



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE: DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Science et Technologie
FILIERE : Télécommunications
OPTION : Réseaux et Télécommunications

Thème

Étude comparative des différents profils des fibres optiques à cristaux photoniques

Présenté par
BENCHOHRA Rabia el adaouia
BRITEL Sara

Soutenu publiquement le : 16/06/2022, devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Dr. SONNE Abdelkader	MCA (UAT Laghouat)	Encadrant.
Dr. REGUIGUE Mourad	MCB (UAT Laghouat)	Président.
Dr. BIRANE Mouhoub	MCA (UAT Laghouat)	Examineur.

Promotion: 2021/2022.

Remerciements

En préambule à ce mémoire nous remerciant **ALLAH** qui nous aide
Et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous souhaitant 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 la
Faculté des Sciences et de la Technologie de Département d'Electronique et
Télécommunication, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui
déployent de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation
actualisée.

Nous tenant à remercier sincèrement Monsieur **SONNE Abdelkader**, qui, en tant
que Directeur de mémoire, se sont toujours montrés à l'écoute et très disponible
tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le
temps qu'ils ont bien voulu nous consacrer et sans qui 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.

A nous parents.

A nous sœurs

A nous frères

A toute la famille et les amis.

ملخص

الألياف ذات المواد الجديدة المعروفة باسم "ألياف المواد الدقيقة (FMS) أو الألياف البلورية الضوئية (FCP)" لديها عدد أكبر من درجات الحرية من الألياف التقليدية. في الواقع ، الخصائص البصرية لهذه الألياف قابلة للتعديل ، مما يؤدي إلى العديد من التطبيقات المحتملة. يمكننا أن نذكر من بين أمور أخرى ، سلوك أحادي اللون بلا حدود ، انكسار كبير ، نقل عالي للطاقة ، زيادة التدفق (تشتتات لوني قابل للتعديل) ، تسطیح كسب مضخمات الألياف.

ومن هنا جاء الاهتمام بهذه الألياف وخاصة في مجال الاتصالات. لقد كنا مهتمين بعملنا في توصيف الخصائص البصرية لـ FCPs من خلال دراسة تأثير المعلمات الهندسية على الانكسار والخسائر عن طريق الاحتواء.

الكلمات المفتاحية : الألياف البلورية الضوئية (FCP) ، ألياف المواد الدقيقة (FMS).

Résumé

Les fibres à nouveaux matériaux communément dénommées « fibres à matériaux microstructurés (FMS) ou fibres à cristal photoniques (FCP) », présentent un nombre de degrés de liberté plus important que les fibres conventionnelles. De fait, les propriétés optiques de ces fibres sont ajustables entraînant ainsi une multitude d'applications potentielles. On peut citer entre autres, un comportement infiniment monomode, une grande biréfringence, le transport de forte puissance, l'augmentation du débit (des dispersions chromatiques ajustables), l'aplatissement du gain des amplificateurs à fibres.

D'où l'intérêt porté à ces fibres notamment dans le domaine des télécommunications. Nous nous sommes intéressés dans nos travaux à la caractérisation des propriétés optiques des FCP en étudiant l'impact des paramètres géométriques sur la biréfringence et les pertes par confinement.

Mots clés : Fibres à cristal photoniques (FCP), fibres à matériaux microstructurés (FMS).

Abstract:

The new fiber materials commonly referred to as " microstructured fiber materials (MSF) or photonic crystal fiber (PCF) " have been many unique optical characteristics, such as broadband signal mode operation, ultra-flattened dispersion, high birefringence, low loss, large effective mode area and flattening the gain of the fiber amplifiers., which cannot be obtained by conventional optical fibers.

Hence the interest brought to these fibers particularly in the field of telecommunications, we focused our work on the characterization of optical properties of PCF by studying the impact of the geometric parameters of the birefringence and losses confinement.

Keywords : Photonic crystal fiber (PCF), Microstructured fiber materials (MSF).

Sommaire

Remercement	I
Résumé	II
Liste des figures	III
Liste des tableaux	VI
Introduction générale	1

Chapitre I *Généralités sur les liaisons par fibres optiques*

I. Introduction	3
II. Structure des réseaux optiques	3
III. Les différents types de réseaux.....	4
III.1 Le réseau long distance (WAN)	5
III.2 Le réseau métropolitain (MAN)	6
III.3 Le réseau local (LAN)	8
IV. Description d'une liaison par fibre optique	9
IV.1 La partie émission.....	10
IV.1.1 Les diodes lasers	11
IV.1.2 Les diodes électroluminescentes (LED)	13
IV.1.3 Les techniques de Modulation	14
IV.1.4 Les principales différences entre Diode électro-luminescente et Diode laser	17
IV.2 La partie réception	17
IV.2.1 Les Photodétecteur	18
IV.2.2 L'amplificateur électrique	18
IV.2.3 Le filtrage	19
IV.2.4 Le régénérateur	19
V. Fabrication d'une fibre optique.....	20
V.1 Domaine d'application des fibres optiques.....	21
VI. Les principales différences entre la fibre optique et câble coaxial	24
VII. Conclusion	25

Chapitre II *Généralités sur la fibre optique*

I. Introduction	26
II. La fibre optique.....	26
III. Présentation du logiciel Optiwave Système.....	27

Sommaire

IV. Evolution de la transmission de signaux par fibre optique	29
V. Le principe de propagation de la lumière dans une fibre optique	30
V.1 Ouverture numérique	34
V.2 Types des fibres optiques	35
V.2.1 Fibres optiques monomode	35
V.2.2 Fibres optiques multimodes	37
VI. Paramètres caractérisent le type d'une fibre optique	38
VI.1 Bande passante	38
VI.2 La fréquence normalisé v	39
VI.3 Longueur d'onde de coupure λ_c	39
VII.Les Caractéristiques de fibre optique	40
VII.1 Atténuation	40
VII.2 La dispersion dans les fibres optiques	43
VII.2.1 La dispersion chromatique	43
VII.2.2 Dispersion intermodale	54
VII.2.3 La dispersion modale de polarisation (PMD)	56
VIII. Multiplexage en longueur d'onde (WDM)	57
VIII.1 Principe de WDM	59
VIII.2 Application de WDM.....	59
IX.Avantage d'une fibre optique	60
X.Conclusion.....	60

Chapitre III

Les fibres optiques à cristaux photoniques

I. Introduction	61
II. Propriétés de base des cristaux photoniques	61
II.1 Périodicité à une dimension.....	61
II.2 Périodicité à deux dimensions	62
III. Concept des fibres à cristaux photoniques.....	63
IV. Principe de propagation de la lumière dans les FCP	64
IV.1 FCP à guidage par Bande Interdite Photonique (BIP)	64
IV.2 FCP à guidage par réflexion totale interne RTI	66
V. Fabrication des FCP	67
VI. Les avantages des fibres à cristaux photonique.....	69
VII.La méthode des éléments finis (MEF)	70

Sommaire

VIII. Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics	71
IX. Etapes de modélisation des FCP	72
IX.1 Détermination du profil d'indice.....	73
IX.2 Définition de l'indice de réfraction du matériau.....	74
IX.3 Maillage de la structure.....	75
IX.4 Détermination de la distribution du mode	76
X. Etude des pertes par confinement dans une FCP	76
X.1 Etude des pertes par confinement de deux structures différentes.....	80
XI. Etude de la biréfringence.....	82
XI.1 Etude comparative de la biréfringence entre une FCP-H et une FCP-O	83
XI.2 Influence des déformations elliptiques des trous d'air de la première couche sur la biréfringence.....	84
XI.3 Etude comparative de la biréfringence entre une FCP-H et FCP-O avec ellipticité des trous d'air de la première couche.....	86
XII. Conclusion	88
Conclusion générale.....	89
Références bibliographiques.....	91

Liste des figures

<i>Figure I.1 : Schéma de principe d'une liaison optique.</i>	4
<i>Figure I.2 : Les différents types de réseaux.</i>	5
<i>Figure I.3. Réseau grand distance .</i>	6
<i>Figure I.4. Métropolitain structurant et réseau métropolitain d'accès .</i>	7
<i>Figure I. 5 : Le réseau local français.</i>	9
<i>Figure I.6 : Schéma d'une liaison par fibre optique.</i>	10
<i>Figure I.7 : Réponse statique du laser et courant de seuil I_s.</i>	11
<i>Figure I.8: Schéma général du laser.</i>	12
<i>Figure I.9: Largeur spectrale d'un laser.</i>	12
<i>Figure I.10: Diode électroluminescentes LED.</i>	13
<i>Figure I.11: Largeur spectrale d'une LED</i>	13
<i>Figure I.12 : Modulation directe d'une diode laser.</i>	14
<i>Figure I.13 : Synoptique de la modulation directe</i>	15
<i>Figure I.14 : Principe de la modulation externe</i>	16
<i>Figure I.15 : Structure d'une photodiode PIN</i>	18
<i>Figure I.16 : Schéma de principe d'un récepteur optique</i>	19
<i>Figure I.17 : Réponses fréquentielle du filtre de Nyquist.</i>	19
<i>Figure I.18 : Présentation temporelle de la régénération des données d'entrée.</i>	20
<i>Figure I. 19 : Une seule paire de fibre optique transporte un débit 10 fois plus fort que 250 paires de fils de cuivre.</i>	21
<i>Figure I.20 : Un endoscope.</i>	22
<i>Figure I.21 : utilisation de la fibre optique dans la chirurgie.</i>	22
<i>Figure I.22 : Capteur pour mesurer la pression dans les vaisseaux sanguins</i>	23
<i>Figure II.1 : Structure d'une fibre optique.</i>	26
<i>Figure II.2. L'interface de travail sur OptiFiber.</i>	27
<i>Figure II.3. L'interface de travail sur OptiSystem.</i>	28
<i>Figure II.4 : Principe de réflexion.</i>	31
<i>Figure II.5 : Passage d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent.</i>	32
<i>Figure II.6 : Passage d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent.</i>	32
<i>Figure II.7: Phénomène de réflexion totale.</i>	33
<i>Figure II.8: Principe du guidage dans la fibre optique par réflexion totale interne.</i>	33
<i>Figure II.9: Cône d'acceptance.</i>	34
<i>Figure II.10: Profile d'une fibre optique monomode.</i>	36
<i>Figure II.11: Profile d'une fibre optique multimode à saut d'indice.</i>	37
<i>Figure II.12: Profile d'une fibre optique multimode gradient d'indice.</i>	38
<i>Figure II.13 : Atténuation spectrale d'une fibre optique.</i>	41
<i>Figure II.14 : perte par courbure.</i>	42
<i>Figure II.15: perte par micro-courbure.</i>	43

Liste des figures

<i>Figure II.16 : La dispersion chromatique.</i>	44
<i>Figure II.17 : dispersions de la silice en fonction de la longueur d'onde</i>	45
<i>Figure II.18 : Dispersion du guide en fonction de la longueur d'onde</i>	46
<i>Figure II.19 : Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique d'une fibre monomode à saut d'indice.</i>	47
<i>Figure II.20: Effet de la dispersion chromatique et l'atténuation sur une impulsion gaussienne.</i>	49
<i>Figure II.21 : Profil d'indice de la fibre à dispersion décalée la G-653.</i>	50
<i>Figure II.22 : Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique de la fibre G-653</i>	51
<i>Figure II.23: Variation de la dispersion en fonction de la longueur d'onde pour différents types de fibre.</i>	52
<i>Figure II.24 : Dispersion chromatique d'un compensateur de dispersion HOM utilisant le mode LP02.</i>	54
<i>Figure II.25 : Dispersion intermodale dans une fibre optique.</i>	55
<i>Figure II.26 : Illustration de la dispersion de polarisation intermodale.</i>	56
<i>Figure II.27: Opportunité d'utilisation du multiplexage couplée à l'amplification optique</i>	58
<i>Figure II.28 : Principe d'une liaison WDM.</i>	59
<i>Figure III.1 : Structure périodique unidimensionnel .</i>	62
<i>Figure III.2 : Structure périodique bidimensionnel</i>	62
<i>Figure III .3 : Coupe transversale d'une FCP avec ses paramètres</i>	63
<i>Figure III.4: Principe de guidage dans les fibres photonique à BIP</i>	65
<i>Figure III.5: Principe de guidage dans les fibres photonique à RTI</i>	67
<i>Figure III.6 : Réalisation d'une fibre microstructurée (a) assemblage macroscopique ; (b) fibre de 125 μm de diamètre typiquement, étirée à partir de la préforme</i>	68
<i>Figure III. 7 : Image de la section transversale d'une fibre photonique BIP</i>	68
<i>Figure III. 8 : Image de la section transversale d'une fibre photonique RTI</i>	69
<i>Figure III.9 : L'interface de travail sur COMSOL.</i>	72
<i>Figure III.10 : Schéma d'une FCP dessinée par le logiciel.</i>	73
<i>Figure III.11 : Maillage de la géométrie obtenue avec Comsol.</i>	75
<i>Figure III.12 : Représentation du champ électrique de modes guidé dans la FCP à 1550 nm.</i>	76
<i>Figure III.13 : Section transversale des FCPs pour différents couches (a)N = 3 couches , (b)N = 4 couches et (c)N =5 couches)</i>	77
<i>Figure III.14 : Pertes de confinement de FCP à 1550 nm en fonction d pour différentes valeurs de N.</i>	78
<i>Figure III.15: Pertes de confinement de FCP en fonction de longueur d'onde.</i>	79
<i>Figure III.16 : Intensité modale du mode fondamental dans une FCP à longueur d'onde de (a) 600 nm et (b) 1550 nm.</i>	80
<i>Figure III.17 : Section transversale de la (a) FCP-octogonale et (b) FCP-hexagonale.</i>	80
<i>Figure III.18 : Etude comparative sur les pertes de confinement en fonction de longueur d'onde entre une FCP-H et une FCP-O.</i>	81
<i>Figure III.19 : Etude comparative sur les pertes de confinement en fonction de d entre une FCP-H et une FCP-O.</i>	82
<i>Figure III.20 : la variation de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde de la FCP-H.</i>	83

Liste des figures

Figure III.21 : Etude comparative sur la variation de la biréfringence en fonction de longueur d'onde entre une FCP-H et FCP-O.	84
Figure III.22: Section transverse de la FCP-H avec ellipticité des trous d'air dans la première couche (a) : ($\eta = 0.1$), (b) : ($\eta = 0.2$) et (c) : ($\eta = 0.3$)	85
Figure III.23 : Variation de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde de la FCP-H avec différente valeur d'ellipticité des trous d'air de la première couche.....	86
Figure III.24 : Section transverse de la : (a) FCP-O et (b) FCP-H avec ellipticité des trous d'air de la première couche.....	87
Figure III.25 : Etude comparative sur la variation de la biréfringence entre une FCP-H et une FCP-O avec ellipticité des trous d'air de la première couche	87

Liste des tableaux

<i>Tableau I.1 : Les principales différences entre Diode électroluminescente et Diode laser</i>	<i>17</i>
<i>Tableau I.2 : Les principales différences entre la fibre optique et câble coaxial.</i>	<i>24</i>
<i>Tableau III.1: Les coefficients de multiples matériaux de verre à base de silice.....</i>	<i>74</i>

Introduction

Générale

Introduction générale

Le concept de communications optiques remonte loin dans l'histoire. L'envoi de messages par la lumière est certainement aussi vieux que les signaux de feu ou de fumée et a continué dans notre ère moderne si on tient compte de l'utilisation de lampes dans les communications entre bateaux en mer. Cependant, ces méthodes de transmission dépendent de l'état de l'atmosphère comme milieu de transmission [3].

Un guide d'onde fabriqué à partir d'un matériau non conducteur qui transmet la lumière (diélectrique), tel que le verre ou le plastique pourrait être un milieu de transmission idéal, parce qu'il n'est pas sujet aux variations atmosphériques. Les recherches entreprises dans ce sens aboutissent aux fibres optiques actuelles avec des pertes de puissance de lumière relativement faibles sur de longues distances [7].

Nous sommes aujourd'hui dans une période où le développement des réseaux Internet est en pleine croissance et le moyen le plus rapide pour transmettre une information est bien sûr la lumière. La transmission sans perturbation d'une information d'un point A à un point B s'effectue à l'aide d'un guide de lumière (fibre optique).

Les fibres optiques sont également utilisées en spectroscopie et en photométrie. Les impératifs ne sont plus alors les mêmes qu'en communication puisqu'elles doivent transmettre la bande spectrale la plus large possible et présenter une grande homogénéité du matériau sur tout le diamètre.

Nous distinguerons deux grands types de fibres standard, les fibres multi modes (à saut ou à gradient d'indice) et les fibres monomodes. Les fibres multi modes sont des fibres utilisées pour des applications « bas de gamme » (courte distance), tandis que les fibres monomodes sont surtout utilisées pour des applications télécoms et donc sur de longues distances.

Malgré les nombreux avantages que présentent les fibres conventionnelles (classiques), on peut retrouver plusieurs défauts majeurs que nous ne pouvons pas les ignorer tels que la dispersion ou les pertes par confinement qui présente un handicap considérable pour les transmissions à longue distance, où il est nécessaire de corriger ces problèmes. Les possibilités offertes par les fibres silice ont été très largement exploitées depuis de nombreuses années et leurs limitations ont été identifiées. Pour élargir l'éventail de performances accessibles, il faut s'intéresser aux potentialités de

Introduction générale

fibres non conventionnelles. C'est dans cette perspective qu'une nouvelle génération de fibres optiques et de manière plus générale, de guides d'ondes, est née. Dans ce contexte, les fibres à cristaux photoniques (FCP) constituées de canaux d'air parallèles à la direction de propagation dans une matrice de verre apparaissent particulièrement attrayantes [9].

Ce mémoire se compose de trois chapitres, le premier chapitre évoque des notions générales concernant les liaisons par fibres optiques, structure des réseaux optiques ainsi les différents types de réseaux et la fabrication d'une fibre optique avec ses principales domaines d'applications.

Le deuxième chapitre traite la fibre optique standard, sa structure et l'évolution de la transmission de signaux par fibre optique ainsi que la représentation du mécanisme de propagation de la lumière dans les fibres optiques.

Un ensemble de résultats de simulation concernant l'influence de l'arrangement des trous d'air sur quelque propriété des FCPs sont traité dans le dernier chapitre

Chapitre I

Généralités sur Les liaisons par fibres optiques

I. Introduction

Les nouvelles technologies d'information ont des exigences plus strictes, notamment en ce qui concerne la vitesse de transmission des paquets des données. Si nous ajoutons à cela la numérisation des services vidéo, intégrant la haute définition, la vitesse de transmission et le multiplexage de données sont les caractéristiques qui définissent les tendances de la création de l'électronique de communication. La fibre optique s'adapte parfaitement à ces besoins en raison de ses faibles pertes et de sa largeur de bande, c'est le support de transmission idéal pour atteindre des taux de transmission élevés.

Il en résulte un bouleversement des réseaux de télécommunications précédents et un besoin de mettre en place de nouvelles structures. Afin de bien comprendre le contexte dans lequel notre étude s'inscrit, le premier chapitre fait office d'une notion fondamentale sur les systèmes de transmission par fibre optique, et plus particulièrement, à la fibre optique, qui a fait l'objet de notre travail. La présentation de ces notions a pour but d'apporter les éléments de base, essentiels pour faciliter la lecture de ce mémoire.

II. Structure des réseaux optiques

Les télécommunications optiques ont acquis une importance considérable dans les réseaux de communication longues distances. L'un des principaux critères de cette réussite tient à la grande bande passante de la fibre. Mais surtout dans les très faibles pertes qu'elle présente. L'autre avantage de l'utilisation d'une porteuse optique est la localisation du signal à l'intérieur de la fibre. Ceci fait de la fibre un élément indispensable des réseaux métropolitains, transnationaux et intercontinentaux [1].

Les systèmes de transmission par fibres optiques peuvent être trouvés dans tous les niveaux du réseau : réseau de cœur, Wide Area Network (WAN), Metro Area Network (MAN), réseau local (LAN) et le réseau d'accès. Les liens de fibre longue courrier. (Milliers de kilomètres) tels que les câbles sous-marins constituent l'épine dorsale ou le noyau d'un réseau de télécommunication. Un WAN est généralement constitué de liaisons de communications couvrant une vaste région, comme un pays. Un MAN est optimisé pour une zone géographique allant de plusieurs blocs de bâtiments à des villes entières. Un Réseau local est un réseau couvrant une zone plus petite, comme un campus ou un Bâtiment. Leurs

architectures sont cependant basées sur un même modèle, celui de la Liaison dite « point à point » [2].

Généralement, une liaison optique est constituée d'un émetteur et d'un récepteur reliés par une fibre optique.

L'information que l'on veut transmettre à distance est convertie en un signal électrique modulée analogiquement ou numériquement par un émetteur (laser ou diode électroluminescente) est convertie en un signal optique.

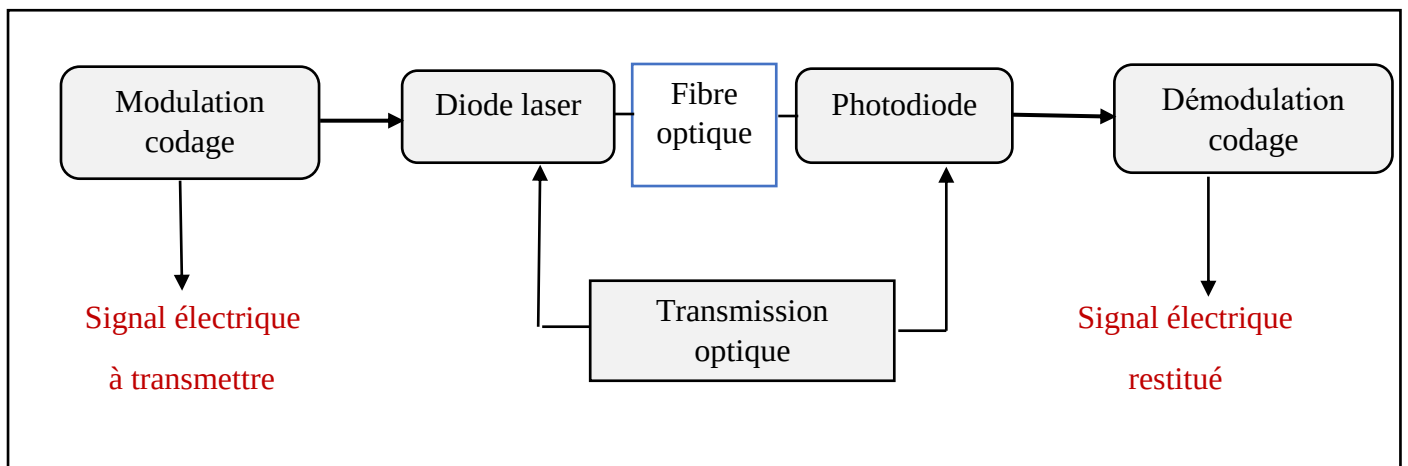


Figure I.1 : Schéma de principe d'une liaison optique [3].

III. Les différents types de réseaux

L'aboutissement de nombreuses années de recherche de base pour obtenir d'une part des fibres présentant une atténuation compatible avec les exigences d'un réseau de télécommunications, d'autre part des composants et dispositifs suffisamment performants et fiables a permis l'apparition des premiers systèmes de transmission optique dès les années 90.

Ils sillonnent désormais le monde entier, aussi bien sur terre que dans le domaine sous-marin.

Le réseau déployé en France est segmenté en fonction des différents besoins en débit, en bande passante, en distance de transmission, ... On distingue trois grandes catégories :

- Les réseaux longues distances (ou les WAN, Wide Area Network). Ce sont les réseaux déployés à l'échelle d'un pays ou d'un continent et dont les nœuds sont de très grands centres urbains.

- Les réseaux métropolitains (Metropolitan Area Network = MAN) qui correspondent aux réseaux mis en œuvre dans une grande ville ou une agglomération et qui permettent de relier entre eux par exemple différents arrondissements.
- Les réseaux locaux (Local Area Network = LAN) encore appelés réseaux de distribution ou réseaux d'accès. Ils représentent le dernier maillon et finissent d'acheminer les informations à l'abonné. Ils sont donc plus courts et moins gourmands en capacité.

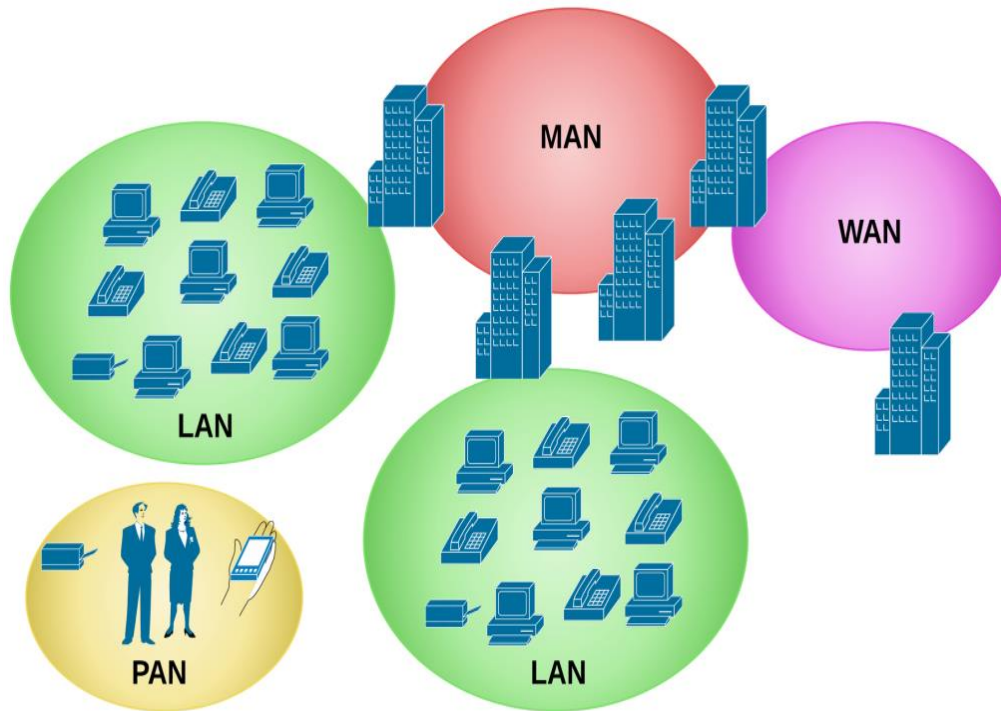


Figure I.2 : Les différents types de réseaux

Selon la nature du réseau dans lequel il se situe, le système optique peut légèrement différer. Nous allons donc présenter succinctement les caractéristiques de ces trois niveaux du réseau dans les paragraphes suivants [4].

III.1 Le réseau long distance (WAN)

Cette partie du réseau, parfois également appelée réseau structurant, représente la couche supérieure du réseau de télécommunications. Elle est comprise entre deux autocommutateurs à autonomie d'acheminement, qui ont pour rôle d'aiguiller les informations d'une région à une autre, de la zone de l'expéditeur vers celle du destinataire. La transmission de ces

informations se fait désormais sur fibre optique à une longueur d'onde de $1,55\mu\text{m}$ et à un débit élevé qui ne cesse de s'accroître (les débits 2,5 Gbits/s et 10 Gbits/s sont déjà installés et le 40 Gbits/s le sera très prochainement).

Cette capacité ne pourrait être atteinte sans l'introduction des fibres optiques dans la chaîne. Elles ont permis de gagner en débit et en espacement entre répéteurs par rapport aux systèmes existants, Il couvre une vaste zone géographique telle qu'un État ou un pays. C'est donc le réseau qui couvre plus de 100 km. Il s'agit d'une interconnexion de petits réseaux constitués de réseaux locaux.

Dès le début des années 1990, l'amplification optique a permis de démontrer la possibilité de transmettre, sans répéteur, des signaux à 5 et 10 Gbits/s sur des distances transocéaniques.

La liaison du réseau longue distance est désormais tout optique.

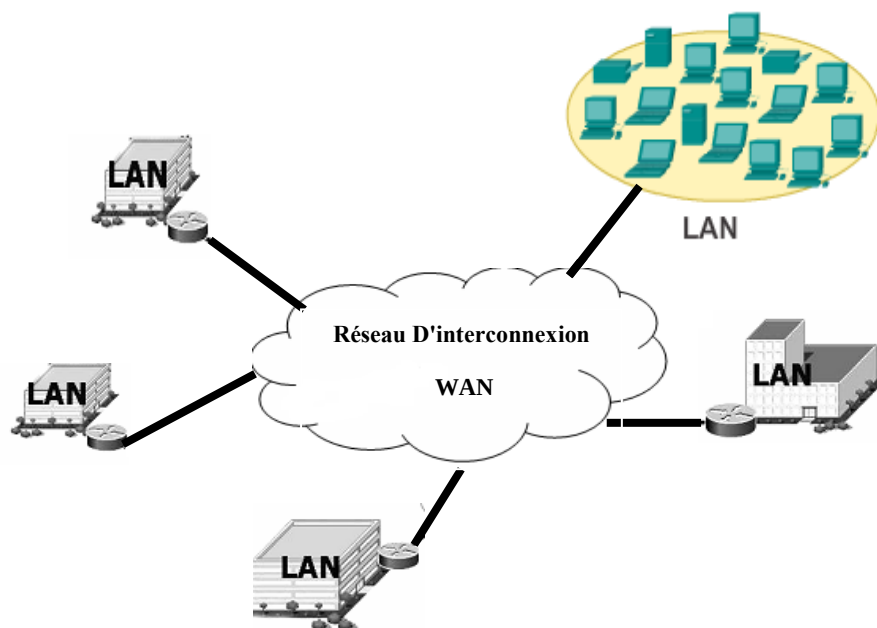


Figure I.3. Réseau grand distance [4].

III.2 Le réseau métropolitain (MAN)

Encore appelé réseau intermédiaire, le réseau métropolitain connaît en ce moment un véritable essor. Déployé entre le dernier autocommutateur à autonomie d'acheminement du réseau longue distance et une zone plus précise (arrondissement, campus, petite ville, ...), il

possède un environnement souvent très complexe et divers. Fondamentalement, On peut distinguer les réseaux métropolitains structurants et métropolitains d'accès (Figure I.4).

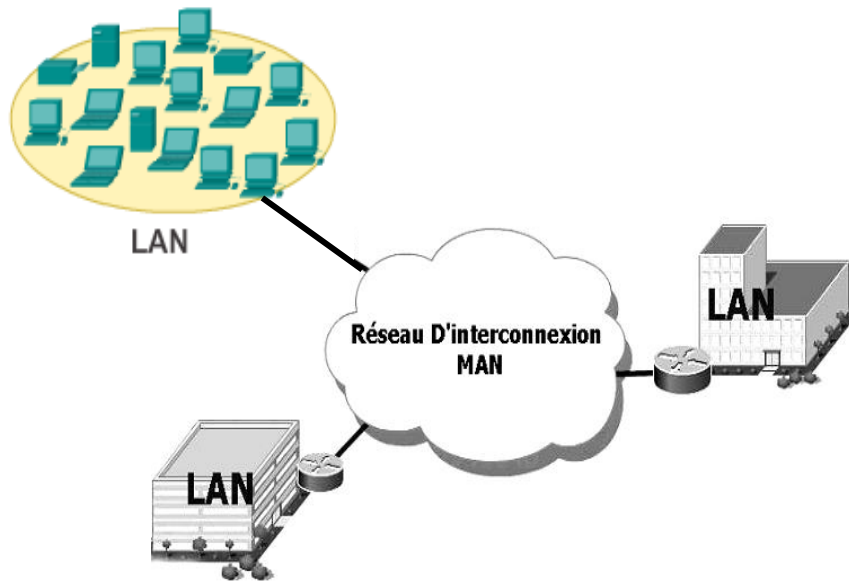


Figure I.4. Métropolitain structurant et réseau métropolitain d'accès [4].

Les réseaux métropolitains structurants sont généralement couvrir une zone de moins de 100 km. Il peut également être considéré comme un ensemble de réseaux locaux.

Suivant les réseaux ou les pays, les chiffres peuvent varier considérablement. En particulier, il existe des différences notables entre les zones très peuplées d'Europe et d'Asie, où les distances seront inférieures, et les Etats-Unis où les applications métropolitaines s'apparentent à de véritables réseaux régionaux.

Les topologies logiques (profils de trafic) des réseaux métropolitains diffèrent radicalement de celles des réseaux longue distance. Ces derniers correspondent pour l'essentiel à des lignes interurbaines point à point avec tout au plus un ou deux multiplexeurs d'insertion-extraction optiques (OADM) pour insérer et extraire le trafic en des points intermédiaires. Les réseaux métropolitains introduisent une infrastructure optique à haut degré de connectivité. Les anneaux métropolitains se caractérisent généralement par un trafic maillé avec un certain degré de concentration lié à l'interconnexion avec le réseau longue distance.

Les anneaux d'accès, à la différence, collectent en général le trafic de plusieurs nœuds pour le concentrer vers un nœud partagé avec un réseau métropolitain structurant.

La complexité de ce réseau ne se traduit pas uniquement par le haut degré de connectivité. A la différence des réseaux longue distance, les réseaux métropolitains doivent prendre en charge des formats, des protocoles et des débits de transmission très divers, mêlant les trafics de la hiérarchie numérique synchrone (SDH) ou du réseau optique synchrone (SONET) ou autres encore. Pour supporter cette diversité, ces réseaux sont souvent équipés de cartes transpondeurs multidébits universelles, acceptant n'importe quel débit de 100 Mbits à 2,5 Gbits/s, pouvant assurer ultérieurement le trafic à 10 Gbits/s sans modification (exemple du récent réseau Alcatel 1696 Metro Span), et dans une transparence totale vis-à-vis de tous les formats et protocoles.

Dans ces réseaux intrinsèquement ouverts à n'importe quel type de signal, le multiplexage en longueur d'onde (WDM), dont une description ultérieure sera faite, trouve une application importante en luttant contre l'encombrement que cela peut procurer tout en réduisant le coût par service apporté. De la même manière, les amplificateurs optiques sont essentiels pour les applications de réseaux métropolitains structurants. Les pertes élevées dans la fibre (dues à l'interconnexion de courts tronçons de fibre) et le cumul des pertes associées aux transits tout optiques dans des nœuds successifs peuvent imposer en effet d'amplifier le signal optique. L'amplificateur optique peut représenter dans bien des cas une solution à moindre coût comparée à la régénération optique-électrique-optique [4].

III.3 Le réseau local (LAN)

Il est également nommé réseau de distribution ou d'accès. C'est la dernière partie du réseau de télécommunication, celle qui relie l'abonné et le dernier autocommutateur. Ce type de réseau a un taux de transfert de données élevé et une congestion moins importante car il couvre une petite zone.

Il est toujours constitué par une partie en fibre optique entre l'autocommutateur et la terminaison de réseau optique suivie d'une partie en conducteur métallique qui va jusqu'au terminal de l'abonné. Cependant, il est de plus en plus envisagé dans l'avenir de réduire la contribution de l'électrique pour aller vers le tout optique dans le but d'augmenter le débit disponible chez l'abonné.

Selon la localisation de la terminaison optique, différentes configurations sont envisageables :

- **FTTH/FTTO (Fiber To The Home / 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 domicile ou son bureau, et la partie terminale en cuivre est très courte.
- **FTTB (Fiber To The Building)** : la terminaison de réseau optique est localisée soit au pied de l'immeuble, soit dans un local technique généralement situé en sous-sol, soit dans une armoire ou un conduit de palier. Elle est partagée entre plusieurs abonnés qui lui sont raccordés par des liaisons en fil de cuivre.
- **FTTC/FTTCab (Fiber To The Curb / 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.

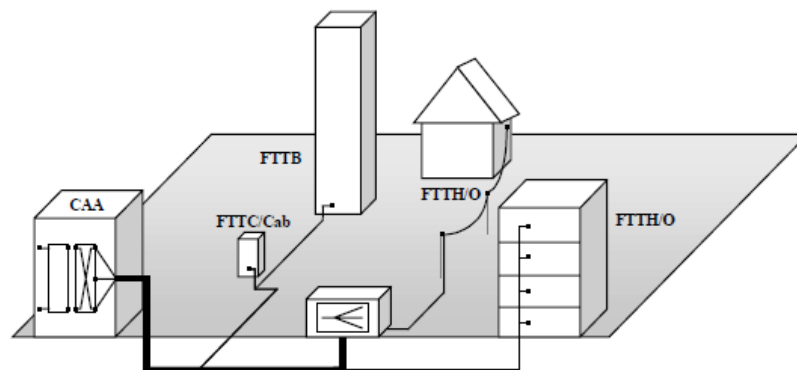


Figure I. 5 : Le réseau local français [4].

IV. Description d'une liaison par fibre optique

Le principe d'une liaison repose sur le principe de faire circuler une information entre un émetteur et un récepteur en réduisant au maximum les risques de déformation du signal réceptionné, afin d'assurer le bon transfert de l'information. La Figure I.6 montre le schéma de principe d'une liaison par fibres optiques, ou système de transmission optique « point à point ». Tous les systèmes se composent d'un bloc émetteur, d'une série de tronçons de fibres optiques séparés par des régénérateurs, et d'un bloc récepteur. Le rôle d'un tel système est

tout d'abord, au niveau de l'émetteur, d'émettre un signal optique et de le moduler en fonction des données binaires et du format choisi. Ensuite, il a bien sûr pour autre objectif de faire propager ce signal optique sur une distance donnée, par le biais d'une ligne optique formée de fibres optiques et des régénérateurs, de telle sorte que le signal soit le moins affecté possible par les différents effets de propagation auxquels il est confronté. Enfin, au niveau du récepteur, ce signal optique est détecté après la transmission pour être reconverti en signal binaire électrique [2].

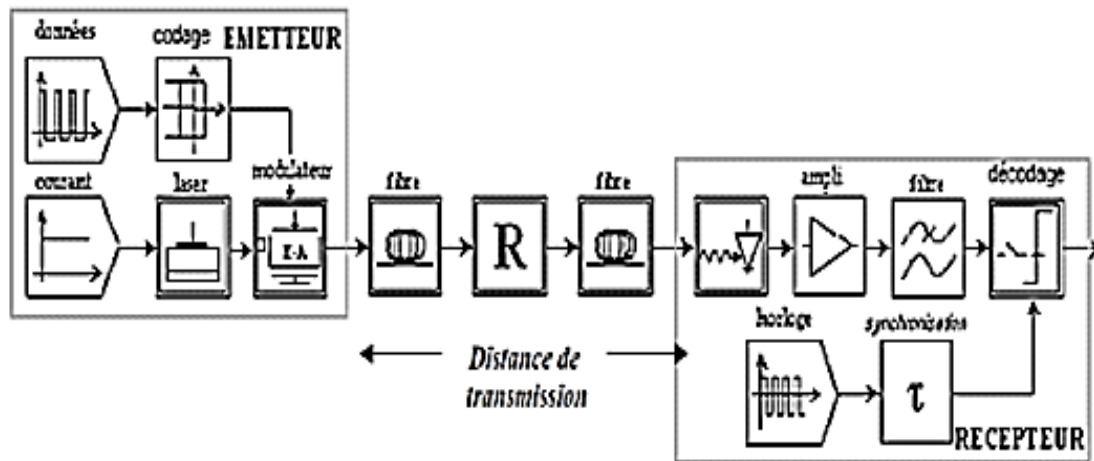


Figure I.6 : Schéma d'une liaison par fibre optique [2].

IV.1 La partie émission

Son rôle consiste à délivrer à la fibre optique un signal sur lequel sont inscrites les données. Elle comprend notamment une source lumineuse (généralement un laser) et un système de modulation.

Depuis le début des télécommunications par fibre optique, le choix des sources optiques s'est porté sur les émetteurs à semi-conducteur à cause de leurs petites dimensions par rapport à celles du cœur des fibres optiques, de la relative facilité à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant, de leur spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation énergétique.

Dans le domaine des télécommunications optiques, deux types de sources lumineuses sont couramment utilisées : les diodes électroluminescentes (LED) et les diodes lasers. Nous allons rappeler dans la suite de ce paragraphe les principales caractéristiques de ces sources [1].

IV.1.1 Les diodes lasers

La diode laser (DL) quant à elle est une source cohérente. Elle est surtout utilisée dans les systèmes de transmission à très grandes distances (faible largeur spectrale $\Rightarrow$ Bande passante importante) [5].

Le laser est polarisé directement par un courant de pompe. Lorsque ce courant est faible le laser se comporte comme une LED et il émet de la lumière non cohérente. Lorsque ce courant appliqué dépasse une limite appelée courant de seuil, on commence à avoir l'émission stimulée, et le laser émet une lumière cohérente avec un spectre très fin.

Le courant de seuil (Figure I.7) est un paramètre très important, que les concepteurs des diodes lasers cherchent à minimiser [1].

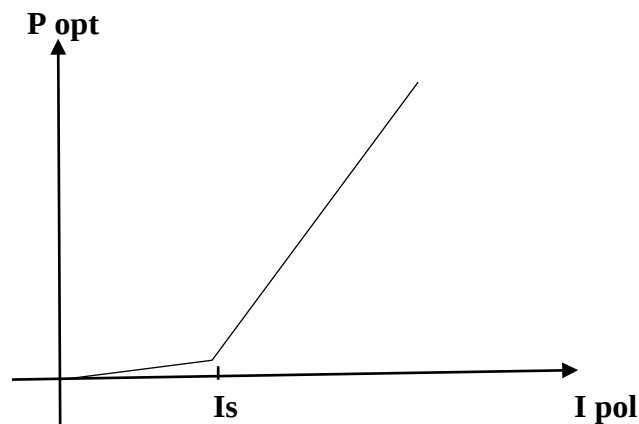


Figure I.7 : Réponse statique du laser et courant de seuil I_s .

Les différentes structures sont configurées de façon à confiner les porteurs électriques et faisceau optique dans une zone très étroite.

Dans les lasers à semi-conducteurs, des vitesses de modulation élevées jusqu'à 10 GHz peuvent être obtenues grâce aux temps de recombinaison faibles des charges électriques associés à l'émission stimulée. C'est pour cela que les lasers sont utilisés comme transmetteurs dans les télécommunications optiques à modulation directe [1].

Pour effectuer l'effet laser : l'excitation externe, le gain, la rétroaction. La région provoquant un gain optique est appelée la région active qui est insérée entre deux couches dopées p et n. Elle est située entre deux miroirs disposés longitudinalement, ce qui correspond à une cavité Fabry-Perot résonante, et la lumière amplifiée sort d'un des miroirs qui est semi-réfléchissant comme cela est montré dans la Figure I.8.

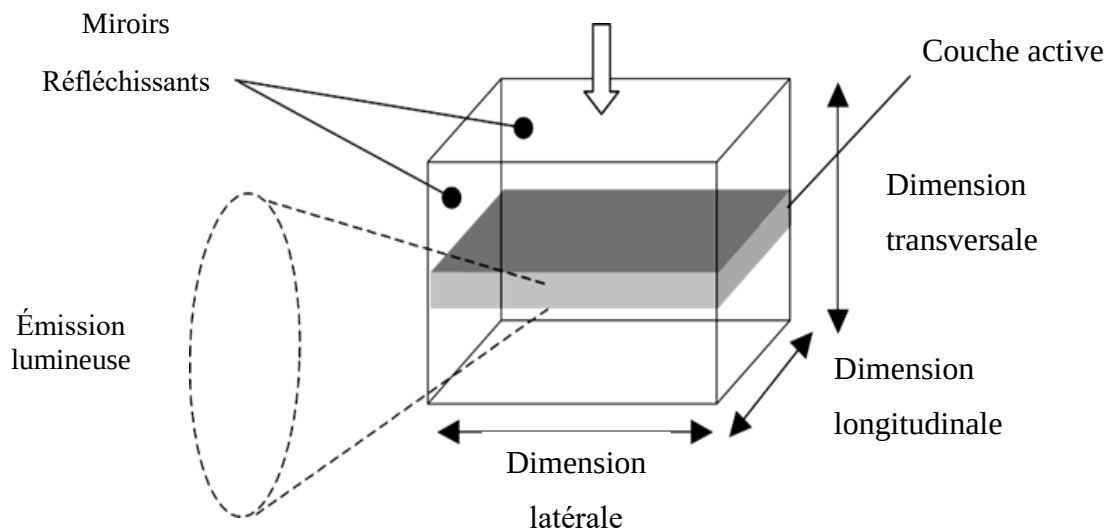


Figure I.8: Schéma général du laser.

L'excitation externe est faite par un courant électrique injecté dans le sens transverse cette injection est faite pour accomplir l'inversion de population [1].

Les diodes laser caractérisent par l'étroitesse de la longueur d'onde qu'elles émettent, le spectre émis se composant de plusieurs raies centrées autour de la longueur d'onde principale (figure I.9).

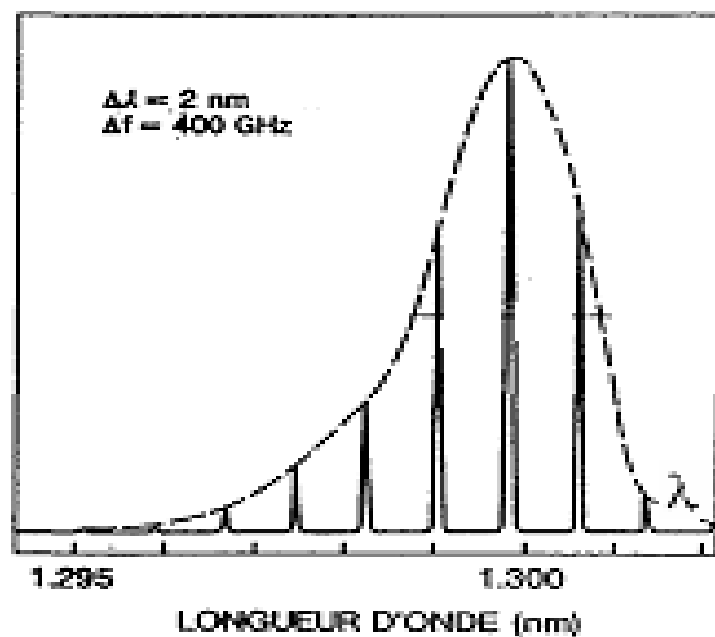


Figure I.9: Largeur spectrale d'un laser [1].

IV.1.2 Les diodes électroluminescentes (LED)

La LED est une source incohérente. Elle présente un spectre d'émission assez large, ainsi qu'un diagramme de rayonnement moins directif. Elle est utilisée essentiellement dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très grandes bandes passantes [5].

Pour la plupart des applications de communications en espace libre, les diodes à émission de lumière infrarouge sont utilisées à cause de leur grande efficacité et de leur longueur d'onde en infrarouge proche, surtout si elles sont utilisées avec des photodétecteurs en silicium.

La diode électroluminescente est utilisée surtout dans les systèmes de communications à fibres optiques multimodes du fait de leurs faisceaux de sortie à large angle de divergence.

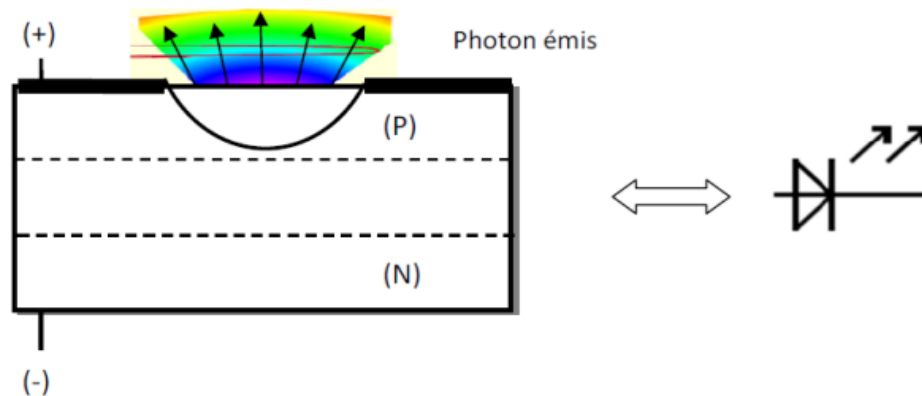


Figure I.10: Diode électroluminescentes LED.

La LED est utilisée dans les communications optiques et délivre une puissance optique de plusieurs centaines de microwatts et offre des débits inférieurs à 5 Mbits/s sur fibre multimode. Elles sont relativement bon marché et ne demandent pas de circuit distinct pour la polarisation et la modulation [1].

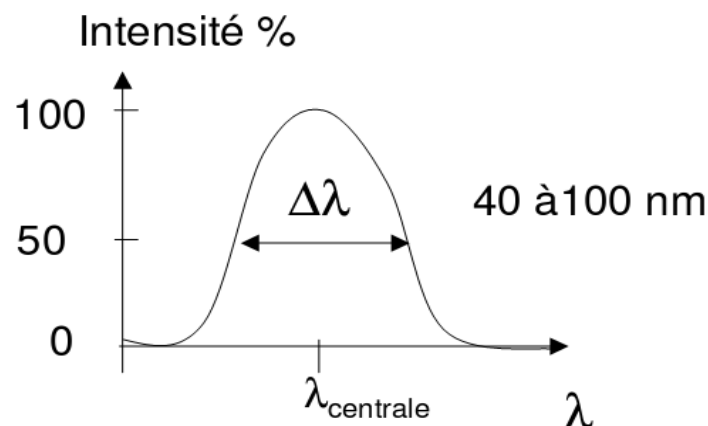


Figure I.11: Largeur spectrale d'une LED

Le spectre d'une LED (figure I.11) est continu est relativement large, de l'ordre de 40 à 100nm à mi-hauteur, la lumière émise est incohérente [1].

IV.1.3 Les techniques de Modulation

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les imprimer sur le signal à envoyer dans la fibre, c'est ce que l'on appelle une modulation. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une conversion des données électriques en données optiques. Il existe principalement 2 techniques : la modulation directe (ou interne) et la modulation Externe. Le détail de ces 2 configurations est donné dans ce paragraphe [4].

- **Modulation directe**

Un des principaux avantages de l'utilisation des lasers à semi-conducteur pour les systèmes de télécommunications par fibres optiques réside dans le fait qu'il est possible de les moduler facilement. La modulation du courant qui traverse le laser entraîne directement la modulation de la lumière émise par celui-ci. Cette technique de modulation est appelée « modulation directe ». Il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser, c'est-à-dire sur le courant injecté dans le laser à semi-conducteur, pour moduler en amplitude le signal émis par celui-ci [6].

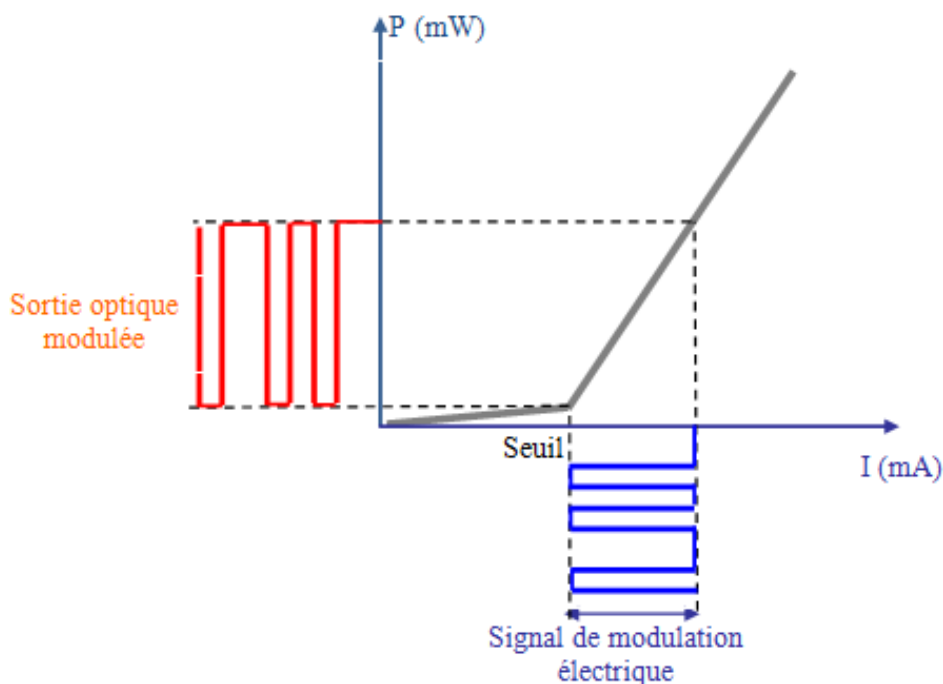


Figure I.12 : Modulation directe d'une diode laser.

Cette solution requiert assez peu de composants. Un laser, un générateur de courant et un circuit de commande ou driver. Ce circuit de commande a pour rôle de moduler la polarisation du laser à partir des données électriques issues de générateur tout en commandant la source optique au niveau des puissances émises (fixer les valeurs du courant d'alimentation). La source modulée est complétée par un dispositif de couplage optique dans la fibre de transmission.

- La modulation directe offre l'avantage d'être simple, facile à mettre en œuvre, efficace et peu coûteuse, elle nécessite une tension réduite (la tension appliquée n'est que de 2 à 3 V) et une puissance faible.
- Cependant, elle présente des inconvénients liés son régime transitoire (oscillations de relaxation), chirp, bruit, ...

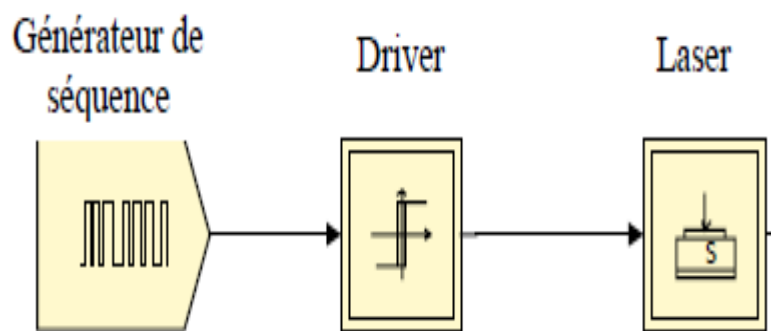


Figure I.13 : Synoptique de la modulation directe [6].

- **Modulation externe**

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

La modulation externe sera donc effectuée sur une onde pure et constante et par un composant indispensable qui est le modulateur externe. Le module d'émission est composé dans ce cas, d'une diode laser émettant un signal continu, suivie d'un modulateur externe commandé par un driver dont le rôle est de fixer les niveaux d'une tension $v(t)$ modulée et représentative de l'information à transmettre. Cette tension appliquée au modulateur a pour propriété de modifier le facteur de transmission en intensité en sortie.

Le signal optique continu émis par le laser alimenté par un courant constant est pur et peu dégradé. En traversant le modulateur, il subit les modifications du facteur de transmission et le signal de sortie se trouve modulé selon $v(t)$.

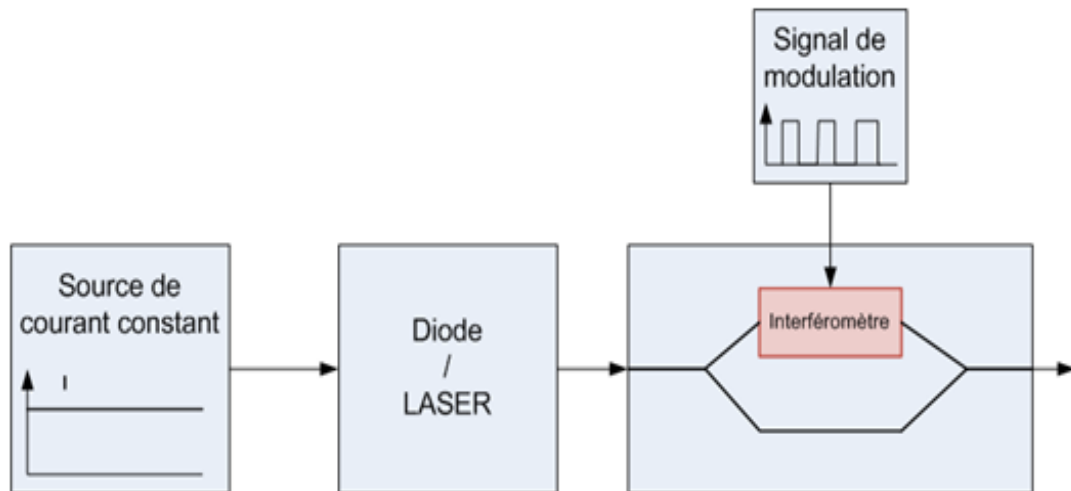


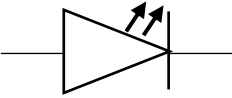
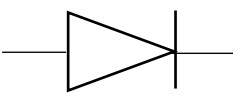
Figure I.14 : Principe de la modulation externe

Les systèmes de transmission par fibres optiques sont conçus pour faire propager par voie Optique des données binaires « 0 » et « 1 ». Il convient donc de déterminer un code Permettant De traduire ces signaux dans le domaine optique par une modulation adéquate D'un signal Optique continu. Le code utilisé pour la traduction en optique des signaux Binaires est appelé Format de modulation (NRZ, RZ,...). La méthode de modulation la plus Intuitive consiste à coder l'information de la manière suivante : « 0 » = pas de lumière Transmise, ou à faible puissance et « 1 » = de la lumière transmise, à puissance plus forte [7].

IV.1.4 Les principales différences entre Diode électro-luminescente et Diode laser

Le tableau I.1, résume Les principales différences entre Diode électroluminescente et Diode laser :

Tableau I.1 : Les principales différences entre Diode électroluminescente et Diode laser [8].

Spécification	Diode électro-luminescente	Diode laser
Définition	Le type de diode qui, lorsqu'elle est placée dans un champ électrique, émet de la lumière.	C'est une diode à semi-conducteur qui ne conduit que dans une direction
Symbole		
Puissance de sortie	Linéairement proportionnel au courant d'entraînement	Proportionnel au courant au-dessus du seuil
Actuel	Courant d'entraînement (50 à 100 mA) (pic)	Courant de seuil (5 à 40 mA)
Puissance couplée	Modérer	Haute
La vitesse	Ralentissez	Plus rapide
Type de fibre	Multimode seulement	Monomode et multimode
Bande passante de modulation	Modéré, des dizaines de KHz à des dizaines de MHz	Élevé, dizaines de MHz à des dizaines de GHz
Longueur d'onde disponible	0,66 à 1,65 mm	0,78 à 1,65 mm
Coût	Faible	Modéré à élevé
Application	La rectification, à savoir, convertit le courant alternatif en courant continu	Émet de la lumière

IV.2 La partie réception

La fonction d'un récepteur dans un système de transmission optique est de détecter et de démoduler un signal lumineux transmis sur une fibre. La détection consiste à la conversion du signal optique en signal électrique. La démodulation est généralement accomplie ensuite par les techniques habituelles des systèmes de transmission électriques.

La détection est assurée par des photodiodes semi-conductrices qui fournissent un courant proportionnel à la puissance lumineuse moyenne interceptée ; cette moyenne (temporelle) étant prise sur un temps d'intégration caractéristique de la technologie de la diode et du circuit électrique dans lequel elle est montée. Les modulations d'amplitude ne seront donc détectées que si leur période est suffisamment grande par rapport au temps d'intégration [7].

IV.2.1 Les Photodétecteur

Pour effectuer la photodétection, en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il faut que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN, encore appelée zone déplétée. La zone de charge d'espace doit être large pour permettre un bon rendement quantique, d'où l'intérêt de la photodiode PIN, où une région intrinsèque est intercalée entre les régions de type P et de type N. La majorité des photons est absorbée dans la zone intrinsèque, où, lorsque la photodiode est polarisée, règne un champ électrique qui sépare les porteurs. La zone traversée par la lumière (P ou N) doit être de faible épaisseur, et recouverte d'une couche antireflet qui améliore le rendement quantique externe, et qui protège le matériau [6].

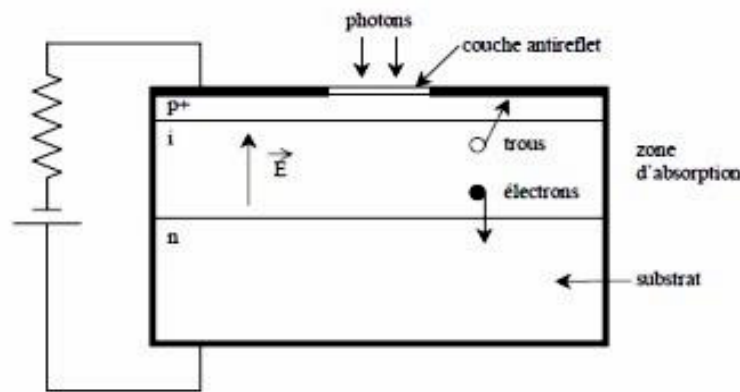


Figure I.15 : Structure d'une photodiode PIN

IV.2.2 L'amplificateur électrique

Le signal électrique est ensuite envoyé vers un amplificateur dont le rôle est de conserver une tension électrique constante en sortie sur une certaine plage de tension d'entrée. Il adapte pour cela son gain en détectant la puissance moyenne en entrée. Le signal amplifié est ensuite filtré dans un filtre centré autour de la fréquence intermédiaire [2].

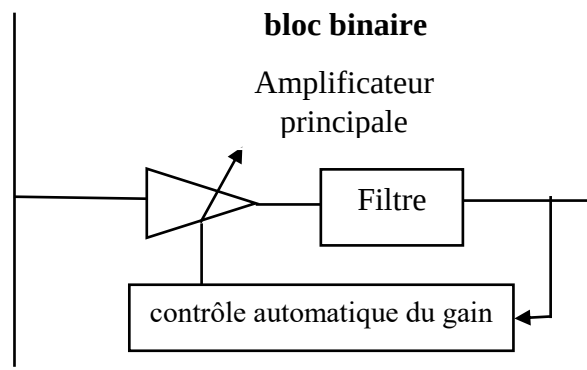


Figure I.16 : Schéma de principe d'un récepteur optique

IV.2.3 Le filtrage

Le signal électrique émis par la photodiode n'est pas parfait. Le courant photodétecté est affecté par des bruits qui contribuent à dégrader les performances des systèmes de communication. Afin de minimiser le bruit en sortie du récepteur, il faut filtrer le signal numérique dans une bande le plus petit possible, tout en ne créant pas d'interférences inter symboles. On utilise le filtre de Nyquist dont la largeur de bande de bruit,

Dans les conditions habituelles, vaut approximativement $\Delta F = 0.8 \times F_r$, avec F_r , la fréquence rythme du signal (figure I.17) [7].

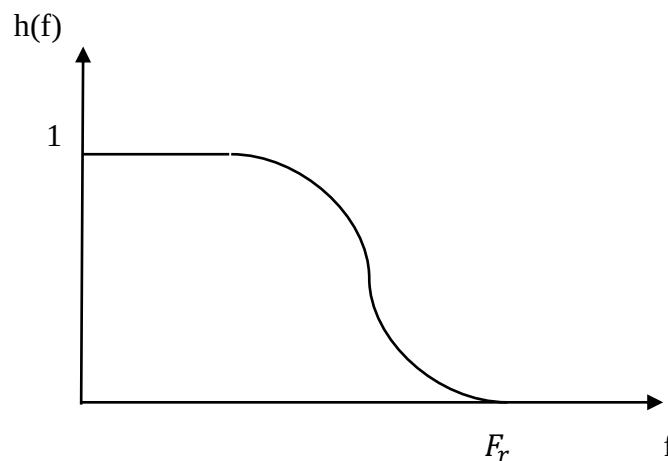


Figure I.17 : Réponses fréquentielle du filtre de Nyquist.

IV.2.4 Le régénérateur

Une fraction du signal est envoyée sur une récupération d'horloge afin de récupérer le rythme de l'information. Après avoir récupéré une horloge synchronisée aux données nous

arrivons sur le circuit de décision. Le rôle du circuit de décision est la régénération des données émises. Ce circuit de décision est piloté par une tension de seuil et l'horloge récupérée. Avec l'horloge, nous déterminons l'instant de décision qui est la plupart du temps optimal au centre du temps bit. La tension du signal reçu au moment de décision va être comparée à la tension de seuil. Si la tension reçue est inférieure (supérieure) au seuil, alors la bascule de décision génère un symbole '0' ('1' respectivement). Les données électriques transmises sont alors retrouvées au niveau du récepteur [2].

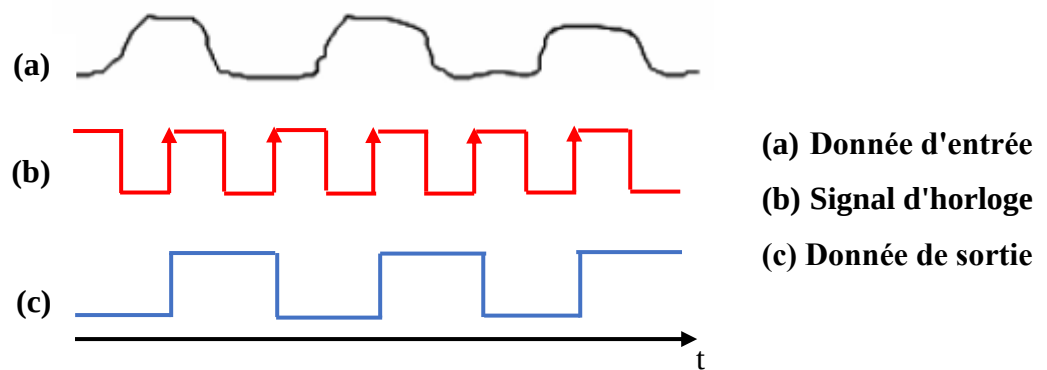


Figure I.18 : Présentation temporelle de la régénération des données d'entrée.

V. Fabrication d'une fibre optique

La fabrication d'une fibre optique passe par la réalisation d'une préforme cylindrique en barreau de silice. La silice est un composé oxygéné de silicium, de formule SiO_2 , présent dans un grand nombre de minéraux, tels que le quartz, la calcédoine et l'opale. Le barreau subit ensuite un étirage, en plaçant l'extrémité dans un four porté à une température voisine de $2000^{\circ}C$. Il est alors transformé en une fibre de plusieurs centaines de kilomètres, à une vitesse de l'ordre du kilomètre par minute. La fibre est ensuite revêtue d'une double couche de résine protectrice avant d'être enroulée sur une bobine ; Son centre, qui constitue le cœur est entouré d'une silice de moindre qualité qui forme la gaine optique. On réalise un écart d'indice entre le cœur et la gaine en incorporant des dopants, tels que :

- Le germanium et le phosphore qui accroissent l'indice dans le cœur.
- Le bore et le fluor qui le font décroître dans la gaine.

Une préforme de verre d'une longueur de 1m et d'un diamètre de 10cm permet d'obtenir par étirement une fibre monomode d'une longueur d'environ 150 Km [9].

V.1 Domaine d'application des fibres optiques

Le domaine d'application de la fibre optique est vaste. Le principal est bien entendu celui des télécommunications, mais les fibres optiques débordent largement ce secteur et connaissent un grand nombre d'applications industrielles, parmi eux on peut citer [10].

- **Les télécommunications**

En télécommunications, la fibre optique est utilisée pour la transmission d'information, que ce soit des conversations téléphoniques, des images ou des données. C'est probablement l'un des domaines où l'utilisation de la fibre optique est le plus important et a le plus d'avenir. Un fil de cuivre ne peut supporter que quelques communications, contre 300000 communications pour la fibre optique. Les fibres sont alors utilisées en particulier pour les réseaux à haut débit.

Leurs capacités de transmission atteignent des débits de l'ordre du gigabit par seconde (câbles transatlantiques) avec une atténuation très faible et grâce aux multiplexages, on atteint la centaine de Gbits/s.

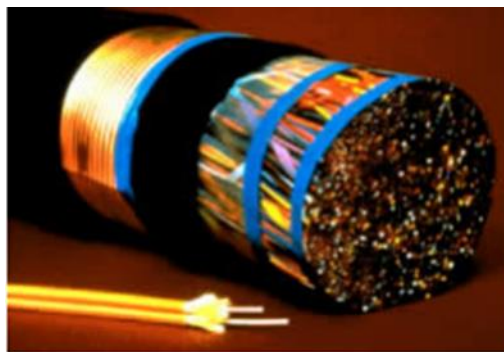


Figure I. 19 : Une seule paire de fibre optique transporte un débit 10 fois plus fort que 250 paires de fils de cuivre [10].

- **La médecine**

La première utilisation d'envergure de la fibre optique fut en médecine, domaine où elle est toujours grandement utilisée aujourd'hui. La fibre optique est utilisée en médecine tant pour diagnostiquer des problèmes de santé que pour traiter certaines maladies. Pour le diagnostic, un câble de fibres optiques transporte de la lumière à l'intérieur du corps. Cette lumière est réfléchiée par les organes internes et est captée par un autre câble de fibres optiques qui achemine cette lumière vers un système d'imagerie vidéo. Il est donc possible d'avoir un

aperçu de grande qualité de ce qui se passe dans le corps, et ce, en temps réel. Un exemple de cette utilisation est l'endoscope, particulièrement utilisé en gastro-entérologie.



Figure I.20 : Un endoscope.

Pour un traitement, la fibre optique sert à transporter la lumière intense d'un laser à l'intérieur du corps humain où elle interagira par effet thermique avec les tissus : en chirurgie associée à un faisceau laser qui permet de : pulvériser un calcul rénal, découper une tumeur, réparer une rétine, ...



Figure I.21 : utilisation de la fibre optique dans la chirurgie.

La fibre optique facilite donc le travail des professionnels de la santé ainsi que la vie de leurs patients. Les interventions sont moins complexes, moins dangereuses et moins invasives que la chirurgie traditionnelle. De plus, puisqu'elles ne nécessitent le plus souvent qu'une

anesthésie locale, le patient peut subir l'intervention et retourner chez lui la même journée. L'application de ces techniques de diagnostic et de traitement a donc eu une incidence importante sur le plan économique [10].

- **Les capteurs (température, pression, etc.)**

Un domaine où la fibre optique a trouvé une application plus récemment est celui de la mesure. La fibre optique, comme tout objet, subit les influences de différents paramètres. Elle sera, entre autres, légèrement déformée lorsqu'elle est soumise à une pression, une force, une contrainte ou une variation de température. La déformation subite par la fibre optique aura une influence sur la façon dont la lumière s'y propage. Il est possible de mesurer ces modifications et de convertir cette mesure en unités de pression, de température ou de force, selon ce qu'on désire mesurer. Ces capteurs ont l'avantage d'être très petits, très précis et insensibles aux perturbations électromagnétiques.

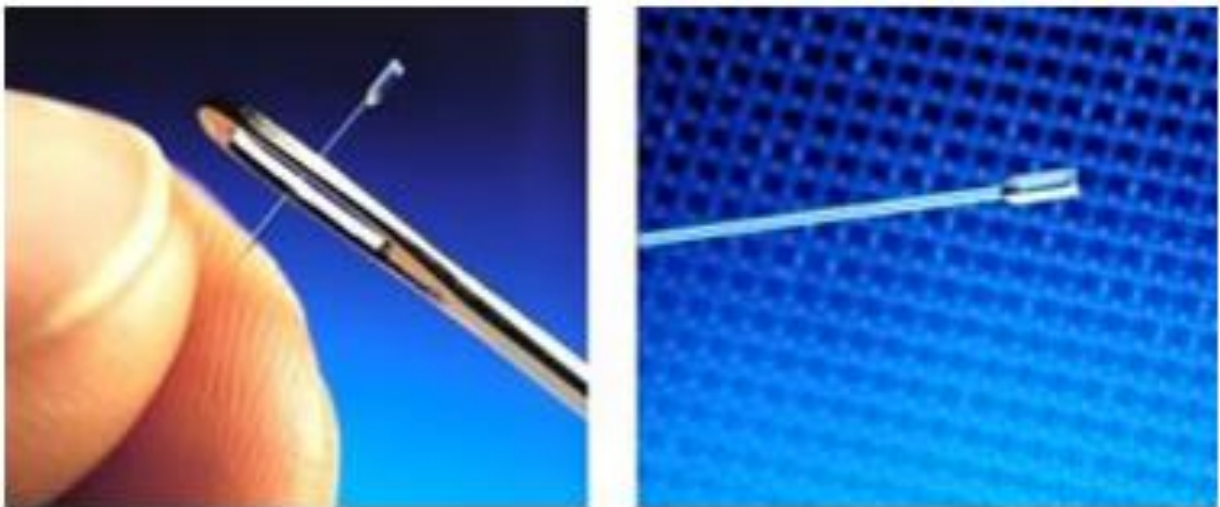


Figure I.22 : Capteur pour mesurer la pression dans les vaisseaux sanguins [10].

- **L'éclairage**

Dans le domaine de l'éclairage, les fibres optiques sont aussi très utilisées, en muséographie, architecture, et aménagement d'espaces d'agrément public et domestique. Enfin, dans le balisage, la décoration, la signalétique d'orientation ou encore en signalisation routière, les fibres optiques sont des outils couramment utilisés [10].

VI. Les principales différences entre la fibre optique et câble coaxial

Généralement, la fibre optique est un support orienté qui transmet les signaux d'un appareil à un autre sous forme de lumière (forme optique). Alors que le câble coaxial transmet les signaux sous forme électrique.

Tableau I.2 : Les principales différences entre la fibre optique et câble coaxial [11].

Base de comparaison	Fibre optique	Câble coaxial
De base	La transmission du signal est sous forme optique (forme légère).	La transmission du signal est sous forme électrique
Composition du câble	Verre et plastiques	Plastique, feuille métallique et fil métallique (généralement en cuivre).
Pertes de câble	Dispersion, flexion, absorption et atténuation.	Perte résistive, rayonnée et diélectrique.
Efficacité	Haute	Faible
Coût	Très cher	Moins cher
Taux de transmission de données	2 Gbps	44.736 Mbps
Installation du câble	Difficile	Facile
Bande passante fournie	Très élevé	Modérément élevé
Immunité au bruit	Haute	Intermédiaire
Poids du câble	Plus léger	Plus lourd comparativement
Champ magnétique externe	N'affecte pas le câble	Affecte le câble
Diamètre du câble	Plus petit	Plus grand

VII. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions importantes des réseaux Wan (Wide Area Network), Man (Metropolitan Area Network) et Lan (Local Area Network). Nous sommes notamment intéressés à la façon dont le signal optique est émis, transmis, régénéré et détecté. La description complète d'une liaison optique composant par composant, a été effectuée.

Nous avons présenté le laser et les caractéristiques du signal émis ont été décrits en détail, nous occuperons surtout de la qualité du signal optique émis par les diodes lasers et des différentes contributions de bruit et les limitations de ce type de composants telles que le chirp, et les caractéristiques du signal de réception et les principales différences entre Diode électro-luminescente et Diode laser. En fin nous avons décrit brièvement les domaines d'application des fibres optiques et les principales différences entre la fibre optique et câble coaxial.

Chapitre II

Généralités sur La fibre optique

I. Introduction

Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin, qui a la propriété de conduire la lumière. Elle sert en général à la transmettre des signaux optiques et par conséquent d'informations. Elle offre un débit d'informations très supérieur à celui des câbles coaxiaux. Un réseau de fibres optiques se caractérise par une bande passante très large par laquelle peuvent transiter simultanément aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence, les données informatiques, etc. Dans ce chapitre, nous allons présenter les fibres optiques, afin d'avoir les connaissances requises pour comprendre l'étude théorique relative aux modes de propagation, qui fait l'objet du présent travail.

II. La fibre optique

Une fibre optique classique est composée des éléments suivants (Figure II .1) :

- **Cœur** : C'est la zone qui confine la lumière lors de sa traversée dans la fibre optique. Il est en verre ou en plastique mais le plus souvent en silice (verre).
- **Gaine** : C'est une fine couche qui entoure le cœur de la fibre optique. Elle sert de barrière pour contenir les ondes lumineuses. En effet, son indice de réfraction va provoquer la réflexion de la lumière à l'intérieur du cœur, ce qui permet donc la propagation de la lumière le long du cœur de la fibre. Elle est généralement en silice mais avec un indice de réfraction légèrement différent de celui du cœur du fait de leur différence de composition.
- **Couche protectrice** : C'est une couche de plastique qui permet d'absorber les chocs et fournit une protection supplémentaire à la fibre. L'épaisseur des revêtements est exprimée en micromètres (μm) et peut aller de 250 à 900 μm [12].

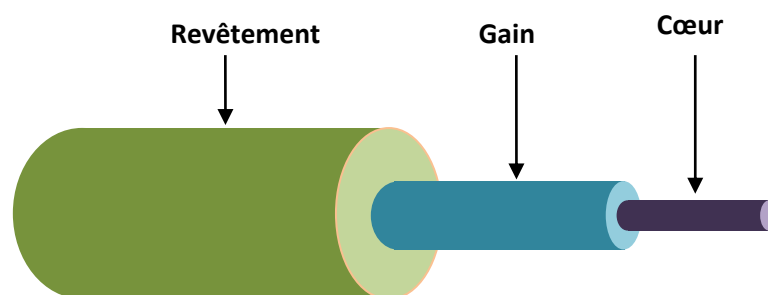
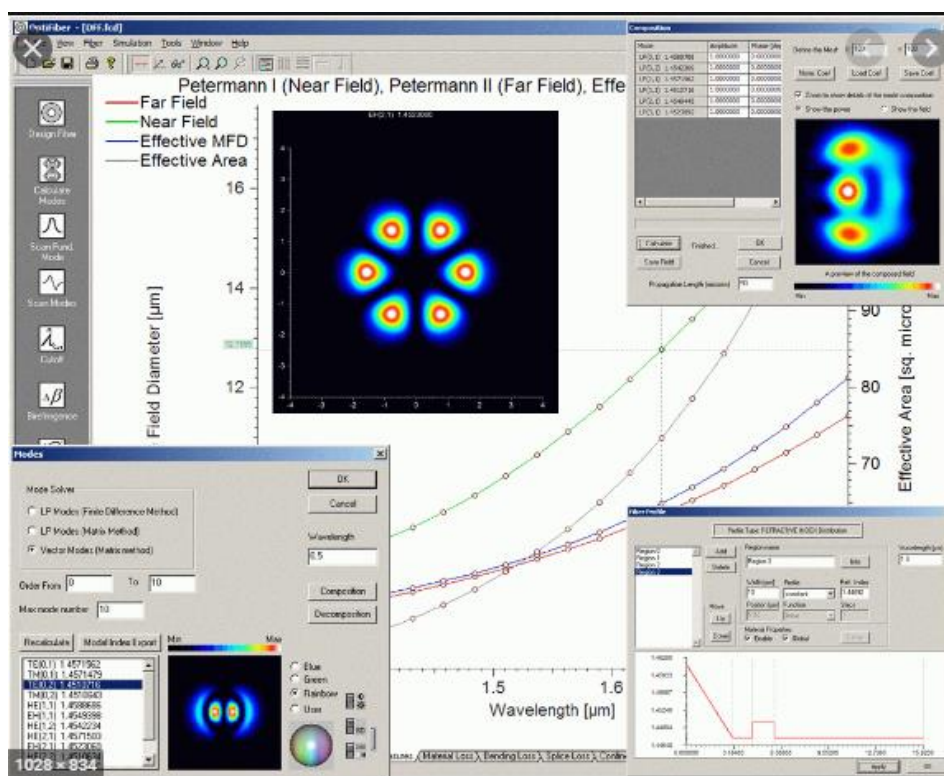


Figure II.1 : Structure d'une fibre optique.

III. Présentation du logiciel Optiwave Système

Optiwave est un leader émergent dans le développement de logiciels innovants pour la conception, la simulation et l'optimisation de composants, de liaisons, de systèmes et de réseaux pour les domaines des nanotechnologies photoniques, de l'optoélectronique, des réseaux optiques et d'autres applications photoniques [16].

OptiFiber : La conception optimale d'un système de communication optique dépend directement du choix des paramètres de la fibre. Les dimensions de la section transversale de la fibre, la composition du matériau et le profil de l'indice de réfraction influencent tous les phénomènes importants linéaires et non linéaires. OptiFiber utilise des solveurs en mode numérique et d'autres modèles spécialisés dans les fibres pour calculer la dispersion, les pertes, la biréfringence et la PMD [7].



OptiSystem : Dans une industrie où la rentabilité et la productivité sont essentielles au succès, OptiSystem permet de minimiser les contraintes de temps et de réduire les coûts liés à la conception des systèmes optiques, des liaisons et des composantes. OptiSystem est un outil de conception de logiciels innovant, évolutif et puissant.

Il permet aux utilisateurs de planifier, de vérifier et de simuler presque tous les types de liaisons optiques dans la couche de transmission d'un large éventail de réseaux optiques : LAN, SAN, MAN aux portées ultra-longues. Il offre une conception des couches de transmission de communication optique et une planification des composantes jusqu'au niveau du système, et présente visuellement l'analyse et les scénarios [7].

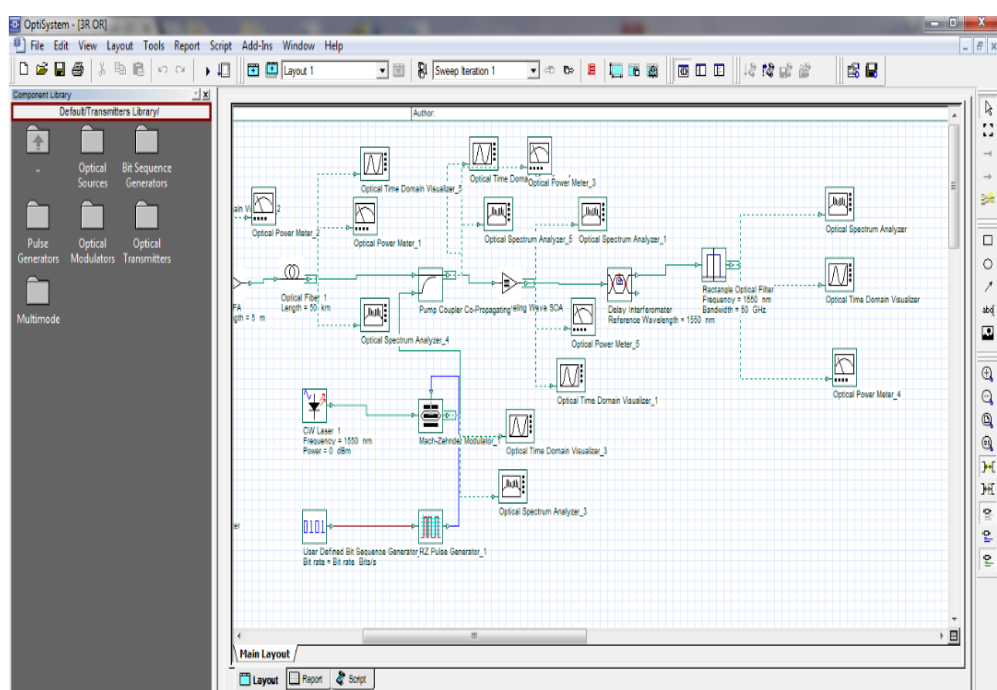


Figure II.3. L'interface de travail sur OptiSystem.

IV. Evolution de la transmission de signaux par fibre optique

La fibre, présente une atténuation quasi constante sur une plage de fréquences considérable (plusieurs milliers de gigahertz) et offre ainsi l'avantage de bandes passantes gigantesques, ce qui permet d'envisager aujourd'hui la transmission de débits très importants (plusieurs téraoctets par seconde) exigés par la multiplication des services et les besoins accrus de transmission d'images. Les systèmes optiques permettent aussi, par rapport aux systèmes sur câble coaxial (cuivre), un gain sur la distance séparant les différents répéteurs-régénérateurs, qui est passée de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres. Dès 1978, des systèmes travaillant à la longueur d'onde optique de 0,8 μm ont été mis en place, acheminant un débit compris entre 50 et 100 Mbit/s avec un espacement entre répéteurs de l'ordre de 10 kilomètres, c'est-à-dire trois fois plus environ que les systèmes sur câble coaxial de capacité équivalente.

La deuxième génération de systèmes de transmission sur fibre optique, apparue dans les années 1980, découle directement de la mise au point de la fibre monomodale et du laser à semiconducteur à 1,3 μm , longueur d'onde pour laquelle la dispersion chromatique (c'est-à-dire la distorsion induite sur les signaux par la propagation) est minimale. Des débits supérieurs à 1 Gbit/s, avec un espacement entre répéteurs de plusieurs dizaines de kilomètres, sont alors atteints. Les portées de ces systèmes sont limitées par les pertes de la fibre, 0,5 dB/km dans le meilleur cas, et l'idée apparaît alors de développer des sources émettant à la longueur d'onde de 1,55 μm , pour laquelle l'atténuation est minimale. Néanmoins, ce gain est détruit par l'effet de la dispersion chromatique, qui est beaucoup plus forte à cette longueur d'onde et qui limite alors la bande passante et donc le débit. Des progrès effectués tant sur les lasers émettant sur un seul mode que sur le milieu de transmission (fibres à dispersion décalée) viennent apporter des solutions à ces problèmes et les premiers systèmes travaillant à 1,55 μm apparaissent à la fin des années 1980, avec un débit supérieur à 2 Gbit/s. L'apparition des amplificateurs à fibre à la fin des années 1980, puis le développement du multiplexage en longueur d'onde ont fait de l'optique une technique surpassant toutes les autres en capacité comme en qualité de transmission, dans les réseaux interurbains constitués d'artères de grosse capacité qui relient les grandes villes. Cette suprématie a également affecté les liaisons internationales à haut débit

qui sont aujourd'hui exclusivement assurées par des câbles sous-marins à fibres optiques [13].

V. Le principe de propagation de la lumière dans une fibre optique

La vitesse de la lumière dépend du matériau ou du milieu qu'elle traverse. Dans l'espace libre, la lumière se déplace à la vitesse maximale possible de 3×10^8 m/s. Lorsque la lumière traverse un matériau, elle présente certains comportements expliqués par les lois de la réflexion, de la réfraction, etc. Ces lois doivent être expliquées avant d'étudier comment la lumière se déplace réellement à travers une fibre optique [7].

- ✓ **L'indice de réfraction** : Est une grandeur qui caractérise les propriétés optiques d'un matériau, on peut définir cette grandeur par [7] :

$$\eta = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (\text{II.1})$$

Ou

ϵ_r : La permittivité relative du milieu.

μ_r : La perméabilité relative du milieu.

✓ **Réflexion** :

Il y a réflexion lorsque la lumière change brutalement de direction mais tout en restant dans le même milieu de propagation. On distingue deux types de réflexion :

- La réflexion métallique où le facteur de réflexion énergétique est proche de 1 : c'est de cette réflexion que l'on parle lorsque la lumière arrive sur un miroir plan, constitué d'une couche métallique déposée sur un support et recouvert d'une plaque de verre.
- La réflexion vitreuse : elle se produit lorsque la lumière est interceptée par un dioptré, surface de séparation entre deux milieux transparents. Le facteur de réflexion est plus faible que dans le cas d'une réflexion métallique, puisqu'outre la lumière réfléchie, il y a une partie qui est transmise (réfractée) dans le second milieu [14].

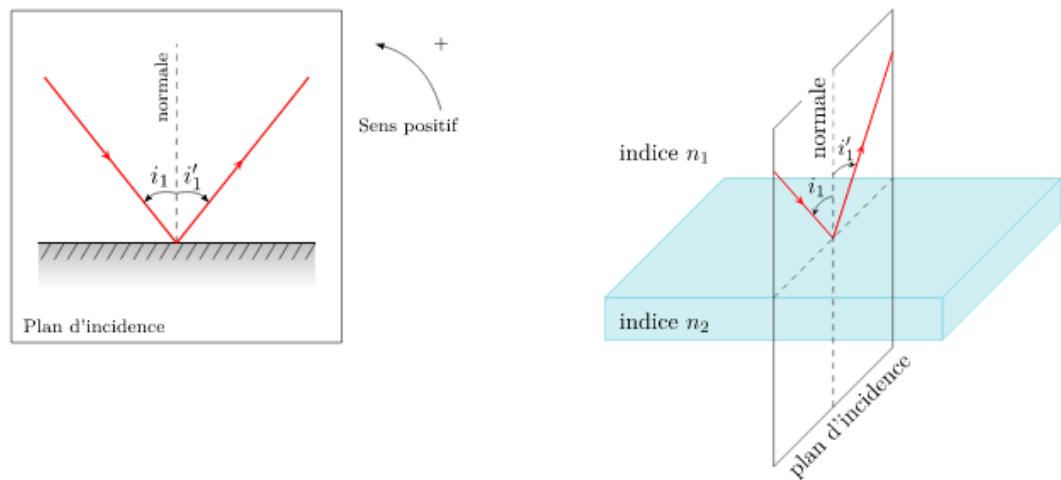


Figure II.4 : Principe de réflexion.

- Le rayon réfléchi appartient au plan d'incidence défini par la normale au dioptre et le rayon incident
- Les angles d'incidence i_1 et de réflexion i_1' vérifient :

$$(i_1 = i_1'). \quad (\text{II.2})$$

- ✓ **Réfraction** : Il y a réfraction quand il y a changement de direction de propagation de la lumière lorsque celle-ci traverse un dioptre et change donc de milieu transparent.
- Le rayon réfracté appartient au plan d'incidence.
- Les angles d'incidence i_1 et de réfraction i_2 vérifient

$$\eta_1 \sin i_1 = \eta_2 \sin i_2 \quad (\text{II.3})$$

Si $\eta_2 > \eta_1$, on dit que le milieu (2) est plus réfringent ; en passant du milieu (1) au milieu (2), la lumière s'approche alors de la normale [14].

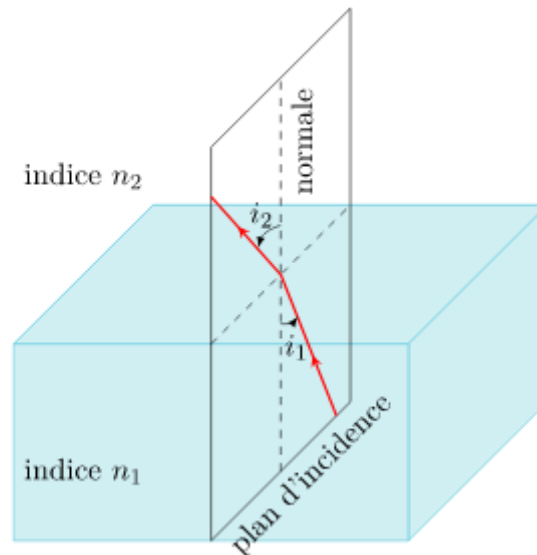


Figure II.5 : Passage d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent : le rayon s'éloigne de la normale.

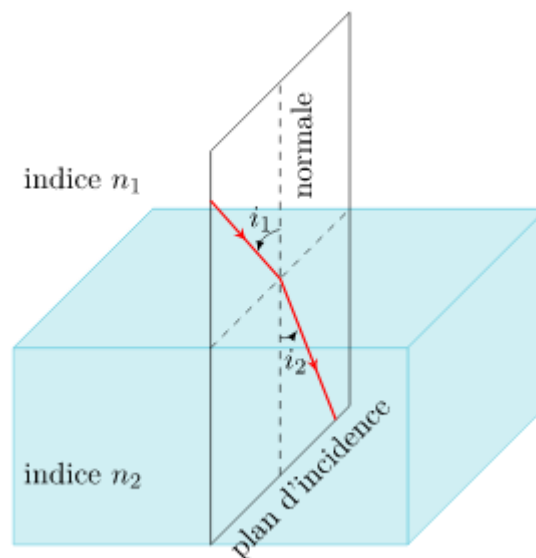


Figure II.6 : Passage d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent : le rayon se rapproche de la normale.

- Les valeurs de l'angle réfracté i_2 sont liées à celles de i_1 et de n_2/n_1 . Il s'en suit plusieurs conséquences :
- ✓ **Réfraction limite** : Propagation vers un milieu plus réfringent, Le rayon réfracté $i_2 < i_1$ existe et atteint une valeur limite donnée par $i_1 = 90^\circ$ et $\sin i_{2l} = n_1/n_2$ [14].

- ✓ **Réflexion totale** : Propagation vers un milieu moins réfringent (Si $n_2 < n_1$), le rayon réfracté s'éloigne de la normale. Il existe alors un angle limite d'incidence i_l tel que $\sin i_l = n_2/n_1$ et tel que $i < i_l$ 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 [14].

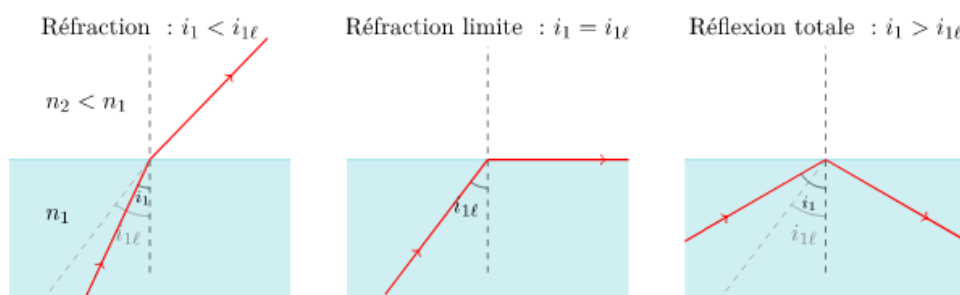


Figure II.7: Phénomène de réflexion totale.

Les propriétés de guidage de la fibre sont basées sur la physique de la réflexion interne totale (Figure II.8). Le cœur et la gaine de la fibre ont des indices de réfraction différents. Ainsi, pour que la lumière se propage, l'indice de réfraction du cœur de la fibre doit être supérieur à l'indice de réfraction de la gaine, de sorte que l'effet miroir se produise à l'intérieur de la gaine. Par conséquent, la lumière est confinée dans le cœur. Pour une propagation de la lumière sans perte dans une fibre, tous les rayons lumineux atteignant l'interface entre le cœur et la gaine doivent obéir à des conditions de réflexion interne totale [7].

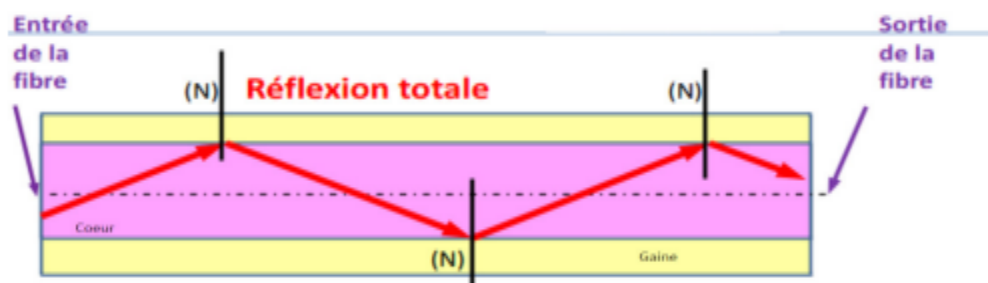


Figure II.8: Principe du guidage dans la fibre optique par réflexion totale interne.

V.1 Ouverture numérique :

Le guidage de la lumière dans le cœur ne pourra se faire que si l'indice de réfraction du cœur est supérieur à celui de la gaine. Tous les rayons arrivant sur l'interface cœur-gaine avec un angle d'incidence $\theta_{0\max}$ plus grand que θ_0 de réflexion totale se propageront dans le cœur par suite de multiple réflexion.

Pour que la lumière soit guidée dans le cœur de la fibre il faut que la condition de réflexion totale interne soit respectée, c'est à dire :

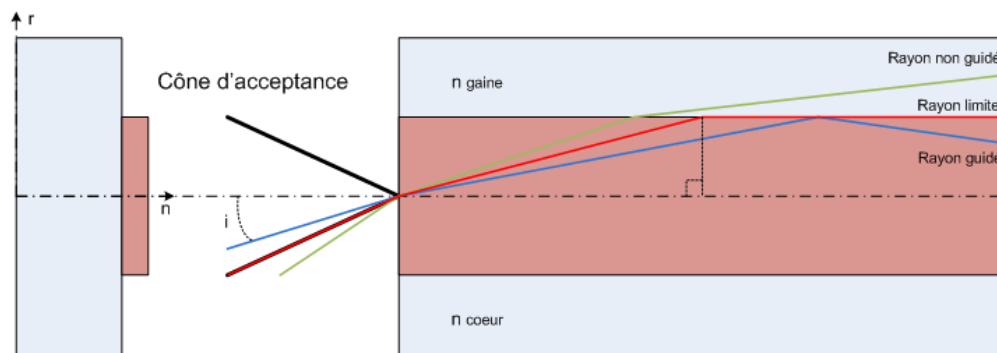


Figure II.9: Cône d'acceptance.

Bien que cette condition de guidage soit suffisante, il est plus commode de connaître la condition que doivent vérifier les rayons à l'entrée dans le guide. On remonte pour cela à l'entrée du guide et on écrit la loi **Snell Descartes** qui lie l'angle d'incidence θ_0 à l'angle θ dans la fibre. En considérant le milieu d'entrée comme étant l'air, l'indice $n_0 = 1$, on peut écrire :

$$n_0 \cdot \sin \theta_{0\max} = n_1 \cdot \sin \theta_c = n_1 \cdot \cos \phi_{\min} = n_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (\text{II.4})$$

La condition de guidage par réflexion totale est donc obtenue pour tout angle d'injection θ_0 inférieur à un angle $\theta_{0\max}$ correspondant à l'angle limite de réflexion totale θ_c . Nous avons donc une réflexion totale si : $\theta_0 < \theta_{0\max}$.

Soit :

$$\sin\theta_{max} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad (\text{II.5})$$

Avec n_c l'indice du cœur et n_g l'indice de la gaine.

Dans le cas d'une fibre à gradient d'indice, on remplace n_c par $n_c(0)$ qui représente l'indice de réfraction du premier niveau du cœur, soit l'indice de réfraction du centre du cœur.

Une caractéristique très importante des fibres optiques est l'ouverture numérique ON défini par :

$$ON = \sin\theta_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (\text{II.6})$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (\text{II.7})$$

Avec Δ est la différence d'indice relative [15].

V.2 Types des fibres optiques

Dans la spécialité des télécommunications, il y a deux types de fibres optiques utilisées :

- Les fibres monomodes.
- Les fibres multimodes.

La différence entre ces deux types de fibres optiques est la dimension du cœur, où il est de 10μm pour les fibres monomodes et de 50μm pour les fibres multimodes [10].

V.2.1 Fibres optiques monomode

Les fibres monomodes ont un diamètre de cœur (10 microns), faible par rapport au diamètre de la gaine (125 microns) et proche de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière injectée.

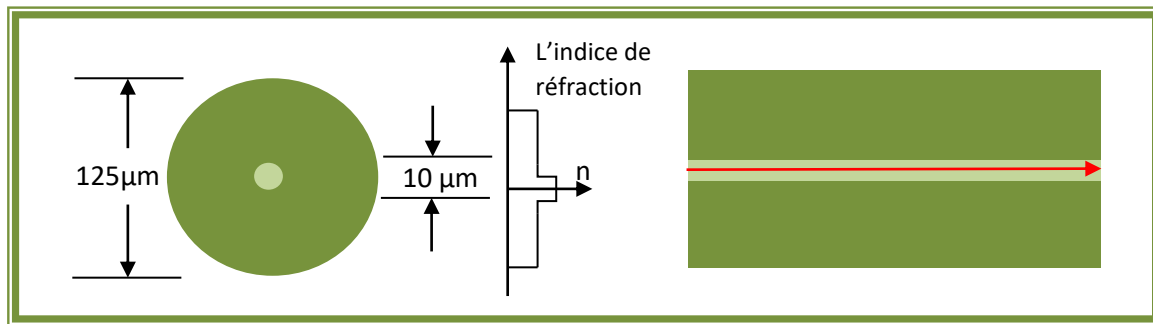


Figure II.10: Profile d'une fibre optique monomode.

L'onde se propage alors sans réflexion et il n'y a pas de dispersion modale. Le petit diamètre du cœur des fibres monomodes nécessite une grande puissance d'émission qui est délivrée par des diodes laser. Les caractéristiques essentielles d'une fibre optique monomode pour la transmission d'un signal sont :

- L'affaiblissement (dB) par unité de longueur (Km), qui est fonction de la longueur d'onde, soit 0,36 dB/Km à 1300 nm et 0,2 dB/Km à 1550 nm.
- La dispersion chromatique, qui conduit à un élargissement d'une impulsion lumineuse du fait de la variation des vitesses de propagation, ce qui est pénalisant dans le cas d'une modulation directe (1 ou 0) du signal optique.
- La dispersion des modes de polarisation (PMD), qui se caractérise par un étalement spectral en ligne
- La longueur d'onde de coupure. Dans les fibres monomodes il existe deux groupes.
- Les fibres monomodes avec profil à gradient d'indice, qui ne sont pas beaucoup utilisées en télécommunications.
- Les fibres avec profil à saut d'indice, avec un diamètre du cœur allant de 9 à 10 μm et un diamètre de gaine 125 μm, qui sont plus utilisées dans les télécommunications. Contrairement à la fibre multimodes la propagation dans la fibre monomode s'effectue avec un seul mode dit mode fondamental [10].

V.2.2 Fibres optiques multimodes

Les fibres multimodes ont un diamètre de cœur important (de 50 à 85 microns). Un rayon lumineux pénétrant dans le cœur de la fibre, à l'une de ses extrémités, se propage longitudinalement jusqu'à l'autre extrémité grâce aux réflexions totales qu'il subit à l'interface entre le verre de cœur et le verre de gaine. Plusieurs modes (chemins optiques) se propagent dans ce type de fibre optique. Selon les différents chemins empruntés par les rayons, ils arrivent avec des temps différents. Ce qui provoque une forte dispersion du signal lumineux, due à la multiplication des modes de propagations (dispersion modale).

Parmi les fibres multimodes, on distingue les fibres à saut d'indice (débit limité à 50 Mb/s) et les fibres à gradient d'indice (débit limité à 1 Gb/s) [10].

V.2.2.1 Fibres multimodes à saut d'indice

Dans ce type de fibre l'indice de réfraction reste constant dans tout le cœur de la fibre, et à l'interface gaine cœur il décroît brusquement en effectuant un saut d'indice dans la gaine [10].

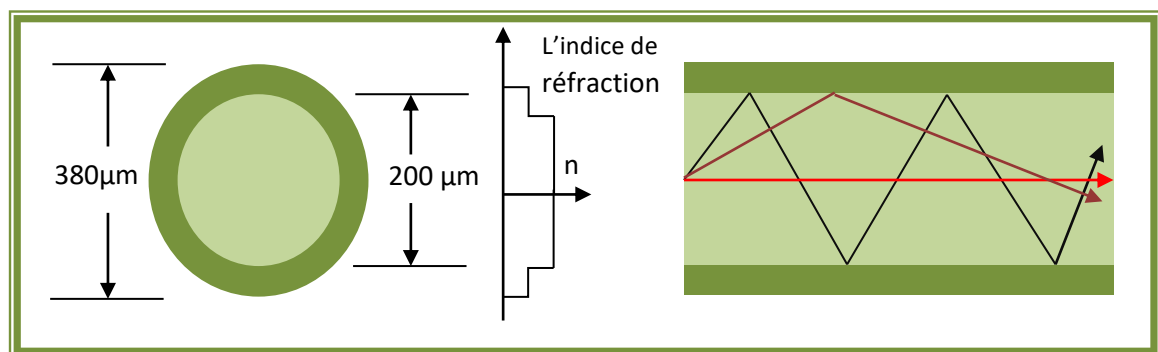


Figure II.11: Profile d'une fibre optique multimode à saut d'indice.

V.2.2.2 Fibres multimodes à gradient d'indice

Dans ce type de fibre l'indice du cœur n'est pas constant mais possède une symétrie autour de l'axe ; l'indice est modifié de sorte à créer un gradient d'indice. Les différences de temps de propagation sont réduites et les écarts entre chemins optiques sont diminués.

Le guidage de la lumière est dû à l'effet du gradient d'indice. En subissant de légères réfractions à l'approche de la gaine, le signal optique forme un signal

sinusoïdal et les rayons suivent une trajectoire d'allure sinusoïdale. La gaine ne joue pas un rôle actif mais élimine les rayons trop inclinés.

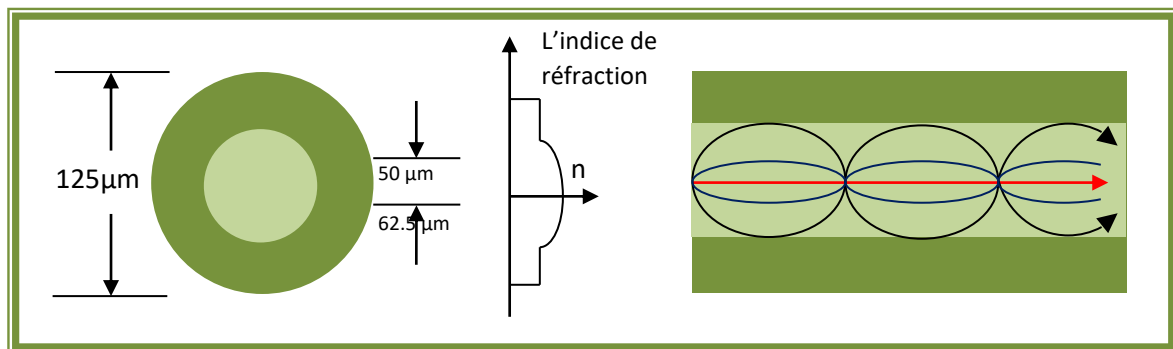


Figure II.12: Profile d'une fibre optique multimode gradient d'indice.

L'atténuation sur ce type de fibre est moins importante que sur les fibres à saut d'indice.

Les fibres à gradient d'indice sont les plus utilisées pour les moyennes distances [10].

VI. Paramètres caractérisent le type d'une fibre optique :

La fibre optique est caractérisée par plusieurs paramètres qui sont déterminés à partir de ses différents types. Les trois paramètres les plus importants sont :

- La bande passante.
- La fréquence normalisé v .
- Longueur d'onde de coupure λ_c .

VI.1 Bande passante :

La bande passante est la capacité de la fibre optique à transmettre des informations rapides. Elle est exprimée en Mhz Km ou GHz Km (débit d'information en Mhz ou GHz par seconde) pour une distance de 1 kilomètre [16].

Elle représente la fréquence maximale de transmission des impulsions. Elle est limitée par la dispersion modale et la dispersion intrinsèque du matériau. La bande passante pour une longueur de la fibre L est :

$$BP = \frac{L}{\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$\Delta\tau_1$: Le retard temporel entre le rayon le plus incliné ($\theta=\theta_c$) et le rayon parallèle à l'axe ($\theta=0^\circ$). Où : θ_c est l'angle critique

$\Delta\tau_2$: Le retard temporel résultant d'une variation de la longueur d'onde en fonction de l'indice due à la dispersion intrinsèque du matériau [17].

Remarque :

- ✓ Pour une fibre à gradient d'indice, la dispersion modale est minimale pour une distribution quasi parabolique de l'indice.
- ✓ Pour une fibre monomode, la bande passante devient théoriquement infinie, puisque la dispersion est nul ainsi que la dispersion du matériau, si on choisit convenablement le matériau et la longueur d'onde de travail [17].

VI.2 La fréquence normalisé v :

On peut également déterminer le mode pouvant se propager dans la fibre optique grâce à la fréquence normalisée v qui dépend de l'ouverture numérique, la longueur d'onde λ , et le rayon a du cœur, Elle a pour expression :

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} \times ON \quad (\text{II.9})$$

VI.3 Longueur d'onde de coupure λ_c :

Le guidage du mode varie avec la longueur d'onde :

- ✓ Aux grandes longueurs d'onde le mode est guidé.
- ✓ Aux courtes longueurs d'onde, le mode est guidé mais des modes d'ordre supérieur sont guidés aussi.

La longueur d'onde de coupure est celle au-dessus de laquelle la fibre devient monomode [18]:

$$\lambda_c = (2\pi a \times ON) / v \quad (\text{II.10})$$

ON : l'ouverture numérique.

a : le rayon du cœur.

v : fréquence normalisée.

Si : $v > 2.405$ la fibre est multimode.

Si : $v < 2.405$ la fibre est monomode.

VII. Les Caractéristiques de fibre optique :

VII.1 Atténuation :

L'atténuation du signal dépend de la nature de la fibre essentiellement en fonction de sa nature (monomode ou multimode).

Le choix de la fibre optique utilisée est principalement imposé par la longueur d'onde du signal transmis. Ainsi, pour des signaux de longueur d'onde entre 800nm et 1300nm, on est contraint d'utiliser une fibre multimode, alors que pour des signaux de longueur d'onde de 1280 à 1640 nm, on peut utiliser une fibre monomode [17].

La puissance lumineuse transportée par toute fibre optique s'atténue au cours de sa propagation. En effet la lumière est plus ou moins absorbée par le milieu traversé, et diffusée par ce même milieu ou par l'interface cœur/gaine. La réduction de puissance entre les deux extrémités d'un tronçon de fibre s'exprime en décibels (dB) par la relation [17] :

$$\alpha = -\frac{1}{L} \times \log_{10}(P_s/P_e) \quad (\text{II.11})$$

P_e : Puissance injectée à l'entrée de la fibre

P_s : Puissance reçue à la sortie de la fibre.

L : La longueur de fibre.

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 micro courbures 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 les fibres 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 montre l'atténuation spectrale d'une fibre en silice, pour les télécommunications [4].

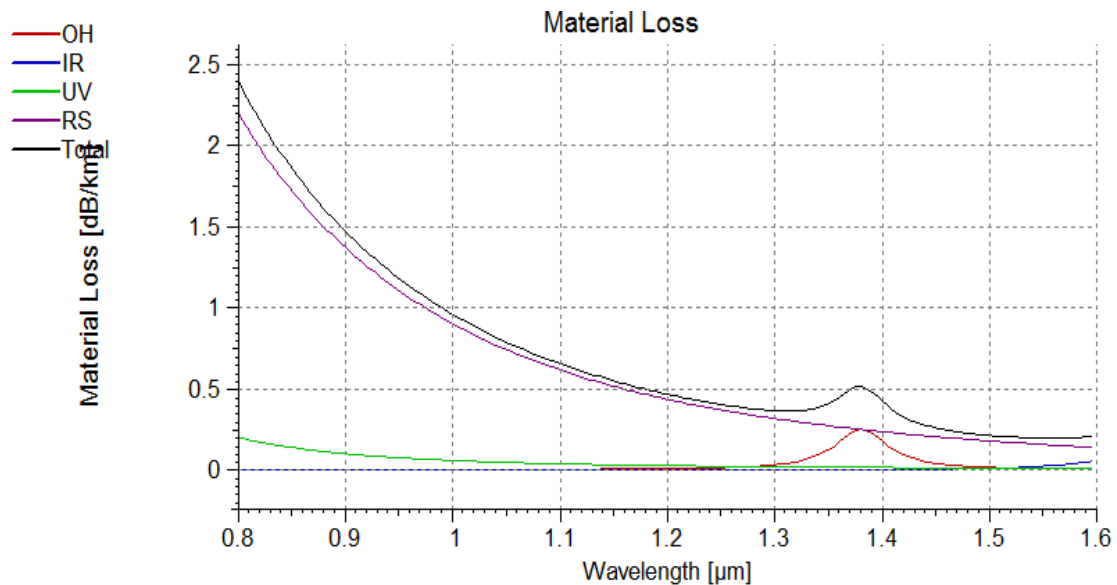


Figure II.13 : Atténuation spectrale d'une fibre optique.

Les systèmes de transmission tiennent compte de cette allure pour utiliser les fibres optiques dans des intervalles dits fenêtres optiques plus convenant quant aux effets de l'atténuation, la technologie des fibres et les dispositifs d'émission et de réception. Les sources et les photodétecteurs sont optimisés pour leur utilisation dans les fenêtres suivantes [17].

Selon l'atténuation, les fibres peuvent être utilisées pour la transmission essentiellement dans deux « fenêtres en longueur d'onde ».

Les fenêtres 1300 nm et 1500 nm. La fenêtre 800 nm étant pratiquement complètement abandonnée [5].

✓ **La première fenêtre (0.8-0.9 μm)**

- Atténuation élevée (~ 3 dB/km)
- Composants très bon marché (Diodes LED)
- ⇒ n'est utilisée qu'en multimode.

✓ **La deuxième fenêtre (1.28-1.33 μm) :**

La fenêtre à 1300 nm a une largeur de bande de 50 nm et une atténuation moyenne importante d'environ 0,4 dB/ km, mais les composants optoélectroniques à ces

longueurs d'onde (lasers et récepteurs) sont peu coûteux. Elle est utilisée pour les systèmes de télécommunications de courte distance (quelques dizaines de kilomètres) ou de faible capacité : réseaux urbains [5].

✓ **La troisième fenêtre (1.525-1.625 μm) :**

La fenêtre à 1550 nm a une largeur de bande de 100 nm et une atténuation moyenne d'environ 0,2 dB/km. Elle est utilisée généralement pour les télécommunications longues distances et à haut débit car la faible atténuation dans cette fenêtre permet d'espacer bien [5].

• **Pertes extrinsèques :**

Les pertes extrinsèques sont des pertes dues aux conditions d'utilisation et de fabrication des fibres. Il y a principalement deux types de pertes : celles qui sont dues à la pose de la fibre (courbures et micro courbures) et celles qui sont dues à la nécessité de raccorder plusieurs fibres pour couvrir de longues distances [7].

✓ **Pertes par effet de courbure :**

La courbure est le problème commun qui peut causer des pertes de fibre optique générées par une mauvaise manipulation de la fibre optique. Il existe deux types de base. L'un est la micro-courbure et l'autre est la macro-courbure (montré dans l'image ci-dessous). La macro flexion se réfère à une grande flexion de la fibre (avec un rayon supérieur à 2 mm).

Lorsqu'on courbe la fibre, une partie de l'énergie lumineuse du mode peut échapper au guidage, et se perdre dans la gaine [19].

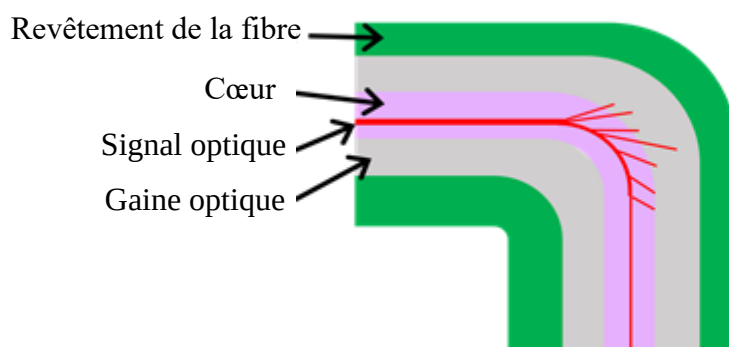


Figure II.14 : perte par courbure.

✓ Pertes par micro-courbures :

Les micros courbures sont moins connues sur les réseaux, mais pourtant bien présentes. Elles sont associées à des contraintes ponctuelles et radiales (dont la dimension géométrique est inférieure à 1 millimètre) distribuées aléatoirement le long de la fibre.

Ce type de déformation fait augmenter l'atténuation linéique de la fibre, dès les faibles longueurs d'onde contrairement au phénomène de macro-courbure. Il faut noter que l'atténuation liée aux micros-courbures croît également avec l'augmentation des longueurs d'onde mais de manière moins exponentielle que dans le cas de la macro – courbures [20].

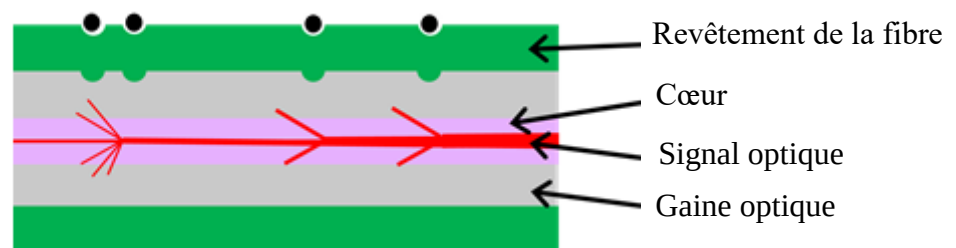


Figure II.15: perte par micro-courbure[20].

VII.2 La dispersion dans les fibres optiques

Les impulsions lumineuses qui traversent la fibre ont tendance à s'étaler, principalement à cause des temps de propagation différents. Ce phénomène est désigné globalement du nom de dispersion.

Dans une fibre optique la dispersion est la somme des trois composantes principales :

- La dispersion chromatique.
- La dispersion intermodale.
- La dispersion modale de polarisation (PMD).

VII.2.1 La dispersion chromatique

En optique la vitesse de la lumière dans le vide ne dépend pas de sa longueur d'onde, mais dans certains milieux, elle peut en dépendre c'est le phénomène de

dispersion. On trouve deux types très connus de dispersion en fibre optique, il y'a se qu'on appeler la dispersion chromatique et il y'a aussi la dispersion intermodale

La dispersion chromatique En générale c'est la variation de la vitesse des signaux lumineux de longueurs d'onde différentes. Elle définit 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 à l'élargissement temporel, les nanomètres à la largeur spectrale et les kilomètres à la longueur de fibre [10].

La dispersion chromatique est un phénomène qui entraîne l'élargissement temporel de ces impulsions du fait des différentes vitesses de propagation dans la fibre. Les impulsions risquent alors de se mélanger avec leurs voisines et provoquer ainsi des erreurs à la détection. La dispersion chromatique devient donc rapidement un facteur limitant pour les transmissions haut débit [10].

Cette figure explique le phénomène de la dispersion chromatique.

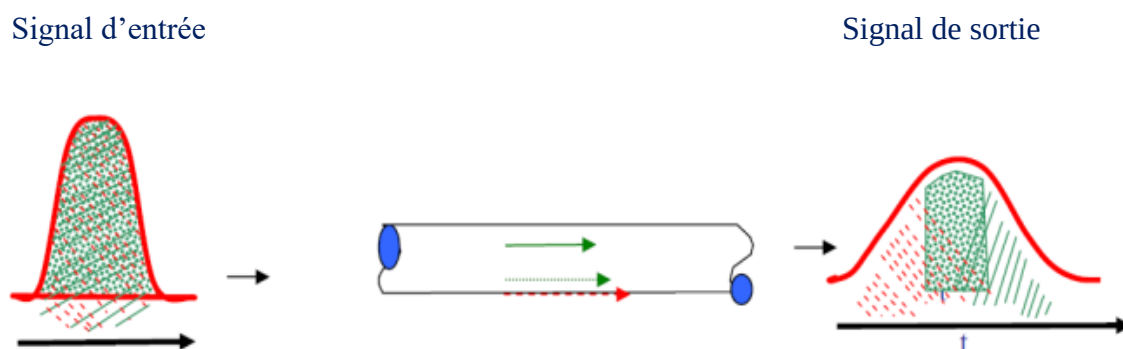


Figure II.16 : La dispersion chromatique.

Plusieurs types de dispersion existent, chacune d'elle contribuant à l'étalement de l'impulsion au cours de sa propagation dans le guide. Il faut différencier la dispersion intermodale, la dispersion du matériau, la dispersion du guide et la dispersion de polarisation.

En fait, la dispersion chromatique est la somme d'un terme de matériau pur (dispersion matériau) et d'un terme du au guidage de l'onde (dispersion modale) [10].

$$D_{ch} = D_{mat} + D_{guide} \quad (II.12)$$

Dispersion du matériau (D_{mat}) : Elle résulte du fait que la silice qui compose majoritairement la fibre optique, possède un indice optique, l'indice de réfraction, qui varie en fonction de la longueur d'onde. Cette dépendance de l'indice en fonction de la longueur d'onde induit une modification de l'indice de groupe propre au milieu et doit être incluse dans les lois de propagation de la lumière dans le guide.

La dispersion chromatique est définie comme étant la somme de deux types de dispersion (Eq. (II.12)) à condition de négliger la contribution croisée des deux dérivées premières par rapport à l'indice de réfraction n et à la fréquence V . La dispersion du matériau s'écrit alors [21].

$$D_{mat} = -\frac{\lambda}{c} \frac{dn_{coeur}^2}{d\lambda^2} \left[\frac{ps}{nm} \cdot km \right] \quad (II.13)$$

Avec n_{coeur} l'indice du cœur de la fibre (proche de n_{eff})

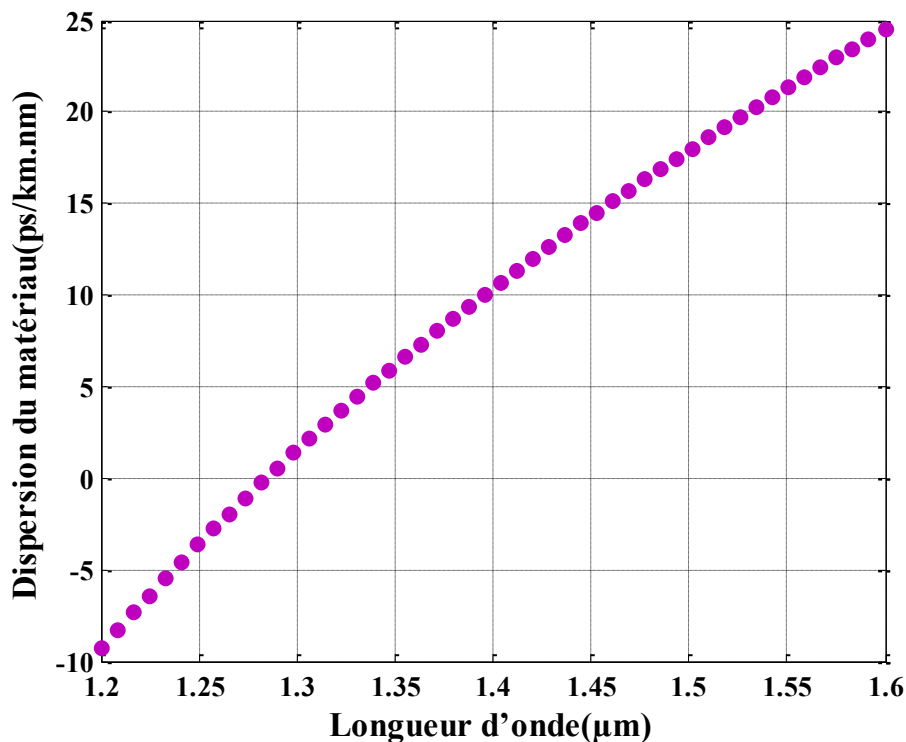


Figure II.17 : dispersions de la silice en fonction de la longueur d'onde.

Dispersion du guide (D_{guide}) : Elle résulte du fait que les ondes se propagent dans un guide d'onde et non dans un milieu illimité leur donne un indice effectif dépendant de la longueur d'onde ; cette influence du guidage entraîne une nouvelle contribution à l'évolution spectrale des temps de propagation. La dispersion du guide s'écrit [21]:

$$D_{guide} = \frac{\tau_{guide}}{\Delta\lambda L} = -\frac{n_1\Delta}{c\lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \left[\frac{ps}{nm} \cdot km \right] \quad (II.14)$$

Avec : b la constante de propagation normalisée, V la fréquence spatiale normalisée et Δ la différence d'indice relative.

$$\Delta = \frac{n_{coeur}^2 - n_{gaine}^2}{2n_{coeur}^2} \quad (II.15)$$

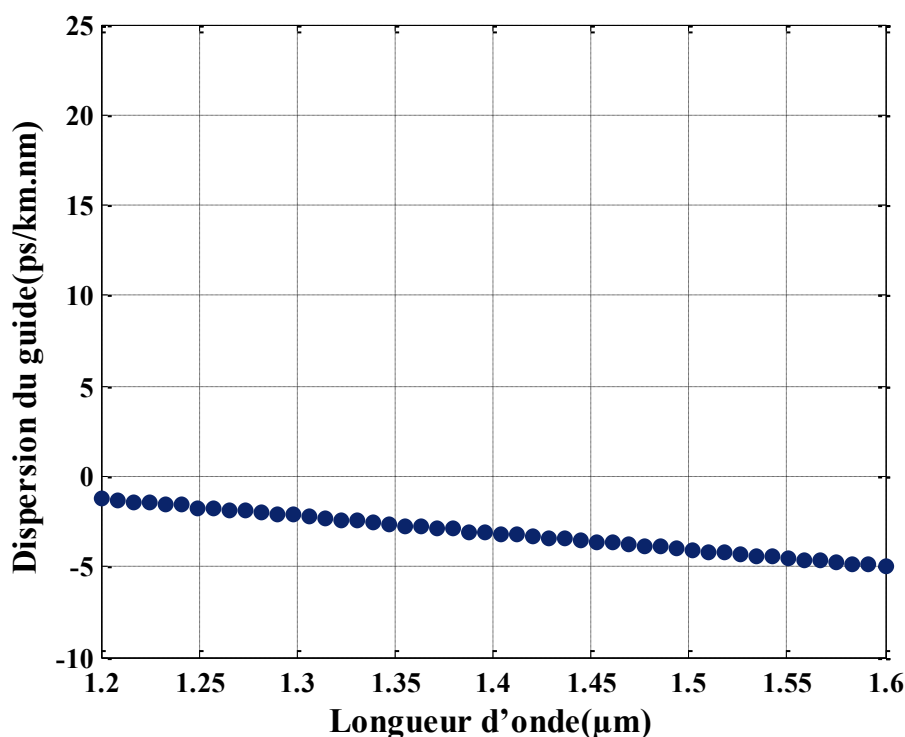


Figure II.18 : Dispersion du guide en fonction de la longueur d'onde.

Dans le domaine monomode ($V < 2,405$), la quantité $V \frac{d^2(Vb)}{dV^2}$ est toujours positive ce qui implique que la dispersion du guide est toujours négative (figure II.18).

Ont représenté sur la figure II.19 la dispersion de la silice (D_m), la dispersion du guide pour le mode fondamental d'une fibre standard monomode G.652 (D_g), et la dispersion chromatique (D) de ce mode correspondant à la somme des deux premières.

La dispersion du guide légèrement négative fait que la longueur d'onde d'annulation de la dispersion chromatique ($1,3\mu\text{m}$) est légèrement supérieure à la longueur d'annulation de la dispersion du matériau ($1,27\mu\text{m}$), donc la capacité de transmission est la plus grande possible pour cette longueur d'onde.

Par conséquent, il s'intègre bien dans cette fenêtre spectrale et peut transmettre des débits de données très élevés. Malheureusement, ce n'est pas là que l'atténuation est la plus faible. Dans la fenêtre d'atténuation de la fibre la plus basse, à , la dispersion modale fondamentale d'une fibre monomode est caractérisée [7].

Par conséquent, il s'intègre bien dans cette fenêtre spectrale et peut transmettre des débits de données très élevés. Malheureusement, ce n'est pas là que l'atténuation est la plus faible. Dans la fenêtre d'atténuation de fibre la plus basse, à , la dispersion modale fondamentale d'une fibre monomode est typiquement 17 ps/Km.nm .

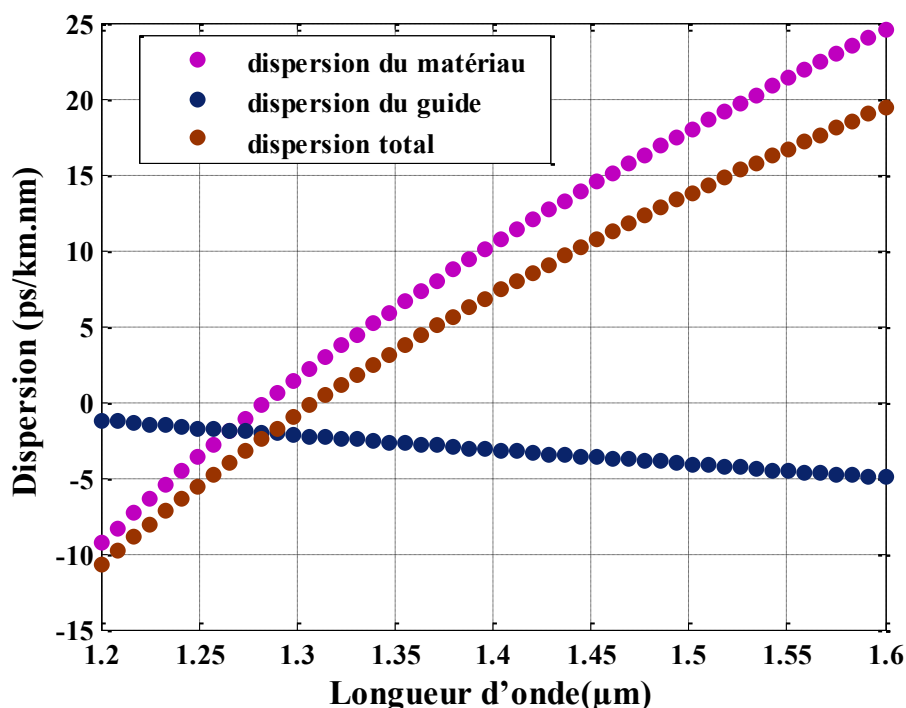


Figure II.19 : Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique d'une fibre monomode à saut d'indice.

Finalement la dispersion chromatique s'exprime sous la forme suivante d'après l'équation [21] :

$$D_{ch} = \frac{n_1 \Delta}{c \lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} - \frac{\lambda}{c} \frac{dn_{coeur}}{d\lambda^2} \left[\frac{ps}{nm} \cdot km \right] \quad (II.16)$$

▪ **Effets de la dispersion chromatique 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 (figure II.20). Cet élargissement τ se calcule ainsi :

$$\tau = D(ps/(nm \cdot km)) \cdot L(km) \cdot \Delta\lambda(nm) \quad (II.17)$$

Avec D le coefficient de dispersion chromatique de la fibre, L la longueur de la fibre et $\Delta\lambda$ 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 $1,55\mu m$ (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 [4].

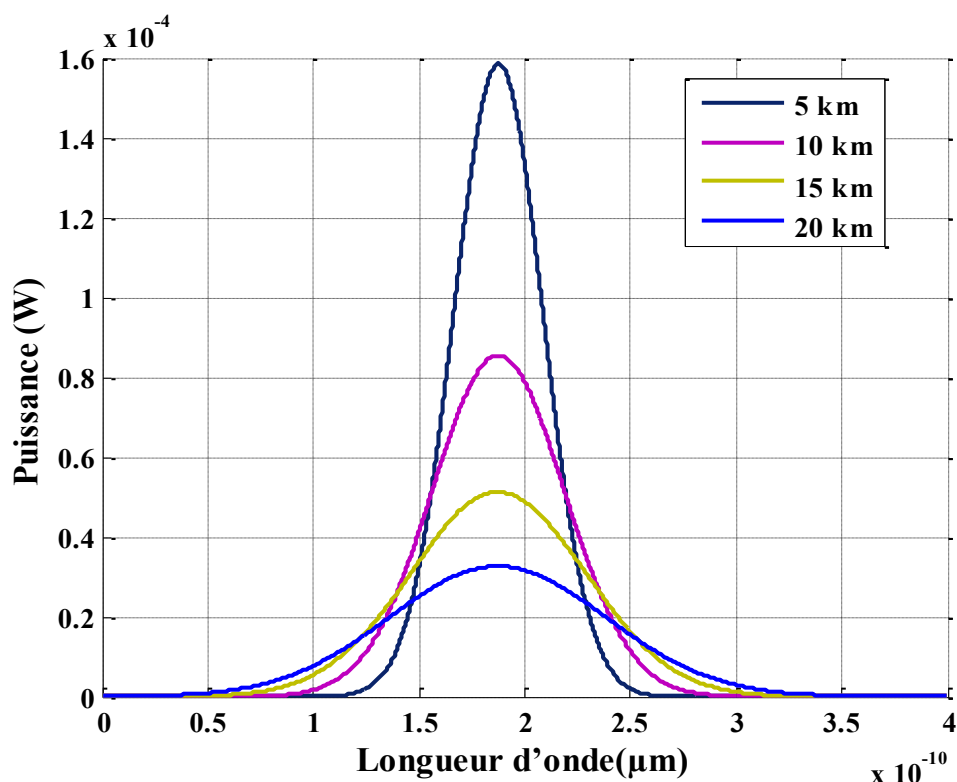


Figure II.20: Effet de la dispersion chromatique et l'atténuation sur une impulsion gaussienne.

▪ **Différentes techniques de compensation de la dispersion chromatique :**

L'augmentation du débit sur les lignes de transmission utilisées aujourd'hui a fait de la dispersion chromatique un problème majeur, plus ces débits seront élevés, plus le recouvrement peut se produire rapidement, et plus des techniques de compensation élaborées devront être mises en œuvre. Il existe deux approches pour combattre ces effets. La première est d'utiliser des fibres avec des dispersions réduites (installation d'un nouveau réseau et donc de nouvelles fibres). La seconde est de créer des modules compensateurs de dispersion chromatique lors de la mise à jour des lignes de transmission [22].

➤ **Contrôle de la dispersion par l'utilisation de fibres à profil d'indice particulier :**

Comme la dispersion chromatique est la somme de la dispersion du matériau et de celle du guide, ceci caractérise le fait qu'à la fois l'indice et la constante de propagation du signal dépendent de la longueur d'onde. Ainsi, en changeant l'une ou

l'autre de ces deux composantes, en utilisant par exemple des dopants ou en jouant sur le profil d'indice ou une autre géométrie du guide, on peut obtenir des fibres ayant des courbes de dispersion différentes de celle de la fibre standard [22].

✓ **Fibre à dispersion décalée :**

Disponibles depuis 1985, ces fibres, communément appelées DSF (Dispersion Shifted Fibre) ayant un zéro de dispersion dans la bande C, entre 1530 et 1570 nm. Elles sont normalisées sous le nom de fibre ITU-T G-653 (figure II.21).

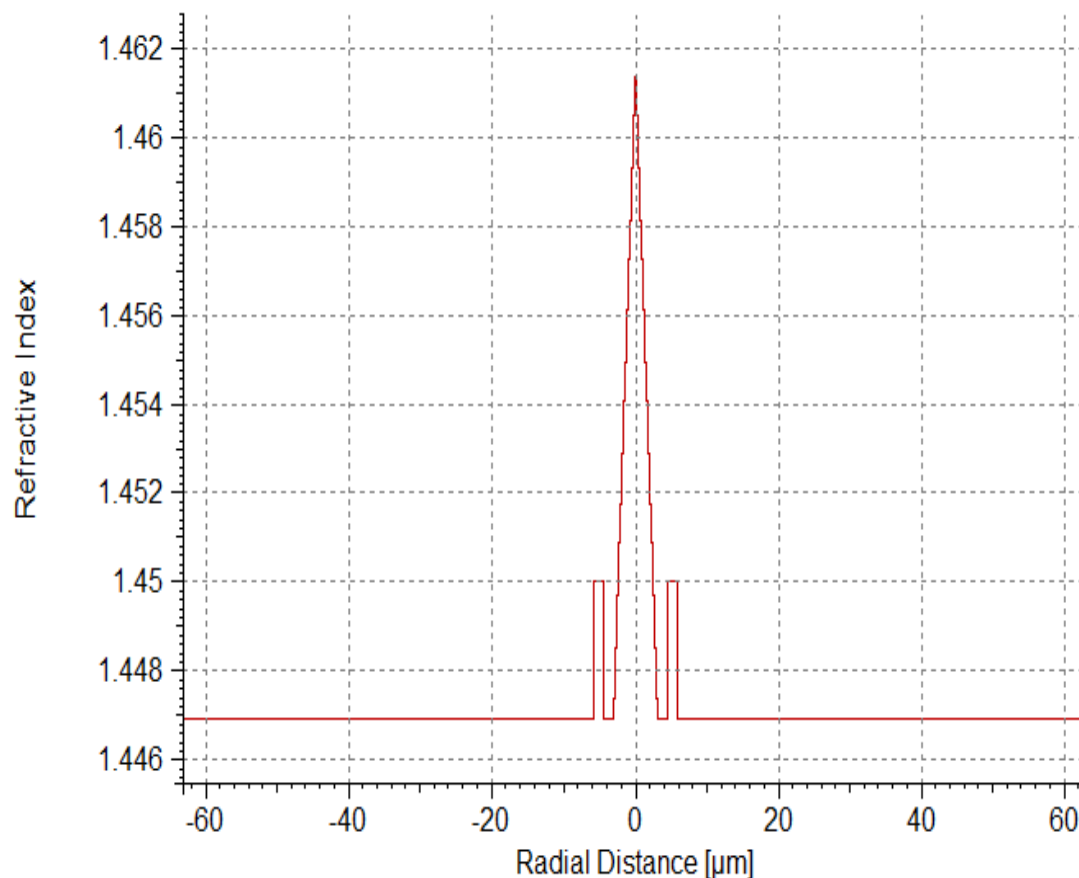


Figure II.21 : Profil d'indice de la fibre à dispersion décalée la G-653.

En utilisant une fibre « à gaine enterrée » (une fibre optique à saut d'indice présentant une valeur d'indice non constante dans la gaine optique) permet si les paramètres optogéométriques sont convenablement déterminés, de décaler la longueur d'onde pour laquelle la dispersion chromatique est nulle. Ceci est réalisé en introduisant des valeurs plus faibles de « a » et plus forts de Δ que ceux d'une fibre standard [22].

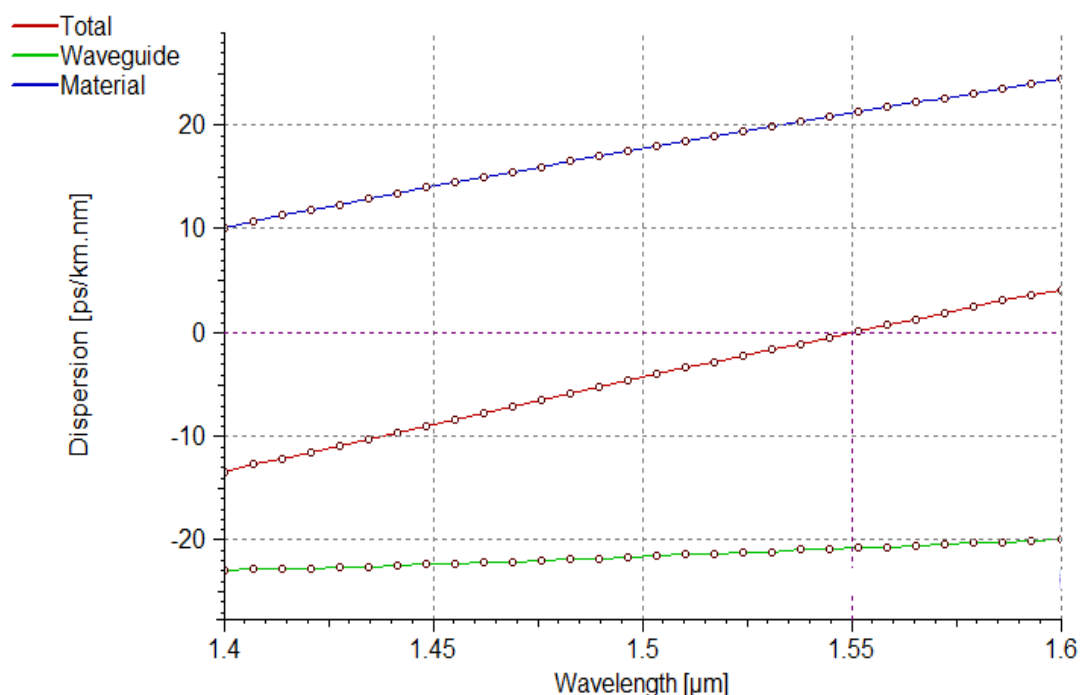


Figure II.22 : Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique de la fibre G-653

Bien que les DSF soient performantes pour des systèmes de transmission monocanal elles sont utilisables pour le WDM, la dispersion nulle autour de 1550 nm entraînant des effets non linéaires comme (FWM). Il a donc fallu développer des fibres à dispersion décalée non nulle [22].

✓ **Fibre à dispersion décalée non nulle :**

Ces fibres sont normalisées sous le nom de fibre ITU-T G-655 mais sont plus communément appelées NZ-DSF (Non Zero Dispersion Shifted Fibre). Comme leur nom l'indique, les NZ-DSF sont des fibres monomodes DSF dont la particularité est de présenter un zéro de dispersion décalé ne se trouvant pas dans la bande C de 1530 à 1565 nm il y a ceux qui ont un zéro avant la bande C (autour de 1520 nm), on les appelle NZDSF- (pour Non Zero DSF) ou après la bande C (autour de 1580 nm), ce sont les NZDSF+. Leur dispersion est comprise entre 4 et 8 ps/(nm.km) à 1550 nm. Ayant une dispersion plus faible que la SMF, la NZ-DSF permet d'augmenter la distance de transmission. Ainsi, pour un débit de 10 Gb/s, le signal peut être transmis sur une distance de 500 km (5 fois plus qu'une SMF).

La figure suivante illustre les courbes de dispersion de diverses fibres citées au-dessus :

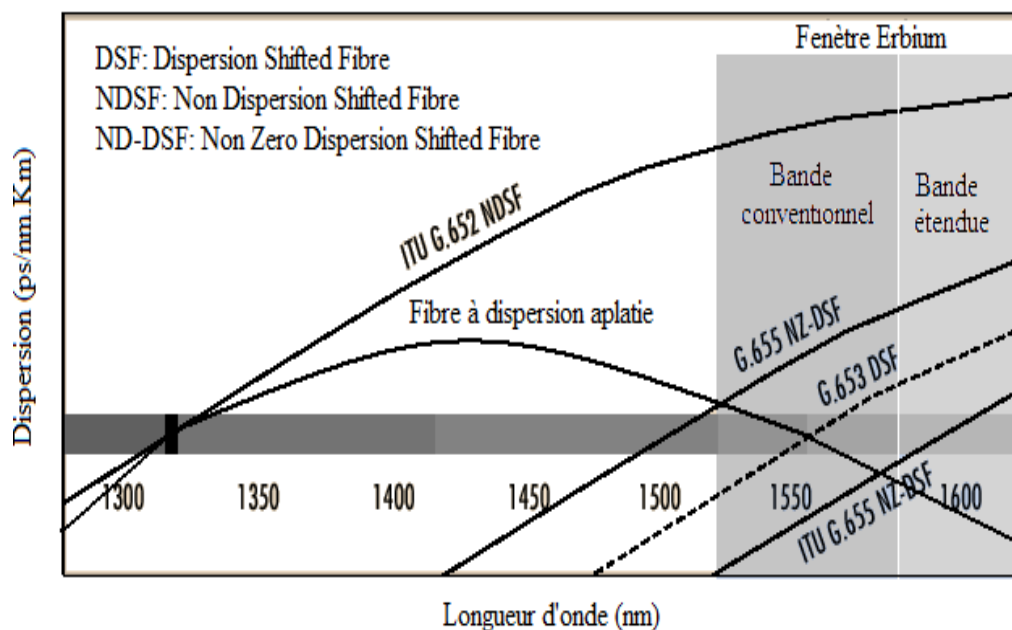


Figure II.23: Variation de la dispersion en fonction de la longueur d'onde pour différents types de fibre.

Bien que ces fibres soient intéressantes pour la construction de nouveaux réseaux, il serait trop coûteux de remplacer toutes les liaisons déjà existantes [22].

➤ **Fibre compensatrice de dispersion :**

Ce sont des fibres qui sont conçues pour avoir de fortes dispersions négatives grâce à des modifications de leurs paramètres optogéométriques. On peut utiliser aussi bien le mode fondamental que des modes d'ordre supérieur.

✓ **Fibres compensatrices DCF (Dispersion Compensating Fiber)**

Par design du profil d'indice de la fibre, il est possible d'ajuster la dispersion du guide et d'obtenir ainsi une fibre à dispersion négative (jusqu'à -200 ps/(nm.km)), qui servir en fibre compensatrice de dispersion DCF. Cette technique est considérée comme meilleure solution permettant de minimiser les pénalités introduites par la dispersion chromatique sur une large bande de longueurs d'onde. Et c'est cette solution qui sera utilisée pour notre étude.

Elle consiste alors à introduire un tronçon de longueur adapté de cette fibre dont la dispersion est de signe opposé par rapport à celle de la fibre de ligne, mais il n'est pas possible de ramener la dispersion chromatique cumulée à zéro périodiquement simultanément sur toute une bande de plusieurs nanomètres en ajoutant simplement une seule et même valeur négative. L'idée est alors de combiner les deux fibres en utilisant le bon rapport de longueur donné par :

$$k = \frac{L_{\text{fibredeligne}}}{L_{DCF}} = \left| \frac{D_{chDCF}}{D_{chFibredeligne}} \right| \quad (\text{II.18})$$

La dispersion chromatique totale (ou cumulée) notée D_c est alors définie par :

$$D_c = D_{chFibredeligne} L_{Fibredeligne} + D_{chDCF} L_{DCF} \approx 0 \quad (\text{II.19})$$

Cette valeur (appelée aussi D_c résiduelle) doit être ramenée à zéro (ou autour d'une valeur faiblement positive) en fin de chaque section. D'après la relation on doit obtenir une valeur de D_c la plus négative possible pour limiter la longueur de fibre compensatrice à insérer.

La DCF est caractérisée par sa simplicité de mise en œuvre et sa bonne résistance aux éléments extérieurs, son avantage majeur est son caractère large bande, mais elle présente aussi des inconvénients comme les pertes linéiques non négligeables. [22]

✓ **Fibre utilisant un mode d'ordre supérieur :**

La compensation de dispersion par mode d'ordre supérieur (HOM-DCF pour Higherorder-mode Dispersion Compensating Fiber) utilise la propriété de fortes dispersions négatives des modes d'ordre élevés se propageant dans une fibre optique. La propagation du signal est réalisée par un mode d'ordre supérieur et plus par le mode fondamental. Cette technique permet d'obtenir une grande pente de dispersion relative K (par exemple $K = -5,4$ au lieu de $-1,4$ ps/nm² pour une compensation en mode fondamental) [22].

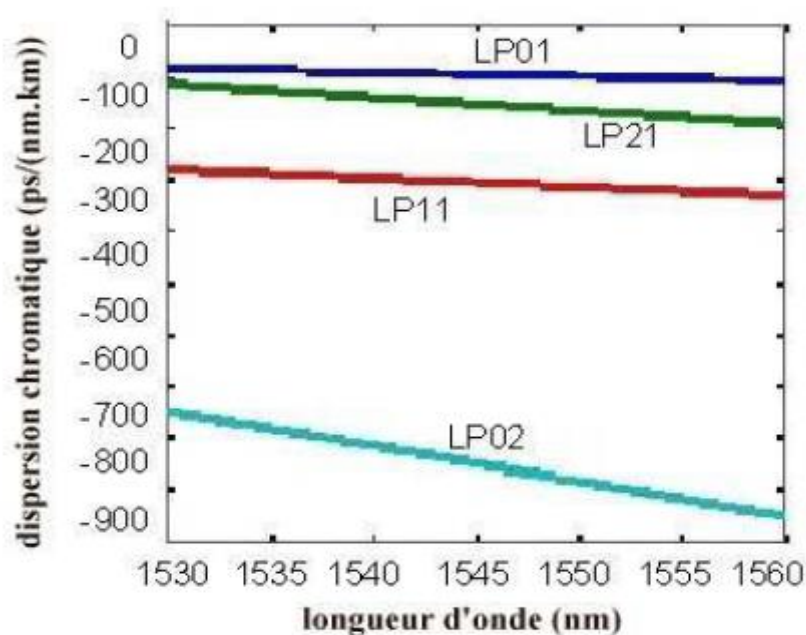


Figure II.24 : Dispersion chromatique d'un compensateur de dispersion HOM utilisant le mode LP02.

De plus les HOM-DCF ont une plus grande aire effective pouvant aller jusqu'à être quatre à cinq fois plus grande que les SM-DCF (pour Single Mode DCF qui sont les fibres qui utilisent le mode fondamental), ce qui augmente la puissance seuil pour les effets non-linéaires. Cependant, ne travaillant pas au mode fondamental, cette technologie nécessite l'ajout de convertisseurs de modes en entrée et sortie, ce qui augmente le coût du module de compensation aussi bien que ses pertes [22].

VII.2.2 Dispersion intermodale

La cause principale de l'élargissement des impulsions dans les fibres optiques multimodes est la dispersion intermodale. Cet élargissement est provoqué par les différences des temps de parcours des rayons (ou des modes). La dispersion intermodale D_i est l'élargissement temporel maximum τ d'une impulsion par unité de longueur de fibre [22].

$$D_i = \frac{t_{max} - t_{min}}{L} = \frac{\tau}{L} \left(ps/km \right) \quad (II.20)$$

Avec t_{max} et t_{min} respectivement le temps de parcours du mode le plus lent et celui du mode le plus rapide. Dans une fibre à saut d'indice, le rayon le plus rapide est celui dont le trajet est parallèle à l'axe de la fibre. Ce rayon est associé à l'angle θ égal à 0 et au mode appelé « mode fondamental » LP01. De même, le rayon le plus lent fait un angle θ_{max} par rapport à l'axe de la fibre avec θ_{max} défini par :

$$\theta_{max} = \left(\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1} \right) \quad (\text{II.21})$$

$$\text{Et} \quad \tau = t_{max} - t_{min} = n_1 \cdot t_{min} \cdot \Delta \quad (\text{II.22})$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (\text{II.23})$$

Finalement on exprime la dispersion intermodale par :

$$D_i = \frac{n_1 \Delta}{c} \quad (\text{II.24})$$

L'obtention d'une dispersion intermodale réduite se fait en minimisant Δ ou en utilisant une fibre à gradient d'indice. En effet, dans ce cas-là, l'indice de réfraction n_1 du cœur décroît avec le rayon de celui-ci de sorte que les rayons axiaux (à trajet court) voient un indice élevé (leur vitesse c/n est alors réduite) tandis que les rayons périphériques (à trajet long) voient un indice plus bas (vitesse accrue) [23].

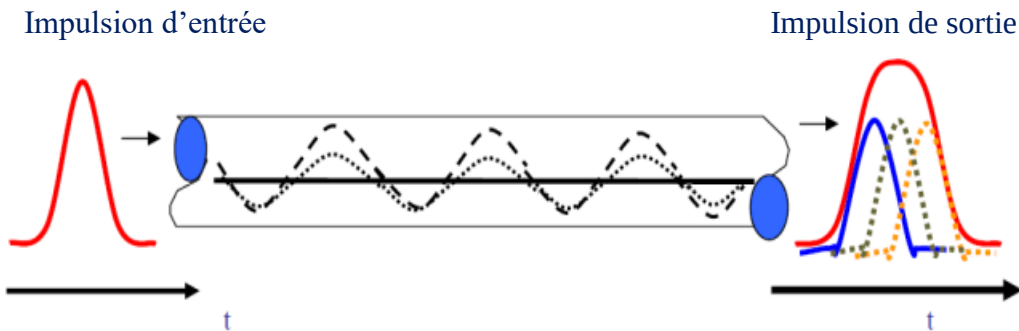


Figure II.25 : Dispersion intermodale dans une fibre optique.

VII.2.3 La dispersion modale de polarisation (PMD) :

Il existe une autre forme de dispersion qui perturbe la propagation des signaux dans une fibre optique : la dispersion de polarisation.

L'origine de la PMD vient du fait que le mode fondamental d'une fibre monomode est une combinaison de deux modes électromagnétiques notés et qui ne se propagent pas à la même vitesse de groupe [7].

Les paramètres opto-géométriques d'une fibre dite idéale sont à symétrie de révolution dans une section droite. Cependant en réalité, des imperfections de fabrication ou des contraintes mécaniques conduisent à briser cette symétrie. Par conséquent, le cœur central peut alors présenter une légère ovalisation qui va entraîner des contraintes radiales différentielles engendrant ce qu'on appelle une biréfringence.

Dans ce cas-là, la dégénérescence entre les modes électromagnétiques est levée.

Donc pour le mode fondamental LP₀₁ d'une fibre anisotrope, les deux modes électromagnétiques HE_{11}^x et HE_{11}^y qui le composent voyagent à des vitesses de phase différentes (donc $n_{eff}^x \neq n_{eff}^y$) et donnent lieu à un élargissement de l'impulsion [21].

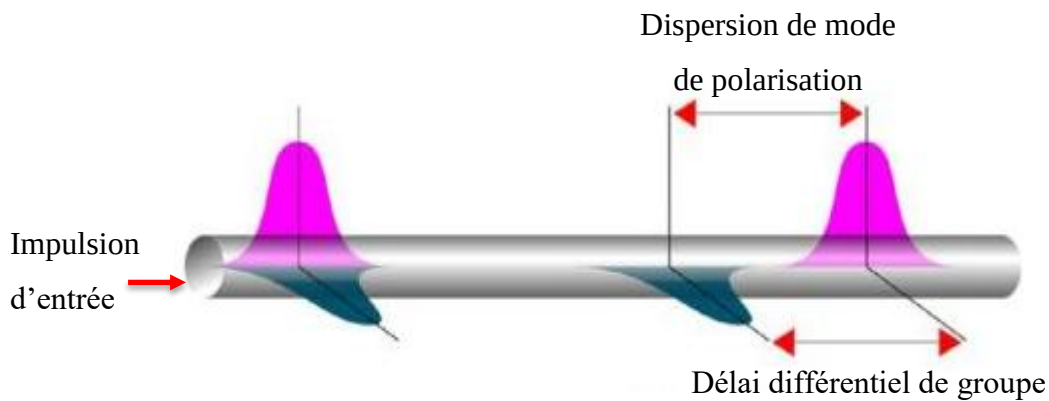


Figure II.26 : Illustration de la dispersion de polarisation intermodale.

La biréfringence traduit cette différence d'indice effectif et s'écrit :

$$B = |n_{eff}^x - n_{eff}^y| \quad (II.25)$$

La longueur de battement entre ces deux modes électromagnétiques notée L_B correspondant à la distance de propagation entre deux accords de phase de ces modes, est déduite de la biréfringence :

$$L_B = \frac{\lambda}{B} \quad (\text{II.26})$$

La biréfringence renseigne donc sur la capacité d'une fibre à maintenir un état de polarisation injecté mais elle est aussi à l'origine de la dispersion modale de polarisation appelée communément PMD (pour Polarisation Mode Dispersion). En effet, l'existence de deux modes de polarisation (pour le LP01) entraîne une dispersion de type intermodal exprimée en $ps/km^{1/2}$ et définie par :

$$PMD = \frac{1}{c} \left(\lambda \frac{dB}{d\lambda} - B \right) \quad (\text{II.27})$$

Il faut noter que cette dispersion est aléatoire dans le temps et l'espace puisque les contraintes accidentelles locales vont dépendre des vibrations, de la température, du vieillissement ... donnant naissance à une biréfringence locale dont les axes et les amplitudes varient dans le temps. C'est pourquoi la biréfringence locale est traitée de façon statistique. De plus, il existe entre les deux polarisations un effet de couplage analogue au couplage des modes entraînant la non conservation d'un état initial de polarisation pour un mode donné au cours de la propagation (hormis fibres spéciales dites à maintien de polarisation). La valeur de cette dispersion est faible, mais pas forcément négligeable devant la dispersion chromatique. Pour les fibres modernes standard, la PMD est typiquement de l'ordre de $0,05 ps/km^{1/2}$ [21].

VIII. Multiplexage en longueur d'onde (WDM) :

Les besoins croissants en débit ont amené à rechercher une technique pour augmenter les capacités de transmission des réseaux optiques. L'une des solutions à cette demande est de poser plus de câble ; mais cette solution pose des problèmes d'ingénierie. Une autre solution beaucoup plus efficace et meilleure est de multiplier

le débit par câble (sur une seule fibre) ; ce procédé est obtenu par la technologie WDM qui consiste en un multiplexage en longueur d'onde.

L'un des éléments primordiaux de la technique du multiplexage est l'amplificateur optique. L'apparition de l'amplification optique fut le véritable point de départ du développement de la technologie WDM longue portée. En effet, l'amplificateur procure un avantage économique décisif par son aptitude à amplifier l'ensemble des N longueurs d'ondes.

De ce fait, un seul amplificateur se substitue aux N régénérateurs en chaque site de ligne, procurant ainsi une économie d'équipements croissante avec le nombre de canaux et la longueur de la liaison comme le montre la figure II.27 [24].

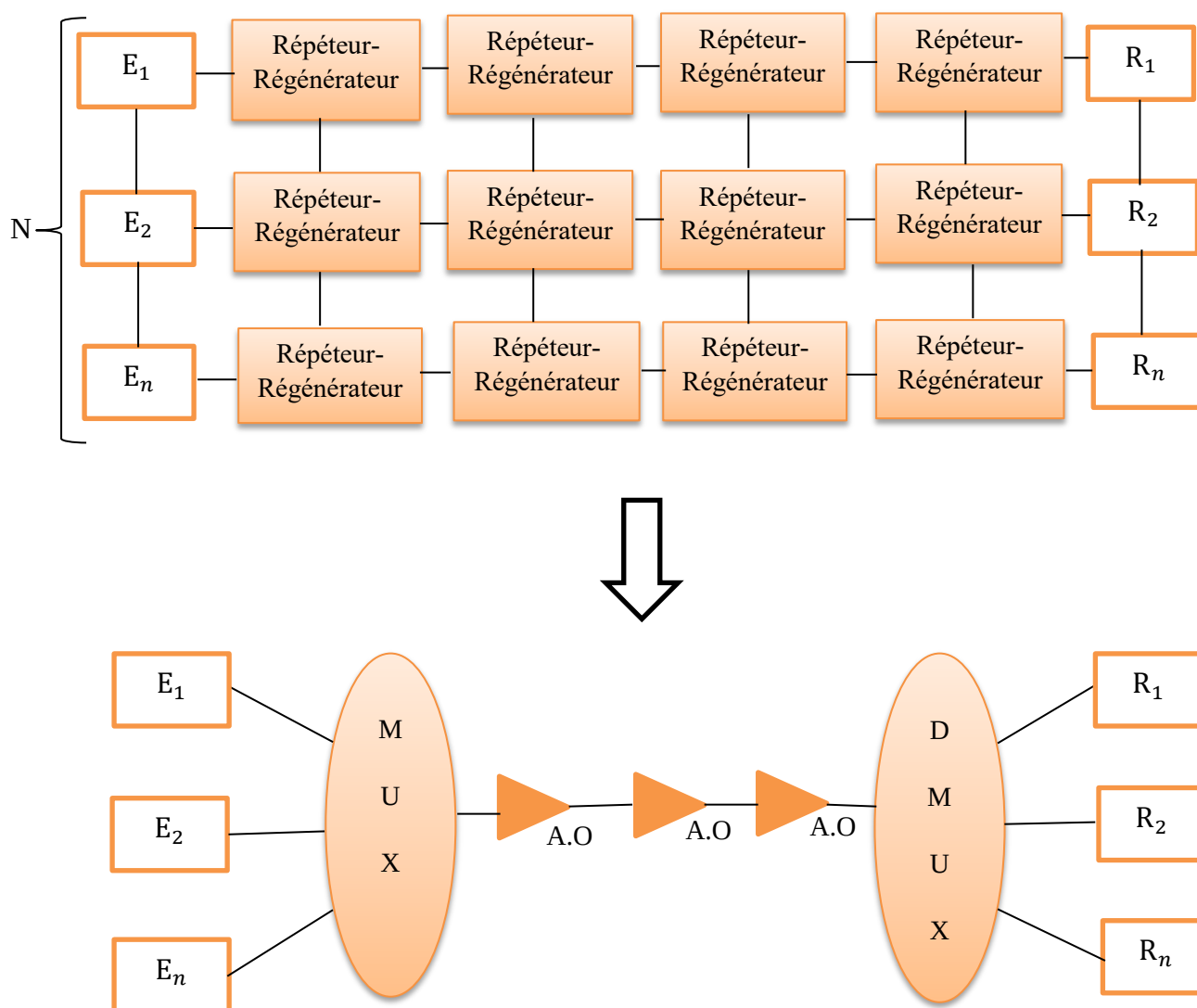


Figure II.27: Opportunité d'utilisation du multiplexage couplée à l'amplification optique.

VIII.1 Principe de WDM

Le multiplexage en longueur d'onde consiste à envoyer dans une seule fibre N porteuses optiques à différentes longueurs d'onde transmettant chacune un débit D_b . La bande passante est découpée en plusieurs sous-bandes dont chacune est affectée à une voie.

L'utilisation du multiplexage WDM nécessite un ensemble de diodes laser émettant à des longueurs d'ondes différentes mais assez proches, sans qu'il y ait de mélange entre eux au cours de la propagation. Ainsi un multiplexeur/démultiplexeur optiques pour combiner/séparer l'ensemble des signaux optiques dans la fibre. La Figure II.28 représente un exemple d'une liaison utilisant le multiplexage WDM.

La fibre optique transporte alors un débit numérique égal à $N * D_b$. Cette dernière est souvent définie comme la capacité du système [24].

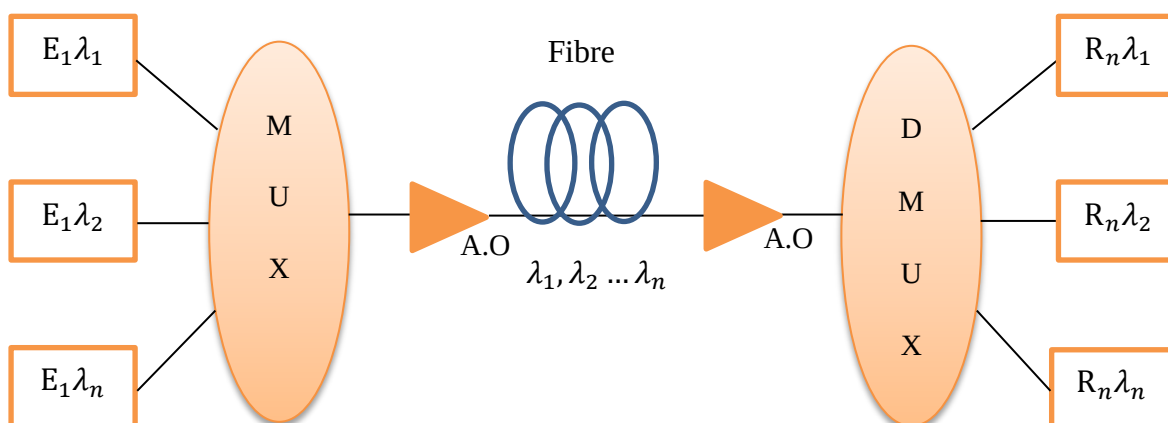


Figure II.28 : Principe d'une liaison WDM.

VIII.2 Application de WDM

L'intérêt premier du WDM est de permettre le transport de débits d'informations très importants sur une même fibre, à destination de plusieurs utilisateurs. Les systèmes actuels autorisent 4, 8, 16, 32 et même 64 canaux optiques différents. Par exemple chacune pouvant supporter 2,5Gbits/s, on obtient alors des débits de 10, 40, 80 et 160Gbits/s. Mais le véritable point de départ du développement des systèmes de

transmission WDM s'est fait lorsqu'il a été associé à l'amplification optique (Figure II.27).

En effet, l'apparition des amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (EDFA) a permis l'amplification simultanée de l'ensemble des N canaux d'un multiplex, sans distorsion du signal utile. Envoyer N canaux dans une fibre optique plutôt que N fibres devenait un avantage économique indiscutable. Si, il y a encore peu de temps, l'espacement entre canaux était de l'ordre de 1nm, le terme de DWDM est maintenant utilisé. En effet, avec l'apparition, sur le marché, de lasers accordables de très bonne qualité, l'espacement entre les longueurs d'onde a pu être progressivement réduit, et est descendu à 0,8 nm ou 0,4nm [24].

IX. Avantage d'une fibre optique

Les avantages que procure la fibre optique peuvent être classés en :

Performances de transmission : Très faible atténuation, très grande bande passante, possibilités de multiplexage (en longueur d'ondes).

Avantages de mise en œuvre : Très petite taille, grande souplesse, faible poids.

Sécurité électrique : Isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive ou sous de forte tension.

Sécurités électromagnétiques : Insensible aux parasites et elle n'en crée pas, inviolabilité presque totale.

Avantage économique : Moindre coût, en comparaison avec d'autres supports [9].

X. Conclusion

Les fibres optiques sont très utilisées es actuellement grâce à leur large bande passante.

Dans ce chapitre, nous avons décrit brièvement les différentes générations de l'évolution de la fibre optique et nous avons présenté ses caractéristiques et les problèmes que peuvent être posés lors de la transmission et le phénomène de la dispersion dans la fibre optique et l'application de multiplexage en longueur d'onde finalement les avantages.

Chapitre III

Les fibres optiques à cristaux photoniques

I. Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter les fibres à cristaux photonique que l'on nomme également fibres à trous (Holey Fiber). Ces fibres sont constituées d'une succession périodique de micro-canaux d'air emprisonnés dans la silice et courant sur toute la longueur de la fibre. La technologie de fabrication des FCP est devenue de plus en plus mature ces dix dernières années, permettant la conception de structures complexes avec parfois des structures périodiques de dimensions nettement inférieures au micron.

L'avènement de ces nouvelles fibres apporte des propriétés inaccessibles avec des fibres standards.

Dans un premier temps, nous expliquerons le concept des fibres a cristaux photoniques en suite principe de propagation de la lumière et après avoir montré que deux types de guidage peuvent opérer dans les FCP (Bande Interdite Photonique (BIP) ou réflexion totale interne (RTI)), nous décrirons les techniques de fabrication de ce type de fibre et finalement quelques avantages.

La suite du manuscrit sera consacrée à l'étude des propriétés optiques et géométriques des FCP (les pertes par confinements et la biréfringence).

Les simulations sont faites en utilisant la méthode des éléments finies avec logiciel COMSOL Multiphysics.

II. Propriétés de base des cristaux photoniques

II.1 Périodicité à une dimension

Les matériaux à bandes photoniques interdites unidimensionnels (1D) possèdent une permittivité électrique périodique dans une direction et uniforme dans les deux autres directions. La figure III.1 montre qu'ils consistent en un empilement de deux couches alternées de matériaux homogènes ayant des constantes diélectriques ϵ différentes. Ces structures existent depuis longtemps et sont utilisées en optique pour obtenir des miroirs sans pertes (miroirs de Bragg) ou des filtres [25].

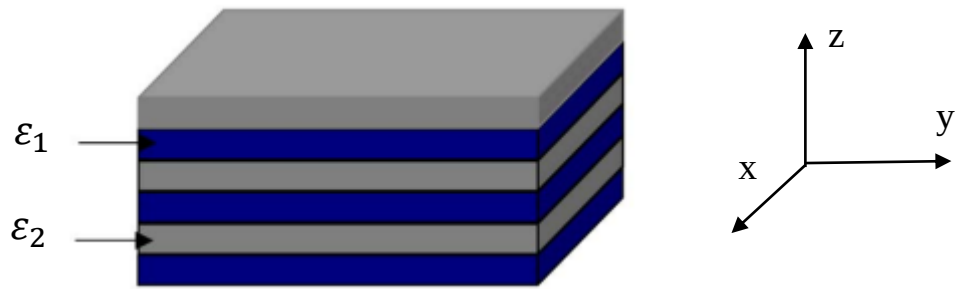


Figure III.1 : Structure périodique unidimensionnel [25].

II.2 Périodicité à deux dimensions

Un cristal photonique bidimensionnel est une structure qui présente une modulation périodique de la permittivité diélectrique suivant deux directions de l'espace, et homogène dans la troisième. Les propriétés optiques des structures bidimensionnelles (ainsi que les structures unidimensionnelles en incidence non normale) sont fortement dépendantes de la polarisation de l'onde électromagnétique. Il existe plusieurs façons de réaliser ces structures bidimensionnelles. Par exemple, on peut placer des tiges diélectriques dans l'air ou encore dans un autre diélectrique. Afin d'ouvrir des bandes interdites larges, il faut un contraste d'indice (différence entre les indices du milieu et des tiges) suffisamment grand.

Un BIP bidimensionnel peut aussi être constitué d'un ensemble de trous percés dans un diélectrique. Les réponses optiques de ces structures dépendent de la polarisation et peuvent ne pas posséder une bande interdite complète. On parle d'une bande interdite complète lorsque la structure interdit la propagation pour toutes les directions dans le plan de la périodicité, quelle que soit la polarisation [25].

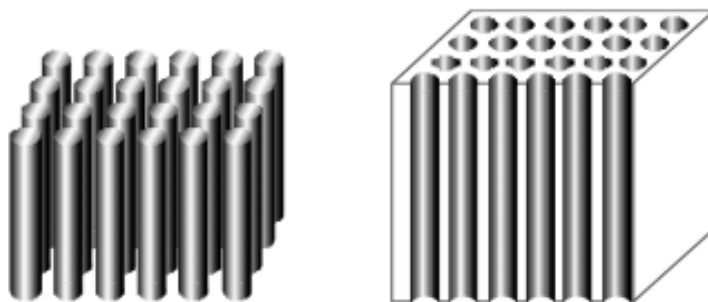


Figure III.2 : Structure périodique bidimensionnel [25].

III. Concept des fibres à cristaux photoniques

Les fibres à cristaux photoniques connues encore sous le nom de fibres microstructurées ou fibres à trous sont constituées d'un arrangement régulier ou non de canaux d'air de dimensions microniques disposés parallèlement à l'axe de propagation. Les paramètres qui caractérisent cet arrangement et ajustent les propriétés optiques des fibres, sont la distance entre les centres de deux trous adjacents noté Λ (pas ou pitch) et le diamètre des trous d . Ces paramètres opto-géométriques permettent de définir le rapport d/Λ correspondant à la proportion d'air présente dans la fibre. L'arrangement des trous peut constituer une matrice triangulaire, hexagonale ou aléatoire. Le nombre de rangées ou de couronnes de trous utilisées pour former la gaine microstructurée constitue un critère important pour réduire les pertes de guidage.

La région, au centre de la fibre, permettant le guidage de la lumière est considérée comme le cœur de la fibre. Généralement, dans le cas de fibres à cœur plein, ce dernier est constitué de silice pure [25].

Une FCP est une fibre avec un cœur en silice pure entouré de plusieurs couches de trous d'air qui jouent le rôle de gaine optique. La figure suivante présente les paramètres géométriques d'une telle fibre.

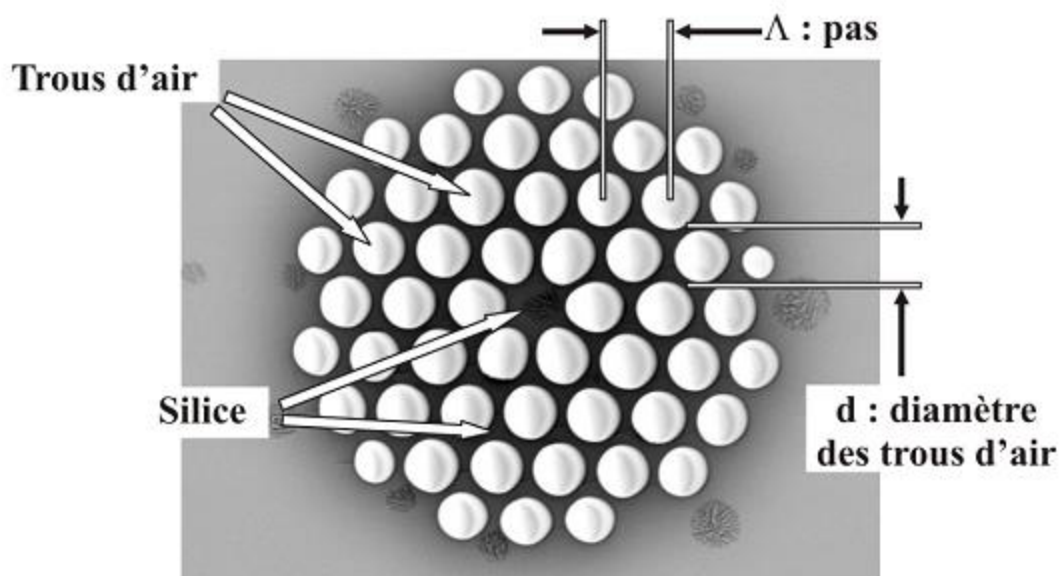


Figure III .3 : Coupe transversale d'une FCP avec ses paramètres [25].

Les fibres à cristaux photoniques diffèrent des fibres conventionnelles par leur fort contraste d'indice transverse. En effet, l'indice effectif de la gaine varie très fortement en fonction de la longueur d'onde, ce qui génère des propriétés spectrales uniques. Aussi, la flexibilité offerte dans le choix des paramètres géométriques de FCP (arrangement, taille, nombre et espacement entre les trous) permet d'ajuster les propriétés optiques (biréfringence, confinement, air effective) dans des plages que ne peuvent atteindre les fibres conventionnelles. Cette flexibilité dans la conception des FCP est de nature à créer un fort intérêt pour leur utilisation dans diverses applications [26].

IV. Principe de propagation de la lumière dans les FCP

Le terme générique de "FCP" regroupe deux catégories de fibres qui se distinguent par les mécanismes de guidage différents qu'elles mettent en jeu : soit un effet de bande interdite photonique dans la gaine, soit la réflexion totale interne. Ces deux types de fibres sont décrits dans la suite de ce chapitre [21].

IV.1 FCP à guidage par Bande Interdite Photonique (BIP)

La "renaissance" des fibres à cristaux photoniques remonte à 1995 lorsqu'un groupe de chercheurs britanniques animé par P. S t. J. Russel (Université de Bath), se propose d'appliquer, dans le domaine des fibres optiques, la notion de Bande Interdite Photonique (BIP). Ce mécanisme est déjà connu et mis en œuvre pour guider la lumière dans les cristaux photoniques pour l'optique intégrée. Le but est de concevoir une structure dans laquelle le photon joue le même rôle que l'électron dans un semi-conducteur. Une BIP est une bande spectrale telle qu'une onde à une longueur d'onde comprise dans cette bande ne peut pas se propager dans la structure. L'effet recherché est une résonance transverse dans la gaine optique de la fibre qui maintiendrait la lumière dans une zone centrale (le "cœur") et assurerait son confinement. La propagation se ferait alors dans la direction axiale, invariante.

Les premières fibres basées sur ce principe possèdent une gaine optique composée d'une succession de couches transparentes d'indices alternativement haut et bas semblables à un réseau de Bragg à une dimension (d'où le nom de "fibres de Bragg" qui leur a été attribué.

Cette structure permet la formation d'interférences constructives entre les composantes de l'onde lumineuse réfléchies aux interfaces entre les couches. Ces diverses réflexions

empêchent la propagation de la lumière radialement et assurent un confinement au centre du réseau de Bragg radial. Comme le mécanisme de propagation de la lumière ne s'appuie pas sur la notion habituelle de réflexion totale interne, l'indice de la zone où est confinée la lumière (le "cœur"), peut-être plus bas que ceux des couches de la gaine optique qui l'entoure le cœur. Nous verrons par la suite les nombreuses applications liées à cette propriété. Dans le projet de P. S t. J. Russel, l'alternance de couches concentriques d'indices haut et bas dans la gaine optique des fibres de Bragg est remplacé par un arrangement triangulaire ou hexagonal (encore appelé "en nid d'abeilles" extrêmement régulier de canaux d'air parallèles à l'axe dans une matrice de silice. Ces structures périodiques sont résonantes transversalement à certaines longueurs d'onde et possèdent donc des bandes interdites photoniques. Dans une fibre optique elles constitueront la gaine confinant la lumière, alors qu'un défaut créé au milieu constituera le cœur.

Ce dernier est réalisé en supprimant un microcanal d'air dans une matrice triangulaire, ou au contraire en ajoutant un microcanal supplémentaire dans une matrice hexagonale.

Le pas de la structure, qui correspond à la distance séparant les centres de deux trous voisins, est noté Λ , tandis que le diamètre des trous est noté d . Dans la suite ces fibres seront appelées FCP-BIP (figure III.4) [21].

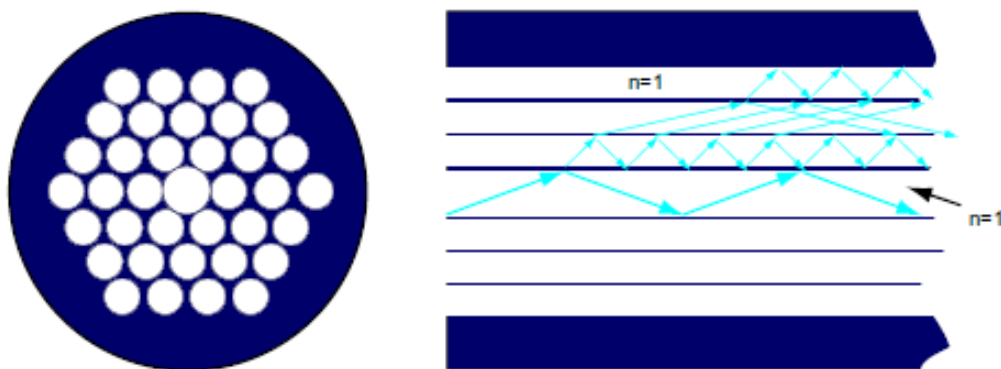


Figure III.4: Principe de guidage dans les fibres photonique à BIP [26].

En 1995, il est démontré pour la première fois qu'une FCP peut présenter de véritables BIP malgré le faible contraste d'indice entre les deux milieux ($\approx 0,45$). Ceci provient du fait que dans les FCP-BIP la propagation ne s'effectue pas perpendiculairement à la direction, mais parallèlement à celle-ci. Les conditions sur le contraste d'indice entre le milieu hôte et l'air, ainsi que sur la proportion d'air nécessaire sont ainsi relâchées. L'onde lumineuse injectée

dans une FCP-BIP est réfléchi par la gaine microstructurée périodique et se retrouve confinée transversalement dans la région où la périodicité est brisée (zone du défaut constituant le cœur). Un mode transverse peut donc s'installer dans le cœur et être guidé dans la direction z .

Les longueurs d'onde (λ) centrales rejetées par le matériau BIP dépendent de la période du cristal et de la proportion d'air ($\lambda \approx 2\Lambda$).

L'un des attraits majeurs des FCP-BIP est que le guidage peut être effectué dans un cœur d'indice bas : ce cœur peut par exemple être un trou rempli d'air ou d'un autre gaz

Dans un cœur d'air, les pertes de propagation peuvent être faibles à des longueurs d'onde où la silice est peu transparente. En remplaçant l'air par un autre gaz (H_2 , Xe), on peut fortement limiter ou au contraire exacerber les effets non linéaires.

L'une des applications du guidage de la lumière dans une telle fibre est le transport de forte puissance sans endommager.

En 1997, P. S t. J. Russel et son groupe a commencé à fabriquer pour la première fois une FCP- BIP.

Pourtant le diamètre des trous est variable, (entre 0,2 et 1 μm), et ils sont espacés d'un pas de 2,3 μm ce qui donne une proportion d'air dans la gaine assez faible.

La caractérisation de cette fibre a montré par la suite que le mécanisme de propagation de la lumière ne reposait pas sur l'effet BIP mais sur la réflexion totale interne. Pourtant cette fibre présentait des caractéristiques de propagation tout à fait originales qui ont très rapidement suscitées un immense intérêt. Cela sera explicité dans le prochain paragraphe [21].

IV.2 FCP à guidage par réflexion totale interne RTI

Comme nous l'avons indiqué plus haut, les raisons pour lesquelles la FCP fabriquée en 1997 par l'équipe de P S t J Russel n'a pas donné les résultats escomptés (guidage par BIP) étaient que la régularité du réseau cristallin n'était pas suffisante et que la proportion d'air dans la gaine était trop faible pour permettre l'existence d'une BIP. Pourtant, la lumière se propageait de 337 nm jusqu'à 1550 nm en régime monomode.

La propagation était assurée grâce à la différence d'indice positive entre le cœur (la silice pure) et la gaine optique (il s'agissait d'un arrangement triangulaire de canaux d'air dans la silice). En effet, la présence d'air dans cette gaine a pour conséquence de diminuer son indice moyen. L'onde lumineuse est donc guidée par réflexion totale interne dans une zone d'indice élevé entourée d'un milieu d'indice moyen plus faible, comme dans le cas classique des Fibres à Saut d'Indice (FSI). Toutefois, il n'existe pas d'interface clairement définie entre le cœur et

la gaine comme il en existe dans les FSI. C'est pourquoi le mode de guidage qui permet la propagation dans les FCP dépourvues de BIP est appelé "guidage par réflexion totale interne" (figure III.5) [21].

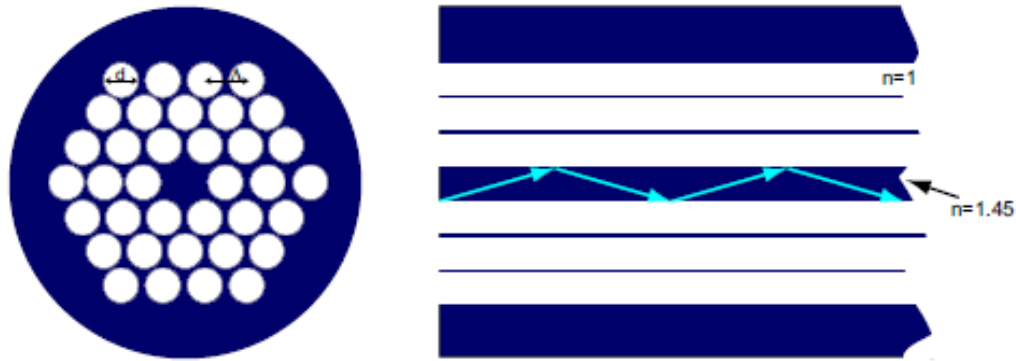


Figure III.5: Principe de guidage dans les fibres photonique à RTI [26].

V. Fabrication des FCP

La silice est couramment utilisée dans la conception des fibres optiques en raison de sa grande transparence dans le proche infrarouge. Les fibres optiques standard sont fabriquées à partir de silice pure et de silice dopée avec des ions augmentant ou diminuant l'indice de réfraction de la silice pour créer la différence d'indice nécessaire au guidage de la lumière dans le cœur par réflexion totale interne. On pourrait envisager de fabriquer une FCP du type de la Figure III.6 à partir de barreaux de silice dopée. Cependant, les différences d'indice accessibles seraient trop faibles pour permettre un guidage efficace par effet BIP sur une large bande spectrale. D'autre part, il n'est pas possible d'associer un matériau de nature différente avec la silice (autre que de la silice dopée). En effet, l'étirage de la préforme sans graves déformations serait très délicat car la température de fusion diffère d'un matériau à l'autre.

Enfin, le coût d'une telle fibre serait probablement rédhibitoire. La solution consiste à s'inspirer des fibres appelées « hole-assisted fibres » constituées d'un cœur en silice entouré d'une forte proportion d'air : le matériau haut indice sera de la silice pure et le matériau bas indice sera de l'air.

L'ensemble des fibres à base de silice et d'air est appelé fibres microstructurées air/silice (FMAS). La première tentative de fabrication d'une FMAS de type FCP a eu lieu, sans succès, en 1997. Le guidage de la lumière était simplement assuré par le principe de réflexion

totale interne que nous traiterons plus loin. La première fabrication d'une FCP présentant une véritable propagation par résonance transverse est réalisée fin 1998. Cette fibre BIP possède une gaine photonique air/silice et un cœur matérialisé par un trou de plus grandes dimensions que ceux de la gaine [27].

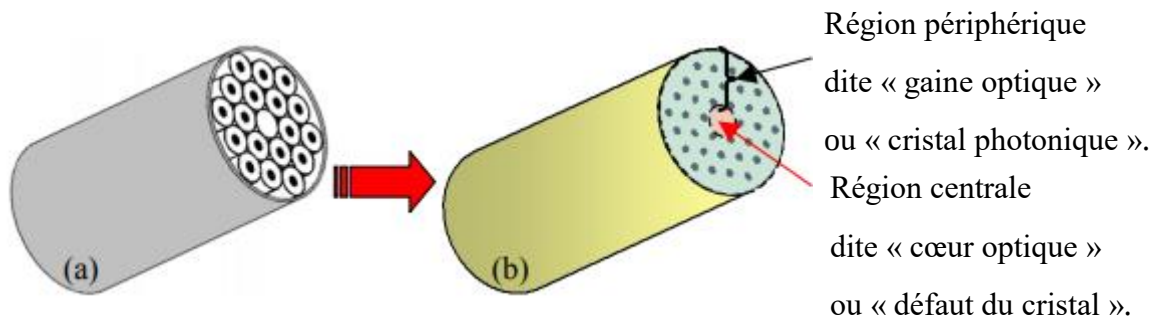


Figure III.6 : Réalisation d'une fibre microstructurée (a) assemblage macroscopique ; (b) fibre de 125 μm de diamètre typiquement, étirée à partir de la préforme [27].

Le processus de fabrication décrit dans ce paragraphe s'applique aussi bien aux FCP-BIP (figure III.7) qu'aux FCP RTI (figure III.8).

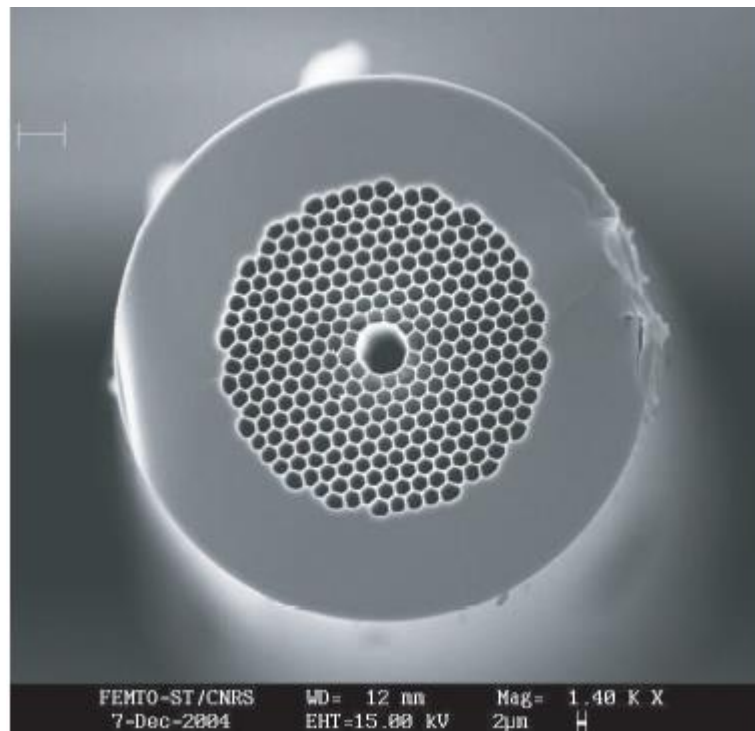


Figure III. 7 : Image de la section transverse d'une fibre photonique BIP [26].

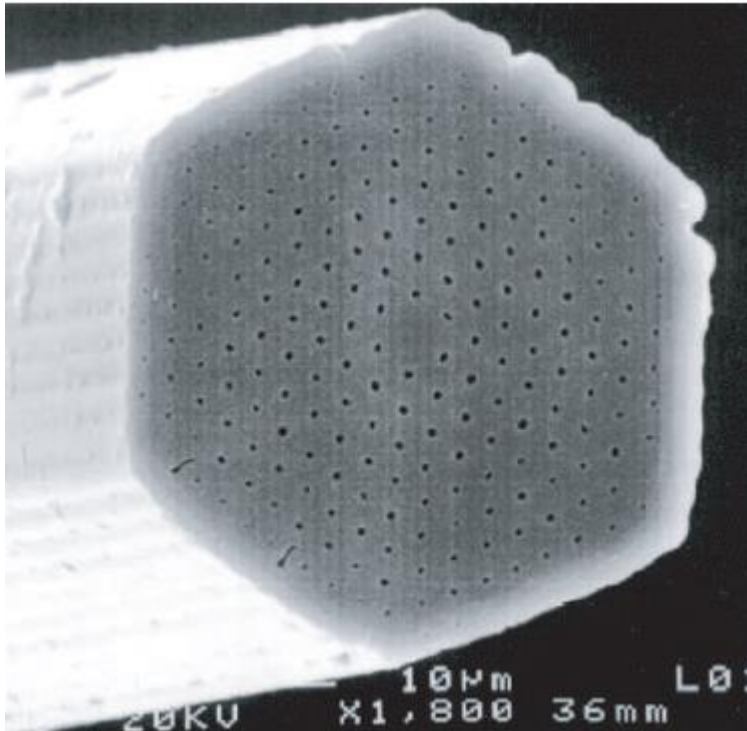


Figure III. 8 : Image de la section transverse d'une fibre photonique RTI [26].

VI. Les avantages des fibres à cristaux photonique

Le guide d'onde optique est à l'optique intégrée ce que l'interconnexion électrique est aux circuits intégrés de l'électronique. Or on sait que les lignes d'interconnexion occupent la majeure partie de la surface d'un circuit en silicium ; leur densification intervient au même titre que la réduction de la taille des composants dans l'accroissement des performances du circuit. Ce parallèle illustre bien l'importance que représente la fonction de guidage optique, même s'il s'agit d'une fonction passive, comparée aux fonctions d'émission ou de conversion de signal.

Dans ce contexte, l'intérêt des guides à cristal photonique est double. Le premier intérêt du guide à cristal photonique se situe au niveau de sa conception. En effet, défini par le retrait, l'ajout ou la modification de motifs dans une ou plusieurs rangées parallèles du cristal, le guide peut être introduit dès l'étape d'écriture des motifs (ce qu'on appelle l'étape de lithographie). L'introduction d'un grand nombre de guides en parallèle ou en série ne pose pas plus de difficultés que d'introduire un seul guide, car les motifs du cristal se répètent à

l'identique de façon périodique. En quelque sorte, on dispose d'un véritable « mécano » optique avec un nombre limité d'éléments de base : le(s) motif(s) du cristal.

Le deuxième intérêt du guide à cristal photonique réside dans le fait que le guidage est plus « Robuste » que celui rencontré dans les guides classiques.

Dans le cas présent, dû à l'effet de bande interdite photonique, les parois du guide à cristal photonique se comportent comme des parois parfaitement réfléchissantes. L'avantage est décisif dès lors que l'on souhaite changer fortement la direction de propagation de la lumière en la guidant. Pour s'en convaincre, il suffit d'imaginer la situation dans laquelle on tordrait une fibre optique en lui imposant un rayon de courbure trop petit. Outre le fait que la torsion pourrait être préjudiciable à la tenue mécanique de la fibre, la lumière s'échapperait de la fibre à l'endroit du coude.

Le faible contraste d'indice entre le cœur et la gaine de la fibre ne permettrait pas d'atteindre la condition de réflexion totale à l'intérieur de la fibre. La situation est forcément différente si la lumière est emprisonnée entre des parois parfaitement réfléchissantes [9].

VII. La méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis (MEF) est une approche mathématique largement utilisée, elle est utilisée dans des simulations dans le but de résoudre numériquement certains problèmes courants en physique et en ingénierie qui se produisent dans des structures de formes complexes et arbitraires, où les méthodes analytiques conventionnelles ne sont d'aucune. Comme son nom peut le suggérer, la MEF consiste à discrétiser la structure considérée en un nombre approprié d'éléments géométriques simples et petits (ex : éléments triangulaires), l'effet de la variable physique (champs électromagnétiques, forces mécaniques, température, etc.) est caractérisé dans chaque élément individuel séparément avant d'assembler numériquement tous les éléments ensemble pour prédire le comportement de la structure complexe originale. Au cours des dix dernières années, il a été réalisé que la MEF est adapté à une grande classe de problèmes multi-physiques, il a été utilisé pour simuler le comportement de variables physiques dans divers domaines, tels que la mécanique structurelle, le transfert de chaleur, l'acoustique et l'électromagnétisme, etc. L'un des principaux avantages du MEF par rapport à d'autres méthodes numériques est sa capacité à gérer naturellement des frontières irrégulières et des formes arbitraires; un autre avantage est la possibilité de régler la finesse du maillage (nombre d'éléments) dans une région spécifique de la structure indépendamment des autres régions (plus le maillage est fin, meilleure est la

précision), ce qui signifie que la densité du maillage peut être augmentée dans les parties ayant plus d'importance pour le problème sans avoir à faire de même pour le reste de la structure, ce qui permettra finalement d'économiser de la mémoire informatique et de réduire le temps de calcul.

D'autre part, la MEF consomme beaucoup de temps de calcul et présente l'inconvénient d'être mathématiquement difficile à mettre en œuvre par rapport à d'autres méthodes de simulation [28].

La méthode des éléments finis repose sur la discrétisation de l'objet à étudier en sous-ensembles, c'est le maillage. On va donc recouvrir le domaine à l'aide d'éléments géométriques, pouvant être des segments à une dimension, des triangles si le domaine est à deux dimensions ou encore des tétraèdres à trois dimensions. Les éléments limitrophes doivent avoir en commun soit un sommet, soit une arête, soit une face. Dans notre étude, nous découperons les domaines en N triangles, ayant chacun un sommet en commun [21].

VIII. Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique qui englobe toutes les étapes de processus de modélisation : de la définition des géométries, des propriétés des matériaux et de la physique, décrivant des phénomènes spécifiques, à la résolution et au post-traitement de modèles tout en assurant des résultats précis et fiables.

Basé sur la méthode des éléments finis, le logiciel COMSOL Multiphysics est recommandé pour la création de modèles utilisés dans les domaines d'applications spécialisés ou les domaines d'ingénieries. Pour ce faire, il est possible d'étendre le logiciel par des modules complémentaires de la suite de produits.

Disposant d'interfaces physiques prédéfinies, ce logiciel permet la simulation de plusieurs physiques et applications en ingénierie, et particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

Multiplateforme et compatible avec Windows, Mac, Linux, le logiciel COMSOL Multiphysics autorise à l'utilisateur de définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations algèbro-différentiels (EAD) sont également possibles.

Des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma, suivi de particules, optimisation, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et Matlab [29].

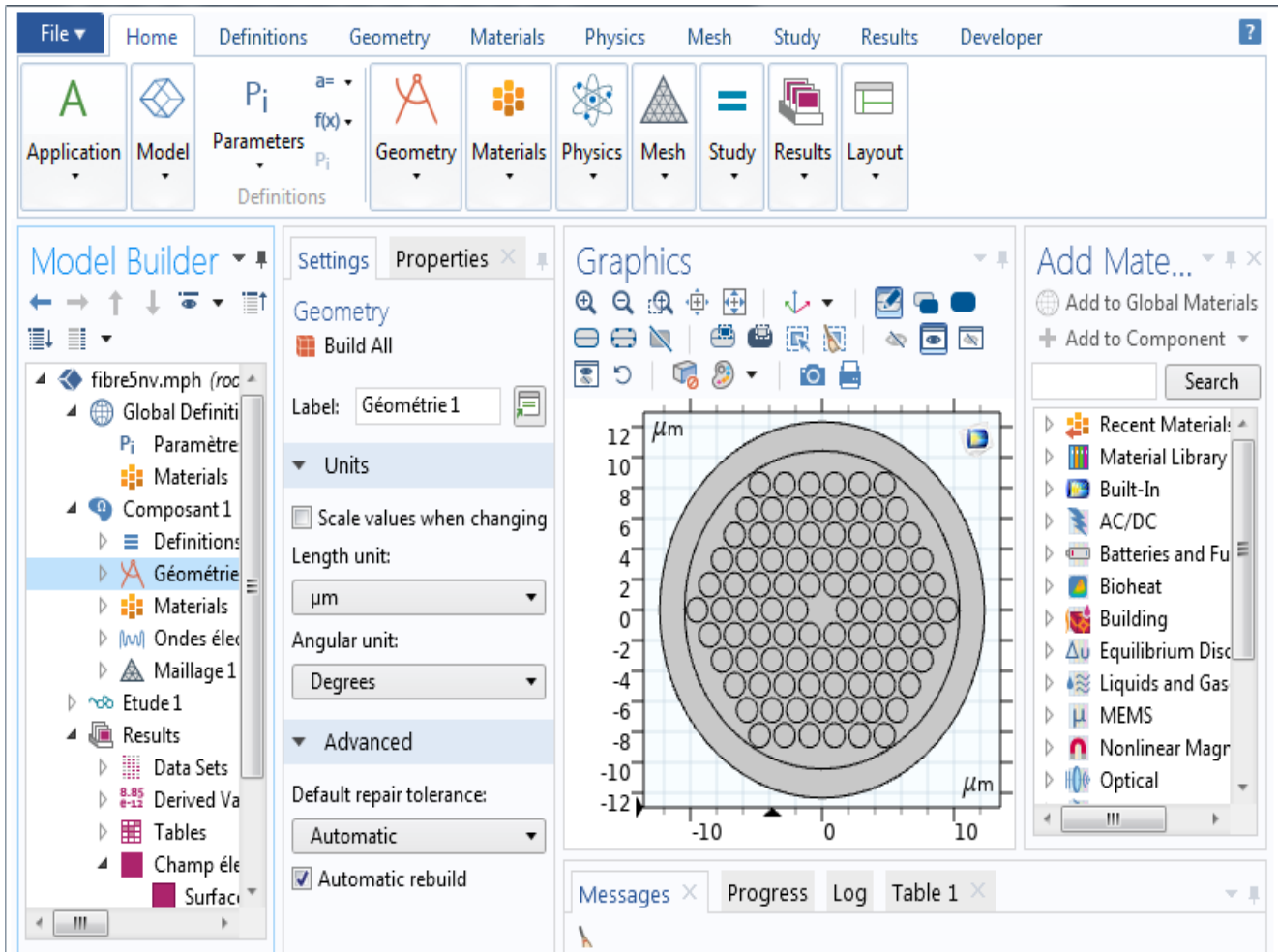


Figure III.9 : L'interface de travail sur COMSOL.

IX. Etapes de modélisation des FCP

Pour la détermination des propriétés optiques des modes guidés dans une FCP, qui présente un fort contraste transversal d'indice, nous avons utilisé le logiciel commercial COMSOL qui repose sur la méthode des éléments finis. Les solutions recherchées du problème étant la constante de propagation (ou l'indice effectif) à partir de laquelle on va calculer les pertes par confinement et la biréfringence ; et la distribution modale du champ à partir de laquelle on détermine modes guidées.

La détermination de ces solutions se déroule principalement en quatre étapes :

1. Détermination du profil d'indice.
2. Définition de l'indice de réfraction du matériau.
3. Maillage de la structure.
4. Détermination de la distribution du mode.

IX.1 Détermination du profil d'indice

La première étape du calcul consiste à définir la géométrie de la fibre à modéliser. Des structures idéales (trous circulaires ou elliptiques arrangés dans une matrice hexagonale ou triangulaire) peuvent être facilement définies.

La FCP peut être vue comme un réseau de trous d'air dans lequel une inclusion est omise au centre créant un défaut et constituant le cœur de la fibre ou se propage le mode fondamental que nous souhaitons étudier.

La structure de la fibre dessinée présente des trous circulaires régulièrement répartis sur un motif de base triangulaire (figure III.10)

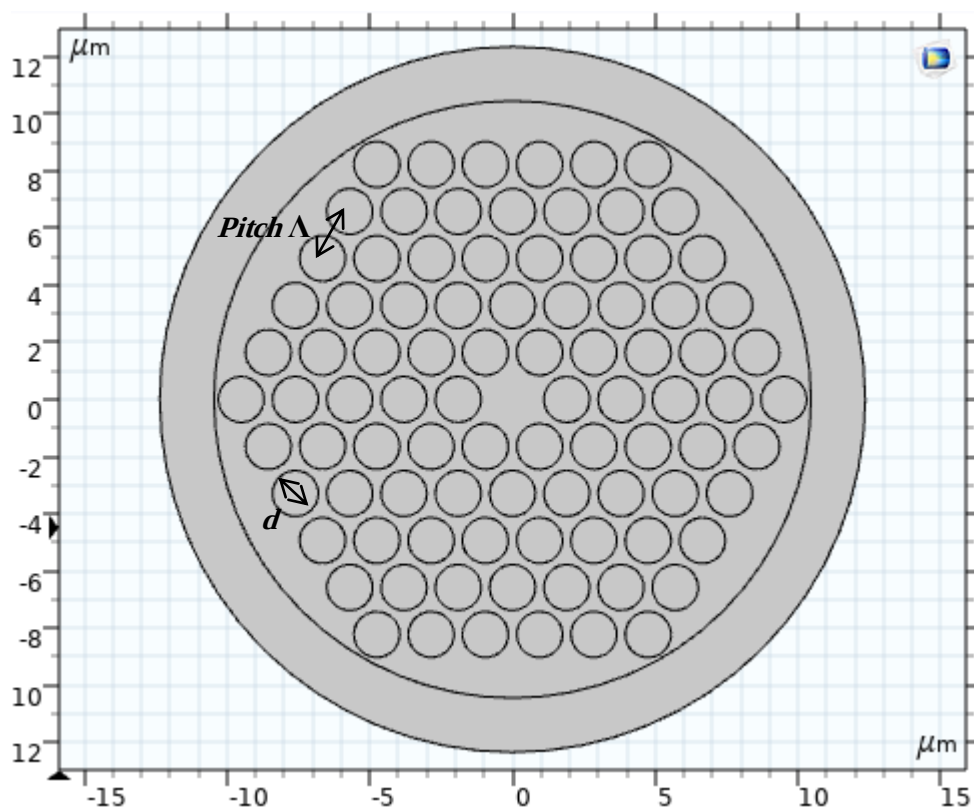


Figure III.10 : Schéma d'une FCP dessinée par le logiciel

IX.2 Définition de l'indice de réfraction du matériau

Une fois la géométrie définie, il est nécessaire de définir les matériaux utilisés en précisant les valeurs de la permittivité ε (ou l'indice de réfraction) et de la perméabilité μ du milieu (figure III.3). L'indice de réfraction de l'air est choisi égal à 1 quel que soit la longueur d'onde à laquelle est effectué le calcul. Nous avons considéré dans nos simulations que le matériau constitutif des FCPs est la silice pure parfaitement isotrope. L'indice du matériau de la matrice évolue avec la longueur d'onde suivant la loi de Sellmeier:

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{G_1\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{G_2\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{G_3\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2} \quad (\text{III.1})$$

Avec les coefficients de sellmeier :

G : Forces d'oscillateur des transitions.

λ_k^2 : Places des énergies respectives de transition.

λ : La longueur d'onde incident.

n : L'indice de réfraction.

Plusieurs matériaux de verre à base de silice ont été fabriqués et leurs propriétés ont été mesurées. Les indices de réfraction sont généralement exprimés à l'aide des coefficients de Sellmeier (Eq III.1). Le tableau III.1 présente les coefficients de multiples matériaux de fibres optiques [30].

Tableau III.1: Les coefficients de multiples matériaux de verre à base de silice.

Constantes de Sellmeier	Concentration de germanium, C (% mole)			
	0 (silice pure)	3.1	5.8	7.9
G1	0.6961663	0.7028554	0.7088876	0.7136824
G2	0.4079426	0.4146307	0.4206803	0.4254807
G3	0.8974794	0.8974540	0.8956551	0.8964226
λ_1	0.0684043	0.0727723	0.0609053	0.0617167
λ_2	0.1162414	0.1143085	0.1254514	0.1270814
λ_3	9.896161	9.896161	9.896162	9.896161

IX.3 Maillage de la structure

Après définition de l'indice de réfraction du matériau, le domaine d'étude est découpé en un nombre fini de sous-espaces élémentaires de forme triangulaire (Figure III.11).

Dans chaque triangle élémentaire, la résolution de l'équation de Helmholtz donne les indices effectifs des modes.

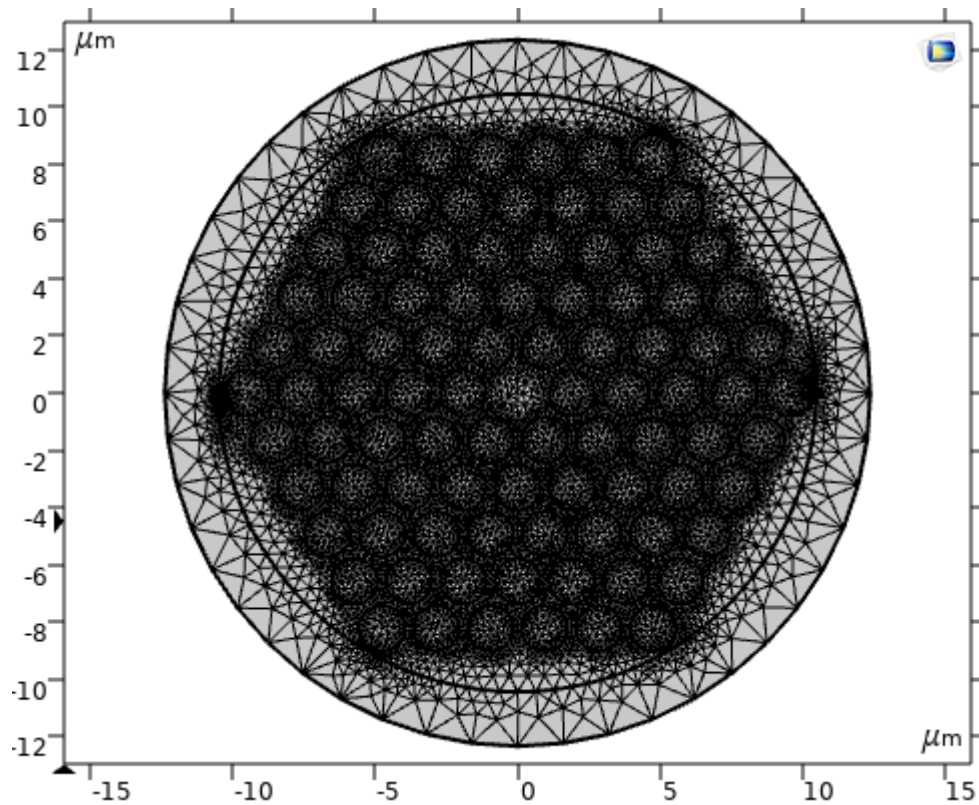


Figure III.11 : Maillage de la géométrie obtenue avec Comsol.

La justesse des résultats dépend de la régularité des sous espaces ainsi que de la finesse du maillage [30]. En ce qui concerne la finesse du maillage des trous, il ne faut pas que les plus grandes dimensions des mailles soient supérieures au rayon des trous. De plus, la taille des mailles par rapport à la longueur d'onde λ influe sur les calculs et la validité des résultats. Il faut utiliser des tailles de maille suffisamment petites par rapport à la longueur d'onde de travail λ . L'expérience montre qu'il est nécessaire de choisir des tailles de mailles de l'ordre de $\lambda/5$, voir $\lambda/6$ [30]. On notera cependant qu'il est possible, sans affecter la justesse des résultats, de considérer un maillage plus lâche dans les régions où le champ électromagnétique recherché présente une faible amplitude [30].

IX.4 Détermination de la distribution du mode

La dernière étape consiste à la détermination de l'indice effectif (ou constante de propagation) du mode étudié. La figure III.12 montre la distribution du mode fondamental d'une FCP à une longueur d'onde de 1550 nm.

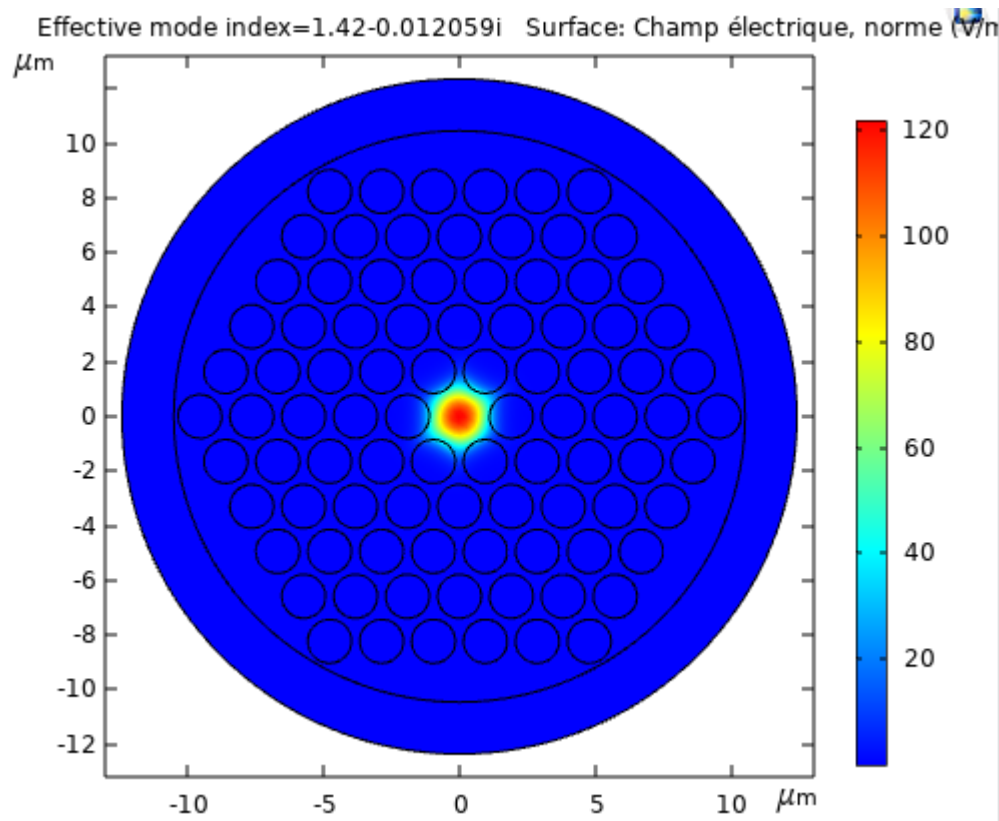


Figure III.12 : Représentation du champ électrique de modes guidé dans la FCP à 1550 nm

On peut alors en déduire les propriétés optiques essentielles telles que la biréfringence et pertes par confinement de la FCP considérée.

X. Etude des pertes par confinement dans une FCP

L'un des premiers avantages des FCPs est la capacité à bien confiner le mode guidé sur des grandes distances de propagation. Les pertes dans les FCPs résultent de la fuite du champ dans la gaine microstructurée. L'extension du champ doit donc être limitée afin de les maintenir en dessous d'un seuil acceptable.

Afin d'étudier l'influence de la fraction d'aire sur les pertes par confinement, une série de calculs a été réalisée en fonction du diamètre des trous d'air (d) pour différents nombre de couches N . La figure III.13 montre les sections transverses des FCPs pour différents nombre de couches ($N = 3, 4$ et 5 couches d'air).

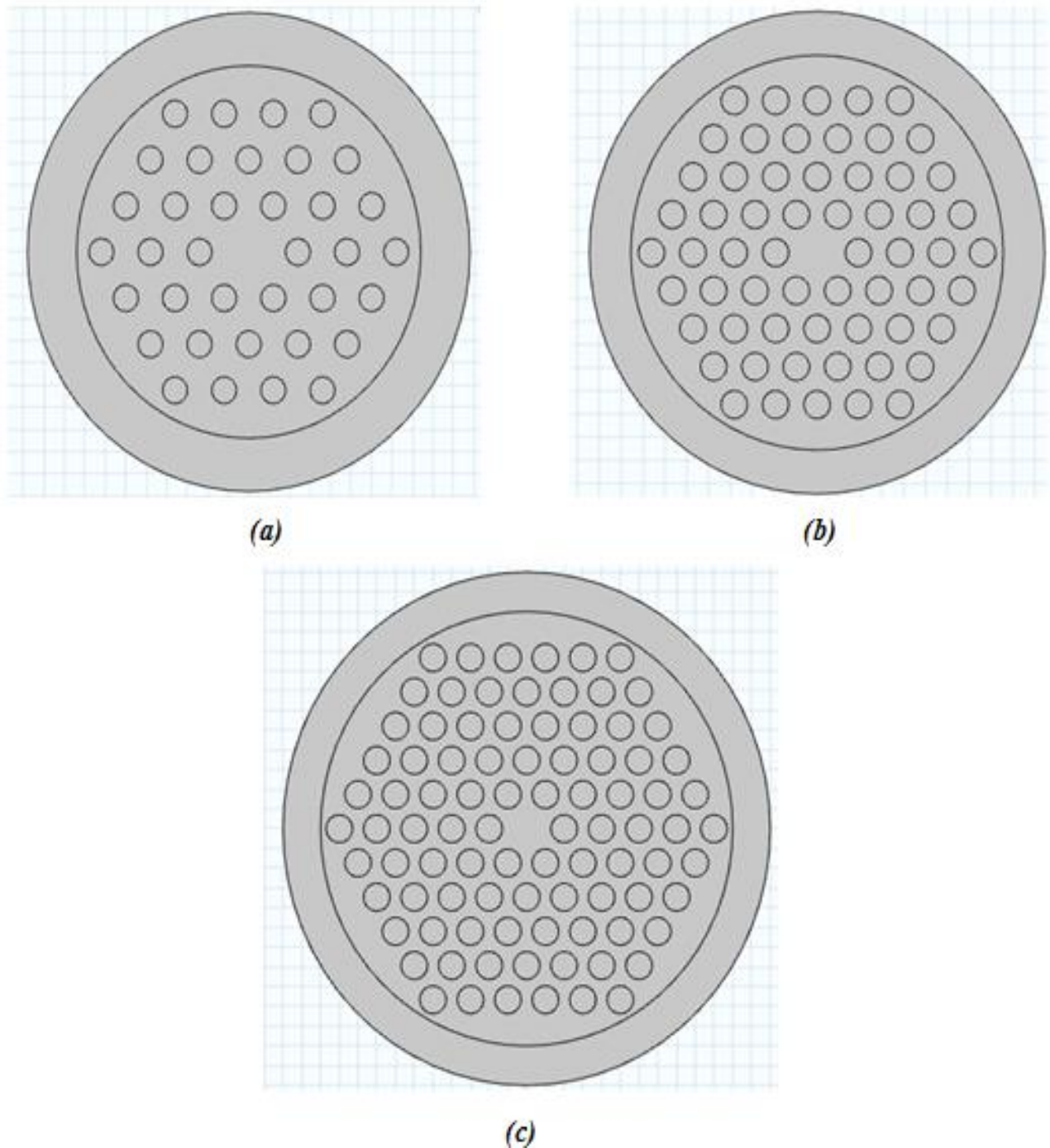


Figure III.13 : Section transverse des FCPs pour différents couches (a) $N = 3$ couches, (b) $N = 4$ couches et (c) $N = 5$ couches)

Ces pertes sont calculées suivant la formule suivante :

$$\alpha \left(\text{dB}/\text{km} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{20}{\ln 10} \text{Im}g(n_{eff}) \quad (\text{III.2})$$

La figure III.14 montre l'évolution des pertes par confinement en fonction de d pour différentes valeurs de N .

D'après cette figure, on remarque que pour chaque nombre de couches ($N = 3, 4$ ou 5) les pertes par confinement diminuent lorsque le diamètre des trous augmente. De même, si on augmente le nombre de rangées d'air dans la gaine (N), toujours pour un diamètre de trou fixe, les pertes diminuent. Ceci est dû à la grande différence d'indice de réfraction entre le cœur et la gaine microstructurée. Il paraît donc intuitif, au premier abord, d'augmenter la fraction d'air dans la gaine afin de mieux confiner le champ dans le cœur de la FCP.

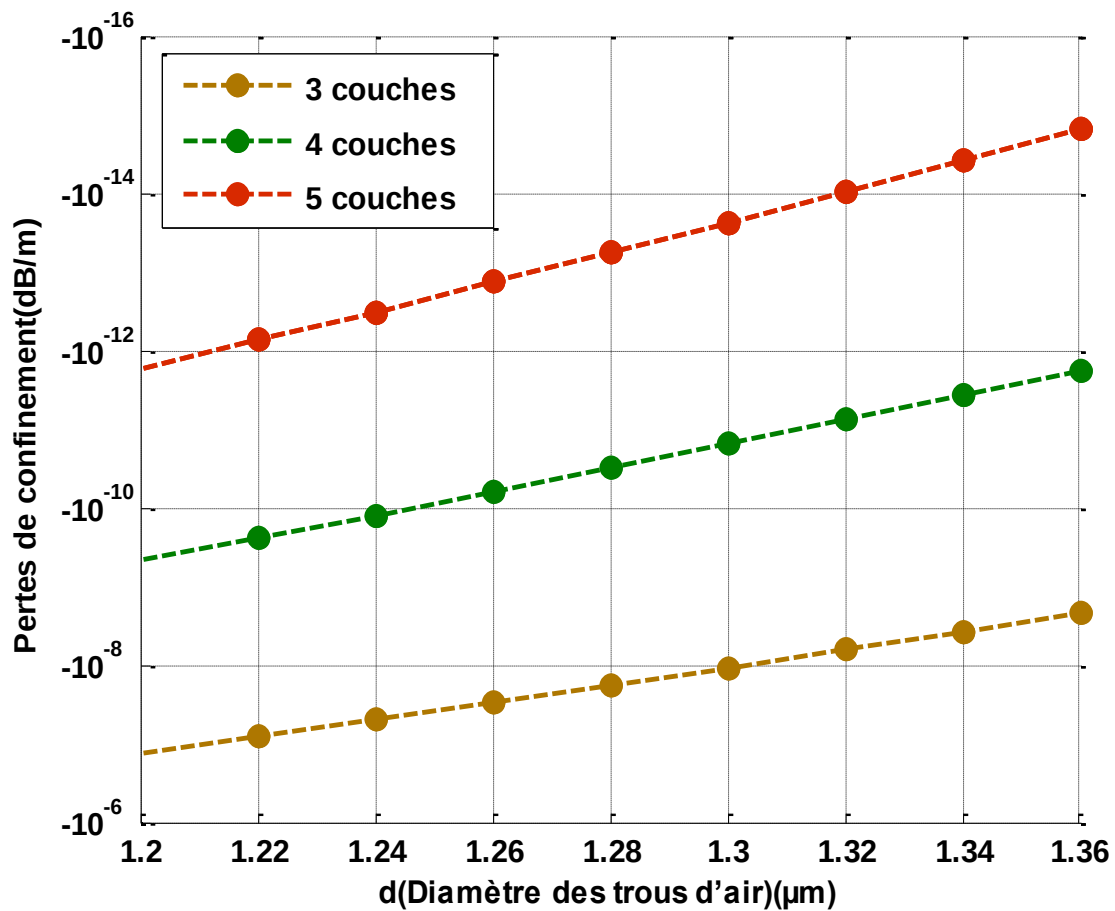


Figure III.14 : Pertes de confinement de FCP à 1550 nm en fonction d pour différentes valeurs de N .

La figure III.15 montre les pertes par confinement en fonction de longueur d'onde pour différentes valeurs de N . D'après cette figure, on observe clairement que les pertes par confinement augmentent avec l'augmentation de la longueur d'onde. En outre, il est confirmé que les pertes par confinement diminuent avec l'augmentation de N . Cela est dû au fait que l'indice de la gaine dépend très fortement de la longueur d'onde. Lorsque la longueur d'onde augmente, le champ du mode fondamental guidé par une FCP s'étend de plus en plus dans la gaine. La lumière pénètre alors plus fortement dans les trous, provoquant ainsi une chute de l'indice effectif de la gaine photonique. À l'inverse, aux courtes longueurs d'onde, la lumière évite les trous d'air et l'indice effectif de gaine augmente.

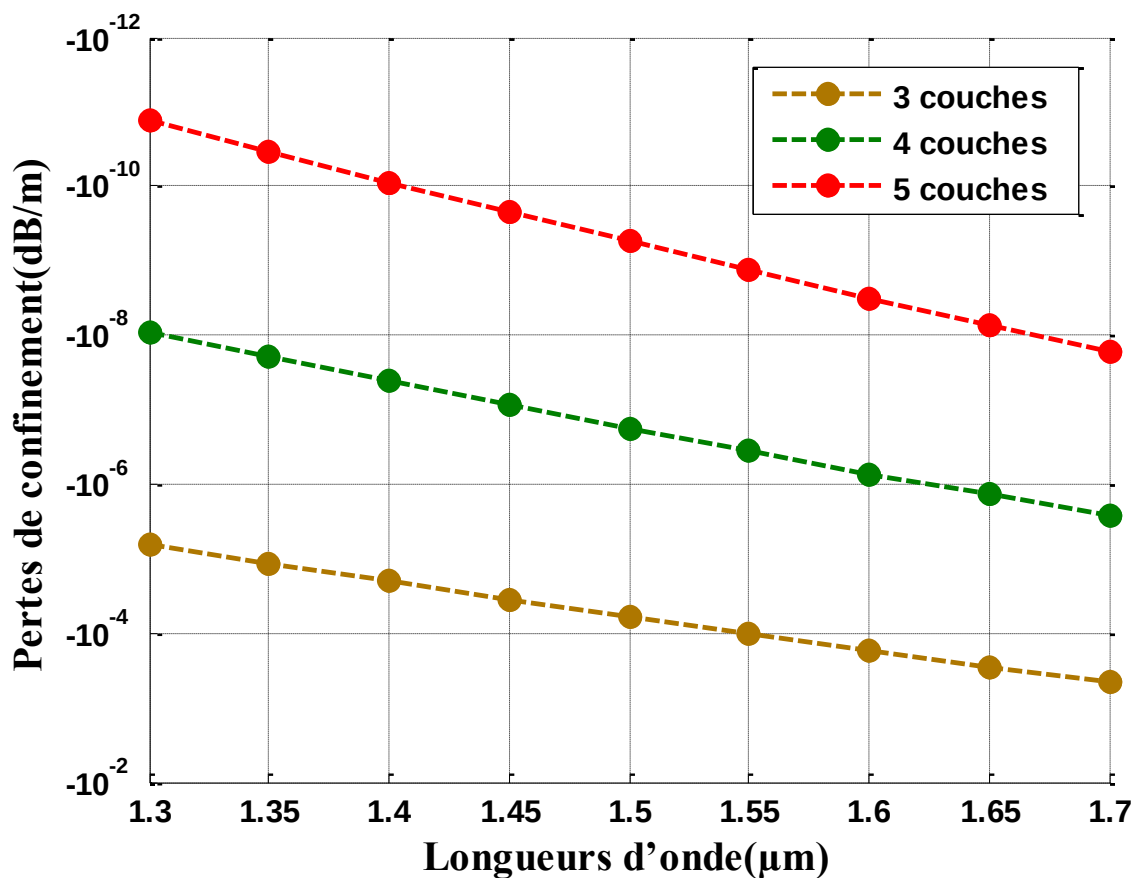


Figure III.15: Pertes de confinement de FCP en fonction de longueur d'onde.

La figure III.16 illustre la variation de l'intensité modale du mode fondamental dans les trous en fonction de la longueur d'onde. Ce résultat est en accord avec les pertes par confinement en fonction de la longueur d'onde que nous avons présentées par la figure III.15. On observe clairement que lorsque la longueur d'onde diminue (figure III.16 (a)), le champ est confiné dans la région constituant le cœur de la fibre. Au contraire, lorsque la longueur d'onde augmente (figure III.16 (b)), le champ s'étend de plus en plus dans la gaine.

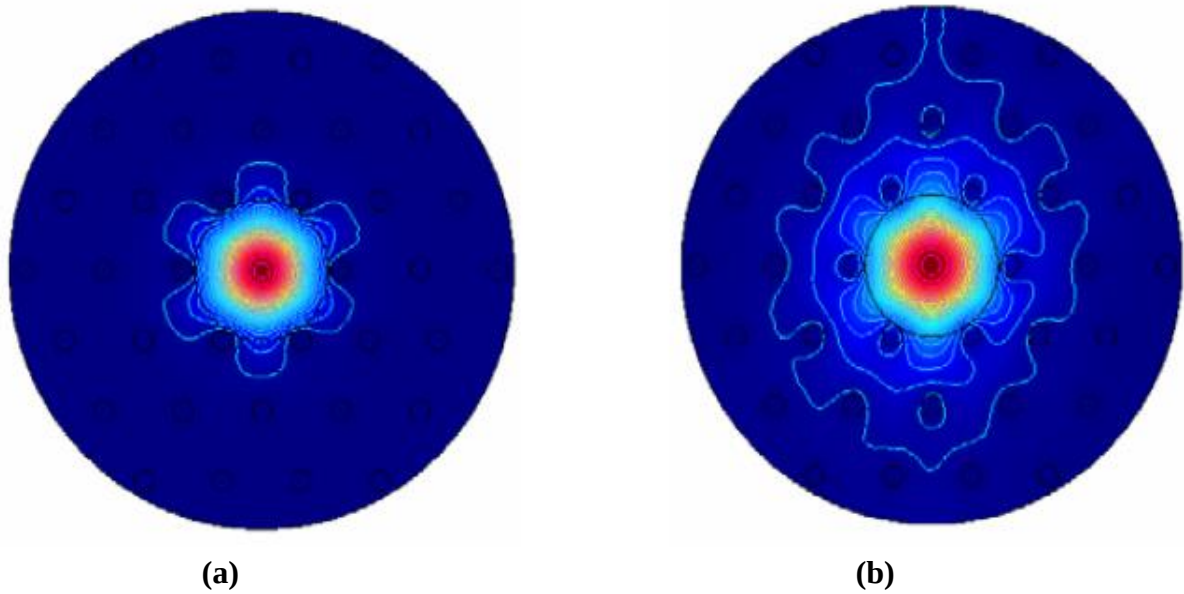


Figure III.16 : *Intensité modale du mode fondamental dans une FCP à longueur d'onde de (a) 600 nm et (b) 1550 nm.*

X.1 Etude des pertes par confinement de deux structures différentes

Pour analyser l'influence de l'arrangement des trous d'air sur les pertes par confinement, on fait une étude comparative entre deux FCPs, dont la première à un arrangement hexagonale (FCP-H), et la deuxième avec un arrangement octogonale (FCP-O). La figure III.17 schématise les deux types de FCPs que nous proposons de comparer.

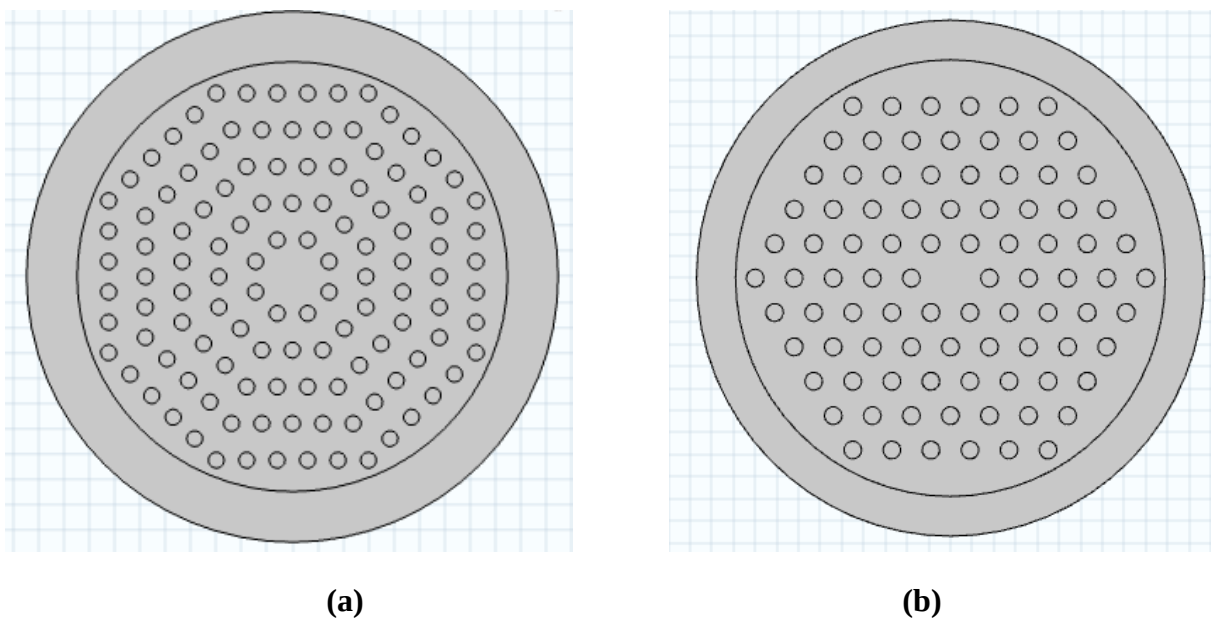


Figure III.17 : *Section transverse de la (a) FCP-octogonale et (b) FCP-hexagonale.*

Les deux FCPs proposées possèdent le même diamètre de trous ($d = 1.2\mu\text{m}$), le même pas du réseau ($\Lambda = 1.9\mu\text{m}$), le même nombre de couche ($N = 5$), L'indice de réfraction des trous d'air est $n_0=1$, et l'indice de réfraction de la gaine microstructurée évolue avec la longueur d'onde suivant la loi de Sellmeier.

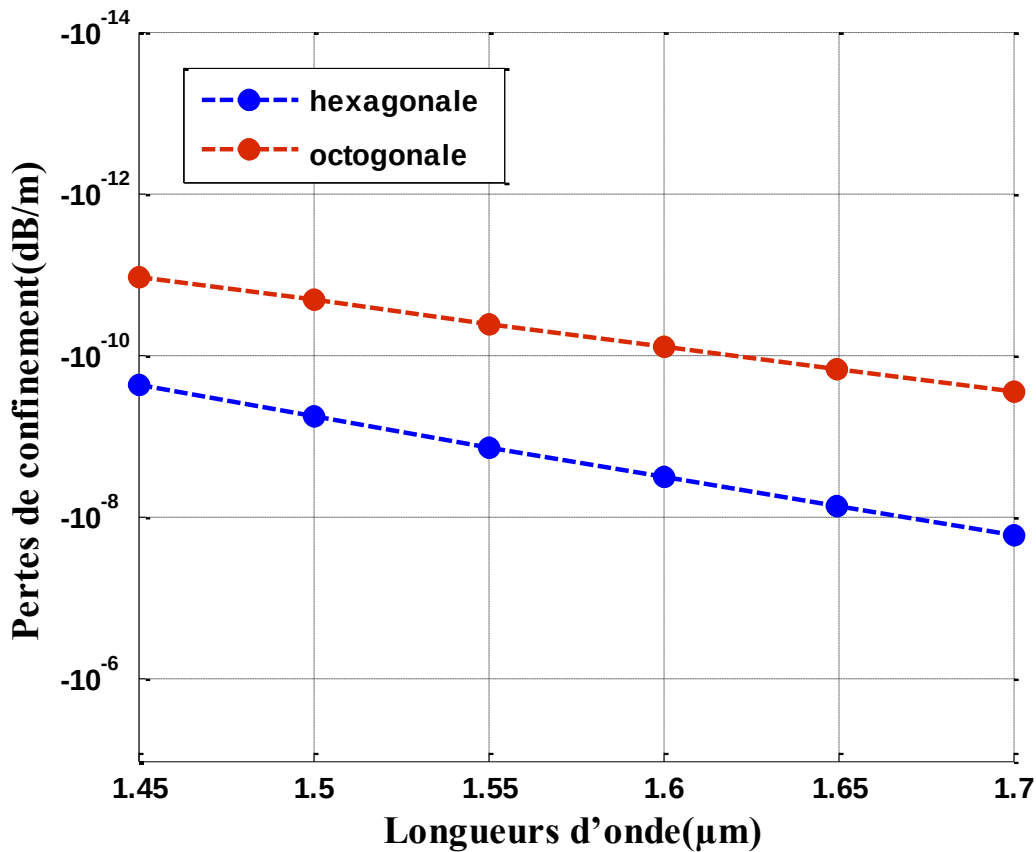


Figure III.18 : Etude comparative sur les pertes de confinement en fonction de longueur d'onde entre une FCP-H et une FCP-O.

D'après la figure III.18, on remarque que pour chaque arrangement de trous (hexagonal ou octogonale) les pertes de confinement augmentent lorsque la longueur d'onde croît. Ce résultat est en accord avec les propriétés du champ du mode fondamental dans une FCP que nous avons présentées dans le paragraphe précédent. Ainsi on observe clairement que les pertes de confinement de la FCP-O est plus petite que celle de la FCP-H, et la différence est d'environ deux ordres de grandeur.

La figure III.19 montre les pertes par confinement en fonction de d pour les deux types de fibres (FCP-O et FCP-H) à 1550 nm avec $\Lambda = 1.9\mu\text{m}$. D'après cette figure, on observe clairement que les pertes par confinement augmentent avec la diminution de d . En outre, il est confirmé que les pertes de confinement des FCP-Os sont inférieures à ceux des FCP-Hs dans

les mêmes conditions. On peut conclure que l'évolution des pertes suit la répartition du champ du mode fondamental. Plus le champ se trouve piégé dans le cœur central et moins les pertes sont élevées.

On peut tirer de cette étude que la FCP-O peut ainsi limiter le champ par rapport à FCP-H. Nous expliquerons cela par le fait que les FCP-Os ont la plus grande proportion d'air que les FCP-Hs.

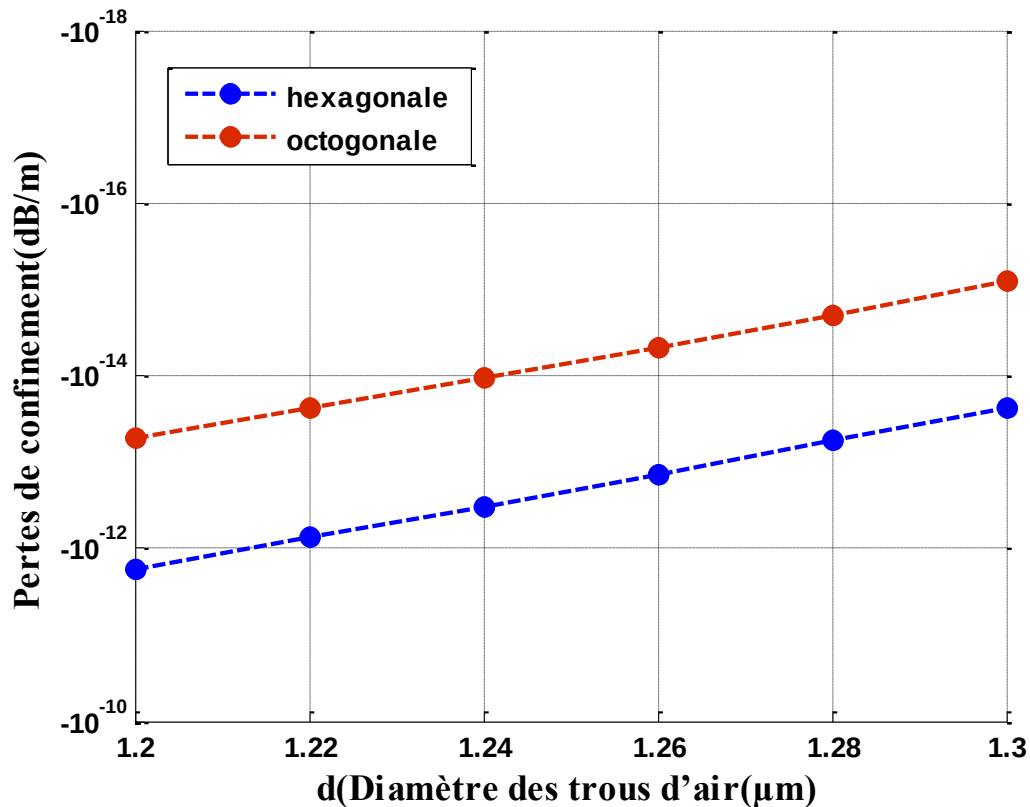


Figure III.19 : Etude comparative sur les pertes de confinement en fonction de d entre une FCP-H et une FCP-O.

XI. Etude de la biréfringence

En raison de nombreuses potentialités d'applications nécessitant le maintien de la polarisation, l'introduction d'une biréfringence contrôlée dans les nouvelles fibres FCPs fait l'objet actuellement de recherches intensives. Partant de la structure idéale d'une FCP, ayant une symétrie de rotation parfaite, la biréfringence peut néanmoins être facilement introduite en utilisant, soit des trous d'air circulaires de diamètre non-uniforme, soit des trous elliptiques.

La figure III.20 représente l'évolution de la biréfringence de phase d'une FCP-H pour une plage des longueurs d'onde allant de 1400 à 1650 nm. Cette courbe indique la différence entre les indices effectifs des deux états de polarisation du mode fondamental. Nous constatons que la biréfringence varie de $5.16 \cdot 10^{-8}$ à $5.98 \cdot 10^{-8}$, en passant par une valeur de $5,75 \cdot 10^{-8}$ à $1,55\mu\text{m}$.

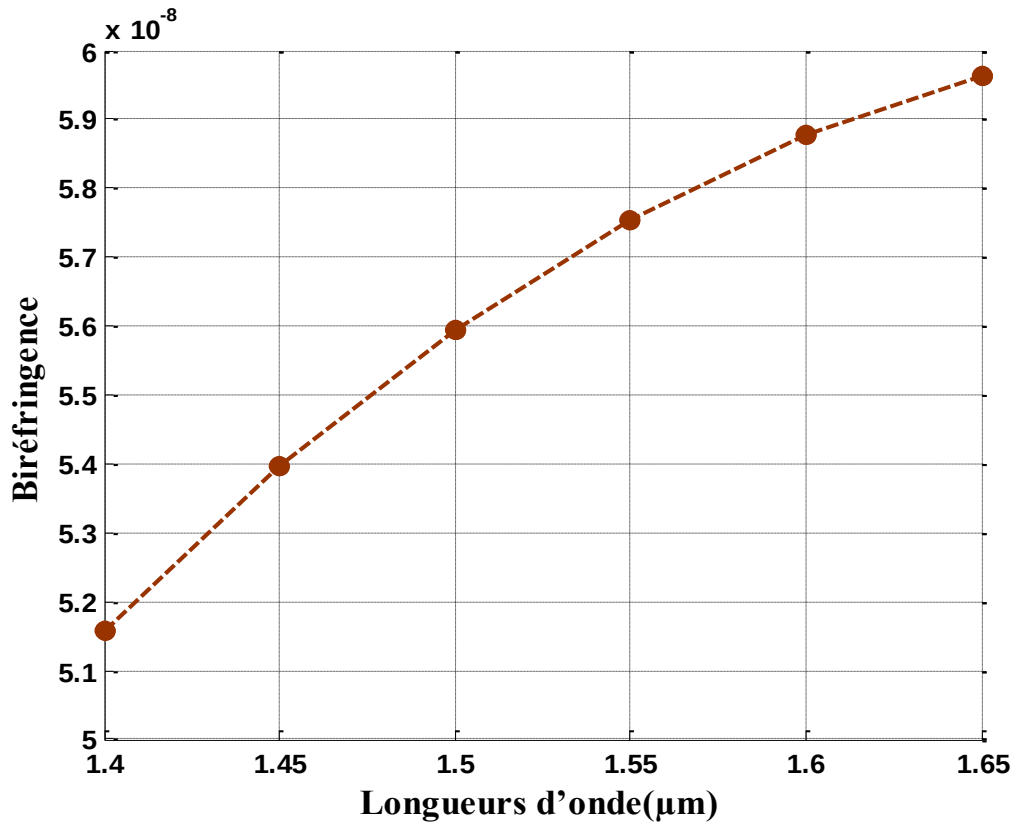


Figure III.20 : la variation de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde de la FCP-H.

XI.1 Etude comparative de la biréfringence entre une FCP-H et une FCP-O

Afin d'évaluer l'impact de l'arrangement des trous d'air sur la biréfringence, on fait une étude comparative entre deux FCPs, dont la première est une FCP-H, et la deuxième est une FCP-O. La figure III.21 représente les courbes de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde pour la FCP-H et de la FCP-O.

D'après cette figure, on remarque que la courbe de la biréfringence de la FCP-H est supérieure à celle de la FCP-O. Donc on peut conclure, que la structure FCP-O est plus symétrique que la structure FCP-H.

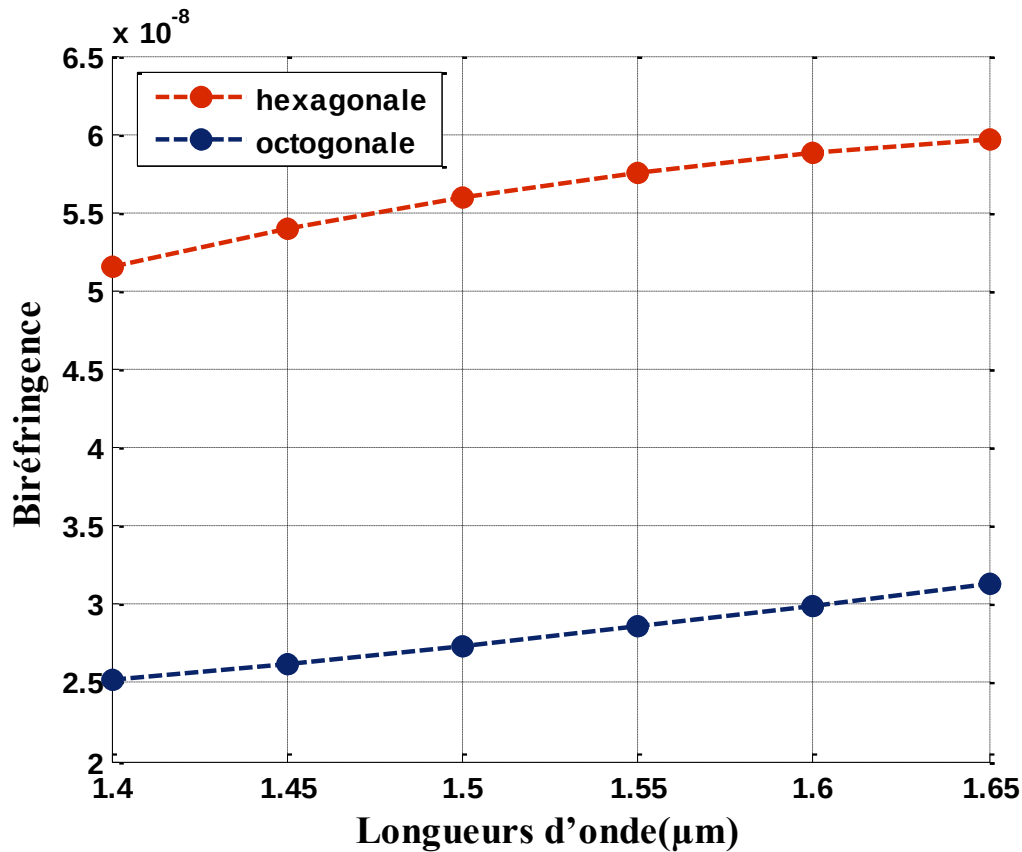


Figure III.21 : Etude comparative sur la variation de la biréfringence en fonction de longueur d'onde entre une FCP-H et FCP-O.

XI.2 Influence des déformations elliptiques des trous d'air de la première couche sur la biréfringence

Nous sommes intéressés dans cette étude à analyser l'impact de quelques déformations géométriques sur la biréfringence. Les déformations géométriques pouvant briser la symétrie d'une FCP sont dues à un changement de position et/ou de formes de certains trous par rapport à leur caractéristiques nominales. Nous allons étudier quelques cas simples qui nous semblent représentatifs des déformations susceptibles d'exister le plus couramment.

Afin d'étudier l'influence du changement des trous d'air de la forme circulaire à la forme elliptique de la première couche (Figure III.22) sur la biréfringence de la FCP-H proposé, nous avons présenté sur la figure III.23 la variation de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs d'ellipticité η . Pour ce faire, les paramètres de

la FCP-H sont conservés avec l'introduction d'une ellipticité de 0.1, 0.2 et 0.3 sur les trous d'air de la première couche.

$$\text{Avec : } \eta = \frac{dx}{dy} \quad (\text{III.3})$$

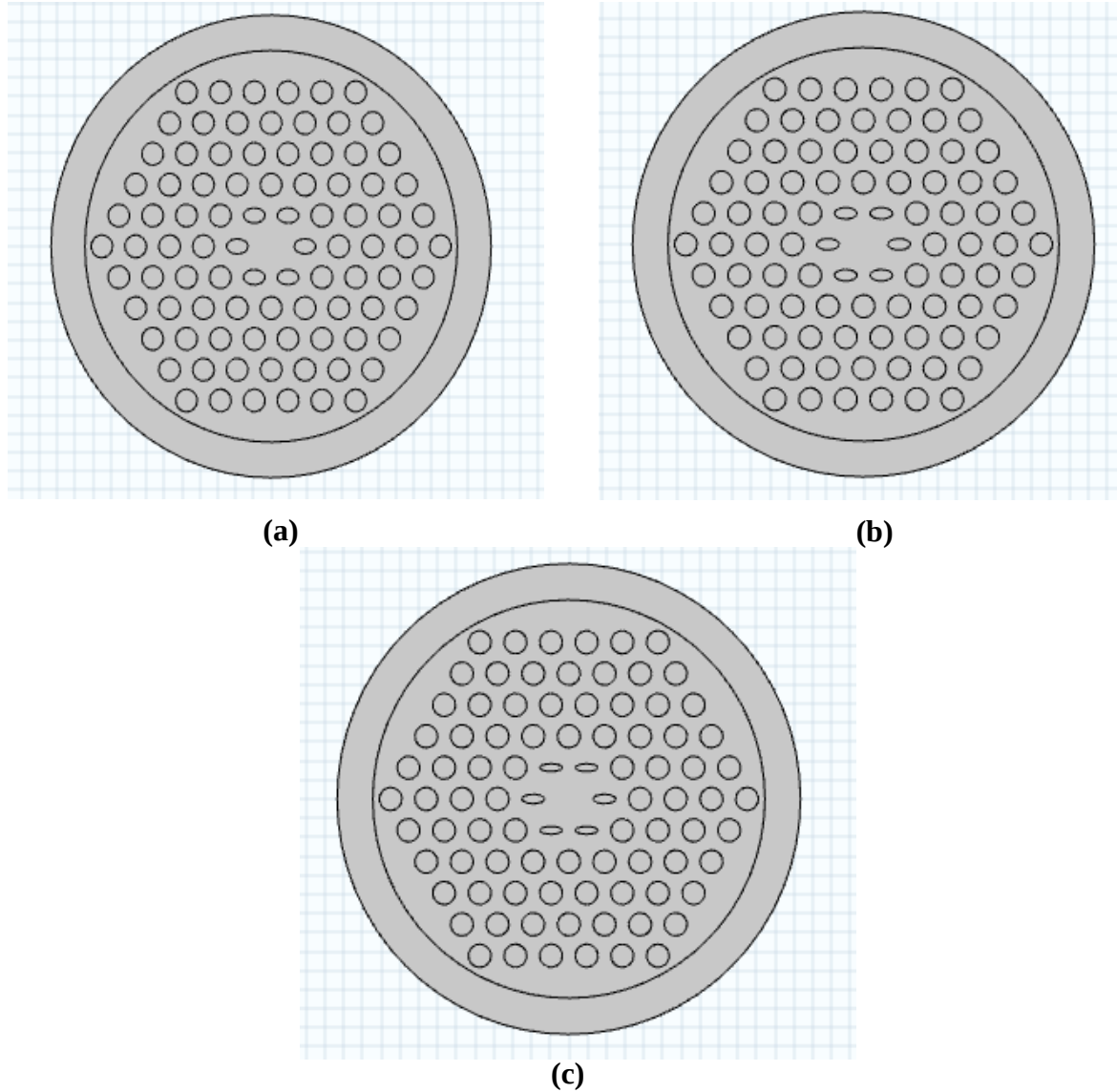


Figure III.22: Section transverse de la FCP-H avec ellipticité des trous d'air dans la première couche (a) : ($\eta = 0.1$), (b) : ($\eta = 0.2$) et (c) : ($\eta = 0.3$)

D'après la figure III.23, on voit que l'évolution de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde est croissante pour les trois changements ($\eta = 0.1, 0.2$ et 0.3) et on observe clairement que lorsqu'on introduisant une ellipticité des trous sur la première couche, on remarque que la biréfringence est de l'ordre de 10^{-3} , ce qui est cinq ordres de grandeur supérieur à celle de la FCP conventionnelle (10^{-8}).

On remarque aussi que pour chaque longueur d'onde la biréfringence augmente avec l'augmentation de η . Ces calculs confirment que plus η augmente, plus la structure est déformée ce qui augmente la biréfringence.

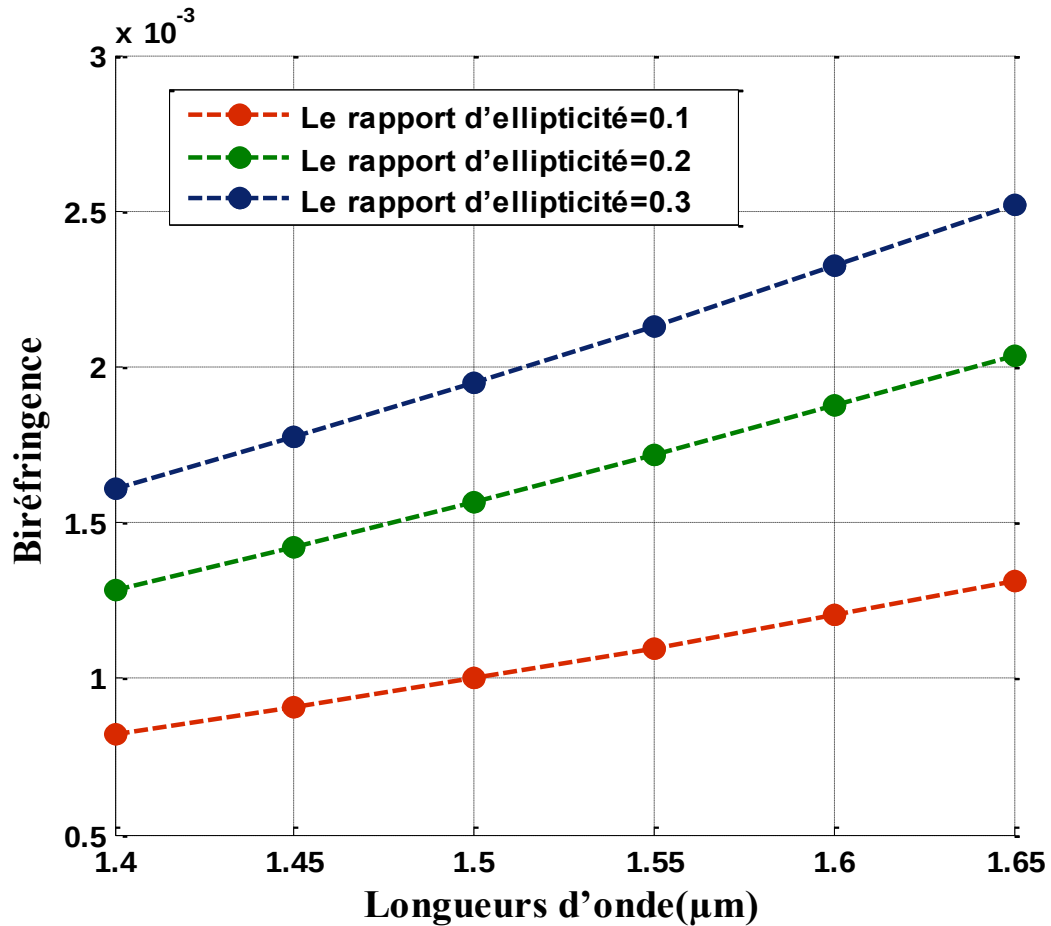


Figure III.23 : Variation de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde de la FCP-H avec différente valeur d'ellipticité des trous d'air de la première couche.

XI.3 Etude comparative de la biréfringence entre une FCP-H et FCP-O avec ellipticité des trous d'air de la première couche

Dans un second temps, nous cherchons à évaluer l'influence de la compression des trous d'air de la première couche sur la biréfringence de la FCP-H et FCP-O. La figure III.24 schématise les deux types de FCPs que nous proposons de comparer.

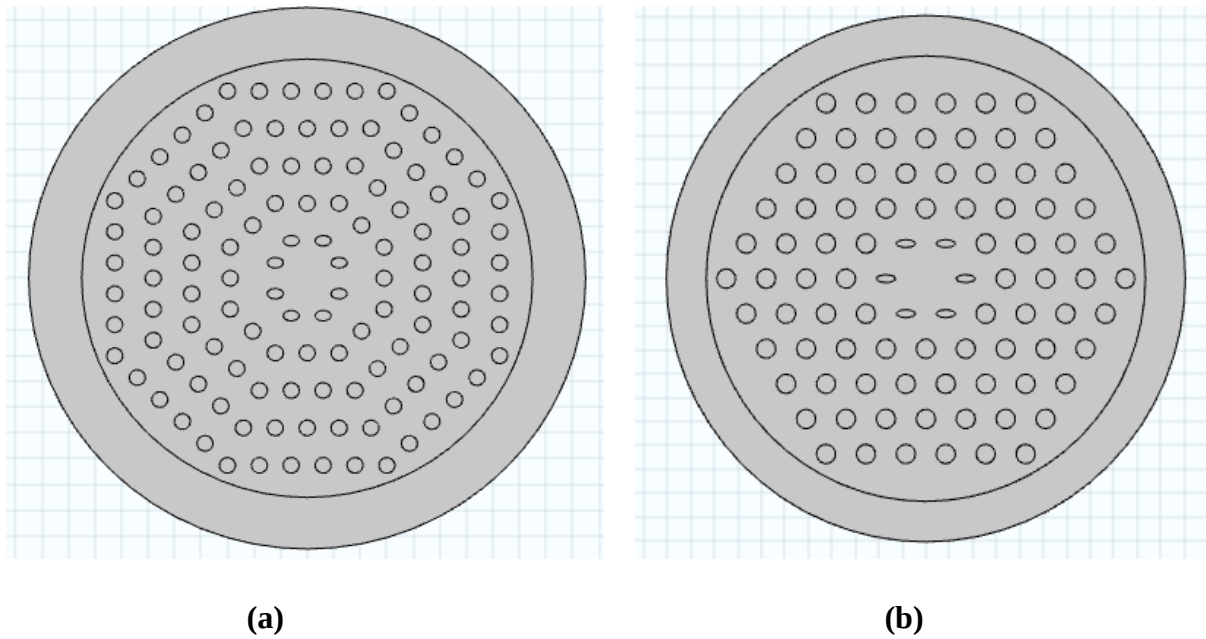


Figure III.24 : Section transverse de la : (a) FCP-O et (b) FCP-H avec ellipticité des trous d'air de la première couche

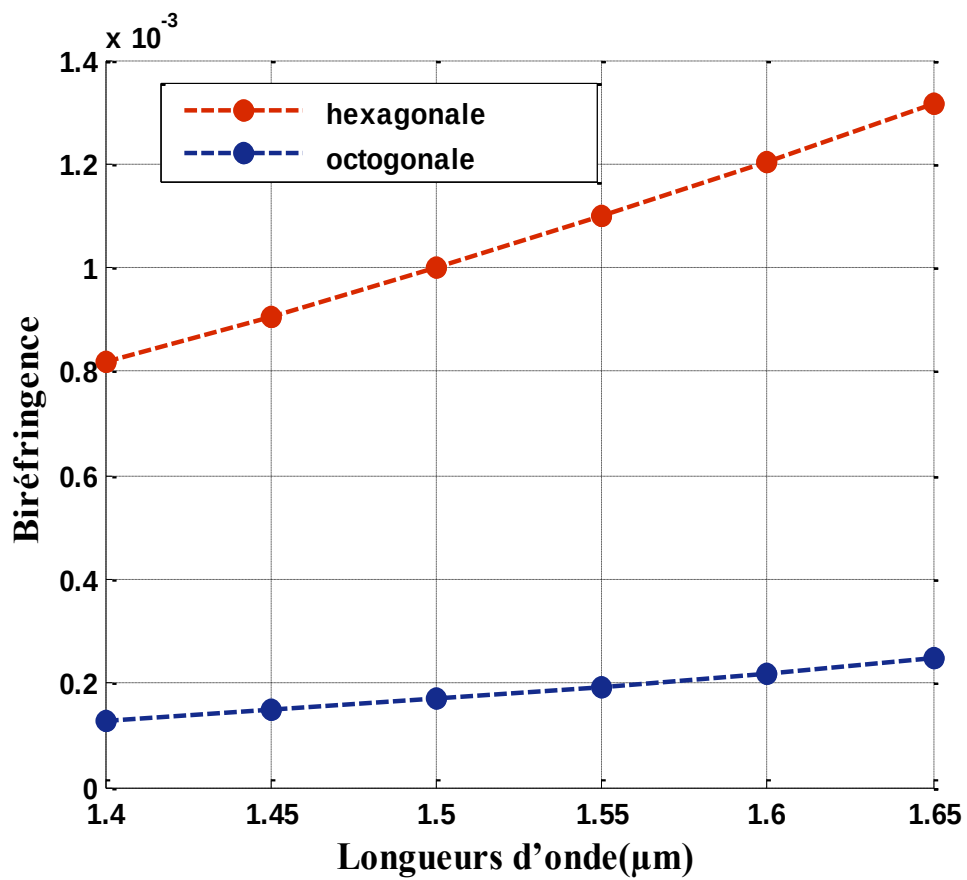


Figure III.25 : Etude comparative sur la variation de la biréfringence entre une FCP-H et une FCP-O avec ellipticité des trous d'air de la première couche

D'après la figure III.25, on observe clairement que lorsqu'en introduisant une ellipticité sur la première couche, l'écart entre les deux courbes augmente presque trois fois par rapport aux structures conventionnelles.

XII. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe des fibres FCP et les deux types de guidage qui pouvant opérer dans ces fibres de nouvelle génération, ce qui permet de distinguer entre les FCP-BIP et les FCP-RT.

Ensuite nous avons présenté notre exploitation du logiciel COMSOL Multiphysics et nous avons mis l'accent sur la méthode des éléments finis que nous avons utilisée dans nos calculs et les étapes suivies pour la caractérisation d'une FCP.

Nous avons mené une étude sur la caractérisation des pertes par confinement et la biréfringence. Nous avons analysé l'impact des déformations géométriques sur ces paramètres. Nous avons aussi comparé l'influence de l'arrangement des trous d'air sur la structure de la FCP. En outre, il est confirmé que les pertes par confinement des FCP-Os sont inférieures à ceux des FCP-Hs dans les mêmes conditions. Enfin, nous avons montré que l'introduction d'une ellipticité sur la première couche nous a permis d'améliorer la biréfringence.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

L'évolution des communications optiques a permis aux réseaux de télécommunications d'atteindre un niveau de performances extraordinaires et a ouvert les portes devant l'apparition de nouvelles disciplines qui visent l'amélioration de l'existant et la création de nouveaux dispositifs pour la transmission et le traitement du signal optique.

Ce travail porte sur l'étude, la modélisation et la simulation de quelque propriété dans les fibres optiques de nouvelle génération communément dénommées "Fibres à Cristaux Photoniques (FCP)". Dans un premier temps, nous sommes intéressés dans nos travaux à l'analyse des caractéristiques optiques originales aux fibres optiques standards.

Nous avons indiqué dans le premier chapitre de ce travail les notions théoriques sur la construction du système de transmission par fibre optique, nous avons présenté les composants d'émission et de réception, son principe de fonctionnement, fabrication d'une fibre optique, et finalement les domaines d'applications.

Ensuite, dans le deuxième chapitre nous avons présenté les propriétés de la fibre optique standard.

Le troisième chapitre a été consacré à l'étude et l'analyse des FCPs. Nous avons comparé l'influence des paramètres optoélectronique de la FCP sur quelque propriété linéaire. Notons que la modification des caractéristiques de la microstructure de la gaine permet d'obtenir de nouvelles propriétés de la biréfringence et les pertes par confinement.

La comparaison des résultats obtenus à ceux des travaux antérieurs a démontré l'efficacité de la méthode MEF dans la modélisation des fibres FCP.

Nous avons effectué des simulations sur deux structures des fibres cristaux photonique hexagonale et octogonale par logiciel COMSOL Multiphysics et faire une comparaison entre eux.

Nous avons trouvé à travers les résultats obtenus que le confinement du champ dans le FCP peut être contrôlé à l'aide des paramètres géométriques Λ et d . La biréfringence

Conclusion générale

associée à l'étalement du champ en fonction de la longueur d'onde peut également être affinée en choisissant Λ et d .

***Références
Bibliographiques***

Références bibliographiques

- [1] BEDOUI Amar, « Etude des éléments d'une liaison optique en microonde », Article, Paris, 2006.
- [2] N. S. Bergano, « Current and Future Technologies for Submarine Transmission », Thèse de doctorat, LEOS'2004, (Puerto Rico)
- [3] BOUDRIOUA Nassima, « Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD », Thèse de master, l'Université Paul Verlaine – Metz, 2007.
- [4] VERNEUIL Jean-Louis, « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s Présentée et soutenue publiquement » Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2009.
- [5] HAMMACHE Hmza Rached, « Etude et simulation des pertes dans une liaison fibre optique avec application », Thèse de master, Université de Bejaïa, 2016.
- [6] FARHAOUI Fatima Zohra et ZAIDI Fatima Zohra, « Etude et Simulation d'une Chaîne de Transmission Numérique sur Fibre Optique Haut », Thèse de master, UNIVERSITE Dr. TAHAR MOULAY - SAIDA ,2017.
- [7] SOUFARI Ikram, « Contrôle de la dispersion chromatique sur la transmission par fibre optique », Thèse de master, Université Amar Telidji – Laghouat, 2018.
- [8] <https://illustrationprize.com/fr/57-difference-between-led-amp-diode>.
- [9] MAHROUG Maghnia et KIDARI Asma « L'approximation analytique et l'analyse de différentes propriétés des fibres cristallines photoniques », Thèse de master, UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID TLEMCEM, 2015.
- [10] FERHATI Soumia, « Etude et simulation des fibres optiques microstructures (FOM) », Thèse de master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2018.
- [11] <https://fr.gadget-info.com/difference-between-optical-fibre>.
- [12] ANTAM Nourddine ET EL SABIR Khaoula ET OUZZINE Abedrazzaq « Fibres Optiques : Modes de Propagation », Thèse de master, Faculté Polydisciplinaire de Ouarzazate ,2020.

[13] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/telecommunications-technologies-optiques>.

[14] <https://www.physagreg.fr/optique-11-lois-optique-geometrique.php>.

[15] http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2007/rlefievr_Fibre_Optique_et_WDM

[16] BOURKAIB Zahia et CHERTOUH Sonia, « Etude et supervision des câbles fibres optiques par OMNS (application sur les réseaux d'Algérie télécom », Thèse de master, UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI - TIZI-OUZOU, 2010.

[17] SLIMI Ouidette, « Microlentillage d'une fibre optique », Thèse de doctorat, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF, 2012.

[18] CHERIFI Nesrine et DEROUICHE Samra, « Etude pratique sur les étapes de préparation des fibres optiques », Thèse de master, Université Abou BakrBelkaid - Tlemcen -,2015.

[19] <https://community.fs.com/fr/blog/how-to-reduce-various-types-of-losses-in-optical-fiber.html>

[20] <https://www.acome.com/fr/publications/446-paroles-dexperts/2657-impact-des-micro-courbures-et-macro-courbures-sur-le-budget?fbclid>

[21] BELALIA Aissa, « Analyse et Détermination des Caractéristiques des Fibres optiques à Cristaux Photoniques ‘ FCP ‘ », Article, USTHB, 2012.

[22] MEDJDOUB Fadila, « Optimisation par la simulation système d'une chaine de transmission numérique par fibre optique haut débit », thèse de doctorat, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEM, 2010.

[23] MAURY Julien, « Etude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique », Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE LIMOGES, 2003

[24] https://pmb.univ-saida.dz/butecopac/doc_num.php?explnum_id=637

[25] BENAÏSSA Fatima, « Etude et Simulation de la propagation des ondes électromagnétiques dans les guides à cristaux photoniques-application aux fibres optiques », Thèse de doctorat, Université A.B.B. Tlemcen, 2013.

[26] KOUSSIKAN Cédric Antoine, « Modélisation des fibres a cristaux photoniques a réflexion totale interne », Article, UNIVERSITÉ D'ABOMEY-CALAVI, 2012

[27] PEYRILLOUX Ambre, « Modélisation et caractérisation des fibres microstructurées air/silice pour application aux télécommunications optiques », Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE LIMOGES, 2003.

[28] HADDOUCHE Issam, «Desing of an Optical Fiber-Based Sensor for Water Quality Control”, Article, USTHB, 2018.

[29] <https://www.comsol.fr/>

[30] SONNE Abdelkader « Conception est simulation des FCPs en vue de leur utilisation dans les télécommunications », Article, Université Amar Telidji – Laghouat.