 \cdot \delta \quad (\text{II.35})$$

$$B_{\text{Opt}} = B_{\text{El}} \cdot \sqrt{2} \quad (\text{II.36})$$

Par analogie avec un guide d'onde, on définit une fréquence de coupure F_c en fonction de la dispersion totale D donnée par la relation empirique :

$$F_c = \frac{0,44}{D} \quad (\text{II.37})$$

On peut alors calculer l'atténuation due à la dispersion chromatique à l'aide de la formule :

$$A_{\text{Dispersion}} = 10 \cdot \log \left[\exp \left(\frac{B_{\text{El}}}{F_c} \right)^2 \right] \quad (\text{II.38})$$

II.6.3 Portées maximales (en kilomètres) des liaisons par fibres optiques

Longueur d'onde nm	Caractéristiques	140 Mbit/s	560 Mbit/s	1 Gbit/s
850	Multimodale 2,5 dB/km D x L = 2 Gbit.km/s	14 /19 (1)	3.5 /17 (1)	2 /16 (1)
1300	Monomodale 0,5 dB/km D x L = 50 Gbit.km/s	96 (2)	84 (2)	50 /78 (1)
1550	Monomodale 0,3 dB/km D x L = 5 Gbit.km/s D x L = 50 Gbit.km/s	36 /160 (1) 160 (2)	9 /140 (1) 90 /140 (1)	5 /130 (1) 50 /130 (2)

Tableau 3.1 : Portées maximales des systèmes numériques avec un code binaire NRZ

D : débit ;

L : portée ;

(1) Portée limitée à la première valeur par la bande passante et à la seconde par le bilan énergétique.

(2) Portée sans problème de bande passante.

Une description détaillée de tous les composants présents dans une liaison par fibre optique a été réalisée. Pour l'émission, deux composants peuvent convertir le signal électrique en signal optique. Ce sont la diode laser et la diode électroluminescente. Pour la réception optique, deux composants sont aussi envisageables tels que la photodiode à avalanche et la photodiode PIN. On a parlé aussi des différents amplificateurs optiques. Des techniques de multiplexage ont été abordées pour profiter des capacités de la fibre optique et donc d'augmenter le transfert d'informations sur un même canal.

CHAPITRE III. ANALYSE ET ETUDE DE PERFORMANCE DES LIAISONS PAR FIBRES OPTIQUES

Cette partie simulation se portera d'une part sur la conception d'un logiciel permettant de calculer le bilan d'une liaison par fibre optique monomode et d'autre part, la comparaison entre l'utilisation de la fibre optique comme support de transmission par rapport aux autres types de support.

Le logiciel est élaboré sous MATLAB Version 5.3.

III.1 Présentation de MATLAB [20]

MAT (rix) LAB (oratory) est un logiciel puissant doté à la fois d'un langage de programmation haut niveau et d'outils dédiés aux calculs numériques et à la visualisation numérique. Développé en C par la société Mathworks ([http : /www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)). Matlab intègre dans sa version originale les outils mathématiques classiques tels que : calcul matriciel, manipulation de fonction, graphisme.... Mais actuellement, il recouvre d'autres domaines d'application de l'informatique scientifique :

- Visualisation graphique 2D et 3D ;
- Résolution d'équations aux dérivées partielles ;
- Optimisation ;
- Contrôle de procédés ;
- Traitement du signal ;
- Traitement de l'image ;
- Logique floue ;
- Réseaux de neurones.

Le système Matlab se divise en deux parties :

- Le noyau Matlab ;
- Une collection de toolboxes.

➤ le noyau Matlab comprend :

- Un environnement de travail offrant plusieurs facilités pour la manipulation des données. Son interpréteur permet de tester rapidement ses propres programmes Matlab ;
- Un système graphique Matlab (interfaces homme-machine, graphiques, images, animations) ;
- Un langage de programmation Matlab ;

- Une librairie de fonctions mathématiques Matlab ;
 - Un système d'interfaçage facilitant l'exécution de programmes C ou Fortran sous Matlab.
- la collection de toolboxes (boîtes à outils) regroupe un ensemble de fonctions spécifiques à un thème.

III.1.1 Fonctions de Matlab pour les graphiques

axis	permettant de choisir les dimensions des axes
figure	spécification du nom d'une fenêtre graphique
gca	récupération d'un pointeur sur l'objet graphique déjà présent
get	obtention des propriétés d'un objet
grid	ajout d'une grille pour une courbe tracée
hold on	pour tracer plusieurs courbes, avec, chacune ses propriétés propres, on l'insère entre les deux commandes 'plot' pour maintenir le premier écran afin que la courbe suivante n'écrase pas la précédente
linewidth	spécification de la largeur du trait d'un tracé
msgbox	crée une boîte du message
plot	pour tracer une courbe
set	pour spécifier les propriétés d'un objet
subplot	commande qui permet de subdiviser en une matrice de sous fenêtres une fenêtre graphique
title	titre de la figure
xlabel	dénomination de l'axe des abscisses
ylabel	dénomination de l'axe des ordonnées.

III.1.2 Génération des signaux

diric	Fonction de Dirichlet
sawtooth	Fonction triangulaire en dent de scie
sinc	Fonction sinus cardinal ($\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$)
rectpuls	Fonction rectangulaire apériodique
tripuls	Fonction triangulaire apériodique
square	Fonction rectangulaire périodique

randn génération des nombres aléatoires

III.2 Présentation du logiciel

Comme on l'a précisé auparavant, le logiciel élaboré permettra de faire le calcul du bilan de liaison d'une transmission par fibre optique ; il permettra aussi de comparer cette liaison avec un autre support de transmission.

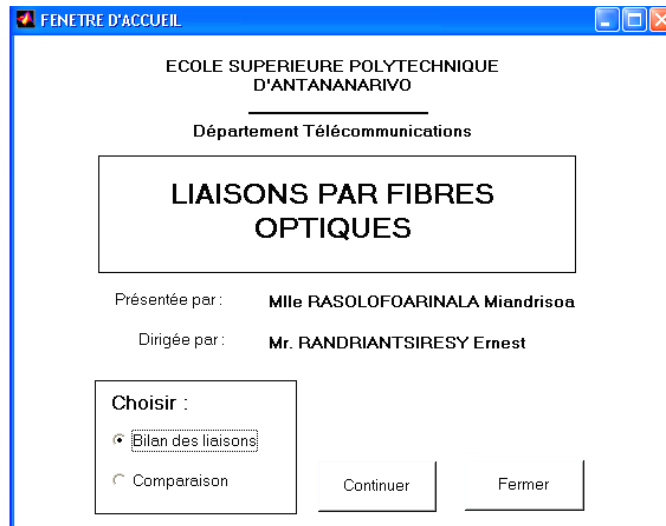


Figure 3. 1 Fenêtre d'accueil

III.2.1 Partie bilan de liaison

Lorsque nous choisissons d'utiliser un support de transmission, il est toujours utile de connaître les caractéristiques du signal qui y circule : c'est ce que l'on entend par bilan de liaison. Pour cela, nous avons à notre disposition des outils mathématiques permettant de faire le calcul des valeurs caractéristiques du signal émis dans une fibre monomode pour une liaison terrestre. Nous devons évaluer :

- puissance maximale et minimale de réception ;
- atténuation totale due à la dispersion ;
- marge de fonctionnement ;
- marge de sécurité ;
- la largeur spectrale du laser ;
- bande optique occupée ;
- fréquence de coupure.

Tous ces calculs seront réalisés avec notre logiciel.

A partir de certaines valeurs obtenues, on peut tracer une courbe représentant l'évolution de la dispersion et de l'atténuation chromatique en fonction de la pureté spectrale de la source d'émission.

Pour choisir cette partie du logiciel, on coche « Bilan de liaisons » dans la fenêtre d'accueil principale. Après avoir lue les informations sur cette partie du logiciel, nous accédons à la fenêtre permettant d'introduire les données et de visualiser le résultat du calcul. Des champs ont été prévus pour accueillir ces données :

- Données caractéristiques de la fibre : atténuation linéique, dispersion chromatique, nombre d'épissures, perte par épissure.
- Données caractéristiques des équipements : débit nominal, puissance maximale d'émission, puissance garantie, seuil de réception, puissance maximale de réception, dispersion maximale admissible.

L'appui sur le bouton « OK » permet de lancer le calcul. Les résultats attendus sur les champs de sortie sont affichés. En même temps, une courbe représentant l'évolution de la dispersion et de l'atténuation chromatique en fonction de la pureté spectrale de la source d'émission est tracée. Le bouton « Graphe » permet de visualiser cette courbe.

III.2.1.1 Exemple du calcul :

Considérons une liaison de 120 km à réaliser au débit de 2.4 Gbit/s sur une fibre de type G.625 dont les caractéristiques sont saisies dans la fenêtre de données.

DONNEES FIBRE		DONNEES EQUIPEMENTS	
Atténuation linéique [dB/km]	0.25	Débit nominal [Mbit/s]	2488
Dispersion chromatique [ps/nm/km]	20	Puiss. Max Emission [dBm]	15
Nombre d'épissures	30	Puiss. garantie [dBm]	10
Pertes par épissure [dB]	0.05	Distance liaison [km]	120
		Seuil de réception [dBm]	-29
		Puiss. Max réception [dBm]	-9
		Dispersion Max. admissible [ps/nm]	3000
		Pertes des connecteurs [dB]	2
RESULTATS			
Atténuation totale [dB]		Largeur spectrale du laser [nm]	
Puissance Max reçue [dBm]		Bande optique occupée [MHz]	
Marge de fonctionnement [dB]		Fréquence de coupure [MHz]	
Marge de sécurité [dB]		Puissance minimale reçue [dB]	

OK GRAPHES NOUVEAU RETOUR QUITTER

Figure 3. 2 Fenêtre de données et de résultat

En cliquant sur le bouton 'ok', on obtient le résultat du bilan de liaisons.

DONNEES FIBRE		DONNEES EQUIPEMENTS	
Atténuation linéique [dB/km]	0.25	Débit nominal [Mbit/s]	2488
Dispersion chromatique [ps/nm/km]	20	Puiss. Max Emission [dBm]	15
Nombre d'épissures	30	Puiss. garantie [dBm]	10
Pertes par épissure [dB]	0.05	Distance liaison [km]	120
		Seuil de réception [dBm]	-29
		Puiss. Max réception [dBm]	-9
		Dispersion Max. admissible [ps/nm]	3000
		Pertes des connecteurs [dB]	2
RESULTATS			
Atténuation totale [dB]	34.1766	Largeur spectrale du laser [nm]	0.033494
Puissance Max reçue [dBm]	-19.1766	Bande optique occupée [MHz]	2160.3979
Marge de fonctionnement [dB]	4.8234	Fréquence de coupure [MHz]	5473.6
Marge de sécurité [dB]	10.1766	Puissance minimale reçue [dB]	-24.1766
OK GRAPHES NOUVEAU RETOUR QUITTER			

Figure 3. 3 Résultat du calcul

III.2.1.2 Programme correspondant à ce calcul

```
%clc
%clear
%clf
%données à saisir
%distance en km
h=findobj(gcf,'tag','distanceliaison');
d=get(h,'string');
d=str2num(d)
%atténuation linéaire en dB
h=findobj(gcf,'tag','attelin');
al=get(h,'string');
al=str2num(al)
%dispersion chromatique en ps/nm/km
h=findobj(gcf,'tag','disperchrom');
dispchro=get(h,'string');
dispchro=str2num(dispchro)
%nombre de d'épissures
h=findobj(gcf,'tag','épissures');
```

```

Nbredepi=get(h,'string');
Nbredepi=str2num(Nbredepi)
%perte par épissure en dB
h=findobj(gcf,'tag','perteparépissure');
pertedepi=get(h,'string');
pertedepi=str2num(pertedepi)
% débit nominal en Mbit/s
h=findobj(gcf,'tag','débitnominal');
debitnom=get(h,'string');
debitnom=str2num(debitnom)
%puissance maximale d'émission en DBm
h=findobj(gcf,'tag','puissancemax');
puimaxemi=get(h,'string');
puimaxemi=str2num(puimaxemi)
%puissance garantie en dBm
h=findobj(gcf,'tag','puissancegarantie');
puisgarantie=get(h,'string');
puisgarantie=str2num(puisgarantie)
seuiderecep=-29; %seuil de réception en dBm
h=findobj(gcf,'tag','seuileréception');
seuiderecep=get(h,'string');
seuiderecep=str2num(seuiderecep)
%puissance maximale de réception en dBm
h=findobj(gcf,'tag','pissancemaxréception');
puismaxrec=get(h,'string');
puismaxrec=str2num(puismaxrec)
%dispersion maximale admissible en ps/nm
h=findobj(gcf,'tag','dispersionmaxadmissible');
dispmaxadm=get(h,'string');
dispmaxadm=str2num(dispmaxadm)
%perte des connecteurs en dB
h=findobj(gcf,'tag','pertesdesconnecteurs');

```

```

perteconnecteur=get(h,'string');
perteconnecteur=str2num(perteconnecteur)
%calcul
durebit=1./(debitnom*10^6);
largeurspect=al.*(durebit/(dispmaxadm.*10.^(-12)));%largeur spectrale
afibre=al.*d;%atténuation du fibre
aepisure=pertedeipi.*Nbredeipi;%atténuation d'epissure
dispchrom1=dispchro.*10.^-12.*largeurspect.*d;%dispersion chromatique
tauxelarg=dispchrom1./durebit;%taux d'élargissement
bandeelecoccupe=0.614.*debitnom.*10^6;%bande électrique occupée
bandeoptoccupe=bandeelecoccupe.*(sqrt(2));%bande optique occupée
freqcoup=0.44./dispchrom1;%fréquence de coupure
%résultat à afficher
durebitps=durebit.*10.^12;%durée du bit par seconde
largeurspectnm=largeurspect;
h=findobj(gcf,'tag','largeurspectrale');
largeurspectnm=num2str(largeurspectnm);
set(h,'string',largeurspectnm)
afibre;
aepisure;
dispchrom1ps=dispchrom1.*10.^12;
tauxelarg;
bandeelecoccupeMHz=bandeelecoccupe./10.^6;
h=findobj(gcf,'tag','atténuationtotale');
bandeelecoccupeMHz=num2str(bandeelecoccupeMHz);
set(h,'string',bandeelecoccupeMHz)
bandeoptoccupeMHz=bandeoptoccupe./10.^6;
bandeoptoccupeMHz=num2str(bandeoptoccupeMHz);
freqcoupMHz=freqcoup/10^6;
h=findobj(gcf,'tag','fréquencecoupure');
freqcoupMHz=num2str(freqcoupMHz);
set(h,'string',freqcoupMHz)

```

```

achro=10.*log10(exp((bandeoptocupe./freqcoup).^2));
atot1=afibre+aepisure;
atot2=achro+perteconnecteur;
atot=atot1+atot2;
h=findobj(gcf,'tag','atténuationtotale');
set(h,'string',atot)
puis=puisgarantie+(-atot)
h=findobj(gcf,'tag','puisminrecu');
pui=num2str(puis);
set(h,'string',pui)
fonct1=puis-seuiderecep
f=findobj(gcf,'tag','margedefonctionnement');
fonct=num2str(fonct1);
set(f,'string',fonct)
puismaxrecu=puimaxemi-atot
h=findobj(gcf,'tag','puissancemaxreque');
puismaxr=num2str(puismaxrecu);
set(h,'string',puismaxr)
securite1=((puismaxrec-puismaxrecu))
f=findobj(gcf,'tag','margedesécurité');
securite=num2str(securite1);
set(f,'string',securite)

```

Sur ce résultat, on peut remarquer que la puissance minimale reçue est supérieure au seuil de réception avec une marge de fonctionnement égale à 5,2 dB.

III.2.1.3 Programme donnant les courbes de dispersion et atténuation chromatique

```

%tracé de courbe du dispersion et atténuation chromatique
deltaL=0:0.0001:0.1;
Dlambda=dispchro*10^-12;
di=d;
dispchrom2=Dlambda.*deltaL.*di./10^-12;
sigma=debitnom*10^6;

```

```

ax1=plot(deltaL,dispchrom2,'b');
ax1=gca
Ylabel('Dispersion chromatique (ps)','FontSize',12)
axis([0 0.1 0 400])
AC=10.*log10(exp((0.614.*sigma.*sqrt(2).*Dlamba.*deltaL.*di./0.44).^2));
ax2 = axes('Position',get(ax1,'Position'),...
'XAxisLocation','bottom',...
'YAxisLocation','right',...
'Color','none',...
'XColor','k','YColor','k');
hold on
ax2=plot(deltaL,AC,'r')
axis([0 0.1 0 6])
grid on
Xlabel('Largeur de la source laser (nm)','FontSize',12)
Ylabel('Attenuation chromatique (dB)','FontSize',12)

```

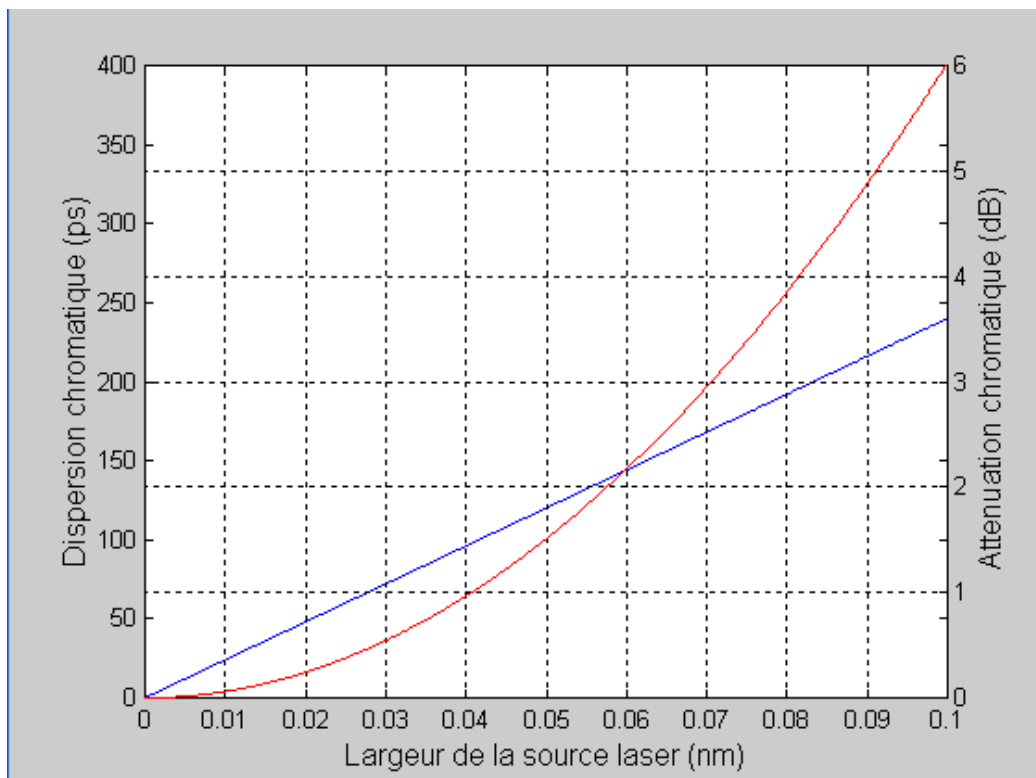


Figure 3. 4 Evolution de la dispersion et de l'atténuation chromatique

On remarque que l'atténuation et la dispersion chromatique croît avec la largeur spectrale du laser. D'où, pour avoir une faible atténuation, il faut utiliser comme émetteur les lasers de faible largeur spectrale.

III.2.2 Partie comparaison avec un autre support de transmission

Cette partie du logiciel a pour but de démontrer la fiabilité d'une liaison par fibre optique en visualisant l'allure du signal reçu si on utilise la fibre et celle du signal reçu en utilisant un câble coaxial comme support de transmission.

Pour entrer dans cette étude à partir de la fenêtre d'accueil principale, on clique sur le bouton '**comparaison**'. Une seconde fenêtre contenant quelques informations sur le logiciel apparaît lorsqu'on clique sur le bouton '**continuer**'

Pour effectuer la comparaison proprement dite, on clique sur le bouton 'continuer'

Une fenêtre permettant de générer le signal à émettre est alors présentée à l'écran. On est invité à introduire trois paramètres :

- Niveau du signal à émettre appelé aussi amplitude (en volt) ;
- Les bits représentant le message binaire (en octet) ;
- La fréquence de répétition.

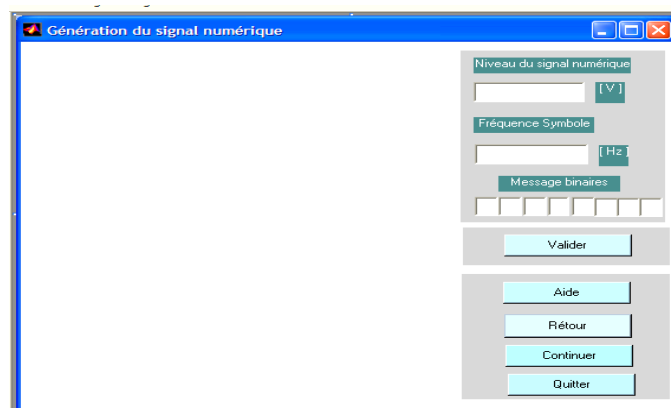


Figure 3. 5 Fenêtre pour générer le signal

En validant ces paramètres, on a la forme du signal à émettre.

Un clic sur le bouton « Continuer » accède à une fenêtre où on introduit la longueur de la liaison et le rapport signal sur bruit.

En validant ces paramètres, on a les allures du signal reçu en utilisant la fibre optique et le câble coaxial.

On doit filtrer le signal reçu pour minimiser la probabilité d'erreur et atténuer les puissances de bruit.

Remarque :

Le rapport signal sur bruit doit être supérieur à 12 dB pour pouvoir reconstituer les séquences binaires avec un minimum de taux d'erreur.

III.2.2.1 Exemple d'application

On veut émettre le message binaire '10101101' avec une amplitude de 5 V et une fréquence de répétition de 50 Hz.

L'allure du signal à émettre est donnée sur la figure ci- dessous

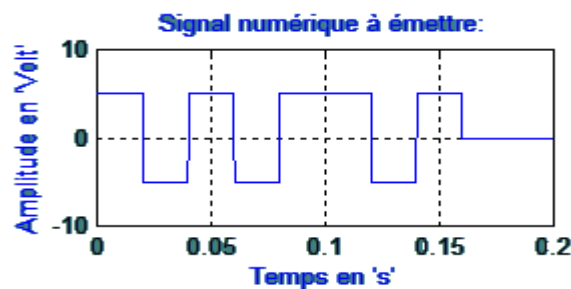


Figure 3. 6 Signal numérique à émettre

Programme générant le signal à envoyer

```
%Saisi des paramètres utilisés
%amplitude%
h=findobj(gcf,'tag','amplitude');
A=get(h,'string')
%Fréquence%
h0=findobj(gcf,'tag','frequence');
fs=get(h0,'string')
%bit1
h=findobj(gcf,'tag','msg1');
a=get(h,'string');
%bit2
h=findobj(gcf,'tag','msg2');
b=get(h,'string');
```

```

%bit3
h=findobj(gcf,'tag','msg3');
c=get(h,'string');
%bit4
h=findobj(gcf,'tag','msg4');
d=get(h,'string');
%bit5
h=findobj(gcf,'tag','msg5');
e=get(h,'string');
%bit6
h=findobj(gcf,'tag','msg6');
m=get(h,'string');
%bit7
h=findobj(gcf,'tag','msg7');
g=get(h,'string');
%bit8
h=findobj(gcf,'tag','msg8');
i=get(h,'string');
%Verification des paramètres
if isempty(A),
    errordlg('Il n'y a aucune valeur pour l'amplitude de la forme d'onde!','ERREUR!');
elseif isempty(fs),
    errordlg('Il n'y a aucune valeur pour la fréquence symbole!','ERREUR!');
elseif
isempty(a)|isempty(b)|isempty(c)|isempty(d)|isempty(e)|isempty(m)|isempty(g)|isempty(i),
    errordlg('Nombre des bits insuffisants','ERREUR!');
else
%tous les paramètres sont complets
    fs=str2num(fs);
    A=str2num(A);
    s1;s2;s3;s4;s5;s6;s7;s8;
    %Valeur limite
    if A>15|fs>5000,
        errofs;

```

```

elseif A<5|fs<5,
    errofs1
elseif
    abs(a)>1|abs(b)>1|abs(c)>1|abs(d)>1|abs(e)>1|abs(m)>1|abs(g)>1|abs(i)>1,
    errorldg('Le message numerique ne doit pas contenir que des zéros et
un!','ERREUR!','on');
else
%Chronogramme
t=[0:1/(100*fs):10/fs];
x=c1*rectpuls(t-0.5/fs,1/fs)+c2*rectpuls(t-1.5/fs,1/fs)+c3*rectpuls(t-2.5/fs,1/fs);
y=c4*rectpuls(t-3.5/fs,1/fs)+c5*rectpuls(t-4.5/fs,1/fs)+c6*rectpuls(t-5.5/fs,1/fs);
z=c7*rectpuls(t-6.5/fs,1/fs)+c8*rectpuls(t-7.5/fs,1/fs)+0*rectpuls(t-5.5/fs,1/fs);
wf=x+y+z;
subplot('Position',[0.1523140495867769 0.6732334047109208 0.4146005509641874
0.2441113490364026]), ...
plot(t,wf,'b');grid;
axis([0 10/fs -A-5 A+5]);
xlabel('Temps en "s"', 'color','b');
ylabel('Amplitude en "Volt"', 'color','b');
title('Signal numérique à émettre:', 'color','b');
%DSP
If=[0:1:1.5*fs];
G=A^2.*(1/fs).*(sinc(f/fs)).^2;G1=20*log10(G);
subplot('Position',[0.1523140495867769 0.09840246406570843 0.4146005509641874
0.2532854209445585]), ...
plot(f,G,'m'); grid;
xlabel('Fréquence [Hz]', 'color','m');
ylabel('DSP', 'color','m');
Title(['DSP du signal signal numérique avec une fréquence =',num2str(fs),'Hz'], 'color','m');
end
end

```

Pour la suite, on a pris pour valeur de la longueur de la liaison 1000 m et le rapport signal sur bruit 20 dB.

III.2.2.2 Visualisation du signal reçu

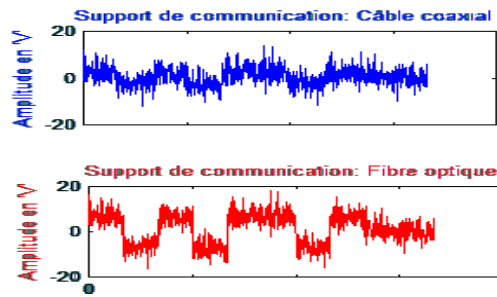


Figure 3. 7 Signal reçu avant le filtrage

Après filtrage on a :

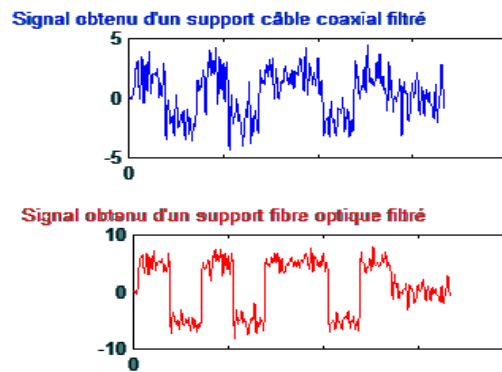


Figure 3. 8 Signal reçu après filtrage

Programme pour le filtrage du signal reçu

```
if isempty(G)|isempty(A)      %Test d'existence des paramètres
    error('Donnée(s) insuffisante(s)', 'ATTENTION!');
else
    sg1=G*(br+(ns1_conv/A)*wf);
    sg2=G*(br+(ns2_conv/A)*wf);
    sg3=G*(br+(ns3_conv/A)*wf);
    fe=5*fs;r=0.5;dl=3;
    filtre=rcosine(fs,fe,'sqrt',r,dl);
    sf1=filter(filtre,3,sg1);
    sf2=filter(filtre,3,sg2);
    sf3=filter(filtre,3,sg3);
    filtad='en cosinus surélevé';
    trace;
end
```

On remarquera que les informations reçues avec la fibre optique comme support de transmission sont mieux restituées par rapport à celles émises dans le câble coaxial. D'où la performance de la fibre optique est démontrée.

En résumé, la simulation s'est divisée en deux parties. Premièrement on a établi un logiciel permettant d'effectuer les calculs nécessaires dans le bilan des liaisons par fibres optiques. On peut dire qu'avec les résultats ainsi obtenus, on pourra envisager une utilisation optimale des fibres optiques. Deuxièmement, on a comparé un signal transmis par fibres optiques à celui transmis par câble coaxial en utilisant toujours des programmes écrits sous Matlab.

On a pu démontrer que l'utilisation des fibres optiques dans le système de transmission numérique permet de réduire considérablement la dégradation du signal émis, dégradation due aux bruits et aux affaiblissements linéiques des supports physiques de communication.

Ainsi, on a prouvé l'importance des fibres optiques dans le domaine de la télécommunication.

CONCLUSION

Le type de propagation des fibres optiques repose sur le principe de la réflexion totale. Les rayons lumineux qui se propagent le long du cœur de la fibre heurtent sa surface avec un angle d'incidence supérieur à l'angle critique. La totalité de la lumière est alors réfléchiée dans la fibre. En se référant à la simulation que nous avons effectuée, on peut déduire que les pertes de lumière entre les deux extrémités de la fibre ne sont pas considérables vis-à-vis des autres types de câble. Toutefois, pour le fonctionnement optimal d'un tel système, il est nécessaire de considérer ces différents types d'atténuation qui surviennent à l'intérieur de ce type de support. Ces pertes de lumière peuvent être principalement liées à l'absorption due aux impuretés sises à la surface de la fibre optique, au raccordement entre fibre ainsi qu'à la courbure et à la microcourbure. Par conséquent, ces pertes peuvent causer les affaiblissements du signal utile. Par ailleurs, la dispersion est également un facteur d'affaiblissement. En effet, elle entraîne l'étalement de délai de transfert d'information. Une description détaillée de tous les composants présents dans une liaison par fibre optique a été réalisée. Le rôle de l'interface d'émission est de convertir le signal électrique en signal optique. Cette fonction est assurée par la diode laser ou la diode électroluminescente. Pour la réception optique, deux composants sont envisageables tels que la photodiode à avalanche et la photodiode PIN. Des techniques de multiplexage ont été abordées pour profiter des capacités de la fibre optique et donc d'augmenter le transfert d'informations sur un même canal. Le bilan de liaison est l'outil de quantification des atténuations dans les fibres en vue de définir les marges requises ; de choisir les types de diode à utiliser à l'émission et à la réception ainsi que du type de fibre à utiliser suivant la qualité des services requise.

Les avantages que présente la transmission de signaux par fibres optiques sont nombreux. A part une faible atténuation du signal, elle est caractérisée par un gros débit de manière à ce qu'il est possible de multiplexer plusieurs signaux et de les envoyer simultanément. En outre, grâce à cette liaison, on a un système sécurisé électriquement et magnétiquement du fait que les terminaux sont isolés entre eux et les signaux sont carrément sensibles aux parasites externes. Toutefois, l'implémentation d'une telle liaison nécessite beaucoup de minuties et d'analyses du profil des milieux pour minimiser toute sorte de pertes.

L'avènement des fibres optiques apportera un grand changement sur les systèmes de télécommunications dans notre pays. Il servira surtout de porte d'entrée pour tout type de technologie de haut débit comme le NGN, les réseaux intelligents ou encore la 3^{ème} génération des mobiles.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Caractéristiques de quelques fibres optiques monomodes

Norme UIT-T		G. 652	G. 653	G. 655
Propriétés géométriques	Diamètre coeur (μm)	9	9	9
	Diamètre fibre (μm)	125	125	125
Propriétés optiques (à 1550 μm)	Atténuation (dB/km)	0,25	0,25	0,25
	Dispersion chromatique (ps/nm/km)	17	0	0,07
	Coefficient de non-linéarité (W/m^2)	$2,7 \cdot 10^{-20}$	$2,7 \cdot 10^{-20}$	$2,7 \cdot 10^{-20}$

ANNEXE 2 : LE FDDI

Le concept FDDI (Fiber Distributed Data Interface) définit un réseau local ou métropolitain performant , pouvant véhiculer des données à haut débit (100 Mbit/s) avec une administration de réseau intégré. FDDI est défini comme un réseau local et semble aujourd'hui la principale solution adaptée à la demande d'interconnexion de réseaux locaux dans un contexte de réseau fédérateur. Les constructeurs offrent déjà des solutions d'interconnexion de type Ethernet et Token-Ring au travers de réseaux FDDI. En résumé, FDDI est une technologie de réseau local pouvant supporter la notion de réseau intégrateur de type réseau métropolitain.

Les principales caractéristiques techniques de FDDI sont :

- Un débit important (100 Mbit/s) ;
- Une méthode d'accès de type jeton temporisé sur boucle ;
- Un support destiné à véhiculer des données informatiques ;
- Une architecture fédératrice de réseaux par l'utilisation de routeurs et de ponts ;
- Une architecture à double anneau.

L'architecture FDDI permet de gérer des débits pouvant atteindre 200 Mbit/s avec un mécanisme de reconfiguration automatique, à 100 Mbit/s, en cas de rupture d'un anneau. Le module de gestion intégré au réseau, SMT (Station Management), fait de FDDI le réseau local standardisé (ISO 9314) le plus performant.

Les réseaux FDDI permettent de répondre à la demande croissante de transmissions de données informatiques à haut débit, nécessaires aux applications d'aujourd'hui (interconnexion, imagerie, applications réparties, etc.). Les solutions FDDI d'interconnexion de réseaux locaux conservent la structure existante et s'adaptent bien aux réseaux Ethernet et Token-Ring des utilisateurs. Cette orientation permet aux utilisateurs de conserver leurs investissements initiaux et d'installer progressivement des réseaux « backbone » FDDI intégrant les réseaux locaux existants.

ANNEXE 3 : Programme donnant la fenêtre d'accueil

```
function fig = simulation()
close all
clc
load simulation

h0 = figure('Units','points', ...
    'Color',[0.482352941176471 0.768627450980392 0.756862745098039], ...
    'Colormap',mat0, ...
    'FileName','D:\Simulat\debut1\simulation.m', ...
    'MenuBar','none', ...
    'Name','FENETRE D"ACCUEIL', ...
    'NumberTitle','off', ...
    'PaperPosition',[18 180 576 432], ...
    'PaperUnits','points', ...
    'Position',[173.25 164.25 420 315], ...
    'Tag','Fig1', ...
    'ToolBar','none');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.505882352941176 0.752941176470588 0.752941176470588], ...
    'ForegroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[41.25 7.5 128.25 85.5], ...
    'Style','frame', ...
    'Tag','Frame2');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.517647058823529 0.756862745098039 0.756862745098039], ...
    'Callback','sr1', ...
    'FontSize',12, ...
```

```

'ListboxTop',0, ...
'Position',[57 18.75 96.75 21.75], ...
'String','Comparaison', ...
'Style','radiobutton', ...
'Tag','radio1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[0.494117647058824 0.745098039215686 0.745098039215686], ...
'Callback','sr2', ...
'FontSize',12, ...
'ListboxTop',0, ...
'Position',[56.25 45.75 96 21.75], ...
'String','Bilan des liaisons', ...
'Style','radiobutton', ...
'Tag','Radio2');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[0.796078431372549 0.901960784313726 0.980392156862745], ...
'Callback','close(gcf)', ...
'FontSize',12, ...
'ListboxTop',0, ...
'Position',[313.5 8.25 85.5 32.25], ...
'String','Fermer', ...
'Tag','Pushbutton3');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[0.454901960784314 0.780392156862745 0.7607843137254901], ...
'FontSize',10, ...
'FontWeight','demi', ...
'ListboxTop',0, ...
'Position',[47.25 271.5 309.75 30], ...
'String','ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO', ...

```

```

        'Style','text', ...
        'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0 0 0], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[148.5 264.75 114 1.5], ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText2');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.509803921568627 0.780392156862745 0.8], ...
    'FontSize',10, ...
    'FontWeight','demi', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[47.25 246.75 309.75 13.5], ...
    'String','Département Télécommunications', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.470588235294118 0.737254901960784 0.737254901960784], ...
    'ForegroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[40.5 162 357.75 69], ...
    'Style','frame', ...
    'Tag','Frame1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.450980392156863 0.725490196078431 0.725490196078431], ...
    'FontSize',20, ...
    'FontWeight','demi', ...

```

```

'ListboxTop',0, ...
'Position',[60.75 183 309.75 25.5], ...
'String','LIAISONS PAR FIBRES OPTIQUES', ...
'Style','text', ...
'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[0.529411764705882 0.7607843137254901 0.7607843137254901], ...
'FontSize',10, ...
'ListboxTop',0, ...
'Position',[48 125.25 102.75 15.75], ...
'String','Présentée par : ', ...
'Style','text', ...
'Tag','StaticText3');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[0.52156862745098 0.7607843137254901 0.7607843137254901], ...
'FontSize',10, ...
'FontWeight','demi', ...
'ListboxTop',0, ...
'Position',[147 125.25 222 15.75], ...
'String','Mlle RASOLOFOARINALA Miandrisoa', ...
'Style','text', ...
'Tag','StaticText4');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[0.529411764705882 0.7607843137254901 0.7607843137254901], ...
'FontSize',10, ...
'ListboxTop',0, ...
'Position',[54.75 101.25 102.75 15.75], ...
'String','Dirigée par : ', ...
'Style','text', ...

```

```

    'Tag','StaticText3');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.486274509803922 0.745098039215686 0.745098039215686], ...
    'FontSize',10, ...
    'FontWeight','demi', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[152.25 99.75 176.25 15.75], ...
    'String','Mr. RANDRIANTSIRESY Ernest', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText4');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.796078431372549 0.901960784313726 0.980392156862745], ...
    'Callback','quest', ...
    'FontSize',12, ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[205.5 7.5 85.5 32.25], ...
    'String','Continuer', ...
    'Tag','Pushbutton3');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.505882352941176 0.752941176470588 0.752941176470588], ...
    'FontSize',12, ...
    'FontWeight','demi', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[44.25 69 69 18], ...
    'String','Choisir :', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText5');
if nargout > 0, fig = h0; end

```

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Lecoy : *Télécommunications optiques* : Hermes : Paris, 1992
- [2] S. Ungar : *Fibres optiques, Théorie et applications* : Dunod : Paris, 1989
- [3] Y. Suematsu, K-I. Iga : *Transmission sur fibres optiques* : Masson : Paris, 1996
- [4] S. Rakotomiraho, *Optoélectronique*, Cours 5^e Année, Dép. Tél.- ESPA, A.U. : 2003-2004
- [5] [http:// www.rez-metz.es-metz.fr/pages_perso/el_1996/beccaer/Rapport_Fibres.html](http://www.rez-metz.es-metz.fr/pages_perso/el_1996/beccaer/Rapport_Fibres.html)
- [6] C. Vassalo: *Fibres optiques pour les Télécommunications* : Techniques de l'Ingénieur, Traité Électronique, E 7 370, 1990
- [7] I. Joindot and M. Joindot : *Les Télécommunications par Fibre Optique*. Collection Technique et Scientifique des Télécommunication. Dunod : Paris, 1996
- [8] http://www.com.fr/elau/polycop/images/Transmission_fibre_optique.pdf
- [9] P.E. Green.: *Fiber Optic Networks* : Prentice-Hall, 1993
- [10] www.htr.tlse.fr/pedagogie/cours/fibre/fotheori.htm
- [11] <http://www.unige.ch/seinf/jfl/fibri/welcome.html>
- [12] G. Barué : *Télécommunications et Infrastructure*, Ellipse : Paris 2003
- [13] <http://stielec.ac-aix-marseille.fr/cours/abati/opto.htm>
- [14] Z. Toffano : *Optoélectronique* : Ellipses : France , 2001
- [15] P.G. Fontollet: *Systèmes de Télécommunications volume XVIII* : Presse Polytechniques et universitaire Romandes : 1983
- [16] http://www.univ-rouen.fr/sciences/iupgii/compa_opt.pdf
- [17] http://www.cem2.univ-montp2.fr/-moreau/cours/Télécom_Optiques.pdf
- [18] R. Bouillie, D. Hui Bon Moa : *Systèmes de transmission numérique sur fibres optiques* : Techniques de l'Ingénieur, Traité Électronique, E 7 440, 1990
- [19] D. C. O'Shea, W.R. Callen : *Introduction aux lasers* : Eyrolles : Paris, 1980
- [20] M. Mokhtari : « *MATLAB 5.2 & 5.3 et SIMULINK 2 & 3* » : ISBN , 2000
- [21] K. Petermann. : *Laser Modulation and Noise* : Kluwer Academic Publishers, 1989

Nom : RASOLOFOARINALA

Prénoms: Miandrisoa

Adresse de l'auteur : Lot 08 A 5 Ambohipierenana

306 Ambositra

Madagascar

Tél : 033.05.101.63

E-mail rasolofoarinala @yahoo.com

Titre de mémoire : LIAISONS PAR FIBRES OPTIQUES

Nombre de pages : 73

Nombre de tableaux : 03

Nombre de figures : 42

Mots clés :

- Liaison ;
- Optique ;
- Optoélectronique ;
- Fibre ;
- Laser ;
- LED ;
- Photodiode ;
- Matlab.

Directeur de mémoire : RANDRIANTSIRESY Ernest

Résumé :

Ce mémoire nous présente les notions de base sur les liaisons par fibres optiques. Dans un premier temps, on définit de manière générale une fibre optique avec les différents types de fibres existantes.

Par la suite, on décrit certains composants de l'infrastructure d'une telle liaison avant d'effectuer un calcul de bilan de liaison. Et ceci, pour pouvoir en déduire les prévisions correspondantes en vue d'optimiser le système tout entier.

Abstract :

Basically, this memory presents notions on the links by optical fibers. Firstly, we define what is generally an optical fiber. Afterwards, we enumerate the different types of existing fibers.

In a second time, we describe some components of the infrastructure of such a link before doing the calculation of the link balance in order to be able to deduct the corresponding forecastings so that we could optimize the whole system.