

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	i
NOTATIONS.....	vi
LISTE DES ABREVIATIONS	viii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA FIBRE OPTIQUE.....	3
1.1. Les supports de transmission	3
1.1.1. Câble bifiliaire	4
1.1.2. Câble coaxial.....	4
1.1.3. Fibre optique	5
1.1.4. Espace libre.....	5
1.1.4.1. Faisceau hertzien.....	5
1.1.4.2. Transmission par satellite.....	5
1.2. Transmission par fibre optique.....	5
1.2.1. Historique	5
1.2.2. Avantages de la fibre optique	7
1.2.3. Domaines d'utilisation des fibres optiques.....	8
1.2.4. Description de la fibre optique	10
1.2.5. Propagation de la lumière.....	10
1.2.5.1. Spectre de la lumière	10
1.2.5.2. La réflexion et la réfraction	11
1.2.6. <i>Angle limite et condition de guidage</i>	13
1.2.7. <i>Propagation de la lumière dans la fibre optique</i>	14
1.2.8. <i>Angle d'acceptance et Ouverture numérique</i>	15
1.2.9. <i>Angle critique</i>	17
1.2.10. <i>Différence relative d'indice</i>	17
1.2.11. <i>Fréquence normalisée</i>	18
1.3. Conclusion	18

CHAPITRE 2 : DIFFERENTS TYPES DE FIBRES OPTIQUES	19
2.1. Notion de mode de propagation	19
2.2. Fibre multimode	19
2.2.1. Fibre à saut d'indice.....	20
2.2.1.1. Profil d'indice	20
2.2.1.2. Caractéristiques.....	20
2.2.1.3. Modes	21
2.2.2. Fibre à gradient d'indice	22
2.2.2.1. Profil d'indice	22
2.2.2.2. Exemples	22
2.2.2.3. Ouverture numérique	23
2.2.2.4. Caractéristiques	23
2.2.2.5. Modes	24
2.3. Du multimode au monomode	24
2.4. Fibre multimode.....	25
2.4.1. Condition de monomodalité d'une fibre optique.....	25
2.4.1.1. Longeur d'onde critique de coupure	25
2.4.1.2. Profil d'indice d'une fibre monomode.....	26
2.4.2. Diamètre de mode d'une fibre monomode.....	27
2.4.2.1. Définition du diamètre de mode.....	27
2.4.2.2. Valeur du diamètre de mode	28
2.4.2.3. Facteur de confinement	29
2.5. Bilan général des différentes fibres.....	30
2.6. Conclusion	30

CHAPITRE 3 : ATTENUATION ET PARAMETRES DE TRANSMISSION DES FIBRES OPTIQUES	31
3.1. Atténuation	31
3.1.1. Introduction.....	31

3.1.2. Définition.....	31
3.1.3. Calcul de l'atténuation linéique	31
3.1.4. Exemple.....	33
3.2. Causes de l'atténuation.....	33
3.2.1. <i>Pertes ou diffusion de Rayleigh</i>	34
3.2.1.1. Principe par diffusion	34
3.2.1.2. Relation entre les pertes de Rayleigh et la longeur d'onde.....	34
3.2.2. <i>Pertes par absorption</i>	35
3.2.2.1. Absorption par l'eau	35
3.2.2.2. Absorption par les métaux	36
3.2.2.3. Conséquence sur la courbe d'atténuation	36
3.2.3. <i>Pertes aux courbes</i>	36
3.2.4. <i>Pertes aux raccordements</i>	37
3.2.4.1. Pertes dues à l'espacement	37
3.2.4.2. Pertes dues aux dimensions différentes de la fibre.....	38
3.2.4.3. Pertes dues à un désalignement.....	39
3.3. Dispersion de la lumière dans les fibres optiques	39
3.3.1. <i>Dispersion temporelle</i>	40
3.3.2. <i>Dispersion modale</i>	40
3.3.2.1. Cas d'une fibre à saut d'indice	41
3.3.2.2. Cas d'une fibre à gradient d'indice	41
3.3.3. <i>Dispersion chromatique</i>	42
3.4. Fenêtre de transmission.....	42
3.5. Elements d'un système de transmission sur fibre optique.....	43
3.6. Interface optique d'émission	45
3.6.1. <i>La diode électroluminescente</i>	45
3.6.1.1. Principe de l'émission de la lumière dans un semi-conducteur	45
3.6.1.2. Principe des diodes DEL	46
3.6.2. <i>Diode Laser</i>	46

3.6.2.1. Caractéristiques des diodes Laser	47
3.6.2.2. Structure de base	47
3.7. Interface optique de réception	47
3.7.1. <i>Photodiode PIN</i>	49
3.7.2. <i>Photodiode à avalanche</i>	49
3.8. Les répéteurs ou amplificateurs optiques	50
3.8.1. <i>Définition et principe des amplificateurs optiques</i>	50
3.8.2. <i>Différents types d' amplificateurs optiques</i>	51
3.8.2.1. Amplificateur à fibre dopée	51
3.8.2.2. Amplificateur Raman	52
3.8.2.3. Amplificateur à semi-conducteur	52
3.9. Techniques d'accès.....	53
3.9.1. <i>WDM</i>	53
3.9.1.1. Multiplexage	53
3.9.1.2. FDM	54
3.9.1.3. TDM	56
3.9.2. <i>Principe de WDM</i>	56
3.9.3. <i>Principe d'une liaison WDM/DWDM</i>	57
3.10. Conclusion	58

CHAPITRE 4 : SIMULATION SOUS MATLAB DE L'OPTIMISATION DES REGENERATIONS DU	
SIGNAL DANS LA FIBRE OPTIQUE.....	59
4.1. Problématique	59
4.2. Solution optimale.....	59
4.3. Bilan énergétique d'une liaison à fibre optique.....	61
4.3.1. <i>Principe</i>	61
4.3.2. Exemple de calcul.....	61
4.4. Présentation du programme de simulation.....	62
4.4.1. <i>Logiciel MATLAB</i>	62

4.4.2. Présentation du programme de simulation	63
4.4.3. Partie calcul des pertes par connexion	63
4.4.4. Partie calcul du bilan énergétique d'une liaison à fibre optique.....	65
4.5. Conclusion	68
CONCLUSION	69
ANNEXE 1 : Evolution de la technologie des systèmes à fibres optiques	70
ANNEXE 2 : Fabrication de la fibre optique.....	72
ANNEXE 3 : Code source de la simulation.....	74
BIBLIOGRAPHIE.....	83

NOTATIONS

α	Coefficient d'atténuation
Δ	Indice relative d'indice
ΔT_{max}	Délai modal
h	Constante de Planck $6,63 \cdot 10^{-34}$ [J.s]
ℓ	angle limite
λ_0	Longueur d'onde dans le vide
λ_c	Longueur d'onde critique ou longueur d'onde de coupure
n_0	Indice de réfraction de l'air
n_1	Indice de réfraction du cœur
n_2	Indice de réfraction de la gaine
R_{lim}	Rayon de courbure limite
θ_{0lim}	Angle d'acceptance
θ_1	Angle d'incidence dans le milieu d'indice n_1
θ_2	Angle de réfraction dans le milieu d'indice n_2
θ_c	Angle critique
$2\omega_0$	Diamètre de mode
x	Exposant du profil d'indice
a	Rayon du cœur
C	Vitesse de la lumière dans le vide

F	Facteur de confinement
L	Longueur de la fibre
N	Nombre de modes
ON	Ouverture Numérique
Pc	Puissance dans le cœur
Pg	Puissance dans la gaine
r	Distance par rapport à l'axe central de la fibre
V	Fréquence normalisée

LISTE DES ABREVIATIONS

dB	Décibel
μ m	Micromètre
ATM	Asynchronous Transfer Mode
ADSL	Asynchronous Digital Subscriber Line
AOFD	Amplificateur Optique à Fibre Dopée
DEL	Diode Electroluminescent
DEMUX	Démultiplexeur
DL	Diode Laser
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
FDM	Frequency Division Multiplexing
GaAs	Arséniure de Gallium
GHz	Gigahertz
IOE	Interface Optique d'Emission
IOR	Interface Optique de Réception
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MUX	Multiplexeur
nm	Nanomètre
PDA	Photodiode à Avalanche

ppm	Partie par million
STP	Shielded Twisted Pairs
TDM	Time Division Multiplexing
THz	Terahertz
UIT-T	Union International de Télécommunication et de la Télégraphe
UTP	Unshielded Twisted Pairs
WDM	Wavelength Division Multiplexing
ZCE	Zone de Charge d'Espace

INTRODUCTION

Depuis l'invention du laser en 1960, de nombreuses recherches ont été effectuées dans le domaine de la transmission optique des informations et c'est ainsi qu'est née l'optique intégrée. L'optique intégrée cherche à refaire avec une onde lumineuse ce qui a été avec une onde hertzienne. L'avantage des ondes lumineuses est que, grâce à leur fréquence élevée, on peut véhiculer une quantité considérable d'informations. L'atmosphère étant un milieu très perturbateur, il a fallu étudier et réaliser un milieu de propagation guidée. Ce milieu de transmission est la fibre optique. Un effort de recherche dans la technique des fibres a permis de réduire les pertes par absorption. De l'ordre de plusieurs centaines de décibels par kilomètre, l'absorption est arrivée aujourd'hui à des valeurs de 1 à 2 décibels. Quand on songe qu'une absorption à 2 décibels correspond à une réduction de l'intensité lumineuse de 50% seulement, on comprend pourquoi cette réussite a suscité un si grand intérêt pour les télécommunications optiques. Enfin existait un guide de lumière utilisable dans la pratique. Mais il ne s'agit pas de se contenter d'une simple liaison : il faut traiter directement le signal lumineux. A l'aide de microcircuits optiques comparables aux microcircuits de l'électronique, on peut effectuer sur les signaux des opérations de modulation, de commutation, de mélange. Enfin, les lasers semi-conducteurs pouvant osciller en continu à la température ambiante sont des sources idéales permettant d'intégrer sur un même substrat à la fois des fonctions optoélectroniques, optiques et électroniques.

Aujourd'hui, les réseaux ont une très grande importance dans notre utilisation quotidienne de l'informatique. Que ce soit pour le travail ou loisir, le réseau permet l'échange d'informations vitales dans notre société de communication actuelle. La course aux débits est le moteur d'une dynamique inaltérable. L'apparition de nouvelles technologies permettant des débits toujours plus élevés entraîne l'élaboration et la mise sur le marché d'applications toujours plus gourmandes en ressources. La fibre optique s'inscrit dans cette mouvance et apporte des améliorations considérables en termes de débits, mais pas uniquement. En effet, la fibre optique est plus fiable, plus performant et a un coût de revient moindre que les câbles cuivrés. Cependant, de nouveaux problèmes se posent, notamment en termes de connexion. En effet, on réalise bien qu'en montant un réseau de fibres optiques, il faut à un moment ou à un autre connecter des fibres entre elles ;

autant joindre parfaitement deux fibres est une tâche contraignante et minutieuse. Il est donc essentiel de minimiser les pertes car c'est aux connexions que le signal perd l'essentiel de sa puissance.

C'est dans cette mesure que nous avons retenu le thème « optimisation des régénérations du signal dans la fibre optique ». Par conséquent, le plan de ce mémoire sera composé de quatre chapitres.

Le premier chapitre aura comme rôle de présenter une vue d'ensemble de la généralité sur la fibre optique tout en définissant le mode de propagation dans la fibre, son domaine d'utilisation et ses avantages.

Le deuxième chapitre parlera des différents types de fibre optique tout en expliquant les caractères spécifiques, les points forts et les points faibles de chaque mode.

Le troisième chapitre sera consacré aux problèmes et paramètres de transmission des fibres optiques. Nous allons essayer d'exposer les obstacles de la fibre optique tout en définissant ses causes et ses impacts, tels que l'atténuation et les dispersions. Ensuite on parlera des éléments qui permettent de réaliser le système de transmission par fibre optique.

Enfin, le dernier chapitre exposera la simulation de l'optimisation des régénérations du signal dans la fibre optique. Nous allons voir dans cette partie la problématique fondamentale de ce mémoire, ainsi que la solution optimale.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA FIBRE OPTIQUE

1.1. Les supports de transmission [1] [2]

Avant l'apparition de la fibre optique, tous les réseaux de communication utilisaient d'autres supports de transmissions tels que les fils de cuivres ou les câbles coaxiaux.

Les supports de transmission sont utilisés pour transporter un signal depuis une entité émetteur jusqu'au récepteur. Lorsqu'il s'agit de transmettre des informations, plusieurs cas peuvent se présenter :

Il faut, soit effectuer une liaison point à point entre un émetteur et un récepteur (téléphonie), soit diffuser l'information à partir d'un émetteur vers plusieurs récepteurs (radiodiffusion ou télédiffusion). C'est en fonction du type de liaison, des contraintes économiques et matérielles, que s'effectuent le choix du media de transmission. Le media de transmission, auquel s'ajoutent les perturbations et déformations (bruits, diaphonie, distorsions...) de l'information, est appelé « canal ».

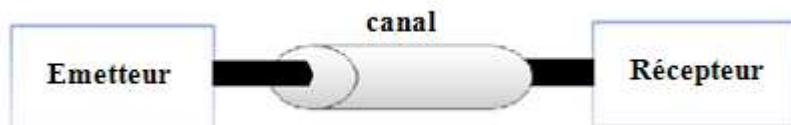


Figure 1.01 : Système de transmission

Le canal peut être :

- Un câble bifilaire
- Un câble coaxial
- Une fibre optique
- L'espace libre

Ces canaux sont souvent classifiés en « limités » ou « non limités ».

Dans les supports limités (câble coaxial, fibre optique, paire torsadée, ...) le signal est guidé par un conducteur physique tandis qu'il ne l'est pas dans les supports non limités (faisceaux hertziens, ondes radio, ...).

1.1.1. Câble bifilaire

Le support de transmission le plus simple est la paire symétrique torsadée (UTP : Unshielded Twisted Pairs). Il s'agit de deux conducteurs métalliques entremêlés (d'où le nom de paire torsadée). Le signal transmis correspond à la tension entre les deux fils. La paire peut se présenter emprisonnée dans une gaine blindée augmentant l'immunité contre les perturbations électromagnétiques (STP : Shielded Twisted Pairs).

Les deux avantages principaux de ce type de support sont :

- sa facilité d'installation
- son coût très bas

Par contre, les inconvénients sont assez nombreux :

- affaiblissement rapide
- sensibilité aux bruits
- faible largeur de bande
- faible débit.

En effet, sa bande passante est faible, il est en général réservé pour les transmissions à bas débit (inférieur à 2Mbit/s sur le réseau téléphonique).

Pour de faibles distances, ce support est relativement utilisé dans les réseaux locaux et raccordements téléphoniques.

1.1.2. Câble coaxial

Le câble coaxial constitue une amélioration de la paire torsadé. Ce support constitue deux conducteurs à symétrie cylindrique de même axe, l'un central, l'autre périphérique ; séparés par un isolant.

Par rapport au câble bifilaire, il possède une bande passante plus importante, et permet de réaliser des transmissions avec un débit relativement élevé de plusieurs centaines de Mbit/s (jusqu'à 565 Mbit/s sur le réseau téléphonique).

Le câble coaxial est notamment utilisé pour connecter les centraux téléphoniques entre lesquels transite un grand nombre de communications.

1.1.3. Fibre optique

Une fibre optique apparait aujourd’hui, grâce à sa bande passante très élevée et sa faible atténuation, comme un support très intéressant. Les fibres optiques sont de plus en plus utilisées pour :

- les réseaux terrestres à grande capacité (plusieurs Gbit/s, voire dans le futur, plusieurs dizaine de Gbit/s)
- les câbles sous-marins (où elles ont supplanté le câble coaxial)
- les réseaux de distribution (c'est-à-dire sur les liaisons entre centraux téléphoniques et abonnés).

1.1.4. Espace libre

L'espace libre utilise la propagation d'une onde électromagnétique dans l'atmosphère. Ce milieu est généralement réservé aux transmissions par satellite ou par faisceau hertzien ainsi qu'aux radiocommunications avec les mobiles.

1.1.4.1 Faisceau hertzien

Les ondes sont émises d'un relais à l'autre en ligne droite. La courbure de la Terre implique une distance maximum entre les relais (tours hertziennes).

1.1.4.2 Transmission par satellite

Le problème de la courbure de la Terre est résolu avec l'utilisation des satellites de télécommunication. Les satellites sont donc considérés comme fixe par rapport à la Terre. (Distance Terre-satellite : 36 000 km)

1.2. Transmission par fibre optique

1.2.1. Historique [3] [4] [5] [6]

La possibilité de transporter de la lumière le long de fines fibres de verre fut exploitée au cours de la première moitié du XX^e siècle. En 1927, Baird et Hansell tentèrent de mettre au point un dispositif pour le transport d'images de télévision à l'aide de fibres. Hansell put faire breveter son invention, mais elle ne fut jamais vraiment utilisée. Quelques années plus tard, soit en 1930, Heinrich Lamm réussit à transmettre l'image d'un filament de lampe grâce à un assemblage

rudimentaire de fibres de quartz. Cependant, il était encore difficile à cette époque de concevoir que ces fibres de verre puissent trouver une application.

La première application fructueuse de la fibre optique eut lieu au début des années 1950, lorsque le fibroscope flexible fut inventé par van Heel et Hopkins. Cet appareil permettait la transmission d'une image le long de fibres en verre. Il fut particulièrement utilisé en endoscopie, pour observer l'intérieur du corps humain, et pour inspecter des soudures dans les réacteurs d'avions. Malheureusement, la transmission ne pouvait pas être faite sur une grande distance étant donné la piètre qualité des fibres utilisées.

Les télécommunications par fibre optique ne furent pas possibles avant l'invention du laser en 1960. Le laser offrit en effet une occasion de transmettre un signal avec assez de puissance sur une grande distance. Dans sa publication de 1964, Charles Kao, des Standard Telecommunications Laboratories, décrivit un système de communication à longue distance à faible perte en mettant à profit l'utilisation conjointe du laser et de la fibre optique. Peu après, soit en 1966, il démontra expérimentalement, avec la collaboration de Georges Hockman, qu'il était possible de transporter de l'information sur une grande distance sous forme de lumière grâce à la fibre optique. Cette expérience est souvent considérée comme la première transmission de données par fibre optique.

Cependant, les pertes par absorption dans une fibre optique étaient telles que le signal disparaissait au bout de quelques centimètres, ce qui la rendait peu avantageuse par rapport au fil de cuivre traditionnel. Les trop grandes pertes encourues par un verre de mauvaise qualité constituaient le principal obstacle à l'utilisation courante de la fibre optique.

En 1970, trois scientifiques de la compagnie Corning Glass Works de New York, Robert Maurer, Peter Schultz et Donald Keck, produisirent la première fibre optique avec des pertes suffisamment faibles pour être utilisée dans les réseaux de télécommunications (20 décibels par kilomètre; aujourd'hui la fibre conventionnelle affiche des pertes de moins de 0,25 décibel par kilomètre). Leur fibre optique était en mesure de transporter 65 000 fois plus d'information qu'un simple câble de cuivre.

Le premier système de communication téléphonique optique fut installé au centre-ville de Chicago en 1977. On estime qu'aujourd'hui plus de 80 % des communications à longue distance sont

transportées le long de plus de 25 millions de kilomètres de câbles à fibres optiques partout dans le monde.

Bien avant l'invention du téléphone par Graham Bell (1876), les télécommunications utilisaient déjà la voie du fil électrique (télégraphe). Puis, grâce à Maxwell et Hertz, les informations ont emprunté la voie des airs. Finalement, dans les années 1970 est apparu le principe de la fibre optique : transmettre un signal lumineux à travers un milieu transparent. Le nombre de communications utilisées par les uns et par les autres faits que les supports traditionnels sont saturés. De plus, ils sont limités en fréquence pour des raisons technologiques. Il est donc nécessaire de développer un autre support de transmission : c'est la naissance de « la fibre optique ».

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.

En effet, une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété de conduire la lumière et sert dans les transmissions terrestres et océaniques de données. Elle offre un débit d'informations nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et supporte un réseau « large bande » par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques. Entourée d'une gaine protectrice, elle peut être utilisée pour conduire de la lumière entre deux lieux distants de plusieurs centaines, voire milliers, de kilomètres. Le signal lumineux codé par une variation d'intensité est capable de transmettre une grande quantité d'informations. En permettant les communications à très longue distance et à des débits jusqu'alors impossibles, les fibres optiques ont constitué l'un des éléments clef de la révolution des télécommunications optiques.

1.2.2. Avantages de la fibre optique [7] [8]

Ils sont nombreux. L'avantage décisif n'est pas toujours le même suivant l'utilisation envisagée. On peut classer ces avantages en :

- **Performance de transmission** : très faible atténuation, très large bande passante de l'ordre de 1GHz pour 1 Km qui permet le multiplexage sur un même support de très nombreux canaux

comme le téléphone, la télévision, etc. Elles permettent de systèmes de portée et de capacité très supérieures à celles des câbles conducteurs.

- **Avantages de mise en œuvre** : faible poids, très petite taille, grande souplesse, appréciables aussi bien en télécommunications que pour le câblage en aéronautique, informatique, médecine, production industrielle... La durée de vie de la fibre optique est presque le double de celle du satellite.
- **Sécurité électrique** : isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive, sous fortes tensions, en applications médicales et **électromagnétique** : la fibre n'est pas sensible aux parasites et n'en crée pas elle-même. On peut ajouter une inviolabilité presque totale.
- **Avantage économique** : contrairement à l'idée encore répandue, le coût globale d'un système sur fibres optiques est, dans de nombreux cas, inférieur à celui d'un système sur cuivre, notamment aux niveaux des raccordements, devient de moins en moins complexe et coûteuse.

1.2.3. Domaines d'utilisation des fibres optiques [1] [7] [9]

Le principal est bien entendu celui des télécommunications, mais les fibres optiques débordent largement ce secteur et connaissent un grand nombre d'applications industrielles :

- **Télécommunications** :

Les deux premiers grands domaines d'utilisation, liés aux besoins des réseaux, ont été les liaisons urbaines, de capacités considérables et fonctionnant sans amplification intermédiaire ni télé-alimentation, et les liaisons sous marines telles que les liaisons transocéaniques, ou les liaisons côtières sans répéteurs (ces derniers atteignent déjà 200 km, et bientôt 300 avec l'amplification optique). Plus récemment, et dans la perspective de la mise en place des réseaux ATM (Asynchronous Transfer Mode), les liaisons terrestres régionales, nationales et internationales connaissent un très fort développement.

Grâce au multiplexage qui consiste à envoyer en même temps plusieurs signaux portés par des longueurs d'onde différentes sur la même fibre, un seul câble de 144 fibres peut transmettre simultanément 40.000 conversations téléphoniques. Le débit est 250 fois plus fort que celui des fils de cuivre. Aux Etats Unis, quasiment tous les appels téléphoniques interurbains et 90% des

appels transcontinentaux passent par les installations à fibres optiques. Il y a dix ans, ce support n'en transportait que 10%.

- **Eclairage :**

Les fibres optiques plastiques, transparentes à la lumière visible, conduisent facilement la lumière d'un endroit à un autre. Une source illumine l'extrémité d'un faisceau de fibres optiques. Son énergie transite à travers l'ensemble des fibres jusqu'à leurs extrémités. Outre l'aspect décoratif de ces pointes lumineuses, cette lumière visible éclaire les œuvres d'art, les vitrines... Grâce à la faible sensibilité des fibres plastiques à l'humidité, elles participent aussi à l'éclairage des fontaines lumineuses, des piscines et du balisage routier.

- **Médecine :**

La fibre optique est utilisée dans le domaine de la médecine pour filmer des endroits sensibles ou inaccessibles du corps humain, du fait de la réalisation de caméra et de câbles de très petite taille. La fibre de verre a été mise au service de la médecine pour l'examen des affectations de l'organisme humain. Ces fibres ont un cœur ($n_1 = 1,62$) et une gaine ($n_2 = 1,51$) en verre. Leur bande passante se situe dans le visible et le proche infrarouge. On introduit dans le corps du patient un câble souple appelé endoscope muni d'une mèche (ou un lot) d'une centaine de fibres par un conduit ou une cavité de l'organisme. La lumière est insérée à une des extrémités et éclaire le tissu à examiner. Un autre faisceau de fibres optiques contenu dans l'endoscope renvoie l'image à travers un système optique vers l'observateur. Dans certains dispositifs, une mini caméra transmet les images à un écran vidéo. Parfois, l'endoscope se termine par un outil chirurgical pour un prélèvement sur la zone observée.

- **Scalpel optique :**

Au système précédent de visualisation peut être associée une fibre polycristalline d'halogénure métallique qui transporte les impulsions d'un laser. L'extrémité de l'endoscope devient un outil chirurgical optique. Le médecin peut alors pulvériser les calculs rénaux, découper une tumeur, réparer une rétine, sans « ouvrir » le patient. Celui-ci voit sa convalescence considérablement réduite, comparée à une opération classique.

1.2.4. Description de la fibre optique [10] [11] [12]

La fibre optique est un guide d'onde cylindrique et diélectrique permettant de conduire la lumière sur une grande distance. Elle se présente sous forme d'un cylindre de verre de quelque centaines de micromètres. Il existe plusieurs types de fibres mais tous sont constitués de la même façon : un « cœur » d'indice n_1 , dans lequel l'énergie lumineuse se trouve confinée, une « gaine » d'indice n_2 , dont l'indice de réfraction est plus faible et un enveloppe protectrice qui sert à protéger la fibre optique.



Figure 1.02 : Structure d'une fibre optique

Le système de câblage en fibre optique repose sur des câblages regroupant un nombre pair de fibres : une pour la transmission, une pour la réception.

1.2.5. Propagation de la lumière [5] [13]

Pour bien comprendre le fonctionnement de la fibre optique, il est important de rappeler tous les caractéristiques de la lumière.

1.2.5.1 Spectre de la lumière [14]

La lumière est une onde. En fonction de la longueur d'onde, elle change soit de couleur, soit de type. L'Homme ne peut voir qu'une partie de ces ondes. Celles qui sont comprises entre 400 nm et 750 nm. De la plus petite longueur d'onde visible pour le violet, environ 400 nm, à 750 nm pour le rouge. Les longueurs d'ondes inférieures à 400 nm correspondent au rayonnement ultraviolet ; celles encore plus basses caractérisent les rayons X et Gamma. Au dessus de 750 nm, il y a les rayons infrarouges. C'est après les 750 nm, au alentour des rayons infrarouges, que se situe les longueurs d'ondes utilisées pour la fibre optique. Voici le schéma du spectre lumineux

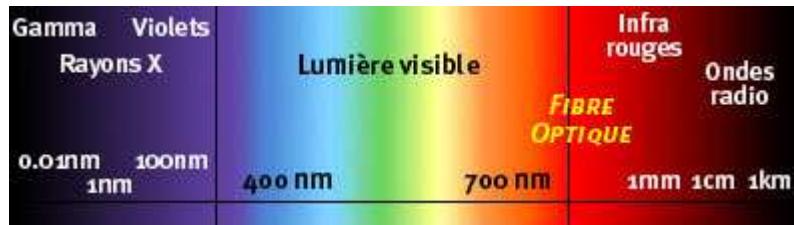


Figure 1.03 : schéma du spectre lumineux

1.2.5.2 La réflexion et la réfraction

La propagation de la lumière à travers une fibre optique est basée sur le principe de réflexions successives du faisceau lumineux. Il est alors nécessaire de reprendre quelques notions fondamentales sur le déplacement de la lumière au niveau d'une surface appelée « dioptre » séparant deux milieux isotropes transparents d'indices de réfraction n_1 et n_2 .

Soit donc un rayon lumineux monochromatique se propageant dans un milieu transparent d'indice n_1 . A l'arrivée sur un dioptre séparant le milieu incident du milieu d'indice n_2 , une partie de son énergie traverse le dioptre alors qu'une autre se réfléchit. On définit ainsi les rayons incidents, réfléchis et réfractés.

Les angles correspondants sont mesurés par rapport à la normale au dioptre. Le plan d'incidence contient le rayon incident et la normale au dioptre.

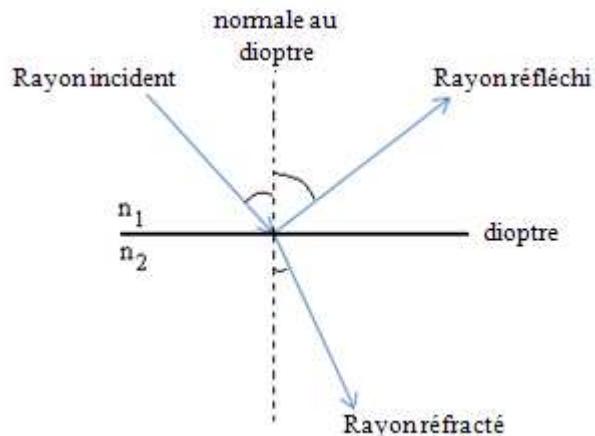


Figure 1.04 : réflexion et réfraction de la lumière

L'indice de réfraction d'un milieu est défini par le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse d'une onde lumineuse dans le milieu :

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.01)$$

C : vitesse de la lumière dans le vide = 3.10^8 [m/s]

La lumière voyage donc plus rapidement dans un matériau avec un indice de réfraction plus petit. Il est à noter que l'indice de réfraction du vide est de 1. On dit aussi que l'indice de l'air est égal à 1 puisque la vitesse de la lumière dans l'air est à peu près égale à celle dans le vide.

1.2.5.3. Loi de Snell-Descartes

Cette propagation a été étudiée par le physicien hollandais Willebrord Snell (1580-1626) et le physicien français René Descartes (1596-1650) qui ont énoncé les lois suivantes, pour les milieux isotropes :

- **Première loi :**

Le rayon incident, le rayon réfléchi, le rayon transmis, et la normale au dioptre appartiennent au même plan. On en déduit que le plan de réfraction et le plan de réflexion sont dans le plan d'incidence.

- **Deuxième loi :**

Pour la réflexion, l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.

La deuxième loi de Snell-Descartes donne la relation entre les angles illustrée par la figure 1.05.

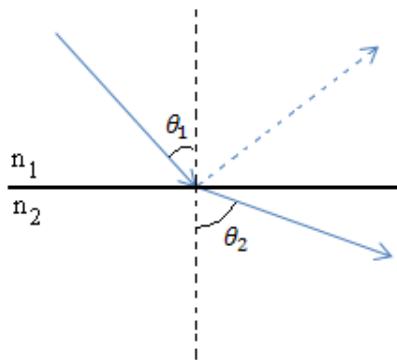


Figure 1.05 : Réfraction de la lumière

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.02)$$

Avec θ_1 : angle d'incidence dans le milieu d'indice n_1

θ_2 : angle de réfraction dans le milieu d'indice n_2

On remarque que :

- Pour $n_1 < n_2$

La relation (1.02) donne

$$\sin \theta_1 > \sin \theta_2 \quad (1.03)$$

Comme la fonction sinus est croissante, alors :

$$\theta_1 > \theta_2 \quad (1.04)$$

Le rayon réfracté se rapproche donc de la normale en traversant le dioptre.

- Pour $n_1 > n_2$, l'angle de réfraction θ_2 est plus grand que l'angle d'incidence θ_1 .

1.2.6. Angle limite et condition de guidage

L'angle limite est la valeur de l'angle incident θ_1 à partir duquel il y a réflexion totale.

On remarque que pour $n_1 > n_2$, le rayon réfracté s'écarte de la normale. Quand l'angle de réfraction arrive à 90° , l'angle d'incidence atteint une limite. Au-delà de cet angle limite, noté ℓ , le faisceau réfracté disparaît car le faisceau incident est alors entièrement réfléchi (figure 1.06b). On parle alors de « réflexion totale ».

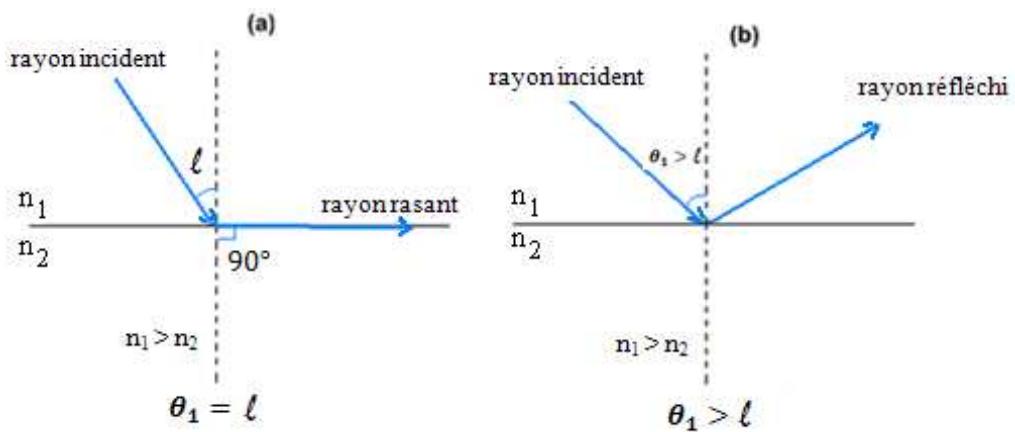


Figure 1.06 : a) Le faisceau réfracté n'existe plus
b) Le faisceau incident est entièrement réfléchi

Pour $\theta_1 = \ell$ on a $\theta_2 = 90^\circ$

La relation (1. 02) s'écrit :

$$n_1 \cdot \sin \ell = n_2 \cdot \sin 90^\circ \quad (1.05)$$

Ce qui entraîne :

$$\sin \ell = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.06)$$

Finalement, l'angle limite s'écrit :

$$\ell = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (1.07)$$

Par exemple, si la lumière passe d'un verre quelconque d'indice $n_1 = 1,5$ dans l'air d'indice $n_2 = 1$, alors l'angle limite est tel que $\sin \ell = \frac{1}{1,5}$. Il est alors proche de 42° .

Ainsi,

- Si l'angle d'incidence est inférieur à 42° , le faisceau est transmis dans l'air
- S'il vaut 42° , il est alors rasant
- S'il est plus grand que 42° , il est entièrement réfléchi par l'air et reste dans le verre.

La condition de guidage est la condition pour que tous les rayons circulant dans la fibre optique soient réfléchis par la gaine.

Elle est obtenue par la relation :

$$\ell \geq \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (1.08)$$

1.2.7. Propagation de la lumière dans la fibre optique [1] [11] [13]

Les propriétés de guidage de la lumière reposent sur le principe physique de la réflexion totale interne décrit plus tôt. Dans la fibre optique, le cœur et la gaine ont des indices de réfraction différents. Pour qu'il y ait propagation de la lumière, l'indice de réfraction du cœur doit être plus grand que celui de la gaine de sorte qu'on retrouve un effet miroir à l'intérieur de la gaine. La lumière est donc confinée à l'intérieur du cœur. Afin d'avoir propagation de la lumière sans perte dans la fibre optique, tous les rayons lumineux heurtant l'interface entre le cœur et la gaine devront

respecter la condition de réflexion totale interne. L'angle d'entrée de la lumière, calculé en fonction des indices, sera donc scrupuleusement respecté.

Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre optique, en empruntant un parcours en zigzag. La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire donc avec très peu de pertes même lorsque la fibre est courbée. On se sert du phénomène de réflexion totale pour guider le rayon lumineux dans le cœur de la fibre.

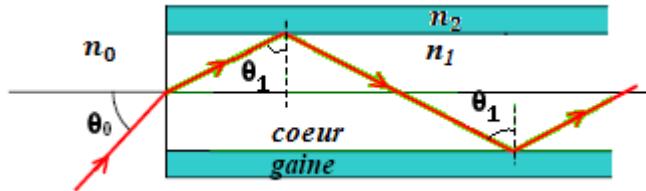


Figure 1.07 : propagation de la lumière par réflexion totale

Avec n_0 : indice de l'air

- La condition de guidage dans le cœur est :

$$\theta_1 \geq \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1.09)$$

- Sinon, le rayon est réfracté dans la gaine de la fibre

1.2.8. Angle d'acceptance et Ouverture numérique [15]

Pour qu'un rayon soit effectivement guidé dans la fibre il faut que sa direction à l'entrée se situe dans un cône dit d'acceptance.

L'angle d'acceptance de la fibre est l'angle d'incidence limite $\theta_{0\text{lim}}$ qui permet à la lumière une propagation par réflexion successive dans la fibre. Pour un angle d'incidence supérieur à l'angle d'acceptance, la lumière est transmise du cœur dans la gaine. L'information alors transportée par la lumière est perdue car non propagée jusqu'à la sortie de la fibre.

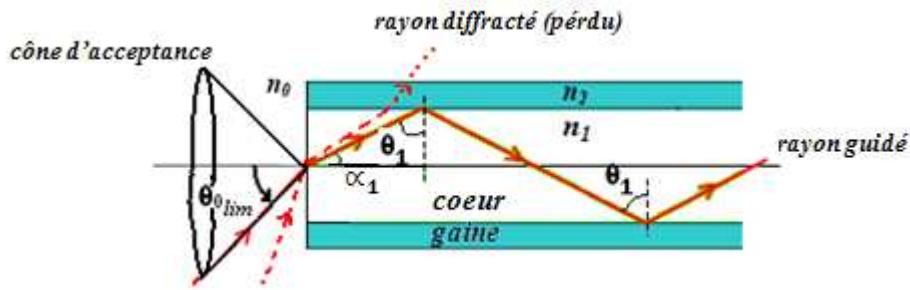


Figure 1.08 : Angle d'acceptance

Un faisceau de lumière rentre dans la fibre avec un angle θ_0 par rapport à la normale à la surface. Puisqu'il y a un changement de milieu, appliquons le principe de Descartes et calculons l'angle θ_0 .

En appliquant le principe de Descartes, formule (1. 02), l'angle dans le matériau d'indice n_1 est α_1 et vérifie :

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \alpha_1 \quad (1.10)$$

Et

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \theta_1 \quad (1.11)$$

Pour l'angle limite on a :

$$\alpha_{1lim} = \frac{\pi}{2} - \theta_{1lim} \quad (1.12)$$

On a alors :

$$\sin \theta_{0lim} = \frac{n_1}{n_0} \sin \alpha_{1lim} = \frac{n_1}{n_0} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_{1lim} \right) = \frac{n_1}{n_0} \cos \theta_{1lim} \quad (1.13)$$

D'où :

$$\sin \theta_{0lim} = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{\left(1 - \sin^2 \theta_{1lim}\right)} = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (1.14)$$

Or, l'indice de l'air est $n_0 = 1$

Donc

$$\sin \theta_{0lim} = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.15)$$

Pour se propager le long de la fibre, le faisceau incident doit appartenir au cône d'acceptance d'angle θ_{0lim} .

L'ouverture numérique O.N. ou en anglais « numeric aperture » (N.A.) d'une fibre caractérise l'angle limite θ_{0lim} que peut faire le faisceau pour assurer sa propagation. Elle est ainsi définie par :

$$ON = \sin \theta_{0lim} = n_1 \sin \alpha_{1lim} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.16)$$

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

Par application numérique : $n_1 = 1.485$ et $n_2 = 1.47$.

On obtient alors comme ouverture numérique: $\sin \theta_{0lim} = 0.21$ ou $2\theta_{0lim} = 24^\circ$

1.2.9. Angle critique

L'angle critique θ_c vaut $90^\circ - \theta_{1lim}$

On peut aussi l'exprimer en fonction des indices n_1 et n_2 .

On a:

$$\sin \theta_c = \frac{\sin \theta_{0lim}}{n_1} \quad (1.17)$$

Ce qui donne :

$$\sin \theta_c = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1} \quad (1.18)$$

1.2.10. Différence relative d'indice

La différence d'indice Δ est définie par :

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (1.19)$$

Δ s'exprime en [%]

On remarque que :

$$\sin \theta_c = \sqrt{2\Delta} \quad (1.20)$$

Prenons une fibre dont les indices sont 1.48 pour le cœur et 1.46 pour la gaine. Le diamètre du cœur de cette fibre est de 100µm, celui de la gaine 140µm. On peut déterminer :

- l'angle limite $\ell = 80.6^\circ$
- l'angle critique $\theta_c = 9.4^\circ$
- l'angle d'acceptance $\theta_{0lim} = 14^\circ$
- l'ouverture numérique $O.N. = 0.242$
- la différence d'indice relative $\Delta = 1.34 \%$

On remarque que Δ est très petit en raison des valeurs voisines de n_1 et n_2 .

1.2.11. Fréquence normalisée

La fréquence normalisée permet de prédire le nombre de modes (chemins possibles) qui conduiront la lumière dans la fibre.

Elle est définie par la formule suivante :

$$V = \frac{2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\lambda_0} \quad (1.21)$$

Ou encore :

$$V = \frac{2\pi a \cdot O.N.}{\lambda_0} \quad (1.22)$$

Avec :

- a: rayon du cœur de la fibre
- O.N. : ouverture numérique de la fibre
- λ_0 : longueur d'onde (dans le vide) de l'onde se propageant dans la fibre.

1.3. Conclusion

Dans ce chapitre, on a cité les avantages de la fibre optique tels que : performance de transmission, avantages de mise en œuvre, sécurité électrique et électromagnétique, avantage économique. De même, on a entamé aussi le mode de propagation de la lumière dans la fibre optique tout en expliquant le principe de la réflexion successive.

CHAPITRE 2 : DIFFERENTS TYPES DE FIBRES OPTIQUES

2.1. Notion de mode de propagation [1] [16]

Le rayon incident, s'il fait partie du cône d'acceptance, doit pouvoir se propager dans la fibre. Mais cette condition de réflexion ne suffit pas.

Comme les ondes proviennent de la même source, des phénomènes d'interférences se produisent. La superposition des ondes progressives doit interférer de façon constructive, pour que de la lumière sorte de la fibre. Les seules directions « permises » constituent les modes de propagation. Chaque direction du rayon incident qui satisfait les conditions de propagation est associée à un mode.

Suivant le nombre de modes N des ondes lumineuses, la fibre peut être classée en deux grandes familles :

- Multimode quand $N \neq 1$
- Monomode quand $N = 1$

2.2. Fibre multimode [5] [7]

Une fibre optique multimode est un guide d'onde diélectrique circulaire dont le cœur, qui est la partie centrale où se propage la lumière, a un diamètre plus grand devant la longueur d'onde de la lumière. Le terme « multimode » signifie que la lumière se repartit sur un certain nombre de trajectoires autorisées, appelées modes, qui résultent des interférences entre les réflexions multiples sur l'interface cœur-gaine. Le mode se caractérise par sa trajectoire et par la répartition du champ électromagnétique autour de celle-ci.

Les fibres multimodes, ont été les premières sur le marché. Elles ont pour caractéristiques de transporter plusieurs modes (trajets lumineux) simultanément. Elles sont utilisées uniquement pour des bas débits et de courtes distances. Ces fibres sont à saut d'indice ou à gradient d'indice.

Le diamètre du cœur est en générale compris entre 50 et 90 μm pour un diamètre extérieur de la gaine de 125 μm .

Par exemple : la fibre 50 / 125, est une fibre de 50 μm de diamètre de cœur et 125 μm de diamètre de gaine. Elle est la plus utilisée en télécommunications pour des distances moyennes.

Les fibres 62,5 / 125 sont utilisées en informatique.

Les fibres 85 / 125 sont utilisées en vidéocommunication.

- Le problème de la fibre multimode est qu'aucun des modes n'arrive au même moment en bout de fibre. Ce qui entraîne la « dispersion modale ». Il y a donc élargissement des impulsions lumineuses émises.
- Pour résoudre ce problème il faut limiter la variation d'indice entre les deux milieux. On obtient alors un angle de réfraction limite proche de 1.

2.2.1. Fibre à saut d'indice [6] [17] [18]

C'est le modèle le plus simple. Les indices du cœur n_1 et de la gaine n_2 sont constants.

2.2.1.1. Profil d'indice

La fibre est caractérisée par son profil d'indice. Il s'agit de la représentation de l'indice de la fibre en fonction de la distance r à l'axe centrale de la fibre : $n(r)$.

Soit $2a$ le diamètre du cœur.

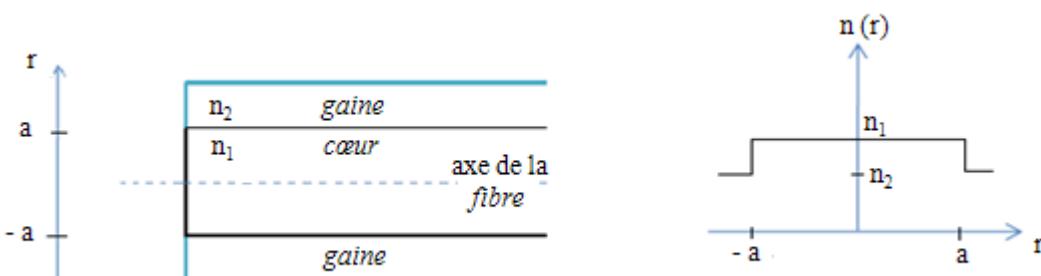


Figure 2.01 : Profil d'indice d'une fibre à saut d'indice

2.2.1.2. Caractéristiques

Le diamètre du cœur est d'environ 200 μm pour un diamètre total de la fibre (c'est-à-dire cœur + gaine) de 380 μm . Le « saut d'indice » signifie que la différence entre l'indice de réfraction du cœur et celui de la gaine est assez importante et constitue de ce fait un palier. De cette façon, lorsque le signal rencontre la gaine, il est brusquement réfléchi. Ce type de propagation entraîne une déformation importante du signal.

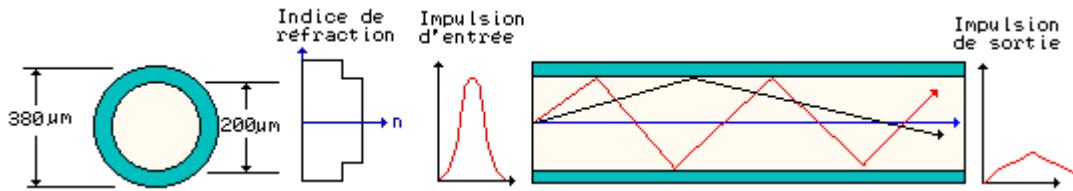


Figure 2.02 : Fibre multimode à saut d'indice

Dans cette fibre, le cœur est homogène et d'indice n_1 . Il est entouré d'une gaine optique d'indice n_2 inférieure à n_1 . Ces indices sont peu différents et voisins de 1,5.

Quant à la gaine optique, elle joue un rôle actif dans la propagation, et ne doit pas être confondue avec le revêtement de protection déposé sur la fibre. Le rayon est guidé par la réflexion totale au niveau de l'interface cœur-gaine, sinon il est réfracté dans la gaine.

Examinons comment est appliquée la loi de Snell-Descartes dans ce type de fibres.

Pour le cas du premier faisceau lumineux (le noir), son faisceau réfracté sera dans le prolongement de la gaine et de la fibre. Donc ce dernier ne sera pas perdu puisqu'il est dans le prolongement du cœur.

Le faisceau réfléchi, lui, se propagera dans le cœur.

Pour le second, le rouge, du fait que son angle de départ est différent de celui du premier, son faisceau réfracté ne sera plus dans le prolongement de la fibre, par conséquent il va entrer dans la gaine, c'est ici qu'elle intervient, elle va permettre pour certain faisceau de « récupérer » leurs faisceaux réfractés.

La capacité de transmission de ce type de fibre est d'environ 100 Mbits/s. Cette valeur correspond également à la bande passante. On peut également exprimer la bande passante en $\text{Mhz} \cdot \text{km}$. Ici pour la fibre à saut d'indice elle est de 22 $\text{Mhz} \cdot \text{km}$. Cette capacité est assez faible car chaque rayon doit parcourir une distance différente.

Par conséquent il faut à l'extrémité « attendre » que tous les faisceaux soient arrivés.

2.2.1.3. Modes

Les modes sont l'expression des différents chemins optiques que peut suivre le signal dans la fibre. Le nombre de modes se calcule en fonction de la fréquence normalisée V décrit auparavant par la formule (1.21).

Pour les fibres multimodes à saut d'indice, le nombre de modes est donné expérimentalement par :

$$N = \frac{V^2}{2} \quad (2.01)$$

2.2.2. Fibre à gradient d'indice [1] [18]

Leur cœur contrairement aux fibres à saut d'indice, n'est pas homogène. Leur cœur est en fait constitué de plusieurs couches de verres dont l'indice de réfraction est différent à chaque couche et l'indice de réfraction diminue de l'axe jusqu'à la gaine.

Le guidage est cette fois-ci dû à l'effet du gradient d'indice. Les rayons suivent une trajectoire d'allure sinusoïdale. La gaine n'intervient pas directement, mais élimine les rayons trop inclinés.

L'avantage essentiel de ce type de fibre est de minimiser la dispersion du temps de propagation entre les rayons, sans utiliser pour cela l'ouverture numérique trop faible.

Ces fibres ont un indice de cœur qui diminue progressivement entre n_1 (au centre de la fibre) et n_2 (indice de la gaine).

2.2.2.1. Profil d'indice

Le profil d'indice est représenté mathématiquement par :

- Dans le cœur (pour $0 < r < a$)

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta(r/a)^x} \quad (2.02)$$

- Dans la gaine (pour $r > a$)

$$n(r) = n_2 \quad (2.03)$$

Avec :

- x : exposant du profil d'indice
- Δ : différence relative d'indice (diminution relative de l'indice entre l'axe et la gaine)
- a : rayon du cœur

2.2.2.2. Exemples

- Pour $x = 2$, le profil est parabolique.
- Pour $x = 1$, le profil devient triangulaire.
- Pour $x \rightarrow \infty$, on est ramené au cas d'une fibre à saut d'indice.

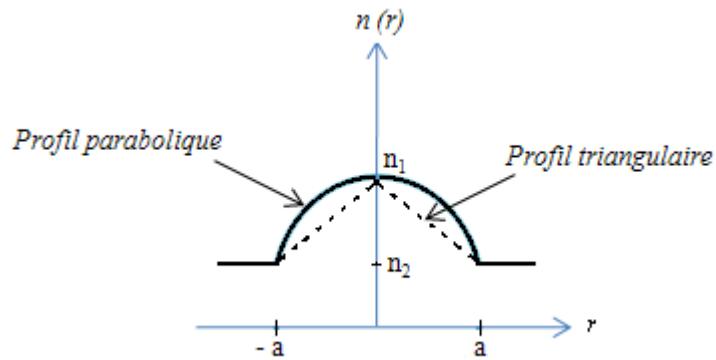


Figure 2.03 : Exemples de profils d'indice d'une fibre à gradient d'indice

2.2.2.3. Ouverture numérique

Pour une fibre à saut d'indice l'ouverture numérique est égale à $\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ (formule 1.14).

Pour une fibre à gradient d'indice, en raison de la variation de l'indice du cœur, on définit une ouverture numérique locale :

$$O.N._{locale} = \sqrt{n(r)^2 - n_2^2} \quad (2.04)$$

Avec $n(r)$: indice du cœur, à la distance r de l'axe du cœur.

On remarque que :

- L'ouverture numérique est maximale pour $n(r) = n_1$. On a alors $r = 0$
- Elle est minimale (et même nulle) pour $n(r) = n_2$. On a alors $r = a$

Plus l'ouverture numérique est importante, plus l'angle d'accéptance est grand, et plus la puissance véhiculée est importante. Ainsi, une fibre à saut d'indice transporte plus de puissance lumineuse qu'une source à gradient d'indice.

2.2.2.4. Caractéristiques

Le diamètre du cœur est de 50 à 100 μm pour un diamètre total de la fibre de 125 μm .

Le cœur est constitué de plusieurs couches de verre ayant chacune un indice de réfraction légèrement différent de la précédente. Ainsi, le rayon lumineux n'est pas brusquement réfléchi lorsqu'il rencontre la gaine, mais sa trajectoire est déviée progressivement à chaque fois qu'il traverse une nouvelle couche. Ceci permet de diminuer la déformation du signal.

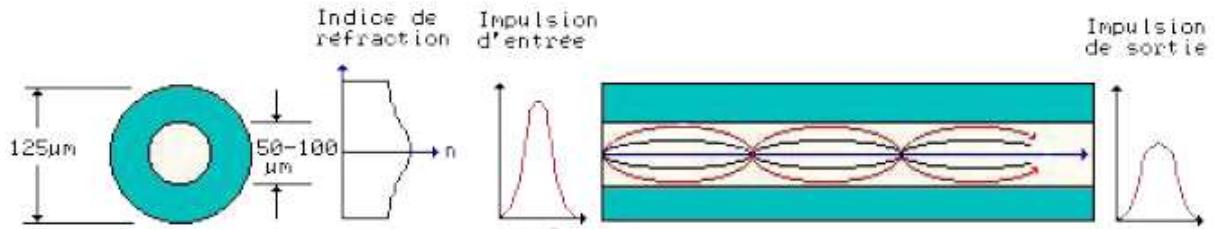


Figure 2.04 : Fibre multimode à gradient d'indice

La bande passante de ce mode de fonctionnement est de 500Mbit/s ou de 1 GHz*Km. Cette capacité est plus faible, donc il est possible d'augmenter en fréquence.

2.2.2.5. Modes

Pour les fibres à gradient d'indice, le nombre de modes est donné par la relation :

$$N = \frac{x}{(x+2)} \frac{V^2}{2} \quad (2.05)$$

- Pour une fibre à gradient d'indice parabolique : $x = 2$ donc N vaut $\frac{V^2}{4}$
- Pour une fibre à saut d'indice : $x \rightarrow \infty$ et N revient à $\frac{V^2}{2}$

2.3. Du multimode [19]

Dans la fibre optique multimode, plusieurs groupes de rayons appelés « modes propres du guide » se propagent sans perte avec des angles et des vitesses variables. Lorsque l'impulsion lumineuse est injectée dans la fibre, plusieurs modes propres sont alors excités ; mais puisque les vitesses de propagation de chacun diffèrent, l'impulsion s'allonge au fur et à mesure qu'elle se propage (comme un train dont le wagon de queue traînerait derrière le wagon de tête). Le résultat est qu'au-delà d'une certaine distance, une impulsion en vient à chevaucher l'impulsion précédente, provoquant ainsi une perte d'information. Une telle fibre ne peut donc être utilisée que pour des communications sur des courtes distances, ou encore, pour des lignes munies de nombreux régénérateurs ou amplificateurs de signal.

Pour régler ce problème, on fabrique une fibre monomode, où un seul mode de propagation est excité par l'impulsion lumineuse. Toutefois, pour obtenir la condition de propagation monomode,

il faut limiter au maximum le rayon du cœur de la fibre et le saut d'indice n_1-n_2 . De plus, la fibre doit être suffisamment large pour permettre l'épissure des différents tronçons (connexion des fibres entre elles), et le saut d'indice suffisamment élevé pour préserver des conditions de réflexion totale en cas de légère courbure.

2.4. Fibre monomode [9] [20] [21] [22] [23]

Le but recherché dans cette fibre est que le chemin parcouru par le faisceau soit le plus direct possible. Pour cela, on réduit fortement le diamètre du cœur qui est dans la plupart des cas inférieur à $10\mu\text{m}$.

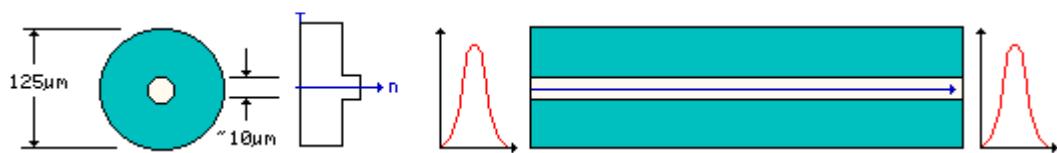


Figure 2.05 : Fibre monomode

Le fait que le cœur soit si fin va obliger le signal lumineux à se propager en ligne droite.

De ce fait,

- Il ne rencontre pas la gaine et n'est donc pas perturbé.
- La déformation du signal dans ce type de fibre est quasi inexistante.
- La dispersion modale est quasi nulle.

Comme on ne casse pas le faisceau lumineux, la bande passante est donc augmentée, environ $10\text{ GHz} \cdot \text{Km}$ ou de 100.

Du fait de ces précieux avantages, la fibre monomode a pris une ampleur considérable dans les transmissions sur des grandes distances.

Le problème de la fibre monomode est le raccord entre fibres, ou entre fibre et connecteur (nécessité d'un alignement parfait)

2.4.1. Conditions de monomodalité d'une fibre optique

2.4.1.1. Longueur d'onde critique ou de coupure

Il s'agit de la valeur de la longueur d'onde à partir de laquelle la fibre n'est plus monomode.

La fibre reste toujours monomode si $V < 2,40$ (plus exactement 2,404), où V est la fréquence normalisée définie par la formule (1.22).

On a donc :

$$\frac{2\pi a \cdot ON}{\lambda_0} < 2,404 \quad (2.06)$$

Entraîne :

$$\lambda_0 > \frac{2\pi a \cdot ON}{2,404} \quad (2.07)$$

La longueur d'onde critique λ_c est la limite de cette équation et qui est définie par :

$$\lambda_c = \frac{2\pi a \cdot ON}{2,404} \quad (2.08)$$

Pour $\lambda_0 > \lambda_c$ la fibre est monomode.

Par exemple, soit une fibre dont $\lambda_0 = 1,3 \mu m$; $a = 3 \mu m$ et $ON = 0,151$

La fibre a donc un rayon de cœur de $3 \mu m$, une ouverture numérique de 0,151 et elle est prévue pour transmettre la longueur d'onde $1,3 \mu m$. A partir de la formule (1.22), on obtient comme fréquence normalisée $V = 2,19$

Comme V est ici inférieur à 2,404 ; on conclut donc que la fibre est monomode.

De plus, si on calcul la longueur d'onde critique on trouve $\lambda_c = 1,183 \mu m$ qui est réellement inférieure à la longueur d'onde $\lambda_0 = 1,3 \mu m$.

2.4.1.2. Profil d'indice d'une fibre monomode

Le profil d'indice est représenté par la courbe $n(r)$.

Les fibres monomodes classiques sont à saut d'indice, avec un cœur beaucoup plus étroit que pour les fibres multimodes.

Il existe aussi des fibres monomodes dont le profil est triangulaire ou en w .

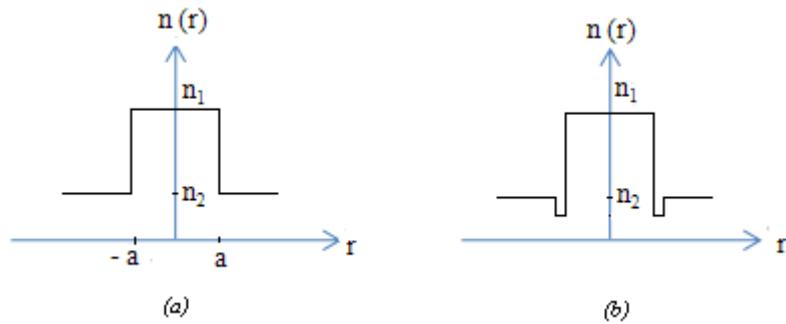


Figure 2.06 : a) Profil d'indice d'une fibre monomode à saut d'indice
b) Profil d'indice en W d'une fibre monomode

2.4.2. Diamètre de mode d'une fibre monomode

En raison de la diffraction de l'onde dans une fibre de très faible diamètre, une partie de la puissance optique se trouve dans la gaine.

- Dans le cas d'une fibre multimode (grand diamètre de cœur) la lumière est majoritairement guidée par le cœur.
- Pour une fibre monomode (petit diamètre de cœur), une grande partie de la lumière transite par la gaine.

C'est pourquoi, on définit un nouveau diamètre de mode, plus large que le diamètre du cœur, qui caractérise la largeur réelle du faisceau modal.

2.4.2.1. Définition du diamètre de mode [7] [10]

La lumière est guidée par le cœur. Mais en monomode, une partie importante de la puissance est transmise dans la gaine. La répartition de cette puissance lumineuse est à peu près « gaussienne », c'est-à-dire en forme de cloche.

L'intensité est répartie selon la loi :

$$I(r) = I_0 \exp \left(\frac{-2r^2}{\omega_0^2} \right) \quad (2.09)$$

Où r est la distance par rapport à l'axe central de la fibre.

Le diamètre de mode est défini par $2\omega_0$. Il est déterminé par la valeur de r pour laquelle $I(r)$ vaut $1/e^2 = 0,135 = 13,5\%$.

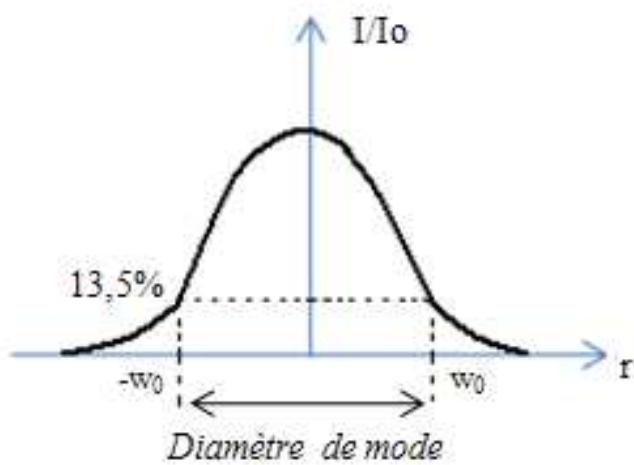


Figure 2.07 : Profil de la puissance lumineuse

Le diamètre de mode est une caractéristique des fibres monomodes. Il augmente très rapidement avec la longueur d'onde, ce qui rend la transmission de plus en plus sensible aux déformations.

2.4.2.2. Valeurs du diamètre de mode

Le diamètre de mode est donné expérimentalement par l'approximation de Marcuse. Il est défini par :

$$\omega_0 = 0,65a + \frac{1,6}{V^{3/2}} + \frac{2,9}{V^6} \quad (2.10)$$

Avec a : rayon du cœur de la fibre monomode

V : Fréquence normalisée

Par exemple :

- Pour $V = 2,404$ (à la limite du monomode) on obtient. $\omega_0 = 1,15a$. On remarque que le cœur guide presque toute la puissance lumineuse.
- Pour $V = 2$, on obtient $\omega_0 = 1,26a$
- Pour $V = 1,5$; on a : $\omega_0 = 1,77a$
- Pour $V = 1$; on obtient : $\omega_0 = 5,15a$

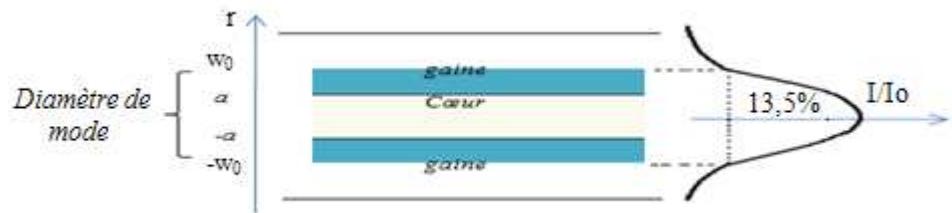


Figure 2.08 : Profil de la puissance lumineuse dans la fibre

2.4.2.3. Facteur de confinement

Le facteur de confinement F est défini pour une fibre monomode, par le rapport de la puissance optique se propageant dans le cœur sur la puissance transmise totale. Elle est donnée par la formule suivante :

$$F = \frac{P_c}{(P_c + P_g)} \quad (2.11)$$

Avec P_c : puissance dans le cœur

P_g : puissance dans la gaine

Plus la fréquence normalisée augmente, plus la quantité de lumière transportée par la gaine diminue (donc plus le facteur de confinement F augmente).

Pour $V = 2.404$, le pourcentage de puissance transportée dans le cœur est de 82.5 %

Pour $V = 1$, seulement 10% de la puissance totale circule par le cœur.

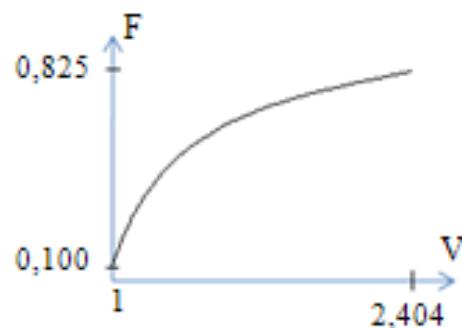


Figure 2.09 : Facteur de confinement

2.5. Bilan général des différentes fibres [20] [21] [22]

Etant données qu'il y a différentes structures de fibres, elles ont par conséquent des capacités et des caractéristiques différentes.

Le tableau suivant donne un bref récapitulatif des avantages et des inconvénients de chaque structure.

Structures	Avantages	Inconvénients
Multimode à saut d'indice	<ul style="list-style-type: none">- Faible prix- Facilité de mise en œuvre- cœur homogène	Perte et distorsion importante du signal
Multimode à gradient d'indice	<ul style="list-style-type: none">- Bande passante raisonnable- Bonne qualité de transmission- cœur pas homogène	Difficile à mettre en œuvre
Monomode	<ul style="list-style-type: none">- Très grande passante- Aucune distorsion- diamètre de cœur réduit	Prix très élevé

Tableau 2.01 : Tableau comparatif des différentes fibres

2.6. Conclusion

Un mode est un rayon lumineux se propageant au sein du cœur. A certaines longueurs d'ondes et avec certaines dimensions du cœur plusieurs rayons lumineux traversent la fibre qui porte alors le nom de multimode. A l'inverse, une fibre monomode n'autorise la propagation que d'un seul rayon lumineux.

CHAPITRE 3 : ATTENUATION ET PARAMETRES DE TRANSMISSION DES FIBRES OPTIQUES

Jusqu'à maintenant, nous n'avons cité que les avantages et les points forts de la fibre optique, mais comme tout support de transmission, elle a quand même ses défauts.

3.1. Atténuation [1]

3.1.1. *Introduction*

Une information codée en signal lumineux transite par la fibre optique. A la réception, l'information doit être restituée sans défaut. Mais lors de la transmission, l'atténuation et la dispersion de la lumière dans la fibre risquent de déformer le signal.

3.1.2. *Définition*

L'atténuation est la perte de puissance que subit la lumière au cours de sa propagation dans la fibre optique. Cette perte est soit locale (due à un défaut ou à un connecteur) soit régulièrement repartie sur toute la longueur de la fibre. Dans le premier cas, la perte ou l'atténuation s'exprime en décibels (dB) alors que dans le deuxième cas, la perte se mesure en dB / Km pour une longueur de fibre traversée.

3.1.3. *Calcul de l'atténuation linéique*

Soit une fibre optique, sans défaut et de diamètre constant. Calculons la perte de puissance lumineuse, pour une certaine longueur de fibre.

On choisit deux sections de droites (perpendiculaires à la direction de propagation) distantes d'une petite distance dL appelée distance élémentaire. La puissance lumineuse (ou flux) est le rapport de la qualité d'énergie lumineuse traversant une section sur l'unité de temps.

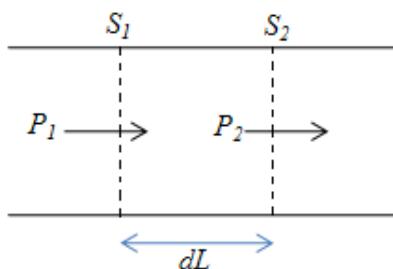


Figure 3.01 : Portion de fibre

Soit P_1 , la puissance lumineuse traversant S_1 , et P_2 la puissance lumineuse traversant S_2 .

En raison de l'atténuation dans l'élément de fibre, on a $P_2 < P_1$. La variation élémentaire de puissance $dP = P_2 - P_1$ est négative et :

- Proportionnelle à P_1 : si P_1 est multipliée par x alors P est x fois plus grand ;
- Proportionnelle à dL : une longueur x fois dL donne des pertes x fois plus grandes ;
- Proportionnelle à un coefficient d'atténuation α caractérisant la fibre.

Ainsi, pour une distance dL faible, on a :

$$dP = -\alpha \cdot P \cdot dL \quad (3.01)$$

Ainsi,

$$\frac{dP}{P} = -\alpha \cdot dL \quad (3.02)$$

Par intégration sur une longueur totale $L_2 - L_1$ de fibre, on obtient :

$$\int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P} = -\alpha \int_{L_1}^{L_2} dL \quad (3.03)$$

On en déduit que :

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = -\alpha (L_2 - L_1) \quad (3.04)$$

Ou :

$$\frac{P_2}{P_1} = \exp[-\alpha (L_2 - L_1)] \quad (3.05)$$

Avec : α en $[m^{-1}]$

$L_2 - L_1$ en $[m]$

On en déduit le coefficient d'atténuation α (en $[m^{-1}]$ ou en $[Km^{-1}]$) par :

$$\alpha = \frac{\ln \frac{P_1}{P_2}}{(L_2 - L_1)} \quad (3.06)$$

En général, l'atténuation linéaire α de la fibre s'exprime en $[dB/m]$ ou en $[dB/Km]$.

En utilisant le logarithme décimal on obtient :

$$\alpha = \frac{10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2}}{(L_2 - L_1)} \quad (3.07)$$

Ou :

$$\frac{P_2}{P_1} = 10^{-\alpha \frac{L_2 - L_1}{10}} \quad (3.08)$$

Avec : α en $[dB \cdot m^{-1}]$ ou $[dB \cdot Km^{-1}]$

On remarque que :

$$\ln \frac{P_1}{P_2} = 2,3 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (3.09)$$

Ce qui s'écrit aussi :

$$\log \frac{P_1}{P_2} = 0,434 \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (3.10)$$

Finalement on en déduit que :

$$\alpha [dB \cdot m^{-1}] = 4,34 \cdot \alpha [m^{-1}] \quad (3.11)$$

3.1.4. Exemple

À l'entrée d'une fibre, on injecte une puissance $P_1 = 10^{-6}$ W. Au bout d'un Km, on récupère une puissance $P_2 = 10^{-7}$ W. Cherchons le coefficient d'atténuation de la fibre, puis la puissance P'_2 à la sortie de la fibre de longueur totale 2,5 Km.

L'atténuation exprimée en [dB/Km] vaut :

$$\frac{10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2}}{(L_2 - L_1)} = \frac{10 \cdot \log \frac{10^{-6}}{10^{-7}}}{1} = 1$$

Pour trouver P'_2 , on utilise

$$\frac{P'_2}{P_1} = 10^{-\alpha \frac{L_2 - L_1}{10}}$$

Avec α en $[dB \cdot m^{-1}]$ si $L_2 - L_1$ est en [Km].

On en déduit que :

$$\frac{P'_2}{P_1} = 10^{-10 \frac{2,5}{10}} = 10^{-2,5}$$

Donc $P'_2 = 10^{-8,5}$ soit $3,16 \cdot 10^{-9}$

3.2. Causes de l'atténuation

Les pertes de lumière d'un réseau de fibres sont dues aux atténuations intrinsèques de la fibre (impuretés, microcourbures...) et aux jonctions entre fibres.

3.2.1. Pertes ou diffusion de Rayleigh

3.2.1.1. Principe de la diffusion

Les pertes de Rayleigh proviennent de la diffusion de la lumière. Quand la lumière rencontre une irrégularité dont la dimension est inférieure à sa longueur d'onde, le phénomène de diffusion disperse l'énergie lumineuse dans toutes les directions. Quelques rayons ne satisfont plus les conditions de réflexion totale et ne coopèrent plus à la transmission du signal.

Des variations locales d'indice du cœur, par exemple dues à la trempe de verre lors de la fabrication de la fibre, ou des petites irrégularités peuvent être la cause de cette diffusion.

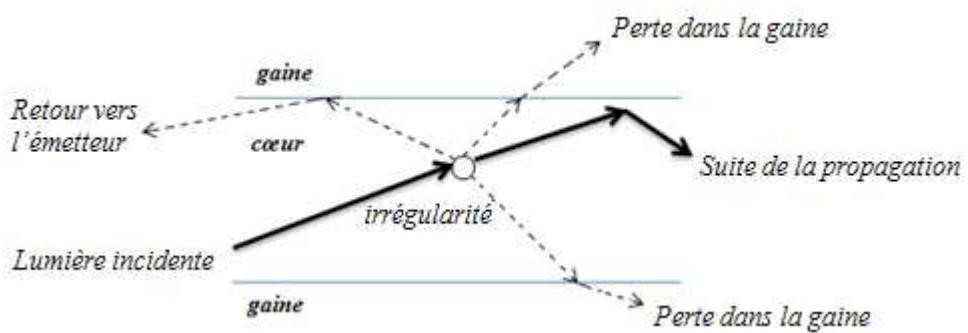


Figure 3.02 : Diffusion de Rayleigh dans la fibre optique

3.2.1.2. Relation entre les pertes de Rayleigh et la longueur d'onde

La diffusion de Rayleigh dépend de la longueur d'onde de la lumière incidente. Elle est d'autant plus grande que la longueur d'onde est courte. Pour minimiser les pertes de transmission dans la fibre, la lumière infrarouge est préférée à la lumière visible.

L'atténuation varie comme l'inverse de la puissance quatrième de la longueur d'onde.

$$\alpha = \frac{A}{\lambda_0^4} \quad (3.12)$$

Avec A : constante

λ_0 : longueur d'onde dans le vide

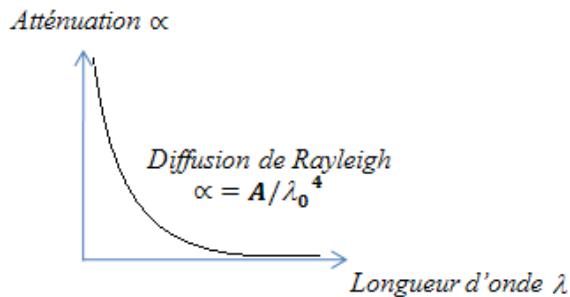


Figure 3.03 : Diffusion de Rayleigh

3.2.2. Pertes par absorption

Quand un photon apporte son énergie à un atome, à une molécule, ou à un cristal, il peut se produire une transition électronique. Cette transition est due à une absorption d'énergie par l'atome (molécule...). L'apport d'énergie excite l'atome, modifie l'énergie de vibration reliant deux atomes d'une molécule.

Les impuretés des constituants de la fibre, absorbent des longueurs d'onde bien spécifiques, ce qui entraîne alors une grande atténuation dans la lumière transmise.

3.2.2.1. Absorption par l'eau

Des traces d'eau dans la fibre optique atténuent la propagation de lumière dans la fibre à des longueurs d'ondes spécifiques.

Les molécules d'eau de formule brute H_2O sont formées de trois atomes (deux hydrogènes et un oxygène). Elles donnent naissance en petite quantité à des ions (OH^-).

- La liaison entre l'oxygène et l'hydrogène (dans OH^-) vibre à une fréquence équivalente à $\lambda = 2,73 \mu\text{m}$. Les harmoniques absorbent les longueurs d'onde λ égales à $1,38 \mu\text{m}$; $0,95 \mu\text{m}$ et $0,75 \mu\text{m}$.
- Les ions OH^- se lient aux molécules de silice SiO_2 , principal constituant de la fibre.

Cette liaison absorbe la longueur d'onde $\lambda = 1,23 \mu\text{m}$.

Pour une partie par million (1 ppm) d'ions OH^- , l'atténuation atteint 40 dB / Km à $1,38 \mu\text{m}$; 2 dB / Km à $1,23 \mu\text{m}$ ou 1 dB / Km à $0,95 \mu\text{m}$.

3.2.2.2. Absorption par les métaux

Une infime présence de métal (chrome, fer, cobalt, cuivre, nickel...) dans la fibre optique produit aussi une très forte absorption. L'énergie apportée par la lumière transfère les électrons des couches périphériques sur des niveaux d'énergie plus élevés. Une concentration de 1 ppm atténue le signal d'environ 2000 dB / Km.

Comme toute trace de métal absorbe une grande partie de l'énergie lumineuse transportée, la fabrication des fibres optiques exige des produits extrêmement purs.

3.2.2.3. Conséquence sur la courbe d'atténuation

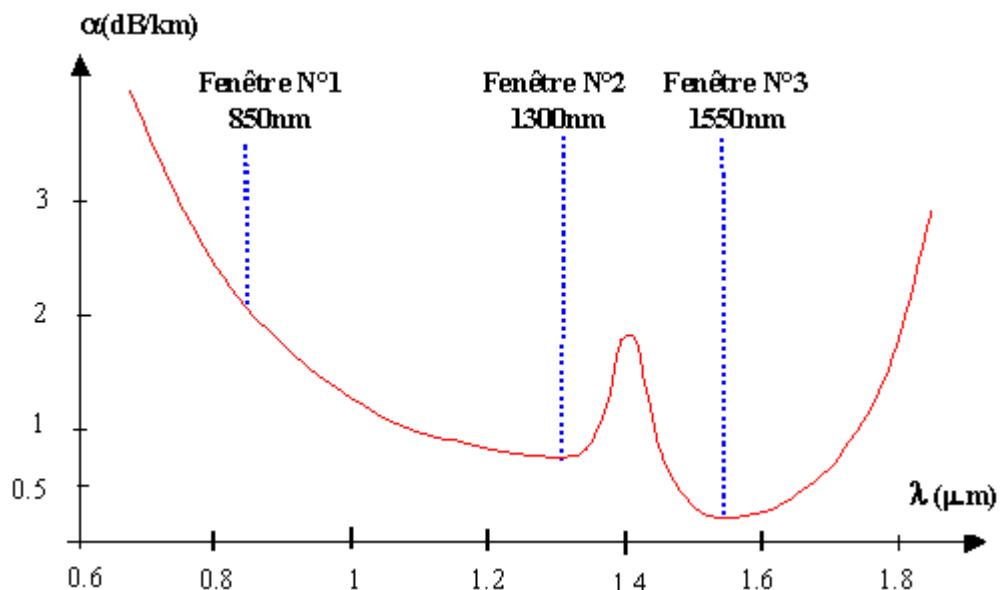


Figure 3.04 : Atténuation en fonction de la longueur d'onde

On constate expérimentalement que les longueurs d'ondes **0.85 μm** ; **1.30 μm** et **1.55 μm** sont favorables à la transmission car c'est dans ces valeurs que l'atténuation est minimale.

3.2.3. Pertes aux courbures

Les fibres, conservées en bobines sont déroulées selon le relief du terrain.

La question qui se pose est que la transmission est-elle affectée par les courbures de la fibre ?

L'incidence des rayons lumineux sur le dioptrre cœur-gaine dépend de la courbure de la fibre, en conséquence :

- Si l'angle d'incidence des modes d'ordre élevé sur le dioptrre cœur-gaine est inférieur à l'angle limite, le rayon est transmis dans la gaine ce qui se traduit par une perte d'énergie transmise.
- Si le mode réfléchi sur le dioptrre cœur-gaine se transforme au profit d'autre mode d'ordre plus élevé (incidence plus faible), il y a couplage de mode. Les modes d'ordres peu élevés sont atténués ou même disparaissent. Quant aux modes d'ordres élevés, leur énergie est perdue pour la propagation.

Ainsi une courbure importante entraîne une forte atténuation. Elle atteint 3 dB / Km pour un rayon de courbure R_{lim} .

Où :

$$R_{lim} = \frac{10.a}{ON^2} \quad (3.13)$$

Avec a : rayon du cœur

ON : ouverture numérique

Par exemple, avec un rayon de cœur a de 25 μm et une ouverture numérique de l'ordre de 0,2 le rayon limite d'enroulement est de 6 mm pour une perte de 50 %.

3.2.4. Pertes aux raccordements [1] [6] [7] [24]

En plus des pertes d'énergie liées à la fibre elle-même, les jonctions entre fibres atténuent la puissance transportée.

3.2.4.1. Pertes dues à l'espacement

Soient deux fibres de même dimension de cœur jointes par un connecteur supposé parfait. Une mince épaisseur d'air les sépare.

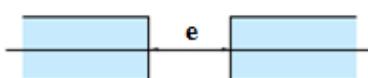


Figure 3.05 : Espace

Recherchons les pertes théoriques liées à la présence de ce connecteur.

Au niveau de chaque diopstre séparant l'air de la fibre, la lumière subit une réflexion de Fresnel. A l'interface air-verre, le facteur de réflexion en intensité s'exprime par :

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (3.14)$$

Et le coefficient de transmission en intensité est définie par :

$$T = 1 - R \quad (3.15)$$

Pour un indice moyen ($n = 1,5$) de fibre, $R = 4\%$ à chaque diopstre et T vaut $1 - R = 96\%$.

Soient P_1 la puissance lumineuse sortant de la première fibre et P_2 la puissance entrant dans la deuxième. En négligeant l'épaisseur de la couche d'air, l'atténuation locale A (ou la perte) en dB due à la réflexion vaut :

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} \quad (3.16)$$

3.2.4.2. Pertes dues aux dimensions différentes de la fibre

Pour une répartition uniforme de l'énergie lumineuse, le rapport $\frac{P_2}{P_1}$ est égal au rapport $\frac{S_2}{S_1}$ où S_1 est la surface de la section transverse du cœur de la première fibre et S_2 la seconde.

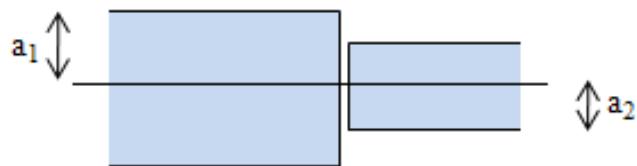


Figure 3.06 : Fibres non identiques

La perte locale vaut :

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} = 10 \cdot \log \frac{S_2}{S_1} = 10 \cdot \log \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 \quad (3.17)$$

Finalement :

$$A = 20 \log \left(\frac{a_2}{a_1} \right) \quad (3.18)$$

3.2.4.3. Pertes dues à un désalignement

Des atténuations supplémentaires s'ajoutent si les deux fibres ont un désalignement axial, un désalignement angulaire ou des angles d'acceptances différentes. A cela, il faut ajouter les éventuels défauts de clivage et de polissage des extrémités des fibres.

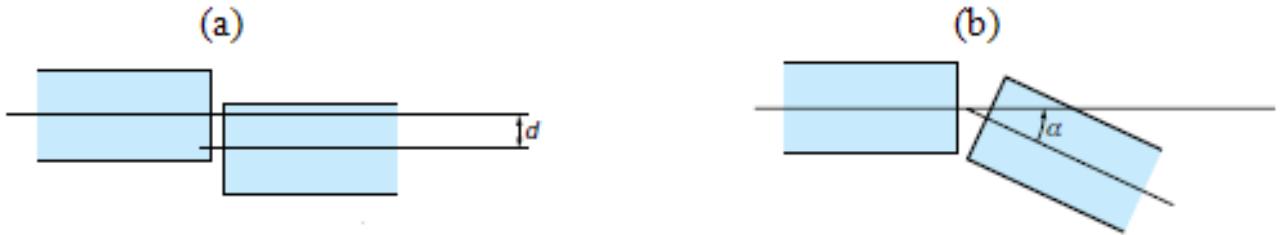


Figure 3.07 : a) Désalignement axial
b) Désalignement angulaire

Il faut réunir donc de nombreuses conditions afin de réaliser une connexion qui minimisera les pertes :

- Aplanir la face de contact, ou la rendre parfaitement sphérique par polissage, en veillant à ce qu'elle soit perpendiculaire à l'axe optique
- Aligner les deux fibres
- Vérifier la soudure s'il y en a et l'entourer d'une gaine de protection

Réaliser toutes ces conditions sur un câble de l'ordre de micromètre en laboratoire et plus encore sur le terrain n'est pas chose aisée. Cela requiert du matériel de pointe.

Si on ne soude pas les fibres, il faut alors travailler avec les nanotechnologies : des commutateurs microélectromécaniques sur lesquels on monte des miroirs qui assurent la redirection du signal à la sortie d'une fibre vers d'autres fibres.

3.3. Dispersion de la lumière dans les fibres optiques

En télécommunication, la lumière se propage dans la fibre sous forme d'impulsion lumineuse. Une impulsion de courte durée s'élargit et s'atténue lors de sa propagation dans la fibre. On parle de dispersion de la lumière.

Pour que la transmission soit bonne, il faut :

- Une faible atténuation : c'est à dire pouvoir distinguer en sortie les niveaux hauts (lumière) des niveaux bas (pas de lumière).
- Une faible dispersion : deux impulsions trop proches en entrée risquent de se confondre en sortie de la fibre : le signal de sortie est alors déformé.

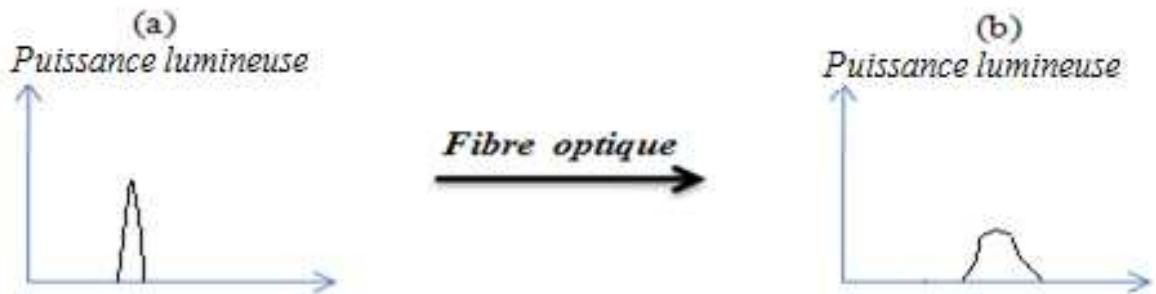


Figure 3.08 : a) Impulsion courte envoyée dans la fibre
b) Impulsion obtenue en sortie de fibre

3.3.1. Dispersion temporelle

La dispersion temporelle caractérise l'élargissement de l'impulsion lors de sa transmission dans la fibre. Elle est due à la dispersion modale et la dispersion chromatique. La quantité d'informations (ou le débit) pouvant être transférée est limitée.

3.3.2. Dispersion modale

Les fibres multimodes permettent à la lumière de se propager selon plusieurs modes. Chaque mode parcourt un chemin différent dans la fibre optique. Les ordres faibles se propagent près du centre du cœur alors que les ordres élevés s'approchent de la gaine. Ainsi une impulsion initiale transmise dans la fibre, transitant par plusieurs modes, ressort à des instants différents de la fibre selon les modes qui l'ont transportée. L'impulsion est élargie en sortie de fibre : il s'agit de la « dispersion modale ».

3.3.2.1. Cas d'une fibre à saut d'indice

Le délai modal est caractérisé par la durée de sortie ΔT_{max} de la puissance lumineuse. Il est mesuré à la mi-hauteur de l'impulsion de sortie de la fibre.

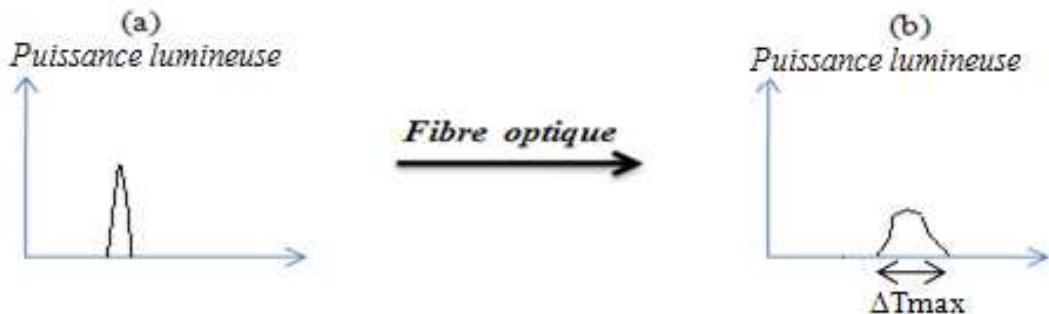


Figure 3.09 : Elargissement d'une impulsion

Par calcul de la variation de distance à parcourir entre les deux modes extrêmes, on détermine le délai modal d'une fibre à saut d'indice et on trouve :

$$\Delta T_{max} = \frac{n_1 \cdot L \cdot (ON/n_1)^2}{2c} \quad (3.19)$$

Avec

n_1 : indice du cœur

L : longueur de la fibre

ON : ouverture numérique

C : célérité de la lumière

On obtient un délai modal d'environ 20 à 30 ns par kilomètre de fibre.

En développant la formule (3.19), on peut exprimer le délai modal en fonction de la différence d'indice relative Δ :

$$\Delta T_{max} = \frac{n_1 \cdot L \cdot \Delta}{c} \quad (3.20)$$

3.3.2.2. Cas d'une fibre à gradient d'indice

La lumière transite dans la fibre sous plusieurs modes mais le délai modal de la fibre à gradient d'indice est plus faible que celui d'une fibre à saut d'indice. En effet, quand un mode s'écarte de

l'axe de la fibre, l'indice local diminue. Il en résulte une augmentation de la vitesse de transmission de la lumière. Ainsi les modes élevés ne sont pas autant retardés que pour une fibre à saut d'indice.

Le délai modal d'une fibre à gradient d'indice s'écrit :

$$\Delta T_{max} = \frac{n_1 \cdot L \cdot \Delta^2}{8c} \quad (3.21)$$

Il est quelques centaines de fois plus faible que celui d'une fibre à saut d'indice.

3.3.3. Dispersion chromatique

Une source lumineuse n'est jamais monochromatique. Son cœur d'indice n_1 disperse les couleurs car n_1 dépend de la longueur d'onde. Deux radiations voisines ressortent l'une après l'autre de la fibre.

Cette dispersion chromatique est beaucoup plus faible que la dispersion modale. Toutefois en l'absence de dispersion modale dans la fibre monomode, la dispersion chromatique devient prépondérante.

Pour accroître le débit d'information dans les fibres monomodes, on réduit au maximum la dispersion chromatique en choisissant des sources aussi monochromatiques que possible.

3.4. Fenêtres de transmission [7]

Compte tenu de l'atténuation et de la dispersion des fibres, on définit trois fenêtres de transmission :

La première fenêtre, de 0.8 à 0.9 μm , n'est pas un minimum d'atténuation ni de dispersion, mais un optimum d'utilisation des matériaux les plus économiques et performants : Silicium Si pour les détecteurs, Arséniure de gallium GaAs pour les émetteurs ; cette fenêtre permet des liaisons peu coûteuses à courtes distances ou en réseau local. Elle n'est utilisée qu'en multimode.

La deuxième fenêtre, autour de $1.3 \mu\text{m}$ est un minimum relatif d'atténuation (vers 0.5 dB/Km) et le minimum de dispersion chromatique qui est couramment utilisé en transmission à grande distance, mais à cause de leurs matériaux, les composants sont plus chers

La troisième fenêtre, vers $1.55 \mu\text{m}$, correspond au minimum absolu d'atténuation (moins de 0.2 dB/km) mais demande des composants beaucoup plus couteux, à cause du problème de la dispersion chromatique. D'utilisation plus récente, elle est surtout utilisée en liaisons sous-marines avec des portées de 150 à 200 Km et permet des débits de plusieurs Gbit/s. C'est surtout dans cette fenêtre que l'on pratique l'amplification optique.

Ces fenêtres concernent les fibres de silice, les plus utilisés en transmissions. On pourrait y ajouter une fenêtre à $0.67 \mu\text{m}$ (rouge) utilisée par les fibres en plastiques pour les liaisons à très courtes distances (moins de 100 m) dont l'intérêt essentiel est alors la sécurité électrique et électromagnétique. La fenêtre des fibres en verres fluorés, vers $2.5 \mu\text{m}$, est surtout exploitée en instrumentation infrarouge.

3.5. Eléments d'un système de transmission sur fibre optique [7] [8]

Considérée comme le support permettant les plus hauts débits, la fibre optique est une technologie aujourd'hui bien maîtrisée. Dans les fils métalliques, on transmet les informations par l'intermédiaire d'un courant électrique modulé. Avec la fibre optique, on utilise un faisceau lumineux modulé. Il a fallu attendre les années 60 et l'invention du laser pour que ce type de transmission se développe.

Dans une liaison point à point par fibre optique, on trouve (figure 3.10)

L'interface optique d'émission : a pour rôle de transformer le signal électrique en signal optique. Il contient principalement le composant optoélectronique d'émission, qui peut être une diode électroluminescente (DEL) ou une diode laser (DL). L'interface contient également des circuits d'adaptation et de protection ; il est relié au câble soit par un connecteur, soit par une fibre amorce qu'il faut raccorder. La modulation est en général une modulation d'intensité lumineuse obtenue par la modulation du courant qui traverse la diode d'émission.

L'interface optique de réception : contient une photodiode qui convertit le signal optique reçu en signal électrique. Elle est suivie d'un préamplificateur, dont la réalisation doit être soignée car c'est en général le bruit de celle-ci qui limite la puissance optique minimale détectable, et donc la portée du système. Suivant les amplifications, on trouve ensuite des circuits de filtrage ou de remise à niveau logique.

Les répéteurs. Lorsque la longueur de la liaison le nécessite, on insère un ou plusieurs répéteurs qui contiennent des interfaces de réception et d'émission reliés par des circuits d'amplification et de régénération pour les transmissions numériques. En effet, il est nécessaire de ramener le signal sous forme électrique pour l'amplifier.

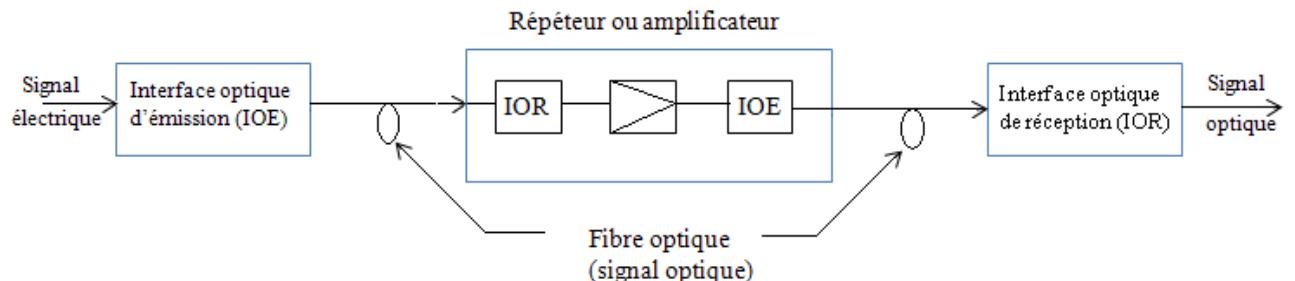


Figure 3.10 : liaison point à point sur fibre optique

Pour mieux comprendre, voici un schéma détaillé d'une liaison par fibre optique

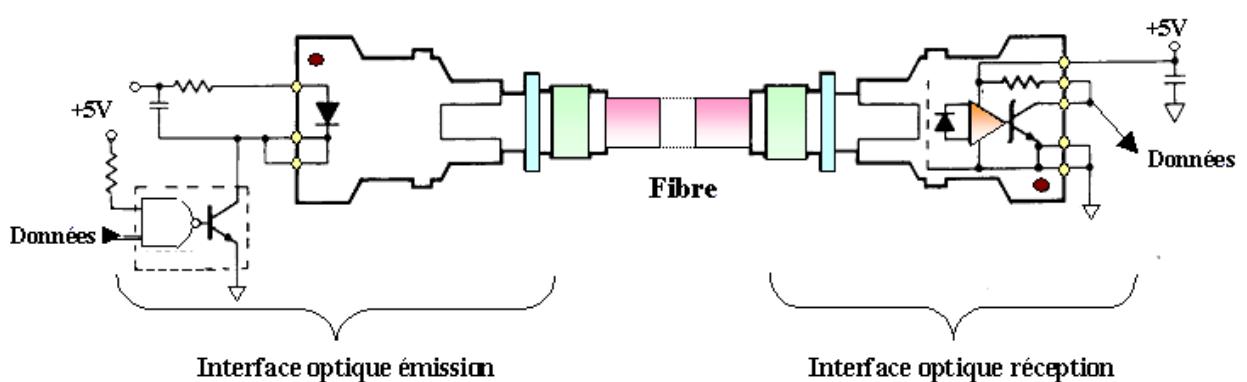


Figure 3.11 : Détail d'une liaison

3.6. Interface optique d'émission

Son rôle est de convertir le signal électrique en signal optique par l'intermédiaire d'une diode émettrice à semi-conducteurs. Ces composants peuvent en effet être modulés à des fréquences élevées sous des tensions faibles.

Les émetteurs optiques peuvent être de deux types :

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

3.6.1. La diode électroluminescente

3.6.1.1. Principe de l'émission de la lumière dans un semi-conducteur

Les semi-conducteurs sont des matériaux présentant une conductivité électrique intermédiaire entre les métaux et les isolants. Les semi-conducteurs sont primordiaux en électronique, car ils offrent la possibilité de contrôler, par divers moyens, aussi bien la quantité de courant électrique susceptible de les traverser que la direction que peut prendre ce courant.

Dans un semi-conducteur, un courant électrique est favorisé par deux types de porteurs : les électrons et les trous.

- La propagation par l'intermédiaire d'électrons est similaire à celle d'un conducteur classique : des atomes fortement ionisés passent leurs électrons en excès le long du conducteur d'un atome à un autre, depuis une zone ionisée négativement à une autre moins négativement ionisée.
- La propagation par l'intermédiaire de trous est différente : ici, les charges électriques voyagent d'une zone ionisée positivement à un autre ionisée moins positivement par le mouvement d'un trou créé par l'absence d'un électron dans une structure électrique quasi pleine

Le silicium pur est un semi-conducteur intrinsèque. Les propriétés d'un semi-conducteur (c'est-à-dire le nombre de porteurs, électrons ou trous) peuvent être contrôlées en le dopant avec des impuretés (autres matériaux). Un semi-conducteur présentant plus d'électrons que de trous est alors dit de type N, tandis qu'un semi-conducteur présentant plus de trous que d'électrons est dit de type P.

Dans les semi-conducteurs, la recombinaison d'une paire électron-trou est radiative, c'est-à-dire que son énergie, voisine de E_g , largeur de bande interdite (ou gap), est transférée à un photon de même énergie $h\nu$. C'est l'électroluminescence. On a donc émission d'une lumière relativement monochromatique. Une structure de diode permet de créer un grand nombre de recombinaisons de porteurs minoritaires injectés à travers la jonction, et donc une émission d'un grand nombre de photons.

Réciproquement, un photon absorbé par un semi-conducteur peut créer une paire électron-trou, à condition que $h\nu$ soit supérieur à E_g . C'est la photodétection, qui a diverses applications (cellules photovoltaïques, capteurs d'images, photorésistances...) et qui fait qu'un matériau réabsorbe sa propre émission.

Afin d'obtenir un bon rendement, on utilise, dans les composants destinés aux télécommunications optiques, des structures à hétérojonctions : la couche active très mince (moins d'un micron), est entourée de couches de confinement de gap plus élevé, ce qui fait que les recombinaisons et l'absorption sont confinées dans la couche active. Les couches de confinement sont transparentes aux photons émis. La réalisation d'une hétérojonction nécessite un accord de maille entre les différentes couches et le substrat.

3.6.1.2. Principe des diodes DEL

Une diode électroluminescente, couramment abrégée sous le sigle DEL et le plus souvent sous l'anglicisme LED (light-emitting diode) est un composant électronique capable d'émettre de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. C'est le composant le plus simple, qui réalise directement l'émission de photons par recombinaison des porteurs dans une hétérojonction polarisée en direct.

La puissance lumineuse émise est alors pratiquement proportionnelle au courant injecté, avec un rendement externe médiocre ; en particulier, seule une faible partie peut être couplée dans une fibre optique à cause de la forte divergence. Le spectre typique de l'émission spontanée, est continu et assez large (d'où forte sensibilité à la dispersion chromatique)

3.6.2. Diode LASER

Le mot LASER vient de l'acronyme anglais « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation » ce qui peut être traduit en français par effet d'amplification de la lumière par émission

stimulée. C'est un oscillateur cohérent (spectre très étroit) dont la fréquence est située dans la fréquence optique. Il émet donc de la lumière à très haute intensité. C'est pour cela qu'on l'utilise dans les communications optiques longues distances.

Une diode laser est un composant optoélectronique à base de matériaux semi-conducteurs. Elle émet de la lumière monochromatique cohérente destinée, entre autres, à transporter un signal contenant des informations ou à apporter de l'énergie lumineuse pour le pompage de certains laser et amplificateurs optiques.

3.6.2.1. Caractéristiques des diodes lasers

Ses caractéristiques sont proches de celles des lasers conventionnels. La plus faible longueur de la cavité, quelques centaines de micromètres au lieu de quelques dizaine de centimètres, entraîne une plus grande divergence du faisceau et des raies d'émission plus éloignées les unes des autres, ce qui facilite la création de lasers monomodes (une seule raie d'émission) par filtrage. Les états énergétiques se répartissent dans la structure de bandes du semi-conducteur à la place d'états énergétiques bien dans un gaz, par exemple, impliquant l'émission de raies moins fines.

Les avantages sont sa capacité, sa facilité de modulation à des fréquences élevées, ses faibles tensions de services et puissance consommée grâce à des rendements de l'ordre de 30% au lieu de 3% pour les autres types de laser.

3.6.2.2. Structure de base

Une diode laser est une jonction de semi-conducteurs, comme une diode électroluminescente classique. Elle possède trois zones caractéristiques : une couche de confinement de type N, une zone active et une couche de confinement de type P. D'une part, la lumière y est guidée dans la couche active, celle-ci ayant un indice de réfraction supérieur à celui des couches de confinement. La lumière sort par conséquent aux deux extrémités du guide. Cette structure est d'ailleurs utilisée dans les DEL à émission par la tranche, de rapidité et de rendement meilleurs que les DEL classiques, mais fonctionnant sur le même principe. Au contraire, la diode laser doit en plus remplir les deux fonctions de l'oscillateur optique qu'est tout optique :

- Amplification de la lumière par émission stimulée (un photon interagissant avec un atome excité crée un deuxième photon identique). Ceci nécessite une inversion de population obtenue par injection d'une densité de courant très élevée à travers la jonction. L'amplification se produit donc lorsque le courant dépasse une valeur de seuil notée I_{th} qui vaut 10 à 200 mA suivant la structure du composant. La lumière amplifiée provient de l'émission spontanée du laser, non nulle lorsqu'on est en dessous du seuil ; ce qui peut être une lumière incidente externe.

- Résonance permettant de sélectionner la ou les fréquences amplifiées.

Voici un tableau qui compare la diode Laser à la diode LED

Composants	D.E.L	Diode Laser
Puissance optique	< 1mW	Quelques mW
Couplage dans une fibre optique $\eta_c(\%)$	Quelques % (fibre multimode)	> 50%
Temps de montée	10ns	< 0.2ns
Bruit	Très faible	Faible
Coût	Faible	Elevé (lié à la fibre)
Applications	Transmission à faible distance	Transmission à longue distance sur fibres monomodes

Tableau 3.01 : Tableau comparatif entre DEL et diode Laser

3.7. Interface optique de réception

Elle est chargée de convertir le signal optique en signal électrique, en lui apportant le minimum de bruit. Elle comprend le photodéTECTeur : une photodiode PIN ou avalanche, suivi d'un préamplificateur.

Avant tout il est nécessaire de reprendre ce qui est une photodiode.

Une photodiode est un semi-conducteur formé par une simple jonction P-N photoréceptrice généralement non amplificatrice mais dans certaines conditions une amplification interne peut se produire (figure 3.12).

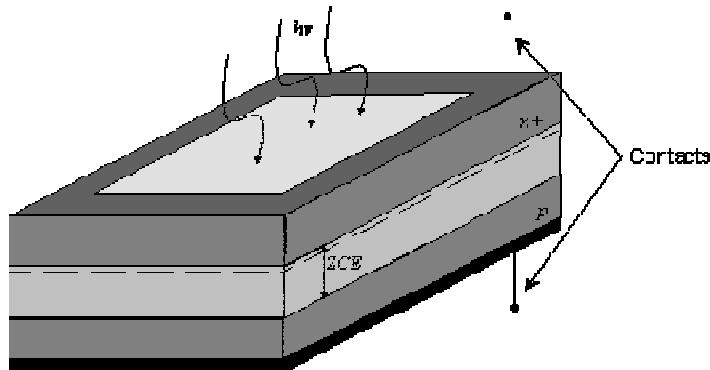


Figure 3.12 : Structure d'une photodiode

Dans cette configuration il y a apparition de trois zones (ou régions), une zone de charge d'espace (ZCE) et deux régions neutre de type N et P. Lorsque les photons pénètrent dans le semi-conducteur, pourvu qu'ils ont une énergie suffisante, ils peuvent créer des photoporteurs en excès dans les matériaux. Ces photoporteurs sont des paires d'électrons-trous. Chaque paire créée se traduit par la circulation dans le circuit extérieur d'une charge élémentaire. On observe ainsi une augmentation du courant. Vu que les photocourants créés sont très faible, il faut que la jonction soit polarisée en inverse, d'une part pour éviter le courant en direct de la photodiode qui est beaucoup plus important que les photocourants et d'autre part pour augmenter son rendement.

3.7.1. Photodiode PIN

Elle utilise la photodétection (conversion d'un photon en une paire d'électron-trou) dans un semi-conducteur. Comme on l'a vu, seuls les photons d'énergie $h\nu$ supérieure à E_g pourront être détectés.

Afin d'obtenir un bon rendement, on utilise une structure de diode PIN polarisée en inverse ; les photons sont absorbés dans la zone intrinsèque qui, du fait de la polarisation, est vide de porteurs mobiles ; les électrons et les trous ainsi créés ont une faible probabilité d'être recombinés. Ils sont séparés par un champ électrique E qui règne dans la zone intrinsèque et qui les dirige vers la zone n et p où ils sont majoritaires.

3.7.2. Photodiode à avalanche

Le signal reçu étant souvent très faible, il est nécessaire d'amplifier le photocourant. Le bruit du préamplificateur étant en général prépondérant, on peut avoir l'intérêt à utiliser un composant à gain interne, la photodiode à avalanche (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 contrôlé, aboutit au claquage de la jonction.

3.8. Les répéteurs ou amplificateurs optiques [1] [7] [25] [26]

Après des années de recherche, le développement des télécommunications a atteint la maturité de sa technologie. Les systèmes de transmission par fibre optique sont les seuls actuellement, capables de répondre par leur capacité élevée à la demande croissante du flux de données et en particulier les applications multimédia grand public.

L'évolution de ces systèmes a connu une véritable révolution avec la mise au point et le développement industriel des amplificateurs optiques, qui ont permis au multiplexage un meilleur contrôle des pertes, mais surtout a fourni un avantage économique décisif par sa capacité d'amplifier un grand nombre de longueurs d'onde sans distorsion du signal utile.

3.8.1. Définition et principe des amplificateurs optiques

Ce sont des équipements simples qui amplifient la lumière transmise dans les fibres optiques et augmentent sa puissance pour étendre la distance de transmission des systèmes à fibre optique.

Le signal est atténué au cours de son transfert dans la fibre optique. Les répéteurs optiques sont des dispositifs servant à régénérer le signal entre deux segments de fibres optiques¹ et 2. Ils captent l'information affaiblie en sortie de la fibre 1, la remettent en forme, l'amplifient et la réinsèrent dans la fibre 2 par modulation externe pour qu'elle parcourt encore quelques dizaines de kilomètres.

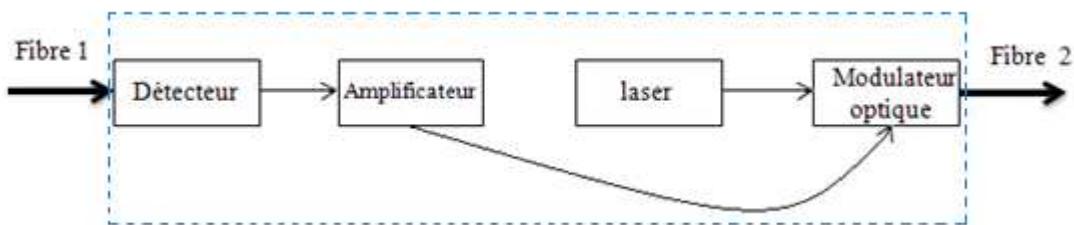


Figure 3.13 : Principe du répéteur

3.8.2. Différents types d'amplificateurs optiques

Il existe plusieurs types d'amplificateurs optiques :

3.8.2.1. Amplificateur à fibre dopée

- **Principe**

Un amplificateur à fibre dopée fonctionne à la manière d'un laser. Une portion de fibre optique est dopée et est pompée optiquement avec un laser afin de placer les ions de dopage dans un état excité. Lorsqu'un signal lumineux passe à travers ce morceau de fibre optique, il désexcite les ions par effet laser en produisant un photon en point identique au photon incident. Le signal lumineux a donc été doublé.

Par effet d'avalanche, l'amplification du signal se fait jusqu'à la sortie de la section dopée de la fibre optique.

- **Bruit dans les amplificateurs à fibre dopée**

Les amplificateurs à fibre dopée ont un bruit qui est dû à la désexcitation spontanée des ions. Cette désexcitation produit des photons dans des directions aléatoires, mais seule la direction avant intervient dans le bruit final observé en sortie de fibre.

La désexcitation dans les autres directions, notamment en sens inverse de la propagation normale du signal est également indésirable, car elle réduit le rendement de l'amplificateur en désexcitant des ions qui ne peuvent ainsi plus participer à l'amplification « utile » du signal.

Afin d'éviter un trop fort bruit d'amplification, on travaille à des gains modérées.

- **Amplificateur à fibre dopée d'Erbium**

Les fibres dopées erbium notées EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) ou AOFD (Amplificateur Optique à Fibre Dopée) sont simplement des fibres optiques de silice normale dans lesquelles ont été insérés des ions Erbium. Le signal optique à amplifier ainsi que le laser pompe apportant l'énergie sont couplés dans la fibre dopée et émettent dans la même direction. Ces systèmes permettent des communications à très longue distance. Ils ont été inventés en 1986 par un groupe des laboratoires AT&Bell.

En général, les longueurs d'onde de travail sont réparties en deux fenêtres. La bande Conventionnelle (C-Band) entre 1525 nm et 1565 nm et la bande Longue (appelée L-Band) entre 1570 nm et 1610 nm. Ces deux bandes peuvent être indifféremment amplifiées par ce type d'amplificateur, mais on préfère souvent utiliser des amplificateurs optimisés pour chaque application.

La principale différence entre les amplificateurs pour bande C ou L est que pour la bande L, la longueur de fibre dopée est nettement plus longue, ce qui nécessite un pompage optique moins fort.

Il existe deux longueurs d'onde pour le pompage optique de ce type d'amplificateur : 980 nm et 1480 nm. La longueur d'onde de 980 nm est habituellement utilisée pour des équipements à faible bruit. Par contre, comme la fenêtre d'absorption est relativement étroite, on doit utiliser des sources lasers stabilisées. La fenêtre d'absorption de la longueur d'onde de 1480 nm est plus large et est habituellement utilisé pour des amplifications de plus forte puissance. Le pompage optique à ces deux longueurs d'ondes est habituellement utilisé en conjonction dans les systèmes.

3.8.2.2. Amplificateurs Raman

Les amplificateurs Raman n'utilisent pas les transitions atomiques d'ions dopés terres-rares dans les fibres mais se basent sur un échange d'énergie par ce qu'on appelle diffusion de Raman. Ainsi, un faisceau laser pompe injecté dans la fibre dans le sens inverse de propagation du signal va amplifier la lumière décalée vers les basses fréquences de 13.2 THz, valeur caractéristique de la silice. Tous les matériaux ont un spectre Raman caractéristique. Pour les télécommunications optiques usuelles à 1550 nm, il faut donc utiliser un laser pompe autour de 1450 nm.

L'amplification Raman présente divers avantages. Elle ne nécessite pas de fibres spéciales et peut donc être utilisée directement dans les fibres de communication. De plus, l'amplification Raman introduit moins de bruit dans le signal amplifié. Elle présente également des atouts non-négligeables dans les communications multiplexées en longueurs d'ondes car sa bande passante de gain est supérieure aux autres techniques d'amplification.

3.8.2.3. Amplificateurs à semi-conducteurs

Les amplificateurs à semi-conducteurs ont la même structure qu'une diode laser de type Fabry-Pérot mais sans les dispositifs de réflexions aux extrémités pour éviter l'effet laser dans ce type d'application.

Ce dispositif d'amplification est de petite taille et a l'avantage que le pompage est électrique c'est-à-dire plus besoin de produire une lumière laser pour faire le pompage optique. Les amplificateurs optiques à semi-conducteurs ont fait l'objet de nombreuses études dans les années 80 et 90. Les points durs concernant l'utilisation de ces amplificateurs sont :

- La sensibilité à la polarisation résultant d'une géométrie de guide non circulaire : le gain varie d'environ 1 dB en fonction de l'état de polarisation du signal incident, ce qui est 10 fois trop élevé
- Les pertes de couplage élevées dues à la désadaptation entre le guide actif et la fibre de ligne.
- La faible puissance de sortie ainsi que les problèmes d'intermodulation entre canaux.

Ces défauts étant quasi inexistant dans les amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium. Actuellement, les amplificateurs optiques à semi-conducteurs font l'objet de recherches pour des applications à des fonctions de traitement tout optique du signal (régénération, démultiplexage temporel, transposition de fréquence), pour lesquels on cherche à exploiter les non linéarités de gain très rapides, à cause des distorsions des signaux.

3.9. Techniques d'accès [27] [28]

La technique d'accès définitie la façon d'utiliser le support physique pour le trafic des utilisateurs. Par conséquent, elle caractérise une communication par le mode, le débit ainsi que les performances du système en termes de qualité de service. Le transport par fibre optique définit des techniques d'accès un peu particulières à cause de la largeur de bande très grande : le multiplexage WDM.

3.9.1. WDM

WDM (Wavelength Division Multiplexing) ou multiplexage en longueur d'onde est une technique de multiplexage révolutionnaire qui, en succédant à deux autres modes de modulation, a marqué l'univers de réseaux hauts débits aussi bien au niveau des débits qu'au niveau des équipements.

3.9.1.1. Le multiplexage

Le multiplexage est une technique qui permet de faire passer sur un canal les signaux venant de N canaux.

Les signaux entrant dans le multiplexeur (MUX) et sortant du démultiplexeur (DEMUX) sont dits voies basse vitesse. Entre ces deux équipements se trouve une voie haute vitesse.

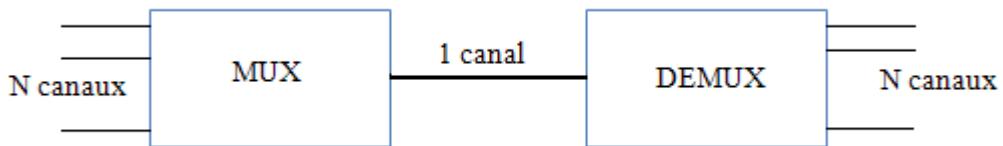


Figure 3.14 : Principe du multiplexage

Il existe 3 techniques de multiplexage :

- Le multiplexage fréquentiel : on effectue à chaque signal une bande passante particulière en s'assurant qu'aucune bande passante de voie basse vitesse ne se chevauche.
 - Le multiplexage temporel : on partage dans le temps l'utilisation de la voie haute vitesse en l'attribuant successivement aux différentes voies basses vitesses même s'il n'y a aucun signal à émettre.
 - Le multiplexage statique : basé sur le multiplexage temporel, on n'attribue la voie haute qu'aux voies basses vitesses qui ont effectivement quelque chose à transmettre.

3.9.1.2. FDM

FDM (Frequency division Multiplexing) est une technique de multiplexage par répartition de fréquence (MRF). Elle est utilisée pour accroître les débits sur paires torsadées et plus particulièrement des lignes téléphoniques.

Le multiplexage fréquentiel consiste à partager la bande de fréquence disponible en un certain nombre de canaux ou sous-bandes plus étroits et à affecter en permanence chacun de ces canaux à un utilisateur ou à un usage exclusif.

L'organisation du groupe primaire ou groupe de base utilisé en téléphonie est basé sur un multiplexage fréquentiel. Ce dernier consiste à regrouper 12 voix téléphoniques de 4000 Hz chacune (3000 Hz utilisables plus 2 espaces inter-bandes de 500 Hz) ce qui donne une largeur de bande de 48 kHz répartie entre 60 et 108 kHz.

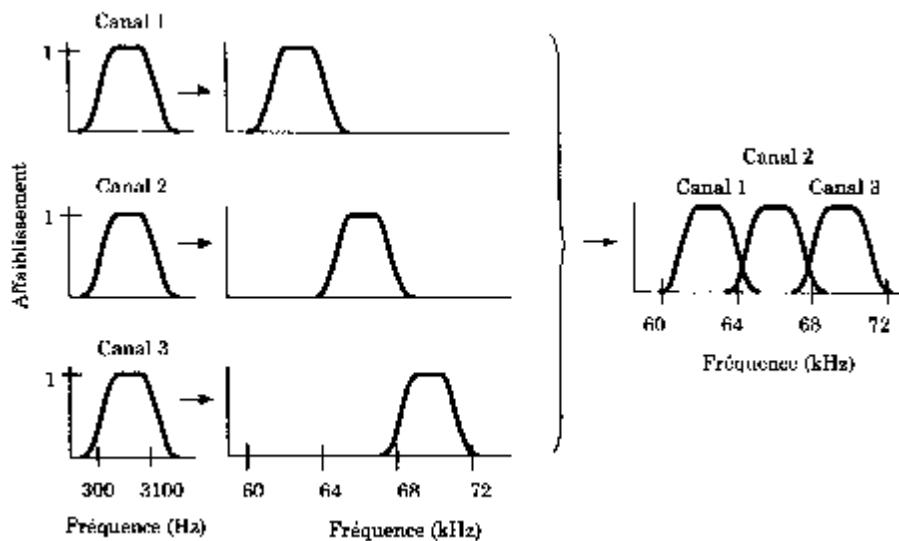


Figure 3.15 : Exemple de multiplexage fréquentiel de trois canaux téléphoniques

On trouve également un bon exemple de l'utilisation de FDM avec ADSL (Asynchronous Digital Subscriber Line). ADSL est né de l'observation qu'une ligne téléphonique possède une bande passante d'environ 1 Mhz dans laquelle seule, une largeur de bande de 4 KHz est utilisée pour les communications téléphoniques. Il reste donc une bande passante importante disponible pour un autre usage. C'est un multiplexage en fréquence qui va permettre son utilisation.

Frequency Division Multiplexing

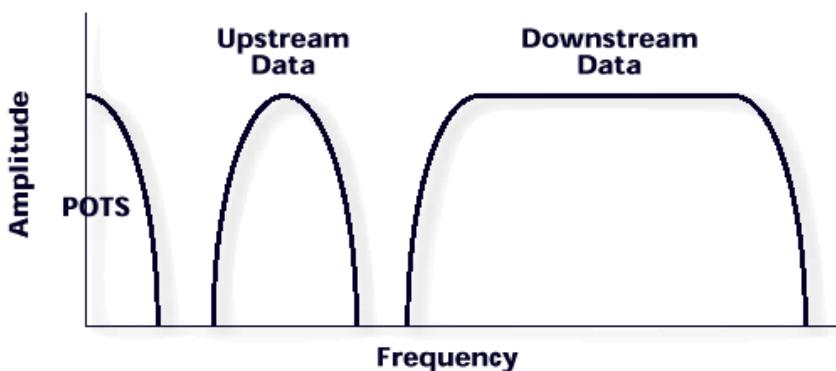


Figure 3.16 : Multiplexage des fréquences en ADSL

Une bande de 4 kHz est réservée pour la téléphonie classique (POTS : Plain Old Telephone Service).

Une bande est réservée pour le flux de données usager vers réseau. (Upstream Data : Voie montante).

Une bande est réservée pour le flux de données réseau vers usager. (Downstream Data : Voie descendante).

L'ensemble de la bande passante s'étend sur 1,1 MHz.

3.9.1.3. TDM

Le multiplexage TDM (Time Division Multiplexing) ou MRT (Multiplexage à répartition dans le temps) consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant appelé IT (intervalle de temps) et à tour de rôle pour chaque utilisateur.

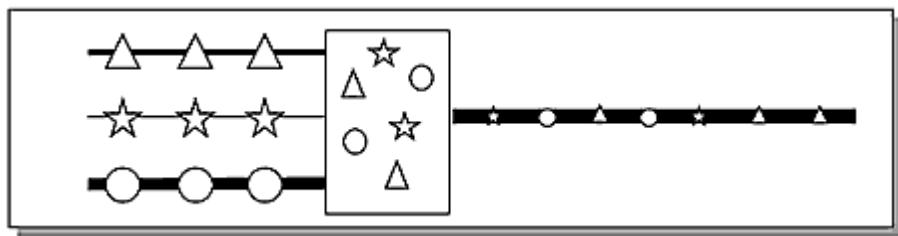


Figure 3.17 : Schéma de principe d'un multiplexage à répartition dans le temps

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

Pour émettre la suite de son message chaque utilisateur doit attendre une période afin que l'intervalle de temps qui lui a été attribué soit à nouveau disponible. L'émetteur n'émet donc pas en continu, mais les messages sont compressés et insérés dans l'IT alloué.

3.9.2. Principe de WDM

La fibre optique possède un avantage non exploité par les deux premiers multiplexages présentés. En effet, sur une fibre optique, il est possible d'utiliser plusieurs longueurs d'onde simultanément. C'est justement sur ce principe qu'une technique de modulation a été mise en place avec de nombreux avantages mais tout de même quelques limites.

L'idée est de reprendre le multiplexage fréquentiel utilisé dans les réseaux électriques pour l'appliquer dans le domaine optique. En effet, si un signal électrique est composé de plusieurs fréquences, un signal optique est lui composé de plusieurs longueurs d'ondes.

Le principe de multiplexage en longueur d'onde est donc d'injecter simultanément dans une fibre optique plusieurs trains de signaux numériques sur des longueurs d'ondes distinctes. La fibre optique se prête d'autant plus à cela que sa bande passante est très élevée (de l'ordre de 25 000 GHz).

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

Lorsque l'espacement utilisé entre deux longueurs d'ondes est égal ou inférieur à 0,8 nm ou lorsque plus de 16 canaux sont utilisés, on parle alors de multiplexage DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).

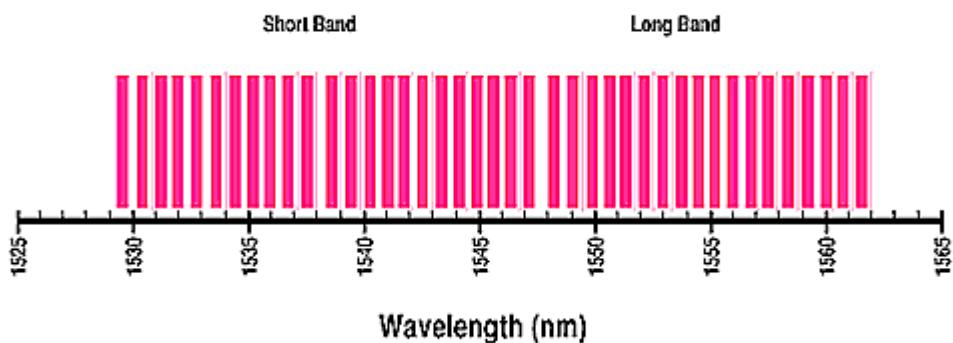


Figure 3.18 : Peigne des fréquences en DWDM

3.9.3. Principe d'une liaison WDM/DWDM

Les systèmes commercialisés aujourd'hui proposent 4, 8, 16, 32 et même 80 canaux optiques à 2,5 Gbit/s par canal. Les débits atteints avec de tels systèmes sont de 10, 20, 40, 80 et même 200 Gbit/s.

Un système à 16 canaux de 2,5 Gbit/s, soit 40 Gbit/s permet l'acheminement de 500 000 conversations téléphoniques simultanément sur une seule paire de fibre optique. Des recherches sont actuellement en cours pour accroître le débit offert sur chaque canal qui pourrait rapidement atteindre 10 Gbit/s.

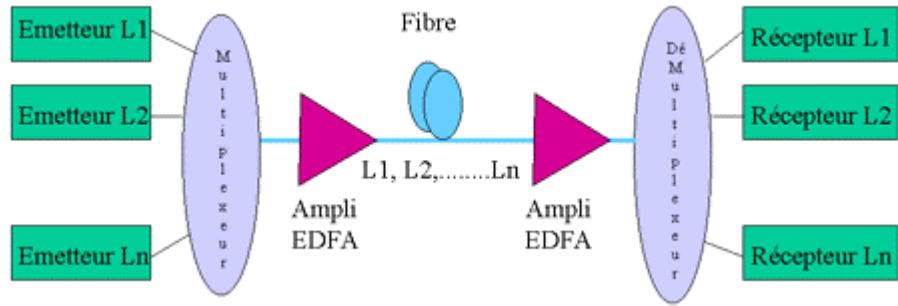


Figure 3.19 : Principe d'une liaison WDM/DWDM

A chaque multiplexage ou démultiplexage de longueur d'onde, il y a des pertes appelées pertes d'insertion. Pour compenser ces pertes et également réduire le bruit, on utilise un amplificateur à fibre dopée erbium EDFA (vu au paragraphe 3.8.2.1.3)

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

3.10. Conclusion

Le multiplexage WDM ou Wavelength Division Multiplexing est donc un procédé qui permet d'envoyer simultanément dans la même fibre optique plusieurs informations lumineuses en utilisant des longueurs d'ondes différentes. Le débit de la transmission est alors multiplié par le nombre de canaux disponibles.

CHAPITRE 4 : SIMULATION SOUS MATLAB DE L'OPTIMISATION DES REGENERATIONS DU SIGNAL DANS LA FIBRE OPTIQUE

Cette partie simulation se portera sur la conception d'un logiciel permettant d'une part de faire le calcul des pertes par connexion et d'autre part, de faire le bilan énergétique d'une liaison par fibre optique.

Le logiciel est élaboré sous MATLAB version 7.5.

4.1. Problématique

Comme nous l'avons affirmé auparavant, les fibres monomodes sont chères par rapport aux fibres multimodes. Par conséquent, pour ne pas trop investir lors d'une installation d'un réseau à fibres optiques, il faut à un moment ou à autre connecter les fibres entre elles. Mais joindre deux fibres est une tâche contraignante et minutieuse. Il est alors essentiel de minimiser les pertes car c'est aux connexions que le signal perd l'essentiel de sa puissance.

Pour cela, il faut :

- Bien aligner les deux fibres.
- Vérifier la soudure s'il y en a et l'entourer d'une gaine de protection
- Aplanir la face de contact, ou la rendre parfaitement sphérique par polissage, en veillant à ce qu'elle soit perpendiculaire à l'axe optique.

Réaliser toutes ces conditions sur un câble de l'ordre de micromètre en laboratoire et plus encore sur le terrain n'est pas chose aisée. Cela requiert du matériel de pointe. C'est pour cela qu'on a essayé de chercher une solution optimale. Comme on n'a pas le moyen de faire une étude nanotéchnologique, alors on procède à une autre méthode : la simulation.

4.2. Solution optimale

Reprendons la figure qu'on a vu dans le chapitre 3, paragraphe 3.2.4.2.

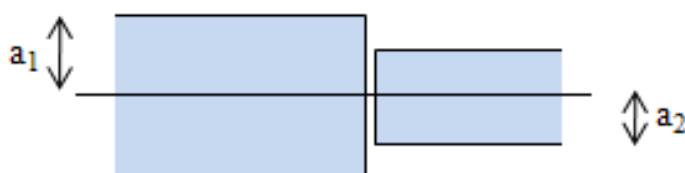


Figure 4.01 : Décalage transversal

La perte locale vaut :

$$A = 20 \log \left(\frac{a_2}{a_1} \right)$$

Où a_1 : rayon du cœur de la fibre 1

a_2 : rayon du cœur de la fibre 2

Idéalement, pour avoir une perte nulle il faut que :

$$a_1 = a_2 \quad (4.01)$$

Cette condition est impossible malgré la différence de diamètre de cœur entre fibres.

Pour y arriver, Il faut donc minimiser l'écart des diamètres de cœur entre les deux fibres.

Autrement dit, choisir deux fibres qui ont pour cœurs de dimensions voisines.

Par exemple, soit une fibre multimode à saut d'indice qui a pour cœur de diamètre $2a_1 = 150 \mu\text{m}$, connectée avec une fibre multimode à gradient d'indice dont le diamètre de cœur vaut $2a_2 = 100 \mu\text{m}$.

La perte vaut alors :

$$A = 20 \log \left(\frac{50}{75} \right) = -3.52 \text{ dB}$$

Maintenant, prenons toujours les deux fibres mais avec des cœurs de diamètres voisins tels que :

$2a_1 = 102 \mu\text{m}$ et $2a_2 = 98 \mu\text{m}$.

Dans ce cas, la perte vaut :

$$A' = 20 \log \left(\frac{49}{51} \right) = -0.34 \text{ dB}$$

En conclusion, on constate bien ici qu'il y a un grand écart entre les deux atténuations A et A' .

Voici un tableau comparant les dimensions de cœur entre fibres :

Structures	Diamètre du cœur
Monomode	$5 - 10 \mu\text{m}$
Multimode à gradient d'indice	$50 - 100 \mu\text{m}$
Multimode à saut d'indice	$100 - 200 \mu\text{m}$

Tableau 4.01 : Tableau comparatif des différents diamètres des cœurs

4.3. Bilan énergétique d'une liaison à fibre optique

4.3.1. Principe

Le bilan de liaison est un calcul par étapes permettant de déterminer la qualité d'une liaison.

Le but est de déterminer :

- L'atténuation totale de la liaison
- La puissance moyenne récupérée à la sortie

La solution optimale vue précédemment est utilisée pour améliorer le bilan d'une liaison à fibre optique.

4.3.2. Exemple de calcul

Soit la figure suivante :

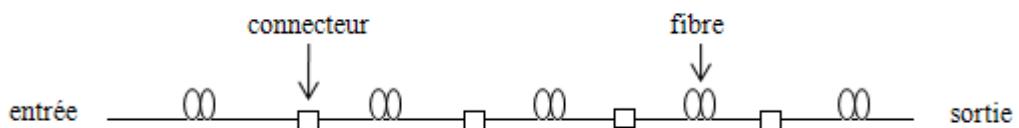


Figure 4.02 : liaison à fibre

A l'entrée d'une liaison à fibre, on injecte une puissance moyenne $P_{entrée} = 2,2 \text{ mW}$.

La liaison est constituée de 5 fibres de 2,8 km de longueur mises bout à bout, ayant une atténuation linéique de $A = 2,3 \text{ dB/km}$. Chaque connecteur produit une perte de 0,30 dB.

On souhaite alors calculer l'atténuation totale A_{totale} de la liaison, ainsi que la puissance moyenne P_{sortie} récupérée à la sortie.

▪ Calcul de l'atténuation totale

On a 4 connecteurs dans la liaison.

Pour 5 fibres de 2,8 km chacune, l'atténuation totale due aux pertes linéiques est :

$$A_1 = 5 \times 2,8 \times (-2,3) = -32,2 \text{ dB}$$

Pour les 4 connecteurs de la liaison, la perte est :

$$A_2 = 4 \times (-0,30) = -1,20 \text{ dB}$$

L'atténuation totale est alors :

$$A_{totale} = A_1 + A_2 = -32,2 - 1,20 = -33,4 \text{ dB}$$

- **Calcul de la puissance de sortie**

La puissance moyenne de sortie est déterminée à partir de la formule 3.16 :

$$A_{totale} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{sortie}}{P_{entrée}} \right)$$

On en déduit que :

$$P_{sortie} = P_{entrée} \cdot 10^{\frac{A_{totale}}{10}} \quad (4.01)$$

Par application numérique on a :

$$P_{sortie} = 2,2 \cdot 10^{\frac{-33,4}{10}} = 10^{-3} \text{ mW} = 1 \mu\text{W}$$

4.4. Présentation du programme de simulation

4.4.1. Logiciel MATLAB [30]

Matlab est un environnement puissant destiné au calcul scientifique. Il intègre le calcul matriciel et l'analyse numérique dans les fonctions de base. De plus, son architecture graphique orientée objets permet la génération de graphiques d'excellente qualité.

Matlab tire son nom de l'anglais et constitue une contraction de MATrix LABoratory. C'est donc un logiciel qui a été développé pour traiter spécifiquement les problèmes nécessitant un formalisme matriciel important.

L'ensemble Matlab est formé d'un noyau et de nombreuses bibliothèques de fonctions spécialisées. Le noyau est le logiciel Matlab en lui-même : c'était à l'origine le logiciel à part entière. Il comprend le langage Matlab et intègre de nombreuses fonctions mathématiques codées en langage Matlab sous forme de .m (les m-files).

Les bibliothèques de fonctions Matlab spécialisées permettent de personnaliser l'environnement de travail. Elles ont été ajoutées au noyau sous forme de « boites à outils » (ou Toolbox). Cette notion est très importante sous Matlab car les toolbox sont des outils qui permettent de répondre à des problèmes particuliers dans des domaines nécessitant des calculs assez puissants et aussi variés

que le traitement du signal, optimisation,...Les toolbox sont donc des bibliothèques de fonctions écrites en langage Matlab : elles regroupent des m-files par thème. Par exemple Image Processing (pour le traitement d'image), Signal Processing (pour le traitement du signal), Control system (pour l'automatique), ...

4.4.2. Présentation du programme de simulation

Le logiciel élaboré permettra de faire d'une part le calcul des pertes par connexion, et d'autre part de faire le bilan énergétique d'une liaison à fibres optiques.



Figure 4.03 : Fenêtre d'accueil

4.4.3. Partie calcul des pertes par connexion

On sait que pour monter un réseau à fibre optique, il faut raccorder les fibres entre elles. Pour pouvoir calculer les pertes à chaque connexion, il faut les deux paramètres suivants

- Le type de fibres
- Le diamètre du cœur de chaque fibre.

Pour choisir cette partie, on clique sur « calcul des pertes par connexion » dans la fenêtre « choix »

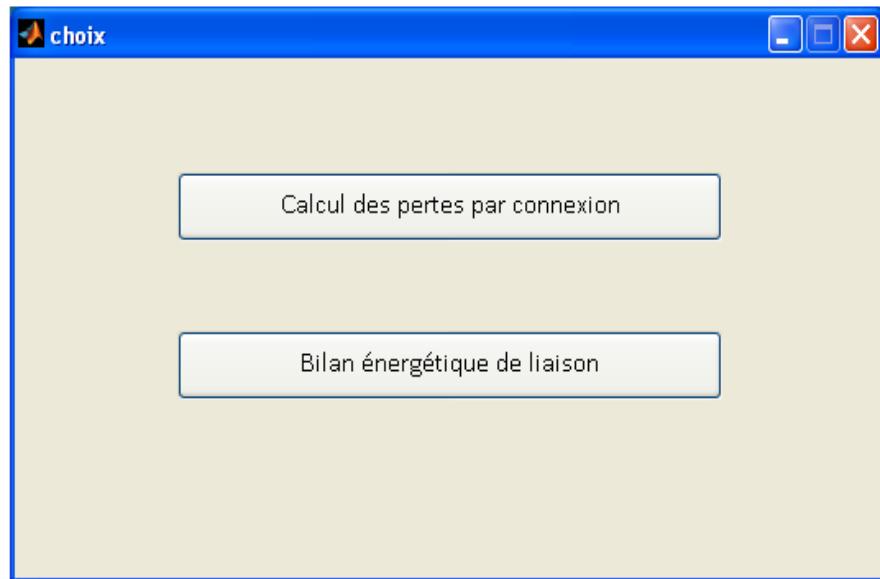


Figure 4.04 : Choix

Après avoir choisi « calcul des pertes par connexion », on introduit des données pour avoir un résultat. Le bouton « calculer » permet de donner les pertes à chaque connexion ainsi que l'atténuation totale.

■ Exemple de calcul

Considérons l'exemple suivant :

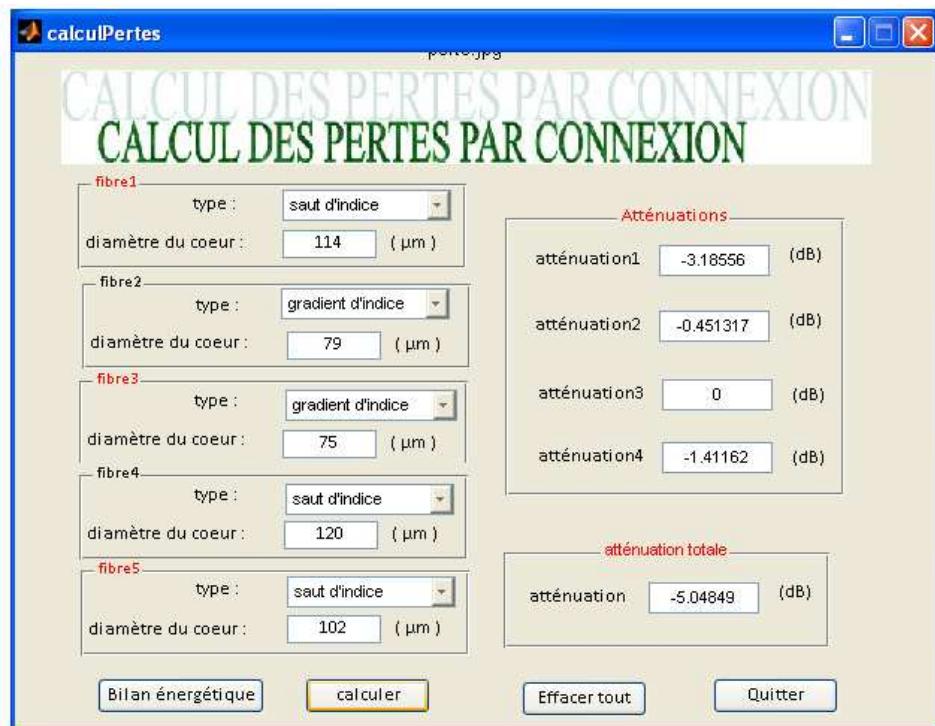


Figure 4.05 : Calcul des pertes avant optimisation

Pour les valeurs qu'on a entrées, l'atténuation vaut 5,04849 dB. En essayant d'appliquer la solution optimale c'est-à-dire d'avoisiner au maximum les valeurs de diamètres des cœurs des fibres, on trouve une atténuation moindre de 3,49909 dB.

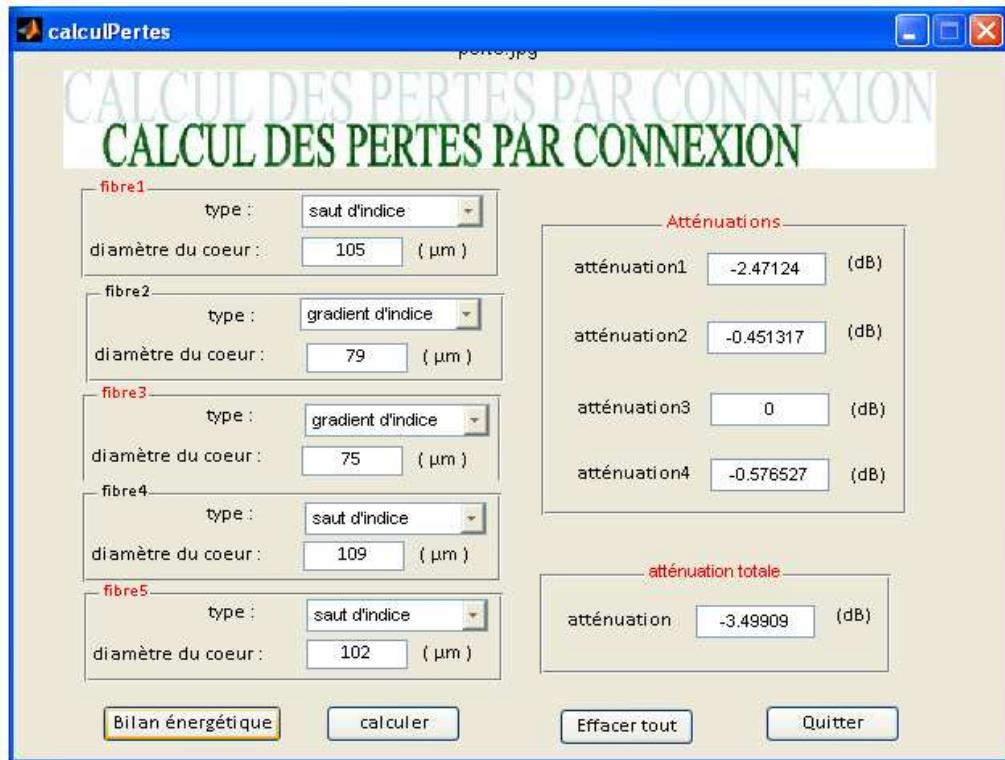


Figure 4.06 : Calcul des pertes après optimisation

4.4.4. Partie calcul du bilan énergétique d'une liaison à fibre optique

Cette partie comme nous l'avons dit auparavant a pour but de déterminer l'atténuation totale de la liaison, ainsi que la puissance moyenne de sortie.

Pour l'avoir, on clique sur « bilan énergétique de liaison » de la fenêtre « choix », ou directement en cliquant sur « bilan énergétique » de la fenêtre « calculPertes ».

Lorsque la fenêtre apparaît, on est alors invité à introduire six paramètres :

- Longueur de chaque fibre
- Nombres de fibre
- Nombres de connecteurs
- Puissance d'entrée
- Atténuation linéique
- Pertes totale des connecteurs

bilanEnergetique

bilan.jpg

BILAN ENERGETIQUE DE LA LIAISON

BILAN ENERGETIQUE DE LA LIAISON

Données fibre		Résultats	
Longueur de chaque fibre	<input type="text"/>	(Km)	Atténuation totale due aux pertes linéiques
Nombres de fibre	<input type="text"/>		<input type="text"/> (dB)
Nombres de connecteurs	<input type="text"/>		Atténuation totale de la liaison
Puissance d'entrée	<input type="text"/>	(mW)	<input type="text"/> (dB)
Atténuation linéique	<input type="text"/>	(dB/Km)	Puissance de sortie
Perte totale des connecteurs	<input type="text"/> (dB)	<input type="button" value="Afficher"/>	<input type="text"/> (mW)
		soit <input type="text"/> (μW)	
<input type="button" value="Calcul Pertes"/>	<input type="button" value="calculer"/>	<input type="button" value="Effacer"/>	<input type="button" value="quitter"/>

Figure 4.07 : Fenêtre pour générer le calcul du bilan énergétique de liaison

■ Exemple d'application

A l'entrée d'une liaison à fibre, on injecte une puissance moyenne $P_{entrée} = 2,2 \text{ mW}$.

La liaison est constituée de 5 fibres de 2,8 km de longueur mises bout à bout, ayant une atténuation linéique de $A = 2,3 \text{ dB/km}$.

On souhaite calculer l'atténuation totale A_{totale} de la liaison, ainsi que la puissance moyenne P_{sortie} récupérée à la sortie.

En prenant l'atténuation totale 5,04849 dB de la première simulation, on trouve une puissance égale à 28,6796 μW.

bilanEnergetique

bilan.jpg

BILAN ENERGETIQUE DE LA LIAISON

BILAN ENERGETIQUE DE LA LIAISON

Données fibre		Réultats	
Longueur de chaque fibre	1.2 (Km)	Atténuation totale due aux pertes linéaires	-13.8 (dB)
Nombres de fibre	5	Atténuation totale de la liaison	-18.8485 (dB)
Nombres de connecteurs	4	Puissance de sortie	0.0286796 (mW)
Puissance d'entrée	2.2 (mW)	soit	28.6796 (μW)
Atténuation linéique	2.3 (dB/Km)		
Perte totale des connecteurs	-5.04849 (dB)		
<input type="button" value="Afficher"/>		<input type="button" value="Calcul Pertes"/>	
<input type="button" value="calculer"/>		<input type="button" value="Effacer"/>	
		<input type="button" value="quitter"/>	

Figure 4.08 : Bilan énergétique avant optimisation

Pour l'atténuation totale 3,49909 dB après optimisation, la nouvelle puissance s'améliore en 40,9745 μW.

bilanEnergetique

bilan.jpg

BILAN ENERGETIQUE DE LA LIAISON

BILAN ENERGETIQUE DE LA LIAISON

Données fibre		Réultats	
Longueur de chaque fibre	1.2 (Km)	Atténuation totale due aux pertes linéaires	-13.8 (dB)
Nombres de fibre	5	Atténuation totale de la liaison	-17.2991 (dB)
Nombres de connecteurs	4	Puissance de sortie	0.0409745 (mW)
Puissance d'entrée	2.2 (mW)	soit	40.9745 (μW)
Atténuation linéique	2.3 (dB/Km)		
Perte totale des connecteurs	-3.49909 (dB)		
<input type="button" value="Afficher"/>		<input type="button" value="Calcul Pertes"/>	
<input type="button" value="calculer"/>		<input type="button" value="Effacer"/>	
		<input type="button" value="quitter"/>	

Figure 4.09 : Bilan énergétique après optimisation

4.5. Conclusion

On a pu faire une étude d'une liaison par fibre optique, par l'intermédiaire d'une simulation, même si c'est une étude un peu difficile. On peut dire que la différence entre la puissance d'entrée et de sortie est minimum lorsqu'on les diamètres de cœur des fibres sont voisins l'un par rapport à l'autre.

CONCLUSION

A travers ce mémoire, nous avons pu décrire la transmission par fibre optique tout en partant des notions fondamentales ainsi que les points forts qui lui ont valu aujourd’hui le premier choix en terme de support de transmission dans les télécommunications de haut débit. Ensuite, pour améliorer la capacité de transmission, nous sommes emmenés à étudier le problème de la fibre optique, qui est fondamentalement au niveau de connexion. C'est ainsi que des notions théoriques sont prises comme support afin de résoudre ce problème. Grâce à une simulation, on a pu trouver la solution optimale qui permet de diminuer la perte due aux connexions.

Un point essentiel évoqué dans ce document est le fait que lorsque l’installation du câble est terminée et que les fibres ont été équipées de connecteurs, il est nécessaire de tester les liaisons optiques obtenues. Les paramètres à considérer sont : l’atténuation par kilomètre, les pertes aux jonctions et connecteurs ainsi que le budget optique de la liaison. Ce dernier point permet de vérifier si la puissance du signal émis est encore suffisante en fin de liaison pour que celui-ci soit interprété correctement par le récepteur. Ce budget prend en compte l’atténuation de la fibre sur la liaison, les pertes aux connecteurs et les pertes aux raccordements.

ANNEXE 1 : Evolution de la technologie des systèmes à fibres optiques [29]

G1 (Première génération) : 1989 – 1991.

Les premiers systèmes à fibres optiques utilisaient des répéteurs en lignes basés sur une technologie silicium pour régénérer optoélectroniquement le signal affaibli après passage par chaque section de câble. La capacité de ces systèmes de transmission était de 0.28 Gbit/s par paire de fibre et ils opéraient dans la fenêtre à 1310 nm.

G2 (Seconde génération) : 1992 – 1995.

La technologie G2 constitua une amélioration par rapport à G1 puisque la capacité transmise devint alors de 0.565 Gbit/s par paire de fibres. Ces progrès furent rendus possibles par de meilleures performances des circuits au silicium du répéteur, ainsi que par l'utilisation de la fenêtre à 1550 nm.

G3 (Troisième génération) : 1995 – 1997.

Cette génération correspond à une évolution majeure dans le domaine de transmission optique : l'amplification optique par fibre dopée à l'erbium (Erbium Doped fiber Amplifier EDFA). Cette technique d'amplification, qui évite la régénération du signal dans chaque répéteur et donne accès au « tout optique », est beaucoup plus économique, efficace et fiable, et autorise l'accès à des bandes passantes de lignes considérables. Les limitations provenant de l'utilisation de circuits au silicium dans les répéteurs n'existent alors plus et la capacité passe à 5 Gbit/s par paire de fibres.

G4 (Quatrième génération) : 1998 – 2000.

La technologie EDFA est améliorée, ce qui permet des bandes passantes optiques plus importantes. Ces progrès, associés à d'autres progrès dans le domaine des techniques de filtrage optique, permettent de mettre en œuvre une première génération de systèmes WDM. La capacité transmise s'élève alors à 20 ou 40 Gbit/s (8 ou 16 couleurs à 2.5 Gbit/s) par paire de fibres.

G5 (Cinquième génération) : 2000 –2002

Les systèmes de la cinquième génération sont actuellement en cours d'installation ou mis en service depuis peu. La bande passante des EDFA est à nouveau améliorée, et la capacité par

couleur passe à 10 Gbit/s. ces systèmes fournissent des capacités de l'ordre de 160 Gbit/s par paire de fibres (16 couleurs à 10 Gbit/s).

G6 (Sixième génération) : 2001– ...

Cette génération a une base de conception semblable à la génération précédente, les caractéristiques des EDFA sont améliorées et les équipements terminaux, toujours à 10 Gbit/s, présentent de meilleures performances. Ainsi, tout en conservant des terminaux à 10 Gbit/s, ces systèmes peuvent multiplexer jusqu'à 100 couleurs par paire de fibres, offrant des capacités de l'ordre de 1 Tbit/s. La génération G6 est dans les catalogues des constructeurs, pour des mises en service en 2002-2003.

G7 (Septième génération)

Certains Centres de recherche de Développement annoncent leurs avancées dans la conception des systèmes DWDM utilisant une technologie à 40 Gbit/s par couleur, avec environ 40 couleurs par fibre. D'autres centres de recherches pensent que la prochaine génération ne sera qu'une amélioration de G6 pour laquelle on accroitra encore le nombre de couleurs à 10 Gbit/s (soit 150 à 200*10 Gbit/s). La spécification de cette génération délicat car on approche des limites physiques de la bande passante de la technologie EDFA. Les problèmes de distorsion de couleurs à 40 Gbit/s sont également difficiles à résoudre.

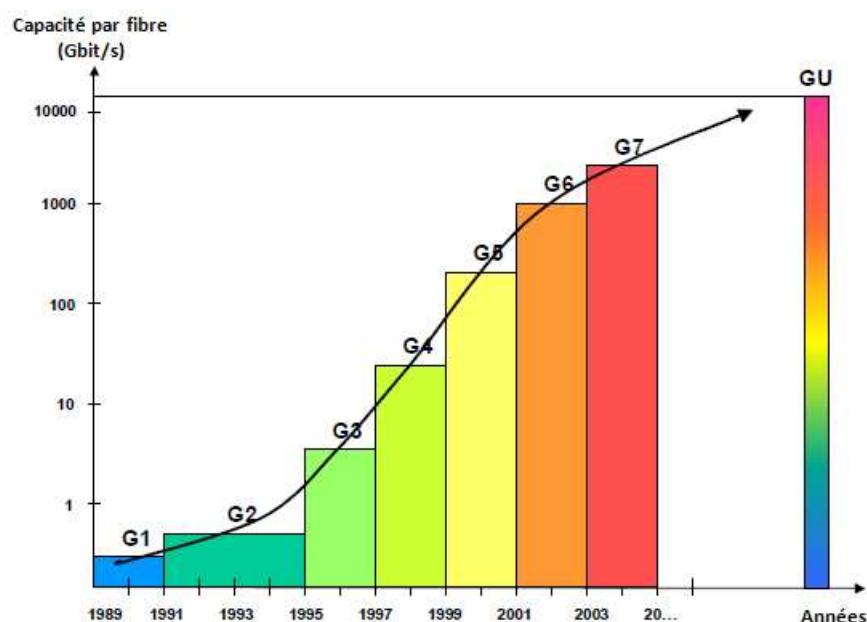


Figure A1 : Evolution de la capacité des systèmes de transmissions optiques

ANNEXE 2 : Fabrication d'une fibre optique [1] [19]

La fabrication d'une fibre optique ayant les qualités requises pour les télécommunications a nécessité la mise au point de procédés techniques très complexes. La technique générale de fabrication comporte d'abord la fabrication d'une préforme, que l'on tire ensuite en fibre.

La préforme est un barreau cylindrique qui représente fidèlement la géométrie de la fibre. Ce barreau peut être imaginé comme une grosse fibre de courte longueur. Une fois étirée, la fibre préserve le même profil d'indice et le même rapport entre le diamètre du cœur et celui de la gaine que ceux présents dans la préforme du départ. En l'étirant, on obtient un cylindre beaucoup plus long mais beaucoup plus mince. Ainsi, une préforme de dix centimètres de diamètre et d'un mètre de long peut former par étirement une fibre de 150 kilomètres et de quelques micromètres de diamètre.

Etapes de fabrication

La préforme est fabriquée par dépôt des composants chimiques sous forme vapeur, à l'intérieur d'un tube de verre, ou en périphérie d'une tige de substrat. Les couches successives de cœur et de gaine ainsi superposées subissent ensuite une compression (opération de restreint), pour l'obtention de la préforme.

La dernière étape (le fibrage) étire la préforme pour lui donner la dimension finale de la fibre. En fin d'opération, la fibre est recouverte de diverses gaines protectrices puis enroulée en bobines.

Préparations des composants

Le verre et les dopants sont préparés en phase vapeur à partir des chlorures ou des bromures correspondants. Ces produits extrêmement purs créent des préformes pour fibres monomodes et multimodes d'atténuations linéaires de l'ordre de 0,2 dB / km.

La variation de l'indice du verre est obtenue par des additifs, les dopants : l'oxyde de bore (B_2O_3) diminue l'indice alors que l'oxyde de phosphore (P_2O_5) et l'oxyde de germanium (GeO_2) l'augmentent.

Obtention de la préforme

Pour fabriquer des préformes, on utilise la méthode du dépôt chimique en phase vapeur, plus communément appelée méthode CVD (Chemical Vapour Deposition). Cette technique permet de fabriquer des verres de très haute qualité à partir d'une réaction chimique de produits en phase vapeur. Les chlorures utilisés (SiCl_4 , GeCl_4 , POCl_3 , BCl_3) sont transformées en oxydes (SiO_2 , GeO_2 , P_2O_5 , B_2O_3). La silice (SiO_2) constitue la matière de base de la préforme. L'addition de GeO_2 et de P_2O_5 augmente l'indice de la silice ; l'addition de B_2O_3 le réduit.

Il existe plusieurs variantes de cette technique pour la fabrication de préformes.

- La technique par dépôt interne est appelée MCVD (Modified Chemical Vapour Deposition ou dépôt de vapeurs chimiques modifiées).
- Il y a aussi les techniques de dépôts externes des oxydes. Ce sont la méthode OVPO (Outside Vapour Phase Oxydation) et la méthode VAD (Vapor Axial disposition).

Fibrage

La préforme est placée verticalement et est étirée pour donner à la fibre la dimension finale.

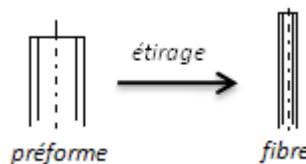


Figure A2 : Etirage du préforme

Les différentes étapes du fibrage sont :

- Chauffage vers 200°C de la préforme dans un four,
- Etirage du verre en fusion pour un diamètre de 125 μm sans revêtement,
- Contrôle du diamètre de la fibre,
- Gainage par un premier revêtement de 210 μm de diamètre pour améliorer sa résistance,
- Deuxième gainage par un second revêtement de 240 μm de diamètre,
- Mesure de la tension de fibrage,
- Enroulement de la fibre en bobine.

ANNEXE 3 : Code source de la simulation

Fenêtre d'accueil :

```
function varargout = accueil(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @accueil_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @accueil_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function accueil_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
axes(handles.axes1);
cla;
imshow('logo.jpg')
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function varargout = accueil_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function quitter_Callback(hObject, eventdata, handles)
close('accueil')

function suivant_Callback(hObject, eventdata, handles)
close('accueil')
choix
```

Bilan énergétique de la liaison

```
function varargout = bilanEnergetique(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @bilanEnergetique_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @bilanEnergetique_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
```

```

function bilanEnergetique_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
axes(handles.axes1);
cla;
imshow('bilan.jpg')
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function varargout = bilanEnergetique_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function a1_Callback(hObject, eventdata, handles)
lfib = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(lfib)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Erreur','Error');
end
handles.metricdata.lfib = lfib;
guidata(hObject,handles)

function a1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function a2_Callback(hObject, eventdata, handles)
nfib = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(nfib)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Erreur','Error');
end
handles.metricdata.nfib = nfib;
guidata(hObject,handles)

function a2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function a3_Callback(hObject, eventdata, handles)
ncon = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(ncon)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Erreur','Error');
end
handles.metricdata.ncon = ncon;
guidata(hObject,handles)

function a3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');

```

```

end

function a4_Callback(hObject, eventdata, handles)
pent = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(pent)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Erreur','Error');
end
handles.metricdata.pent = pent;
guidata(hObject,handles)

function a4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function a5_Callback(hObject, eventdata, handles)
alin = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(alin)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Erreur','Error');
end
handles.metricdata.alin = alin;
guidata(hObject,handles)

function a5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function a6_Callback(hObject, eventdata, handles)
ptot = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(ptot)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Erreur','Error');
end
handles.metricdata.ptot = ptot;
guidata(hObject,handles)

function a6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function b1_Callback(hObject, eventdata, handles)

function b1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

```

        set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function b2_Callback(hObject, eventdata, handles)

function b2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function b3_Callback(hObject, eventdata, handles)

function b3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function b4_Callback(hObject, eventdata, handles)

function b4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function afficher_Callback(hObject, eventdata, handles)
load sauve.mat atot
set(handles.a6, 'String', atot);

function precedent_Callback(hObject, eventdata, handles)
calculPertes

function calculer_Callback(hObject, eventdata, handles)
atper =
(handles.metricdata.lfib*handles.metricdata.nfib*handles.metricdata.alin)*(-1);
set(handles.b1, 'String', atper);
load sauve.mat atot
atotal=atper+atot;
set(handles.b2, 'String', atotal);
ps=handles.metricdata.pent*(10^(atotal/10));
set(handles.b3, 'String', ps);
psa=ps*10^3;
set(handles.b4, 'String', psa);

function quitter_Callback(hObject, eventdata, handles)
close('bilanEnergetique')

function effacer_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.b1, 'String', '');
set(handles.b2, 'String', '');
set(handles.b3, 'String', '');

```

Calcul des pertes par connexion

```
function varargout = calculPertes(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @calculPertes_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @calculPertes_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function calculPertes_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
axes(handles.axes1);
cla;
imshow('perte.jpg')
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function varargout = calculPertes_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function t1_Callback(hObject, eventdata, handles)

function t1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function d1_Callback(hObject, eventdata, handles)
dfib1 = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(dfib1)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Erreur','Error');
end
handles.metricdata.dfib1 = dfib1;
guidata(hObject,handles)

function d1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function t2_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```

function t2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function d2_Callback(hObject, eventdata, handles)
dfib2 = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(dfib2)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Erreur','Error');
end
handles.metricdata.dfib2 = dfib2;
guidata(hObject,handles)

function d2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function t3_Callback(hObject, eventdata, handles)

function t3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function d3_Callback(hObject, eventdata, handles)
dfib3 = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(dfib3)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Erreur','Error');
end
handles.metricdata.dfib3 = dfib3;
guidata(hObject,handles)

function d3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function t4_Callback(hObject, eventdata, handles)

function t4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');

```

```

end

function d4_Callback(hObject, eventdata, handles)
dfib4 = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(dfib4)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Erreur','Error');
end
handles.metricdata.dfib4 = dfib4;
guidata(hObject,handles)

function d4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc           && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function t5_Callback(hObject, eventdata, handles)

function t5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc           && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function d5_Callback(hObject, eventdata, handles)
dfib5 = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(dfib5)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Erreur','Error');
end
handles.metricdata.dfib5 = dfib5;
guidata(hObject,handles)

function d5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc           && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function a1_Callback(hObject, eventdata, handles)

function a1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc           && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function a2_Callback(hObject, eventdata, handles)

function a2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function a3_Callback(hObject, eventdata, handles)

function a3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function a4_Callback(hObject, eventdata, handles)

function a4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function a5_Callback(hObject, eventdata, handles)

function a5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function precedent_Callback(hObject, eventdata, handles)
bilanEnergetique

function calculer_Callback(hObject, eventdata, handles)
a1 = 20*log10(handles.metricdata.dfib2 / handles.metricdata.dfib1);
if a1>0
    a1=0;
end
set(handles.a1, 'String', a1);
a2 = 20*log10(handles.metricdata.dfib3 / handles.metricdata.dfib2);
if a2>0
    a2=0;
end
set(handles.a2, 'String', a2);
a3 = 20*log10(handles.metricdata.dfib4 / handles.metricdata.dfib3);
if a3>0
    a3=0;
end
set(handles.a3, 'String', a3);
a4 = 20*log10(handles.metricdata.dfib5 / handles.metricdata.dfib4);
if a4>0
    a4=0;
end
set(handles.a4, 'String', a4);
atot = a1+a2+a3+a4;

```

```
set(handles.a5, 'String', atot);
save 'sauve.mat' atot

function quitter_Callback(hObject, eventdata, handles)
close('calculPertes')

function effacertout_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.d1, 'String', '');
set(handles.d2, 'String', '');
set(handles.d3, 'String', '');
set(handles.d4, 'String', '');
set(handles.d5, 'String', '');
set(handles.a1, 'String', '');
set(handles.a2, 'String', '');
set(handles.a3, 'String', '');
set(handles.a4, 'String', '');
set(handles.a5, 'String', '');
```

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] F.Weil, Technosup, *Optique moderne : « Polarisation, laser, fibres optiques »*
- [2] E. Randriantsiresy, *Notion de base sur la transmission numérique*, cours 4^{ème} année, Dép. Tél.- ESPA, A.U. :2006-2007
- [3] http://www2.fsg.ulaval.ca/opus/physique_534/optique
- [4] J.J. Claire, Préface du Pr. Francon, *Télécommunications optiques : « Introduction à l'optique intégrée »* : Masson, Paris, 1977
- [5] http://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_optique
- [6] C.C. Cordat - 2003, « *La Fibre optique* », <http://mptranss.free.fr/cc/fibre.html>
- [7] Hermès : « *technologie des télécoms* », Paris 1995
- [8] G. Pujolle, « *Les Réseaux* » : 5^è édition, Best of, Eyrolles
- [9] C. Cimelli, R. Bourgeron : « *Guide du technicien en électronique* », éditions hachette
- [10] CNAM, Cours B11- Partie 2 - Chapitre 5, « *Transmission des Télécommunications* »
- [11] Ecole nationale supérieure des télécoms : <http://www.enst-bretagne.fr/>
- [12] Dép. Physique, « *Complément sur les fibres optiques* », Université de Sherbrooke, Faculté des Sciences
- [13] <http://www.telcite.fr/nwdm.html>
- [14] <http://www.zonehd.net/dossier/la-fibre-optique-une-technologie-de-pointe/4/>
- [15] L. Yves : « *supports de transmission* », 2002
- [16] C. Caleca, « *La fibre optique* », <http://christian.caleca.free.fr/fibroptique/>
- [17] ESI-NET01, La fibre optique : <http://www.esi.01.com>
- [18] C. François, P. Christophe : « *Réseaux et routage optique* », DESS TNI-ASR, promotion 2004

- [19] P-A. Bélanger : « *Les fibres optiques : supplément d'électromagnétisme appliqué* », Université Laval, Canada
- [20] P. Lecoy, *traité des nouvelles technologies de télécommunications :* « *Télécommunications optiques* », HERMES
- [21] Tout sur la fibre optique : <http://www.unige.ch/seinf/jfl/fibre/welcome.html>
- [22] Laboratoire de fibres optiques : <http://opt-fibre.phys.polymtl.ca/>
- [23] G. Pinson, Physique appliquée, « *liaison par fibre optique, Emetteurs et récepteurs de lumière, photocoupleur* », optoélectronique, <http://www.syscope.net/elec/>
- [24] M. Joindot, I. Joindot : « *Fibres optiques pour télécommunications* ». Techniques de l'ingénieur, Traité électronique E7 110.
- [25] Dr. Temmar. A, Institut des télécommunications, « *caractéristique de l'amplificateur optique à fibre dopée à Erbium* »
- [26] http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Amplificateur_optique&action=edit
- [27] O. Adamus, E Panetta, « *Nouvelles technologies réseaux Sonet / WDM* », IR3-2003
- [28] http://deptinfo.cnam.fr/Enseignement/memoires/LUSTEAU.Franck/Pages/Les_multiplexages.html
- [29] J.P. Thomine, L.L.Fur, « *La technologie des fibres optiques* »
- [30] P. A. Randriamantsoa, *Outils Informatiques pour les Math-Physique*, cours 1^{er} année, Dép. Tél.- ESPA, A.U. : 2003-2004

FICHE DE RENSEIGNEMENTS

Nom : RAMAROSON

Prénom : Harilantosoa

Adresse de l'auteur : Lot A 187 Anatihazo Isotry

ANTANANARIVO – 101

Madagascar

E-mail :Rhlanto@yahoo.fr

Tél : 0330280772

Titre de mémoire : OPTIMISATION DES REGENERATIONS DU SIGNAL DANS LA
FIBRE OPTIQUE

Nombre de pages : 84

Nombres de tableau : 03

Nombre de figures : 47

Mots clés :

- Fibre optique
- Connecteurs
- Atténuations

Directeur de mémoire : RATSIHOARANA Constant

RESUME

On peut trouver dans ce livre les bases théoriques ainsi que les paramètres de transmission des fibres optiques. Il met aussi en évidence les atouts de la fibre optique en tant que support physique de transmission. A la fin de cet ouvrage, on aperçoit une simulation d'une liaison par fibre optique afin de mieux voir la qualité de la liaison, surtout au niveau de l'énergie.

ABSTRACT

In this book, we can find the theoretical bases as well as the parameters of transmission of optical fiber. It also highlights the assets of optical fiber as a physical support of transmission. At the end of this work, we see a simulation of a fiber optic link in order to better see the quality of the connection, especially on the energy level.