

## TABLE DES MATIERES

### REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIERES .....	I
--------------------------	---

NOTATIONS.....	VII
----------------	-----

ABREVIATIONS.....	X
-------------------	---

INTRODUCTION.....	1
-------------------	---

CHAPITRE 1 GENERALITES SUR LA FIBRE OPTIQUE.....	3
--	---

1.1 Les supports de transmission .....	3
--	---

1.1.1 Câble bifilaire .....	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.....	6
---	---

1.2.1 Historique .....	6
------------------------	---

1.2.2 Avantages de la fibre optique .....	8
---	---

1.2.3 Domaines d'utilisation des fibres optiques.....	9
---	---

1.2.4 Description de la fibre optique .....	10
---	----

1.2.5 Propagation de la lumière .....	11
---------------------------------------	----

1.2.5.1 Spectre de la lumière .....	11
-------------------------------------	----

1.2.5.2 La réflexion et la réfraction .....	11
---	----

1.2.5.3	Loi de Snell-Descartes .....	13
<b>1.2.6</b>	<b><i>Angle limite et condition de guidage .....</i></b>	<b>14</b>
<b>1.2.7</b>	<b><i>Propagation de la lumière dans la fibre optique .....</i></b>	<b>16</b>
<b>1.2.8</b>	<b><i>Angle d'acceptance et Ouverture numérique.....</i></b>	<b>17</b>
<b>1.2.9</b>	<b><i>Angle critique .....</i></b>	<b>19</b>
<b>1.2.10</b>	<b><i>Différence relative d'indice.....</i></b>	<b>19</b>
<b>1.2.11</b>	<b><i>Fréquence normalisée.....</i></b>	<b>20</b>
<b>1.3</b>	<b><i>Conclusion .....</i></b>	<b>20</b>
 <b>CHAPITRE 2 DIFFERENTS TYPES DE FIBRES OPTIQUES.....</b>		<b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>Notion de mode de propagation .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2</b>	<b>Fibre multimode .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.1</b>	<b><i>Fibre à saut d'indice.....</i></b>	<b>23</b>
2.2.1.1	Profil d'indice.....	23
2.2.1.2	Caractéristiques .....	24
2.2.1.3	Modes .....	25
<b>2.2.2</b>	<b><i>Fibre à gradient d'indice.....</i></b>	<b>25</b>
2.2.2.1	Profil d'indice.....	25
2.2.2.2	Exemples .....	26
2.2.2.3	Ouverture numérique.....	26
2.2.2.4	Caractéristiques .....	27
2.2.2.5	Modes .....	27
<b>2.3</b>	<b>Du multimode au monomode .....</b>	<b>28</b>
<b>2.4</b>	<b>Fibre monomode.....</b>	<b>28</b>
<b>2.4.1</b>	<b><i>Conditions de monomodalité d'une fibre optique .....</i></b>	<b>29</b>
2.4.1.1	Longueur d'onde critique ou de coupure .....	29

2.4.1.2	Profil d'indice d'une fibre monomode .....	30
<b>2.4.2</b>	<b><i>Diamètre de mode d'une fibre monomode</i></b> .....	<b>31</b>
2.4.2.1	Définition du diamètre de mode .....	31
2.4.2.2	Valeurs du diamètre de mode .....	32
2.4.2.3	Facteur de confinement .....	33
<b>2.5</b>	<b>Bilan général des différentes fibres</b> .....	<b>34</b>
<b>2.6</b>	<b>Les Recommandations G 652 à G 657 de l'UIT</b> .....	<b>35</b>
<b>2.7</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>41</b>
<b>CHAPITRE 3 LA DISPERSION CHROMATIQUE</b> .....		<b>42</b>
<b>3.1</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2</b>	<b>Définition d'un milieu dispersif</b> .....	<b>42</b>
<b>3.3</b>	<b>Conséquence sur la vitesse de groupe</b> .....	<b>42</b>
<b>3.4</b>	<b>Dispersion de la lumière dans les fibres optiques</b> .....	<b>43</b>
3.4.1	<i>Dispersion temporelle</i> .....	44
3.4.2	<i>Dispersion modale</i> .....	44
3.4.2.1	Cas d'une fibre à saut d'indice .....	44
3.4.2.2	Cas d'une fibre à gradient d'indice .....	45
3.4.3	<i>Dispersion chromatique</i> .....	45
<b>3.5</b>	<b>La dispersion chromatique dans une fibre optique</b> .....	<b>46</b>
3.5.1	<i>Mesure de la dispersion chromatique</i> .....	47
3.5.2	<i>La conséquence directe de la dispersion chromatique : la limitation du produit capacité×distance</i> .....	50
<b>3.6</b>	<b>Les solutions pour la dispersion chromatique</b> .....	<b>51</b>
3.6.1	<i>Fibres compensatrices de dispersion</i> .....	51
3.6.2	<i>Les fibres à dispersion décalées</i> .....	53

3.6.3	<i>Réseau de Bragg</i> .....	54
3.6.4	<i>Les solitons</i> .....	55
3.7	<b>Conclusion</b> .....	60
<b>CHAPITRE 4 TRANSMISSION MULTI-CANAL SUR FIBRE OPTIQUE</b> .....		61
4.1	<b>Introduction</b> .....	61
4.2	<b>Paramètres de transmission des fibres optiques</b> .....	61
4.2.1	<i>Eléments d'un système de transmission sur fibre optique</i> .....	61
4.2.2	<i>Interface optique d'émission</i> .....	63
4.2.2.1	La diode électroluminescente.....	63
4.2.2.2	Diode LASER .....	64
4.2.3	<i>Interface optique de réception</i> .....	67
4.2.3.1	Photodiode PIN .....	68
4.2.3.2	Photodiode à avalanche .....	69
4.2.3.3	Seuil typique de détection pour un taux d'erreur binaire de $10^{-9}$ .....	69
4.2.4	<i>Mesure de la bande passante</i> .....	70
4.2.4.1	Bande passante en régime impulsionnel .....	70
4.2.4.2	Bande passante en régime harmonique .....	71
4.2.5	<i>Les modulations</i> .....	72
4.2.6	<i>Le mélange à quatre ondes</i> .....	73
4.3	<b>Etude de la transmission multi-canal sur fibre optique</b> .....	74
4.3.1	<i>Principe</i> .....	74
4.3.2	<i>Schéma synoptique de la liaison</i> .....	74
4.3.3	<i>Description des différents blocs</i> .....	74
4.3.3.1	Le codeur.....	74
4.3.3.2	Le commutateur.....	74

4.3.3.3	Le module émetteur.....	75
4.3.3.4	L'émetteur .....	75
4.3.3.5	La fibre optique .....	75
4.3.3.6	Le filtre.....	75
4.3.3.7	Le détecteur .....	76
4.3.3.8	Le module de réception .....	77
4.3.3.9	Le décodeur .....	77
<b>4.3.4</b>	<b><i>Evaluation des paramètres de la transmission.....</i></b>	<b>77</b>
4.3.4.1	Les retards .....	78
4.3.4.2	Le facteur de rallongement.....	80
<b>4.4</b>	<b>Simulation d'une transmission multi-canal sur fibre optique monomode.....</b>	<b>80</b>
<b>4.4.1</b>	<b><i>Position du problème.....</i></b>	<b>80</b>
4.4.1.1	Problématique.....	80
4.4.1.2	Solution .....	81
<b>4.4.2</b>	<b><i>Exemple de calcul.....</i></b>	<b>81</b>
4.4.2.1	Enoncé.....	81
4.4.2.2	Calculs .....	81
<b>4.4.3</b>	<b><i>Description de l'outil de simulation.....</i></b>	<b>84</b>
<b>4.4.4</b>	<b><i>Avantages de la transmission multi-canal.....</i></b>	<b>88</b>
<b>4.4.5</b>	<b><i>Inconvénients.....</i></b>	<b>89</b>
<b>4.5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>89</b>
<b>CONCLUSION.....</b>		<b>86</b>
<b>ANNEXES.....</b>		<b>87</b>

<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>99</b>
<b>PAGE DE RENSEIGNEMENTS .....</b>	<b>102</b>
<b>RESUME.....</b>	<b>103</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>103</b>

## NOTATIONS

### 1. Minuscules latines

$a$	Rayon du cœur
$c$	Vitesse de la lumière dans le vide
$h$	Constante de Planck $6,63.10^{-34}$ [J.s]
$\ell$	angle limite
$n$	Indice de réfraction
$n_0$	Indice de réfraction de l'air
$n_1$	Indice de réfraction du cœur
$n_2$	Indice de réfraction de la gaine
$r$	Facteur de rallongement
$v$	Vitesse de propagation de la lumière dans un milieu transparent
$v_g$	Vitesse de groupe
$x$	Exposant du profil d'indice

### 2. Majuscules latines

$D$	Coefficient de dispersion
-----	---------------------------

CK	‘Clock’ (Horloge)
F	Facteur de confinement
L	Longueur de la fibre
N	Nombre de modes
ON	Ouverture Numérique
P <sub>c</sub>	Puissance dans le cœur
P <sub>g</sub>	Puissance dans la gaine
<b><math>R_{lim}</math></b>	Rayon de courbure limite
S	Pente de dispersion
S <sub>D</sub>	Seuil de détection
S <sub>0</sub>	Seuil limite
V	Fréquence normalisée

### 3. Minuscules grecques

$\alpha$	Coefficient d’atténuation
$\beta$	Constante de propagation
$\beta_2$	Dérivée seconde de la constante de propagation
$\lambda$	Longueur d’onde de la lumière
$\lambda_0$	Longueur d’onde dans le vide
$\lambda_c$	Longueur d’onde critique ou longueur d’onde de coupure



$2\omega_0$  Diamètre de mode

#### 4. Majuscules grecques

$\Delta$  Différence relative d'indice

$\Delta\lambda$  Etendue spectrale de la source de lumière

$\Delta\tau$  Retard différentiel

$\Delta T_{max}$  Délai modal

$\theta_{olim}$  Angle d'acceptance

$\theta_1$  Angle d'incidence dans le milieu d'indice  $n_1$

$\theta_2$  Angle de réfraction dans le milieu d'indice  $n_2$

$\theta_c$  Angle critique

## **ABBREVIATIONS**

dB	Décibel
DEL	Diode Electroluminescent
DFB	Distributed Feed Back
DL	Diode Laser
DSF	Dispersion Shifted Fiber
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
FP	Fabry-Pérot
FWM	Four Wave Mixing
GaAs	Arséniure de Gallium
GHz	Gigahertz
GPRS	Global Packet RadioSystem
IOE	Interface Optique d'Emission
IOR	Interface Optique de Réception
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
nm	Nanomètre
NRZ	Non Retour à Zero
NZDSF	Non Zero Dispersion Shifted Fiber
ppm	Partie par million

PDA	Photodiode à Avalanche
RZ	Retour à Zero
SMF	Single Mode Fiber
TDMA	Time Division Multiple Access
THz	Terahertz
UIT	Union International de Télécommunication
WDM	Wavelength Division Multiplexing
ZCE	Zone de Charge d'Espace
μm	Micromètre

## INTRODUCTION

Dès l'apparition de sources laser, à très faible divergence, on note un regain d'intérêt pour la transmission d'informations par voie optique. Assez rapidement, les problèmes posés par la transmission d'un point à un autre en atmosphère libre conduisent à envisager le guidage de la lumière, puis à remplacer l'atmosphère libre par un milieu protégé. On n'est plus très loin des fibres optiques, fondées sur le principe des fontaines lumineuses : la lumière peut rester confinée dans un mince fil de verre constituant un guide diélectrique (appelé généralement le cœur de la fibre), le guidage étant obtenu par une gaine dont l'indice de réfraction est inférieur à celui du cœur : c'est le rôle joué par le cœur dans une fontaine lumineuse.

Jusqu'en 1970, l'atténuation des verres les meilleurs restait supérieure à quelques centaines, pour ne pas dire des milliers, de décibels par kilomètre. La firme Corning Glass Works annonça la première 20, puis 0,5 dB/km : les applications potentielles très nombreuses permirent alors d'assister à un développement spectaculaire des recherches tant sur les matériaux et les méthodes de fibrage que dans le domaine des sources lumineuses et des photodétecteurs. Diodes électroluminescentes, diodes laser, photodiodes PIN et à avalanche, sont désormais inscrites au catalogue de nombreux fabricants, et certaines fibres ont été annoncées avec une atténuation de 0,2 dB pour un kilomètre à 1550 nm : ainsi après 15 kilomètres de parcours dans du verre, il subsiste encore la moitié de l'énergie lumineuse de départ.

La fibre optique apparaît alors, aujourd'hui, comme la solution miracle pour les réseaux câblés hauts débits. A part sa très faible atténuation et sa grande bande passante elle offre aussi une vitesse de transmission relativement élevée due au fait que l'onde lumineuse se propage plus rapidement que l'onde hertzienne. Ainsi, la fibre optique, par rapport aux autres supports de transmission par câble, semble avoir toutes les qualifications techniques nécessaires pour satisfaire les besoins croissants des actuels réseaux de télécommunication et des réseaux informatiques. Néanmoins, étant le meilleur support de transmission recensé jusqu'ici, la fibre optique n'en est pas moins un support parfait. De nombreux paramètres tels que les différentes atténuations dues à la structure de la fibre, les atténuations au niveau de la ligne de transmission, ainsi que celles au niveau des connexions doivent être améliorés, et des recherches sont encore en cours dans ce sens. La dispersion chromatique qui est une des principales causes de la limitation de la capacité des fibres optiques, constitue encore actuellement, un problème important dans les transmissions par fibres. Cependant, bien que des solutions aient déjà été avancées, elles apportent parfois de

nouveaux problèmes, nous poussant à rechercher en permanence d'autres solutions. Ce qui nous amène au présent travail qui s'intitule « Réduction des effets de la dispersion chromatique sur une fibre optique par une transmission multi-canal ».

Ce type de transmission devrait permettre de rallonger la longueur d'une liaison par fibre optique sans changer sa capacité.

Nous avons alors adopté un plan comprenant quatre chapitres :

Le premier chapitre, « Généralités sur la fibre optique », nous donnera un bref aperçu sur les différents supports de transmission généralement utilisés avant de parler de la fibre optique ainsi que ses avantages et son domaine d'utilisation.

Le second 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 chapitre suivant, s'intitulant « La dispersion chromatique », parlera de ce problème que représente la dispersion chromatique dans une transmission par fibre optique et exposera brièvement, par la même occasion, quelques solutions déjà proposées sur le marché pour y remédier.

Enfin, le dernier chapitre sera axé sur l'étude de la transmission multi-canal sur une fibre optique, en commençant par définir les différentes caractéristiques d'une transmission optique. Nous allons voir dans cette partie la problématique fondamentale de ce mémoire, ainsi que la solution que nous proposons.

# CHAPITRE 1

## GENERALITES SUR LA FIBRE OPTIQUE

### 1.1 Les supports de transmission

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 » [1] [2].



**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 torsadée. 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 apparaît 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. Selon leur altitude, on distingue trois types d'orbites :

- Low Earth Orbit (LEO) : orbite basse, jusqu'à 1 500 km



- Medium Earth Orbit (MEO) : orbite allant de 5 000 à 15 000 km et au-delà de 20 000 km (les ceintures de Van Hallen, entre 1 500 et 5 000 km puis entre 15 000 et 20 000 km, rendent ces altitudes inexploitable)
- Geostationary Earth Orbit (GEO) : orbite à 35 786 km au-dessus de l'équateur. La durée d'une révolution est fonction de l'altitude et varie de 100 minutes à basse altitude pour atteindre 24 heures à 35 786 km.

## **1.2 Transmission par fibre optique**

### ***1.2.1 Historique***

La possibilité de transporter de la lumière le long de fines fibres de verre fut exploitée au cours de la première moitié du XX<sup>e</sup> 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 été 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 [3] [4] [5] [6].

### ***1.2.2 Avantages de la fibre optique***

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 [7] [8].

### ***1.2.3 Domaines d'utilisation des fibres optiques***

Le principal est bien entendu celui des télécommunications, mais les fibres optiques débordent largement ce secteur et connaissent un grand nombre d'applications industrielles [1] [7] [9]:

- **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 infections 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***

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 quelques 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 une enveloppe protectrice qui sert à protéger la fibre optique.



**Figure 1.02 :** *Structure d'une fibre optique*

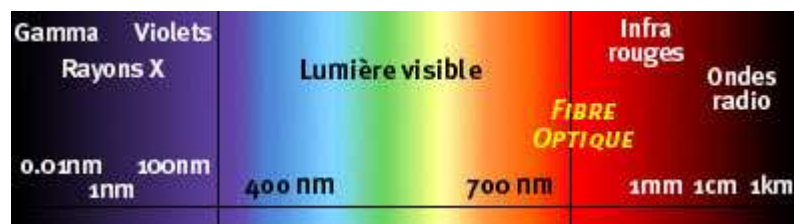
Le système de câblage en fibre optique repose sur des câblages regroupant un nombre pair de fibres : une pour la transmission, une pour la réception [10] [11] [12].

### 1.2.5 Propagation de la lumière

Pour bien comprendre le fonctionnement de la fibre optique, il est important de rappeler toutes les caractéristiques de la lumière [5] [13].

#### 1.2.5.1 Spectre de la lumière

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 [14]. Voici le schéma du spectre lumineux



**Figure 1.03 :** *schéma du spectre lumineux*

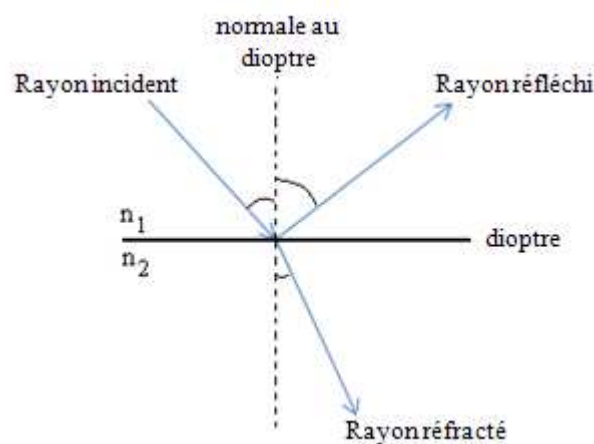
#### 1.2.5.2 La réflexion et la réfraction

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 =  $3 \cdot 10^8$  [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 :

▪

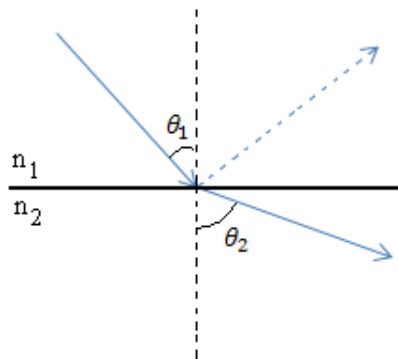
#### Première loi :

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  $\theta_1$  : angle d'incidence dans le milieu d'indice  $n_1$

$\theta_2$  : 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 dioptré.

▪ Pour  $n_1 < n_2$ , l'angle de réfraction est plus grand que l'angle d'incidence

### 1.2.6 Angle limite et condition de guidage

L'angle limite est la valeur de l'angle incident  $\theta_1$  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  $90^\circ$ , l'angle d'incidence atteint une limite. Au-delà de cet angle limite, noté  $\ell$ , le faisceau réfracté disparaît car le faisceau incident est alors entièrement réfléchi (figure 1.06b). On parle alors de « réflexion totale ».

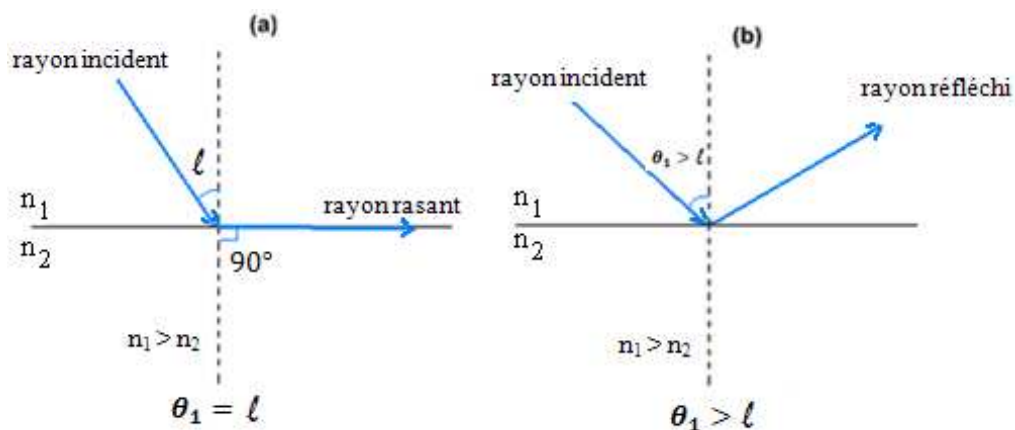


Figure 1.06 : a) Le faisceau réfracté n'existe plus

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  $42^\circ$ .

Ainsi,

- Si l'angle d'incidence est inférieur à  $42^\circ$ , le faisceau est transmis dans l'air
- S'il vaut  $42^\circ$ , il est alors rasant
- S'il est plus grand que  $42^\circ$ , 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.

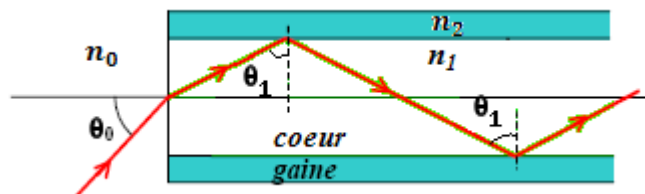
Elle est obtenue par la relation :

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

### 1.2.7 Propagation de la lumière dans la fibre optique

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 [1] [11] [13].

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

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  $\theta_{0lim}$  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 [15].

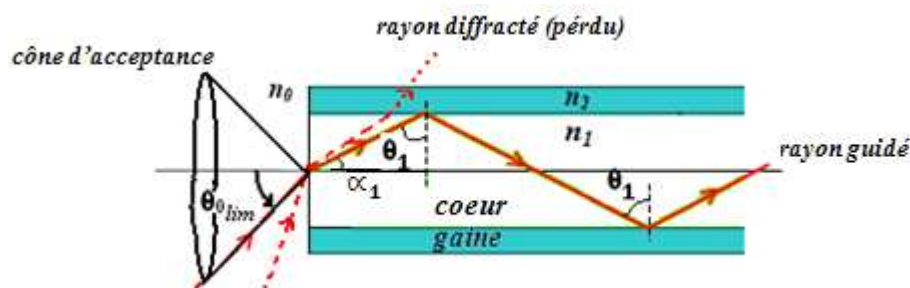


Figure 1.08 : Angle d'acceptance

Un faisceau de lumière rentre dans la fibre avec un angle  $\theta_0$  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  $\theta_0$ .

En appliquant le principe de Descartes, formule (1. 02), l'angle dans le matériau d'indice  $n_1$  est  $\alpha_1$  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 :

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

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  $\theta_{0lim}$ .

L'ouverture numérique O.N. ou en anglais « numeric aperture » (N.A.) d'une fibre caractérise l'angle limite  $\theta_{0lim}$  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  $\theta_{0lim}$  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:  $\sin \theta_{olim} = 0.21$  ou  $2\theta_{olim} = 24^\circ$

### 1.2.9 Angle critique

L'angle critique  $\theta_c$  vaut  $90^\circ - \theta_{olim}$

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

On a:

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

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  $\Delta$  est définie par :

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

$\Delta$  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 100 $\mu\text{m}$ , celui de la gaine 140 $\mu\text{m}$ . On peut déterminer :

- l'angle limite  $\ell = 80.6^\circ$
- l'angle critique  $\theta_c =$
- l'angle d'acceptance  $\theta_{olim} =$
- l'ouverture numérique  $O.N. = 0.$
- la différence d'indice relative  $\Delta = 1.3$

On remarque que  $\Delta$  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 :

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

Avec :

- a: rayon du cœur de la fibre
- O.N. : ouverture numérique de la fibre
- $\lambda_0$  : 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 également 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**

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 [1] [16].

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**

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 répartit 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  $\mu\text{m}$  pour un diamètre extérieur de la gaine de 125  $\mu\text{m}$  [5] [7].

Par exemple : la fibre 50 / 125, est une fibre de 50  $\mu\text{m}$  de diamètre de cœur et 125  $\mu\text{m}$  de diamètre de gaine. Elle est la plus utilisée en télécommunications pour des distances moyennes.

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

Les fibres 85 / 125 sont utilisés en vidéocommunication.

- Le problème de la fibre multimode est qu'aucun des modes n'arrive au même moment en bout de fibre. Ce qui entraine 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.

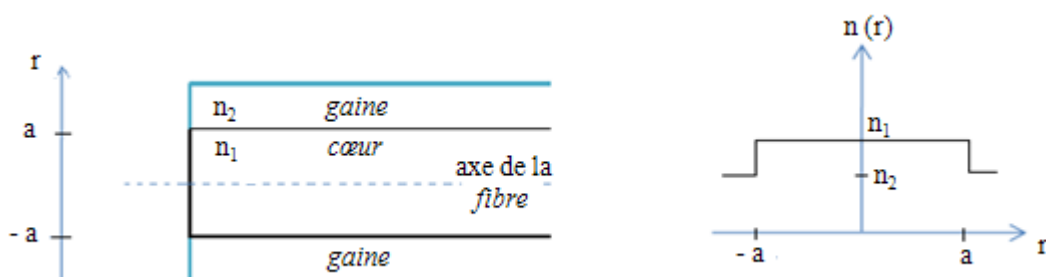
### 2.2.1 Fibre à saut d'indice

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 :  $n(r)$ .

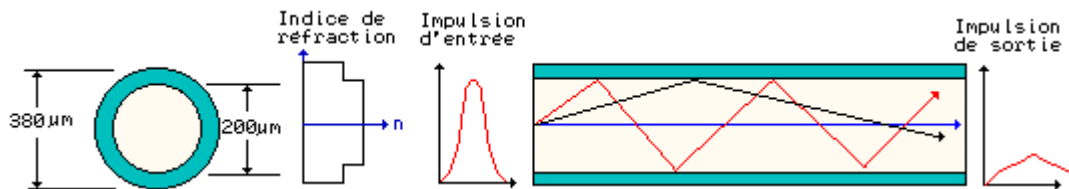
Soit  $2a$  le diamètre du cœur.



**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  $\mu\text{m}$  pour un diamètre total de la fibre (c'est-à-dire cœur + gaine) de 380  $\mu\text{m}$ . 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 certains faisceaux 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 Mhz\*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 [6] [17] [18].

### 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

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 [1] [18].

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  $r > a$ )

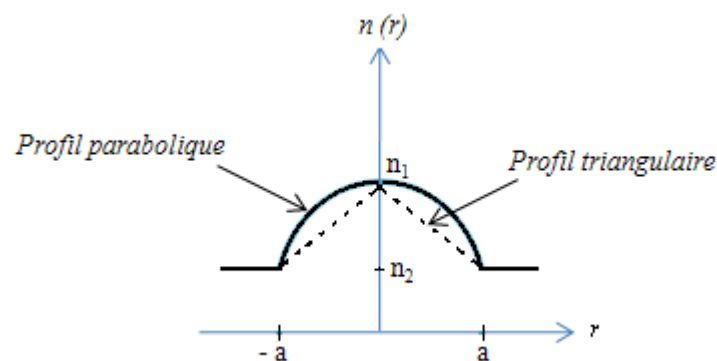
$$n(r) = n_2 \quad (2.03)$$

Avec :

- $x$  : exposant du profil d'indice
- $\Delta$  : 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 :

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

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

On remarque que :

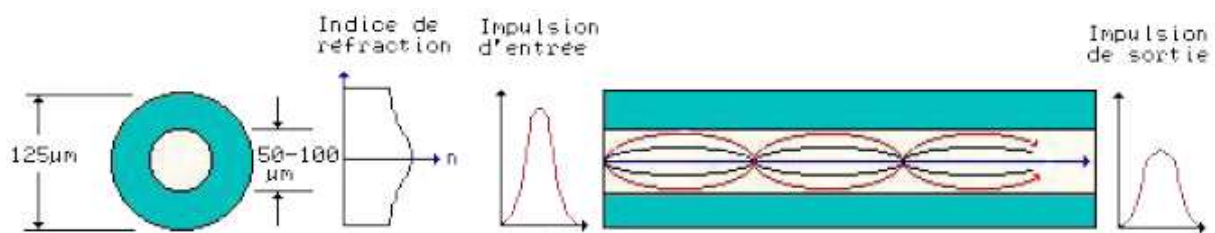
- L'ouverture numérique est maximale pour  $n(r) = n_1$ . On a alors  $r = 0$
- Elle est minimale (et même nulle) pour  $n(r) = n_2$ . On a alors  $r = a$

Plus l'ouverture numérique est importante, plus l'angle d'acceptance 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  $\mu\text{m}$  pour un diamètre total de la fibre de 125 $\mu\text{m}$ .

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
- Pour une fibre à saut d'indice :  $x \rightarrow \infty$  et  $N$  revient à

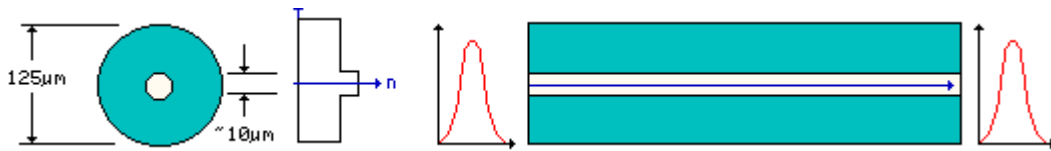
### 2.3 Du multimode au monomode

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 [19].

### 2.4 Fibre monomode

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 GHz\*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 [9] [20] [21] [22] [23].

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 :

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



Entraîne :

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

La longueur d'onde critique  $\lambda_c$  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.

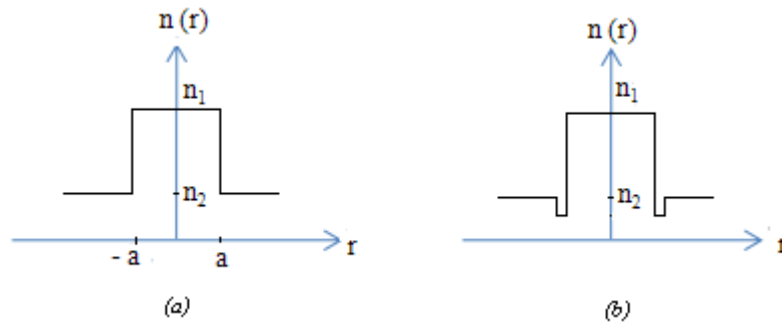
De plus, si on calcul la longueur d'onde critique on trouve  $\lambda_c = 1,183 \mu m$  qui est réellement inférieure à la longueur d'onde  $\lambda_0 = 1,3 \mu m$ .

#### 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

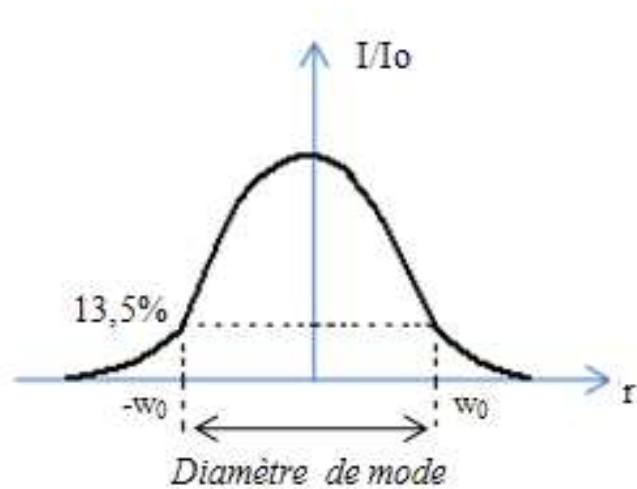
La lumière est guidée par le cœur. Mais en monomode, une partie importante de la puissance est transmise dans la gaine. La répartition de cette puissance lumineuse est à peu près « gaussienne », c'est-à-dire en forme de cloche [7] [10].

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 :

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

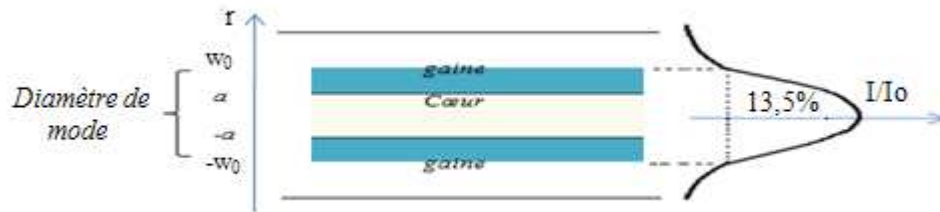
Avec  $a$  : rayon du cœur de la fibre monomode

$V$  : 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 :

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

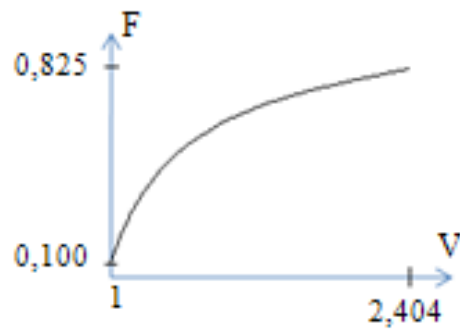
Avec  $P_c$  : puissance dans le cœur

$P_g$  : 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

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 [20] [21] [22].

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

**Tableau 2.01** : *Tableau comparatif des différentes fibres*

## 2.6 Les Recommandations G 652 à G 657 de l'UIT

L'UIT ( Union Internationale des Télécommunications) est un organe de l'Organisation des Nations Unies (ONU) chargé de la réglementation et la normalisation des télécommunication dans le monde. Les normes sont publiés sous forme de « Recommandations », dans la mesure où chaque constructeur, chaque entreprise est libre de les suivre ou non.

Les Recommandations G 652 à G 657 de l'UIT sont spécialement dédiées à la fibre optique monomode. Les points essentiels de cette série sont représentés par le tableau suivant : [36]

<b>G.652</b>		
<b>G.652.A</b>		
<b>Attribut</b>	<b>Détail</b>	<b>Valeur</b>
Coefficient de dispersion chromatique	$\lambda_{0min}$	1300 nm
	$\lambda_{0max}$	1324 nm
	$S_{0max}$	0,092 ps/nm <sup>2</sup> km
Coefficient d'atténuation	Maximum à 1310 nm	0,5 dB/km
	Maximum à 1550 nm	0,4 dB/km
<b>G.652.B</b>		
Coefficient de dispersion chromatique	$\lambda_{0min}$	1300 nm
	$\lambda_{0max}$	1324 nm
	$S_{0max}$	0,092 ps/nm <sup>2</sup> km
Coefficient d'atténuation	Maximum à 1310 nm	0,4 dB/km
	Maximum à 1550 nm	0,35 dB/km
	Maximum à 1625 nm	0,4 dB/km
<b>G.652.C / G.652.D</b>		
Coefficient de dispersion chromatique	$\lambda_{0min}$	1300 nm
	$\lambda_{0max}$	1324 nm
	$S_{0max}$	0,092 ps/nm <sup>2</sup> km
Coefficient d'atténuation	Maximum de 1310 nm à	0,4 dB/km

	1625 nm	
	Maximum à 1383 nm $\pm 3$ nm	$\leq 0,4$ dB/km
	Maximum à 1550 nm	0,3 dB/km
<b>G.653</b>		
<b>G.653.A</b>		
Attribut	Détail	Valeur
Coefficient de dispersion chromatique	$\lambda_{0min}$	1525 nm
	$\lambda_{0max}$	1575 nm
	$D_{max}$	3,5 ps/nm.km
	$\lambda_{0min}$	1500 nm
	$\lambda_{0max}$	1600 nm
	$S_{0max}$	0,085 ps/nm <sup>2</sup> km
Coefficient d'atténuation	Maximum à 1550 nm	0,35 dB/km
<b>G.653.B</b>		
Coefficient de dispersion chromatique	$D_{min}(\lambda) : 1460 - 1525$ nm	$0,085 * (\lambda - 1525) - 3,5$
	$D_{min}(\lambda) : 1525 - 1625$ nm	$3,5(\lambda - 1600)/75$
	$D_{max}(\lambda) : 1460 - 1575$ nm	$3,5(\lambda - 1500)/75$
	$D_{max}(\lambda) : 1575 - 1625$ nm	$0,085 * (\lambda - 1525) + 3,5$
Coefficient d'atténuation	Maximum à 1550 nm	0,35 dB/km
<b>G.654</b>		



<b>G.654.A / G.654.B / G.654.C</b>		
<b>Attribut</b>	<b>Détail</b>	<b>Valeur</b>
Coefficient de dispersion chromatique	$D_{1550\max}$	20 ps/nm.km
	$S_{1550\max}$	0,070 ps/nm <sup>2</sup> km
Coefficient d'atténuation	Maximum à 1550 nm	0,22 dB/km
<b>G.655</b>		
<b>G.655.C</b>		
<b>Attribut</b>	<b>Détail</b>	<b>Valeur</b>
Coefficient de dispersion chromatique (1530 – 1565 nm)	$\lambda_{0\min}$	1530 nm
	$\lambda_{0\max}$	1565 nm
	$D_{\min}$	1,0 ps/nm.km
	$D_{\max}$	10,0 ps/nm.km
	$D_{\max} - D_{\min}$	$\leq 5,0$ ps/nm.km
Coefficient d'atténuation	Maximum à 1550 nm	0,35 dB/km
	Maximum à 1625 nm	0,4 dB/km
<b>G.655.D</b>		
Coefficient de dispersion chromatique	$D_{\min}(\lambda) : 1460 - 1550$ nm	$7,00(\lambda - 1460)/90 - 4,20$
	$D_{\min}(\lambda) : 1550 - 1625$ nm	$2,97(\lambda - 1550)/75 + 2,80$

	$D_{\max}(\lambda) : 1460 - 1550 \text{ nm}$	$2,91(\lambda - 1460)/90 + 3,29$
	$D_{\max}(\lambda) : 1550 - 1625 \text{ nm}$	$5,06(\lambda - 1550)/75 + 6,20$
Coefficient d'atténuation	Maximum à 1550 nm	0,35 dB/km
	Maximum à 1625 nm	0,4 dB/km
<b>G.655.E</b>		
Coefficient de dispersion chromatique	$D_{\min}(\lambda) : 1460 - 1550 \text{ nm}$	$5,42(\lambda - 1460)/90 + 0,64$
	$D_{\min}(\lambda) : 1550 - 1625 \text{ nm}$	$3,30(\lambda - 1550)/75 + 6,06$
	$D_{\max}(\lambda) : 1460 - 1550 \text{ nm}$	$4,65(\lambda - 1460)/90 + 4,66$
	$D_{\max}(\lambda) : 1550 - 1625 \text{ nm}$	$4,12(\lambda - 1550)/75 + 9,31$
Coefficient d'atténuation	Maximum à 1550 nm	0,35 dB/km
	Maximum à 1625 nm	0,4 dB/km
<b>G.656</b>		
Coefficient de dispersion chromatique	$D_{\min}(\lambda) : 1460 - 1550 \text{ nm}$	$2,60(\lambda - 1460)/90 + 1,00$
	$D_{\min}(\lambda) : 1550 - 1625 \text{ nm}$	$0,98(\lambda - 1550)/75 + 3,60$
	$D_{\max}(\lambda) : 1460 - 1550 \text{ nm}$	$4,68(\lambda - 1460)/90 +$

		4,60
	$D_{\max}(\lambda) : 1550 - 1625 \text{ nm}$	$4,72(\lambda - 1550)/75 + 9,28$
Coefficient d'atténuation	Maximum à 1460 nm	0,4 dB/km
	Maximum à 1550 nm	0,35 dB/km
	Maximum à 1625 nm	0,4 dB/km
<b>G.657</b>		
<b>G.657.A</b>		
Coefficient de dispersion chromatique	$\lambda_{0\min}$	1300 nm
	$\lambda_{0\max}$	1324 nm
	$S_{0\max}$	0,092 ps/nm <sup>2</sup> km
Coefficient d'atténuation	Maximum de 1310 nm à 1625 nm	0,4 dB/km
	Maximum à 1383 nm $\pm 3\text{nm}$	$\leq 0,4 \text{ dB/km}$
	Maximum à 1550 nm	0,3 dB/km
<b>G.657.B</b>		
Coefficient de dispersion chromatique	$\lambda_{0\min}$	1300 nm
	$\lambda_{0\max}$	1424 nm
	$S_{0\max}$	0,10 ps/nm <sup>2</sup> km
Coefficient d'atténuation	Maximum de 1310 nm	0,5 dB/km
	Maximum à 1550 nm	0,3 dB/km

	Maximum à 1625 nm	0,4 dB/km
--	-------------------	-----------

**Tableau 2.02 :** *Les Recommandations G652 à G657 de l'UIT*

Le coefficient de dispersion chromatique,  $D$ , est spécifié en imposant des limites aux paramètres d'une courbe de dispersion chromatique qui est une fonction de la longueur d'onde dans la région 1310 nm. La limite du coefficient de dispersion chromatique pour n'importe quelle longueur d'onde,  $\lambda$ , est calculée à l'aide de la longueur d'onde minimale de dispersion nulle,  $\lambda_{0\min}$ , de la longueur d'onde maximale de dispersion nulle,  $\lambda_{0\max}$  et du coefficient maximal de pente à la dispersion nulle,  $S_{0\max}$ , conformément à:

$$\frac{\lambda S_{0\max}}{4} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{0\max}}{\lambda} \right)^4 \right] \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0\max}}{4} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{0\min}}{\lambda} \right)^4 \right] \quad (2.12)$$

Dans toute la suite du travail, nous allons prendre les valeurs mentionnées dans le tableau précédent comme références pour les paramètres des fibres monomodes.

## 2.7 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

### LA DISPERSION CHROMATIQUE

#### 3.1 Introduction

Après avoir acquis une connaissance générale sur les fibres optiques et ses différents types nous allons aborder, d'un œil plus attentionné, le problème de la dispersion chromatique dans ce chapitre. Il est à noter que nous ne nous lancerons pas dans une étude approfondie de ce phénomène (ce qui serait compliqué compte tenu des expressions à manipuler), mais nous nous contenterons d'en exposer les faits essentiels afin de le comprendre et de le caractériser.

Pour cela nous parlerons d'abord de la dispersion et de ses principales caractéristiques (temps de groupe, coefficient de dispersion) avant de voir les différentes solutions proposées pour y remédier.

#### 3.2 Définition d'un milieu dispersif

En optique, un matériau est qualifié de « dispersif » si son indice varie en fonction des longueurs d'onde que l'on transmet.

Par exemple, la silice (composant de base des fibres) est un matériau très dispersif dont l'indice obéit à la relation de Cauchy :

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (3.01)$$

Où  $A$  et  $B$  sont des constantes

En conséquence, chaque « couleur » se déplace à une vitesse qui lui est propre.

$$v_g = \frac{c}{n_g} \quad (3.02)$$

Où  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide et  $n_g$  l'indice de groupe relatif à la longueur d'onde de la « couleur ». [30][34]

#### 3.3 Conséquence sur la vitesse de groupe

Un milieu dispersif impose un temps de propagation de groupe non constant.

De ce fait, une impulsion de largeur spectrale très étroite à l'émission va s'étaler (dans le temps) tout au long de sa propagation dans le canal comme le montre la figure ci-dessous.



**Figure 3.01 :** *Etalement d'une impulsion lumineuse*

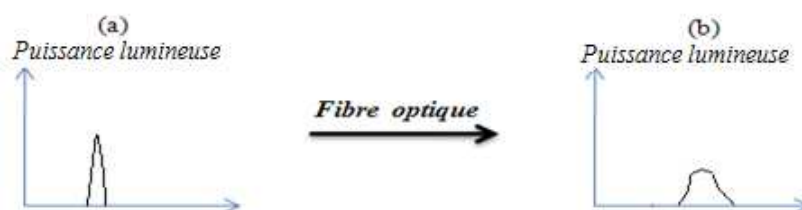
Si  $\tau$  est la largeur temporelle de l'impulsion émise et  $\tau'$  celle de l'impulsion reçue, nous aurons évidemment  $\tau < \tau'$

### 3.4 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. [1][34]

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 3.02 :** *a) Impulsion courte envoyée dans la fibre*

*b) Impulsion obtenue en sortie de fibre*

### 3.4.1 Dispersion temporelle

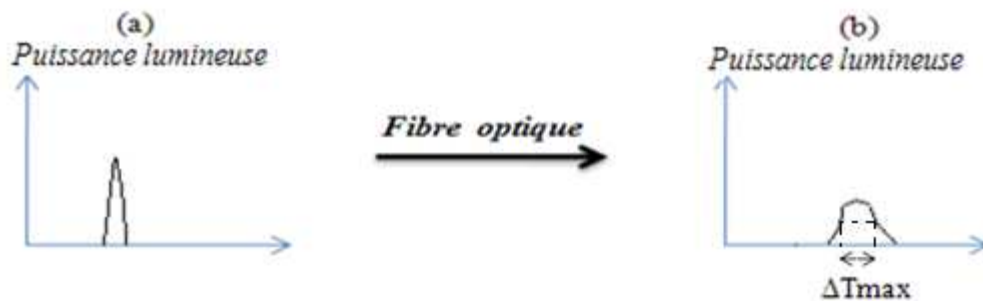
La dispersion temporelle caractérise l'élargissement de l'impulsion lors de sa transmission dans la fibre. Elle est due à la dispersion modale et la dispersion chromatique. La quantité d'informations (ou le débit) pouvant être transférée est limitée.

### 3.4.2 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 ».

#### 3.4.2.1 Cas d'une fibre à saut d'indice

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



**Figure 3.03 : 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 :

$$\Delta T_{\max} = \frac{n_1 L (2n_1/n_2)^2}{2c} \quad (3.03)$$

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 (3.03), on peut exprimer le délai modal en fonction de la différence d'indice relative  $\Delta$  :

$$\Delta T_{max} = \frac{n_1 \cdot L \cdot \Delta}{c} \quad (3.04)$$

#### 3.4.2.2 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 :

$$\Delta T_{max} = \frac{n_1 \cdot L \cdot \Delta^2}{8c} \quad (3.05)$$

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

#### 3.4.3 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.

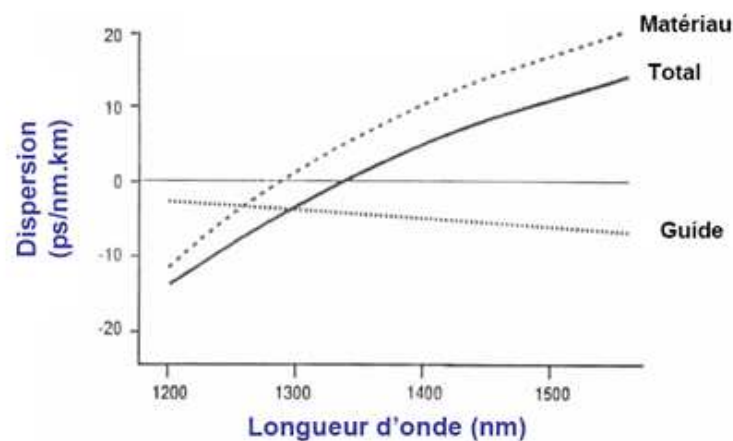
La dispersion chromatique est beaucoup plus faible que la dispersion modale. Toutefois en l'absence de dispersion modale dans la fibre monomode, la dispersion chromatique devient prépondérante.



Cette dispersion possède deux composantes : la dispersion due au matériau et celle due au guide. Ainsi, la dispersion totale est donnée par :

$$D_{\text{total}} = \sqrt{D_{\text{matériau}}^2 + D_{\text{guide}}^2} \quad (3.06)$$

La figure 3.04 illustre cette dernière expression.



**Figure 3.04 :** Dispersion totale dans une fibre standard G652

Dans le paragraphe suivant, nous allons alors entrer dans l'étude de la dispersion chromatique dans une fibre optique.

### 3.5 La dispersion chromatique dans une fibre optique

Le verre (ou la silice amorphe) est un milieu dispersif. Aux longueurs d'ondes visibles, le rouge va plus vite que le bleu. Si une impulsion de lumière blanche est injectée à l'entrée d'une fibre de silice, les longueurs d'onde rouges émergent de la fibre les premières suivies de l'orange, du jaune, du vert et du bleu et la durée de l'impulsion en sortie est plus longue qu'en entrée. C'est ce que l'on appelle la dispersion de vitesse de groupe normale ou positive. Les grandes longueurs d'onde se propagent plus rapidement que les longueurs d'onde plus courtes. Dans l'infrarouge, autour de 1,3  $\mu\text{m}$ , le signe de la dispersion de vitesse de groupe change (figure 3.04). C'est le domaine de dispersion anormale ou négative (les dénominations « normale » et « anormale » proviennent du fait que si l'on regarde l'indice de réfraction d'un milieu sur une très large fenêtre

spectrale, la dispersion est normale sauf en de très petites zones). Toute impulsion de durée finie a une étendue spectrale non nulle (seul un signal continu peut être strictement monochromatique). Cela est dû aux relations d'incertitude (ou plus simplement aux propriétés de la transformation de Fourier) :

$$\Delta t \Delta \nu \geq 1/2 \quad (3.07)$$

où  $\Delta t$  et  $\Delta \nu$  sont les largeurs quadratiques temporelle et spectrale. [26][34]

Par exemple, une LED (Light Emitting Diode), a un pic d'une largeur de 10 nm, un laser, un pic d'une largeur d'1 nm et moins.

Lors de sa propagation dans la fibre, une impulsion lumineuse subit le même sort que l'impulsion de lumière blanche : elle s'élargit temporellement. Si la dispersion est anormale, la seule différence notable sera l'apparition en bout de fibre des longueurs d'ondes les plus courtes avant les autres. Les effets linéaires ne permettent donc pas une propagation sans déformation de la forme de l'impulsion.

### 3.5.1 Mesure de la dispersion chromatique

Le mode fondamental a une constante de propagation définie par :

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 \quad (3.08)$$

Où  $n_1$  désigne l'indice du cœur de la fibre et  $\lambda$  la longueur d'onde d'émission.

Le temps de propagation est :

$$\tau = \frac{L}{v} n_1 = L \left( \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right) \quad (3.09)$$

Avec  $L$  : longueur de la liaison et  $\omega = 2\pi \frac{c}{\lambda}$

La dispersion chromatique traduit les variations de  $\tau$  selon  $\lambda$ :

$$D = \frac{1}{L} \frac{\partial \tau}{\partial \lambda} \quad (3.10)$$

D'après (3.09) on a :

$$\frac{\partial \tau}{\partial \omega} = L \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \quad (3.11)$$

Ainsi le retard différentiel  $\Delta \tau$  s'écrit alors :

$$\Delta \tau = \beta_2 L \Delta \omega \quad (3.12)$$

On voit que la différence de temps de parcours d'un signal de largeur spectrale  $\Delta \omega$ , dépend de celle-ci, de la longueur  $L$  de fibre parcourue et de  $\beta_2$ , dérivée seconde de la constante de propagation du mode.

A présent, tentons d'exprimer le retard différentiel  $\Delta \tau$  en fonction du coefficient de dispersion  $D$ .

On a :

$$D = \frac{1}{L} \frac{\partial \tau}{\partial \omega} \frac{\partial \omega}{\partial \lambda} \quad (3.10')$$

Sachant que :  $\omega = 2\pi c / \lambda$  et avec (3.11), on obtient :

$$D = - \frac{2\pi c \beta_2}{\lambda^2} \quad (3.13)$$

En isolant  $\beta_2$ ,

$$\beta_2 = - \frac{D \lambda^2}{2\pi c} \quad (3.14)$$

En portant (3.14) dans (3.12) :

$$\Delta\tau = DL \left( -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \right) \Delta\omega \quad (3.15)$$

Comme  $\omega = 2\pi\frac{c}{\lambda}$  et  $\Delta\omega$  est très petit devant 0, on en déduit que

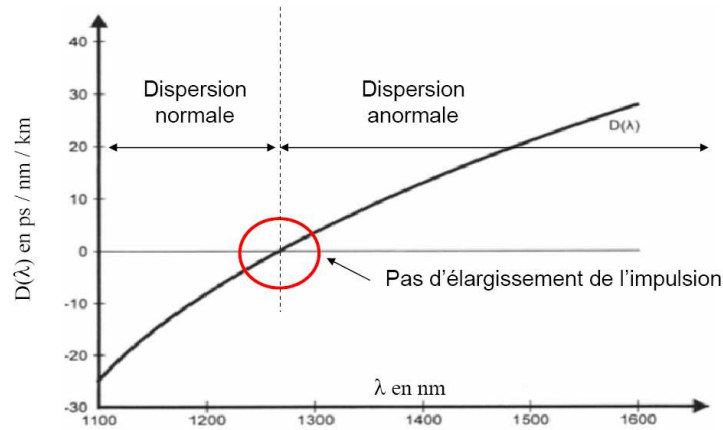
$$\Delta\omega = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \Delta\lambda \quad (3.16)$$

D'où :

$$\Delta\tau = DL\Delta\lambda \quad (3.17)$$

Dans cette dernière expression  $\Delta\lambda$  désigne l'étendue du signal lumineux en termes de longueur d'onde et  $D$ , le coefficient de dispersion, s'exprime en ps/nm.km et est fourni par le fabricant. Le retard  $\Delta\tau$  s'exprime quant à lui en ps. [24][28][33]

Nous retiendrons la formule (3.17) pour nos calculs par la suite.



**Figure 3.05 :** *coefficient de dispersion pour une fibre classique*

La figure ci-dessus nous montre la courbe de variation du coefficient de dispersion en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  de l'impulsion. Nous constatons qu'elle est assimilable à une droite à partir des 1100 nm et passe par 0 aux environs de 1300 nm (pour la fibre G652).

La dispersion maximum admissible est fixée par les caractéristiques de l'émetteur (source laser modulée manière direct ou externe).

Elle peut être modifiée par les conditions de propagation. Pour une source pré-accentuée (sujette à des effets non-linéaires), l'automodulation de phase peut apporter un gain de 2dB sur le seuil de réception.

En général, on a aussi une limite inférieure de la dispersion chromatique liée au caractère non-linéaire de la propagation.

En fait, on a une fourchette de dispersion chromatique admissible en réception qui se rétrécit avec la distance. Cette fourchette correspond à un diagramme de l'œil en réception présentant l'ouverture optimale. [24]

### ***3.5.2 La conséquence directe de la dispersion chromatique : la limitation du produit capacité×distance***

Comme nous l'avons probablement déduit des propos énoncés précédemment, la dispersion chromatique limite considérablement les capacités des fibres optiques (surtout celles employées sur de longues distances). Généralement, la limite de la dispersion totale tolérable dans un système est assez arbitraire. Mais les simulations et l'expérience, montrent que la longueur maximale imposée par la dispersion chromatique est environ de 500 km à 2,5 Gbit/s et 60 km à 10 Gbit/s pour une fibre standard et une diode laser de spectre de raies entre 0.2 et 1 MHz comme source. [35]

Le tableau 3.01 nous donne une idée des valeurs de limitation de ce phénomène généralement indésirable, la valeur de la dispersion y est limitée à 10% du temps de bit. [32]

SONET	SDH	Débit de transmission	Temps de bit	Dispersion max
OC-1		51.84 Mb/s	19.29 ns	2 ns
OC-3	STM-1	155.52 Mb/s	6.43 ns	640 ps
OC-12	STM-4	622.08 Mb/s	1.61 ns	160 ps
OC-24		1244.16 Mb/s	803.76 ps	80 ps

OC-48	STM-16	2488.32 Mb/s	401.88 ps	40 ps
OC-192	STM-64	9953.28 Mb/s	100.47 ps	10 ps
OC-768	STM-256	39 813.12 Mb/s	25.12 ps	2 ps

**Tableau 3.01** : Valeurs maximales de la dispersion selon les débits de transmission

Ces chiffres nous témoignent du réel problème qu'apporte la dispersion chromatique dans une liaison optique donnée. En effet, un retard de 10 ps est facilement atteint dans une fibre classique dont le coefficient de dispersion dans la bande C est estimé à 17 ps/nm.km.

### 3.6 Les solutions pour la dispersion chromatique

Nombreuses sont les solutions proposées pour réduire, voire annuler, la dispersion chromatique dans une fibre optique donnée. Ceci afin d'exploiter aux maximum l'énorme potentiel de ce type de support de transmission. Voici quelques-uns de ces solutions tout aussi efficaces les unes que les autres.

#### 3.6.1 Fibres compensatrices de dispersion

La compensation permet de remettre en forme les impulsions optiques étalées par la dispersion chromatique. Pour cela on utilise des fibres compensatrices de dispersion ou « Dispersion Compensating Fiber » (DCF). [24][32]

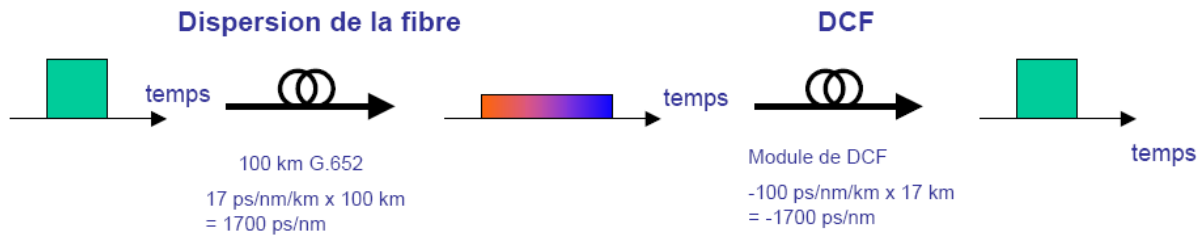
Les fibres à compensation de dispersion ont une dispersion négative et une valeur absolue très élevée du coefficient de dispersion chromatique (de l'ordre de 100 ps/nm.km).

Comme la dispersion chromatique est stable et prévisible, il est possible de la compenser afin de rétablir la forme initiale de l'impulsion lumineuse émise.

A partir des caractéristiques de la fibre, fournit par le fabricant, dont principalement, le zéro de dispersion et la pente de dispersion il est possible de prévoir la valeur de la dispersion à un endroit donné et concevoir par la suite des modules de compensation. La dispersion totale est la somme de la dispersion de la ligne et de celle de la compensatrice.

$$D_{tot} = D_{ligne} + D_{compensatrice} \quad (3.18)$$

La figure ci-dessous illustre cette technique de compensation de la dispersion :



**Figure 3.06 : exemple de compensation de dispersion de 100%**

Dans l'exemple illustré par la figure 3.06, la liaison est constituée de 100 km de fibre G652 de coefficient de dispersion  $D = 17 \text{ ps/nm.km}$ , donc  $D_{\text{ligne}} = 1700 \text{ ps/nm}$ . Le module de compensation est formé par une DCF de coefficient de dispersion égal à  $-100 \text{ ps/nm.km}$  sur 17 km. C'est ainsi qu'on réalise la compensation de dispersion de 100%.

Certes, la technique est efficace mais le problème est que les fibres compensatrices présentent un affaiblissement linéique plus élevée que les fibres standards (0.6 au lieu 0.2 dB/km).

### **Importance de la pente de dispersion**

Il est à noter que la pente de dispersion définie par :

$$S = \frac{dD}{d\lambda} \quad [\text{ps/nm}^2.\text{km}] \quad (3.19)$$

est un paramètre important dans une compensation de la dispersion pour une liaison par fibre optique donnée. Il est en effet important que toutes les longueurs d'onde arrivent à la destination finale avec un niveau de dispersion cumulée relativement similaire. Pour cela les modules de compensation doivent non seulement compenser le niveau global de dispersion mais également sa pente. Cela n'est possible que si la dispersion de la fibre est adaptée avec la pente de dispersion du module de compensation. La facilité de compenser la pente sur une large plage de longueurs d'ondes de bout en bout est dépendante de la dispersion de la fibre (Plus elle est haute, plus c'est facile), de la pente de dispersion (plus elle est basse, mieux, c'est).

Dès qu'une longueur d'onde dépasse la tolérance du système en dispersion cumulée, la compensation doit être réalisée par longueurs d'onde (ou groupe de longueur d'ondes). Cela augmente le coût du système et sa complexité.

### 3.6.2 Les fibres à dispersion décalées

Dans une fibre donnée, il est possible de décaler la courbe de dispersion en optimisant son profil d'indice (comme nous l'avons vu dans la relation 3.06). Cela permet de sélectionner des valeurs de  $\lambda$  pour lesquelles  $D = 0$  (zéro de dispersion). [30][34][1]

On distingue principalement deux types de fibres à dispersion décalée :

- La fibre à dispersion décalée dont le zéro de dispersion se situe dans la bande C (autour de 1550 nm) ou DSF (Dispersion Shifted Fiber). Ces types de fibres sont définis par la recommandation G653 de l'UIT.
- La fibre à dispersion décalée non-nulle dont le zéro de dispersion se situe près de la bande C (à 1525 nm) ou NZDSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber). Ces types de fibres permettent de multiplexer des canaux en DWDM et font l'objet de la recommandation G655 de l'UIT.

En effet, grâce à un dopage adéquat de la préforme, il est possible de créer des fibres avec une dispersion chromatique nulle dans la bande C (autours de 1550 nm).

Parmi les DSF (Dispersion Shifted Fiber), nous pouvons citer la G653 qui a été conçue sur ce principe. Mais bien qu'ayant éliminé le problème de la dispersion, des effets non linéaires destructeurs apparaissent (car concentration de la puissance optique en un même point).

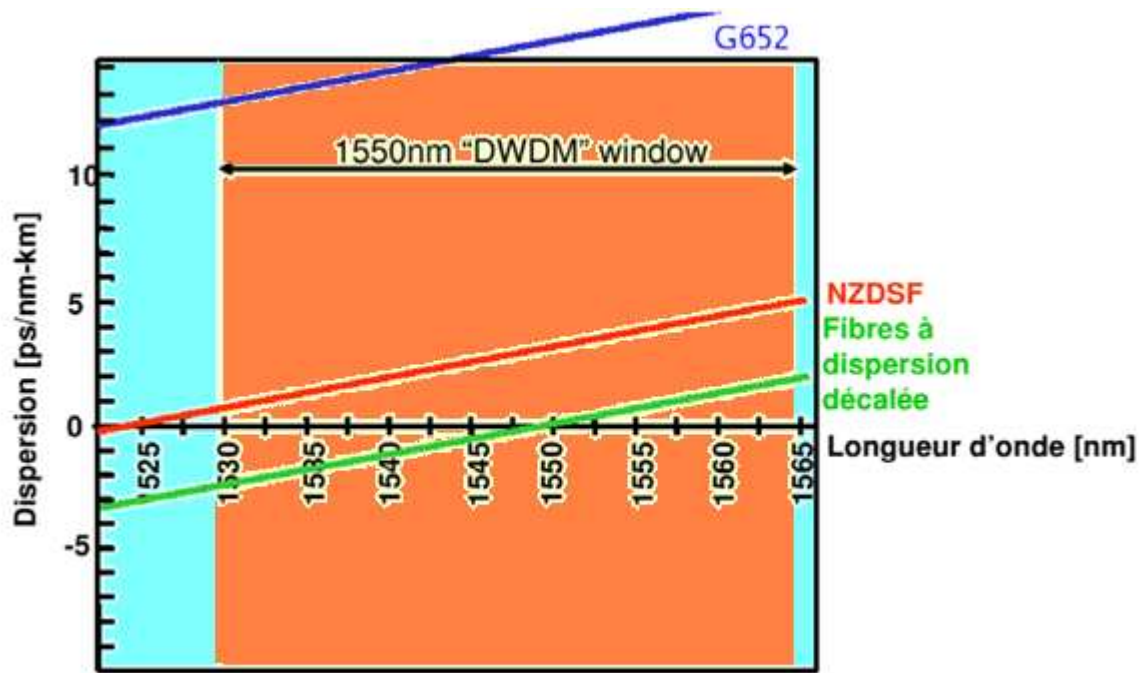
Ainsi, il est impossible de faire du multiplexage WDM sur ce genre de fibre sous le risque d'avoir des phénomènes indésirables comme le mélange à quatre ondes.

Comme remède à cela fut créée la fibre NZDSF, définie par la Recommandation G655 de l'UIT.

NZDSF désigne un type de fibre monomode qui présente un zéro de dispersion juste à côté de la bande C (utilisée pour les télécommunications). Cela signifie que la dispersion reste très faible dans cette bande, et permet toutefois d'éliminer les effets non linéaires.

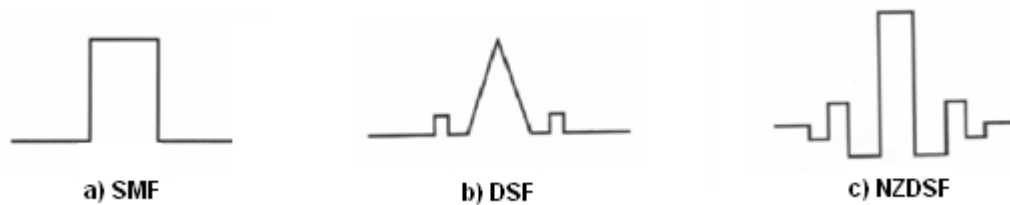
La figure 3.07 nous montre les différentes courbes de dispersion des fibres G652, G653 (DSF) et de la G655 (NZDSF). On constate que par rapport à la G652, les fibres DSF et NZDSF sont très performantes du point de vue de la dispersion chromatique.





**Figure 3.07 :** *Courbes de dispersion des fibres G652, G653, G655*

La figure 3.08 par contre nous illustre le profil d'indice des fibres standards (SMF), des fibres à dispersion décalée (DSF), et des fibres à dispersion décalée non-nulle (NZDSF).



**Figure 3.08 :** *Profil d'indice des fibres SMF, DSF et NZDSF*

En conclusion, la NZDSF est une fibre qui offre un bon compromis, elle permet notamment d'effectuer du WDM, et son atténuation linéique reste comparable à celle de la G652.

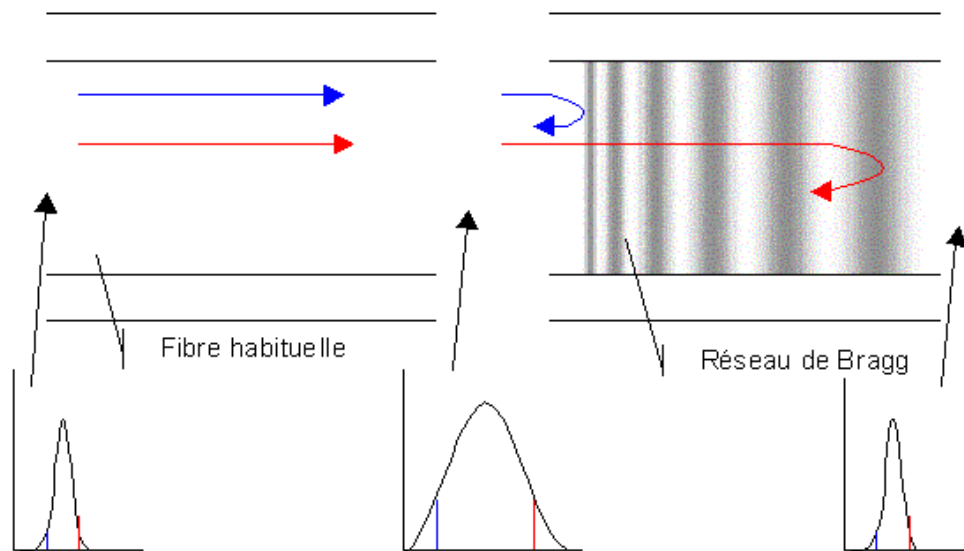
Durant les années 1990, beaucoup de câbles sous-marins se sont appuyés sur ce type de fibre. De nos jours, des techniques plus modernes permettent des performances beaucoup plus importantes.

### 3.6.3 Réseau de Bragg

Pour corriger la dispersion chromatique, on fait parfois appel à un réseau de Bragg à pas variable.

[33]

Un réseau de Bragg à pas constant se comporte comme un filtre pour une longueur d'onde donnée. Avec un réseau à pas variable, on travaille sur toute une bande spectrale, on ralentit les longueurs d'onde les plus rapides. En optimisant la variation continue du pas du réseau, le signal issu de ce réseau retrouve sa forme d'origine.



**Figure 3.09 :** *Effet sur un signal d'une fibre à réseau de Bragg à pas variable*

Un réseau de Bragg est inscrit dans la fibre par holographie ou bien par chauffage, tension ou pression, sur un segment de quelques centimètres.

D'après Optics Letter, la méthode par compression (avec une compression de 2.7 % ) est plus efficace que la tension, mais il y a une force limite à ne pas dépasser pour ne pas rompre la fibre : environ 22 Newton. Par contrôle actif, on obtient un réseau à variations continues et un gain identique pour toutes les longueurs d'onde.

#### **3.6.4 Les solitons**

La première observation physique des solitons date de 1834. Un gentleman écossais, John Scott Russel, se promenant à cheval le long d'un canal, a observé que, lorsqu'une péniche se fut arrêtée brusquement, une grande vague solitaire continua de se propager sans déformation apparente de sa forme ni variation de vitesse. Il a pu la suivre pendant plus de dix kilomètres. Il fit un rapport de son observation en 1844. Les phénomènes physiques intervenant dans la propagation de cette onde solitaire sont accessibles à tout observateur attentif. Ce dernier remarquera que les vagues de forte

amplitude se propagent plus vite que celles d'amplitude plus modeste. Il arrive fréquemment que les premières rattrapent et dépassent les secondes. C'est l'effet non linéaire de la propagation. L'autre phénomène est plus difficilement observable. Cependant, si l'on prend un peu de recul, il apparaît que les vagues de plus grande longueur d'onde se propagent plus rapidement que celles de longueur d'onde plus courte. Cet effet est responsable de l'élargissement spatial des vagues. La vague observée par Russel était de celles dont la dépendance non linéaire de la vitesse en fonction de son amplitude compensait exactement la dépendance linéaire de la vitesse en fonction de la longueur d'onde. Ce que n'a pas observé Russel, mais qui est d'une grande importance, est que, après une collision entre une onde solitaire de grande amplitude (rapide) et une autre d'amplitude plus faible (lente), les deux ondes retrouvent leur forme initiale. Cet effet n'est pas évident a priori, puisque, lors de la collision, les deux ondes se superposant, l'effet non linéaire total n'est certainement pas égal à la somme des effets non linéaires de chacune des deux ondes prises isolément. Des ondes solitaires retrouvant leur forme initiale après une collision sont appelées des solitons. Le suffixe « on » représente l'aspect particulaire de l'onde. Ce nom a été donné par Zabusky et Kruskal en 1965. Il fallut plus de cinquante ans pour poser mathématiquement le problème. C'est l'oeuvre de deux mathématiciens, D.J. Korteweg et G. de Vries (1895). L'équation obtenue porte leurs initiales : KdV.

Cette équation fait partie d'une famille plus large d'équations non linéaires aux dérivées partielles possédant comme solutions particulières des solitons. Ces équations non linéaires intégrables ont été l'objet d'études approfondies dans les années 1960, notamment par Gardner. En 1973, peu de temps après la fabrication de fibres de silice aux pertes acceptables (quelques dB/km à comparer à 0,2 dB/km à la longueur d'onde de 1,55  $\mu$ m aujourd'hui), les propriétés optiques de ces fibres n'étaient pas encore bien cernées. Il apparaissait cependant que certaines longueurs d'onde seraient privilégiées pour la transmission optique (disponibilité de sources et dépendance spectrale des pertes). La dispersion chromatique dépendant de la longueur d'onde, elle ne serait pas contrôlée. Aux Bell Labs, Akira Hasegawa est déjà conscient que la dispersion chromatique pourrait être une limitation à la transmission de hauts débits (et donc d'impulsions courtes) sur fibre. Il a l'intuition que l'effet Kerr pourrait combattre les effets de la dispersion chromatique. Il dérive l'équation de propagation dans les fibres (équation de Schrödinger non linéaire, ESNL) et il montre numériquement que cette équation admet des solutions stables. Les limitations de débit imposées par la dispersion chromatique pourraient ainsi être repoussées. Indépendamment (dans le cadre de la physique des plasmas), Zakharov démontre rigoureusement en 1972 que l'ESNL est

intégrable et admet des solitons comme solutions. Il faut attendre 1980 pour réunir de bonnes fibres monomodes et des sources adaptées pour que Mollenauer (aux Bell Labs) réalise les premières expériences de propagation et d'interaction de solitons. À ce moment-là, le problème de la dispersion chromatique est résolu. En revanche, des amplificateurs optiques sont développés et permettent d'envisager de transmettre des signaux sur des distances transocéaniques sans régénération ; la non-linéarité de la fibre devient un problème sur de telles distances. Le soliton est la réponse naturelle à cette nouvelle limitation et Mollenauer réalise la première transmission non régénérée sur une distance transocéanique.

#### Effet Kerr. Équation de Schrödinger non linéaire et solitons

Au XIX<sup>e</sup> siècle, un écossais nommé John Kerr a montré que l'indice de réfraction pouvait être modifié par un signal lumineux de très forte intensité. Suivant le milieu, l'indice pouvait être augmenté ou réduit. Dans la silice, cet effet est relativement faible et augmente l'indice (ou réduit la vitesse). Cet effet induit un retard de phase qui est maximal au pic en intensité de l'impulsion. Cette variation temporelle de la phase à l'intérieur de l'impulsion induit une variation de fréquence instantanée (définie comme l'opposé de la dérivée temporelle de la phase, figure 3.10). L'avant de l'impulsion voit donc ses fréquences être réduites (ou ses longueurs d'onde être augmentées) et les fréquences en fin d'impulsion sont augmentées. Nous voyons donc que, dans le domaine de dispersion anormale, l'association de l'effet Kerr et de la dispersion chromatique ralentit le début de l'impulsion (car les longueurs d'ondes deviennent plus grandes) et accélère la fin de l'impulsion. C'est l'effet d'une lentille convergente temporelle qui comprime l'impulsion. Si l'intensité de l'impulsion (ainsi que sa forme) est ajustée de manière à compenser exactement l'élargissement naturel de l'impulsion, la forme de l'impulsion ne varie pas le long de la propagation. Nous avons alors un comportement soliton. Pour une fibre et une longueur d'onde données, la puissance nécessaire est inversement proportionnelle au carré de la largeur temporelle du soliton. Mathématiquement, il est possible de compléter l'équation de propagation d'une impulsion lumineuse d'enveloppe  $G(Z,T)$  en ajoutant l'effet Kerr. On obtient : [25][26]

$$i \frac{\partial G}{\partial Z} - \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 G}{\partial T^2} + k_{NL} |G|^2 G = 0 \quad (3.20)$$

où :

$$k_{NL} = \epsilon_0 \frac{\omega n_2}{2A_{eff}} \quad (3.21)$$

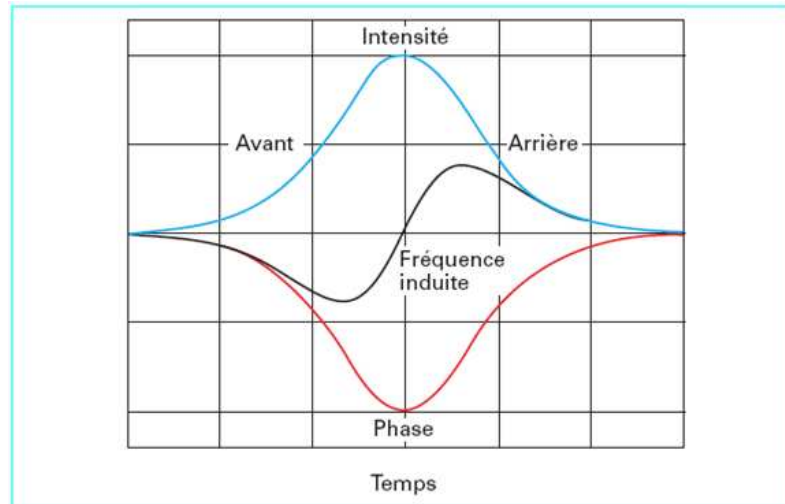
Avec

$n_2$  : indice non linéaire (exprimé en  $\text{m}^2/\text{W}$ ),

$n$  : indice de réfraction linéaire,

$\epsilon_0$  : permittivité du vide,

$A_{eff}$  : aire effective du mode.



**Figure 3.10** : Variations relatives d'intensité, de phase et de fréquence d'une impulsion sous l'effet Kerr

Pour simplifier les études, cette équation est en général normalisée en posant :

$$u = G/A_e \quad (3.22)$$

$$t = T/\tau_e \quad (3.24)$$

et

$$z = Z/Z_e \quad (3.25)$$

où  $\tau_e$  est un temps choisi arbitrairement (en général de l'ordre de la durée des impulsions),

$$A_e = (k_{NL}Z_e)^{-1/2} \quad (3.26)$$

$$Z_c = \frac{\tau_c^2}{|\beta_2|} \quad (3.27)$$

La nouvelle équation s'écrit :

$$i \frac{\partial u}{\partial z} \pm \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + |u|^2 u = 0 \quad (3.28)$$

Où les signes + et - correspondent respectivement à  $\beta_2 < 0$  et  $\beta_2 > 0$ . Avec le signe - (c'est-à-dire  $\beta_2 > 0$ ), il n'existe pas d'impulsion gardant sa forme initiale. Avec le signe + (quand  $\beta_2 < 0$ ), cette équation est l'équation de Schrödinger non linéaire (ESNL).

Les impulsions de forme gaussienne ne se propagent pas sans déformation. En revanche :

$$u(z,t) = A \operatorname{sech}(A(t - \alpha)) \exp(-i\omega t + i\varphi) \quad (3.29)$$

(A étant l'amplitude de l'impulsion et  $\operatorname{sech}(x) = \frac{1}{\cosh(x)}$ )

est solution de (4.22) lorsque :

$$\begin{cases} \alpha'_z = -\omega \\ \varphi'_z = (A^2 + \omega^2)/2 \end{cases} \quad (3.30)$$

C'est un soliton. Il apparaît que durée et puissance de l'impulsion sont reliées. Ce soliton est caractérisé par quatre paramètres (amplitude, fréquence, position et phase). En revenant aux unités réelles, nous obtenons la puissance  $P_s$  du soliton égale à :

$$P_s = 0,776 \frac{\lambda^2 A_{eff} D}{\pi^2 c n_2 T^2} \quad (3.31)$$

Où

$T$  : durée à mi-hauteur en intensité du soliton.

$D$  : le coefficient de dispersion de la fibre

$c$  : célérité de la lumière

Comme nous pouvons le constater, la puissance du soliton est liée intimement au coefficient de dispersion de la fibre optique. Ceci explicitant la compensation de la dispersion par l'effet Kerr pour un soliton, lui permettant de garder sa forme initial tout au long de la propagation.

Les solitons s'avèrent être très efficaces surtout sur de longues distances. Elles permettent en effet la propagation sans déformation d'une impulsion en agissant juste sur l'intensité et la durée de celle-ci.

Cependant, un soliton possède une limite et la transmission des solitons nécessite la révision de la longueur des tronçons entre amplificateurs pour pouvoir garder leur effet.

### **3.7 Conclusion**

Ainsi, dans ce chapitre nous avons pu caractériser le phénomène de la dispersion chromatique et aussi évaluer ses effets, souvent néfaste, dans une liaison par fibre optique. Mais nous avons également pu voir la diversité des solutions offert pour réduire les effets indésirables apporter par la dispersion chromatique. Ce qui nous amène au chapitre suivant qui posera le problème de la dispersion chromatique sous un autre angle.

## **CHAPITRE 4**

### **TRANSMISSION MULTI-CANAL SUR FIBRE OPTIQUE**

#### **4.1 Introduction**

Comme nous l'avons vu précédemment, la dispersion chromatique constitue un réel problème dans un système de transmission par fibre monomode. Nombreuses sont déjà les solutions proposées aux opérateurs de télécommunication pour y palier, des solutions aussi performantes les unes que les autres. Malgré cela, que ce soit l'utilisation de fibres compensatrices de dispersion ou de fibres à dispersion décalé, la plupart de ces méthodes opèrent au niveau des fibres optiques (à l'exception des Solitons). Ainsi pour pouvoir bénéficier de tous les avantages qu'elles apportent, il est nécessaire de s'approprier ces types de fibres relativement chers. Ce qui peut être moins rentable pour un opérateur qui n'envisage que de rallonger une liaison existante.

C'est dans ce souci de ne pouvoir se permettre de changer de câble pour une liaison optique donnée que nous avons développé une solution qui pourrait, sans changer la capacité de la liaison, augmenter la longueur de celle-ci en contournant le problème de la dispersion chromatique.

En premier lieu, nous verrons les différents paramètres et caractéristiques d'une transmission par fibre optique afin d'assimiler plus rapidement la suite. Ce n'est qu'après cela que nous exposerons les principes de base de la méthode et évaluerons ses performances dans une simulation développée sous le logiciel MATLAB version 7.0.

#### **4.2 Paramètres de transmission des fibres optiques**

##### ***4.2.1 Éléments d'un système de transmission sur fibre optique***

Dans une liaison point à point par fibre optique, on trouve (figure 4.01)

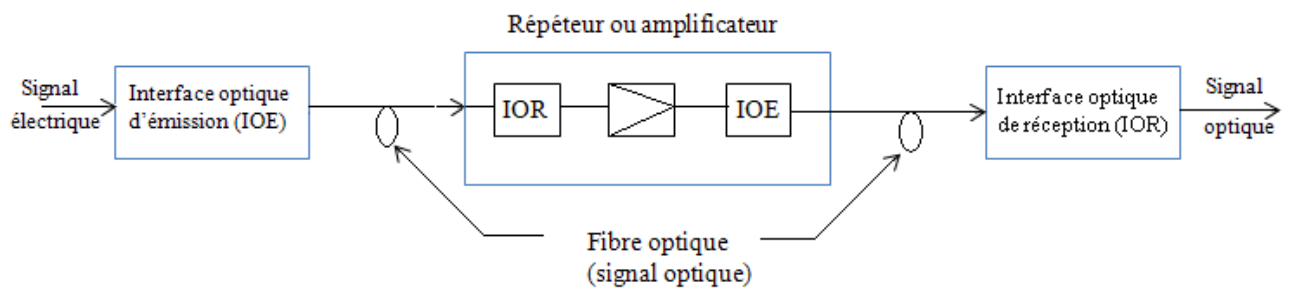
L'interface optique d'émission : a pour rôle de transformer le signal électrique en signal optique. Il contient principalement le composant optoélectronique d'émission, qui peut être une diode électroluminescente (DEL) ou une diode laser (DL). L'interface contient également des circuits d'adaptation 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.

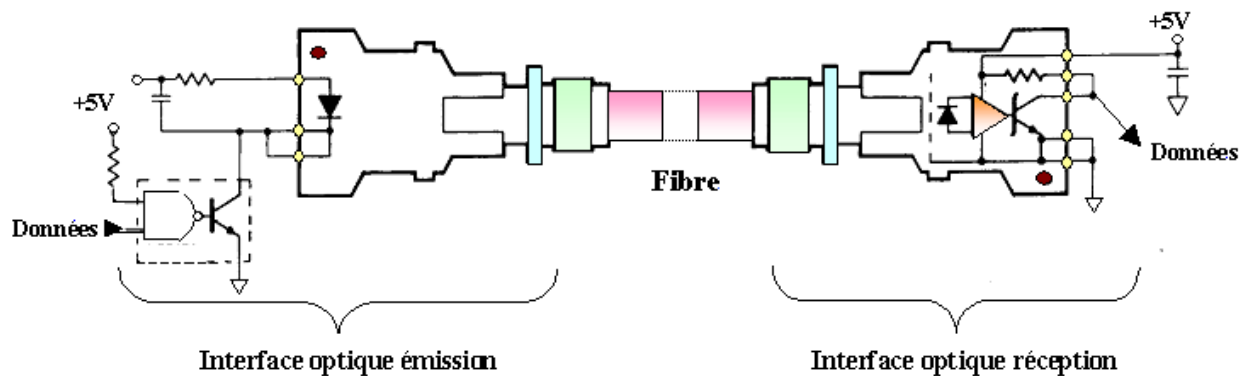
L'interface optique de réception : contient une photodiode qui convertit le signal optique reçu en signal électrique. Elle est suivie d'un préamplificateur, dont la réalisation doit être soignée car c'est en général le bruit de celle-ci qui limite la puissance optique minimale détectable, et donc la 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 [7] [8].



**Figure 4.01 :** *liaison point à point sur fibre optique*

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



**Figure 4.02 :** *Détail d'une liaison*

#### 4.2.2 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)

##### 4.2.2.1 La diode électroluminescente

###### a. 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 une 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.

#### b. *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)

#### 4.2.2.2 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.

#### a. *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.

#### b. *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	DEL	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)
Application	Transmission à faible distance	Transmission à longue distance sur fibres monomodes

**Tableau 4.01** : *Tableau comparatif des DELs et des diodes Laser*

Voici quelques valeurs de la largeur spectrale de source et du retard différentiel causé par la dispersion chromatique : [24]

Avec une fibre monomode standard  $D = 17 \text{ ps/nm.km}$  à  $1,55 \mu\text{m}$

Source	Largeur spectrale (nm)	$\Delta\tau$ (ps)	Bande passante $1000/\Delta\tau$ (GHz) par km de fibre
DEL	50	750	1.33
Diode Laser FP	2	30	33
Diode Laser DFB	0.02	0.3	3333

**Tableau 4.02 :** *Largeur spectrale de source et retard différentiel*

Avec une fibre monomode à dispersion décalée  $D = 1$  ps/nm.km à  $1,55 \mu\text{m}$

Source	Largeur spectrale (nm)	$\Delta\tau$ (ps)	Bande passante $1000/\Delta\tau$ (GHz) par km de fibre
DEL	50	50	20
Diode Laser FP	2	2	500
Diode Laser DFB	0.02	0.02	50 000

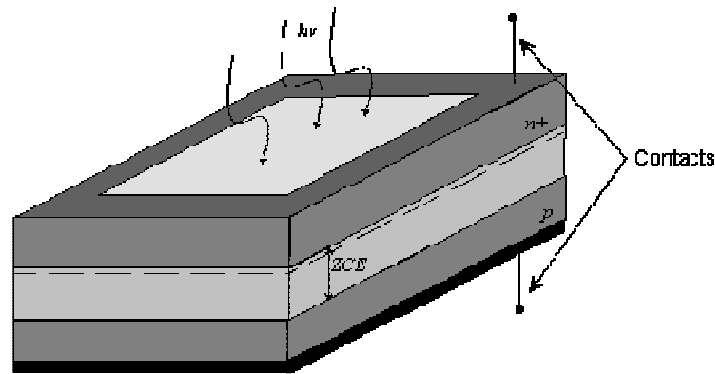
**Tableau 4.03 :** *Largeur spectrale de source et retard différentiel*

#### 4.2.3 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 4.03).



**Figure 4.03 :** *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.

#### 4.2.3.1 Photodiode PIN

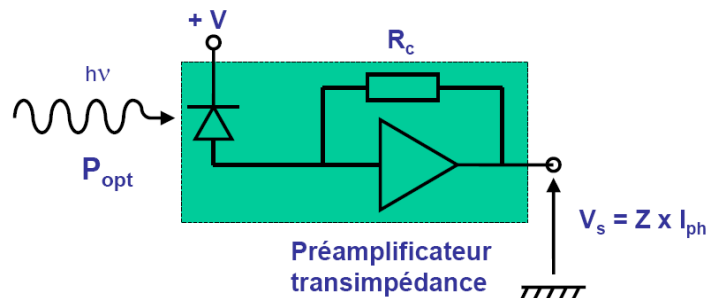
Elle utilise la photodétection (conversion d'un photon en une paire d'électron-trou) dans un semi-conducteur. Comme on l'a vu, seuls les photons d'énergie  $h\nu$  supérieure à  $E_g$  pourront être détectés.

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 recombinaisonnés. 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.

#### 4.2.3.2 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.



**Figure 4.04 :** Récepteur transimpédance

Où :

$P_{opt}$  : puissance de la lumière incidente

$Z$  : transimpédance de l'amplificateur

$I_{ph}$  : courant généré par l'intensité lumineuse dans le capteur

#### 4.2.3.3 Seuil typique de détection pour un taux d'erreur binaire de $10^{-9}$

- A 2,5 Gbit/s :
  - PIN en montage transimpédance : -28 dBm environ
  - PDA en montage transimpédance : -30 à -35 dBm
  - Avec préamplificateur : -42 dBm environ
- A 10 Gbit/s :
  - PIN en montage transimpédance : -10 à -15 dBm
  - PDA en montage transimpédance : -25 dBm environ
  - Avec préamplificateur : -30 dBm environ [24]



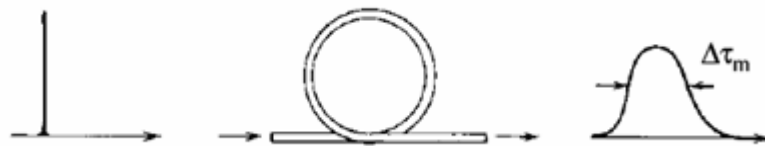
#### 4.2.4 Mesure de la bande passante

En transmission optique, il existe deux régimes principaux :

- Le régime impulsionnel
- Le régime harmonique

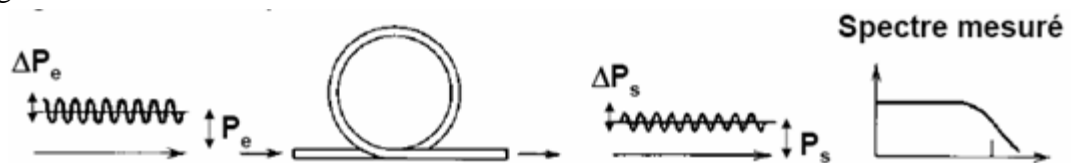
Ainsi, la mesure de la bande passante se fait de deux façons différentes :

- En régime impulsionnel, la mesure de la bande passante se fait en termes de durée d'une impulsion de lumière



**Figure 4.05 :** Mesure de la bande passante en régime impulsionnel

- En régime harmonique, par contre, on retrouve la bande passante par la largeur de spectre du signal lumineux.



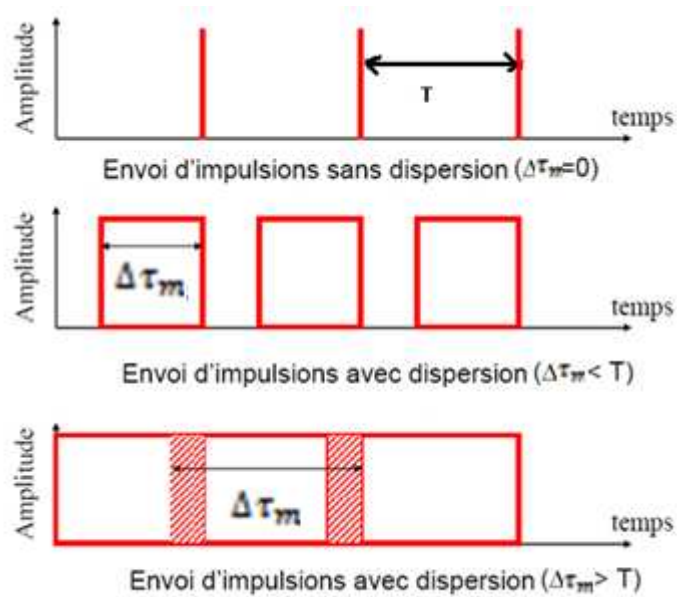
**Figure 4.06 :** Mesure de la bande passante en régime harmonique

##### 4.2.4.1 Bande passante en régime impulsionnel

La bande passante en régime impulsionnel est donnée par la relation :

$$B = \frac{1}{\Delta\tau_m} \quad (4.01)$$

Où  $\Delta\tau_m$  est la durée de l'impulsion telle que l'illustre la figure 4.07



**Figure 4.07 :** *Bande passante en régime impulsionnel*

#### 4.2.4.2 Bande passante en régime harmonique

La puissance d'un signal électrique est donnée par :

$$P_{dB} = 20 \log \left( \frac{P_s}{P_r} \right) \quad (4.02)$$

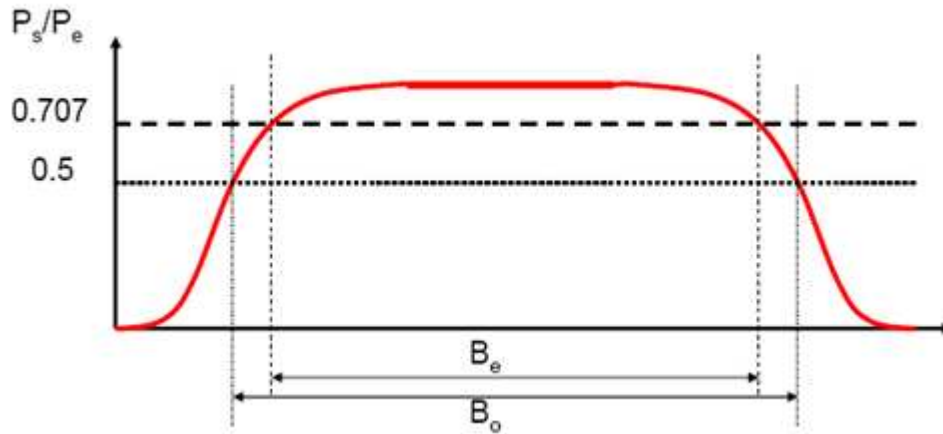
Ce qui fait que le niveau à -3dB correspond à un rapport  $\frac{P_s}{P_r} = 0.707$

La puissance d'un signal optique, quant à lui, est donnée par :

$$P_{dB} = 10 \log \left( \frac{P_s}{P_r} \right) \quad (4.03)$$

Ce qui fait que le niveau à -3dB correspond à un rapport  $\frac{P_s}{P_r} = 0.5$

Alors la bande passante en régime harmonique correspond à la largeur de bande à mi-hauteur de l'impulsion. [28]

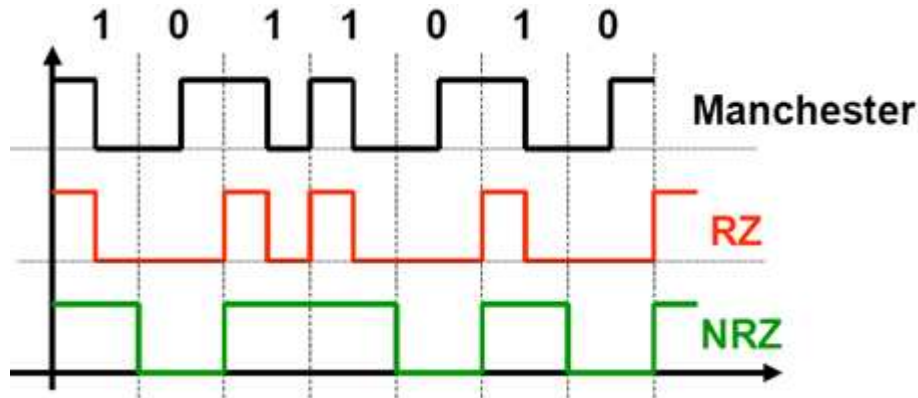


**Figure 4.08 :** Bande passante électrique et optique en régime harmonique

#### 4.2.5 Les modulations

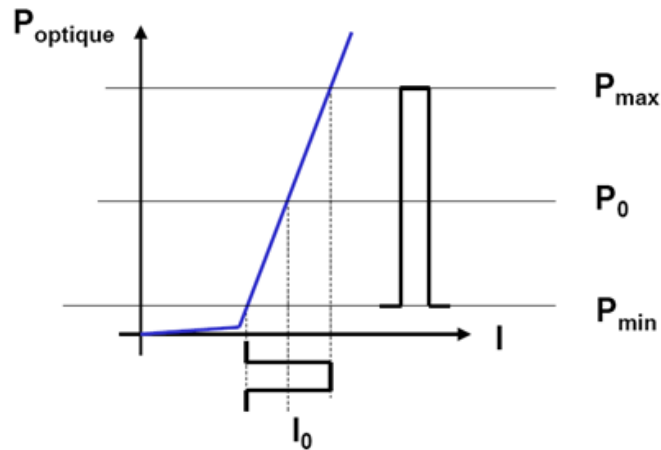
Dans les systèmes à détection d'intensité, le signal optique transmis est unipolaire : on module une puissance qui est une grandeur positive.

On utilise des modulations à deux niveaux (considérations de simplicité à haut débit) sur un canal à grande bande passante tels les codages Manchester, RZ, ou NRZ.

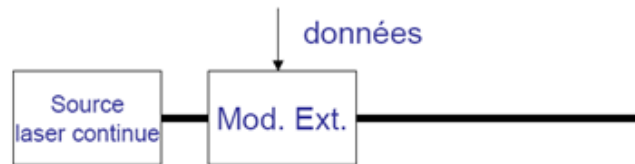


**Figure 4.09 :** Modulation numérique utilisées en optique

Il y a deux moyens de moduler un signal lumineux : soit en modulation directe en agissant directement sur le courant de polarisation du laser, soit en modulation indirecte qui est plutôt assurée par un dispositif placé après l'émetteur dans la chaîne de transmission. [24]



**Figure 4.10 :** *Modulation directe d'un laser*



**Figure 4.11 :** *Modulation externe*

#### 4.2.6 Le mélange à quatre ondes

L'effet Kerr traduit la variation de l'indice de réfraction du cœur d'une fibre optique, de façon non-linéaire, en fonction de l'intensité du rayon lumineux le traversant. Cet effet est à l'origine de plusieurs phénomènes comme l'automodulation de phase, et le mélange quatre ondes.

En effet, en absence de dispersion chromatique, lorsque deux ondes aux pulsations  $\omega_1$  et  $\omega_2$  se recouvrent dans une fibre, de nouvelles pulsations :

$$\omega_3 = 2\omega_1 - \omega_2 \text{ et } \omega_4 = 2\omega_2 - \omega_1 \text{ sont créées.}$$

Ce phénomène est appelé mélange à quatre ondes ou « Four Wave Mixing » (FWM).

C'est le cas lorsque le multiplexage en longueur d'onde est utilisé en télécommunication pour augmenter la capacité d'une liaison sans augmenter le débit par canal. Le champ créé aux pulsations  $\omega_3$  et  $\omega_4$  dépend de la phase relative des champs aux pulsations  $\omega_1$  et  $\omega_2$ . La dispersion chromatique désaccorde les différentes phases et peut réduire considérablement l'effet. Lorsque ce n'est pas le cas (dispersion chromatique faible et signaux intenses), cet effet est catastrophique lorsque des signaux sont présents aux pulsations  $\omega_3$  et  $\omega_4$ . En effet, une corrélation de

l'information présente dans les canaux 1 et 2 se trouve dupliquée dans les canaux 3 et 4 (diaphonie). Cet effet dégrade rapidement la qualité de la transmission. [25][35]

### 4.3 Etude de la transmission multi-canal sur fibre optique

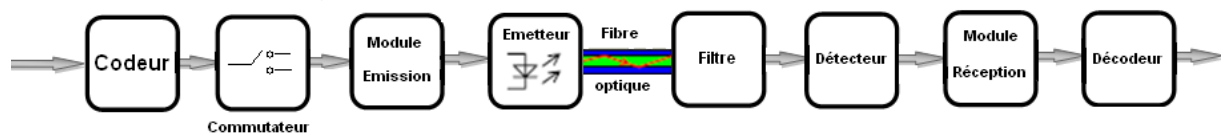
#### 4.3.1 Principe

Le principal problème causé par la dispersion est l'étalement d'une impulsion lumineuse, provoquant des distorsions au bout de quelques kilomètres, augmentant le taux d'erreurs binaire de la liaison numérique.

Nous proposons de réduire ces effets afin de permettre une plus grande longueur de la liaison.

Pour cela, la solution repose sur un principe simple qui est d'émettre, alternativement, une information sur n-longueurs d'ondes orthogonales de façon à annuler l'interférence entre les impulsions successives. Cette astuce offrira à la liaison une plus grande tolérance à l'étalement de l'impulsion, ce qui permettra de la rallonger par la suite.

#### 4.3.2 Schéma synoptique de la liaison



**Figure 4.12 :** schéma synoptique de la liaison après rallongement

#### 4.3.3 Description des différents blocs

##### 4.3.3.1 Le codeur

Le codeur adapte l'information numérique à transmettre (détection d'erreur, modulation numérique).

##### 4.3.3.2 Le commutateur

Ce dispositif permet de passer alternativement sur les n-longueurs d'ondes d'émission.

Il est donc nécessaire qu'il puisse supporter la capacité de la transmission. Etant donné que le débit maximum envisagé est de 10Gbit/s (pour les G 652), le commutateur devra alors supporter une fréquence de 10GHz pour pouvoir garantir la conservation de la qualité du service.

#### 4.3.3.3 Le module émetteur

Le module d'émission transforme les signaux logiques en impulsions de courant d'injection.

#### 4.3.3.4 L'émetteur

L'émetteur convertit les impulsions lumineuses en puissance lumineuse envoyée à l'entrée de la fibre optique.

La source, comme dans toutes liaisons par fibre optique monomode, est généralement constituée par des Lasers. En effet, ces derniers offrent les performances demandées pour ce type de transmission que ce soit en terme de puissance, de rapidité, ou de cohérence du signal lumineux émis.

Comme pour les technologies WDM, on peut, soit utiliser une seule source à grande largeur spectrale, soit utiliser deux sources à largeur spectrale faible.

#### 4.3.3.5 La fibre optique

La fibre optique guide l'onde lumineuse.

Tous les types de fibres compatibles avec les technologies WDM peuvent être utilisés avec cette technique, c'est-à-dire les fibres à coefficient de dispersion non-nul. Ce qui exclut les G 653 qui présentent un coefficient de dispersion nul dans la bande C, accentuant les effets non-linéaires tel que le mélange à quatre ondes dans cette bande. Néanmoins, pour la rentabilité de l'installation, la présente méthode est surtout utilisée avec des fibres à forte dispersion chromatique. Notamment les G 652 qui sont des fibres anciennes et qui sont aussi utilisées sur de moyennes distances.

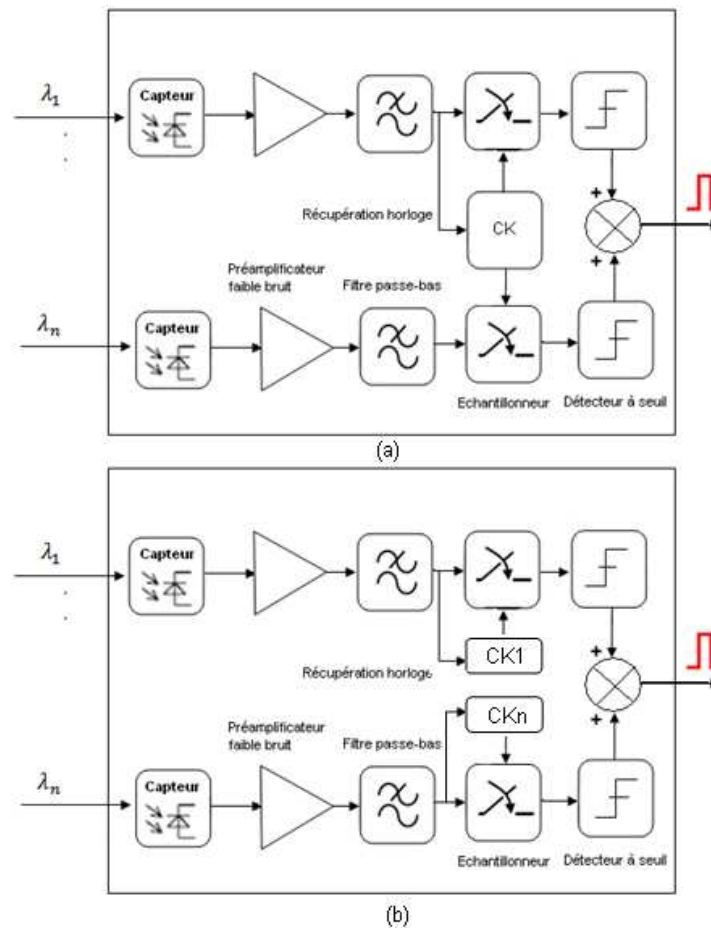
#### 4.3.3.6 Le filtre

Le pouvoir de séparation du filtre déterminera en partie le choix des longueurs d'ondes d'émission. Comme ceux utilisés pour les technologies DWDM, la bande passante devra être égale à 20% de  $\Delta f$  (où  $\Delta f$  est l'espacement entre les canaux). [24]

#### 4.3.3.7 Le détecteur

Le détecteur permet de convertir le signal lumineux en impulsion électrique, entre autre, et de rassembler les informations apportées sur les  $n$ -longueurs d'ondes afin de reconstituer le message original.

Comme indiqué dans la figure 4.13, le bloc du détecteur est formé par  $n$ -capteurs,  $n$ -décideurs à seuil, et un additionneur.



**Figure 4.13 :** a) Constitution du détecteur avec une simple horloge  
b) Constitution du détecteur avec plusieurs horloges

Après avoir été séparées par le filtre, les différentes longueurs d'ondes émises sont ensuite converties en signaux électriques par chacun des deux capteurs ; les circuits de décision les transforment à leur tour en signaux binaires ('0' ou '1'). Puisque l'émission se fait en jouant alternativement sur  $n$ -longueurs d'ondes  $\lambda_1$  à  $\lambda_n$ , additionner les signaux en sortie des circuits de décision devrait nous permettre de rétablir le train de bits émis.

#### 4.3.3.8 Le module de réception

Le module de réception transforme les impulsions de courant en signaux logiques et élimine les distorsions dues à la propagation.

#### 4.3.3.9 Le décodeur

Le décodeur reconstitue l'information numérique (démodulation et détection d'erreur).

Ainsi par rapport à une liaison par fibre optique habituelle, nous pouvons remarquer les blocs : commutateur, filtre, et détecteur qui ont été implantés afin de pouvoir rallonger la liaison.

### 4.3.4 *Evaluation des paramètres de la transmission*

Dans ce travail nous avons limité notre étude au cas d'une transmission à modulation d'intensité lumineuse, avec un codage NRZ.

L'information est transmise dans la fibre sous la forme d'une impulsion lumineuse. Plus précisément, sous la forme d'une impulsion gaussienne dont l'amplitude a pour expression : [31]

$$A(z, t) = A_0 \exp \left( -\frac{(1+iC)}{2} \left( \frac{t}{T_0} \right)^2 \right) \quad (4.04)$$

Où

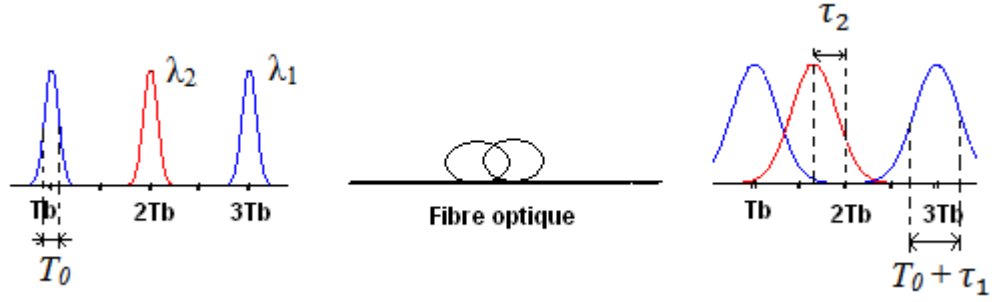
$A_0$  est l'amplitude initiale de l'impulsion

$C$  est un coefficient sans dimension qui détermine la forme de l'impulsion

$T_0$  est homogène à un temps et représente la largeur à 1/e de l'impulsion

La figure 4.14 illustre la déformation d'une série d'impulsions lumineuses après être passées par une longueur finie de fibre optique (dans le cas où on n'utilise que deux longueurs d'ondes).





**Figure 4.14 :** Déformation d'une série d'impulsions lumineuses après passage par fibre optique

#### 4.3.4.1 Les retards

Les paramètres qui nous intéressent sont principalement les retards  $\tau_1$  et  $\tau_2$  ( $\tau_n$  dans le cas de  $n$ -longueurs d'ondes), respectivement le retard différentiel (dû à la dispersion chromatique) et un retard supplémentaire causé par la différence des conditions de propagation entre  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ .

En notons  $S_0$ : le seuil de décision des circuits de décision à la réception, prenant des valeurs entre 0 et 1 dont 1 correspond à l'amplitude maximale du signal à la réception, et  $l_d$ : la limite du retard différentiel imposée, prenant des valeurs entre 0 et 1 dont 1 correspond au temps de bits c'est-à-dire à  $nT_b$ . Nous avons les systèmes d'inéquations suivant :

$$\begin{cases} \tau_1 \leq l_d n T_b \\ \tau_2 \leq Re\left\{(T_0 + \tau_1)\sqrt{(1 - iC)(-\ln S_0)}\right\} = (T_0 + \tau_1)\sqrt{(-\ln S_0)} \end{cases} \quad (4.05)$$

Pour une transmission sur  $n$ -canaux la valeur à la place de  $\tau_2$  retenue est celle correspondante à la  $n$ -ème « sous-porteuse ». Le second membre de l'inégalité ne change pas dans ce cas.

Pratiquement,  $\tau_1$  détermine la longueur de la liaison et  $\tau_n$  l'espace inter-canal entre  $\lambda_1$  et  $\lambda_n$  et aussi le nombre de canal par la même occasion.

En effet, soit  $D_{\lambda 1}$  le coefficient de dispersion en  $\lambda_1$ . Si  $\lambda_n - \lambda_1$  est suffisamment petit, on aura :

$$\begin{cases} \tau_1 = LD_{\lambda 1} \Delta \lambda \\ \tau_2 = LD_{\lambda 1} (\lambda_n - \lambda_1) \end{cases} \quad (4.06)$$

Sinon, avec  $n_{g n}$  et  $n_{g 1}$  respectivement l'indice de groupe correspondant à  $\lambda_n$  et  $\lambda_1$ , le système (4.06) deviendra :

$$\begin{cases} \tau_1 = LD_{\lambda 1} \Delta \lambda \\ \tau_2 = \frac{L}{c} (n_{gn} - n_{g1}) \end{cases} \quad (4.07)$$

(Il en est de même pour  $\tau_1$ , si  $\lambda_1 - \lambda_n$  est trop grand, le retard différentiel ne sera plus la même pour  $\lambda_1$  et  $\lambda_n$ )

Evidemment, la seconde expression de  $\tau_2$  donnera une valeur plus grande que la première et réduira alors l'efficacité de la technique. C'est pour cela que, par la suite, nous poserons la condition suivante :

$$|\lambda_1 - \lambda_n| = 2(n-1)\Delta\lambda \leq 1 \text{ nm} \quad (4.08)$$

Ainsi les équations de (4.06) nous permettent de déterminer la distance maximale  $L_{max}$  de la liaison après rallongement :

$$L_{max} = \min \left\{ \frac{\tau_{1max}}{D_{\lambda 1} \Delta \lambda}, \frac{\tau_{2max}}{D_{\lambda 1} (\lambda_n - \lambda_1)} \right\} \quad (4.09)$$

Avec :

$$\begin{cases} \tau_{1max} = l_d n T_b \\ \tau_{2max} = (T_0 + l_d n T_b) \sqrt{(-\ln S_0)} \end{cases} \quad (4.10)$$

Soit la fonction  $y(T_b) = \frac{l_d n T_b}{D_{\lambda 1} \Delta \lambda} - \frac{(T_0 + l_d n T_b) \sqrt{(-\ln S_0)}}{D_{\lambda 1} (\lambda_n - \lambda_1)}$ , on remarque que cette fonction passe par l'origine en un seul point :

$$T_{b0} = \frac{\Delta \lambda T_0 \sqrt{(-\ln S_0)}}{l_d n ((\lambda_n - \lambda_1) - \Delta \lambda \sqrt{(-\ln S_0)})} \quad (4.11)$$

Ainsi :

- Si  $T_b > :$

$$L_{max} = \frac{(T_0 + l_d n T_b) \sqrt{(-1)}}{D_{\lambda 1} (\lambda_n - \lambda_1)} \quad (4.12)$$

- Si  $T_b \leq$ , nous allons prendre :

$$L_{max} = \frac{l_c}{D_i} \quad (4.13)$$

Afin de réduire les effets de  $\tau_2$ , qui limite beaucoup l'efficacité de la technique, il faudrait des signaux d'horloge différents pour tous les  $\lambda_n$  (comme le montre la figure 4.13.b). Dans ce cas, la nouvelle valeur limite de  $\tau_2$  est :

$$\tau_2 \leq T_b \quad (4.14)$$

Alors, pour  $n = 2$  seulement :

$$L_{max} = \frac{\tau_{i,max}}{D_{\lambda i} \Delta \lambda} = \frac{l_d n T_b}{D_{\lambda i} \Delta \lambda} \quad (4.15)$$

Ce qui limite le nombre de canaux à utiliser à 2.

#### 4.3.4.2 Le facteur de rallongement

Le facteur de rallongement est un paramètre introduit ici pour évaluer l'efficacité de la technique. Il est donné par le rapport :

$$r = \frac{L_{max}}{L_i} \quad (4.16)$$

Où  $L_i$  est la longueur initiale de la liaison

Après avoir défini les paramètres fondamentaux de la liaison, nous allons procéder à l'étude de son application sur le terrain. Faute de moyen, notre étude se limitera à une simulation.

### 4.4 Simulation d'une transmission multi-canal sur fibre optique monomode

#### 4.4.1 Position du problème

##### 4.4.1.1 Problématique

Au début des années 80, la fibre optique faisant l'objet de la recommandation G652 de l'UIT fit son apparition dans le monde des télécommunications. Etant alors le plus performant à cette

époque, une époque où les fibres multimodales étaient encore d'actualité, les opérateurs se sont rués vers cette merveille technologique. Les applications étaient encore de type monolambda. Durant à peu près une décennie, la G652 régnait en maître sur le monde des télécommunications à haut débit si bien qu'actuellement près de 90% des fibres installées sont de catégorie G652. [27]

Aujourd'hui il est donc nécessaire d'optimiser l'exploitation de ces anciennes installations pour éviter, entre autre, une gestion complexe du parc de câbles installés et à construire. Le problème principal s'agit, généralement, d'augmenter le produit capacité x distance.

#### 4.4.1.2 Solution

Afin d'augmenter le produit capacité x distance (dans notre cas : à capacité fixe, augmente la distance d'une liaison), la solution proposée est l'utilisation de plusieurs longueurs d'ondes pour transmettre une information unique. D'où l'appellation de *multi-canal*.

Puisque les transmissions dans les anciennes liaisons par fibre étaient de type monolambda, il n'y a donc pas de problème de ressource lié à l'utilisation de plusieurs longueurs d'ondes. De plus, les technologies actuelles nous permettent de mettre en œuvre cette solution, ce qui n'était pas le cas avant.

### 4.4.2 Exemple de calcul

#### 4.4.2.1 Enoncé

Un opérateur a fait installer une liaison de 23 km à 2,5Gbit/s, par fibre optique G652 il y a 20 ans, reliant une région A et une région B. Ce même opérateur veut à présent établir une liaison entre la région A et une autre région C, relativement proche de B, et avec un trafic peu important si bien qu'une capacité de 2,5 Gbit/s suffirait pour la liaison entre A et C (en passant par B).

Nous allons calculer jusqu'où nous pourrions rallonger la liaison sans changer sa capacité initiale.

#### 4.4.2.2 Calculs

Voici les caractéristiques essentielles de la liaison :

- Emetteur : laser monomode de largeur spectrale 0,1nm
- Puissance d'émission : 2mW
- Longueur d'onde d'émission : 1550 nm

- Durée d'une impulsion : 20ps
- Type de fibre : G652 (D = 17 ps/nm.km ; coefficient d'affaiblissement linéique  $\alpha = 0,3\text{dB/km}$ )
- Récepteur : PIN/transimpédance (seuil de détection  $S_D = -28\text{dBm}$ )
- Limite du retard différentiel : 10% de
- $S_0 =$  ; ce qui fait que  $\sqrt{(-\ln S_0)}$

D'après ces caractéristiques nous allons prendre alors :

$$n = 2$$

Et

$$\lambda_2 - \lambda_1 = 0,2 \text{ nm} < 1 \text{ nm}$$

Ainsi la condition définie par (4.08) est satisfaite.

Dans un premier temps, calculons la longueur maximale de la liaison dans le cas où les effets de  $\tau_2$  ne sont pas réduits.

a. Calcul de  $T_b$  et de  $T_{b0}$  :

- Avec une capacité de 2,5Gbit/s on a :

$$T_b = \frac{1}{2,5} \text{ s}$$

Après calcul on trouve :

$$T_b = 400 \text{ ps}$$

- D'après la relation (4.11) on a :

$$T_{b0} = \frac{0,120}{0,12((1550,2 - 1550) - 0,1)} = 100 \text{ ps}$$

b. Détermination de  $L_{max}$

Comme  $T_b > T_{b0}$ ,  $L_{max}$  est donnée par la relation (4.12), d'où :

$$L_{max} = \frac{20 + 0,12.400}{17,02} = 29,41 \text{ km}$$

c. Calcul de la puissance à la réception

La puissance à la réception est donnée par :

$$P_r[dBm] = P_e[dBm] - A_{\text{ligne}} - A_{\text{connecteur}}$$

Avec :

$P_e$  : Puissance d'émission

$A_{\text{ligne}}$  : Affaiblissement totale en ligne égal à  $\alpha L$

$A_{\text{connecteur}}$  : Perte au niveau du connecteur évaluée à 0,3dB

On a alors :

$$P_r[dBm] = 10 \log(2) - 0,3.29,41 - 0,3 = -6,11 dBm$$

Comme nous avons pris  $\tau_{2max} = (T_0 + l_a n T_b) \sqrt{-\ln S_0}$ , il est donc nécessaire que

$10 \log S_0 + P_r$  soit supérieure à  $S_D(-28 dBm)$  si on veut que le signal soit détecté à la réception.

Nous avons alors :  $10 \log 0,36 + P_r = -10,55 dBm >$ , d'où :

$$L_{max} = 29,41 km$$

d. Calcul du facteur de rallongement

D'après (5.10), le facteur de rallongement  $r$  est égal à :

$$r = \frac{29,41}{23} = 1,27$$

Donc nous n'avons réussi qu'à rallonger la liaison de 1,27 fois sa longueur initiale.

A présent, nous allons refaire le calcul mais cette fois, pour un système où les effets de  $\tau_2$  sont réduits.

a. Détermination de  $L_{max}$

D'après la relation (4.15) :

$$L_{max} = \frac{0,1.2.400}{17,0,1} = 47,05 km$$

b. Calcul de la puissance à la réception

La puissance à la réception est donnée par :

$$P_r [dBm] = P_e [dBm] - A_{\text{ligne}} - A_{\text{connecteur}}$$

Avec :

$P_e$  : Puissance d'émission

$A_{\text{ligne}}$  : Affaiblissement totale en ligne égal à  $\alpha L$

$A_{\text{connecteur}}$  : Perte au niveau du connecteur évaluée à 0,3dB

On a alors :

$$P_r [dBm] = 10 \log(2) - 0,347,05 - 0,3 = -11,40 \text{ dBm}$$

Comme  $P_r > S_D (-28 \text{ dBm})$  le signal est donc détectable par le récepteur, d'où

$$L_{\text{max}} = 47,05 \text{ km}$$

c. *Calcul du facteur de rallongement*

D'après (5.10), le facteur de rallongement  $r$  est égal à :

$$r = \frac{47,05}{23} = 2,04$$

Donc nous avons réussi à rallonger la liaison de 2 fois sa longueur initiale.

Notons que si, après tous les calculs, on trouve  $P_r < S_D$ , il faudrait dans ce cas soit :

- Augmenter la puissance d'émission
- Changer d'émetteur ou de récepteur
- Introduire un amplificateur au niveau de la liaison
- Diminuer  $L$

#### 4.4.3 Description de l'outil de simulation

Afin d'évaluer les différents paramètres énoncés plus haut, nous avons développé un programme sous le logiciel MATLAB version 7.0. Dans ce sens, le programme nous permettra aussi de simuler la mise en œuvre de notre technique dans une liaison par fibre optique.

Pour cela, nous avons surtout porté notre attention sur la fibre optique et défini ensuite ses caractéristiques en fonction de nos besoins. D'après les études menées précédemment, les paramètres essentiels à la simulation sont : le coefficient de dispersion et le coefficient d'atténuation linéique de la fibre. Nous nous sommes tenues aux valeurs recommandées par l'UIT comme référence vue l'influence de cet organe des Nations Unies sur le monde des télécommunications dans le monde.

- **Exemple d'application**

Considérons l'exemple suivant :

**TRANSMISSION MULTICANAL SUR FIBRE OPTIQUE**

**Données**

Capacité de la liaison: 2.5 Gbit/s

Longueur d'onde émission: 1530 nm

Nombre de canaux: 2

Limite du retard différentiel: 20 % Tb

Valeur du seuil: 0.36

Puissance émission: 1 mW

Largeur spectrale émetteur: 0.2 nm

Durée d'une impulsion: 20 ps

Longueur initiale de la liaison: km

Caractéristiques de la fibre optique:

Coefficient de dispersion: 15 ps/nm.km

Coefficient d'affaiblissement: 0.2 dB/km

**Résultats**

Pour un système simple

Longueur max liaison: 30.323 km

Facteur de rallongement: 1.1371

Pour un système à plusieurs horloges

Longueur max liaison: 53.3333 km

Facteur de rallongement: 2

Puissance à la sortie: -10.9667 dBm

Calculs Effacer

**Figure 4.15 :** Exemple de calcul de la distance maximale

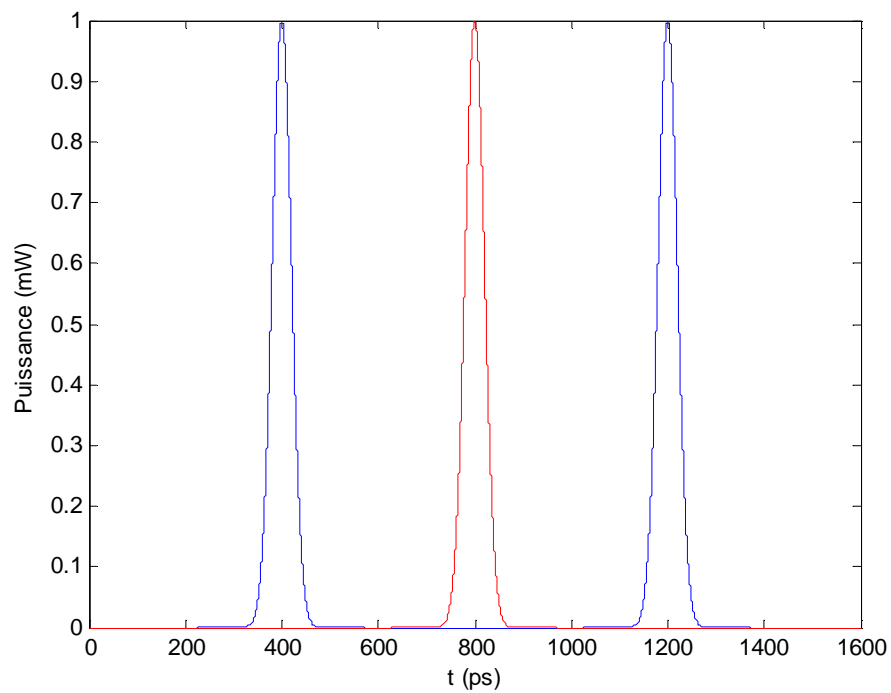
En notons que tous les calculs se font selon les expressions vues précédemment, les résultats ne nous étonnes pas beaucoup. La longueur initiale de la liaison ici est définie par défaut et est donnée par la formule :



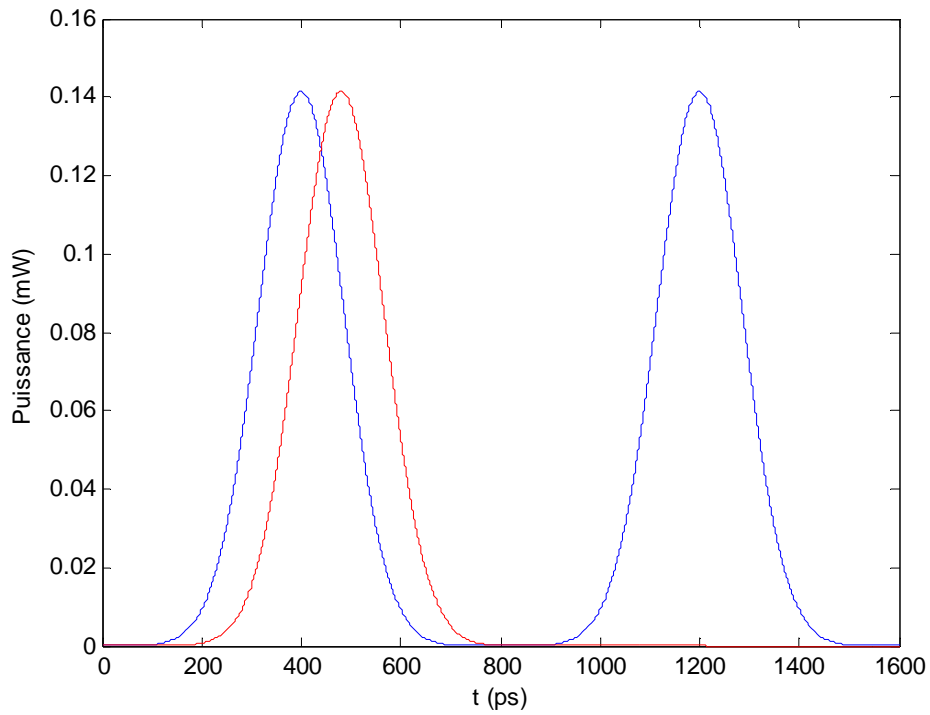
$$L_i = \frac{l_d T_b}{D \Delta \lambda} \quad (4.17)$$

Avec un coefficient de dispersion de 15 ps/nm.km et une source de largeur spectrale 0.2 nm, nous avons réussi à obtenir un facteur de rallongement maximum de 2 pour 2 canaux.

Les figures 4.16 et 4.17 représentent l'allure des impulsions à l'entrée et à la sortie de la fibre. Les canaux sont illustrés par les couleurs différentes, bleu pour la longueur d'onde plus élevée ( $\lambda_1$ ) et rouge pour la plus faible ( $\lambda_2$ ).



**Figure 4.16 :** *Forme des impulsions à l'entrée de la fibre optique*

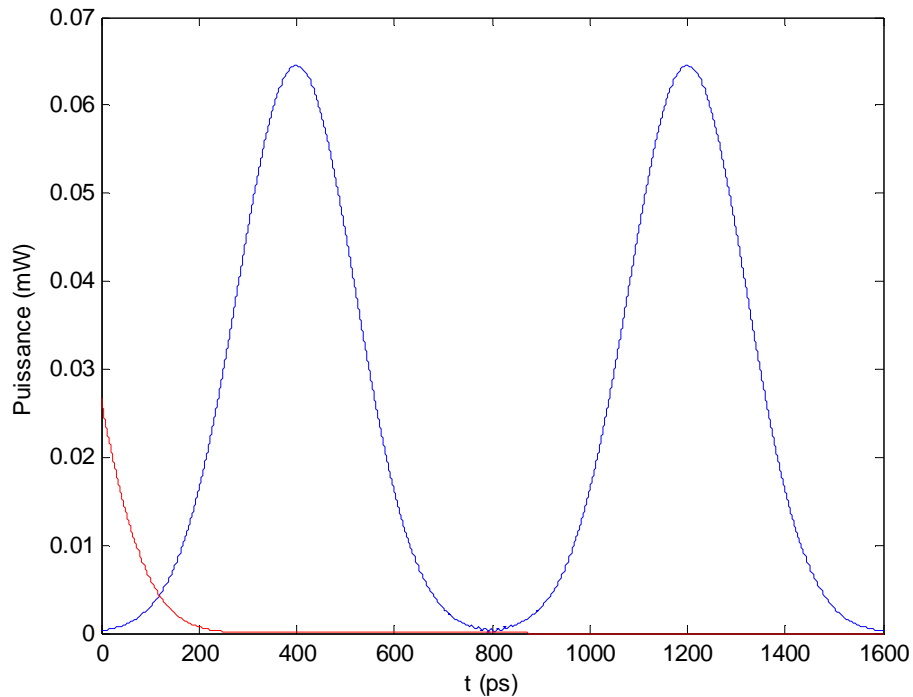


**Figure 4.17 :** *Forme des impulsions à la sortie de la fibre optique*

L'axe des ordonnées est perçu comme une amplitude, c'est pour cela qu'il a des valeurs négatives.

Dans les figures, on remarque le décalage important de l'impulsion « rouge » par rapport au « bleu ». Ceci est dû au retard différentiel  $\tau_2$  causé par la différence  $\lambda_2 - \lambda_1$ . Ainsi, il est vraiment nécessaire d'avoir des signaux d'horloges différents pour chaque canal si on veut avoir un meilleur rendement.

Si nous augmentons le nombre de canal à 3, l'allure des impulsions à la sortie deviendront :



**Figure 4.18 :** *Forme des impulsions à la sortie de la fibre optique pour 3 canaux*

Dans ce cas, la relation 4.14 n'est plus vérifiée et nous auront du mal à reconstituer l'information émise.

En conclusion, nous pouvons affirmer qu'au mieux la transmission multi-canal peut doubler la longueur d'une liaison en faisant appel à un système relativement simple.

#### **4.4.4 Avantages de la transmission multi-canal**

Les principaux avantages de la transmission multi-canal sont :

- ✚ Technique relativement simple à mettre en œuvre
- ✚ Elle permet d'optimiser l'exploitation des anciennes installations
- ✚ Dans de bonnes conditions, elle permet de doubler la longueur d'une liaison en gardant sa capacité

#### **4.4.5 Inconvénients**

- ✚ Cette technique s'appuie sur de vieilles installations qui peuvent être sujettes à des pannes
- ✚ Consomme les ressources en longueurs d'ondes des fibres optiques
- ✚ Au mieux, elle ne permet que de doubler la longueur d'une liaison

#### **4.5 Conclusion**

Nous avons ainsi pu voir dans ce chapitre les caractéristiques d'une transmission sur fibre optique et étudier les paramètres essentiels d'une transmission multi-canal sur ce même type de support. Les résultats obtenus sont plus ou moins satisfaisants.

## 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 termes de support de transmission dans les télécommunications à haut débit. Nous avons aussi pu mettre le point sur la dispersion chromatique, qui est la principale cause de la limitation du produit capacité x distance dans une liaison par fibre optique donnée, en analysant ses effets et en évaluant ses caractéristiques. Ce qui nous a aidé à trouver un moyen de le contourner afin d'augmenter le produit capacité x distance d'une liaison optique (la capacité est fixée dans notre cas). Ce moyen est la transmission d'une information par l'intermédiaire de plusieurs longueurs d'ondes différentes (analogue à une transmission multi-porteuses).

Ainsi, après une étude détaillée de l'application d'une transmission multi-canal sur une fibre optique G652, où le coefficient de dispersion chromatique est suffisamment élevé pour nous permettre d'affirmer que ce type de transmission est tout aussi applicable sur d'autres catégories de fibres optiques (à part la G653 bien sûr), nous en concluons que nous avons atteint notre objectif qui est de permettre le rallongement d'une liaison sans changer sa capacité. Néanmoins, les résultats ont été obtenus sous de nombreuses contraintes et le plus grand inconvénient de cette transmission, qui est de consommer les ressources en longueurs d'ondes des fibres optiques, reste à voir.

Comme le multiplexage statistique en TDMA qui a permis d'augmenter le débit d'information dans les systèmes GPRS en allouant plusieurs slots à une communication au lieu d'un seul, selon les disponibilités, ce type de transmission, simple mais efficace, présente un potentiel qui pourrait encore être profitable aux réseaux actuels.

Nous avons alors pu ajouter une nouvelle ligne à la liste des solutions pour la dispersion chromatique que l'opérateur de télécommunication pourra prendre en compte quand il décidera d'installer une nouvelle liaison par fibre optique.

## **ANNEXE 1**

### **Evolution de la technologie des systèmes à fibres optiques**

#### **A1.1 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.

#### **A1.2 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.

#### **A1.3 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.

#### **A1.4 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.

#### **A1.5 G5 (Cinquième génération) : 2000 –2002**

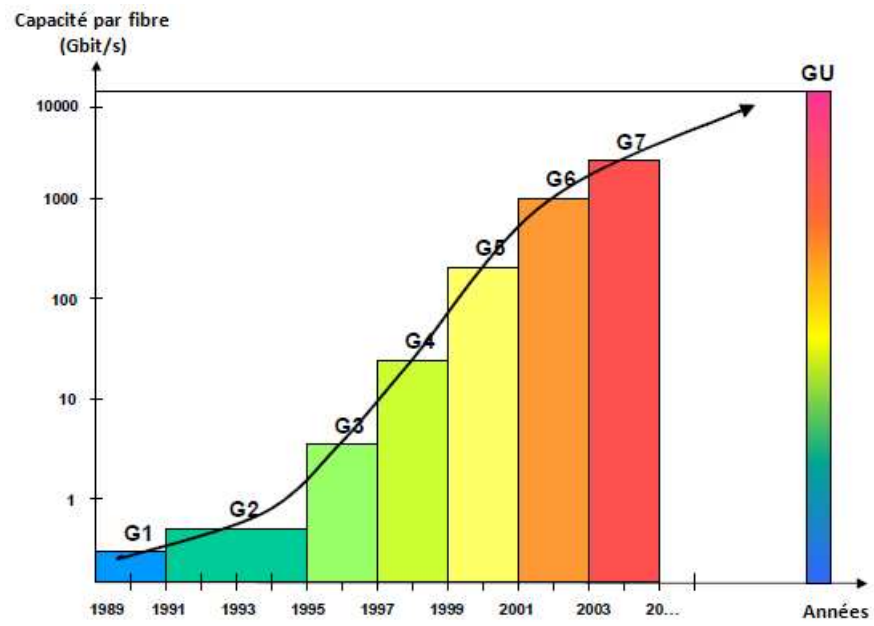
Les systèmes de la cinquième génération sont actuellement en cours d'installation ou mis en service depuis peu. La bande passante des EDFA est à nouveau améliorée, et la capacité par couleur passe à 10 Gbit/s. ces systèmes fournissent des capacités de l'ordre de 160 Gbit/s par paire de fibres (16 couleurs à 10 Gbit/s).

#### **A1.6 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.

#### **A1.7 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 accroîtra encore le nombre de couleurs à 10 Gbit/s (soit 150 à 200\*10 Gbit/s). La spécification de cette génération délicate 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 [29].



**Figure A01 :** *Evolution de la capacité des systèmes de transmissions optiques*



## **ANNEXE 2**

### **Fabrication d'une fibre optique**

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 [1] [19].

#### **A2.1 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.

#### **A2.2 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 linéiques 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.

### A2.3 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 transformés 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).

### A2.4 Fibrage

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



**Figure A02 :** *Etirage du préforme*

Les différentes étapes du fibrage sont :

- Chauffage vers  $200^{\circ}C$  de la préforme dans un four,
- Etirage du verre en fusion pour un diamètre de  $125\ \mu m$  sans revêtement,
- Contrôle du diamètre de la fibre,
- Gainage par un premier revêtement de  $210\ \mu m$  de diamètre pour améliorer sa résistance,
- Deuxième gainage par un second revêtement de  $240\ \mu m$  de diamètre,
- Mesure de la tension de fibrage,

- Enroulement de la fibre en bobine.

## ANNEXE 3

### Présentation de l'outil de simulation

#### A3.1 L'interface

L'outil ne comporte qu'une fenêtre principale où toutes les données sont entrées et où on peut voir les résultats par la même occasion. Voici l'interface :

The screenshot shows a software window titled "fenetre" with a menu bar containing "Fichier". The main title is "TRANSMISSION MULTICANAL SUR FIBRE OPTIQUE". The interface is split into two columns. The left column, labeled "Données", contains several input fields with units: "Capacité de la liaison" (Gbit/s), "Longueur d'onde émission" (nm), "Nombre de canaux", "Limite du retard différentiel" (% Tb), "Valeur du seuil", "Puissance émission" (mW), "Largeur spectrale émetteur" (nm), "Durée d'une impulsion" (ps), "Longueur initiale de la liaison" (km), and a section for "Caractéristiques de la fibre optique" with a dropdown menu, "Coefficient de dispersion" (ps/nm.km), and "Coefficient d'affaiblissement" (dB/km). The right column, labeled "Résultats", shows results for two system types: "Pour un système simple" and "Pour un système à plusieurs horloges". Each type has fields for "Longueur max liaison" (km) and "Facteur de rallongement". Below these is "Puissance à la sortie" (dBm) and another dropdown menu. At the bottom right are "Calculs" and "Effacer" buttons.

**Figure A03 :** *Interface principale*

Les données sont entrées à gauche et les résultats, notamment les longueurs maximales et la puissance à la sortie de la fibre, sont affichés à droite. Il est aussi possible de visualiser l'allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la ligne de transmission par l'intermédiaire du « combo box » au dessus des boutons « Calculer » et « Effacer ».

### A3.2 Les formules

Tous les expressions nécessaires ont été vues au paragraphe 4.2.4, mais en plus, pour l'expression des signaux à l'entrée, respectivement, à la sortie de la fibre optique nous avons utilisé les expressions A01 et A02 : [31]

$$A(z, t) = A_0 \exp \left( -\frac{(1+iC)}{2} \left( \frac{t}{T_0} \right)^2 \right) \quad (\text{A01})$$

$$A(z, t) = A_0 \exp \left( -\frac{\alpha}{2\pi 4\beta_2} z \right) \frac{T_0}{[T_0^2 - i\beta_2 z(1+iC)]^{1/2}} \exp \left( -\frac{(1+iC)t^2}{2[T_0^2 - i\beta_2 z(1+iC)]} \right) \quad (\text{A02})$$

Où

$A_0$  est l'amplitude initiale de l'impulsion

$C$  est un coefficient sans dimension qui détermine la forme de l'impulsion

$T_0$  est homogène à un temps et représente la largeur à 1/e de l'impulsion

$\alpha$  est le coefficient d'affaiblissement linéique

$\beta_2$  est la dérivée au second ordre de la constante de propagation

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Weil F., « *Optique moderne* », Ellipses : Paris, 2006.
- [2] Randriantsiresy E., *Notion de base sur la transmission numérique*, cours 4<sup>ème</sup> année, Dép.Tél.- ESPA, A.U. :2007-2008
- [3] [http:// www2.fsg.ulaval.ca/opus/physique 534/optique](http://www2.fsg.ulaval.ca/opus/physique%20534/optique)
- [4] Claire J.J., Préface du Pr. Francon, « *Télécommunications optiques : Introduction à l'optique intégrée* » : Masson, Paris, 1977
- [5] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre\\_optique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_optique)
- [6] Cordat C.C., « *La Fibre optique* », <http://mptranss.free.fr/cc/fibre.html>, 2003
- [7] « *Technologie des télécoms* », Hermès, Paris 1995
- [8] Pujolle G., « *Les Réseaux* », 5<sup>è</sup> édition, Best of, Eyrolles, 2000
- [9] Cimelli C., Bourgeron R. , « *Guide du technicien en électronique* », éditions Hachette, 1995
- [10] « *Transmission des Télécommunications* » , CNAM, Cours B11- Partie 2 - Chapitre 5, 2005
- [11] <http://www.enst-bretagne.fr/>
- [12] « *Complément sur les fibres optiques* », Université de Sherbrooke, Faculté des Sciences, Dép. Physique, 2000
- [13] <http://www.telcite.fr/nwdm.html>
- [14] <http://www.zonehd.net/dossier/la-fibre-optique-une-technologie-de-pointe/4/>

- [15] Yves L., « *supports de transmission* », 2002
- [16] Caleca C., « *La fibre optique* », <http://christian.caleca.free.fr/fibroptique/>
- [17] <http://www.esi.01.com/>
- [18] François C., Christophe P., « *Réseaux et routage optique* », DESS TNI-ASR, 2004
- [19] Bélanger P.A., « *Les fibres optiques : supplément d'électromagnétisme appliqué* », Université Laval, Canada, 1999
- [20] Lecoy P., « *Traité des nouvelles technologies de télécommunications : Télécommunications optiques* », HERMES, 1997
- [21] <http://www.unige.ch/seinf/jfl/fibre/welcome.html>
- [22] <http://opt-fibre.phys.polymtl.ca/>
- [23] Pinson G., « *Physique Appliquée* », <http://www.syscope.net/elec/>, 2004.
- [24] Morvan M., « *Transmission sur Fibres optiques : Base d'ingénierie* », Cours 5 et 6, Dép. Optique – ENST, 2005.
- [25] Salvador R., « *Câble sous-marins à fibres optiques* », E7 555, 1995.
- [26] Georges T., « *Solitons dans les fibres optiques* », E1 985, 2000.
- [27] Bizeul J.C., « *Evolution de la fibre G652* », E2 555, 2003.
- [28] « *Dispersion chromatique* », <http://www.syscope.net/elec/>, 2004.
- [29] Thomine J.P., Fur L.L., « *La technologie des fibres optiques* », 2003
- [30] Roque D., « *La fibre NZDSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber)* », <http://www.enst-bretagne.fr>, 2003

- [31] Cassan E., Cassan S., « *Etude des propriétés physiques des fibres optiques à partir d'un modèle simple* », Institut d'Electronique Fondamentale – Université Paris-Sud Orsay, 2005.
- [32] Colomer L., « *Les mesures de dispersion chromatique (DC)* », Photon Line, Conférences Opto 2005.
- [33] Caleca C., « La fibre optique », <http://christian.caleca.free.fr/fibroptique/>, 6 mars 2005.
- [34] Cozannet A., Fleuret J., Maître H. et Rousseau M., « *Optique et Télécommunications* », Eyrolles, Paris, 1981.
- [35] Joindot M., Joindot I., « *Fibres optiques pour télécommunications* », E7 110, 2000.
- [36] <http://www.itu.int/>



## **PAGE DE RENSEIGNEMENTS**

**Nom :** ANDRIAMANARIVO

**Prénoms :** Zo Mahenina

**Adresse de l'auteur :** Lot K 26 Ambohitanety Alasora

ANTANANARIVO – 103

Madagascar

**E-mail :** zmaheninaz@yahoo.fr



**Titre de mémoire :** « REDUCTION DES EFFETS DE LA DISPERSION CHROMATIQUE SUR UNE FIBRE OPTIQUE PAR UNE TRANSMISSION MULTI-CANAL »

**Nombre de pages :** 104

**Nombres de tableau :** 06

**Nombre de figures :** 45

**Mots clés :** Fibre optique, transmission optique, impulsion lumineuse, dispersion chromatique, retard différentielle

Directeur de mémoire : RATSIHOARANA Constant

## RESUME

Les bases théoriques de la transmission par fibre optique ainsi que ses différents paramètres sont abordés dans ce livre. Il met aussi en évidence les atouts de la fibre optique en tant que support physique de transmission et expose la dispersion chromatique comme étant un problème pour la transmission sur ce type de support. Une solution est alors proposée pour contourner ce problème et ainsi réduire les effets néfastes de ce type de dispersion sur la propagation d'une impulsion lumineuse.

## ABSTRACT

We can see in this book the theoretical bases of optical fiber's transmission and its parameters. It also highlights the assets of optical fiber as a physical transmission support and shows chromatic dispersion as a matter for transmission on this kind of support. Then, a solution is given to get around this problem and reduce its bad effects on light impulse propagation.