

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université de Blida 1  
Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales IAES  
Département d'études spatiales



# Projet de fin cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master en  
aéronautique

Option : télécommunications spatiales



## Thème

Analyse Numérique Et Etude Spectrale De Réseaux De Bragg A Fibre :  
Compensation De La Dispersion Chromatique Dans Une Ligne De Transmission  
Optique



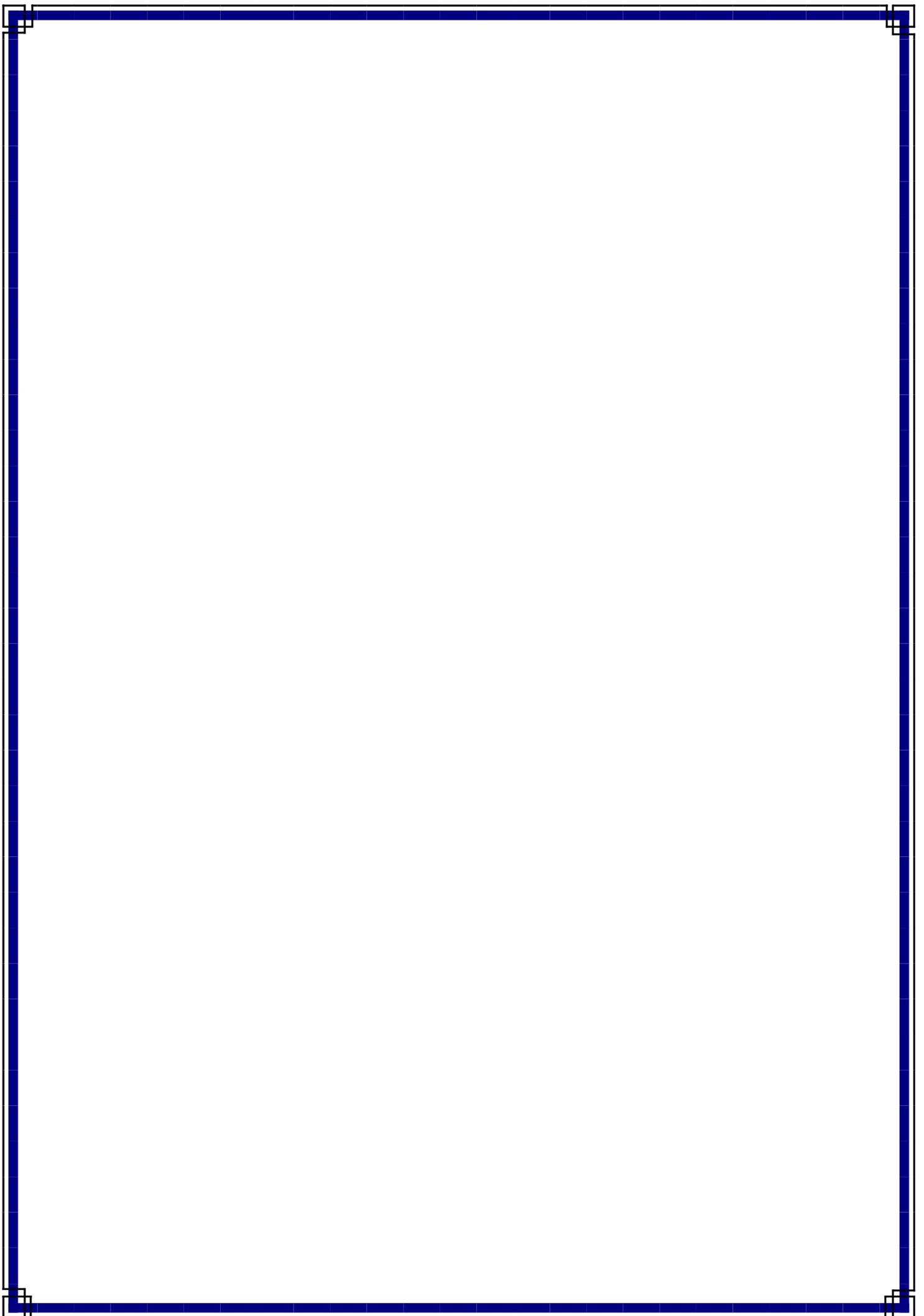
Réalisé par :

Tahi Mimouna Merabta  
Chadouli Sabra

Encadré par :

Mme El Akrmi Soumaya

Promotion : 2019







# REMERCIEMENTS

En préambule à ce mémoire nous remercions ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude. Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire. Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de l'Institut de l'Aéronautique et d'étude Spatiale (IAES), pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nous tenons à remercier notre promotrice ELAKERMI SOUMAYA, et ces mots sont pesés. Son aide, sa disponibilité, ses précieux conseils, d'une grande simplicité. On la remercie infiniment.

Nous tenons à remercier sincèrement tous les membres de CMSO d'Algérie Télécom, et notamment notre encadreur Mr RAHMANI AMINE et Mr CHADLI HICHEM.

Nous exprimons ensuite une profonde gratitude à Mr SEDAOU ABDELKADER qui est toujours montrée à l'écoute et très disponible avec sa grande expérience tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer, et sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

## *Dédicaces*

Je dédie ce travail :

A ma très chère maman qui m'a aidé et encouragé durant toute ma vie et mes études.

A mon meilleur oncle Becharef Abd El Kader, que j'aime beaucoup et qui a toujours été là pour moi.

A ma petite kitten.

A ma chère petite sœur SABRA ainsi qu'à tous mes amis.

*T'AHÍ MIMOUNA*

## *Dédicaces*

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents qui m'ont aidé et encouragé durant toute ma vie et mes études.

A mon chère frère : Chadouli Ben Yaagoub Yacine.

A mes chères sœurs : Mariouma, Houda, Manel.

A ma meilleure Mimouna, mes sœurs Fatima, Amel, Sarrah, Soumaya, ainsi qu'à tous mes amis.

*CHADOULI SABRA*

### Liste des acronymes:

**EDFA:** Erbium Doped Fiber Amplifier.

**NA:** Numerical Aperture.

**SMF:** Single Mode Fiber.

**PMD:** Polarization Mode Dispersion.

**DGD:** Differentiel Group Delay.

**DL:** Diodes Laser.

**DEL:** Diodes Electroluminescentes.

**PIN:** Positive Intrinsèque Négative Photodiode.

**LED:** Light Emitting Diode.

**ADSL:** Asymmetric Digital Subscriber Line.

**DSLAM:** Digital Subscriber Line Access Multiplexer.

**VDSL:** Very-high-bit-rate DSL.

**DSL:**Digital Subscriber Line.

**WDM:** Wavelength Division Multiplexing.

**UV:** Ultra Violet.

**OADM:** Optical Add/Drop Multiplexer.

**FFP:** Filter Fabry Perot.

**IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers.

**FBG:**Fiber Bragg Grating.

**FTTx: Fiber To The X**

**FTTN:** Fiber To The Neighborhood (Fibre jusqu'au quartier)

**FTTC :** Fiber To The Curb (Fibre jusqu'au trottoir)

**FTTS :** Fiber To The Street (Fibre jusqu'à la rue - bâtiment)

**FTTN :** Fiber To The Node (Fibre jusqu'au répartiteur)

**FTTB :** Fiber To The Building (Fibre jusqu'au bâtiment)

**FTTCab :** Fiber To The Cab (Fibre jusqu'au sous-répartiteur)

**FTTP :** Fiber To The Premises (Fibre jusqu'aux locaux - entreprises)

**FTTH :** Fiber To The Home (Fibre jusqu'au domicile)

**FTTE :** Fiber To The Entreprise (Fibre pour les entreprises)

**FTTO :** Fibre To The Office (Fibre jusqu'au bureau - entreprises)

## Liste des acronymes

---

**FTTLA** : Fiber To The Last Amplifier (Fibre jusqu'au dernier amplificateur)

**ZA** : Zone D'Activité

**NRA** : Nœud de Raccordement d'Abonnés.

**HFC** :HybridFiber Coaxial.

**SR** :Sous Réparateurs.

**PC** :Point DE Concentration

**Wi-Fi**: Wifi wireless fidelity

**Wi-max**: worldwide interoperability for Microwave Access

**G.FAST**: 1 Gbps Fast Access to Subscriber Terminals.

**Laser**: Light Amplification by Simulated Emission of Radiation

**Liste des figures :**

<b>FIG.1.1:</b> Illustration de l'amplification du signal.....	4
<b>FIG .1.2:</b> Historique des pertes dans les verres. ....	4
<b>FIG .1.3:</b> spectre électromagnétique. ....	7
<b>FIG. 1.4:</b> lumière recueillie sur un écran après avoir traversé un plan opaque percée d'un orifice circulaire. La dimension de la tache centrale et la présence des anneaux concentriques sont en contradiction avec les lois de l'optique géométrique. ....	7
<b>FIG.1.5:</b> réflexion d'un rayon sur une interface. ....	9
<b>FIG .1.6:</b> réfraction d'un rayon lumineux. ....	9
<b>FIG .1.7:</b> phénomène de réflexion totale. ....	9
<b>FIG. 1.8:</b> dispersion de la lumière a la traverse d'une goutte d'eau(simulation ©J.Roussel). ....	10
<b>FIG.1.9:</b> structure d'une fibre optique [5]. ....	11
<b>FIG.1.10:</b> principe de guidage de la lumière dans une fibre optique.....	12
<b>FIG.1.11:</b> fibre monomode et multimode – principe [7]. ....	13
<b>FIG.1.12:</b> fibre a saut d'indice.....	14
<b>FIG.1.13:</b> fibre a gradient d'indice. ....	15
<b>FIG.1.14:</b> fibre monomode. ....	15
<b>FIG.1.15:</b> Atténuation spectrale d'une fibre optique G.652. ....	18
<b>FIG.1.16:</b> l'atténuation dans la fibre optique. ....	18
<b>FIG.1.17:</b> Dispersion matériau dans la silice pure en fonction de la longueur d'onde. ....	19
<b>FIG.1.18:</b> Courbes de dispersion de quelques fibres optiques.....	20
<b>FIG.1.19:</b> dispersion chromatique (Le signal qui se propage s'élargit, le signal reçu est déformé par rapport au signal émis (dégradation).....	21
<b>FIG.1.20:</b> Décalage temporel entre les composantes orthogonales du signal optique dû à une biréfringence aléatoire de la PMD. ....	22
<b>FIG.1.21:</b> dispersion modale. ....	22
<b>FIG.1.22 :</b> Schéma synoptique d'un système de transmission optique [22] .....	25
<b>FIG.1.23:</b> l'architecture d'une liaison optique. ....	25
<b>FIG.1.24:</b> Spectre d'émission d'une DEL. ....	26
<b>FIG.1.25:</b> Spectre d'émission d'une DL. ....	26
<b>FIG.2.1:</b> Représentation schématique d'un réseau de Bragg inscrit au cœur d'une fibre optique.	30

<b>FIG.2.2:</b> Technique de masque de phase : la figure d'interférence est obtenue par un réseau de diffraction gravé sur un substrat en silice (SiO <sub>2</sub> ). .....	32
<b>FIG.2.3:</b> réseau de desserte optique jusqu'à un point de distribution.....	34
<b>FIG.2.4 :</b> réseau de desserte optique jusqu'à l'utilisateur.....	36
<b>FIG.2.5 :</b> (A gauche en haut : spectre de la lumière injectée; en haut à droite : spectre de la lumière transmise; au centre : FBG avec symbolisées la transmission la réflexion de la lumière; en bas à gauche : spectre de la lumière réfléchiée) . .....	38
<b>FIG.2.6:</b> représentation schématique d'un réseau de Bragg à fibre[48], $\lambda_B$ : longueur d'onde de Bragg, L : longueur du réseau, $n_{co}$ : indice de cœur, $\Delta n_{mod}$ : indice de modulation, $\Delta n_{moy}$ : indice moyen, $\Lambda$ : pas du réseau.....	39
<b>FIG.2.7:</b> géométrie du transfert d'énergie entre les modes aller et retour dans un réseau de Bragg.....	41
<b>FIG.2.8 :</b> réseau de Bragg uniforme.....	44
<b>FIG.2.9:</b> réseau de Bragg « tilted » .....	45
<b>FIG.2.10:</b> réseau de Bragg « chirped » . .....	45
(a) intégré une fibre optique (b) intégré dans un guide d'onde	
<b>FIG.2.11 :</b> Réseau apodisé intégré dans un guide d'onde.....	46
<b>FIG.2.12 :</b> (a) Filtre passe bande fabriqué par un réseau de Bragg associé avec un circulateur ; (b) un multiplexeur OADM fabriqué avec association d'un réseau de Bragg et deux circulateurs	46
<b>FIG.2.13:</b> (a) multiplexeur OADM basé sur un interféromètre Mach-Zehnder : deux réseaux de Bragg identiques sont photo imprimés à la longueur $\lambda_2$ sur les deux bras de l'interféromètre ;(b) multiplexeur OADM basé sur un coupleur 0% : le réseau de Bragg est photo imprimé à la longueur $\lambda_2$ dans la région du couplage, la fonction d'insertion de $\lambda_2$ est représentée.....	47
<b>FIG.2.14:</b> Filtres optiques. ....	47
(à gauche) association d'un réseau de Bragg et d'un FFP.	
(à droite) association d'un réseau de Bragg et deux FFP	
<b>FIG.2.15:</b> principe de la compensation de la dispersion chromatique en utilisant un réseau de Bragg chirpé en association avec un circulateur.....	49
<b>FIG.2.16:</b> Mesure de température autour d'un A380.....	50
<b>FIG.3.1:</b> Spectre de réflexion d'un réseau de Bragg uniforme pour $\lambda_B = 850$ nm (a) L= 2 mm (b) L = 3 mm (c) L = 5 mm.....	55
<b>FIG.3.2:</b> Spectre de réflexion d'un réseau de Bragg uniforme pour $\lambda = 1550$ nm (a) L= 2 mm (b) L = 3 mm (c) L =5 mm.....	56

<b>FIG.3.3</b> : spectre de Réflexion(a), transmission(b) et dispersion(c) d'un réseau de Bragg uniforme (L=1.5mm, un pas $\Lambda= 535.59$ nm, et une amplitude de la modulation de l'indice $\Delta n=1.5.10^{-4}$ , $\bar{n} =1.470$ , $\lambda_B = 1550$ nm) .....	59
<b>FIG.3.4</b> : spectre de réflexion d'un réseau de Bragg apodisé par une fonction Gaussienne.....	61
<b>FIG 3.5</b> : spectre de Dispersion d'un réseau de Bragg apodisé par une fonction Gaussienne.....	61
<b>FIG 3.6</b> : spectre de réflexion d'un réseau de Bragg chirpé. ....	62
<b>FIG 3.7</b> : spectre de réflexion d'un réseau de Bragg chirpé. ....	63
<b>FIG 3.8</b> : Principe de fonctionnement d'un réseau de Bragg à pas variable dans une ligne de transmission optique. ....	63

**Liste des tableaux :**

**Tableau 1.1** : débits de différents services multimédia.....3

**Tableau.1.2** : variation de la vitesse de propagation de la lumière en fonction du matériau.....6

**Tableau 1.3** : comparaisant entre les déférents types de la fibre optique.....16

**Table des matières**

Remerciement

Dédicaces

Liste d'acronymes

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Introduction générale

**Chapitre 01: Les propriétés fondamentales d'une ligne de transmission optique**

1.1 Introduction .....2

1.2 Historique .....2

1.3 Notion sur optique géométrique .....5

1.3.1 Nature de la lumière .....5

1.3.2 La vitesse de propagation de la lumière .....5

1.3.3 Le spectre électromagnétique .....6

1.3.4 Limitations des lois de l'optique géométrique.....7

1.3.5 Lois de Snell-Descartes .....8

1.3.5.1 Réflexion .....8

1.3.5.2 Réfraction .....9

1.3.5.3 Dispersion.....10

1.4 La fibre optique .....10

1.4.1 définition .....12

1.4.2 principe .....12

1.4.3 Une affaire de mode.....13

1.4.4 Longueur d'onde de coupure et la fréquence normalisée.....14

1.4.5 Type de fibre optique .....14

1.4.5.1 Les fibres multimodes.....14

1.4.5.2 Fibre optique monomode .....15

## Table des matières

1.4.6 Les effets limitent la capacité de transmission.....	17
1.4.6.1 Les effets linéaires .....	17
1.4.6.2 Les effets non linéaires .....	23
1.4.7 Avantage de la fibre optique .....	23
1.4.8 Inconvénients .....	24
1.4.9 Quelques Applications de la fibre optique.....	24
1.5 Architecture d'une ligne de transmission optique .....	25
1.5.1 Définition d'une liaison par fibre optique .....	25
1.5.2 Architecture d'une liaison optique .....	25
1.5.2.1 Emetteur (source optique) .....	26
1.5.2.1.1 La diode DEL (électroluminescentes) .....	26
1.5.2.1.2 la diode laser (DL) .....	26
1.5.2.1.3 Modulateurs .....	26
1.5.2.2 Récepteurs .....	27
1.5.2.2.1 Photodiode PIN (Positive Intrinsèque Négative Photodiode) .....	27
1.6 Conclusion .....	27

### **Chapitre 02 : propriétés fondamentales de réseau de Bragg**

2.1 Introduction.....	29
2.2 Définition de réseau de Bragg.....	29
2.3 Techniques de fabrication de réseau de Bragg .....	31
2.3.1 Technique de Mask de Phase.....	31
2.4. Etude des propriétés de réseau de Bragg sur une liaison FTTH.....	32
2.4.1 Les technologies FTTX.....	32
2.4.2 Les Catégories de technologie FTTx .....	34
2.4.2.1 Les réseaux de desserte optique jusqu'à un point de distribution .....	34
2.4.2. Les réseaux de desserte optique jusqu'à l'utilisateur .....	36
2.4.3 Principe de fonctionnement.....	37
2.4.4 La théorie et généralité.....	40

2.4.4.1 Théorie des modes couplés et la méthode des matrices de transfert.....	40
2.5 Les types de réseau de Bragg .....	44
2.5.1 Réseau de Bragg uniforme .....	44
2.5.2 Réseau de Bragg « tilted » ou « blazed » .....	44
2.5.3 Réseau de Bragg à pas variable ou « chirped » .....	45
2.5.4 Réseau de Bragg apodisé .....	45
2.6 Application des réseaux de Bragg à la télécommunication.....	46
2.6.1 Filtrage et multiplexage .....	46
2.6.2 Compensation de la dispersion chromatique .....	48
2.7 Autres application de réseau de Bragg .....	49
2.7.1 Les réseaux de Bragg dans l'aviation .....	49
2.7.2 Les réseaux de Bragg dans l'automobile.....	50
2.8 Conclusion .....	50

### **Chapitre03: compensation de la dispersion chromatique par le réseau de Bragg.**

4.1 Introduction.....	53
4.2 Les propriétés spectrales d'un réseau de Bragg.....	53
4.2.1. Le réseau uniforme.....	54
4.2.2. Réseau apodisé.....	60
4.2.3. Le réseau chirpé (à pas variable) .....	62
4.3. Conclusion.....	64

### **Conclusion générale**

Bibliographié

### **Résumé :**

Ce travail est la convergence de trois domaines des fibres optiques : la théorie d'optique géométrique et les propriétés fondamentales d'une ligne de transmission optique, la technologie FTTH, et enfin les réseaux de Bragg fibrés (FBGs pour Fiber Bragg Gratings) et leurs rôle dans la compensation de la dispersion chromatique dans un réseau FTTH.

Au premier lieu ; Nous avons présenté quelques généralités sur la propagation de la lumière dans les fibres optiques ; Nous introduirons au lecteur les briques essentielles à la construction de ce mémoire, notamment, les différents phénomènes physiques qui sont associés à la fibre optique ainsi que l'architecture d'une ligne de transmission optique.

Par la suite ; et avant de comprendre les réseaux de Bragg fibrée (fabrication, mode d'emploi, application et caractérisation,...) avec la simulation et la discussion des résultats obtenus, nous avons parlé d'abord des technologies FTTx qui représentent une solution d'accès réseaux de nouvelle génération utilisant la fibre pour offrir des services très haut débit.

Ces points ont servi comme outils efficaces pour modéliser et traiter notre problématique : la dispersion chromatique dans un réseau FTTH, dont, le phénomène de réseau de Bragg a été exploité pour compenser la dispersion.

### **Mots-clés :**

Fibre optique, réseaux FTTx, réseaux FTTH, réseaux de Bragg, dispersion chromatique.

### **Abstract:**

This work is a convergence of three domains of optical fibers: geometric optical theory and the fundamental properties of an optical transmission line, FTTH technology, and finally fiber Bragg gratings (FBGs) and their role in compensating chromatic dispersion in an FTTH network.

First, we presented some general information on the propagation of light in optical fibres; we will introduce to the reader the essential building blocks for the construction of this work, in particular, the different physical phenomena associated with optical fibre as well as the architecture of an optical transmission line.

Thereafter, and before understanding the fiber Bragg gratings (manufacture, mode of use, application and characterization...) with the simulation and discussion of obtained results, we

have firstly talked about FTTx networks, which represent a new generation network access solution using optical fiber in order to offer a very high flow services .

These points have been used as effective tools to modalise and treat our problem: chromatic dispersion in an FTTH network, of which the Bragg grating phenomenon has been used to compensate this dispersion.

### Keywords:

Optical fiber, FTTx networks, FTTH networks, Bragg gratings, chromatic dispersion.

### تلخيص :

هذا العمل هو تقارب ثلاثة مجالات للألياف البصرية: النظرية البصرية الهندسية والخصائص الأساسية لخط النقل تقنية FTTH وأخيرا حواجز شبكية من ألياف براغ (FBGs) ودورها في تعويض التشتت اللوني في شبكة

.FTTH

بعض المعلومات العامة عن انتشار الضوء في الألياف الضوئية؛ سوف نقدم للقارئ لبنات البناء الأساسية

لبناء هذه ولا سيما الظواهر الفيزيائية المختلفة المرتبطة بالألياف الضوئية وكذلك بنية خط النقل البصري.

و قبل الاقبال على فهم شبكية من ألياف براغ (التصنيع، الاستخدام والتطبيق والتوصيف،

...) ضافة الى محاكاة و مناقشة النتائج المتحصل عليها FTTx، والتي تمثل حلاً جديداً

الجيل الجديد الشبكة باستخدام الألياف البصرية بتقديم تتميز بتدفق عال جدا.

هاته : FTTH والتي استخدمت فيها

ظاهرة شبكية الياف Bragg هذا التشتت.

الكلمات المفتاحية :

الألياف البصرية FTTx FTTH .

# **Introduction générale.**

### **Introduction générale :**

Le monde des télécommunications a connu d'importantes évolutions, mais un grand pas a été effectué durant les deux derniers siècles avec le développement des systèmes de transmission sur câbles et sur ondes hertziennes mais la qualité et le débit d'une transmission est resté toujours d'une grande importance.

L'idée de servir de la lumière dans les communications remonte aux feux de bois utilisés par les Grecs et les Perses ainsi qu'aux torches enflammées utilisées par les Romains.

En 1958 et avec l'invention du laser, l'idée d'utiliser l'optique surgisse de nouveau, en fait, l'idée de guider la lumière sans l'affaiblir a abouti aux fibres optiques. Au début, la recherche s'est concentrée sur le perfectionnement des fibres optiques dont l'atténuation est passée de 1000 dB/km en 1966 à 0.2 dB/km en 1979.

Aujourd'hui, on est arrivé à établir une communication dont la liaison est 100% de la fibre optique, c'est ce qu'on appelle les réseaux FTTH qui fournissent un débit très élevé, mais L'augmentation du débit sur les lignes de transmission utilisées présentement a fait de la dispersion chromatique un problème majeur qui perturbe la propagation du signal dans les réseaux de télécommunications optiques. Il est donc impératif de compenser la dispersion cumulée au cours de sa propagation. Parmi les dispositifs de compensation les plus répandus, on trouve le réseau de Bragg, qui est un composant tout optique dont la matière de fabrication (qui est inconnue car dans le monde entier il y a que l'USA et la Russie qui font la fabrication des réseaux de Bragg) est le premier responsable du phénomène qui se passe ; par définition, ce n'est qu'une fibre à deux cœurs car on ne fait que jouer sur l'indice de réfraction. Il y a pas de doute que l'informatique a joué un rôle très important pour ce qui concerne l'exploitation et le développement de cette technologie, car c'est grâce à des logiciels tel que MATLAB (qui est un outil de calcul et de simulation des résultats pour constater la différence), qu'on atteint notre objectif, et qu'on arrive à agrandir la bande passante pour avoir un débit important, sinon, même en sachant la matière utilisée, on ne peut pas savoir ce qui se passe vraiment.

Ce type de réseau trouve actuellement beaucoup d'applications dans plusieurs domaines (l'aviation, la santé, le militaire....), et il est en voie de développement.

Nous débuterons le premier chapitre de ce mémoire par une étude théorique sur l'optique géométrique, en suite, nous décrirons la fibre optique en expliquant le principe de guidage de la lumière, nous aborderons de même, le phénomène de l'atténuation et les différentes pertes causées par une fibre optique, dans la dernière partie de ce chapitre nous détaillerons l'ensemble des composants présents dans une liaison optique et nous expliquerons leur fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre nous présenterons l'aspect des réseaux informatiques connexes ainsi que ses topologies, nous détaillerons par la suite la technologie FTTx et plus précisément, les réseaux FTTH qui seront utilisés pour établir les réseaux de Bragg dans les chapitre suivants.

Le troisième chapitre sera entièrement consacré à la découverte de réseaux de Bragg et ses applications dans le domaine de télécommunications ainsi que la méthode de fabrication et quelques éléments théoriques.

## Introduction générale.

---

Le quatrième chapitre sera une modélisation et approches de simulation de réseau de Bragg par la méthode des matrices de transfert dans un but de la compensation de la dispersion chromatique, en utilise l'environnement MATLAB comme un logiciel de simulation.

**Chapitre 01 :**  
**Les propriétés**  
**fondamentales d'une ligne**  
**de transmission optique.**

# Chapitre 01 : les propriétés fondamentales d'une ligne De transmission optique.

## 1.1 Introduction :

La fibre optique, mince cheveu de verre très transparent, a révolutionné les télécommunications depuis sa découverte dans les années soixante. L'information n'est plus transmise sous forme électrique mais sous forme lumineuse. En raison de sa faible atténuation, son faible poids, sa très petite taille et sa résistance mécanique, elle s'est imposée au fil des années comme le média par excellence pour la transmission des données sur des longues distances.

La conception des systèmes de transmission à très grande capacité était désormais possible, de plus les échanges à travers ces systèmes allaient être de plus en plus nombreux et la demande de services de plus en plus élevée. Son apparition a nécessité la conception et le développement de nouveaux composants optiques.

## 1.2 Historique :

Il est naturel aujourd'hui de recevoir et d'envoyer des messages instantanément de n'importe quel point de la planète. Cette capacité de communication à l'échelle du globe, sans précédent dans l'histoire, bouleverse notre représentation du monde. Elle est le résultat d'une longue évolution, depuis les signaux de fumée des indiens d'Amérique jusqu'aux réseaux de télécommunication par fibre optique.

### ➤ L'ère électronique :

Nous nous intéressons ici aux systèmes de communication par câble. La première invention qui permit de communiquer sur une distance de plusieurs centaines de kilomètres fut le télégraphe électrique inventé par Samuel Morse en 1837 et utilisé dès 1852, avec la pose du premier câble électrique sous la Manche, reliant la France à l'Angleterre. Peu de temps après, en 1858, la première ligne transatlantique fut installée. Ce fut un progrès immense même si son isolation ne résista qu'un mois. Dans la période qui suivit et jusqu'à la première guerre mondiale, la pose des câbles sous-marins

télégraphiques se développa, les méthodes de fabrication s'améliorèrent et les télécommunications devinrent un commerce international.

Dans l'entre-deux-guerres l'activité s'est quasiment stoppée. Les inventions de la télégraphie sans fil et de la radio ont alors porté aux câbles un coup rude. Néanmoins, la mise au point, à la fin des années 30, des technologies coaxiales amplifiées, permettent de transmettre une conversation téléphonique transocéanique de bonne qualité. Cependant, le signal électrique est atténué lors de la propagation dans le câble de cuivre. Il doit être ré-amplifié régulièrement, à l'aide d'un dispositif électrique, pour pouvoir parvenir au récepteur d'arrivée.

La première ligne téléphonique qui traverse l'Atlantique est posée en 1958, sa capacité est de 36 voies à 4 kHz. Grâce à l'amélioration des câbles et l'utilisation des transistors, les lignes deviennent capables, en 1980, de transporter 4000 voies chacune. Pour fixer les ordres de grandeur, le tableau (1.1) montre les débits nécessaires pour transmettre différents types d'informations. Cependant, le temps de réponse des appareils électroniques fait que le signal ne peut pas avoir une fréquence supérieure au GHz, ce qui limite le débit. De plus l'atténuation du signal électrique dans les câbles en cuivre est très forte et elle augmente proportionnellement à la fréquence. Pour un signal de 1 MHz, l'atténuation est de 2 dB/km [1]. Cela revient à diviser le signal par 100 tous les 10 km. On doit donc installer un grand nombre d'amplificateurs avec les coûts que cela entraîne et la complexité du système.

**Tableau 1.1** : débits de différents services multimédia.

Service multimédia	Débit requis
Téléphone	8 à 64 Kbit/s
CD	44.1 Kbit/s
Visiophone particulier	64 Kbit/s
Visiophone professionnel	384 Kbit/s à 2 Mbit/s
MPEG 1 (qualité comparable)	1 à 1.41 Mbit/s
MPEG 2 (télévision standard)	4.5 à 15 Mbit/s
MPEG 3 (télévision HD)	Jusqu'à 80 Mbit/s
Enregistrement numérique professionnel	270 Mbit/s

➤ **L'ère optique :**

Ces limitations ont pu être dépassées grâce au développement des fibres optiques. L'amélioration de la transparence du verre de silice permet à la fibre optique de transporter un signal dans le proche infrarouge ( $\sim 1300\text{nm}-1600\text{nm}$ ) avec de faibles pertes sur une centaine de kilomètres, comme illustré sur la figure (1.1).

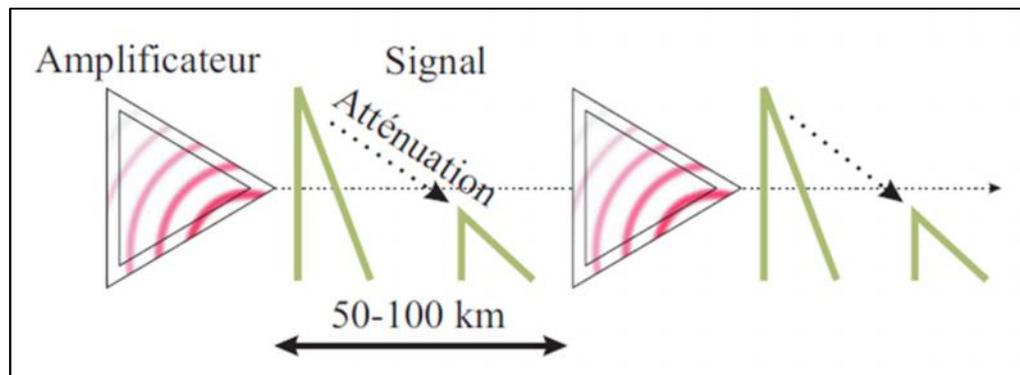


FIG.1.1 : Illustration de l'amplification du signal.

Ceci permet de réduire le nombre d'amplificateurs sur les lignes. La figure (1.2) montre l'évolution de l'atténuation des verres, de son invention antique à la fin des années 80.

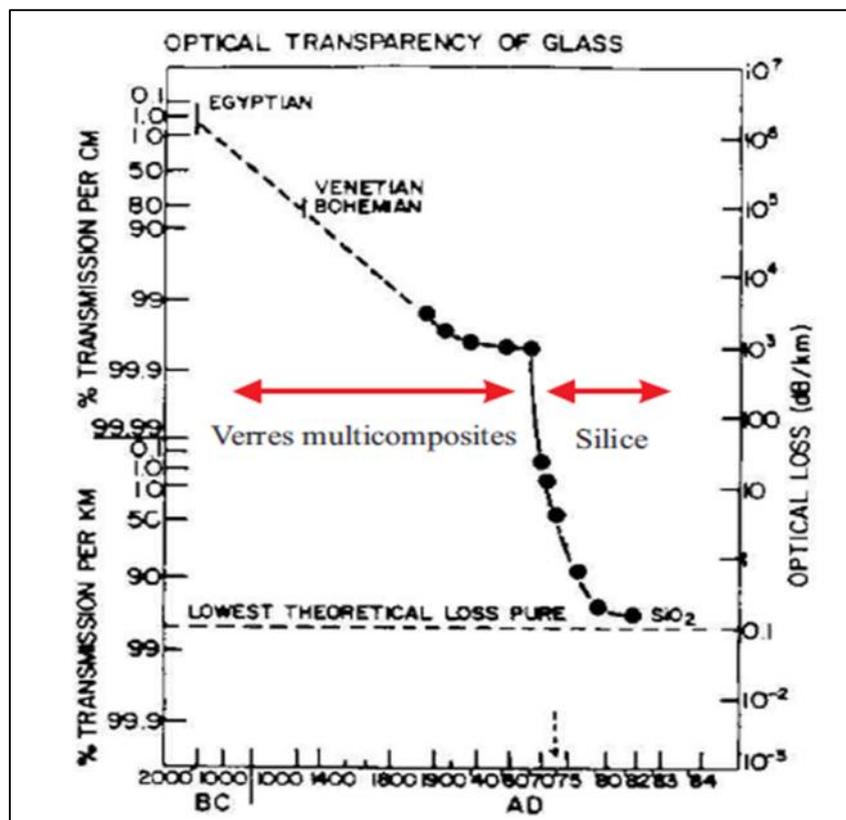


FIG 1.2 : Historique des pertes dans les verres.

En 1986, on installe le premier câble optique sous-marin. Son débit est de 280 Mbit/s (soit environ 4000 voies). Les amplificateurs utilisés alors sont électroniques. Le signal lumineux doit être converti en signal électronique pour être amplifié puis reconverti en signal lumineux. Le débit de ces lignes est limité par la rapidité des composants électroniques des amplificateurs.

A la fin des années 1980, une nouvelle technologie fait son apparition dans les laboratoires de recherche qui est l'amplificateur optique à base de fibre en silice dopée aux terres rares et en particulier à l'erbium (Erbium Doped Fibre Amplifier EDFA). Le minimum d'atténuation de la silice se situant autour de 1550nm, on a cherché un amplificateur capable d'opérer à ces longueurs d'onde. Grâce à lui, il n'est plus nécessaire de convertir le signal de l'optique à l'électronique. Le signal lumineux est directement amplifié sans conversion électronique. L'énergie nécessaire à l'amplification est apportée sous forme de lumière par un rayonnement laser de pompe. On n'a plus besoin d'amplificateurs électro-optiques complexes et coûteux. De plus, puisqu'il ne passe plus par des composants électroniques au temps de réponse limité, on peut utiliser des fréquences de l'ordre du THz pour le signal. La première ligne commerciale avec ce type d'amplificateur a été installée en 1995.

### 1.3 Notions sur l'optique géométrique :

#### 1.3.1 Nature de la lumière :

La question de la nature de la lumière fut probablement l'une des interrogations les plus fécondes en physique : elle est, en quelque sorte, à l'origine des théories géométrique, ondulatoire, électromagnétique, relativiste et quantique de la lumière.

#### 1.3.2 La vitesse de propagation de la lumière :

- Dans le vide : elle est toujours égale à  $299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , on l'appelle la célérité et on la note **c**. Avec : la grandeur  $c = 300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $c=3 \cdot 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).
- Dans les milieux transparents : la lumière se propage à une vitesse inférieure à la célérité. La vitesse de propagation **v** de la lumière dans un milieu transparent homogène est directement liée à l'indice de réfraction **n** de ce milieu par la formule :  **$n = c/v$**
- L'indice absolu d'un milieu (généralement noté **n**) est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le milieu considéré.

$$n = \frac{\text{vitesse de l'onde dans le vide}}{\text{vitesse de l'onde dans le matériau considéré}} \quad (1.1)$$

**Tableau.1.2** : variation de la vitesse de propagation de la lumière en fonction du matériau.

Matériau	Indice	Vitesse en Km/S
Vide	1.000	300000
Air	1.0002926	299912
Eau (20 <sup>0</sup> C)	1.330	225564
Verre au plomb	1.900	157895
Diamant	2.400	125000
Cœur fibre 62.5/125	1.500	200000

### 1.3.3 Le spectre électromagnétique :

Il faut toutefois rappeler que la lumière est une vibration électromagnétique qui se caractérise par une longueur d'onde  $\lambda$  ; déplacement de l'onde pendant un cycle de vibrations et par une fréquence  $f$  (nombre de cycles par seconde). La fréquence et la longueur d'onde sont liées par la relation suivante :

$$\lambda = c / f \quad (1.2)$$

Le spectre électromagnétique est quasi-totalement invisible pour un œil humain (figure 1.3), sauf une petite portion dite spectre visible qui s'étend du rouge au violet en passant par toutes les couleurs de l'arc-en-ciel (communément divisé en rouge, orange, jaune, vert, bleu, indigo et violet). La couleur de la lumière est avant tout une question de perception par l'œil et d'interprétation par le cerveau. On retiendra que le spectre optique correspond à l'intervalle  $380 \text{ nm} < \lambda \text{ optique} < 750 \text{ nm}$  et le maximum de sensibilité de l'œil est pour  $\lambda = 560 \text{ nm}$ .

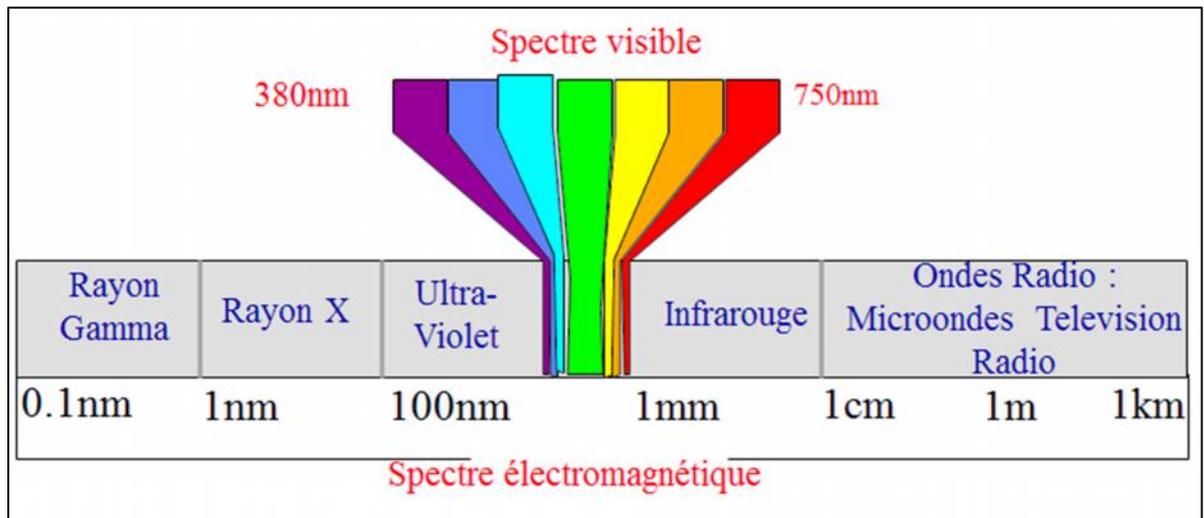


FIG .1.3 : spectre électromagnétique.

### 1.3.4 Limitations des lois de l'optique géométrique :

Les lois de l'optique géométrique permettent de traiter la lumière dans un cadre approximatif dans lequel les aspects ondulatoires et quantiques peuvent être négligés. Tant que les propriétés des milieux varient peu à l'échelle de la longueur d'onde  $\lambda$ , l'approximation de l'optique géométrique est valide. La notion de rayon est par exemple purement conceptuelle et toute expérience cherchant à isoler un rayon lumineux est vouée à l'échec à cause du phénomène de diffraction. (Figure 1.4).

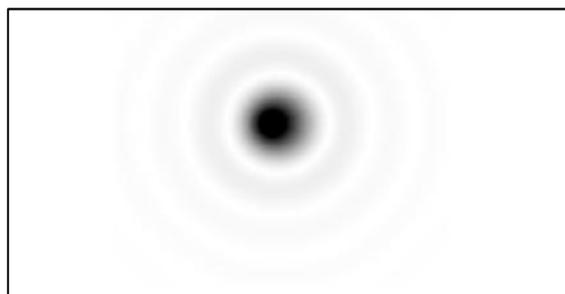


FIG. 1.4 : lumière recueillie sur un écran après avoir traversé un plan opaque percée d'un orifice circulaire. La dimension de la tache centrale et la présence des anneaux concentriques sont en contradiction avec les lois de l'optique géométrique.

Si l'on note  $N$  le nombre de photons mis en jeu dans un phénomène optique,  $D$  la dimension caractéristique des obstacles (miroirs, trous, lentilles...) et  $\lambda$  la longueur d'onde, l'approximation de l'optique géométrique est bonne si  $N \gg 1$  et  $D \gg \lambda$ .

### 1.3.5 Lois de Snell-Descartes :

#### 1.3.5.1 Réflexion

Lorsqu'un rayon arrive à l'interface entre deux milieux isotropes et homogènes différents, il donne naissance à un rayon réfléchi et à un rayon transmis (réfracté). On distingue deux types de réflexion :

- La réflexion diffusée est produite par une surface irrégulière. Elle ne produit pas d'image discernable. C'est cependant cette sorte de réflexion qui nous permet de voir le monde qui nous entoure.
- La réflexion spéculaire est produite par une surface très lisse (ex. : miroir ou surface d'eau très calme). Elle produit une image discernable d'un objet. On s'intéresse ici à la réflexion spéculaire. On définit le plan d'incidence comme le plan contenant le rayon incident et la normale à l'interface (figure 1.5). L'angle d'incidence est l'angle que forme le rayon incident avec la normale.

#### ➤ Lois de la réflexion

1. Le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence. On définit alors l'angle de réflexion  $i_1'$ .
2. Le rayon réfléchi est symétrique du rayon incident par rapport à la normale :

$$i_1 = i_1' \quad (1.3)$$

#### Pouvoir Réflecteur

La lumière réfléchie n'emporte pas entièrement l'énergie incidente. On définit le pouvoir réflecteur  $R$  d'une interface comme étant le rapport de l'énergie lumineuse réfléchie sur l'énergie lumineuse incidente. En incidence normale ( $i_1 = i_1' = 0$ ), on a

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (1.4)$$

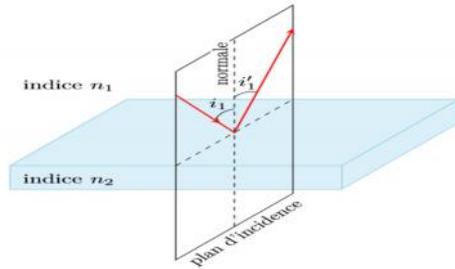


FIG 1.5 : réflexion d'un rayon sur une interface.  
lumineux

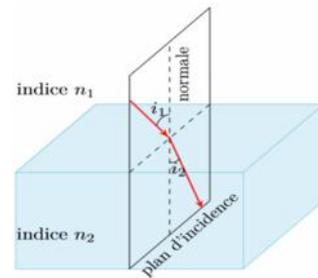


FIG 1.6 : réfraction d'un rayon

### 1.3.5.2 Réfraction

La réfraction est la déviation de la lumière lorsqu'elle traverse l'interface entre deux milieux transparents d'indices optiques différents (figure. 1.6).

#### ➤ Lois de la réfraction

1. Le rayon réfracté est dans le plan d'incidence ; on définit alors l'angle de réfraction  $i_2$ .
2. Le rayon réfracté est tel que :  $n_1 \cdot \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(i_2)$  (1.5)

Il s'en suit plusieurs conséquences :

- Principe du retour inverse de la lumière. Tout trajet suivi par la lumière dans un sens peut l'être en sens opposé.
- Réflexion totale. Lorsque le milieu 2 est moins réfringent que le milieu 1 (c'est-à-dire  $n_2 < n_1$ ), le rayon réfracté s'éloigne de la normale. Il existe alors un angle limite d'incidence  $i_1 = i_L$  tel que  $i_2 = 90^\circ$  et donc  $\sin(i_L) = n_2 / n_1$  (1.6)

Et tel que si  $i > i_L$  le rayon réfracté disparaît; seul le rayon réfléchi existe : on parle alors de réflexion totale car toute l'énergie se retrouve dans le rayon réfléchi.

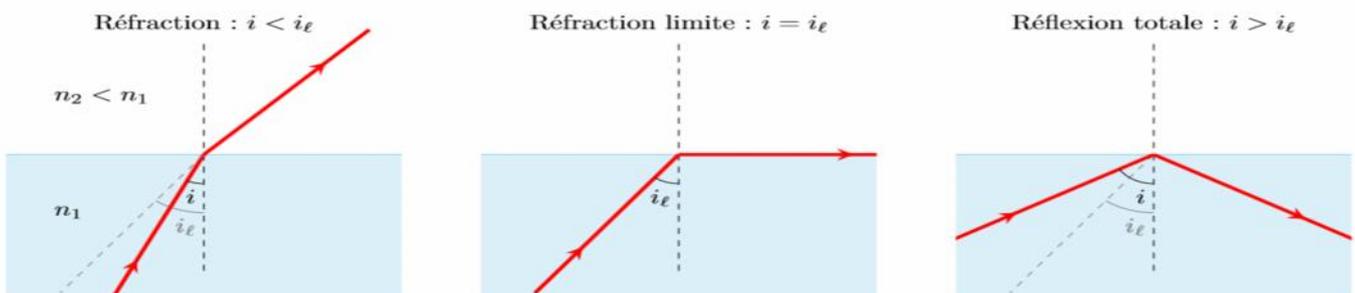
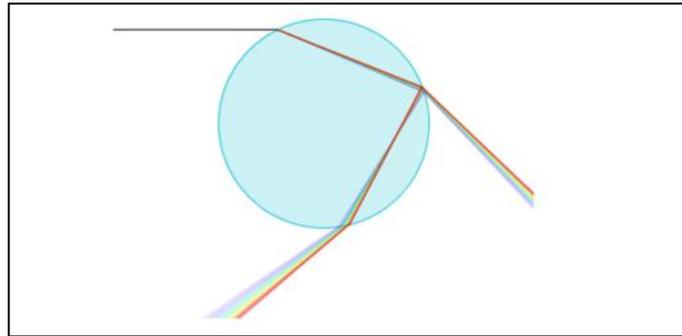


FIG 1.7 : phénomène de réflexion totale.

### 1.3.5.3 Dispersion :

En 1660, Newton réalisa ses fameuses expériences autour de la décomposition de la lumière par un prisme. Lorsque l'on envoie un pinceau de lumière blanche à travers un prisme, on voit apparaître en sortie du prisme un faisceau divergeant et irisé (qui présente les couleurs de l'arc-en-ciel). Chaque composante spectrale est déviée différemment; on dit qu'il y a une dispersion.



**FIG 1.8** : dispersion de la lumière à la traversé d'une goutte d'eau (simulation ©J.Roussel).

Ce phénomène provient du fait que l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde de la lumière. La relation  $n(\lambda)$  s'appelle relation de dispersion. Dans la plupart des milieux transparents, dans le domaine visible, l'indice suit la loi de Cauchy :

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (1.7)$$

Avec **A** et **B** des paramètres propres à chaque matériau. En général, ces paramètres sont tous les deux positifs; la lumière rouge est alors plus rapide que la lumière bleue : on parle de dispersion normale.

## 1.4 La fibre optique :

Afin de guider la lumière, des guides d'onde d'abord métalliques et non métalliques ont été fabriqués, mais ils ont d'énormes pertes. Donc ils n'étaient pas adaptés pour les télécommunications. 'Tyndall' a découvert qu'avec les fibres optiques, la lumière peut être transmise par le phénomène de réflexion interne totale. Pendant les années 1950, les fibres optiques à grand diamètre d'environ 1 ou 2 millimètres ont été utilisées dans les endoscopes pour voir les parties intérieures du corps humain [2].

Les fibres optiques peuvent fournir une voie beaucoup plus fiable que l'atmosphère. En 1966, 'Kao' et 'Hockham' ont publié un document sur le système de communication par fibres optiques [3] avec une énorme perte de 1000 dB/km. Par contre, dans l'atmosphère,

il y a une perte de quelques dB/km. Immédiatement Kao et ses collègues de travail se sont rendu compte que ces pertes étaient élevées en raison d'impuretés dans le matériau de la fibre. En utilisant une fibre en silice pure, ces pertes ont été réduites à 20 dB / km en 1970 par 'Kapron', 'Keck' et 'Maurer' [4]. Avec cette perte d'atténuation, l'espacement des répéteurs pour les liaisons à fibres optiques devient comparable à celui des systèmes à câbles de cuivre. Ainsi, le système de communication à fibre optique est devenu une réalité.

La fibre optique est un moyen de transmission de l'information d'un point à un autre sous forme de lumière. Contrairement au support de la transmission sur cuivre, la fibre optique n'est pas de nature électrique. La transmission par fibre optique utilise de la lumière avec des longueurs d'ondes juste supérieures à celles de la lumière visible, et donc indétectables à l'œil nu. La fibre optique se présente sous forme d'un cylindre de verre de quelques centaines de micromètres de diamètre. Il existe plusieurs types de fibres mais tous sont constitués de la même façon d'un cœur et d'une gaine toutes deux sont des matériaux transparents en verre ou en plastique. Un revêtement protecteur, en plastique souple, entoure la gaine (Figure1.9).

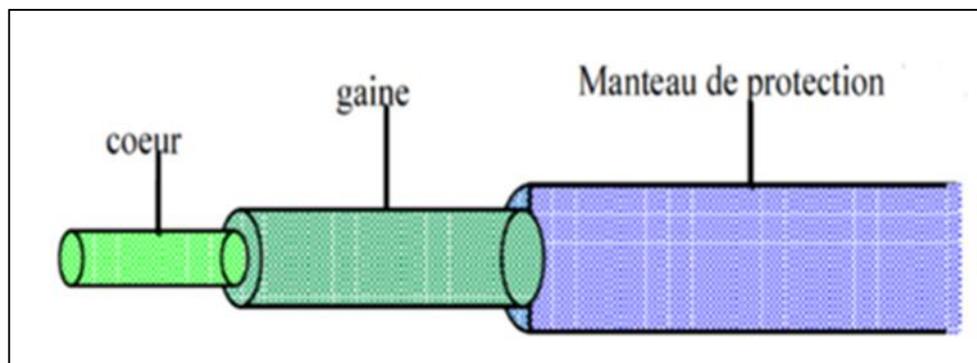


FIG. 1.9 : structure d'une fibre optique [5].

Les signaux lumineux vont transiter dans le cœur, tandis que la gaine va empêcher qu'ils ne s'échappent de la fibre. Pour ce faire, le cœur et la gaine sont fabriqués de telle sorte qu'ils disposent d'indices de réfraction différents, l'indice de réfraction du cœur  $n_c$  doit être plus grand que l'indice de réfraction de la gaine  $n_g$ . L'indice de réfraction d'un matériau correspond au rapport  $n = \frac{c}{v}$  [6], où  $c$  représente la vitesse de la lumière dans le vide qui est égale à  $3.10^8$  m/s, et  $v$  est la vitesse de la lumière dans le matériau étudié.

### 1.4.1 définition :

Une fibre optique est un fil de verre transparent très fin qui a la propriété de conduire la lumière et sert dans les transmissions terrestres et océaniques de données. Elle a 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.

### 1.4.2 principe :

La fibre optique est un guide d'onde qui exploite les propriétés réfractrices de la lumière. Elle est habituellement constituée d'un cœur entouré d'une gaine. Le cœur de la fibre a un indice de réfraction légèrement plus élevé (différence de quelques millièmes) que la gaine et peut donc confiner la lumière qui se trouve entièrement réfléchi de multiples fois à l'interface entre les deux matériaux (en raison du phénomène de réflexion totale interne).

L'ensemble est généralement recouvert d'une gaine plastique de protection (figure 1.10).

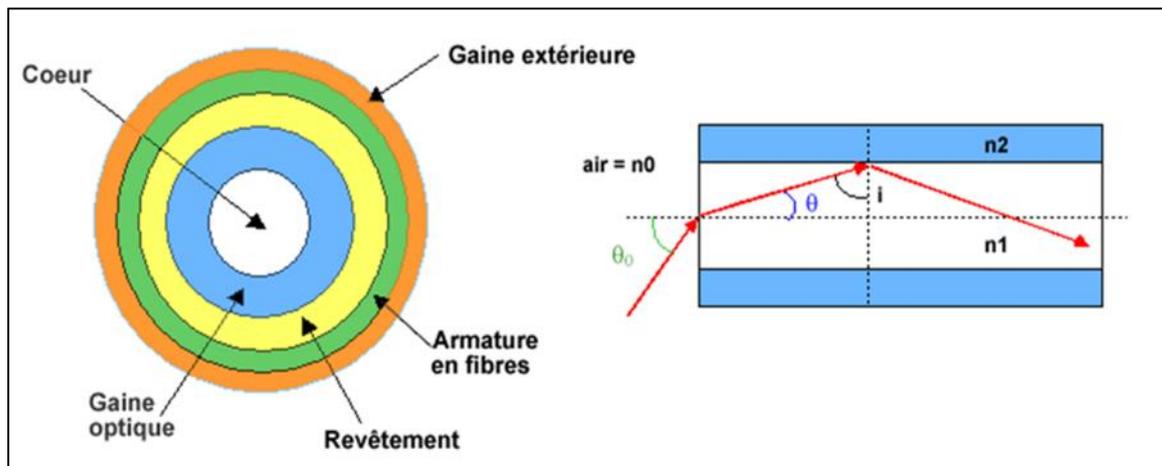


FIG 1.10 : principe de guidage de la lumière dans une fibre optique.

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 sans perte, en empruntant un parcours en zigzag. La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec très peu de pertes même lorsque la fibre est courbée. Une fibre optique est souvent décrite selon deux paramètres.

Le premier est la différence d'indice normalisé, qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine :  $\Delta n = \frac{n_c - n_g}{n_c}$  (1.8)

Le second est l'ouverture numérique de la fibre (N.A. pour Numerical Aperture). Concrètement, ce paramètre est le sinus de l'angle d'entrée maximal de la lumière dans la fibre pour que la lumière puisse être guidée sans perte.

Cet angle est mesuré par rapport à l'axe de la fibre :

$$N.A. = \sin \theta_{\max} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad (1.9)$$

### 1.4.3 Une affaire de mode :

En optique, le mode c'est le nombre de chemins (pour simplifier). Dans une fibre multimode, la lumière peut emprunter un grand nombre de chemins (voir le schéma). Dans une fibre monomode, elle est prisonnière d'un trajet direct. Elle conserve donc vitesse et cohérence. La fibre monomode est donc une fibre plus performante que la fibre multimode, mais elle nécessite l'utilisation de sources lumineuses (laser) très puissantes. Le nombre de modes est donné par :

$$M = \frac{V^2}{2} \quad (1.10) \quad (\text{approximation vraie pour un grand nombre de modes avec } V \text{ représente la fréquence normalisée})$$

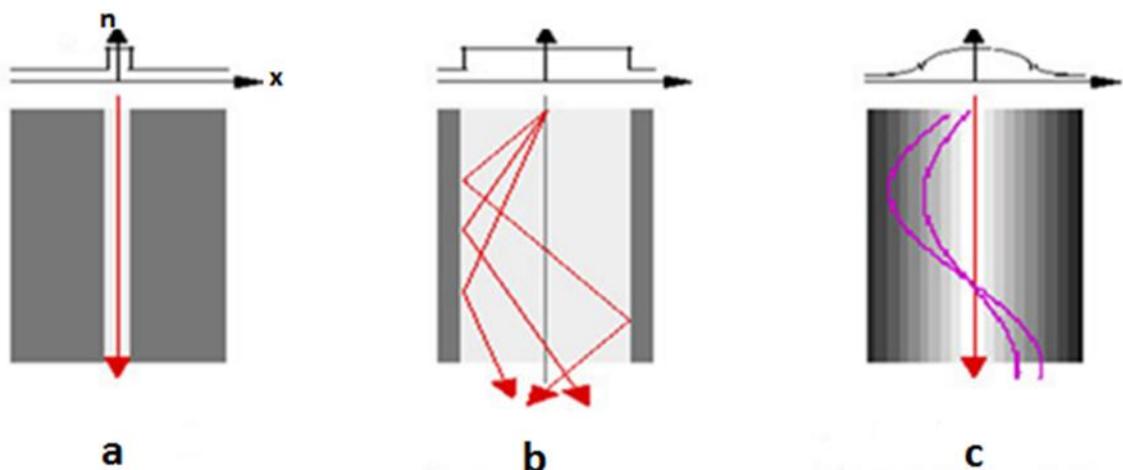


FIG. 1.11 : fibre monomode et multimode – principe [7].

(a) Fibre monomode.

(b) Fibre multimode à saut d'indice.

(c) Fibre multimode à gradient d'indice.

#### 1.4.4 Longueur d'onde de coupure et la fréquence normalisée :

La longueur d'onde de coupure est la longueur d'onde  $\lambda_c$  en dessous de laquelle la fibre n'est plus monomode. Ce paramètre est relié à la fréquence normalisée, noté  $V$ , qui dépend de la longueur d'onde  $\lambda$ , du rayon de cœur de la fibre  $a$  et des indices du cœur  $n_c$  et de la gaine  $n_g$ . La fréquence normalisée est exprimée par:

$$V = \frac{(2\pi a \sqrt{n_c^2 - n_g^2})}{\lambda} \quad (1.11)$$

Une fibre est monomode pour une fréquence normalisée  $V$  inférieure à 2,405. Des abaques fournissent la constante de propagation normalisée, notée  $B$ , en fonction de la fréquence normalisée pour les premiers modes.

#### 1.4.5 Type de fibre optique :

Les fibres optiques peuvent être classées en deux catégories selon leur diamètre et la longueur d'onde utilisée.

##### 1.4.5.1 Les fibres multimodes :

Les fibres multimodes ont été les premières sur le marché. Elles ont pour caractéristiques de transporter plusieurs modes (trajets lumineux) simultanément. Du fait de la dispersion modale, on constate un étalement temporel du signal. En conséquence, elles sont utilisées uniquement pour des bas débits et de courtes distances. La dispersion modale peut cependant être minimisée (à une longueur d'onde donnée) en réalisant un gradient d'indice dans le cœur de la fibre. Elles sont caractérisées par un diamètre de cœur de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de micromètres (les cœurs en multimodes sont de 50 ou 62.5 microns pour le bas débit).

Dans cette famille, nous trouvons deux sous catégories:

##### A- La fibre à saut d'indice :

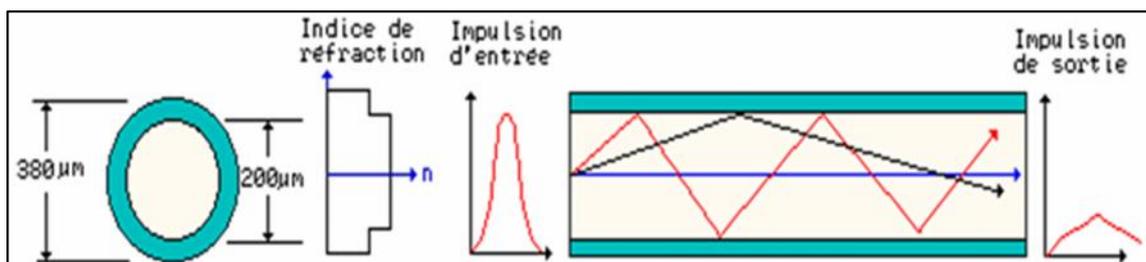


FIG. 1.12 : fibre à saut d'indice.

C'est la plus "ordinaire". Le cœur a un relatif gros diamètre, par rapport à la longueur d'onde de la lumière (de l'ordre du  $\mu\text{m}$  dans l'infrarouge). Tous les inconvénients vus plus haut se manifestent ici. Observez l'allure de l'impulsion de sortie, comparée à celle de l'impulsion d'entrée. Ce sont bien entendu des informations non quantitatives.

### B- La fibre à gradient d'indice :

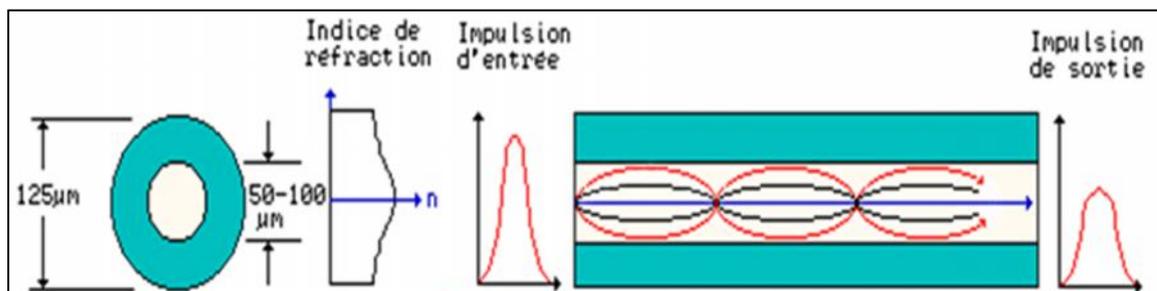


FIG. 1.13 : fibre à gradient d'indice.

Ici, deux améliorations sont apportées: Le diamètre du cœur est de deux à quatre fois plus petit. Le cœur est constitué de couches successives, à indice de réfraction de plus en plus grand. Ainsi, un rayon lumineux qui ne suit pas l'axe central de la fibre est ramené "en douceur" dans le droit chemin. Comme vous pouvez l'observer, les résultats sont déjà de meilleure qualité.

### 1.4.5.2 Fibre optique monomode :

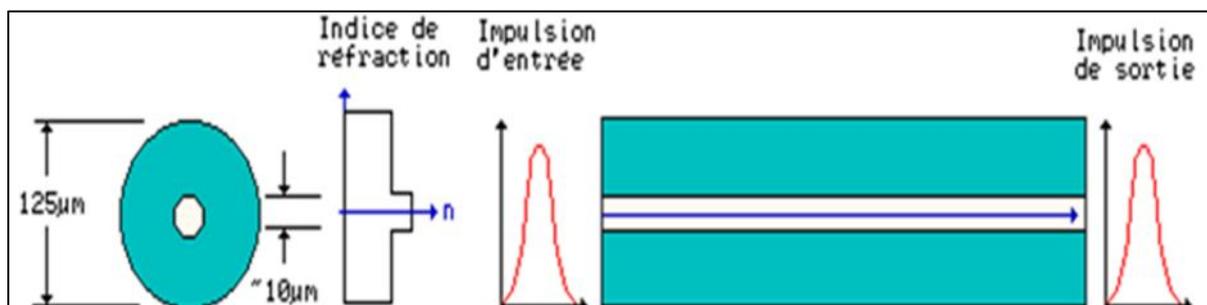


FIG. 1.14 : fibre monomode.

La fibre monomode, ou SMF (Single Mode Fiber) est utilisée pour les réseaux métropolitains ou les communications longue distance des opérateurs. Son cœur est extrêmement fin (environ 9 microns). La transmission des données y est assurée par des lasers émettant des longueurs d'onde de 1300 à 1550 nanomètres et par des amplificateurs optiques situés à intervalles réguliers.

On peut distinguer plusieurs catégories de plus en plus performantes, tant en débit qu'en distance :

Compte tenu des fréquences optiques émises, le champ optique émis peut se représenter sous la forme d'un signal à bande étroite tel que :

$$E(t) = \sqrt{P_0} m(t) \exp j(\omega_0 t + \phi(t)) \quad (1.12)$$

Où  $P_0$  la puissance moyenne émise,  $m(t)$  est l'enveloppe complexe et  $\omega_0$  la fréquence optique émise. Le temps  $\phi(t)$  correspond au bruit de phase conduisant à une largeur spectrale non nulle. En première approximation la largeur spectrale de la source peut être considérée comme indépendante de la modulation. Dans ce cas, le spectre du champ optique peut s'écrire sous la forme suivante :

$$S_E(\omega) = \sqrt{P_0} S_m(\omega) S_{\delta\lambda}(\omega) \quad (1.13)$$

Le spectre du champ optique est simplement donné par la convolution du spectre associé à l'enveloppe complexe par le spectre de la source optique en régime non modulé.

Certaines sources optiques, laser de type Fabry pérot ou diode électroluminescentes présente une largeur spectrale bien supérieur au spectre associé à la modulation. La largeur spectrale d'une LED est de plusieurs dizaines de nm. Un laser de type Fabry Perrot n'est jamais parfaitement monomode, les largeurs spectrales typiques à mi-hauteur tant de l'ordre de 2-4 nm.

**Tableau 1.3 :** comparant entre les différents types de la fibre optique.

Structure	Avantage	Inconvénients	Applications pratique
Multimode à saut indice	-Grande ouverture numérique -Connexion facile -Faible prix -Facilité de mise en œuvre	Pertes, Dispersion et distorsion élevées du signal	Communications courtes distances, réseaux locaux.
Multimode à gradient indice	Bande passante raisonnable et bonne qualité de transmission	Difficile à mettre en œuvre	Communications courtes et moyennes distances
Monomode	Bande passante très grande ; atténuation très faible, faible dispersion	Prix très élevé	Communications longues distances

### **1.4.6 Les effets limitent la capacité de transmission:**

Les systèmes de télécommunications sur fibre sont conçus dans l'hypothèse d'une transmission linéaire et les effets non-linéaires sont alors des effets parasites qui en dégradent les performances quand les puissances véhiculées deviennent élevées. Aujourd'hui, les systèmes de transmission à haut débit et grande distance utilisent des amplificateurs de puissance à l'émission ce qui conduit à des puissances injectées dans la fibre très élevées et des effets non-linéaires non négligeables.

#### **1.4.6.1 Les effets linéaires :**

##### **A. Atténuation :**

L'atténuation dans les fibres optiques résulte de plusieurs mécanismes. D'abord, l'absorption intrinsèque du matériau constitutif provoque une augmentation très rapide des pertes aux basses longueurs d'onde. La présence d'impuretés peut aussi créer diverses bandes d'absorption. Dans le cas de la silice pure, le minimum théorique d'atténuation devrait descendre à 0,14 dB/km vers  $L = 1,55 \mu\text{m}$ . De plus, les irrégularités involontaires de structure provoquent des pertes par diffusion (diffusion Rayleigh). Il y a ensuite les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres. Toute courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement. Les microcourbures sont des courbures très faibles, mais répétées et pratiquement incontrôlables, dues au conditionnement des fibres dans les câbles. Ces pertes s'ajoutent directement aux pertes intrinsèques. Elles sont toutefois négligeables pour la fibre standard des télécommunications dans des conditions d'emploi normales. Enfin, les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux. Chaque jonction peut provoquer une perte de raccordement. La Figure (1.15) montre l'atténuation spectrale d'une fibre en silice, pour les télécommunications.

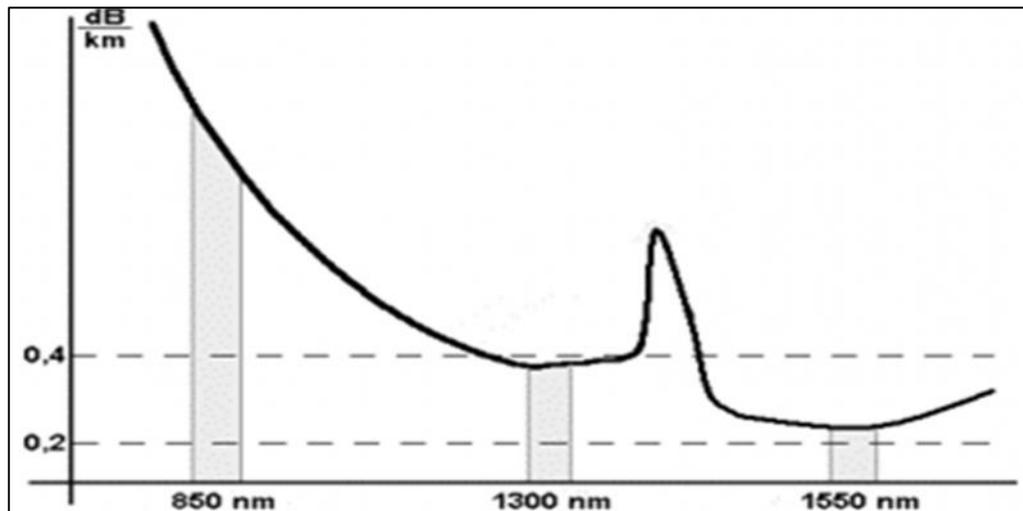


FIG. 1.15 : Atténuation spectrale d'une fibre optique G.652.

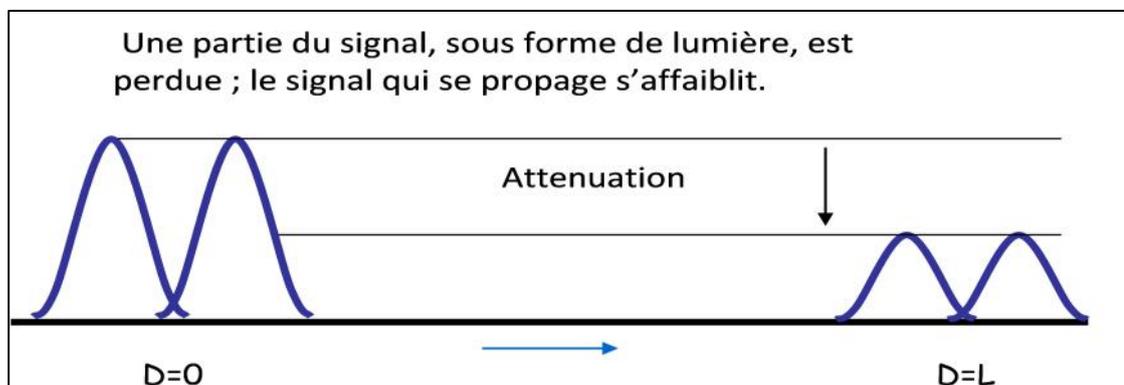


FIG. 1.16 : l'atténuation dans la fibre optique.

On peut résulter théoriquement l'atténuation dans cette formule :

$$\text{Atténuation} \left[ \frac{\text{dB}}{\text{km}} \right] = \frac{(P_{\text{sortie}}[\text{dBm}] - P_{\text{entrée}}[\text{dBm}]) \times 1000}{\text{distance} [\text{m}]} \quad (1.14)$$

### B. Dispersion chromatique :

Le temps de propagation de groupe, c'est-à-dire le temps mis par un signal pour parcourir l'unité de longueur, dépend de la longueur d'onde (deux longueurs d'ondes différentes ne se propagent pas exactement à la même vitesse). Dans le cas d'un signal issu d'une source émettant sur une raie de largeur  $\Delta\lambda$ , ces temps de propagation vont s'étaler sur une certaine durée. Le paramètre de dispersion chromatique (**D**) est défini comme la dérivée du temps de propagation de groupe par rapport à la longueur d'onde, pour une longueur de fibre de 1 km. On le donne généralement en ps/(nm.km), les picosecondes

correspondant l'élargissement temporel, les nanomètres à la largeur spectrale et les kilomètres à la longueur de fibre.

En fait, la dispersion chromatique est la somme d'un terme de matériau pur (dispersion matériau) et d'un terme dû au guidage de l'onde (dispersion modale). La Figure (1.17) montre l'évolution avec du terme matériau pour la silice.

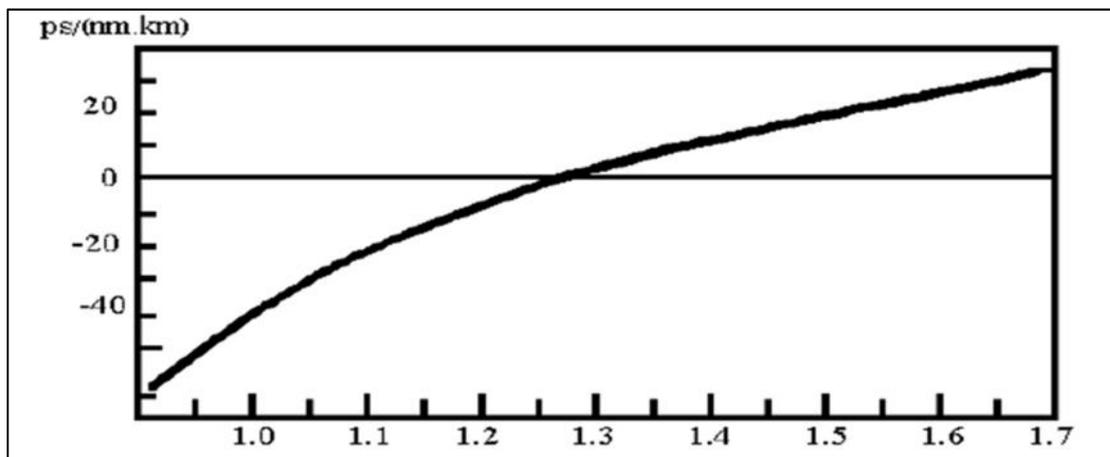


FIG. 1.17 : Dispersion matériau dans la silice pure en fonction de la longueur d'onde.[8]

On voit sur cette courbe, que la fibre monomode standard G.652 [9] présente une dispersion maximale de 20 ps/(nm.km) à 1550 nm. Classiquement, on la considère de 17 ps/(nm.km). Dans la bande 1288 à 1359 nm, elle est de 3,5 ps/(nm.km). Ainsi, la capacité de transmission est la plus grande possible pour une longueur d'onde d'environ 1,3 μm. Elle est donc idéale pour cette fenêtre spectrale et permet de transporter de très hauts débits.

Malheureusement, ce n'est pas là que l'atténuation est la plus faible. On a donc cherché à déplacer le point de dispersion nulle vers 1,55 μm. On dit que ce genre de fibre, la G.653, est à dispersion décalée (Figure 1.18). Il existe aussi des fibres à dispersion aplatie pour lesquelles la dispersion totale reste très faible, de l'ordre de quelques ps/(nm.km), sur plus d'une centaine de nanomètres (Figure 1.18) [10].

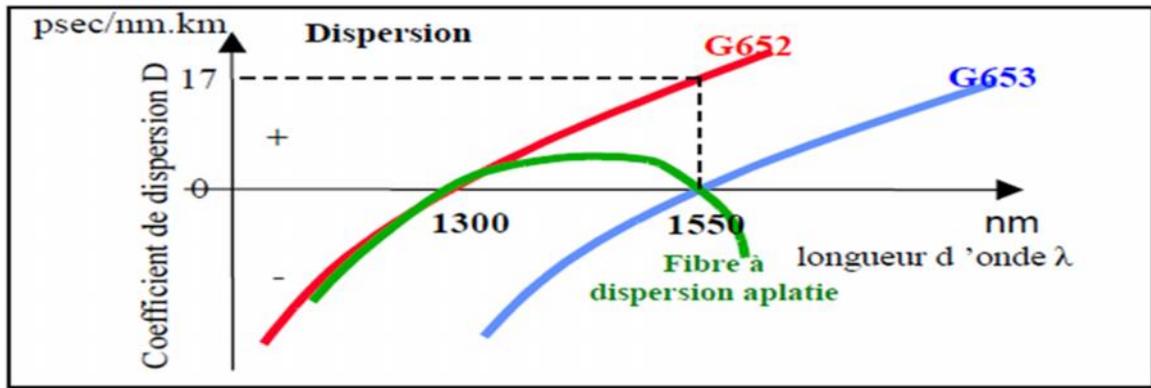


FIG. 1.18 : Courbes de dispersion de quelques fibres optiques.

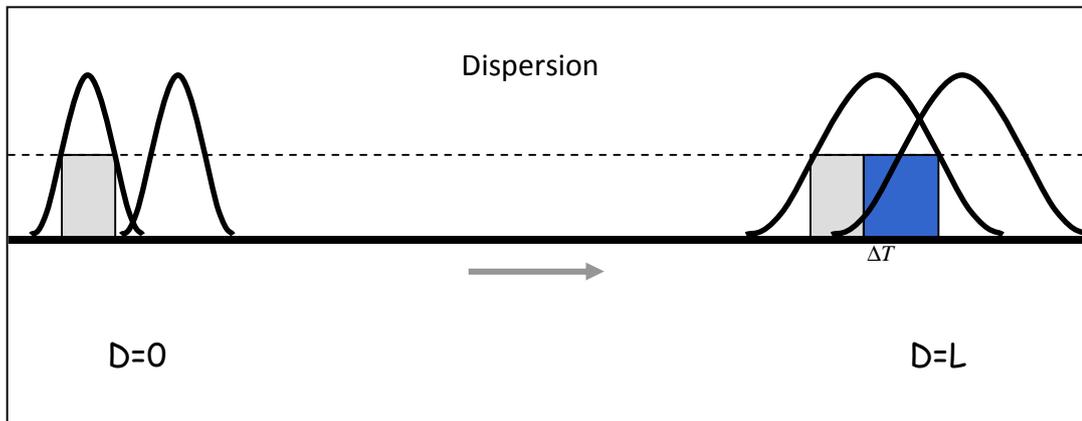
➤ **Effets sur la transmission :**

La dispersion chromatique d'une fibre entraîne donc différents temps de propagation et un élargissement temporel des impulsions émises si celles-ci ne sont pas parfaitement monochromatiques. Au bout d'une certaine distance, si cet étalement devient relativement important, un recouvrement générateur d'interférences entre symboles est possible. Cet élargissement se calcule ainsi :

$$= D(\text{ps/nm.km}) \times L(\text{km}) \times (\text{nm}) \quad (1.15)$$

Avec  $D$  le coefficient de dispersion chromatique de la fibre,  $L$  la longueur de la fibre et la largeur spectrale de la source.

La dispersion chromatique est donc un facteur majeur de limitation des performances des systèmes de transmission sur fibre à haut débit. Car le milieu des télécommunications utilise principalement des longueurs d'onde autour de 1,55 $\mu\text{m}$  (en raison de sa faible atténuation dans cette plage spectrale). Aussi, plus les débits à transmettre seront élevés, plus le recouvrement peut se produire rapidement, et plus des techniques de compensation élaborées devront être mises en œuvre. Il y a principalement deux possibilités : utiliser des fibres ayant la dispersion chromatique modifiée quasiment nulle pour cette longueur d'onde ou ajouter à la première fibre ayant la dispersion chromatique positive une seconde fibre à dispersion négative. On parle de compensation de dispersion. La mise en série de ces fibres permet de compenser et d'annuler les déformations des impulsions dues aux dispersions chromatiques. C'est un procédé souvent usité dans les réseaux de télécommunications. (Deux longueurs d'ondes différentes ne se propagent pas exactement à la même vitesse).



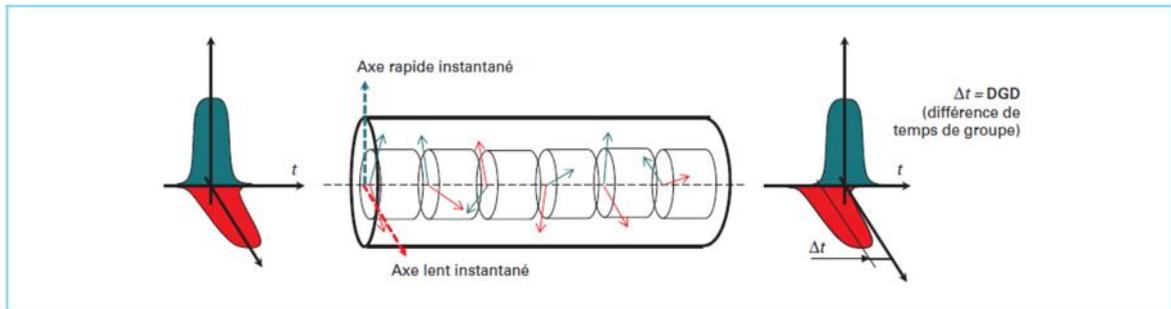
**FIG. 1.19** : dispersion chromatique (Le signal qui se propage s'élargit, le signal reçu est déformé par rapport au signal émis (dégradation)).

### C. La polarisation et la dispersion modale de polarisation [11][12-19]:

En principe, la polarisation, dans une fibre parfaitement circulaire, ne devrait pas évoluer le long de la fibre. On n'observe rien de tel dans la pratique. Un petit tronçon de fibre apparaît généralement comme une lame biréfringente, avec un mode dit rapide et un mode dit lent qui ont des polarisations rectilignes orthogonales. De plus, dans une fibre réelle, cette biréfringence et la direction des axes propres varient constamment et de manière incontrôlée, et la dépolarisation devient rapidement imprévisible.

Ce phénomène est dû à la non-symétrie de révolution du profil d'indice dans le cœur de la fibre, non-symétrie intrinsèque à la fabrication de la fibre et/ou extrinsèque lors de la pose de la fibre. Les origines intrinsèques peuvent être une symétrie géométrique circulaire imparfaite de la fibre ou une non-homogénéité de l'indice de la fibre. Les causes extrinsèques peuvent être un écrasement, un étirement, une torsion ou une courbure de la fibre. Ceci induit un effet photo-élastique, d'où une biréfringence et une polarisation variable.

Quand on envoie un signal sur une fibre «biréfringente», sans se soucier de sa polarisation, on excite les deux modes à la fois. Chacun d'entre eux a sa propre vitesse de propagation. Ce décalage des temps de propagation de groupe a pour effet le dédoublement du signal à la sortie de la fibre, et donc un brouillage de l'information (Figure 1.20). On l'appelle dispersion modale de polarisation (Polarization Mode Dispersion, PMD, en angloaméricain).

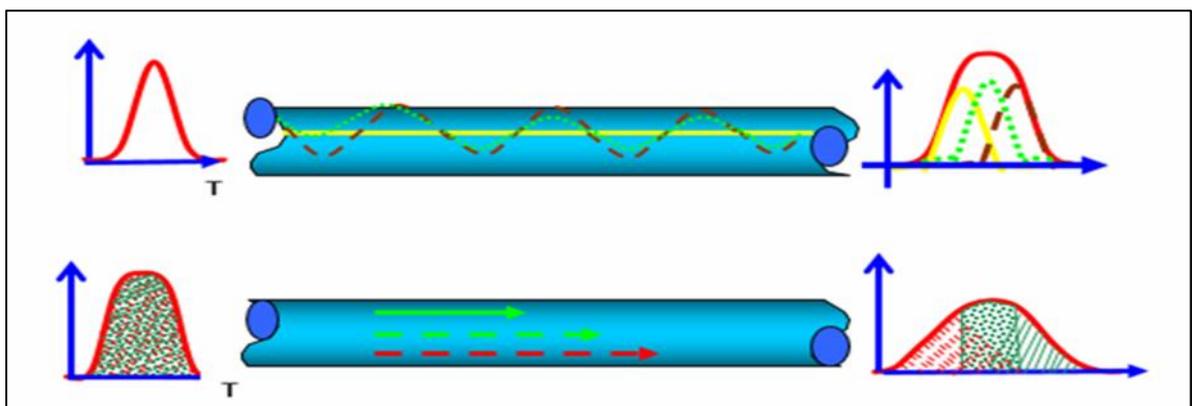


**FIG. 1.20 :** Décalage temporel entre les composantes orthogonales du signal optique dû à une biréfringence aléatoire de la PMD.

Une caractéristique essentielle de ce phénomène réside dans son caractère aléatoire, étant donné qu'il est principalement d'origine extrinsèque et dépend de la qualité de la pose de celle-ci. La fibre optique apparaît ainsi comme un milieu fluctuant. La valeur moyenne du retard n'est donc pas suffisante pour le décrire totalement et nous utiliserons donc des données statistiques. La mesure principale est le DGD (Differential Group Delay), tel que :

$$\text{DGD} = \text{Biréfringence linéique} \times \sqrt{\text{Longueur de couplage}} \times \sqrt{\text{Longueur de la fibre}} \quad (1.16) \text{ [11]}$$

Ce décalage a jusqu'à nos jours souvent été négligé car il reste minime. Cependant, l'allongement du support de transmission optique augmente la valeur de ce décalage temporel alors que la valeur critique diminue avec l'augmentation des débits.



**FIG. 1.21 :** dispersion modale.

#### 1.4.6.2 Les effets non linéaires [20]:

##### A. L'effet Kerr :

L'effet Kerr, en optique géométrique, est une extension des lois de la réfraction de la lumière lors de la propagation de cette lumière dans des milieux d'indice variable. L'indice de réfraction peut alors s'exprimer sous la forme d'une équation non linéaire, proportionnellement à la puissance optique :  $n = n_0 + n_2$  avec  $n_0$  une constante et  $n_2$  une fonction quadratique de la puissance.

La non-linéarité induit une modulation de phase croisée (cross phase modulation), ainsi que des phénomènes connus sous le nom de mélange à trois ou quatre ondes, sources d'intermodulations entre les différents canaux d'un système de transmission utilisant plusieurs longueurs d'onde.

##### B. Les effets Raman et Brillouin :

L'effet Raman est le plus connu des effets non-linéaires. Il s'agit d'une interaction photon-phonon, c'est-à-dire d'échange d'énergie entre l'onde optique et les vibrations du matériau.

L'effet Brillouin est de même nature que la diffusion de Raman, mais l'interaction se fait avec des photons acoustiques, c'est-à-dire avec les vibrations d'ensemble du matériau, se propageant à la vitesse des ondes acoustiques.

Ces effets sont sensibles dès que la puissance injectée dépasse un certain seuil. Une solution mise en œuvre pour les combattre consiste à moduler en amplitude à très basse fréquence le courant d'injection du laser par un signal sinusoïdal, ce qui provoque une modulation de fréquence du signal optique émis et élargit le spectre jusqu'à quelques GHz [21].

#### 1.4.7 Les avantages de la fibre optique :

-Insensibilité au bruit : les interférences électromagnétiques ou le brouillage radioélectrique n'ont aucune influence sur la transmission

-Atténuation de perte inférieure : perte monomode aussi basse que 0,2 dB/km ( 4,5 %), et perte multimode d'environ 1 dB/km ( 30 %)

-Largeur de bande élevée : Taux de transmission atteignant jusqu'à 40 Gb/s (OC-768)  
Petit forma, une fibre est de la même dimension qu'un cheveu humain (125  $\mu\text{m}$ ) dont, un câble contenant 12 paires de fibre optique, de 1.4 cm de diamètre, équivaut à un câble Contenant 900 paires de fils de cuivre ayant un diamètre de 8 cm.

-Poids léger : un câble de cuivre de 900 paires pèse (8000 kg/km), alors qu'un câble de fibre optique de 900 paires pèse (660 kg/km)

-Sécurité de transmission

-Sécurité électrique : La fibre n'est pas sensible aux parasites électriques et n'en crée pas.

-Température environnementale : une fibre peut fonctionner à l'intérieur d'une vaste plage de température ( $-40^{\circ}\text{C}$  à  $100^{\circ}\text{C}$ ).

#### **1.4.8 les inconvénients de la fibre optique:**

- Exigences micromécaniques importantes (connexions, alignement).

- Coût : les câbles de fibre optique sont plus coûteux à installer, mais dure plus longtemps que les câbles de cuivre.

- Transmission : La transmission du signal dans les câbles de fibre optique doit se répéter au long d'une certaine distance grâce à des appareils amplificateurs mais demande beaucoup moins de répétitions que les câbles de cuivre.

- Fragilité : Les fibres peuvent être cassées ou perdre la transmission quand le câble est rayé ou fissuré. Cependant en enveloppant des fibres dans une gaine en plastique, il est difficile de plier le câble sans casser la fibre.

- Protection : Les Fibres Optiques exigent plus de protection autour du câble comparé au cuivre.

#### **1.4.9 Quelques applications de la fibre optique :**

- Transmission numérique à haute débit :
- Réseaux nationaux et internationaux de télécommunications.
- Réseaux locaux en environnement bruité.
- Détection.

## 1.5 Architecture d'une ligne de transmission optique :

### 1.5.1 Définition d'une liaison par fibre optique [22]:

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

Globalement, une liaison optique est composée d'un émetteur et d'un récepteur reliés par une fibre optique (figure 1.22).

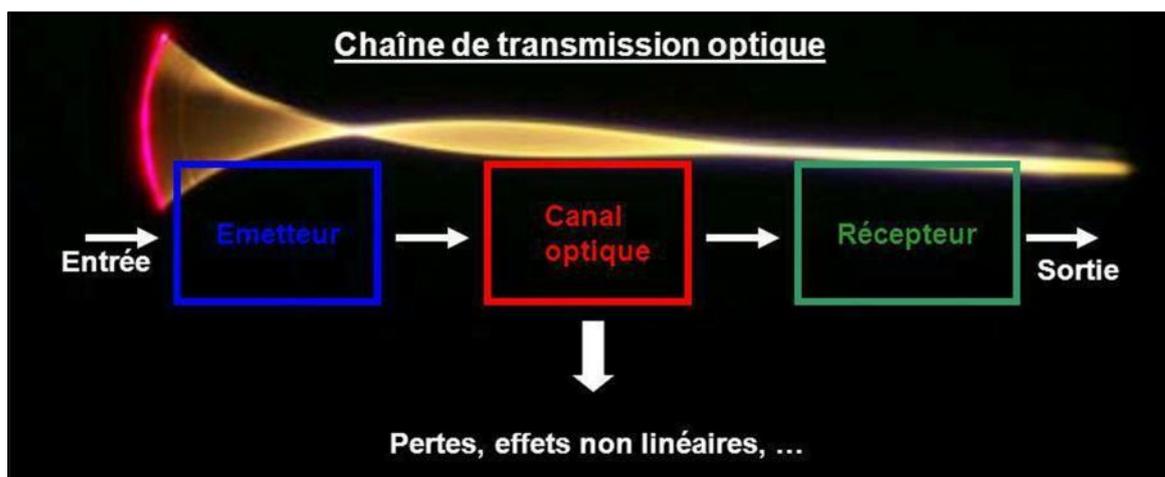


FIG. 1.22: Schéma synoptique d'un système de transmission optique [22]

### 1.5.2 Architecture d'une liaison optique [23]:

L'architecture d'une liaison optique est décrite par la figure (1.22), dans cette liaison le signal optique est émis, transporté, régénéré (s'il y a lieu) et détecté aux moyens de composants optiques ou optoélectroniques.

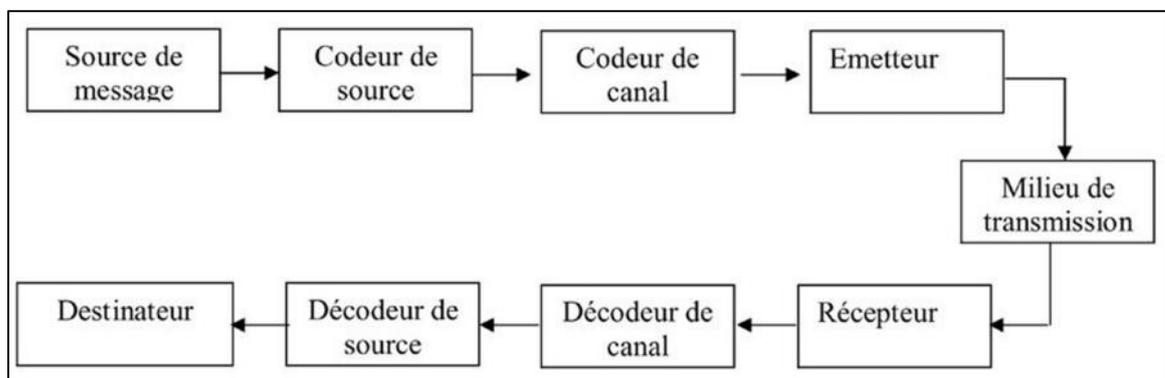


FIG. 1.23 : l'architecture d'une liaison optique.

### 1.5.2.1 Emetteur (source optique) [22] :

Les sources optiques sont des composantes actives dans le domaine de la communication par fibre optique. Leur fonction fondamentale est de convertir une énergie électrique en une énergie optique (conversion électro-optique). En télécommunication optique la nécessité d'utiliser des bandes passantes de plus en plus larges impose le choix des sources à spectres réduits telles que les diodes laser (DL) et les diodes électroluminescentes (DEL).

#### 1.5.2.1.1 La diode DEL (électroluminescentes) [22] :

La diode électroluminescente (DEL) ou LED est le composant émetteur le plus simple. C'est une source incohérente et polychromatique, elle présente un spectre d'émission assez large et un diagramme de rayonnement moins directif, elle est utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très grandes bandes passantes. Elle a un spectre typique d'émission spontanée, continu et assez large d'où une forte sensibilité à la dispersion chromatique (figure 1.24).

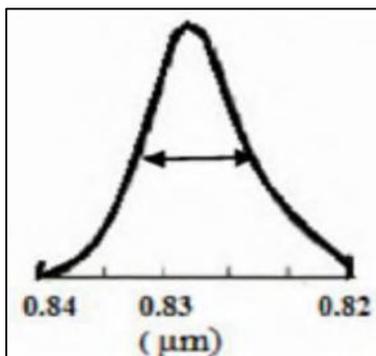


FIG. 1.24 : Spectre d'émission d'une DEL.

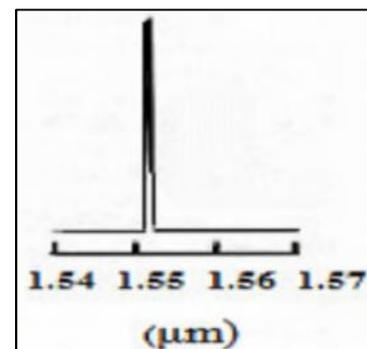


FIG. 1.25 : Spectre d'émission d'une DL.

#### 1.5.2.1.2 La diode laser (DL) [22] :

Laser est l'acronyme anglais de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (en français, amplification de la lumière par émission stimulée de radiations). La diode laser est une source cohérente et monochromatique, elle est utilisée dans les systèmes de transmission à très grande distance, elle est caractérisée par une faible largeur spectrale et une bande passante importante. Le spectre est monomode longitudinal (figure 1.25).

#### 1.5.2.1.3 Modulateurs [22] :

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

### **1.5.2.2 Récepteurs [22] :**

La photo détectrice est un composant essentiel dans les communications par fibres optiques. Son rôle est de traduire le signal optique envoyé par la fibre optique en signal électrique, qui sera traité par des dispositifs électroniques. La photo détectrice la plus utilisée dans les systèmes de transmission par fibre optique est la photodiode PIN.

#### **1.5.2.2.1 Photodiode PIN (Positive Intrinsèque Négative Photodiode) [22] :**

Cette photodiode, polarisée en inverse, est réalisée à partir de trois couches de semi-conducteur. Deux couches fortement dopées P+ et N+ entre lesquels existe une couche de grande résistivité (presque intrinsèque) où il existe très peu de charges mobiles. Les photodiodes PIN sont les plus utilisées car elles sont peu coûteuses et simples à utiliser avec une performance satisfaisante.

## **1.6 conclusion :**

La fibre possède des qualités non négligeables comme support de transmission de l'information qui lui ont permis de s'imposer dans les réseaux de télécommunications. Et plusieurs de ses défauts semblent pouvoir se corriger (la dispersion chromatique, l'atténuation, ...). Nous avons également présenté dans ce chapitre les autres modules de la ligne de transmission optique et nous avons donné leurs principales propriétés. Nous allons maintenant aborder un autre domaine de la fibre optique : la technologie FTTx..

**Chapitre 02 :**

**Propriétés**

**fondamentales**

**des réseaux de**

**Bragg**

# Chapitre02 : propriétés fondamentales de réseau de Bragg

## 2.1 Introduction :

Tout comme une multitude de technologies importantes (par exemple le four à micro-onde, le transistor, les plastiques...), la découverte des réseaux de Bragg eut lieu quelque peu par hasard lors d'une expérience ayant un tout autre but initialement. En étudiant en 1978 le signal de réflexion d'un laser argon de 488 nm se propageant à l'intérieur d'une fibre optique dopée au germanium, Ken Hill du Centre Canadien de Recherche en Communication fit la surprenante découverte que ce signal augmentait avec le temps. Ceci était dû à la réflexion de Fresnel à l'extrémité de la fibre optique qui créait une onde stationnaire qui modifiait l'indice de réfraction de façon à former une structure périodique : le réseau de Bragg (FBG). Le mécanisme responsable du changement d'indice de réfraction, i.e. sa photosensibilité, fut par la suite déterminée comme étant l'absorption à deux photons du laser argon correspondant à une longueur d'onde équivalente de 244 nm pour laquelle le verre était particulièrement photosensible. Plusieurs mécanismes physiques distinctifs peuvent contribuer à la photosensibilité des fibres optiques et ceux-ci seront abordés [24.25].

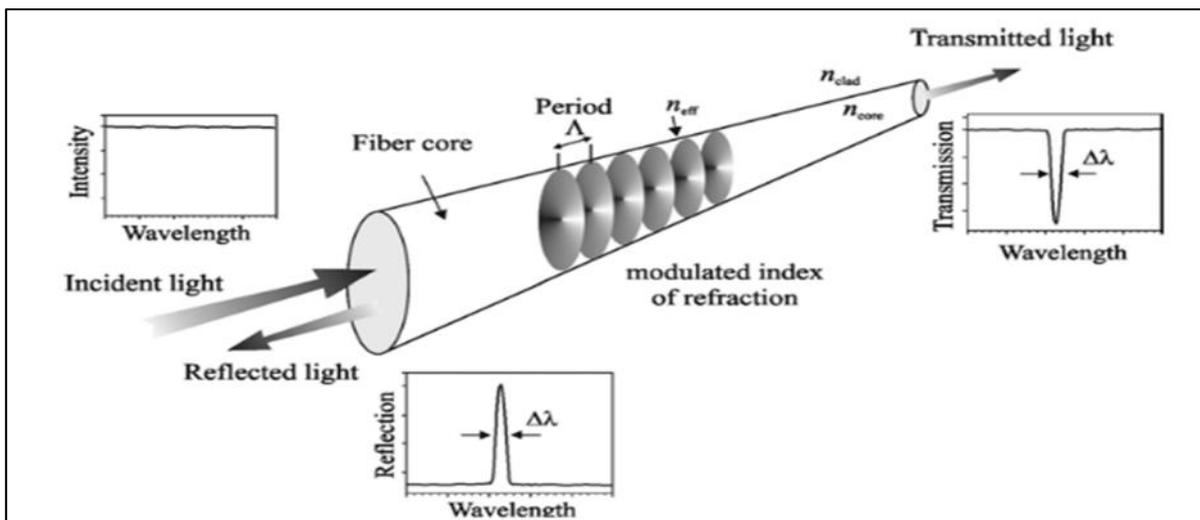
Ce chapitre présente une introduction à la théorie de réseaux de Bragg et les principales équations à l'aide de la théorie des modes couplés. Les différents types de réseaux de Bragg et la méthode des matrices de transferts sont ensuite présentés. Finalement, les diverses techniques de fabrication et les applications.

## 2.2 Définition de réseau de Bragg :

Une fibre à réseau de Bragg est une microstructure tout optique de quelques millimètres basés sur un seul concept fondamental de la physique qui est la dispersion par une structure périodique. Ces structures présentent une variation périodique locale de la constante de propagation, qui est induite par la variation périodique de l'indice de réfraction du guide d'onde considéré. La distribution périodique de l'indice de réfraction génère, en quelques sortes, une suite de miroirs diélectriques spécifiques à une certaine longueur d'onde. En effet, de tels réseaux présentent une sélectivité spectrale incontestée, car ils ont le pouvoir de contrôler la vitesse de propagation et par suite les caractéristiques dispersives du matériau où s'y propage la lumière. En

conséquence, la lumière peut être accélérée, ralentie, ou même quasi-arrêtée. Toutes ces nouvelles propriétés ont conduit à la conception et le développement de nouveaux composants purement optiques d'une grande utilité dans l'optimisation des capteurs à fibres optiques [26], des lasers à fibres optiques [27], et des systèmes de communications optiques [28].

Explicitement, un réseau de Bragg fibré est un morceau de fibre optique, généralement de longueur ne dépassant pas les 3 centimètres à l'exception de certains réseaux spécifiques qui peuvent atteindre ou dépasser une longueur de 14 centimètres [29], et dont l'indice de réfraction du cœur est modulé de façon périodique, comme le représente le schéma de la figure (2.1). La modification d'indice est obtenue par insolation latérale avec une figure d'interférence issue d'un faisceau laser ultraviolet. Dans ce cas, on note que le laser à excimer à base de fluorure d'argon ( $\text{ArF}^*$ ), qui émet à 193 nm, est le mieux placé pour ce genre d'opération. De ce fait, il modifie périodiquement la phase (ou l'intensité) de la lumière réfléchie (ou transmise).



**FIG 2.1 :** Représentation schématique d'un réseau de Bragg inscrit au cœur d'une fibre optique.

- La période de variation de l'indice de réfraction est représentée par une lumière à large bande est couplée dans le cœur de la fibre. Une partie de la lumière d'entrée est réfléchie (à la condition de Bragg) et le reste est transmis. La largeur de bande de la lumière réfléchie et transmise dépend des caractéristiques du réseau de Bragg, de sa longueur et de la profondeur de modulation [30].

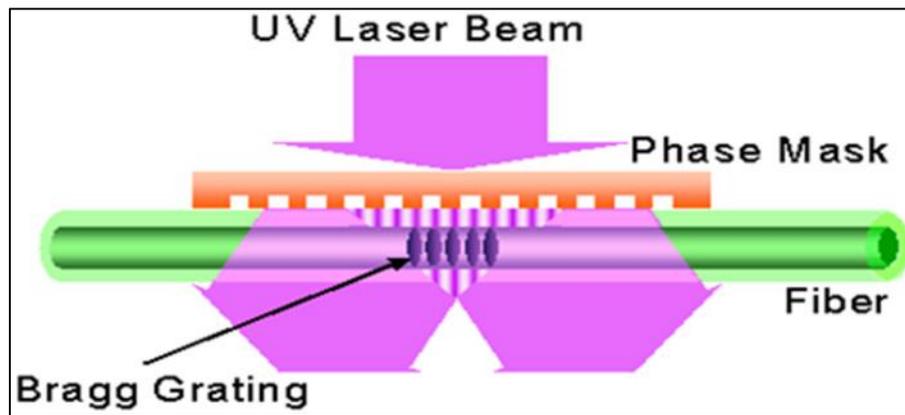
### 2.3 Techniques de fabrication de réseau de Bragg :

En matière de procédés de fabrication, actuellement, il existe principalement trois techniques de base en usage permettant d'obtenir la modulation d'indice nécessaire avec la plus grande précision : l'interférométrie (ou technique holographique) [31], la technique de point par point [32], et la méthode de masque de phase [33, 34]. Il est à noter que chaque technique a ses propres avantages et ses inconvénients. Cependant, comparée aux différentes méthodes utilisées, la technique de masque de phase présente de nombreux avantages par rapport aux autres.

#### 2.3.1 Technique de Mask de Phase :

La figure (2.2) représente la technique de masque phase. On utilise un réseau de diffraction gravé sur un substrat en silice ( $\text{SiO}_2$ ), qui fait l'objet de masque de phase. Le faisceau laser unique est séparé en plusieurs ordres de diffraction. Dans cette approche on joue sur la profondeur des reliefs du réseau pour éliminer l'ordre zéro. Ce qui permet d'obtenir une figure d'interférence issue des premiers ordres de diffraction ( $\pm 1$ ) avec une puissance assez importante. Donc, la modulation de l'indice de réfraction est limitée à la région de densité énergétique élevée, ceci permet d'obtenir une modulation d'indice optimale [33]. Une fibre optique dénudée et chargée d'hydrogène dont le cœur est dopé au germanium est exposée au champ d'interférences. Suite à cette insolation, on obtient une modulation périodique permanente de l'indice de réfraction.

Malheureusement, cette méthode n'est pas flexible comme la méthode interférométrique, car chaque masque de phase correspond à une seule longueur d'onde de Bragg  $\lambda_B$ . Celle-ci est déterminée uniquement par le pas du masque de phase et elle est indépendante de la longueur d'onde de la lumière laser UV utilisée. Toutefois, elle est moins sensible aux vibrations et aux contraintes d'alignement.



**FIG. 2.2** : Technique de masque de phase : la figure d'interférence est obtenue par un réseau de diffraction gravé sur un substrat en silice ( $\text{SiO}_2$ ).

De ce fait, elle est beaucoup plus adaptée pour la production en masse avec une meilleure reproductibilité à faible coût. En plus, cette technique permet la fabrication de réseaux de Bragg chirpés, c'est-à-dire, à pas variable, qui sont utilisés particulièrement comme compensateur de dispersion dans les systèmes de transmission optiques à haut débit et les systèmes multiplexés en longueurs d'onde [35].

## 2.4 Etude des propriétés de réseau de Bragg sur une liaison FTTH :

### 2.4.1 Les technologies FTTx :

Le FTTx est un terme générique pour toute architecture de réseau à large bande, qui utilise la fibre optique pour remplacer le tout ou une partie de la boucle locale, habituellement, en fil métallique. Présentement, l'optique est déjà installée dans les réseaux de desserte grand public. Les terminologies FTTx regroupe plusieurs concepts distincts. Plusieurs abréviations sont généralement utilisées pour parler des technologies FTTx,

Souvent, quand on parle de raccordement des utilisateurs à la fibre optique, il s'agit dans les faits d'un rapprochement du réseau de fibres optiques au client via une paire de cuivre (opérateurs télécom) ou d'un câble coaxial (câblo-opérateur).

Le débit fourni via une fibre optique est indépendant de la distance, alors que le débit fourni via les derniers mètres (ou hectomètres) de cuivre dépend de la longueur de la paire de cuivre (affaiblissement du signal).

En pratique, si la longueur de cuivre résiduelle est inférieure à 1 km, le client peut bénéficier du très haut débit [36].

Les fibres ont l'avantage de permettre d'atteindre des débits bien supérieurs à ceux du cuivre, elles bénéficient d'une moindre atténuation du signal (de l'ordre de 0.2 dB/km, à comparer aux 15 dB/km du cuivre). Enfin, elles sont insensibles aux phénomènes électromagnétiques. [37]

Les opérateurs de télécommunication tentent donc de raccourcir le plus possible la paire de cuivre existante qui raccorde leur clients à leur réseau.

-L'introduction des technologies « fibre optique » dans le réseau d'accès découle d'un certain nombre d'éléments convergents : [38]

- l'augmentation des besoins des utilisateurs :

-les besoins des entreprises en communications symétriques sont en croissance régulière quelles que soient leur taille et leur activité, pour passer de 1 à 10 puis 100 Mbit/s, voire 40 Gbit/s à terme, [38]

-les besoins des usagers résidentiels combinent l'accès à plusieurs programmes de télévision (en haute définition), la navigation Internet, le téléchargement et le transfert de fichiers et les communications téléphoniques et visiophoniques.

La convergence des applications et des terminaux, favorisée par l'utilisation du protocole IP, conduit à utiliser un média large bande et transparent,

Les technologies traditionnelles (cuivre) atteignent leurs limites liées aux lois de la physique, alors que les technologies alternatives (radio, satellite, ..) ne sont que des solutions d'attente sur des applications ciblées [38].

**-Différents sigles utilisés et architecture correspondante :**

- FTTN: *Fiber To The Neighborhood* (Fibre jusqu'au quartier)
- FTTC : *Fiber To The Curb* (Fibre jusqu'au trottoir)
- FTTS : *Fiber To The Street* (Fibre jusqu'à la rue - bâtiment)
- FTTN : *Fiber To The Node* (Fibre jusqu'au répartiteur)
- FTTB : *Fiber To The Building* (Fibre jusqu'au bâtiment)
- FTTCab : *Fiber To The Cab* (Fibre jusqu'au sous-répartiteur)

- FTTP : *Fiber To The Premises* (Fibre jusqu'aux locaux - entreprises)
- FTTH : *Fiber To The Home* (Fibre jusqu'au domicile)
- FTTE : *Fiber To The Entreprise* (Fibre pour les entreprises)
- FTTO : *Fiber To The Office* (Fibre jusqu'au bureau - entreprises)
- FTTLA : *Fiber To The Last Amplifier* (Fibre jusqu'au dernier amplificateur)

## 2.4.2 Les Catégories de technologie FTTx :

Les réseaux FTTx peuvent être classés en deux grandes catégories :

### 2.4.2.1 Les réseaux de desserte optique jusqu'à un point de distribution :

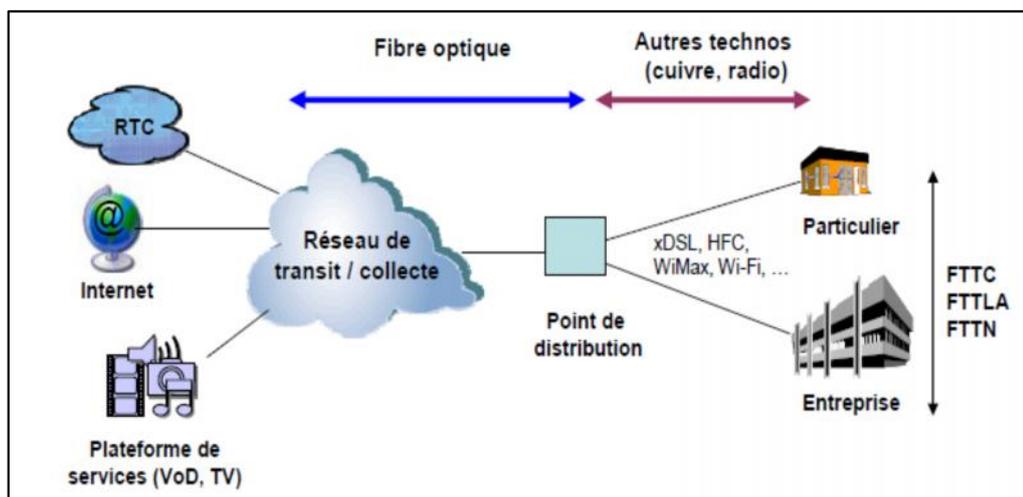


FIG .2.3 : réseau de desserte optique jusqu'à un point de distribution [37].

La fibre optique est déployée jusqu'au point de distribution (situé par exemple, à l'entrée d'une Zone d'Activité (ZA), ou au cœur d'un quartier résidentiel), puis la distribution terminale des usagers est réalisée par une autre technologie (câble, ADSL, réseaux hertzien, ...).

Le point de distribution peut être situé au niveau :

- D'un NRA «Nœud de Raccordement d'abonnés» ou d'une station de base (Wi-Fi, Wi-Max), on parle alors de FTTN.
- D'un sous-répartiteur ou d'une armoire de rue, on parle alors de FTTC.
- Du dernier amplificateur dans le cas des réseaux des câblo-opérateurs, on parle de FTTLA ou bien le réseau HFC (Hybrid Fiber Coaxial), la fibre optique étant déployée

en remplacement du câble jusqu'au dernier amplificateur (situé à quelques centaines de mètres des logements), puis prolongée sur la partie terminale par le câble coaxial.

**a) FTTN (Fiber to the Node):**

Technologie de déploiement des réseaux haut-débit consistant à équiper les armoires des sous-répartiteurs (SR), voire des points de concentration (PC) en colonne technique d'immeubles d'équipements actifs haut-débit (DSLAM).

Cette technologie est utilisée par la plupart des opérateurs mondiaux, lorsqu'il s'agit d'améliorer la desserte haut-débit de réseaux existants, car :

- Elle réutilise la paire de cuivre du dernier kilomètre diminuant de façon considérable la quantité de génie civil nécessaire
- Elle permet d'augmenter considérablement le débit fourni, par rapport à une bouche locale 100% cuivre, en réduisant la longueur du fil de cuivre reliant le client à la fibre, 50 Mbps en VDSL2 jusqu'à 500 mètres, 100 Mbps jusqu'à 100 mètres, voire 500 Mbps en G.fast
- Elle permet un déploiement des réseaux beaucoup plus rapide.

**b) FTTCab (Fiber To The Cabinet) :**

La terminaison de réseau optique est localisée soit dans une chambre souterraine, soit dans une armoire sur la voie publique, soit dans un centre de télécommunications, soit sur un poteau. Selon le cas, il est envisagé de réutiliser le réseau terminal en cuivre existant ou de mettre en œuvre une distribution terminale par voie radioélectrique.

**c) FTTCurb (Fiber To The Curb) :**

La fibre optique est amenée jusqu'au point de concentration, situé sur le trottoir (curb, en anglais). Cette solution permet de se rapprocher, en moyenne, à 300 mètres du client.

**d) FTTLA (Fiber To The Last Amplifier) :**

La technologie de la fibre jusqu'au dernier amplificateur FTTLA (Fiber To The Last Amplifier) permet de réutiliser l'infrastructure en câbles métalliques existante. La fibre est amenée au niveau du dernier amplificateur, soit au niveau du quartier en zone moins dense ou au niveau de l'immeuble en zone très dense. Dans certains cas, la fibre est conduite précisément via les colonnes montantes jusqu'aux répartiteurs d'étages. Donc,

les derniers mètres réutilisent l'infrastructure en câble coaxial ou en paires torsadées. Enfin, il est noté que la technologie FTTx a permis d'ajouter, à l'ensemble des technologies existantes, de nouvelles méthodes de densifications d'utilisateurs et de multiplications de débits, grâce aux techniques de multiplexage.

#### 2.4.2.2 Les réseaux de desserte optique jusqu'à l'utilisateur :

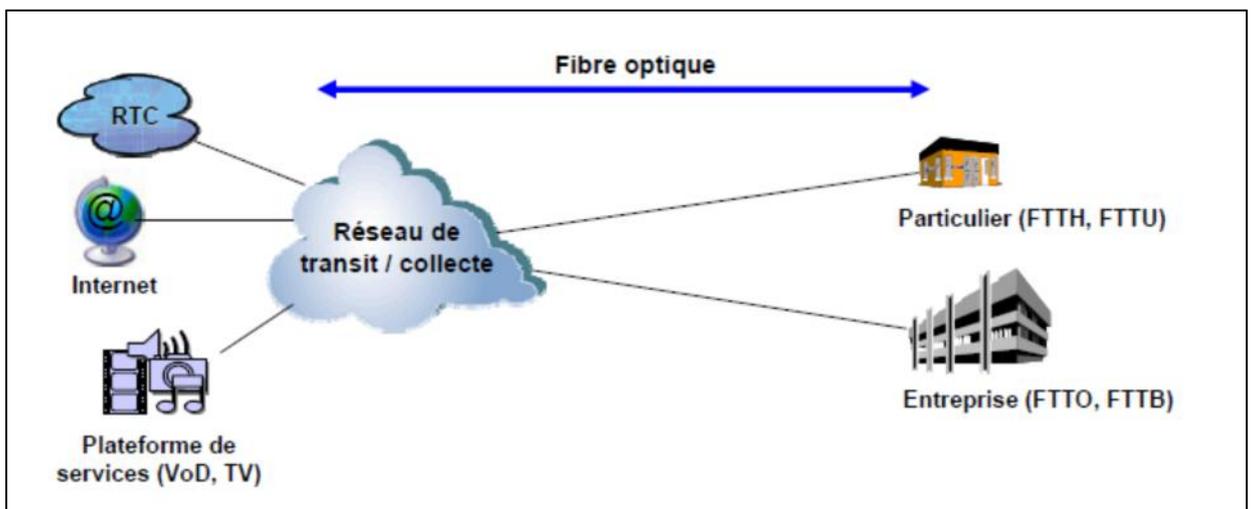


FIG.2.4 : réseau de desserte optique jusqu'à l'utilisateur [37].

Pour lesquels on distingue :

- Les réseaux de desserte optique déployés jusqu'au bâtiment d'une entreprise, ou au pied d'un immeuble (FTTO / FTTB, pour Fiber to the Office / Building).

La desserte interne de l'entreprise ou des foyers au sein de l'immeuble est ensuite réalisée généralement via un réseau « cuivre ».

- Les réseaux de desserte optique **jusqu'au foyer de l'abonné** (FTTU / FTTH, pour Fiber to the User / Home).

##### a) FTTB (Fiber To The Building):

La fibre se termine au pied d'immeuble. Pour effectuer le raccordement terminal des clients, on peut utiliser soit un câble Ethernet, soit la terminaison en cuivre traditionnelle équipée en VDSL 2. Le VDSL 2 (nouvelle norme DSL) autorise des débits de 40 Mbit/s descendant et 15 Mbit/s ascendant, mais seulement pour des clients très proches du DSLAM (quelques centaines de mètres au plus), avec des débits variant selon la distance, à la différence de la fibre qui ne présente pas ces contraintes. Les

architectures FTTB ne sont pas parfaitement compatibles entre elles du fait que la partie terminale soit différente.

- les opérateurs installent des équipements actifs en pied d'immeuble ou en extérieur (raccordement au réseau électrique).
- Chacun des opérateurs utilisant un réseau terminal différent : coaxial par certains câblo-opérateurs, cuivre catégorie 5 par d'autres.

**b) FTTO (fiber To The Office):**

La terminaison de réseau optique, qui est propre à un abonné donné, est implantée dans ses locaux. La fibre va donc jusqu'à son bureau, et la partie terminale en cuivre est très courte.

**c) FTTH (fiber To The Home) :**

Le FTTH désigne le raccordement optique jusqu'à l'utilisateur final, sans réutilisation du câblage cuivre. Avec cette solution, la plus achevée et donc la plus performante, il est actuellement possible d'atteindre des débits atteignant 2,5 Gbit/s dans le sens descendant et 1,2 Gbit/s dans le sens montant sur une même fibre qui peut être partagée entre 64 clients [37], cette solution est définie comme une architecture de réseau d'accès dans laquelle le raccordement au logement ou au local professionnel de l'utilisateur final est assuré par fibre optique destinée à desservir un utilisateur unique en services de télécommunications [39, 40, 41].

L'apparition de la technologie FTTx a totalement révolutionné le monde des réseaux télécommunications. La conception de systèmes de transmission à très grande capacité était désormais possible. De plus, les échanges à travers ces systèmes allaient être de plus en plus nombreux et la demande de services de plus en plus élevés, on verra par la suite une des technologies utilisés pour assurer le bon fonctionnement d'une ligne de transmission optique, en utilisant les réseaux de Bragg.

### **2.4.3 Principe de fonctionnement [42] :**

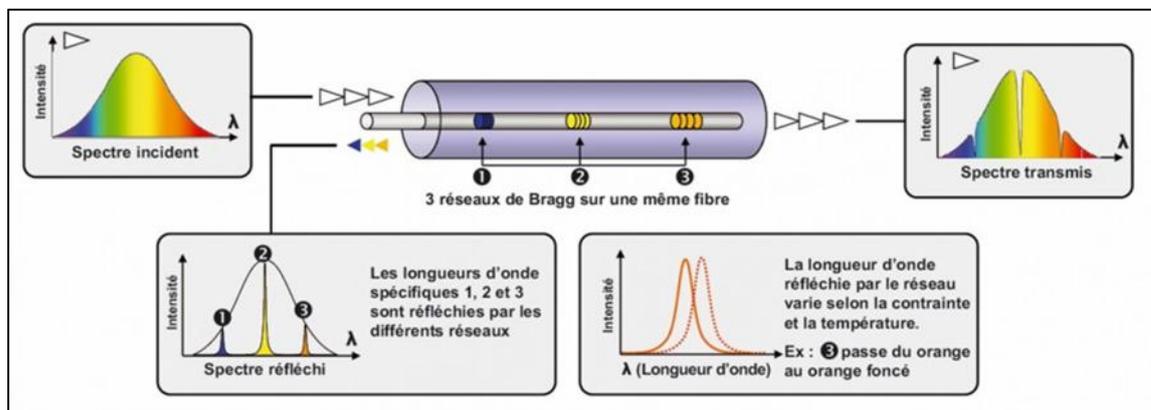
En tant que structure résonnante, la fibre à réseau de Bragg agira comme un miroir sélectif de la longueur d'onde très précise ; c'est un filtre à bande étroite. Cela signifie que si la lumière d'une source à bande large parcourt la fibre optique, seule la lumière

sur une largeur spectrale très étroite, centrée sur la longueur d'onde du réseau de Bragg sera reflétée. La lumière restante poursuivra son chemin le long de la fibre jusqu'au prochain réseau de Bragg sans avoir perdu de son pouvoir (FIG.2.5).

La longueur d'onde du réseau de Bragg est essentiellement définie par la période de la microstructure et de l'indice de réfraction du noyau.

Le réseau de Bragg est une structure symétrique, ainsi il reflétera toujours la lumière selon la longueur d'onde peu importe d'où provient la lumière.

Différents capteurs fabriqués à partir de réseaux ayant une longueur d'onde spécifique peuvent être implémentés en série sur une même ligne optique (typiquement jusqu'à 16).

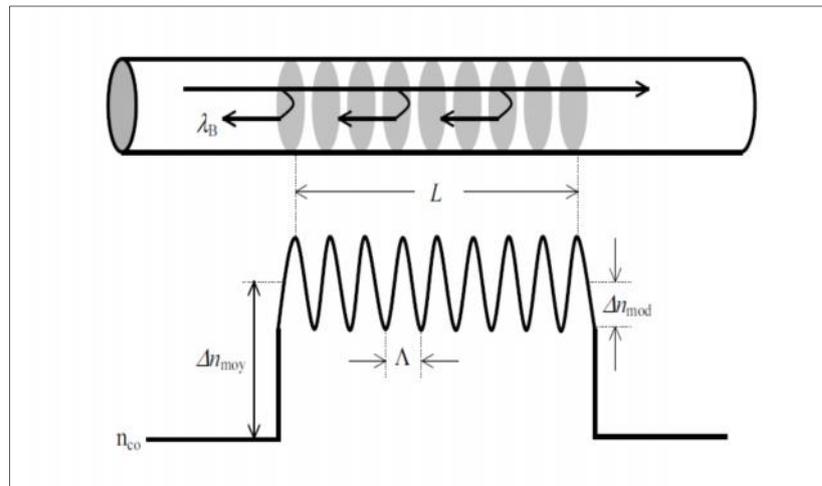


**FIG 2.5 :**(A gauche en haut : spectre de la lumière injectée ; en haut à droite : spectre de la lumière transmise ; au centre : FBG avec symbolisées la transmission la réflexion de la lumière ; en bas à gauche : spectre de la lumière reflétée) [42].

La figure (2.5) montre la représentation schématique d'un réseau de Bragg à fibre. Lorsque la période et l'amplitude de la modulation de l'indice sont constantes, le réseau est appelé uniforme et représente la structure de base pour décrire les différents types de réseau de Bragg existants. La modulation de l'indice de réfraction de la fibre optique résultante de l'irradiation UV s'écrit :

$$\Delta n(z) = \Delta n_{moy} + \Delta n_{mod} \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \quad (2.1)$$

- $n_{moy}$  : la variation de l'indice moyen
- $n_{mod}$  : l'amplitude de la modulation
- $z$  : la position dans le réseau
- $\Lambda$  : la période ou pas de variation de l'indice de réfraction.



**FIG 2.6** : représentation schématique d'un réseau de Bragg à fibre [31],  $\lambda_B$  : longueur d'onde de Bragg,  $L$  : longueur du réseau,  $n_{co}$  : indice de cœur,  $n_{mod}$  : indice de modulation,  $n_{moy}$  : indice moyen,  $\Lambda$  : pas du réseau

Le pas du réseau est fixé par les paramètres géométriques de l'inscription et les variations de l'indice par l'amplitude du signal UV. Les variations périodiques de l'indice de réfraction vont produire une résonance à la longueur d'onde de Bragg  $\lambda_B$  due à l'échange d'énergie entre les différents modes se propageant dans la fibre :

$$\lambda_B = 2n_{eff} \quad (2.2)$$

Où  $n_{eff}$  est l'indice effectif du réseau.

De ce fait, seules les longueurs d'onde autour de la longueur d'onde de Bragg éprouveront les effets de la structure périodique. Pour les autres, la structure sera pratiquement transparente [31]. Le réseau provoque un couplage des modes se propageant dans la fibre. De plus, comme seul un mode transversal existe dans les fibres optiques monomodes, le couplage se produit alors entre les deux sens de propagation différents de ce mode. Le coefficient de couplage, défini comme l'ordre de grandeur de l'interaction entre les modes dans la fibre, est décrit par :

$$k = \frac{\pi \Delta n_{mod}}{\lambda_B} \eta \quad (2.3)$$

Dans le cas d'une modulation de l'indice de forme sinusoïdal. Le facteur de confinement dans la fibre optique a une valeur de  $\eta \approx 0.83$ . L'influence du réseau sur

l'onde incidente peut être expliquée à partir du fait que le réseau est un composant sélectif en longueur d'onde, comme le montre la figure (3.3).

#### 2.4.4 La théorie et généralité :

En général, on est intéressé à la réponse spectrale du réseau de Bragg. Les caractéristiques de ce spectre de réseau peuvent être modélisées par plusieurs approches. La théorie largement utilisée est celle des modes couplés. Cette théorie est un outil convenable pour décrire la propagation des ondes optiques dans un guide d'onde avec une petite variation de l'indice à travers la longueur du guide d'onde. L'idée derrière cette théorie est que le champ électrique d'un guide d'onde avec perturbation est représenté par une combinaison linéaire des modes de la distribution du champ, mais sans perturbations.

##### 2.4.4.1 Théorie des modes couplés et principe de la méthode des matrices de transfert [32] :

La modélisation du couplage induit dans les champs d'une fibre par le réseau de Bragg considère celui-ci comme une perturbation dans l'axe de propagation  $z = [0, L]$  de la fibre.

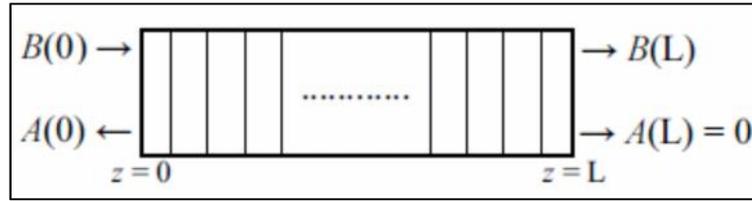
Comme seulement le mode fondamental se propage dans une fibre monomode, le couplage est contra-propagatif, i.e. se réalisera entre les deux sens possibles de propagation, soient alors  $E_1$  le mode fondamental et  $E_2$  le mode généré par la perturbation, (fig 2.7) ; définis par ;

$$E_1 = B(z)\exp(-j\beta_1 z) \quad (2.4)$$

et

$$E_2 = A(z)\exp(-j\beta_2 z) \quad (2.5)$$

Où  $A(z)$  et  $B(z)$  sont les amplitudes des champs aller et retour, et  $\beta_1$  et  $\beta_2$  les constantes de propagation respectives. Ces constantes de propagation sont liées au pas de perturbation par  $\beta = \pi/\Lambda$ .



**FIG 2.7 :** géométrie du transfert d'énergie entre les modes allé et retour dans un réseau de Bragg [32].

D'après la théorie des modes couplés, la perturbation périodique de la fibre, i.e., le réseau de Bragg, peut provoquer un échange d'énergie entre les deux modes. La loi de la conservation de l'énergie exige :

$$\frac{d}{dz} (|A(z)|^2 - |B(z)|^2) = 0 \quad (2.6)$$

Le couplage entre les deux modes est ainsi gouverné par les équations suivantes :

$$\frac{dA(z)}{dz} = \kappa B(z) \exp(-j2(\Delta\beta)z) \quad (2.7)$$

$$\frac{dB(z)}{dz} = \kappa^* A(z) \exp(j(\Delta\beta)z)$$

Ou  $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$  est la condition de couplage et  $\kappa$  le coefficient de couplage qui représente la force du couplage entre les champs contre-propagatif et qui s'écrit comme suit :

$$K = k \exp[-j\left(\frac{2\pi}{\lambda}z + \phi\right)] \quad (2.8)$$

Ces équations sont appelées les équations des modes couplés. Leur solution dépend des conditions aux limites définies. Dans ce cas,  $E_1(z)$  est le mode aller et  $E_2(z)$  le mode retour produits par le réseau, alors  $E_2(z=L)=0$ . Comme il s'agit d'une perturbation obéissant à la loi de Bragg, la condition de phase exige que  $\Delta\beta = 0$ , en conséquence :

$$A(z) = B(0) \frac{\sinh[\kappa(z-L)]}{\cosh(\kappa L)} \quad (2.9)$$

$$B(z) = B(0) \frac{\cosh[\kappa(z-L)]}{\sinh(\kappa L)}$$

Le guidage de la lumière dans le réseau est alors convenablement défini par le produit sans dimension  $\kappa L$ .

Afin de déterminer la réflectivité du réseau de Bragg, nous considérons les conditions aux limites suivantes sur les champs électromagnétiques: pour un réseau de Bragg le mode contre propageant n'est pas présent à la sortie, ce qui nous donne :  $B(L) = 0$ , et le mode aller n'est pas couplé à l'entrée du réseau, c'est à dire que :  $A(0) = 1$  (puissance incidente). La réflectivité est alors donnée par :  $r = \frac{B(0)}{A(0)}$

Encore une fois, nous distinguons deux régions :

- Pour les fréquences comprises dans la bande interdite  $|k| < |\beta|$ .

$$R = |r|^2 = \frac{(kL)^2 \sinh^2(\gamma L)^2}{(\gamma L)^2 \cosh^2(\gamma L) - (\Delta\beta L)^2 \sinh^2(\gamma L)} \quad (2.10)$$

- Pour les fréquences supérieure dans la bande interdite  $|k| > |\beta|$ .

$$R = |r|^2 = \frac{(kL)^2 \sin^2(\gamma L)^2}{(\Delta\beta L)^2 \sin^2(\gamma L) - (\gamma L)^2 \cos^2(\Delta\beta L)^2} \quad (2.11)$$

L'indice de la transmission s'écrit alors,

$$T(\lambda) = \frac{\gamma_B^2}{(\Delta\beta L)^2 \sinh^2(\gamma_B L) - \gamma_B^2 \cosh^2(\gamma_B L)^2} \quad (2.12)$$

Ou  $\gamma_B = \sqrt{\Delta\beta^2 - k^2}$  pour  $|k| < |\beta|$ .

Et  $\gamma_B = \sqrt{k^2 - \Delta\beta^2}$  pour  $|k| > |\beta|$ .

Parmi les deux façons d'aborder le calcul des réponses spectrales d'un réseau de Bragg, la méthode de matrice de transfert a été retenue, en raison de sa simplicité de mise en œuvre, de sa vitesse de calcul et de la précision des résultats obtenue. Cette méthode consiste à identifier une matrice 2\*2 à chaque section uniforme du réseau. Le réseau est alors fractionné en N sections uniformes .si  $R_i$  et  $T_i$  sont les amplitudes des champs se propageant à travers chaque section i, alors  $R_0 = R(L/2) = 1$  et  $T_0 = T(L/2) = 0$ , car il n'existe pas de mode retour se propageant pour  $z \leq L/2$ . La propagation à travers chaque section i est alors décrite par la matrice M, définie par :

$$\begin{bmatrix} R_i \\ T_i \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ T_{i-1} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Pour un réseau de Bragg à fibre, la matrice M est donnée par :

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos(\gamma L_i) - j \frac{\Delta\beta}{\gamma} \sin(\gamma L_i) & j \frac{\kappa}{\gamma} \sin(\gamma L_i) \\ -j \frac{\kappa}{\gamma} \sin(\gamma L_i) & \cos(\gamma L_i) + j \frac{\Delta\beta}{\gamma} \sin(\gamma L_i) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Où  $L$  est la longueur de la section uniforme,  $\Delta\beta$  et  $\kappa$  les coefficients de couplage associés à chaque section et  $\gamma_B = \sqrt{\Delta\beta^2 - \kappa^2}$ . Une fois la matrice de chaque section a été calculée, les amplitudes des champs sont obtenues à partir de :

$$\begin{bmatrix} R_N \\ T_N \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} R_0 \\ R_0 \end{bmatrix}, M = M_N \cdot M_{N-1} \cdot M_{N-2} \cdots M_i \cdot M_1 \quad (2.15)$$

Le produit des matrices donne une matrice de transfert totale  $M$  caractérisant la propagation à travers le réseau. Le nombre de sections uniformes nécessaires pour estimer avec précision les réponses spectrales des réseaux non uniformes ; i.e., apodisés et à pas variables, est  $\sim 100$ .

Pour des réseaux non uniformes, tels que le réseau à saut de phase et échantillonnés,  $M$  est alors déterminée par le nombre de sections uniformes dans le réseau et en insérant une matrice de saut de phase entre les facteurs  $M_i$  et  $M_{i+1}$  du produit (3.15) pour saut de phase localisé juste après la  $i^{\text{ème}}$  section :

$$M_s = \begin{bmatrix} \exp\left(\frac{-j\phi_i}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(\frac{j\phi_i}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Les effets des variations de la valeur de chaque paramètre constituant un réseau de Bragg peuvent ensuite être facilement déduits des modélisations des réponses spectrales complexes du composant. Les variables indispensables pour effectuer la modélisation sont :

- Pour la fibre : les paramètres opto-géométriques de la fibre, i.e., les indices du cœur et de la gaine, leurs diamètres, etc.
- Pour le réseau : le pas, la longueur, le coefficient de couplage et, éventuellement, la variation du pas, l'apodisation, les sauts de phase, etc.
- Pour la source optique incidente : la largeur et la résolution spectrale.

## 2.5 Les types de réseau de Bragg :

### 2.5.1 Réseau de Bragg uniforme :

Ce sont des réseaux standards qui ont une période constante et des pas perpendiculaires à l'axe de la structure (la fibre ou guide d'onde). Par exemple pour un réseau de Bragg photo-inscrit dans le cœur d'une fibre optique consiste en la variation périodique, selon l'axe de la fibre, (figure 2.8). Cette modulation d'indice réalise un filtre en longueur d'onde. En effet, les longueurs d'onde situées autour de la longueur d'onde de Bragg vérifiant la loi de Bragg : [31]

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.17)$$

sont partiellement réfléchies par le réseau ; les autres sont transmises, avec  $\Lambda$  désigne la période de modulation d'indice et  $n_{eff}$  l'indice de réfraction effectif du mode fondamental.

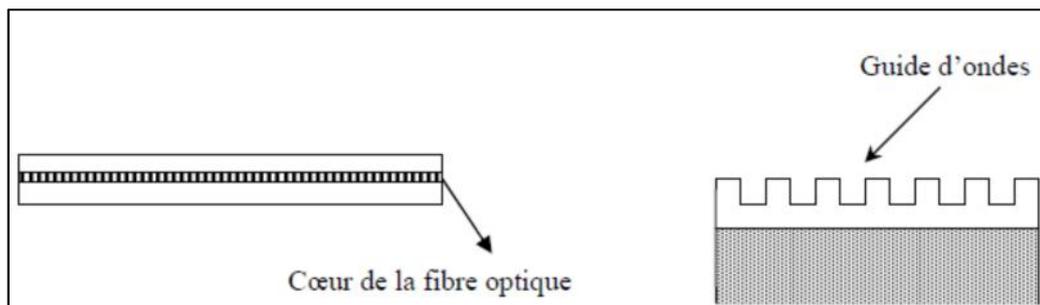


FIG 2.8 : réseau de Bragg uniforme

Donc on peut dire que le réseau réfléchit la lumière centrée autour d'une seule longueur d'onde.

Le réseau est parfaitement périodique le long de la structure, avec des points de départ et de fin bien définis. Souvent, soit par sa conception même soit à cause des techniques de fabrications utilisées, le réseau de Bragg dévie un peu de cette structure parfaite.

### 2.5.2 Réseau de Bragg « tilted » ou « blazed » :

Les réseaux « tilted » ont des pas inclinés d'un certain angle par rapport à l'axe de la fibre à titre d'exemple (figure 2.9) ce qui permet un couplage de la lumière à la fois à l'intérieur et à l'extérieur du cœur. [31]

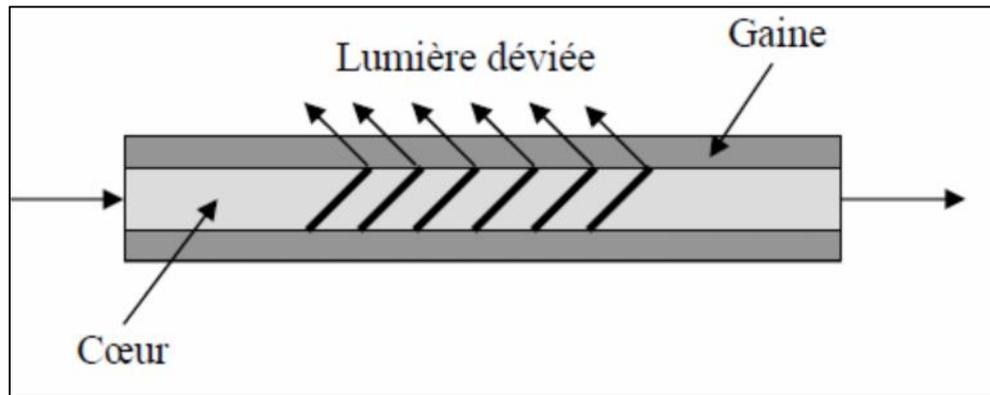


FIG 2.9 : réseau de Bragg « tilted »

### 2.5.3 Réseau de Bragg à pas variable ou « chirped » :

Souvent, soit par la conception même du réseau soit à cause des techniques de fabrication utilisées, le réseau de Bragg dévie un peu de cette structure parfaite.

Si le pas du réseau varie légèrement tout au long de la structure, on dit alors qu'il présente un écart ou « chirp ».

Dans les réseaux chirpés la période augmente progressivement d'un pas à l'autre (figure 2.10) ; les grandes longueurs d'onde sont réfléchies en début de réseau et les plus courtes en fin de réseau ; ainsi la dispersion peut être compensée et le signal d'origine rétabli. [31]

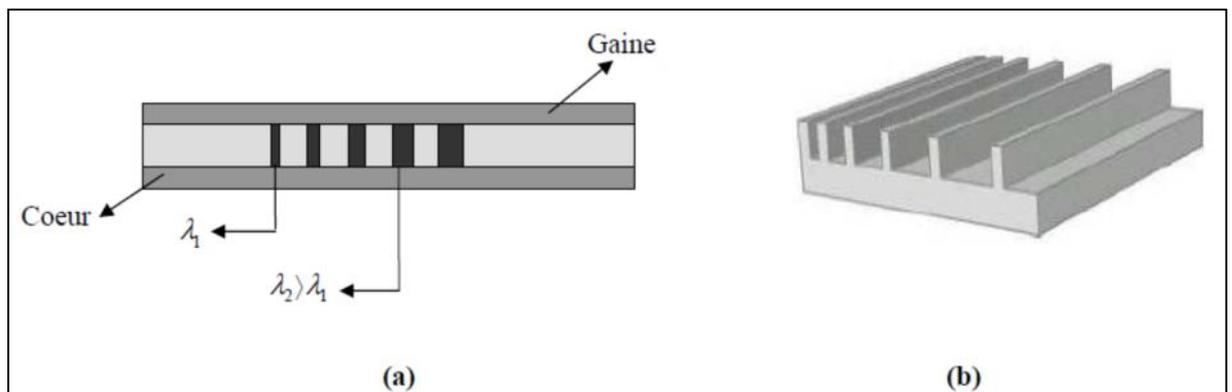


FIG 2.10 : réseau de Bragg « chirped » [31].

(a) intégré dans une fibre optique

(b) intégré dans un guide d'onde

### 2.5.4 Réseau de Bragg apodisé :

Dans ces réseaux l'amplitude du coefficient de couplage  $c$  varie le long de la structure.

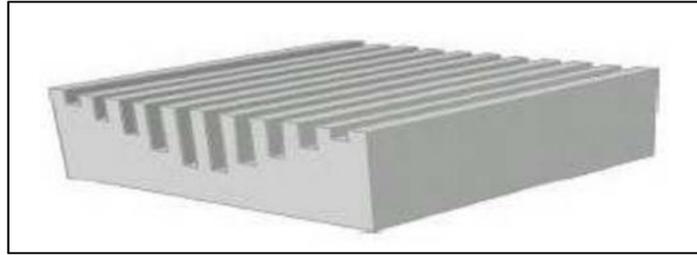


FIG 2.11 : Réseau apodisé intégré dans un guide d'onde

La figure (2.11) représente un réseau sur semi-conducteur présentant une apodisation, c'est à dire une variation de son coefficient de couplage le long de la structure. Cette variation est obtenue ici par une modification de la profondeur de gravure [31].

## 2.6 Application des réseaux de Bragg à la télécommunication :

Les réseaux de Bragg photoinscrits dans les fibres optiques sont devenus indispensables pour l'égalisation du gain des amplificateurs, la stabilisation en longueur d'onde des pompes ou des sources, et pour les Lasers à fibre. Leurs avantages majeurs sont de faibles pertes d'insertion, une très faible sensibilité à la polarisation et une conception extrêmement flexible. Ces avantages en font également des candidats très attractifs pour les applications de filtrage complexe ou de compensation de dispersion chromatique fine[32].

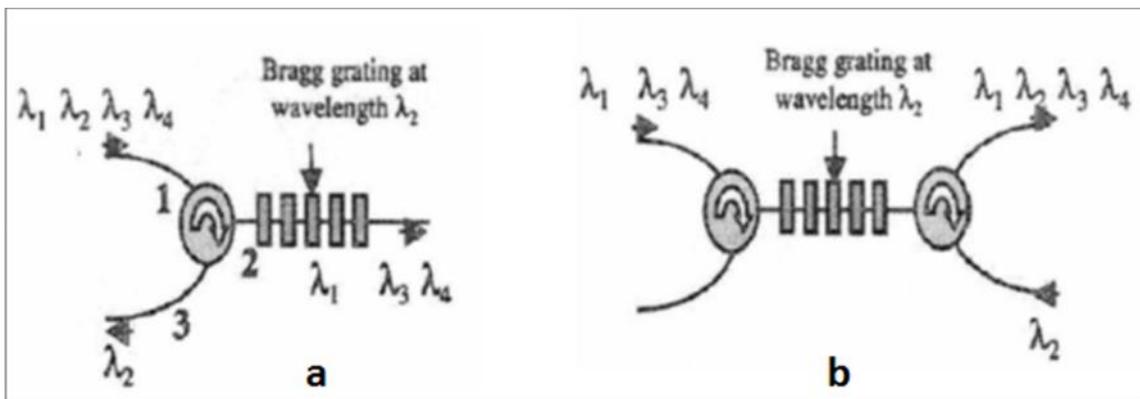


FIG 2.12 : (a) Filtre passe bande fabriqué par un réseau de Bragg associé avec un circulateur ; (b) un multiplexeur OADM fabriqué avec association d'un réseau de Bragg et deux circulateurs

### 2.6.1 Filtrage et multiplexage :

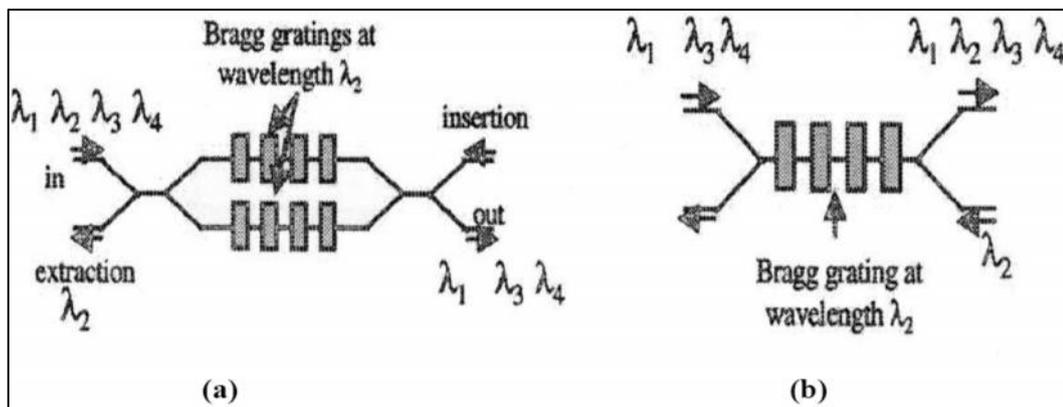
Agissant en tant que filtres sélectifs de longueur d'onde, les réseaux de Bragg uniformes de courtes périodes ont été visés la première fois vers des applications du filtrage et du multiplexage. Le coefficient de réflexion, est proportionnel à la transformée de Fourier du profil longitudinal de l'indice de réfraction. Le spectre du filtrage peut alors être

obtenu, en ajustant la période du réseau et la variation de l'indice de réfraction, pour des rejets élevés, des canaux adjacents, formes rectangulaires, multi crête ...etc.

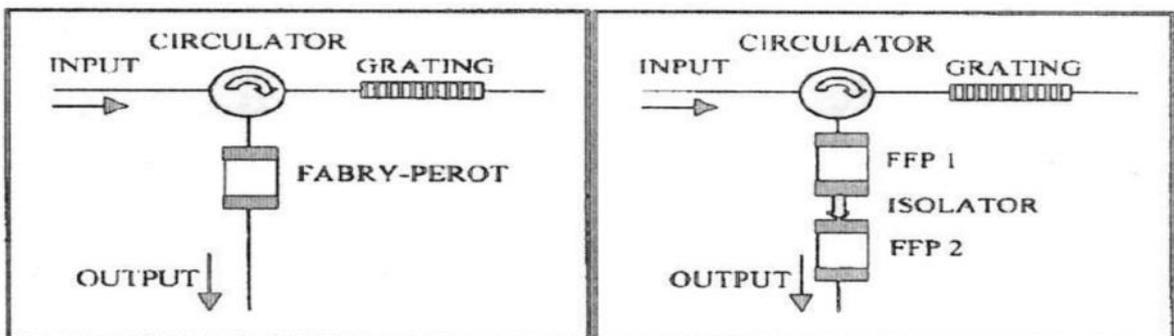
Aujourd'hui, les techniques avancées d'écriture des FBG permettent la réalisation de presque n'importe quelle forme spectrale désirée en contrôlant la réponse de la phase.

Les réseaux de Bragg sur fibres sont donc d'excellents candidats pour les futurs systèmes WDM complexes mais avec des filtres peu coûteux à adapter à cette conception. Un exemple de filtre déjà démontré contenant un espacement entre canaux de 25 ou de 12.5 GHz montrant simultanément des formes rectangulaires et une dispersion nulle [32].

Le réseau de Bragg de périodes courtes réfléchit la lumière près de la longueur d'onde de Bragg et demeure transparente pour les autres. Pour être utilisés dans un réseau, le réseau de Bragg doit s'associer à un autre composant avec plusieurs entrées et sorties pour extraire le signal utile.



**FIG 2.13 :** (a) multiplexeur OADM basé sur un interféromètre Mach-Zehnder : deux réseaux de Bragg identiques sont photo imprimés à la longueur  $\lambda_2$  sur les deux bras de l'interféromètre. (b) multiplexeur OADM basé sur un coupleur 0% : le réseau de Bragg est photo imprimé à la longueur  $\lambda_2$  dans la région du couplage, la fonction d'insertion de  $\lambda_2$  est représenté [32].



**FIG 2.14 :** Filtres optiques [32]

(À gauche) association d'un réseau de Bragg et d'un FFP et (à droite) association d'un réseau de Bragg et deux FFP

Généralement ce composant est un circulateur. Son principe est décrit sur la figure (2.14). Sur la même figure est montré un autre filtre en ajoutant un second circulateur (coupleur), la fonction d'insertion peut être inclus dans le composant. Le filtre est transformé en un (OADM) (optical. add and drop multiplexeur). Cependant les circulateurs sont coûteux, et c'est possible de les remplacer par des dispositifs à fibres comme un interféromètre Mach-Zhender où le même réseau de Bragg est imprimé sur ces deux bras ou bien coupleur 100% ou 0% où le réseau de Bragg est imprimé dans sa région de couplage [33].

### 2.6.2 Compensation de la dispersion chromatique [33] :

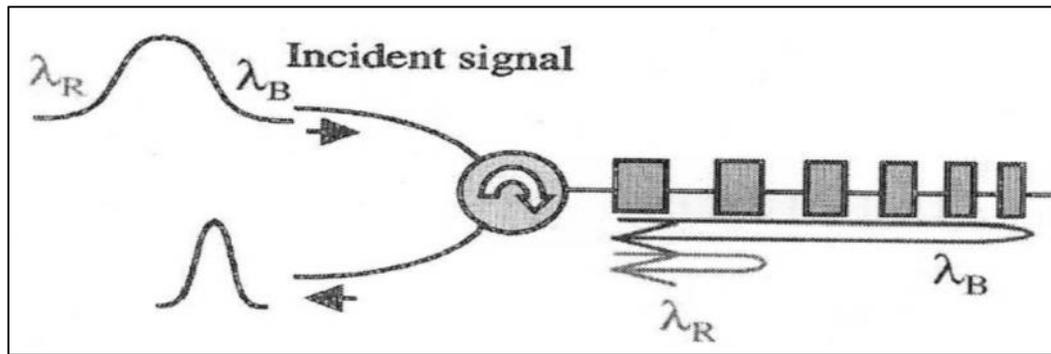
La dispersion chromatique lors de la transmission par fibre avec la dispersion de la polarisation des modes est un des principaux facteurs limitatifs de l'augmentation du débit de transmission. L'impulsion n'est pas vraiment monochromatique, dans les fibres dispersives, Les différentes fréquences du spectre d'impulsion se propagent à différentes vitesses, ce qui entraîne l'élargissement de l'impulsion. Les impulsions peuvent se recouvrir, ce qui détériore la transmission de l'information. Le problème s'aggrave quand le débit augmente. En effet, quand le débit augmente, les impulsions sont plus courtes et spectralement plus larges. On peut éliminer cette dispersion en utilisant des fibres à dispersion négatives, par contre de grande longueur de fibres sont exigées et ça devient encombrant et coûteux .et en plus les fibres compensatrices montrent plus d'atténuation lors de la transmission donc il faut ajouter des amplificateurs. En outre, ces fibres sont sensibles aux effets non linéaires.

Ces dernières années l'utilisation des réseaux chirpés pour remplacer les fibres compensatrices est devenue de plus en plus fréquente. Par exemple un réseau de Bragg est utilisé en réflexion en association avec un circulateur. Le principe est montré sur la figure (2.15).

Les grandes longueurs d'ondes sont immédiatement réfléchies tandis que le plus courtes se propage un peu plus. La solution est intéressante puisque on remarque des pertes minimales, peu encombrantes et l'insensibilité aux effets non linéaires.

La dispersion introduite peut être exprimé approximativement par :

$$DC = \frac{2n_{\text{eff}}L}{c\Delta\lambda} \cong \frac{10L(\text{mm})}{\Delta\lambda(\text{nm})} \text{ (ps/ nm)} \quad (2.18)$$



**FIG 2.15** : principe de la compensation de la dispersion chromatique en utilisant un réseau de Bragg chirpé en association avec un circulateur.

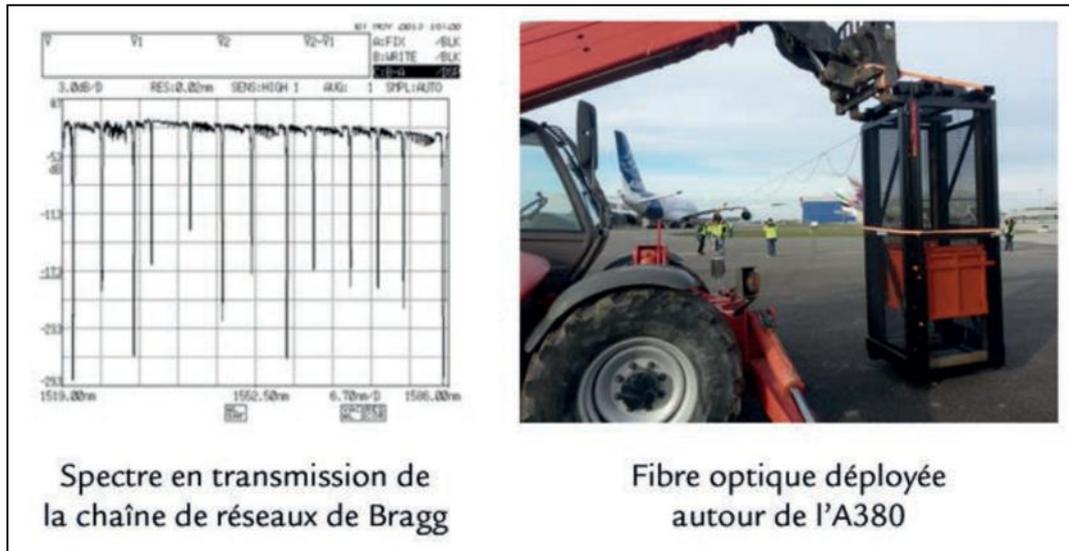
Où  $D\lambda$  et  $L$  représentent respectivement la variation de la longueur d'onde et longueur le long du réseau,  $c$  et  $n_{eff}$ , c'est la vitesse de la lumière et l'indice effectif du cœur qui sont remplacé respectivement par  $3.10^8$  m/s et 1,45.

La formule prouve que la compensation de la dispersion de 100km de fibre de transmission est possible pour un canal en utilisant un réseau de longueur inférieure à 100 millimètres [33].

## 2.7 Autres application de réseau de Bragg :

### 2.7.1 Les réseaux de Bragg dans l'aviation :

Les réseaux de Bragg sont couramment utilisés dans l'aviation. Leur utilisation se fait à la fois lors des qualifications de l'avion, mais aussi de manière définitive lors de l'exploitation de celui-ci. Les photographies en figure (2.16) représentent une mesure de température réalisée par Airbus A380. Trois fibres optiques de 125 m équipées chacune de 13 réseaux de Bragg ont été utilisées. Ces mesures ont permis de réaliser une cartographie thermique autour de l'avion et ainsi de déterminer son périmètre de sécurité sur les aéroports.



**FIG 2.16 :** Mesure de température autour d'un A380 [34].

### 2.7.2 Les réseaux de Bragg dans l'automobile :

Les réseaux de Bragg ainsi que les fibres optiques sont employés depuis quelques décennies dans les domaines cités précédemment. Néanmoins on ne peut pas qualifier ces applications de grand public. Dans le domaine de l'automobile, les réseaux de Bragg peuvent être utilisés pour la qualification des processus et des véhicules, mais pas encore intégrés dans les véhicules de tourisme. Des études en cours permettent néanmoins d'envisager une réduction importante des coûts par le développement d'interrogateurs bas coûts. La fibre utilisée dans les voitures sert aujourd'hui essentiellement pour l'éclairage d'habitacle (fibre plastique) ou encore pour les systèmes multimédia [34].

### 2.8 Conclusion :

Les réseaux de Bragg sont des composants présents dans les systèmes de télécommunication. Ils sont idéaux une fois utilisés en association avec des amplificateurs à fibre. En outre, leur grande flexibilité et leur conception les rend très intéressants pour des applications adaptées aux besoins de l'utilisateur, telles que l'égalisation du gain ou la compensation chromatique de dispersion. Leur efficacité spectrale élevée leur fait la solution presque unique pour l'espacement de canal très bas. Les réseaux de Bragg trouvent beaucoup d'applications dans les systèmes de communications optiques, notamment dans les systèmes multiplexés en longueurs d'onde (WDM) et dans les modules de compensation de la dispersion chromatique. On

va voir dans le chapitre suivant que le réseau de Bragg remplit bien ce rôle de compensation de la dispersion chromatique.

**Chapitre03 :**

**Etude des propriétés  
spectrales des réseaux de  
Bragg pour la compensation  
de la dispersion  
chromatique.**

## **Chapitre 3 : Etude des propriétés spectrales des réseaux de Bragg pour la compensation de la dispersion chromatique**

### **3.1 Introduction :**

Depuis leur lancement sur le marché, les fibres optiques à réseaux de Bragg et leur utilisation dans des produits commerciaux ont connu une croissance exponentielle, en particulier dans le domaine des télécommunications et celui des capteurs. La recherche s'est poursuivie à un rythme accéléré. A ce jour, les qualités métrologiques et la tenue aux environnements sévères des fibres optiques à réseaux de Bragg ont été démontrées dans divers domaines et pour de nombreuses grandeurs d'intérêt (déformations, déplacements, température, pression, force, inclinaison, effets des impacts, indice de réfraction, etc.)[42]. La technologie des réseaux de Bragg à base de fibre optique est utilisée aussi pour compenser la dispersion chromatique dans la fibre optique comme nous allons le voir par la suite.

Dans le but d'introduire de façon concise et pédagogique toutes les propriétés spectrales des différents réseaux de Bragg (uniforme, apodisé, à pas variable et à saut de phase) plusieurs codes de calcul, basés sur Matlab, ont été développés.

### **3.2 Les propriétés spectrales d'un réseau de Bragg :**

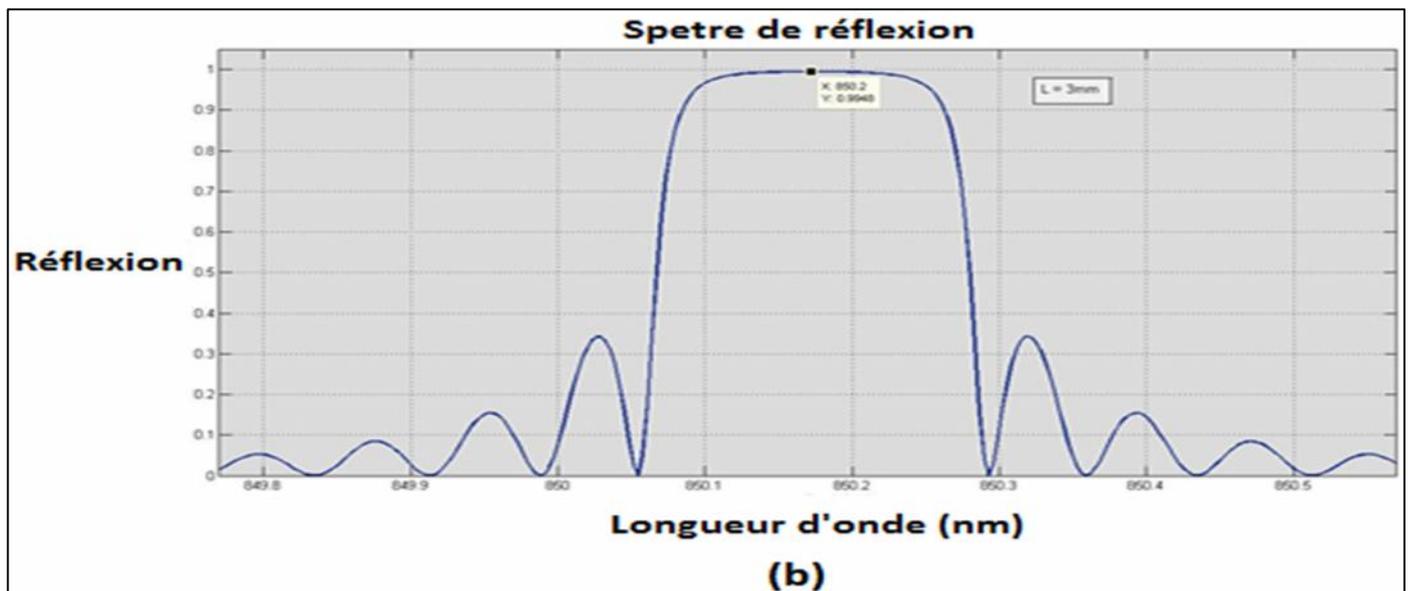
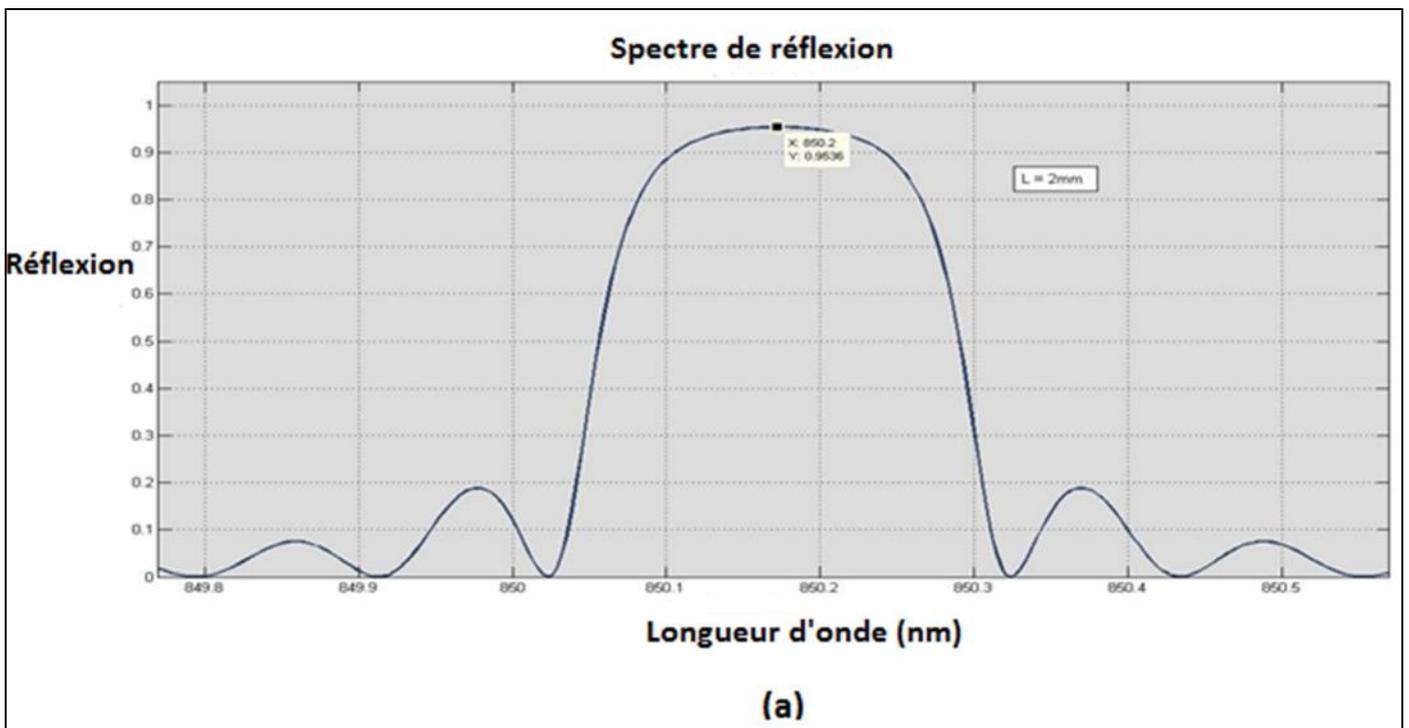
Lors de la conception des réseaux de Bragg à fibre en vue de leur application dans le domaine des télécommunications, il est très important de disposer d'outils de modélisation des réseaux, afin d'optimiser leur analyse et caractérisation. La théorie du couplage des modes dans les guides d'onde, exposée par A. Yariv en 1973 [35], est un outil qui permet d'estimer la dépendance spectrale des réseaux de Bragg de façon direct et conforme avec leur structure réelle. La plupart des réseaux peuvent être modélisés en faisant appel à l'une des solutions des équations de modes couplés (équations 3.9)[42], les plus communément utilisées étant l'intégration directe des équations et la méthode des matrices de transfert [33].

L'outil de modélisation donne la réponse spectrale complexe du réseau, à partir de laquelle peuvent être déduites la réflexion, la transmission. Les exemples les plus usuels des réseaux de Bragg, classifiés à partir de la variation de l'indice de réfraction ont été modélisés à l'aide de la méthode des matrices de transfert.

### 3.2.1 Le réseau uniforme :

Un réseau uniforme est un réseau dont les caractéristiques, période et amplitude de la modulation d'indice photo-induite dans le cœur de la fibre, sont uniformes sur toute la longueur  $L$  (figure 2.8).

Les figures (3.1 et 3.2 (a), (b), (c)) Montre la réflexion pour un réseau uniforme de plusieurs longueur  $L= 5, 10$  et  $20$  mm, un pas  $\Lambda = 535.59$  nm, et une amplitude de la modulation de l'indice  $n=2.10^{-4}$ ,  $\bar{n}=1.470$ .



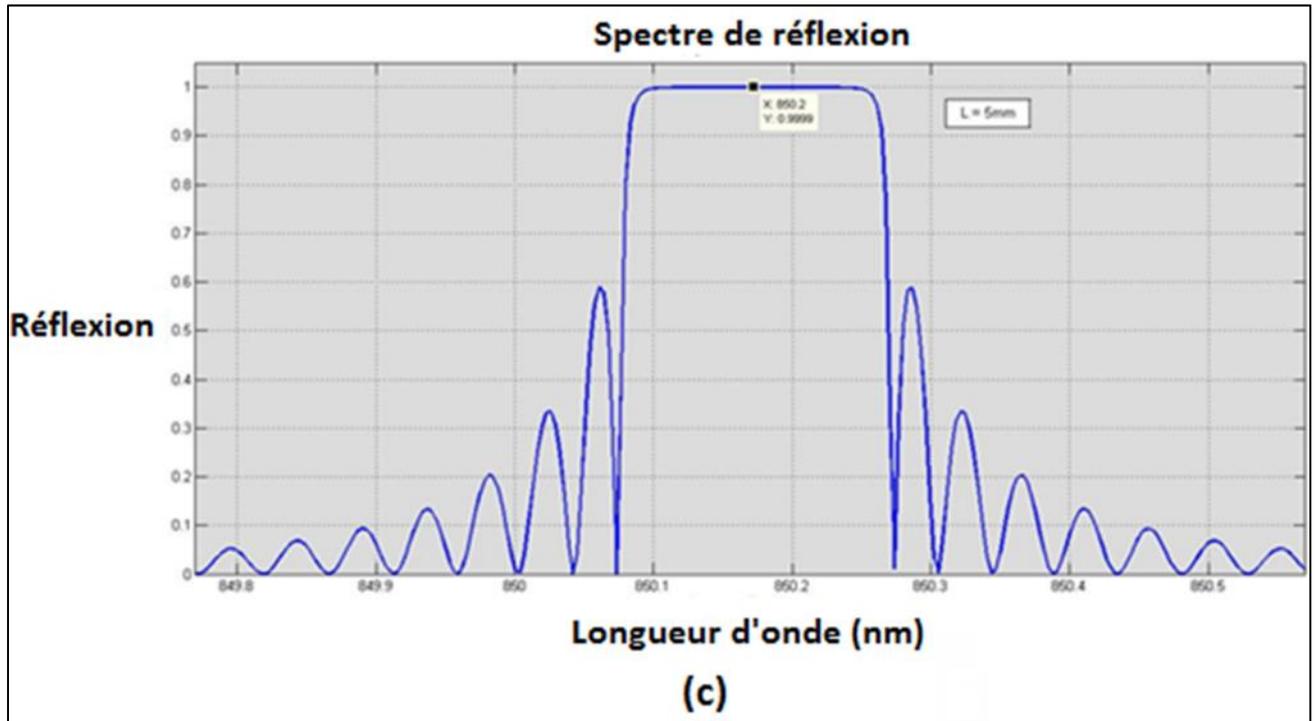
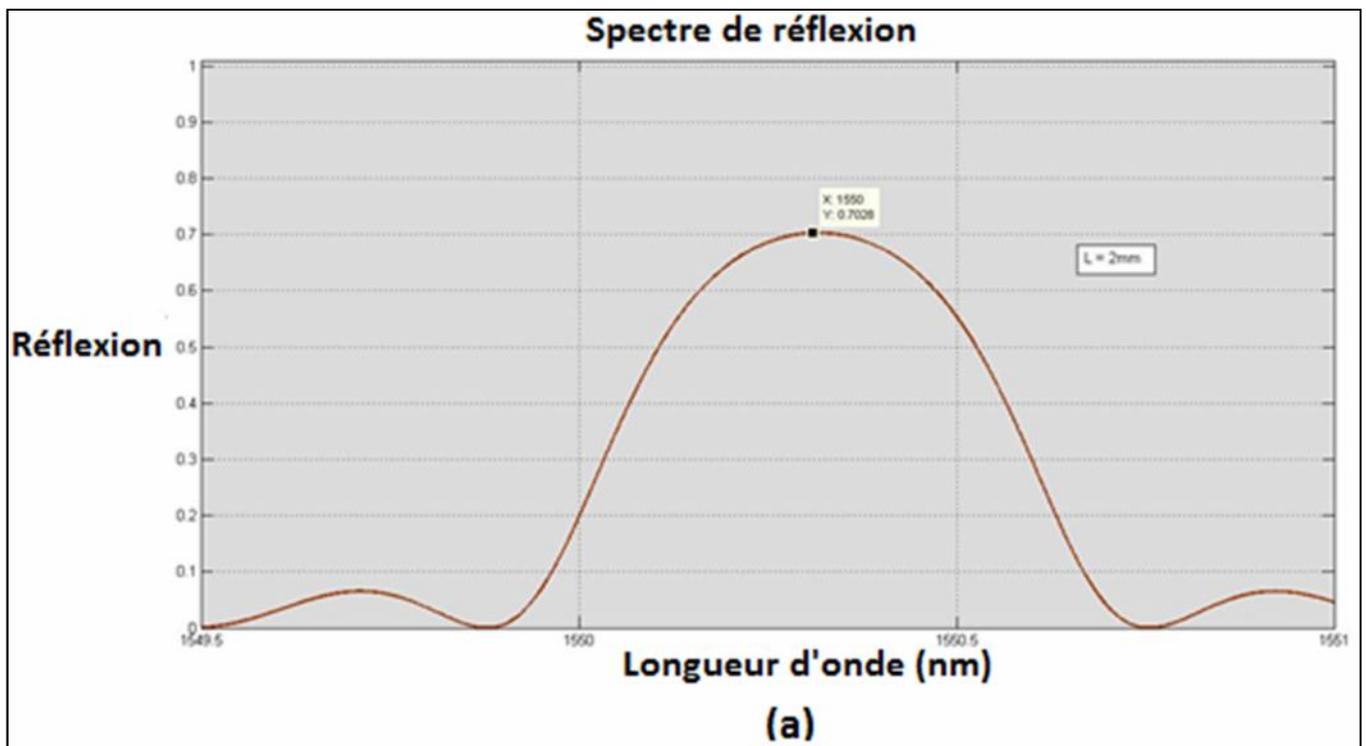


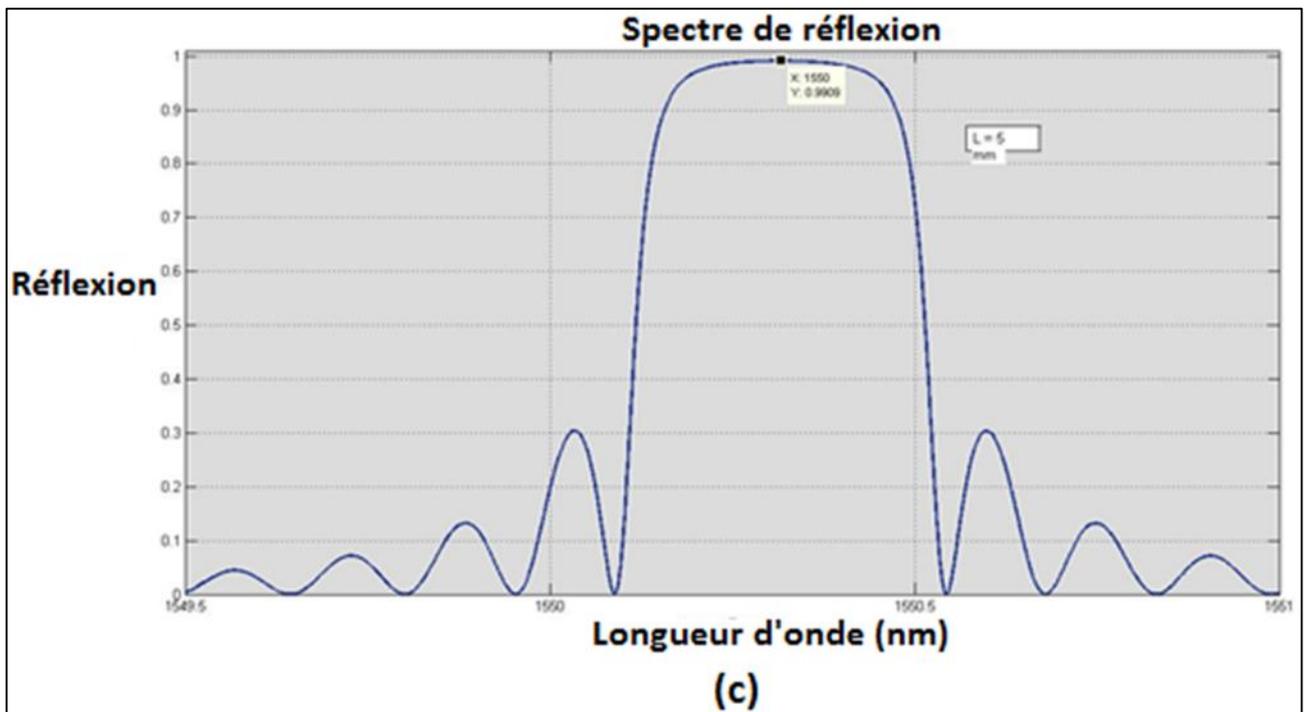
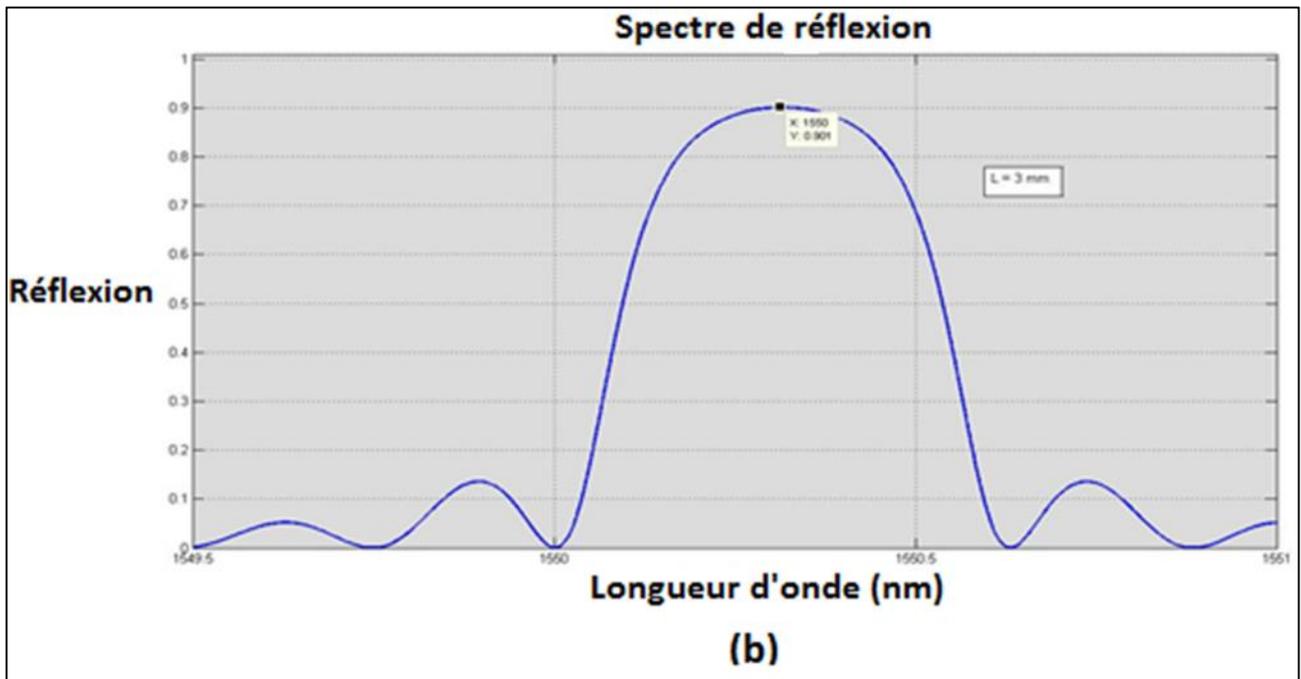
FIG 3.1 : Spectre de réflexion d'un réseau de Bragg uniforme pour  $\lambda_\beta = 850$  nm :

(a):  $L = 2$  mm

(b):  $L = 3$  mm

(c):  $L = 5$  mm





**FIG 3.2 :** Spectre de réflexion d'un réseau de Bragg uniforme pour  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  :

(a):  $L = 2 \text{ mm}$

(b):  $L = 3 \text{ mm}$

(c):  $L = 5 \text{ mm}$

La figure (3.1 et 3.2) montre les spectres de réflexion d'un réseau de Bragg uniforme de différentes longueurs, simulé numériquement pour  $\lambda_B = 850$  et  $1550$  nm avec différentes paramètres physiques du FBG. Ces spectres ont été choisis parmi beaucoup d'autres. Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit : Le maximum de réflectivité est centrée sur la longueur d'onde de Bragg  $\lambda_B$ , sa position spectrale et le taux de réflectivité peuvent être prescrits en avance, comme le montre les spectres de la figure (3.2). La variation de ce maximum de réflectivité présente un aspect de saturation qui augmente avec la longueur du réseau  $L$ . En outre, on note que ces spectres présentent des bandes latérales (side lobes), qui sont dues à des réflexions multiples sur les deux extrémités du FBG jouant le rôle d'une cavité résonante de type Fabry-Pérot [43]. Celles-ci sont considérées comme des pertes d'énergie. En termes pratiques, elles sont nuisibles parce qu'elles contribuent à la dégradation de la qualité de filtrage, par exemple. Nous devrions les éliminer ou les atténuer au moins en utilisant des profils d'apodisation au cours du processus de photo inscription du FBG, comme le montre la figure (2.11).

#### ➤ Calcul du délai de groupe et de la dispersion

Ce qui nous intéresse de plus dans cette étude de réseau de Bragg est non seulement la représentation du spectre de réflexion, mais aussi le délai de groupe et la dispersion que peut fournir ce réseau. L'objectif de notre étude est d'arriver à avoir une dispersion décroissante négative, pour justement compenser la dispersion de la vitesse de groupe que fournit la fibre de transmission.

Le délai de groupe et la dispersion d'un réseau sont obtenus à partir de la phase du coefficient de réflexion. Le délai de groupe  $\tau_p$  pour la lumière réfléchiée dans un réseau est définie par :

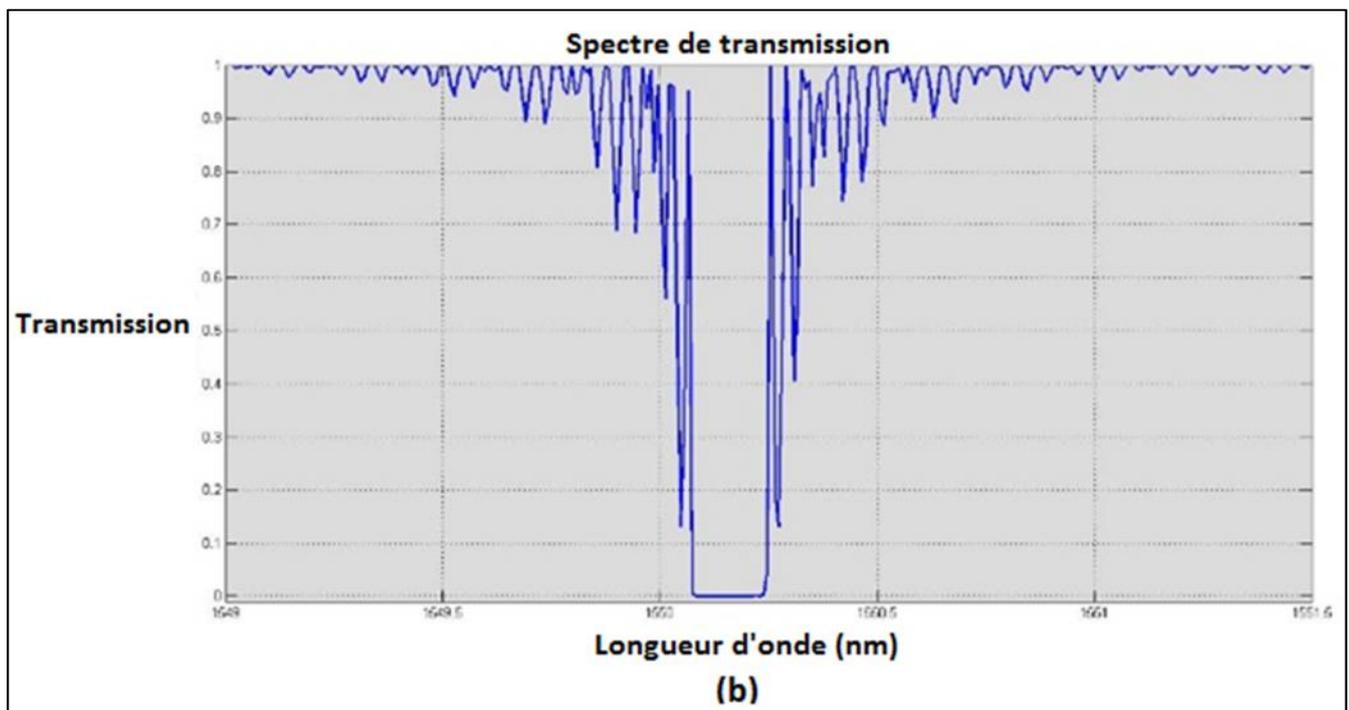
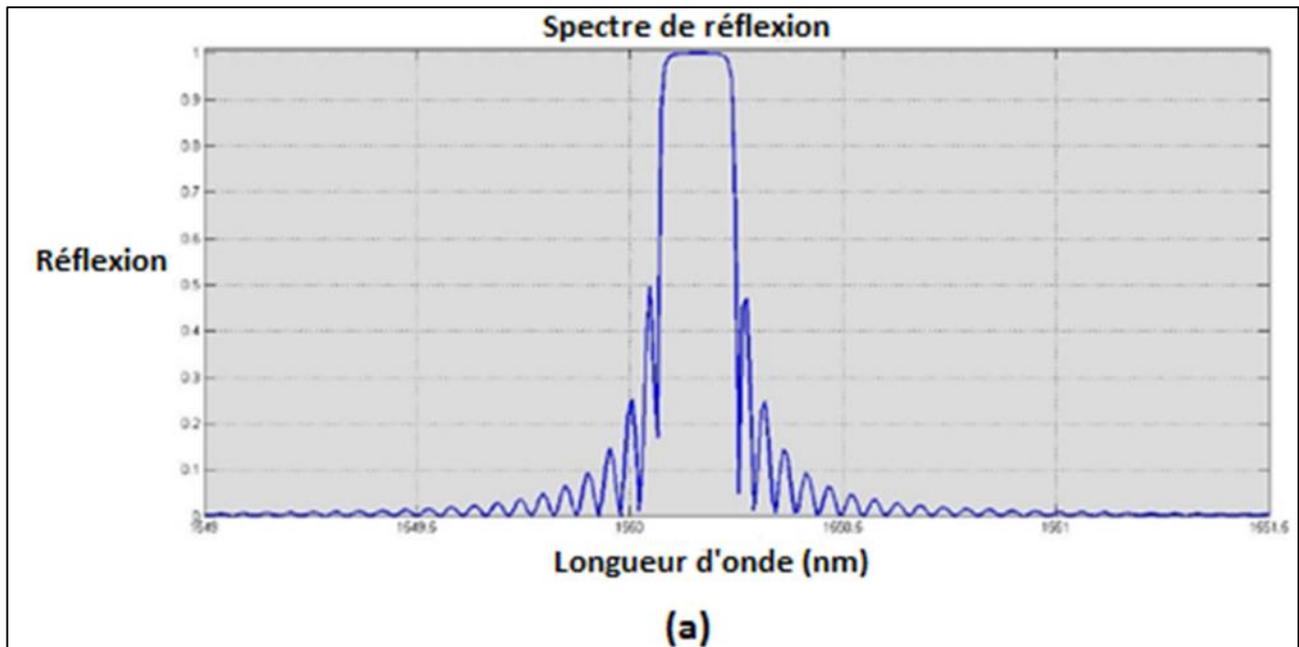
$$\tau_p = \frac{d\theta_p}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\theta_p}{d\lambda} \quad (3.1)$$

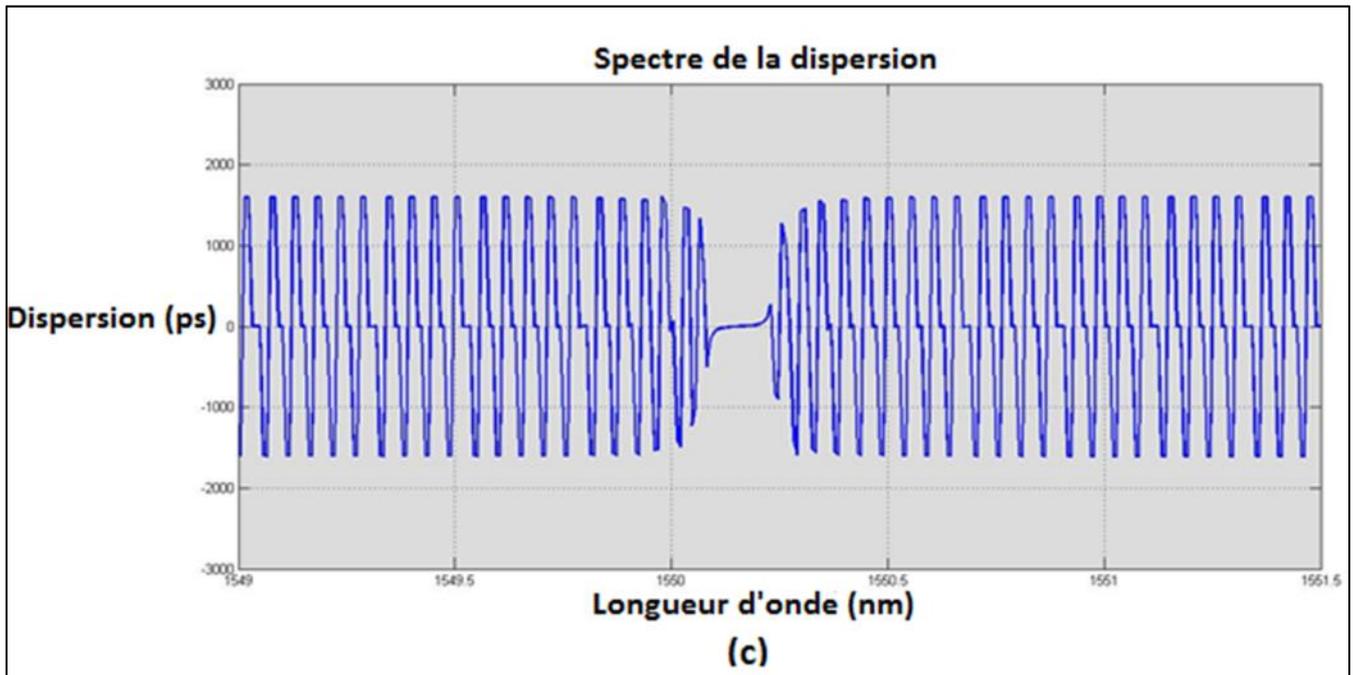
$$\frac{d\theta_p}{d\lambda} = -\tau_p \frac{2\pi c}{\lambda^2} \quad (3.2)$$

La dispersion  $d_p$  (en ps/nm) est définie par [54] :

$$d_p = \frac{d\tau_p}{d\lambda} = \frac{2\tau_p}{\lambda} - \frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d^2\theta_p}{d\lambda^2} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\theta_p}{d\omega^2} \quad (3.3)$$

$$\frac{d^2\theta_p}{d\lambda^2} = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \left( \frac{2\tau_p}{\lambda} - d_p \right) \quad (3.4)$$





**FIG 3.3 :** spectre de Réflexion (a), transmission (b) et dispersion (c) d'un réseau de Bragg uniforme ( $L=1.5\text{mm}$ , un pas =  $535.59\text{ nm}$ , et une amplitude de la modulation de l'indice  $n=1.5 \cdot 10^{-4}$ ,  $\bar{n}=1.470$ ,  $\lambda_B = 1550\text{ nm}$ )

La forme antisymétrique du spectre de dispersion a deux branches de signe négatif et positif, qui représentent respectivement le régime de dispersion normale et anormale, en passant par une valeur nulle centrée sur la longueur d'onde de Bragg  $\lambda_B$ . Cependant, la dispersion devient importante sur les bords de la bande photonique, et les lobes latéraux présentent une variation périodique très rapide pour tendre vers la valeur zéro. La valeur très élevée de la dispersion chromatique sur les bords de la bande photonique explique clairement l'origine physique de l'apparition de solitons de Bragg "Gap Solitons", qui se forment à l'intérieur de la bande photonique interdite et peuvent se propager à l'intérieur du réseau à une vitesse allant de zéro jusqu'à la vitesse de la lumière [43].

En termes d'applications industrielles, les réseaux de Bragg uniformes peuvent être essentiellement utilisés comme filtres en mode de réflexion avec les caractéristiques spectrales suivantes : bande étroite inférieure à  $0,1\text{ nm}$  ou à large bande supérieure à  $10\text{ nm}$ . Le taux de réflexion peut être choisi volontairement, sachant qu'il peut varier dans une large plage de  $1\%$  à  $9.99\%$ . Par conséquent, ces filtres peuvent être combinés avec d'autres composants optiques pour former des dispositifs optiques complexes utilisés dans le domaine des télécommunications comme multiplexeur Add-Drop, filtres sélectifs pour stabiliser le fonctionnement des diodes laser (faisceaux de fréquences uniques), et ainsi de suite.

Cependant, les FBG uniformes ne peuvent pas être utilisés pour la compensation de la dispersion chromatique.

### 3.2.2 Réseau apodisé :

Les FBGs non-uniformes sont obtenues en modifiant l'un de leurs paramètres physiques à l'aide de certains profils de faisceaux lasers au cours de leur fabrication. Par conséquent, on obtient différents types de FBGs modifiés avec des propriétés spectrales dédiées.

Les lobes secondaires du spectre de réflexion d'un réseau de Bragg sont extrêmement gênants lorsque les réseaux de Bragg sont utilisés dans des systèmes de transmission comportant différents canaux, car ils limitent la séparation spectrale du fait qu'ils peuvent exister des interactions non désirées entre les lobes des signaux voisins. Une solution pour réduire ces lobes sans pourtant changer les performances spectrales du réseau est l'apodisation. Celle-ci consiste à changer l'amplitude de la modulation de l'indice de réfraction de telle sorte que les lobes secondaires sont supprimés du spectre par variation progressive du coefficient de couplage avec la longueur (figure 2.11).

Pour réaliser l'apodisation, il faut choisir une fonction d'apodisation. On note qu'il existe plusieurs fonctions, et chacune désigne un profil (gaussien, cosinus, sinus cardinal, ...etc.)

Parmi les différentes fonctions d'apodisation on trouve la gaussienne de  $n_{mod}$  avec et sans compensation de la composante continue  $n_{mod}$  sont les plus performantes. La distinction entre les deux est parfaitement mise en évidence lorsqu'elles sont appliquées à des réseaux de Bragg à pas variable.

La figure (3.4) montre le cas d'un réseau de Bragg apodisé, qui a été modélisé en utilisant une fonction gaussienne de  $\Delta n_{mod}$  de la forme :

$$\Delta n(z) = \Delta n_0 \exp\left(-\left(\frac{z}{L/4}\right)^2\right), \quad -\frac{L}{2} < z < \frac{L}{2} \quad (3.5)$$

Où  $n_0$  est l'amplitude maximale de la modulation de l'indice de réfraction.

Les valeurs utilisées pour la modulation sont  $n=0.00015$ ,  $L=15$  mm,  $\lambda=535.59$  nm, Les spectres de réflexion et de dispersion sont présentés sur les figures (3.4 et 3.5) respectivement.

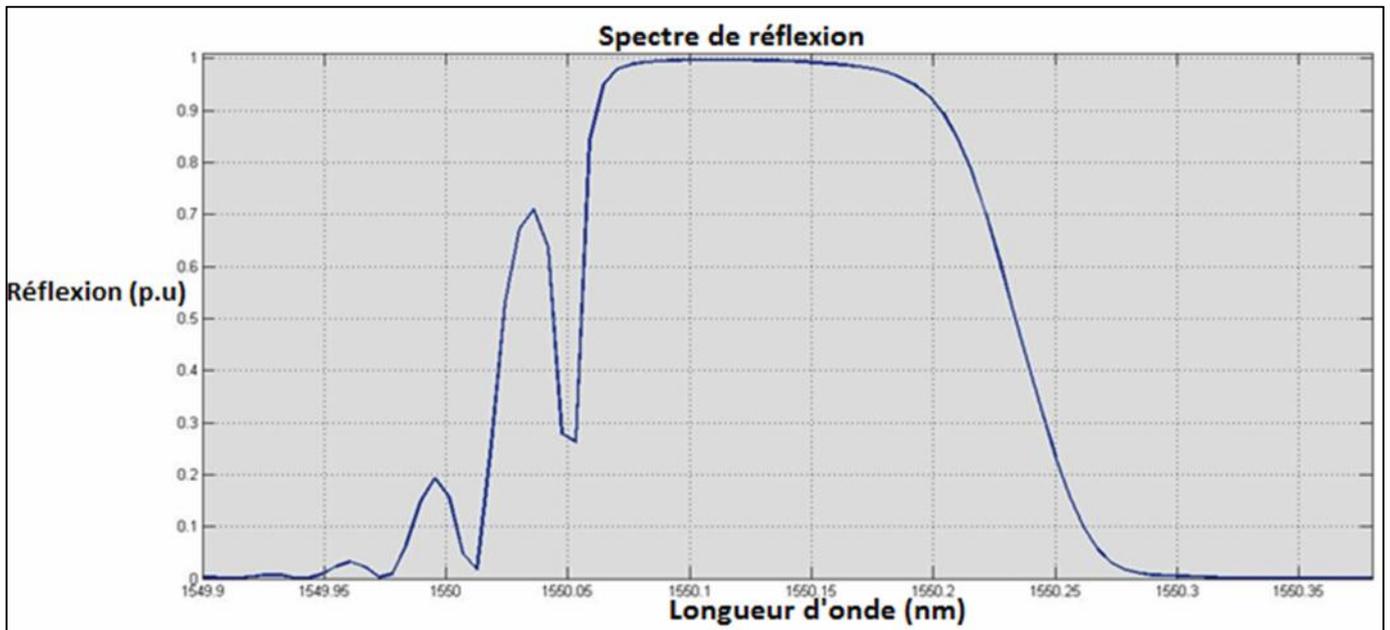


FIG 3.4 : spectre de réflexion d'un réseau de Bragg apodisé par une fonction Gaussienne

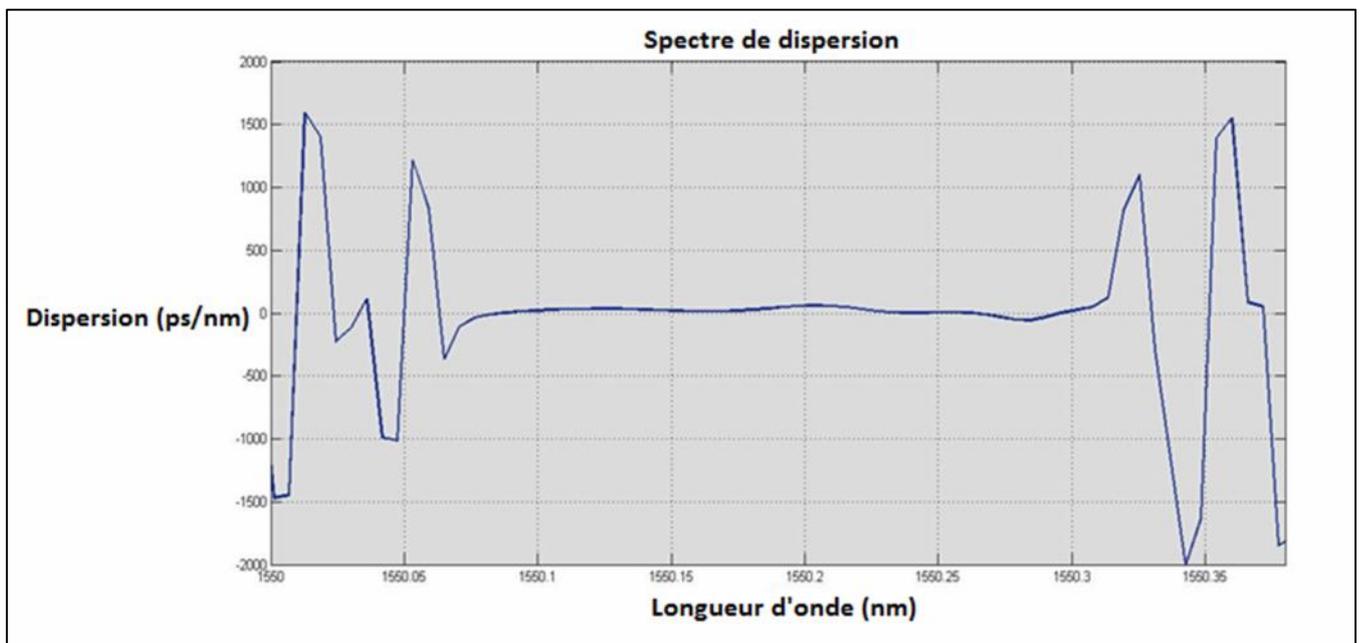


FIG 3.5 : spectre de Dispersion d'un réseau de Bragg apodisé par une fonction Gaussienne

En effet, les lobes secondaires correspondants aux longueurs d'onde plus élevées sont quasiment réduits. En revanche, une dissemblance apparaît pour les longueurs d'onde plus courte. Cette différence est occasionnée par la non uniformité de la forme gaussienne de la

composante continue de la variation de l'indice, i.e.  $n_{moy}$ , du fait que seul  $n_{mod}$  a été apodisé. De ce fait un effet Fabry-Pérot s'est produit pour les courtes longueurs d'onde.

L'allure de la dispersion obtenue dans le cas d'un réseau apodisé présente des fluctuations ; la dispersion est tantôt positive, tantôt négative. On remarque aussi l'apparition des lobes secondaires dans le spectre de réflectivité d'un réseau apodisé par une fonction gaussienne. On peut dire que ce type de réseau ne permet pas de faire une bonne compensation de la dispersion, parce que l'allure de la dispersion n'est pas linéaire et décroissante.

### 3.2.3 Le réseau chirpé (à pas variable) :

Dans le cas des réseaux linéairement chirpés, la période varie de façon linéaire avec la position, comme le montre la figure (2.10). Cela rend le réseau apte à réfléchir différentes longueurs d'ondes à différents points le long de sa longueur. Par conséquent, l'introduction de différents temps de retard pour les différentes composantes spectrales de l'impulsion qui le traverse. Ce qui permet de l'utiliser comme élément dispersif pour la correction de la dispersion chromatique et la remise en forme des impulsions laser distordues.

Dans le cas d'un réseau linéairement chirpé, la période varie de façon linéaire avec la position, D'après la condition de résonance, Le réseau va réfléchir différentes longueurs d'ondes en différents points le long de sa longueur. Ce qui implique que les différentes composantes spectrales constituant l'impulsion laser vont acquérir un temps de retard les unes par rapport aux autres, comme le montre les spectres de réflexions et de dispersion de la

figure 3.6 et 3.7, obtenus pour  $n=0.0002$ ,  $L=35$  mm,  $\lambda=535.59$  nm

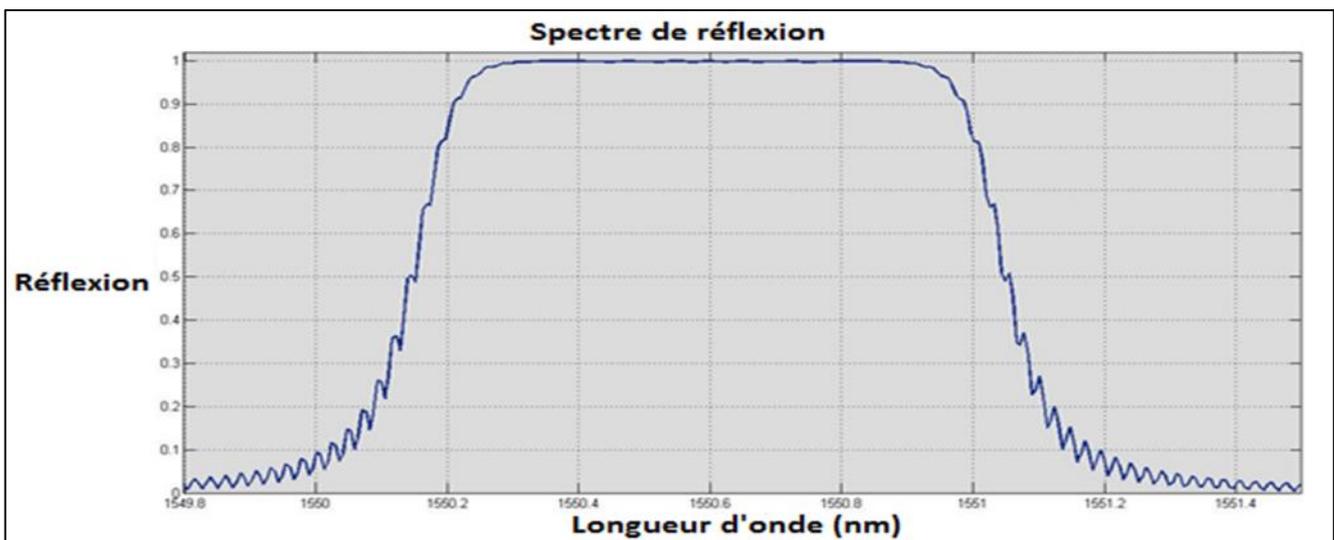


FIG 3.6 : spectre de réflexion d'un réseau de Bragg chirpé.

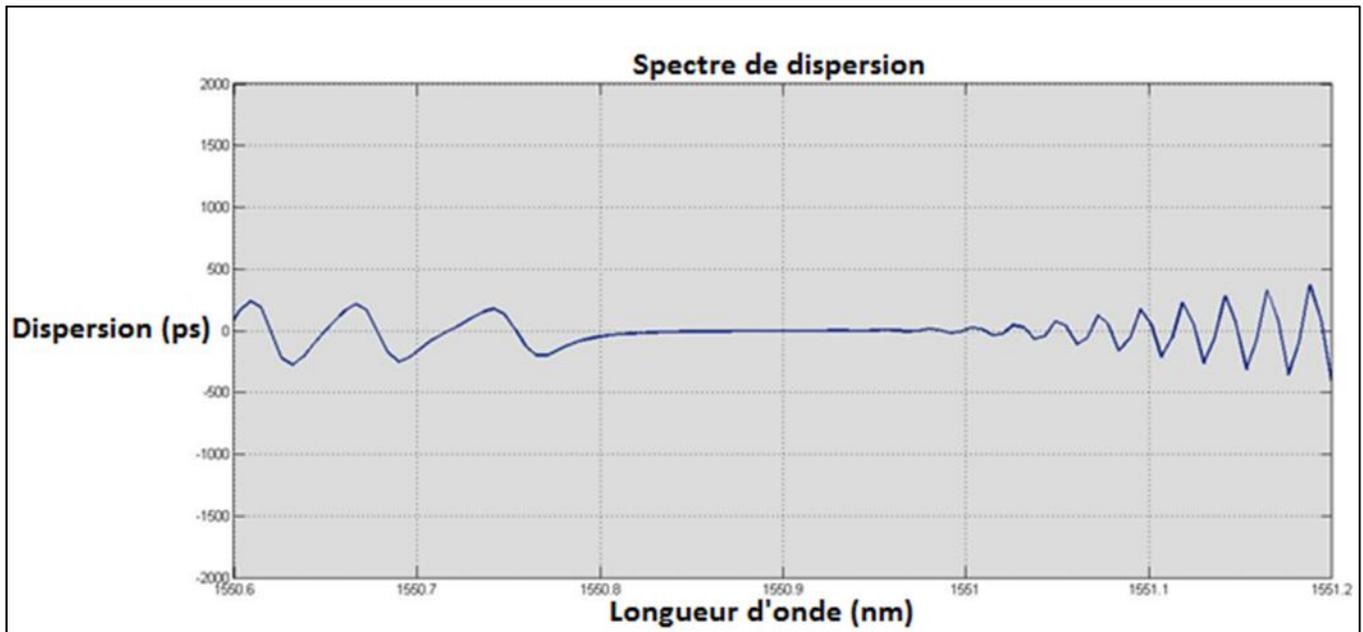


FIG 3.7 : spectre de réflexion d'un réseau de Bragg chirpé.

D'après ces spectres, on note la dispersion des réflexions latérales (side lobes) et l'élargissement spectrales de la bande interdite, on remarque aussi que le maximum de réflectivité augmente avec la longueur du réseau. La figure (3.7) montre que la courbe de la dispersion devient linéaire et décroissante par rapport au réseaux uniforme et réseau apodisé. Cette amélioration est en fonction des paramètres caractéristiques du réseau chirpé, où les petites longueurs d'ondes subissent plus de retard que les grandes longueurs d'ondes.

Donc, les réseaux de Bragg à pas variable sont des éléments dispersifs très intéressants, Cependant, il faut choisir les paramètres convenables pour optimiser la compensation de la dispersion chromatique

Le schéma de la figure (3.8) illustre le principe de fonctionnement d'un compensateur de dispersion chromatique, composé simplement d'un circulateur optique et d'un réseau de Bragg à pas linéairement variable.

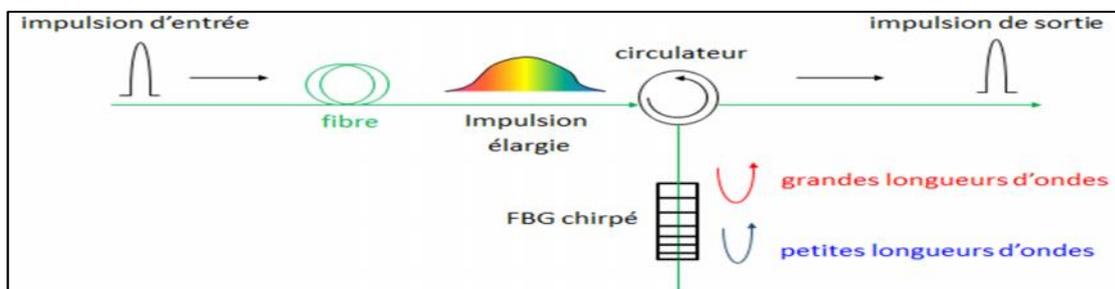


FIG 3.8 : Principe de fonctionnement d'un réseau de Bragg à pas variable dans une ligne de transmission optique.

L'impulsion laser injectée à l'entrée de la fibre optique avec certaines propriétés spectrales données s'étale après avoir parcourue une certaine distance supérieure à la longueur de dispersion LD. On remarque le retard des composantes de faibles fréquences (grandes longueurs d'ondes) par rapport aux petites longueurs d'ondes, car le régime de propagation choisi dans cet exemple est anormal. Cependant, l'injection de l'impulsion étalée au travers un réseau de Bragg avec un chirp négatif, via un circulateur optique, va être remise en forme. Car, le rôle du FBG est de retarder les composantes spectrales rapides (petites longueurs d'ondes) par rapport aux composantes basses fréquences (grandes longueurs d'ondes). Par optimisation des propriétés spectrales du réseau de Bragg, on obtient à la sortie du circulateur une impulsion laser avec les mêmes caractéristiques spectrales que celle à l'entrée.

### **3.3 Conclusion :**

Le réseau de Bragg est une technique de compensation très intéressante à cause des nombreux avantages qu'il présente. Une variation périodique et linéaire de son indice de cœur a permis d'avoir des caractéristiques spectrales très particulières ; un spectre de réflexion sélectif centré sur la longueur d'onde d'utilisation, un délai de groupe permettant d'avoir une dispersion négative. Ensuite, la simulation des résultats de notre programme sert à corriger les fluctuations présentes sur la réponse spectrale, le délai et la dispersion, dans le but d'avoir une compression meilleure des impulsions dispersées. Une apodisation gaussienne est faite ensuite. Les résultats obtenus sont encourageants et ils sont validés, en le comparant avec ceux trouvés par d'autres chercheurs.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale :

La caractérisation des composants à fibre optique est une étape importante pour la conception des systèmes de communication optiques comme les réseaux FTTx. La méthode de simulation numérique est un outil très rapide, efficace et économique pour analyser ces systèmes de transmission.

Les réseaux de Bragg ont un rôle très important dans le domaine des télécommunications optiques. La théorie des modes couplés est un concept simple et exact pour analyser la fibre de Bragg. Dans notre travail, le réseau de Bragg a été modélisé dans le but de faire une application pour la compensation de la dispersion chromatique. Le réseau de Bragg uniforme, à pas variable (chirpé) et le réseau apodisé ont été simulés.

En effet, l'impact de divers profils non-uniforme des réseaux de Bragg utilisés dans la compensation de la dispersion et la pente de dispersion dans les liaisons optiques, a été mis en évidence. Le calcul est effectué à l'aide d'un code Matlab basé sur la résolution de l'équation de modes couplés en utilisant la méthode de la matrice de transfert. Notre étude montre que le FBG chirpé fournit le meilleur résultat par comparaison autres profils étudiés.

### **Perspectives:**

L'apodisation des réseaux de Bragg compensateurs permet d'avoir un minimum de fluctuations dans le délai de groupe et la dispersion, mais l'augmentation de la distance d'un lien optique permet d'avoir une large bande passante, ce qui va régénérer des rides (ondulations) sur la réponse spectrale. Cependant, il faut mettre en œuvre des méthodes d'optimisation pour réduire la déviation de la dispersion obtenue par rapport au niveau voulu.

Le réseau de Bragg présenté dans ce manuscrit permet de faire une compensation fixe de la dispersion, or il existe des dispositifs accordables qui permettent d'ajuster précisément la compensation et d'adapter la correction suivant les variations environnementales ou les reconfigurations du système. Parmi les solutions développées commercialement ; l'accordabilité par effet thermique.

Le réseau de Bragg à pas variable est un exemple de réseaux non uniformes, on note qu'il existe d'autres types de réseaux, comme le réseau de Bragg déphaseur qui a la caractéristique

de bande passante étroite. Ce réseau déphaseur est utilisé pour obtenir une opération monomode d'un laser à contre réaction distribuée (DFB).

Le réseau de Bragg échantillonné est un réseau non uniforme dont on a exposé des intervalles de la fibre de même longueur aux rayons ultraviolets. On note que ces intervalles sont espacés par la même distance, et cette dernière n'est pas exposée à ces rayons. Le réseau échantillonné se retrouve dans des applications comme le multiplexage en longueur d'onde (WDM).

Les réseaux de Bragg à longue période (LPFG), connus sous le nom de réseaux de transmission, sont des structures périodiques, dont le couplage se procure entre les modes se propageant dans la même direction. Ces réseaux sont utilisés pour la détection à cause de la haute sensibilité qui les caractérise.

### Bibliographie :

- [1] F. Roy, F. Leplingard, L. Lorcy, A. Le Sauzez, P. Baniel, et D. Bayart. "48% power conversion efficiency in single pump gainshifted thulium-doped fibre amplifier,". *ELECTRONICS LETTERS*, vol. 37, no 15, JUL 2001.
- [2] PIERRON 2011, 'La refraction - la réflexion totale', Physique – Chimie, Programme : BO spécial n° 4 du 29 avril 2010.
- [3] A-E. Willner, S-R. Nuccio, B-G. Potter, "Photonic Communications Engineering: Module 3 - Attenuation in Optical Fibers", 8 September 2010.
- [4] A. Ghatak, K. Thyagarajan, "Optical Waveguides and Fibers", Department of Physics Indian Institute of Technology New Delhi, India, 2000 University of Connecticut, pp 255.
- [5] H. Brahim, « Etude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences Modélisation, caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence », thèse de doctorat-Université de Paul Sébastien de Toulouse- Octobre 2010.
- [6] M.Cardo-saban Réfraction et Indice de réfraction, disponible sur site : <http://www.dicoptic.izispot.com/>, Le, pp 1-3, 03 Juillet 2008.
- [7] G. Pinson. Physique appliquée : Liaison par fibre optique, Emetteurs et récepteurs de lumière, Photocoupleur. Optoélectronique - B33/1, xxxx.
- [8] BENDRIHEM ABDELAZIZ «Etude des phénomènes lies a la propagation dans les fibres optiques»2010.
- [9] "Characteristics of a single-mode optical fiber cable", *ITU-T Recommendations G.652*,October 2000.
- [10] FRANCOIS P.L., BAYON J.F et ALARD F., "Design of quadruple-clad fibers",*Electronics Letters*, 1984, Vol. 20, pp. 688-689.
- [11] HEIDEMANN R., WEDDING B. et VEITH G., "10-GB/s transmission and beyond", *Proceedings of the IEEE* , November 1993, Vol. 81, n°11.
- [12] BRUYERE Frank, "Impact of First -and Second- Order PMD in Optical Digital Transmission Systems", *Optical Fiber Technology*, 1996, Vol.2, pp. 269-280.
- [13] FOSCHINI G.F. end POOLE C.D., "Statistical Theory of Polarization Dispersion in Single Mode Fibers", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, November 1991, Vol. 9, n°11, pp. 1439-1456.
- [14] GISIN N., PASSY R., BISHOFF J.C. and PERNY B., "Experimental Investigations of the Statistical Properties of Polarization Mode Dispersion in Single Mode Fibers", *IEEE Photonics Technology Letters*, July 1993, Vol. 5, n°7, pp. 819-821.

- [15] " Combat polarization impairments with dynamic polarization controllers", Site de General Photonics Corporation. disponible sur site:  
<http://generalphotonics.com/techinfocombat.htm>
- [16] Polarization Mode Dispersion, Site de Tektronix. disponible sur site :  
<http://www.tektronix.com/Measurements/commtest/pmd/index.html>
- [17] Polarization Mode Dispersion Tutorial, Site Web ProForum Tutorials:  
[http://www.onforum.com/tutorials/polar\\_mode/index.html](http://www.onforum.com/tutorials/polar_mode/index.html)
- [18] UNIVERSITY OF MICHIGAN, Polarization Mode Dispersion, *Electrical Engineering and Computer Science*. disponible sur site: <http://www.eecs.umich.edu/satin/pmd/>
- [19] "Chromatic Dispersion and Polarization Mode Dispersion (PMD)", Light Reading – The Global Site for Optical Networking. [http://www.lightreading.com/document.asp?doc\\_id=7303](http://www.lightreading.com/document.asp?doc_id=7303)
- [20] AGRAWAL G.P., "Nonlinear fiber optics", *Academic Press*, New York, 1989.
- [21] FRANCOIS P.L., BAYON J.F et ALARD F., "Characterization procedure of fiber packaging relative to microbends", *Electronics Letters*, 1985, Vol. 21, pp. 471-472.
- [22] Melle BILLAMI Hanane et BENDAHMANE Raouida «Etude d'un réseau optique ADM 10 Gbit /S »2013
- [23] BOUZIDI TANI asma «effet des les passements inter-canal et de débit binaire sur une liaison WDM »2013
- [24] :« Synthesis and characterization of fiber Bragg gratings » Johannes Skaar, these de doctorat, Institut of optical research Sweden, 2001.
- [25]: A. D. Kersey. A review of recent developments in fibre optic sensor technology. *Optical Fibre Technology*, 2 :291.317, 1996.
- [26] :J. T. Kringlebotn, J.-L. Archambault, L. Reekie, and D. N. Payne. Er<sup>3+</sup> :yb<sup>3+</sup> codoped fiber distributed-feedback laser. *Opt. Lett.*, vol., 19 :2101.2103, 1994.
- [27] :Govind P. Agrawal. *Fiber-Optic Communication Systems*. A John Wiley and Sons, Inc., 2002.
- [28] :P. A. Krug, T. Stephens, G. Dhosi, G. Yore, F. Ouellette, and P. Hill. Dispersion Compensation over 270 km at 10 gbit/s using an offset-core chirped fibre bragg grating. *Electron. Lett.*, 31 1091.1093, 1995.
- [29] :[https://www.ftmesures.com/Technologie\\_reseau\\_de\\_Bragg](https://www.ftmesures.com/Technologie_reseau_de_Bragg)
- [30] :A. Martinez, M. Dubov, I. Khrushchev, and I. Bennion. Direct writing of fibre bragg gratings by femtosecond laser. *Electron Letters*, 40 :1170.1172, 2004.
- [31] :[www.photoniques.com/http://dx.doi.org/10.1051/photon/20168041](http://www.photoniques.com/http://dx.doi.org/10.1051/photon/20168041).
- [32] :Raman kashyap. *Fiber Bragg Gratings*. Academic Press, 1999.

- [33]: T. Erdogan, « *fiber grating spectra* », J.Lightwave Technol, vol. 15. Août 1997.
- [34] :MEZGHICHE KAMEL thèse de doctorat Etude et caractérisation des réseaux de Bragg fibrés « Fiber Bragg Gratings » Université Badji Mokhtar badji Mokhta,Année 2011.
- [35]: A. Yariv, « *coupled mode theory for guided-wave optics* », IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-9, septembre 1973.
- [36]↑<http://www.arcep.fr/fileadmin/reprise/dossiers/fibre/slides-fttx-prog-101106.pdf> [archive] Liens externes.
- [37] D. Dahan and G. Eisenstein, Numerical comparison between distributed and discrete amplification in a point-to-point 40-Gb/s 40-WDM-based transmission system with three different data formats, J. Lightwave Technol., 20 (2002) 379–388.
- [38] Gabrielle Gauthey Développement des réseaux à très haut débit pour le développement Guide de mise en place de réseaux fibres optiques FTTH [37] groupe orange France Télécom, SA au capital de 10 412 239 188€ RCS Paris 380 129 866 - 6921.
- [39] D and O Committee. FTTH Hanbook, Fourth Edition. Fibre To The Home, Council Europe 2011, 2011.
- [40] H. Taga, M. Suzuki, and Y. Namihira, Polarization mode dispersion tolerance of 10 Gbit/s NRZ and RZ optical signals, Electron. Lett., 34(1998) 2098–2100.
- [41] John Crisp and Barry Elliott. Introduction de Fiber Optics. Newnes, 2005.
- [42]; G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn. Formation of bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method. Opt. Lett., 14 :823.825, 1989.
- [43]: «Etude d'un système de communication optique à encodage en fréquence (FE-CDMA) utilisant des réseaux de Bragg superposés » JULIEN MAGNÉ, thèse de doctorat, Université de Laval, 2004.