

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Amar Thelidji-Laghouat-



FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE MASTER

Réalisé par : Benguit Aicha et Senouci Rokaia

DOMAINE : Science et Technologie

FILIERE : Télécommunication

OPTION : RESEAUX ET TELECOMMUNICATIONS

Thème

**Etude et simulations des fibres optiques à
cristaux photoniques**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Dr. ROUGAB Ilyas	MAA (UAT Laghouat)	Président.
Dr. SONNE Abdelkader	MCA (UAT Laghouat)	Rapporteur.
Dr. GUEFFAF Hamza	MCA (UAT Laghouat)	Examineur.

Promotion 2021/2022.

DEDICACE

Au nom de DIEU clément et miséricordieux

Nous dédie Ce modeste travail:

A nos parents que Dieu les protège.

A tous nos frères et sœurs, ainsi que leurs enfants.

A tous les membres de nos familles, petits et grands.

A tous nos amis et camarades.

Rokaia, Aicha

Remerciements

Nous remercions DIEU, le Miséricordieux de nous avoir données Foi, volonté, et courage pour atteindre notre objectif.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et nos profondes reconnaissances à notre encadreur Mr SONNE Abdelkader, pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.

Nous remercions aussi les personnes qui nous font l'honneur de participer à notre jury de soutenance.

Enfin, nous présentons nos remerciements, notre respect, notre gratitude et notre attachement à toutes les personnes ayant contribué au bon déroulement de ce travail.

Résumé

Les fibres à cristaux photoniques (PCF) représentent une nouvelle catégorie de guides d'ondes optiques qui possèdent des caractéristiques optiques inédites. Les FCPs 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. 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 PCFs en étudiant l'impact des déformations géométriques sur les pertes par confinements et la biréfringence. La méthode des éléments finis a été adoptée pour l'analyse des structures.

Mots-clés : fibre à cristaux photoniques, Dispersion chromatique, Biréfringence, perte par confinement.

Abstract

Photonic crystal fibres (PCF) represent a new class of optical waveguides that possess novel optical characteristics. PCFs have a number of degrees of freedom which is greater in importance than conventional fibres. In fact, the optical properties of these fibres are adjustable, resulting in a multitude of potential applications. Hence the interest in these fibres in particular in the field of telecommunications. In our work, we were interested in the characterization of the optical properties of PCFs by studying the impact of geometric deformations on the confinement losses and birefringence. The finite element method has been adopted for the analysis of structures.

Keywords: photonic crystal fiber, Chromatic dispersion, Birefringence, loss by confinement.

ملخص

تمثل الألياف البلورية الضوئية فئة جديدة من الأدلة الموجات الضوئية التي تملك خصائص بصرية جديدة. تتمتع هذه الألياف البلورية الضوئية بعدد كبير من درجات الحرية التي تعتبر أكثر أهمية من الألياف التقليدية.

في الواقع، الخصائص البصرية لهذه الألياف قابلة للتعديل، مما ينتج عنه العديد من التطبيقات المحتملة. ومن هنا جاء الاهتمام بهذه الألياف على وجه الخصوص في مجال الاتصالات. في عملنا كنا مهتمين بتوصيف الخصائص البصرية لألياف البلورية الضوئية.

قمنا بدراسة تأثير التشوهات الهندسية على خسائر الحبس والانكسار. واعتمادنا طريقة العناصر المحدودة لتحليل الهياكل

الكلمات المفتاحية: الألياف البلورية الضوئية ، التشتت اللوني ، الانكسار ، الفقد بالحبس

Sommaire

DEDICACE.....	I
Remerciement.....	II
Résumé.....	III
Introduction générale.....	1

Chapitre I Généralité sur les liaisons par fibres optiques

I.Introduction.....	4
II. Les différents types de réseaux.....	4
II.1 Le réseau local (LAN, Local Area Network).....	5
II.2 Le réseau métropolitain (MAN, Métropolitain Area Network).....	5
II.3 Le réseau étendu ou longue distance (WAN, Wide Area Network).....	6
III. Les différents types de câblage.....	7
III.1 Câble à paire torsadée.....	8
III.2 Le câble coaxial.....	9
III.3 Câble fibre optique.....	9
IV. Système de transmission sur fibre optique.....	10
IV.1 Le module d'émission.....	11
IV.1.1 La diode DEL.....	11
IV.1.2 La diode laser.....	12
IV. 1.3 La modulation.....	12
IV.1.4 Les principales différences entre Diode électro-luminescente et Diode.....	14
IV.2 Le module de réception.....	15
IV.2.1 Photodiode PIN.....	16
IV.2.2 Photodiode APD.....	16
IV.2.3 L'amplificateur électrique.....	17
IV.2.4 Le filtrage.....	17
IV.2.5 Le régénérateur.....	18
V.Conclusion.....	19

Chapitre II Fibre optique conventionnelle

I. Introduction.....	21
II. Présentation du logiciel OptiFiber et OptiSystem.....	21
III. Brève historique.....	23
IV. Structure de la fibre optique.....	23
V. Différents types de fibre optique.....	24
V.1 Fibres Multimodes.....	24

Sommaire

V.2 Les fibres optiques monomodes.....	26
VI. Avantages et inconvénients des fibres optiques.....	26
VI.1 Les avantages de la fibre optique.....	26
VI.2 Les inconvénients de la fibre optique.....	27
VII. Caractéristiques de la fibre.....	28
VII.1 L'atténuation.....	28
VII.2 Pertes extrinsèques.....	30
VII.3 Dispersion.....	31
VII.3.1 Dispersion intermodal.....	32
VII.3.2 La dispersion chromatique.....	33
VII.3.2.1 La dispersion du matériau.....	34
VII.3.2.2 La dispersion du guide.....	35
VII.3.2.3 Effets de La dispersion chromatique sur la transmission.....	36
VII.4 La biréfringence.....	37
VII.4.1 la dispersion de polarisation PMD.....	38
VIII. Les fenêtres utilisées dans les télécommunications optiques.....	28
IX. Les techniques de transmission dans Les fibres optiques.....	39
IX.1 Le multiplexage temporel (TDM).....	40
IX.2 Multiplexage en longueur d'onde (WDM).....	40
X. Conclusion.....	41

Chapitre III Simulation des fibres optiques à cristaux photonique

I. Introduction.....	43
II. Propriétés de base des cristaux photoniques.....	43
II.1 Périodicité à une dimension	43
II.2 Périodicité à deux dimensions	44
III. Concept des fibres à cristaux photoniques.....	44
IV. Type des fibres cristaux photoniques.....	45
IV.1. Bande Interdite Photonique (BIP)	46
IV.2. Réflexion totale interne modifiée (RTIM).....	47
V. Introduction à COMSOL Multiphysics.....	48
V. 1 Création du modèle de la simulation.....	49
V.2 Définition des paramètres globaux et création de la géométrie.....	50
V.3 Détermination du profil d'indice.....	51
V.4 Choix de matériaux.....	51

Sommaire

V.4.1 Insertion des nouveaux matériaux.....	52
V.5 Le Maillage.....	53
V.6 Détermination de la distribution du mode d'une fibre optique Standard.....	54
VI. Etude de la biréfringence dans les fibres optiques conventionnelles.....	55
VI.1. Fibres optiques conventionnelles à cœur circuler.....	56
VI.2. Fibres optiques conventionnelles à cœur elliptique.....	57
VII. Détermination de la distribution du mode fondamental de la fibre à cristaux photonique.....	58
VII.1 Etude de la biréfringence dans les fibres à cristaux photoniques.....	61
VII.2 Influence des déformations elliptiques des trous d'air de la première couche de la FCP-H sur la biréfringence.....	62
VIII. Etude des pertes par confinement dans une FCP-H.....	64
IX. Conclusion.....	67
Conclusion général.....	70
Références Bibliographiques.....	72

Liste de figures

<i>Chapitre I</i>	<i>Généralité sur les liaisons par fibres optiques</i>
Figure I.1: Différents types de réseaux.....	4
Figure I.2. Réseau local (LAN).....	5
Figure I.3: Réseau Métropolitain(MAN).....	6
Figure I.4. Réseau longue distance(WAN).....	6
Figure I.5: Canal de transmission.....	7
Figure I.6 : Paire torsadée blindée.....	8
Figure I.7 : Câble coaxial.....	9
Figure I.8 : Câble à fibre optique.....	10
Figure I.9 : Schéma d'une liaison par fibre optique.....	11
Figure I.10 : Principe d'une modulation directe.....	12
Figure I.11 : Modulation directe d'une diode laser.....	13
Figure I.12 : Principe d'une modulation externe.....	13
Figure I.13 : Largeur spectrale d'une DEL.....	14
Figure I.14 : Largeur spectrale d'un laser.....	14
Figure I.15 : La rapidité d'une DEL.....	15
Figure I.16 : La rapidité d'un laser.....	15
Figure I.17 : Schéma d'un récepteur.....	15
Figure I.18 : Structure d'une photodiode PIN.....	16
Figure I.19 : Structure d'une photodiode APD.....	17
Figure I.20 : Structure d'un amplificateur.....	17
Figure I.21 : Réponses fréquentielles du filtre de Nyquist.....	18
Figure I.22 : Présentation temporelle de la régénération des données.	18
 <i>Chapitre II</i>	 <i>Fibre optique conventionnelle</i>
Figure II.1 : L'interface de travail sur OptiFiber.....	21
Figure II.2 : L'interface de travail sur OptiSystem.....	22

Liste de figures

Figure II.3 : Structure d'une fibre optique.....	24
Figure II.4 : La fibre optique multimodes à saut d'indice.....	25
Figure II.5 : La fibre multimodes à gradient d'indice.....	25
Figure II.6 : Les fibres monomode avec propagation d'une impulsion..	26
Figure II.7 : Exemples de caractéristiques de quelques fibres optiques de transmission.....	29
Figure II.8 : Perte par courbure.....	30
Figure II.9 : Perte par micro-courbure.....	30
Figure II.10 : Illustration du phénomène de la dispersion.....	31
Figure II.11 : Le phénomène de dispersion intermodale.....	32
Figure II.12 : Dispersion chromatique dans une fibre optique.....	33
Figure II.13 : Dispersion du matériau en fonction de la longueur d'onde.....	34
Figure II.14 : Dispersion du guide en fonction de la longueur d'onde.....	35
Figure II.15 : Dispersion du guide, du matériau et dispersion chromatique d'une fibre optique.....	36
Figure II.16 : L'effet de l'atténuation et la dispersion chromatique Sur la transmission.....	37
Figure II.17 : Effet de la PMD sur le mode.....	38
Figure II.18 : Schéma de principe du multiplexage ETDM dans les communications par fibre optique.....	40
Figure II.19 : Schéma de principe du multiplexage WDM dans les communications par fibre optique.....	41

Chapitre III

Simulation des fibres optiques à cristaux photonique

Figure III.1 : Exemple de structure périodique unidimensionnel.....	43
Figure III.2 : Exemple de structure périodique bidimensionnel.....	44
Figure III.3 : Concept des fibres à cristaux photoniques.....	45
Figure III.4 : Guidage par effet BIP, $n_1=1.45$ (silice) et $n_2=1$ (air).....	46

Liste de figures

Figure III.5 : Guidage par RTIM, $n_1=1.45$ (silice) et $n_2=1$ (air)(bleu=silice, noir=air).	47
Figure III.6 : L'interface de travail sur COMSOL.....	48
Figure III.7 : Type de l'étude désiré sous comsol.....	49
Figure III.8 : L'équation à résoudre.....	50
Figure III.9 : Déclaration des paramètres.....	50
Figure III.10 : Schéma d'une Fibre standard dessinée par le logiciel.....	51
Figure III.11 : Bibliothèque des matériaux dans COMSOL Multiphysics.	52
Figure III.12 : Maillage de la géométrie obtenue avec Comsol.....	54
Figure III.13 : Représentation du champ électrique du mode guidé.....	54
Figure III.14 : La variation de biréfringence de la fibre en fonction de la longueur d'onde.....	56
Figure III.15 : Distribution du champ du mode fondamental à cœur elliptique pour $\lambda=1.55 \mu\text{m}$	57
Figure III.16 : La variation de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde pour différente valeur de η	58
Figure III.17 : Schéma d'une FCP dessinée par le logiciel.....	59
Figure III.18 : Maillage de la FCP-H obtenue avec Comsol.....	60
Figure III.19 : Représentation du mode fondamental guidé dans la FCP-H à 1550 nm.	60
Figure III.20 : La variation de biréfringence de la FCP-H en fonction de la longueur d'onde.....	61
Figure III.21 : Section transverse du mode fondamental de la FCP-H avec ellipticité des trous d'air dans la première couche.....	62
Figure III.22 : Variation de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde de la FCPH avec différente valeur d'ellipticité des trous d'air de la première couche.....	63
Figure III.23 : Section transverse du mode fondamental de la FCP-H pour différents couches.....	64
Figure III.24 : Pertes par confinement de la FCP-H pour différentes couches en fonction de longueur d'onde.....	65
Figure III.25 : Intensité modale du mode fondamental dans une FCP-H à longueur d'onde de (a) 600 nm et (b) 1550 nm.....	66

Liste de figures

Figure III.26 : Pertes de confinement de FCP-H à 1550 nm en fonction d pour différentes valeurs de N.....	67
--	-----------

Liste de tableau

Chapitre I Généralité sur les liaisons par fibres optiques

Tableau I.1 : Comparaison entre les trois types de réseaux.....7

Chapitre II Fibre optique conventionnelle

Tableau II.1 : Les différentes causes d'atténuation..... 31

Chapitre III Simulation des fibres optiques à cristaux photonique

Tableau III.1: Les coefficients de multiples matériaux de verre à base de silice.....53

Liste des abréviations

LAN	Local Area Network
WAN	Wide Area Network
MA	Metropolitan Area Network
LED	Light Emitting Diode
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
PMD	Polarization Mode Dispersion
FCP	Fibres à Cristaux Photoniques
<i>FCPH</i>	Fibres à Cristaux Photoniques- Hexagonal
FCPO	Fibres à Cristaux Photoniques- Octogonale
BIP	Bande Interdite Photonique
RTIM	Réflexion Totale Interne Modifiée

Introduction

Générale

Introduction générale

Il n'y a pas si longtemps, lorsque les systèmes numériques les plus rapides transmettaient l'information à un débit de 270 Mbits/s, le câble coaxial était parfaitement à même de remplir son rôle de support de transmission. Mais avec l'apparition des nouveaux services liés au développement du multimédia, un besoin d'un débit de transmission d'informations plus élevé est apparu, et une alternative au câble coaxial était à trouver : pertes trop élevées, courtes distances de propagation, performances limitées. La fibre optique remplit très bien ce rôle de support de transmission. Son utilisation est désormais courante dans les réseaux de télécommunications.

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 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.

La fibre à cristal photonique (PCF) est une classe de fibre optique basée sur les propriétés des cristaux photoniques. Il a été exploré pour la première fois en 1996 à l'Université de Bath, au Royaume-Uni.

Ce mémoire s'articule autour des trois chapitres suivants:

Le premier chapitre de ce mémoire décrira les structures des réseaux de télécommunications, ainsi que les diverses techniques d'utilisation de la capacité des fibres optiques. Cette description aidera le lecteur par la suite à comprendre la constitution d'une liaison sur fibre optique.

Le deuxième a pour but de présenter quelques généralités sur les fibres optiques conventionnelles. Nous rappellerons aussi les propriétés et les caractéristiques de ces fibres dans le but d'établir leurs limitations (dispersion chromatique, les pertes par confinement, PMD) dans les systèmes télécommunications optique.

Un ensemble de résultats de simulation concernant les pertes par confinement et la biréfringence est donné dans le dernier chapitre. L'objectif est en particulier d'identifier les matériaux et les paramètres opto-géométriques qui peuvent permettre d'obtenir les caractéristiques de propagation recherchées en fonction de l'application envisagée pour la FCP (grande biréfringence et des faibles pertes par confinement).

Chapitre I

Généralité sur les liaisons par fibres optiques

I. Introduction :

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. La conception de système de transmission à très grande capacité était désormais possible. Ceci fait de la fibre un élément indispensable des réseaux métropolitains, transnationaux et intercontinentaux. Historiquement, les technologies de télécommunications optiques visent donc en premier lieu à transmettre des données et de l'information avec des débits très élevés.

Dans ce chapitre, nous allons faire une brève description des différents composants constituant une liaison par fibre optique. Pour chacun de ces éléments constitutifs, nous tenterons de décrire leur rôle et leur fonctionnement.

II. Les différents types de réseaux

Les systèmes de transmission par fibres optiques peuvent être trouvés dans tous les niveaux du réseau: Réseau grand distance (Wide Area Network (WAN)), Réseau métropolitain (Metro Area Network (MAN)), réseau local (local area network (LAN)). Comme nous venons de le rappeler, il existe trois catégories de réseaux optiques présentées sur la figure I.1 ci-dessous. Les liens sont des câbles constitués de plusieurs fibres optiques.

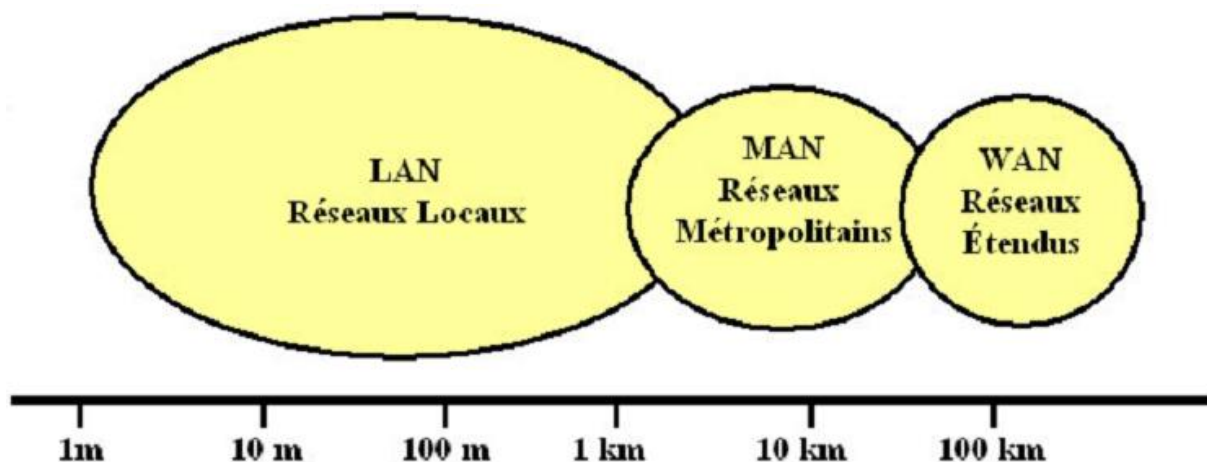


Figure I.1. Différents types de réseaux.

II.1 Le réseau local (LAN, Local Area Network)

Un réseau local (également appelé " Réseau local d'entreprise " ou RLE) (ou en anglais *LAN*, local area network), est un réseau informatique couvrant un rayon de quelques centaines de mètres tout au plus, dans un bâtiment, voire un petit groupe de bâtiments. Apparu dans les années 1970, le réseau local a connu un essor considérable avec le développement de la micro-informatique dans les années 1980 et l'avènement de la norme de communication Ethernet.

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 [1].

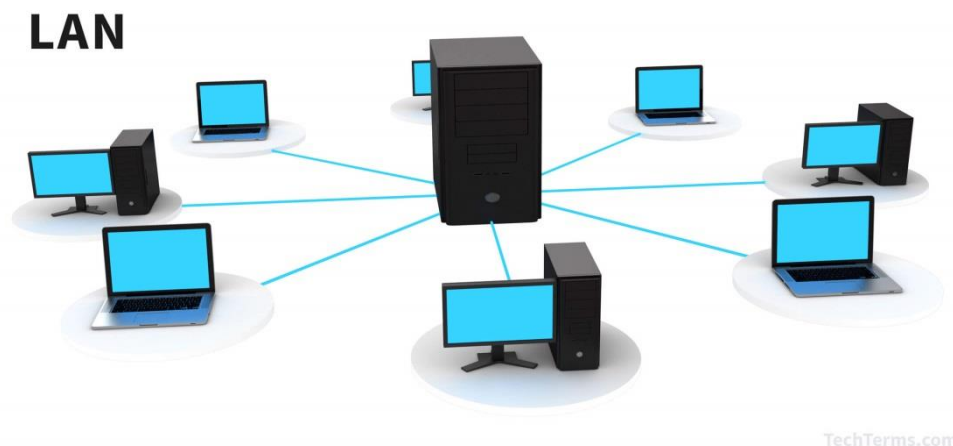


Figure I.2. Réseau local (LAN).

II.2 Le réseau métropolitain (MAN, Métropolitain Area Network)

Les MAN (Metropolitan Area Network) interconnectent plusieurs LAN géographiquement proches (au maximum quelques dizaines de km) (figure I.2) à des débits importants. Ainsi un MAN permet à deux nœuds distants de communiquer comme si ils faisaient partie d'un même réseau local [1].

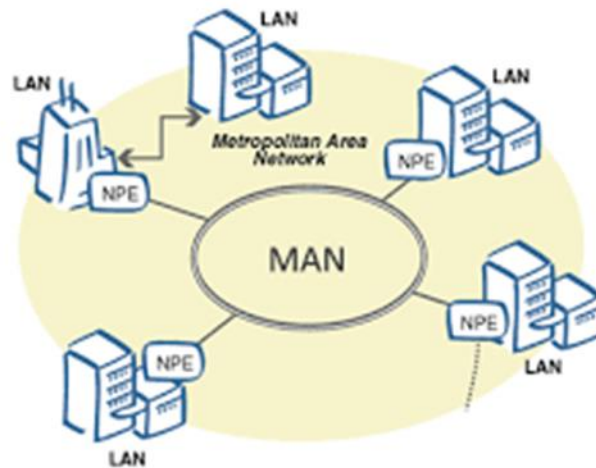


Figure I.3. Réseau Métropolitain(MAN).

II.3 Le réseau étendu ou longue distance (WAN, Wide Area Network)

Il est déployé à l'échelle d'un pays ou d'un continent, et ses nœuds sont de très grands centres urbains. Ce type de système :

- comprend des systèmes terrestres ou sous-marins.
- Véhicule des données à grande vitesse sur des longues distances de plus de 100 km.

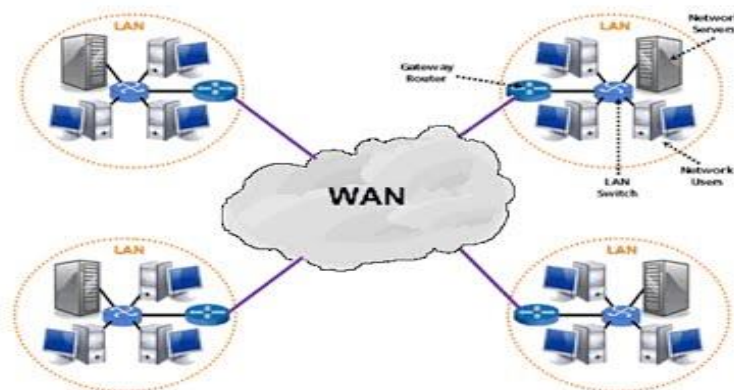


Figure I.4. Réseau longue distance(WAN).

Les caractéristiques des trois types de réseau fixe sont résumées dans le tableau ci-dessous [2].

Tableau I.1 : Comparaison entre les trois types de réseaux.

	réseau LAN	réseau MAN	réseau WAN
Nombre d'éléments	un ensemble d'équipements, appartenant à une même société	interconnecte plusieurs LANs	interconnecte plusieurs LANs ou MANs
Dispersion géographique	les machines sont situées sur un périmètre géographiquement restreint	réseaux LANs géographiquement proches	très grandes distances
Protocoles utilisés	Ethernet, Token Ring, FDDI, etc.	FDDI, ATM, SDH, etc.	SDH, SONET, WDM, etc.

III. Les différents types de câblage

Lorsqu'il s'agit de transmettre des informations, plusieurs cas peuvent se présenter : d'une part, il faut soit effectuer une liaison point à point entre un émetteur et un récepteur (téléphonie), soit diffuser l'information à partir d'un émetteur vers plusieurs récepteurs (radio/télé diffusion). En fonction du type de liaison (point à point ou diffusion), des contraintes économiques et matérielles, s'effectue le choix du media de transmission (câble coaxial ou paires torsadées, fibres optiques, vide ou air pour les communications Hertzienne). Le media de transmission, auquel s'ajoutent les perturbations et déformations (bruits, distorsions) de l'information, est appelé canal (figure I.5) [2].

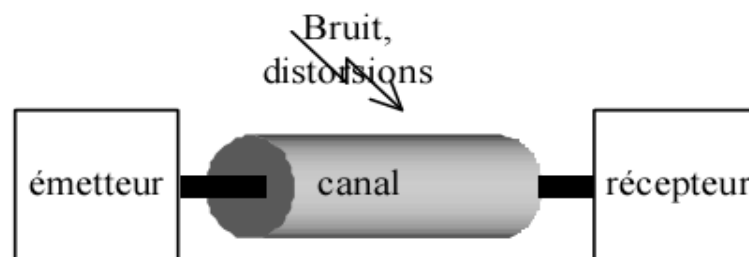


Figure I.5. Canal de transmission.

Pour relier les diverses entités d'un réseau, plusieurs supports physiques de transmission de données peuvent être utilisés. Une de ces possibilités est l'utilisation de câbles.

Il existe de nombreux types de câbles, mais on distingue généralement [2]:

- . Câble à paire torsadée
- . Le câble de type coaxial
- . La fibre optique

III.1 Câble à paire torsadée

La paire torsadée est réalisée de deux à quatre paires de fils torsadés sur toute la longueur. Chaque fil conducteur enroulé autour des autres sert de protection contre les interférences. Il existe deux types de paires torsadées : la paire torsadée blindée (figure I.6) et la paire torsadée non blindée. La seule différence entre ces deux types de paires torsadées est la présence d'un enrobage blindé protégeant mieux des interférences [2].

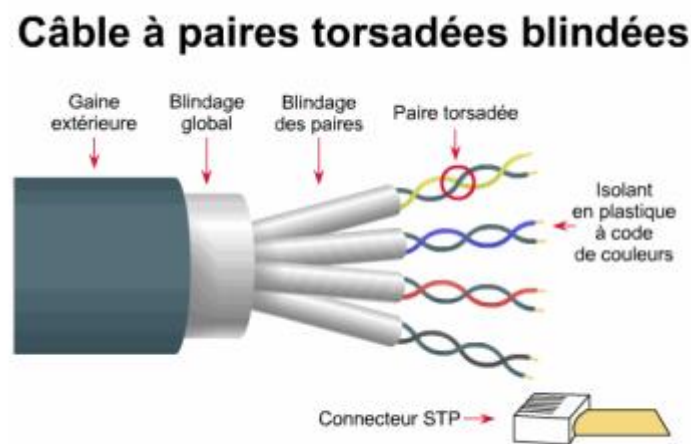


Figure I.6. Paire torsadée blindée.

C'est un câble utilisé pour câbler des courtes distances. Ces câbles ne peuvent couvrir qu'au maximum 100 mètres [2].

Il en existe plusieurs catégories :

- . Catégorie 1 : utilisé pour les communications téléphoniques, inutilisables pour le transfert de données
- . Catégorie 2 : Transmission de données à 4 Mbps

- Catégorie 3 : Transmission de données à 10 Mbps
- Catégorie 4 : utilisé dans les réseaux Token Ring, transmission à 16 Mbps
- Catégorie 5 : Transmission de données à 100 Mbps
- Catégorie 6 : Transmission de données à 1 Gbps

III.2 Le câble coaxial

Un câble coaxial consiste en un conducteur de cuivre isolé dans un diélectrique. Autour de cette isolation, il y a un bouclier en cuivre qui aide à réduire les interférences (figure I.7). Ce câble peut supporter des vitesses de 10 ou 100 Mbps et n'est pas très coûteux, bien que plus cher que l'UTP. Par contre, il peut couvrir des distances plus longues que l'UTP, jusqu'à 500 mètres [2].

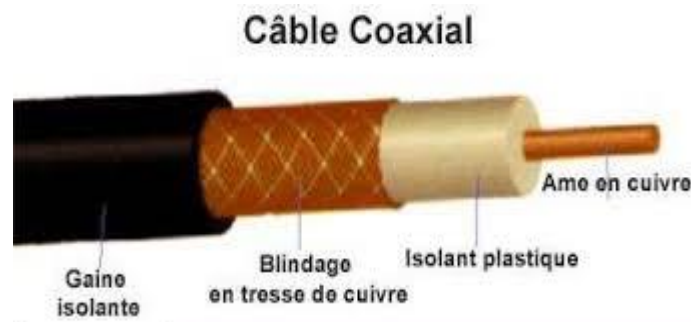


Figure I.7. Câble coaxial.

III.3 Câble fibre optique

Le câble à fibre optique est un média réseau capable de conduire des impulsions lumineuses modulées.

Comparée aux autres modes de transmission, la fibre optique est relativement coûteuse, mais elle est insensible aux interférences électromagnétiques et peut acheminer des débits de données considérablement plus élevés [5].

La lumière est conduite par une fibre en verre entourée d'une gaine également en verre dont le rôle est de réfléchir la lumière. Le tout est protégé par un enrobage en plastique.

Chaque câble peut contenir plus d'une fibre optique (figure I.8), permettant ainsi aux données d'arriver plus rapidement à destination. Plus il y a de fibres optiques dans le câble, plus nombreuses sont les données circulant à un instant donné, exactement comme une autoroute à quatre voies supporte plus de trafic qu'une départementale. Le câblage optique est particulièrement adapté à la liaison entre répartiteurs (liaison centrale entre plusieurs bâtiments, appelé backbone, ou en français épine dorsale) car elle permet des connexions sur des longues distances [2].

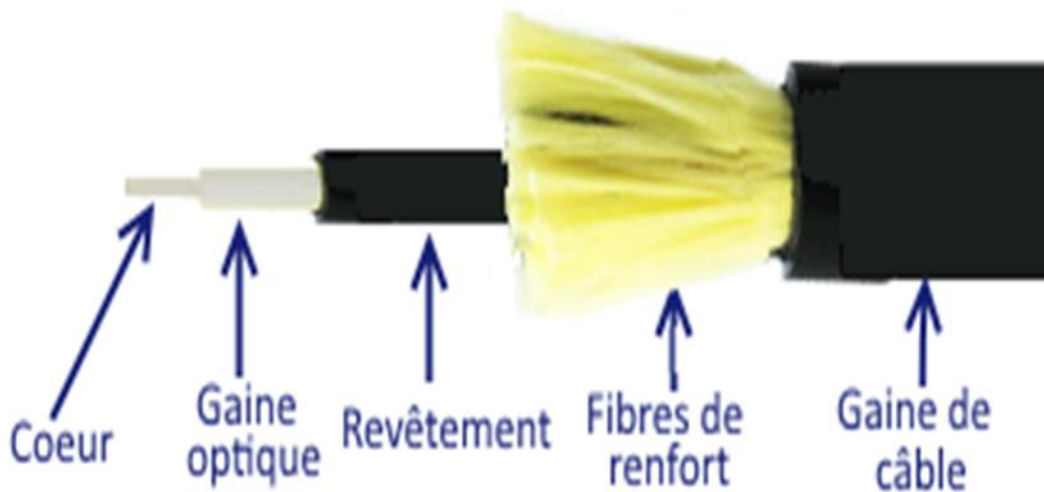
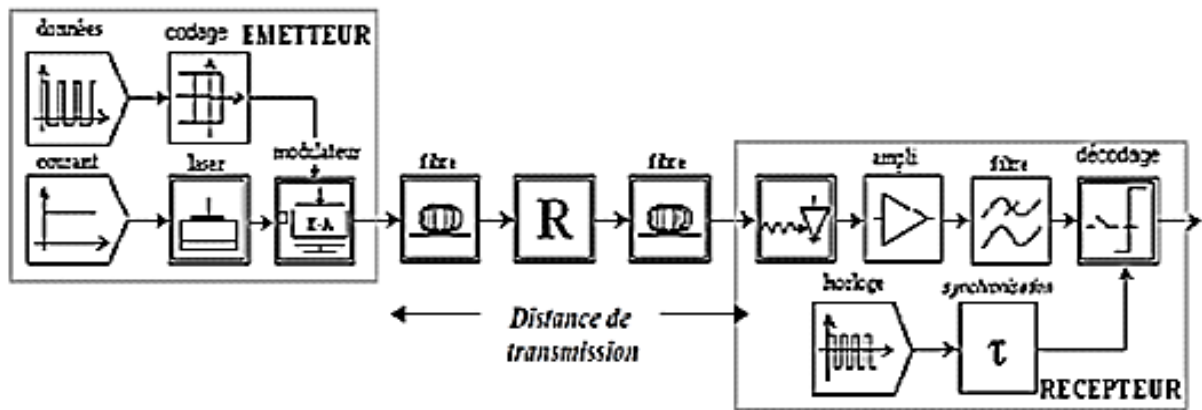


Figure I.8. Câble à fibre optique.

IV. Système de transmission sur fibre optique

Une liaison optique consiste en un émetteur optique modulé en direct ou en externe, par le signal à transmettre qui est connecté à une fibre optique qui peut être constituée de plusieurs tronçons connectés ensemble avec éventuellement des répéteurs optoélectroniques ou à base d'amplificateurs optiques. Suivant le type de réseau il peut y avoir des multiplexeurs ou d'autres fonctions optiques [3].

La Figure I.9 montre le schéma de principe d'une liaison par fibres optiques, ou système de transmission optique.



La Figure I.9. Schéma d'une liaison par fibre optique.

IV.1 Le module d'émission

L'émetteur optique est un dispositif qui a pour rôle de convertir l'énergie électrique en énergie optique avec un rendement satisfaisant et encore plus il assure un bon couplage avec la fibre. Pour être exploitable, avec une certaine qualité, le signal lumineux reçu doit être supérieur à un certain seuil de puissance et doit présenter une largeur de bande minimale.

En télécommunications optiques, la nécessité d'utiliser des bandes passantes de plus en plus larges impose le choix de sources à spectres réduits telles que les diodes Laser (DL) et les diodes électroluminescentes (DEL). Ces deux sources sont réalisées à partir de jonctions PN polarisées en direct. Le principe d'émission est dû à la recombinaison des paires électrons trou [3].

IV.1.1 La diode LED

C'est une source incohérente et polychromatique, elle présente un spectre d'émission assez large et un diagramme de rayonnement moins directif, elle est utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très grandes bandes passantes.

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. 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 Mbit/s sur fibre multimode [3].

IV.1.2 La diode laser

Le choix des sources optiques s'est porté sur les émetteurs à semi-conducteur à cause de leurs petites dimensions en rapport avec celles du cœur des fibres optiques, de la relative facilité que l'on a à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant, de leur spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation énergétique. Ainsi la diode laser est la source la mieux adaptée pour les télécommunications optiques car elle permet d'avoir la meilleure efficacité de couplage optique avec la fibre.

Le mot laser, sigle de l'expression anglaise Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, signifie amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement. L'effet laser ne fut démontré qu'en 1960 par Mainman en utilisant un barreau de rubis. Deux notions peuvent résumer cet effet : amplification et contre-réaction [3].

IV. 1.3 La 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, qui est une fonction essentielle de tout système de transmission. Pour réaliser la modulation d'émission, on a deux possibilités :

- **Modulation directe**

On agit sur le courant de jonction qui provoque l'effet laser. La puissance optique délivrée varie linéairement en fonction du courant. Ce type de modulation provoque une modification dynamique du spectre due à la conversion amplitude-fréquence (désignée par le terme anglo américain de chirp) et du diagramme de rayonnement, avec des effets nuisibles aux grandes vitesses de modulation.



Figure I.10. Principe d'une modulation directe.

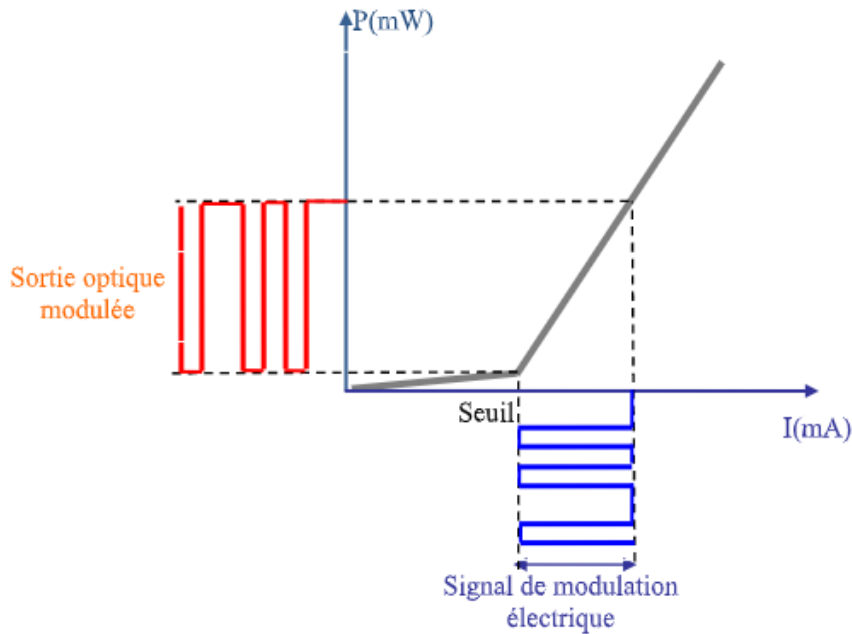


Figure I.11. Modulation directe d'une diode laser.

▪ Modulation externe

Elle permet de contourner cette difficulté, l'émetteur est alors constitué d'une source optique émettant une onde pure suivie d'un modulateur externe. Le courant d'injection du laser n'est plus modulé. La modulation externe présente de nombreux avantages. Elle est plus rapide et permet donc d'envoyer des débits plus élevés.

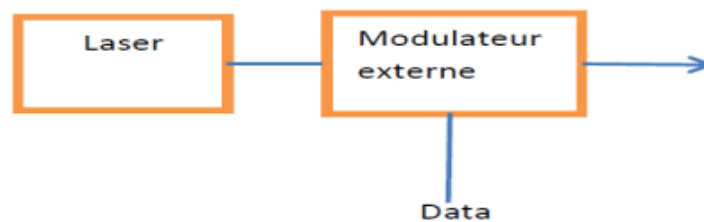


Figure I.12. Principe d'une modulation externe.

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

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

Le spectre d'une DEL (figure I.13) continu et relativement large, de l'ordre de 40 à 100nm à mi-hauteur, la lumière émise est incohérente [4].

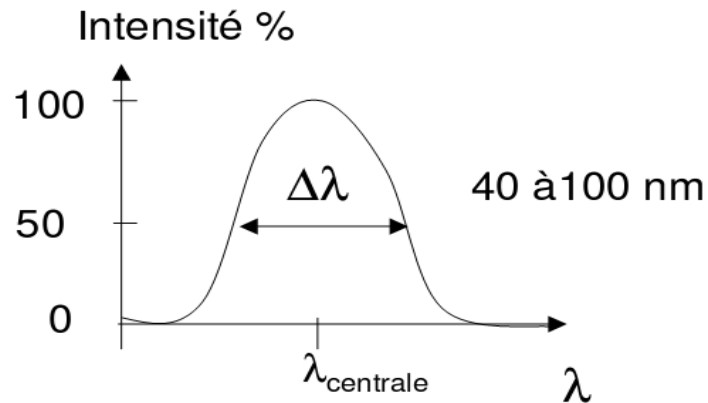


Figure I.13. Largeur spectrale d'une DEL.

Les diodes laser sont caractérisées par l'étroitesse de la longueur d'onde qu'elles émettent, le spectre émis se compose de plusieurs raies centrées autour de la longueur d'onde principale (figure I.14).

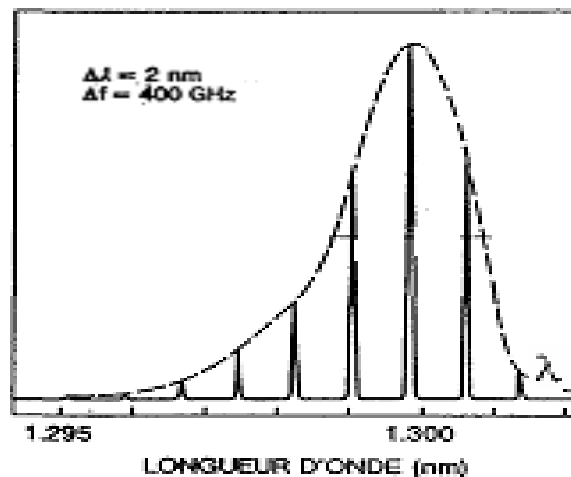


Figure I.14: Largeur spectrale d'un laser.

La rapidité d'une DEL est limitée par la durée de vie des porteurs injectés. Si les variations du courant injecté sont telles que les électrons n'ont pas le temps de se recombiner, le flux énergétique émis ne sera plus proportionnel au courant [3-4].

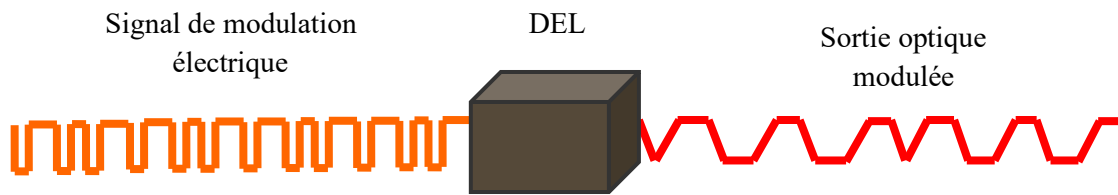


Figure I.15. La rapidité d'une DEL.

Pour atteindre de plus hautes valeurs, il faut réduire encore le temps de recombinaison. C'est ce que permet l'émission stimulée dans un laser [3].

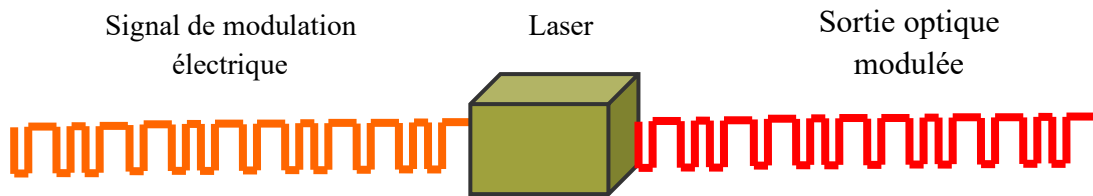


Figure I.16. La rapidité d'un laser.

IV.2 Le module de réception

Le but du récepteur est de restituer de façon fidèle à l'information, il doit extraire avec des moyens fiables l'information transmise à partir du signal optique reçu.

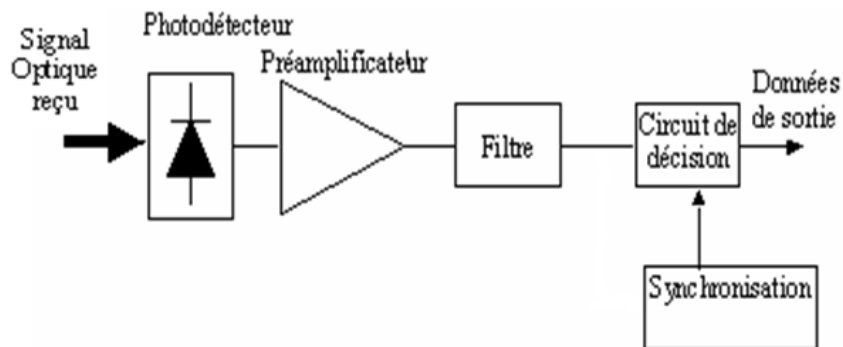


Figure I.17. Schéma d'un récepteur.

Dans notre étude nous allons parler des photodétecteurs, les plus utilisés dans les systèmes de transmission par fibre optique qui sont les photodiodes PIN ou APD.

Le photodétecteur est un semi-conducteur de jonction PN polarisé en inverse il permet la conversion du signal optique reçu (les photons) en signal électrique par l'effet photoélectrique. Les photodiodes peuvent être classées en deux catégories : celles qui n'ont aucun gain interne PN et PIN, et celles qui ont un gain interne Avalanche.

IV.2.1 Photodiode PIN

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

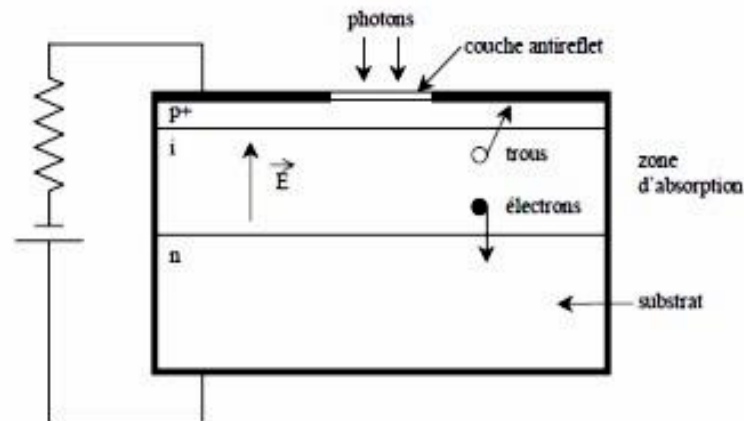


Figure I.18. Structure d'une photodiode PIN.

IV.2.2 Photodiode APD

Lorsque la puissance lumineuse reçue est très faible, les courants détectés sont peu élevés et se superposent au courant d'obscurité, conduisant à un mauvais rapport signal à bruit. Pour augmenter ce dernier, il est nécessaire que le courant détecté soit plus important en utilisant d'autres types de photodiodes, comme les photodiodes à gain interne de type avalanche.

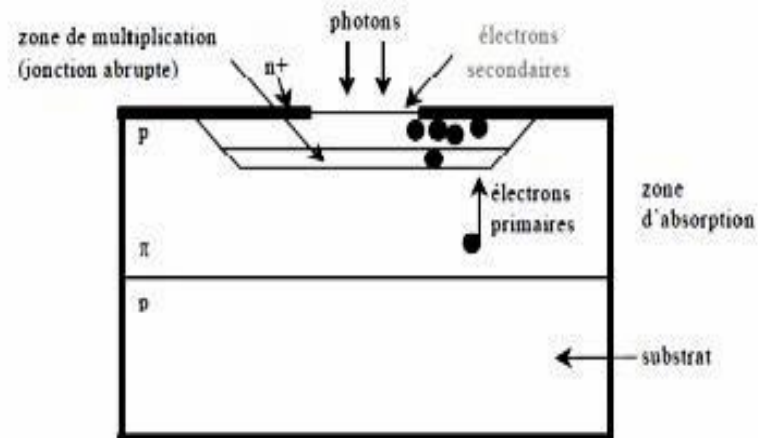


Figure I.19. Structure d'une photodiode APD.

La photodiode d'avalanche est une diode PIN dans laquelle est réalisée une amplification de puissance, cela permet d'extraire un signal électrique fort même pour une puissance lumineuse affaiblie.

Les photodiodes à avalanche sont aussi utilisés grâce à leurs performances, leur gain important et leur réponse rapide mais elles sont plus coûteuses, difficiles à utiliser et nécessitant une polarisation inverse très forte.

IV.2.3 L'amplificateur électrique

Le courant émis par la photodiode est faible. Ainsi, un pré-amplificateur est couramment utilisé pour augmenter l'amplitude du signal de sortie [4].

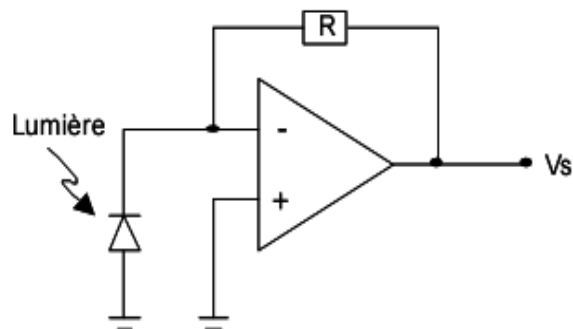


Figure I.20. Structure d'un amplificateur.

IV.2.4 Le filtrage

Le signal électrique émis par la photodiode n'est pas parfait. Le courant photodéecté 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 la plus petite possible, tout en ne créant pas d'interférences inter symboles. On utilise le filtre de Nyquist dont le 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 [4].

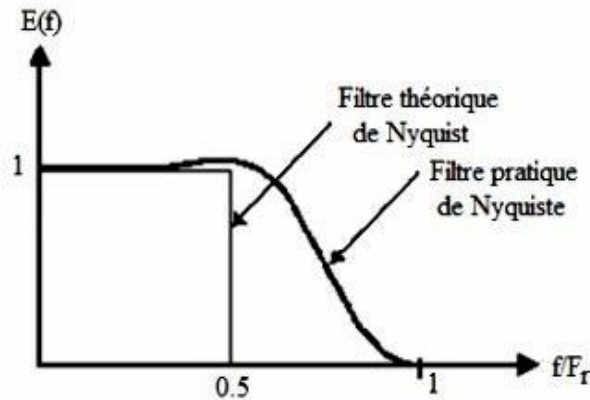


Figure I.21. Réponses fréquentielles du filtre de Nyquist.

IV.2.5 Le régénérateur

Le rôle du circuit de décision est la régénération des données émises. La décision s'effectue sur les fronts montants de l'horloge, et doit être prise au centre du bit du signal à régénérer, lieu où les interférences entre symboles sont minimales [4].

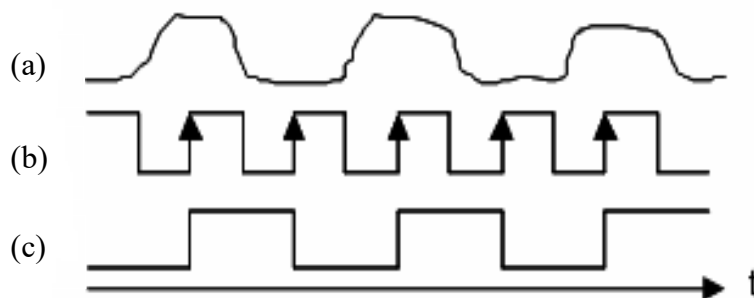


Figure I.22. Présentation temporelle de la régénération des données d'entrée :

- (a) Donnée d'entrée
- (b) Signal d'horloge
- (c) Donnée de sortie

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement le système de télécommunication par fibre optique. Tous d'abord nous avons commencé par les différents types de réseaux puis on a expliqué le principe de l'émetteur et celui du récepteur optique. Après nous avons présenté la fibre optique sa structure, le principe de propagation dans la fibre et les différentes types de fibres optiques. Enfin, nous avons évoqué les principales caractéristiques de la fibre optique. A l'heure actuelle, c'est la dispersion chromatique de la fibre et non pas l'atténuation et le facteur limitant de la transmission de signaux à haut débit sur de longues distances. Ce phénomène sera détaillé dans le prochain chapitre.

Chapitre II

Fibre optique conventionnelle

I. Introduction

Depuis 25 ans, la fibre optique a supplanté le câble coaxial dans la plupart des réseaux de télécommunications sur support, tout du moins pour les hauts débits. Mais son apparition a nécessité la conception et le développement de nouveaux composants optiques ou optoélectroniques performants. Nous présenterons dans ce chapitre les fibres optiques standard.

Les effets linéaires étant directement liés à la distance de propagation, ils sont donc d'autant plus importants que les distances de transmission augmentent. Ils modifient soit la puissance des impulsions (atténuation) soit leur forme (dispersion).

II. Présentation du logiciel OptiFiber et OptiSystem

Dans ce chapitre on a tracé les courbes de la dispersion chromatique et l'atténuation et on a utilisé les logiciels OptiFiber et OptiSystem.

- OptiFiber : La conception optimale d'un système de communication optique dépend directement du choix des paramètres de la fibre.

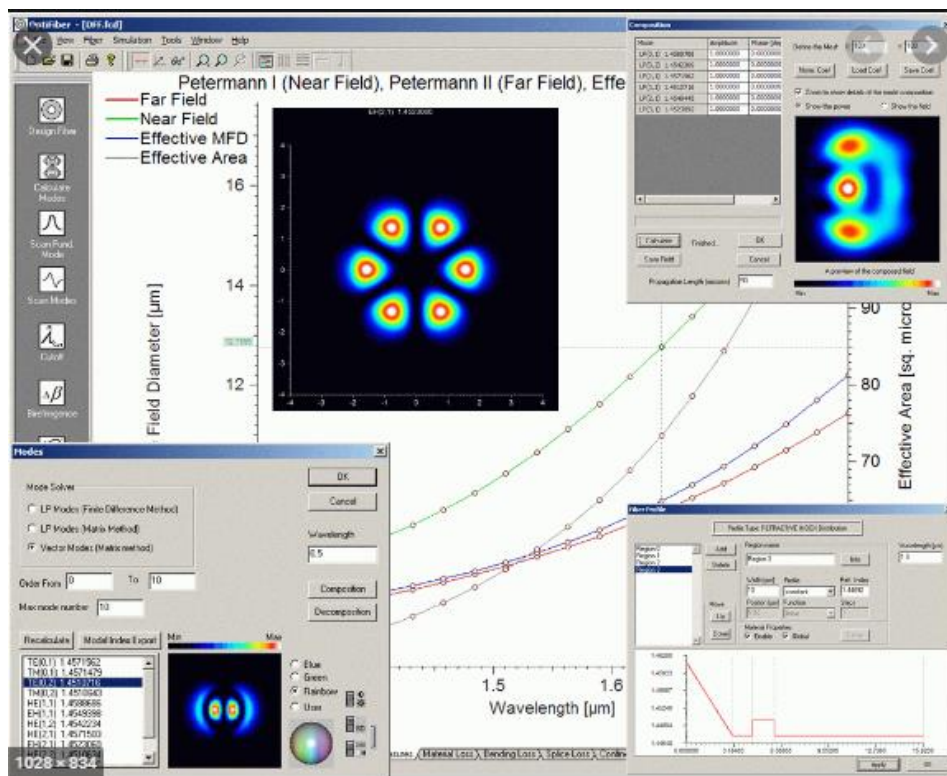


Figure II.1. L'interface de travail sur OptiFiber.

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.

- 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 composants.

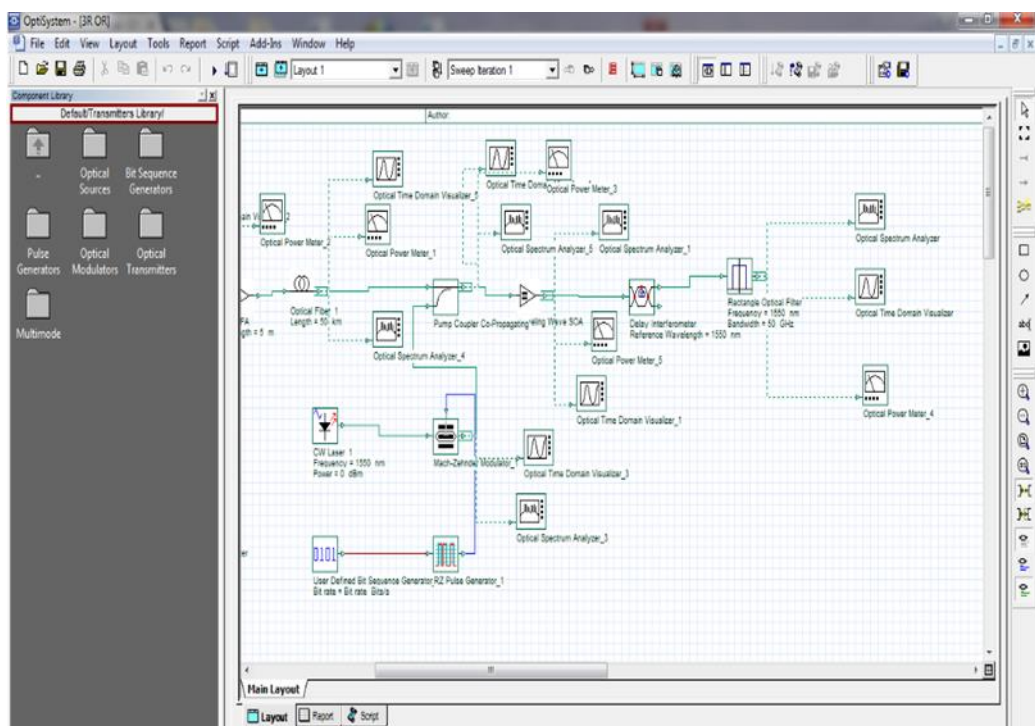


Figure II.2. L'interface de travail sur OptiSystem.

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 composants jusqu'au niveau du système, et présente visuellement l'analyse et les scénarios.

III. Brève historique

Développée pour la première fois dans les années 1970, la fibre optique a révolutionné l'industrie des télécommunications et a joué un rôle majeur dans l'avènement de l'ère de l'information. En raison de ses avantages par rapport à la transmission électrique, les fibres optiques ont largement remplacé les communications par fil de cuivre dans les réseaux dorsaux du monde développé [6].

Le processus de communication à l'aide de la fibre optique comprend les étapes de base suivantes:

- création du signal optique impliquant l'utilisation d'un émetteur, généralement à partir d'un signal électrique
- Relais du signal le long de la fibre, en veillant à ce que le signal ne devienne pas trop déformé ou faible
- réception du signal optique
- le convertir en un signal électrique

IV. Structure de la fibre optique

La Fibre Optique est un guide d'onde cylindrique réalisé au moyen d'un matériau diélectrique transparent, elle permet de transporter le plus d'informations et de fournir des débits de signaux numériques très importants. La FO est composée des éléments de base suivants [10] :

- **Le cœur** : C'est la région centrale de la fibre qui permet le guidage des ondes lumineuses.
- **La gaine** : Représente une couche entourant le cœur de la fibre avec un indice de réfraction légèrement supérieur à celui du cœur ce qui permet par conséquent, la réflexion totale et perpétuelle des modes à l'interface cœur-gaine.
- **Le revêtement** : C'est la couche appliquée sur le verre de la gaine, elle est détachable afin de permettre d'effectuer des injections ou des découpages de la lumière, son indice de réfraction est inférieur à celui de la gaine.
- **L'armature métallique** : Permet de protéger le cœur de la FO contre les forces d'écrasement et les tensions mécaniques excessives lors de l'installation.

La figure II.3. Présente la structure de la fibre optique standard.

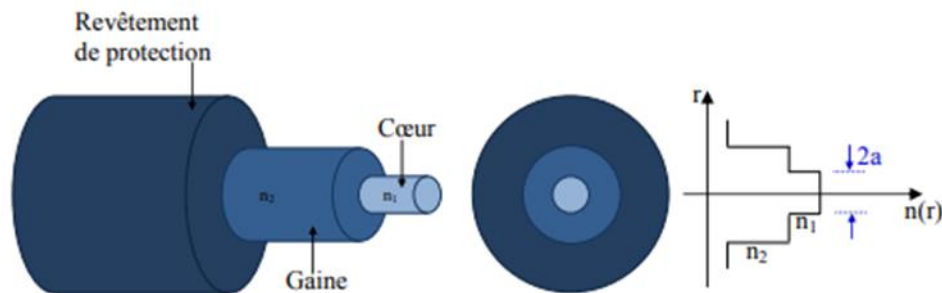


Figure II.3. Structure d'une fibre optique.

V. Différents types de fibre optique

Les deux grandes catégories de fibres optiques sont : les multimodes et les monomodes [7].

V.1 Fibres 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. Parmi les fibres multimodes, on distingue les fibres à faible indice ou saut d'indice (débit limité à 50 Mb/s) et les fibres à gradient d'indice (débit limité à 1 Gb/s).

➤ à saut d'indice

C'est le type de fibre le plus simple, et il est directement issue des applications optiques traditionnelles (figure II.4). Le cœur de diamètre $2a$ est homogène et d'indice n_1 . Il est entouré d'une gaine optique de diamètre extérieur $2b$ et d'indice n_2 inférieur à n_1 . Ces deux indices doivent être de l'ordre de 1,5.

La gaine optique joue un rôle actif dans la propagation, et ne doit pas être confondue avec les revêtements de protection déposés sur la fibre.

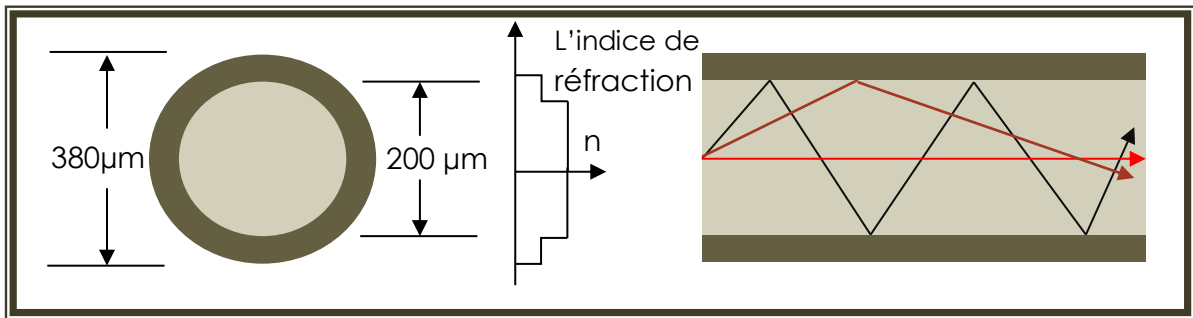


Figure II.4. La fibre optique multimodes à saut d'indice.

➤ à gradient d'indice

Ces fibres sont spécialement conçues pour les télécommunications (figure II.5). Leur cœur n'est plus homogène : la valeur de l'indice décroît de l'axe à l'interface et le guidage est dû à l'effet du gradient d'indice. Les rayons guidés suivent une trajectoire d'allure sinusoïdale et la gaine d'indice n_2 n'intervient pas directement, mais élimine les rayons trop inclinés.

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

Cette fibre utilisée en télécommunications à moyenne distance a pour ouverture numérique 0,2 et pour diamètres cœur/gaine 50/125 mm Il existe aussi les fibres 62,5/125 utilisées en micro-informatique et les fibres 85/125 utilisées en vidéocommunication [7].

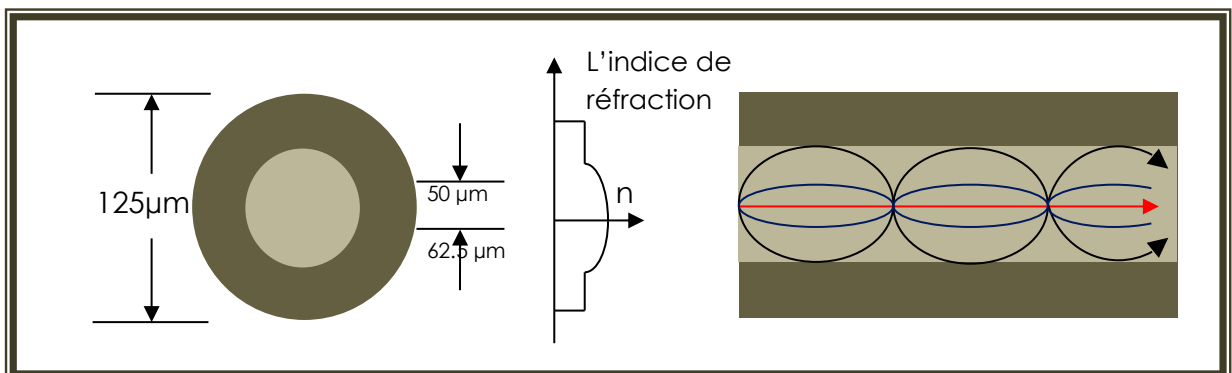


Figure II.5. La fibre multimodes à gradient d'indice.

V.2 Les fibres optiques monomodes

Les fibres monomode (figure II.6) 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.

L'onde se propage sans réflexion et il n'y a pas de dispersion modale. Le petit diamètre du cœur nécessite une grande puissance d'émission qui est délivrée par des diodes-laser.

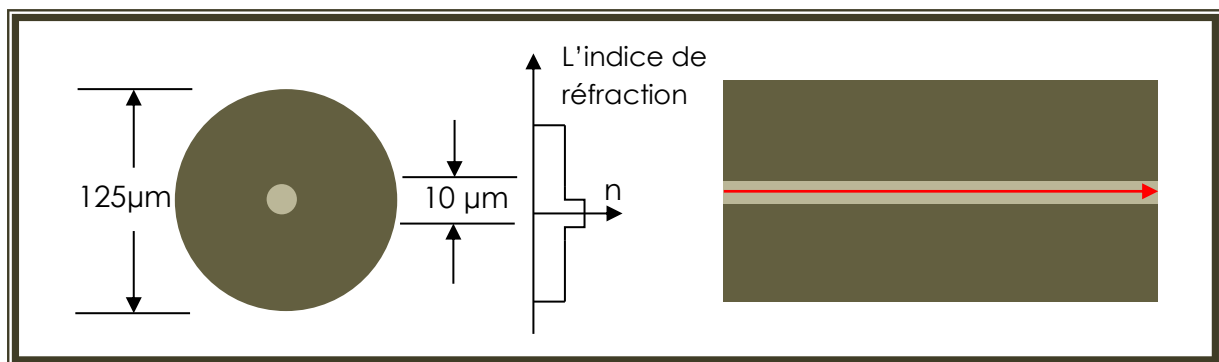


Figure II.6. Les fibres monomode avec propagation d'une impulsion.

VI. Avantages et inconvénients des fibres optiques

Par comparaison aux autres supports de transmission existants, la fibre optique présente de nombreux avantages et inconvénients qui justifient son introduction dans les systèmes de transmission.

VI.1 Les avantages de la fibre optique

- Ces avantages sont, tout d'abord, des avantages de performances de transmission, multiplexage (en longueur d'onde) possible avec une bande passante optique très grande, et donc une grande capacité (débit de plusieurs Tbit/s) n'ayant aucune commune mesure avec les bandes passantes des supports électriques ou radio classiques.
- Les fibres optiques, qui offrent un débit d'informations nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et supportent un réseau "large bande", ont de multiples applications.
- Elles permettent de transmettre aussi bien la télévision et le téléphone que des visioconférences ou des données informatiques.

- La perte de signal sur une grande distance est bien plus faible par rapport à une transmission électrique dans un conducteur métallique.
- Cette technologie offre des vitesses de transmission très élevées.
- Les fibres optiques ne sont pas sensibles aux interférences extérieures (proximité d'un câble à haute tension, par exemple).
- La fibre optique présente également des avantages de sécurité électrique (isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive et sous forte tension) et électromagnétique. Elle est donc insensible aux parasites électromagnétiques, et n'en créant pas elle-même, elle assure ainsi une inviolabilité presque totale, ce qui permet son utilisation dans les applications militaires, bancaires et en transmission de données.
- Enfin, les facilités de mise en œuvre qu'elle présente, à la fois par sa petite taille, sa grande souplesse et son faible poids, combinés à un coût raisonnable, lui confère un avantage économique sur les autres supports de transmission [8]

VI.2 Les inconvénients de la fibre optique

- Exigences micromécaniques importantes (connexions, alignement).
- Coût : les câbles de fibre optique sont plus coûteux à installer, mais dure plus longtemps que les câbles de cuivre.
- Transmission : La transmission du signal dans les câbles de fibre optique doit se répéter au long d'une certaine distance grâce à des appareils amplificateurs mais demande beaucoup moins de répétitions que les câbles de cuivre.
- Fragilité : Les fibres peuvent être cassées ou perdre la transmission quand le câble est rayé ou fissuré. Cependant en enveloppant des fibres dans une gaine en plastique, il est difficile de plier le câble sans casser la fibre.
- Protection : Les Fibres Optiques exigent plus de protection autour du câble comparé au cuivre [9].

VII. Caractéristiques de la fibre

Les principales caractéristiques des fibres optiques sont l'atténuation, la dispersion chromatique, dispersion intermodal et la biréfringence que nous allons présenter.

VII.1 L'atténuation

L'atténuation dans les fibres optiques résulte de plusieurs mécanismes. D'abord, l'absorption intrinsèque du matériau constitutif provoque une augmentation très rapide des pertes aux basses longueurs d'onde. La présence d'impuretés peut aussi créer diverses bandes d'absorption. Dans le cas de la silice pure, le minimum théorique d'atténuation devrait descendre à 0.14 dB/km vers $\lambda=1.55 \mu\text{m}$.

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 micros 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 la fibre standard des télécommunications dans des conditions d'emploi normales. Enfin, les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux. Chaque jonction peut provoquer une perte de raccordement. La Figure(II.7) montre l'atténuation spectrale d'une fibre en silice, pour les télécommunications [11].

Au cours de la propagation dans la fibre, la puissance décroît selon la loi :

$$P(L) = P_{in} \cdot e^{-\alpha L / 10} \quad II.1$$

Où

P_{in} Est la puissance qui a été couplée à l'entrée de la fibre.

α Est le coefficient d'atténuation en Neper/m, cette atténuation α dépend du matériau et de la longueur d'onde λ .

La mesure d'atténuation spectrale consiste à mesurer l'affaiblissement de la fibre sur une plage de longueurs d'onde.

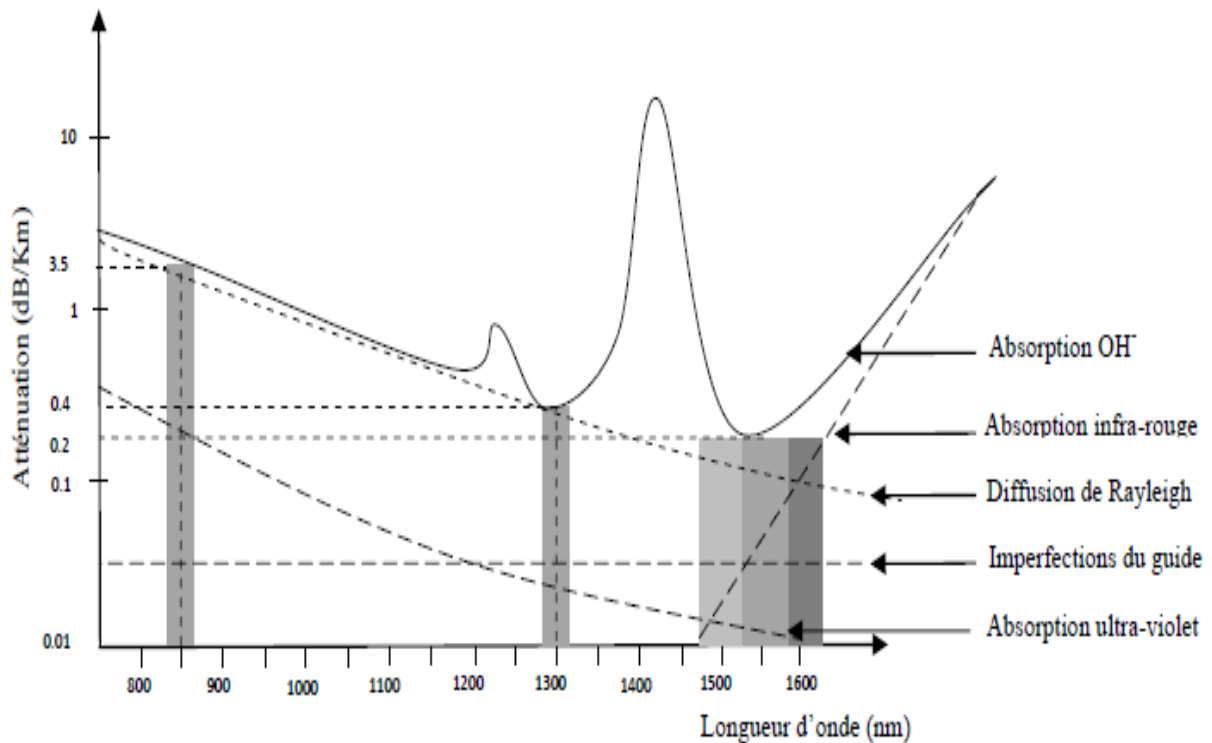


Figure II.7. Exemples de caractéristiques de quelques fibres optiques de transmission.

Les principales causes d'affaiblissement dans une fibre optique sont :

-l'absorption dans le matériau : pour la silice, il y a deux bande d'absorption, dans l'infrarouge moyen à cause des vibrations moléculaires, et dans l'ultraviolet à cause des transitions électroniques et moléculaires.

-La diffusion Rayleigh : causée par la nature désordonnée des molécules dans le verre qui est un matériau amorphe. L'intensité est proportionnelle à l'inverse de la puissance quatrième de la fréquence, ou ce phénomène provoque une augmentation de l'atténuation aux basses longueurs d'onde.

-L'absorption intrinsèque : sous forme de pics, principalement due aux ions OH- cette absorption est difficile à éliminer, il faut éviter le contact de la fibre avec l'eau [15].

VII.2 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 [16].

- **Les pertes par courbure**

Lorsqu'on courbe la fibre, une partie de l'énergie lumineuse peut échapper au cœur et se perdre dans la gaine. Ce phénomène s'appelle pertes par courbure (figure II.8) [14].

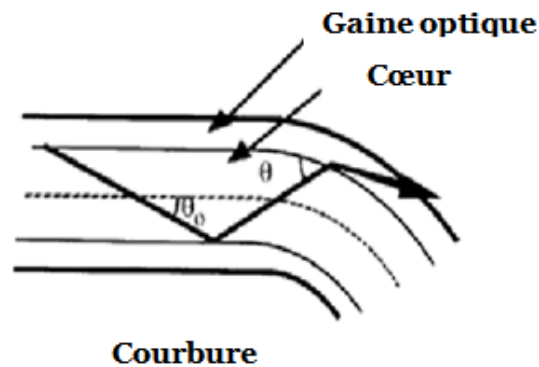


Figure II.8. Perte par courbure.

- **Les pertes par micro-courbure**

Les pertes par courbure sont souvent négligeables en pratique, mais les pertes par micro courbures peuvent augmenter l'atténuation de manière significative si on ne prend pas les précautions nécessaires lors de la fabrication et de la manutention des câbles (figure II.9) [16].

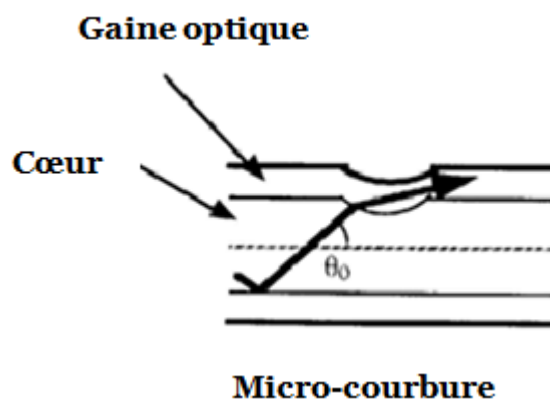


Figure II.9. Perte par micro-courbure.

Elles Apparaissent lors de la fabrication des câbles lorsque des contraintes mécaniques provoquent des microdéformations de la fibre, entraînant des pertes de lumière. Elles sont à peu près indépendantes de la longueur d'onde.

Ces pertes dépendent aussi bien de la fibre elle-même que du revêtement. Elles augmentent très vite lorsque le diamètre de la fibre diminue [16].

L'atténuation provient principalement de phénomènes résumés dans le tableau et la figure suivantes [12]:

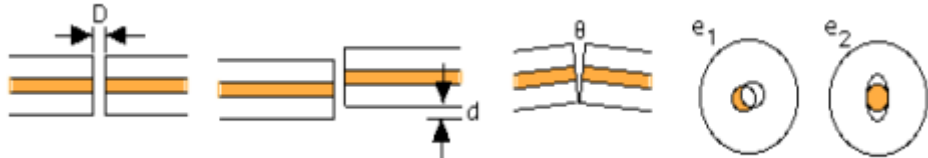
Type de pertes	Explications
Absorption	Perturbation du photon de lumière par un électron d'un atome d'impureté
Diffusion	Variation locale de l'indice de réfraction du cœur de la fibre. Changements de densité ou de composition dans la matière.
Courbures	Torsion dans la fibre. Non-respect du principe de réflexion totale interne.
Pertes de connections	Séparation longitudinale Désalignement radial/angularaire Excentricité/ellipticité des cœurs 

Tableau II.1. Les différentes causes d'atténuation.

VII.3 Dispersion

La dispersion se manifeste par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation [7].

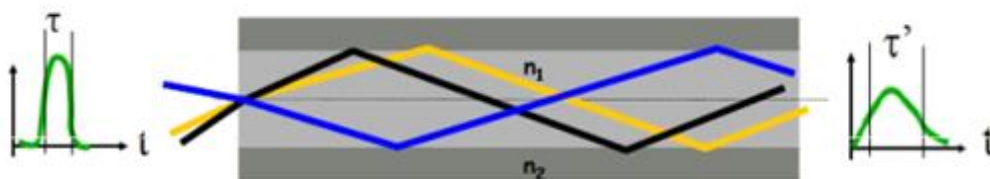


Figure II.10. Illustration du phénomène de la dispersion.

VII.3.1 Dispersion intermodal

Elle existe dans les fibres multimodes à saut d'indice. En effet dans une fibre multimode, plusieurs chemins sont possibles pour la lumière, ces chemins ont des longueurs différentes donc les temps de parcours sont différents aussi. La dispersion modale provient de la différence du temps de parcours de la lumière dans la fibre en fonction des chemins parcourus.

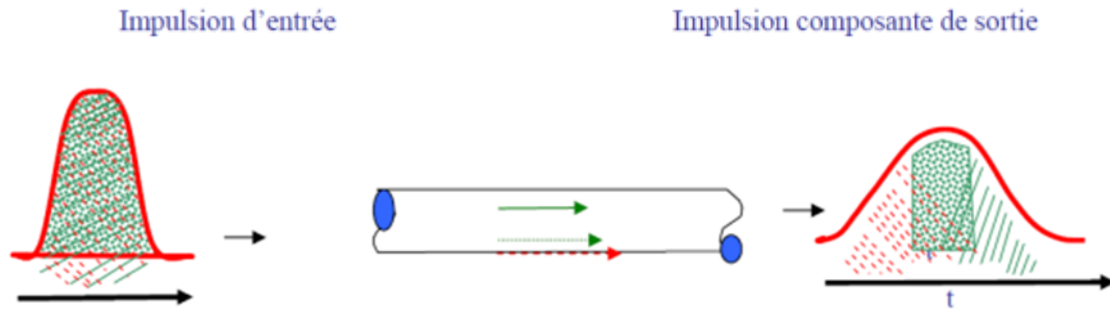


Figure II.11. Le phénomène de dispersion intermodale.

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 [12].

II.3

$$D_i = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{L} = \frac{\tau}{L} \text{ (ps / km)} \tag{II.4}$$

Avec

$$\tau = t_{\max} - t_{\min} = \eta_1 \cdot t_{\min} \cdot \Delta \tag{II.5}$$

$$\Delta = \frac{\eta_1^2 - \eta_2^2}{2 \cdot \eta_1^2}$$

Finalement on exprime la dispersion intermodale par :

$$D_i = \frac{\eta_1 \cdot \Delta}{c}$$

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). 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 :

$$\theta_{\max} = \arcsin\left(\frac{\sqrt{\eta_1^2 - \eta_2^2}}{\eta_1}\right)$$

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 η_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/η est alors réduite) tandis que les rayons périphériques (à trajet long) voient un indice plus bas.

Dans le cas d'une fibre optique monomode, cette dispersion est nulle et ne sera donc pas prise en compte.

VII.3.2 La dispersion chromatique

La dispersion chromatique exprimée en ps/ (nm.km), caractérise l'étalement du signal lié à sa largeur spectrale de l'émetteur (deux longueurs d'onde différentes ne se propagent pas exactement à la même vitesse) Cette dispersion dépend de la longueur d'onde considérée [12].

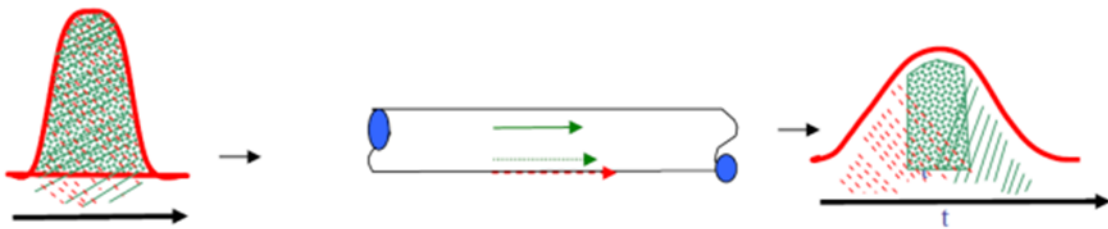


Figure II.12. Dispersion chromatique dans une fibre optique.

Ce terme regroupe en fait deux types de dispersion : la dispersion du matériau et la dispersion de guide.

VII.3.2.1 La dispersion du matériau

II.7

Le premier terme de dispersion vient de la dépendance en longueur d'onde (en fréquence) de l'indice de réfraction. Cette dispersion se traduit par une variation de η_{eff} et N_g avec la longueur d'onde.

$$D_m(\lambda) = \frac{-\lambda}{c} \frac{d^2 \eta_{gain}}{d\lambda^2}$$

Les lasers et les LEDs ne sont pas des sources monochromatiques. Ils produisent de la lumière dans une gamme de longueur d'ondes. Une impulsion lumineuse issue de source optique est donc composée de plusieurs longueurs d'onde. L'indice de réfraction des fibres étant différent selon la longueur d'onde de la lumière, chaque longueur d'onde se propage dans la fibre à une vitesse spécifique. Certaines longueurs d'ondes arrivent donc avant d'autres et l'impulsion s'étale (s'élargit) [12].

La dispersion du matériau correspondant est représentée sur la figure II.13

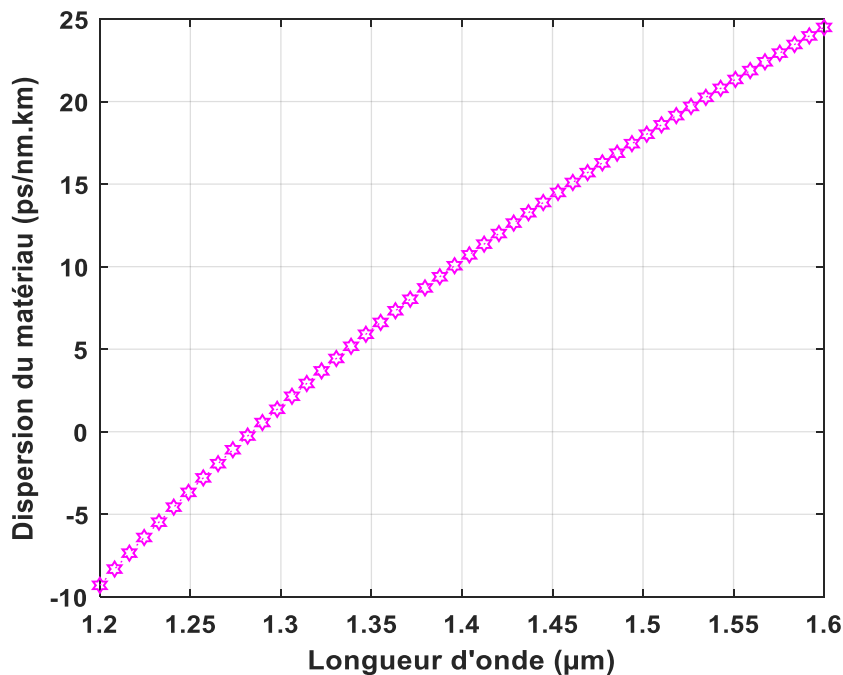


Figure II.13. Dispersion du matériau en fonction de la longueur d'onde.

Nous intéressons à la dispersion de la silice qui est le matériau utilisé pour fabriquer les fibres optiques. La dispersion de la silice est une fonction continûment croissante. Elle est fortement négative aux courtes longueurs d'onde car la courbure de l'indice est significative dans cette zone spectrale.

VII.3.2.2 La dispersion du guide

Le deuxième terme de dispersion provient de la dispersion de guide. Son origine s'explique par la dépendance de β en fonction de la longueur d'onde.

$$D_{\xi}(\lambda) = -\frac{\Delta\eta}{c\lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \quad II.8$$

Ceci est dû au fait que la lumière n'est en fait pas strictement confinée dans le cœur. Les champs électrique et magnétique constituant l'impulsion lumineuse s'étendent en fait (légèrement) à l'extérieur du cœur, donc dans la gaine. Le champ électromagnétique "déborde" dans la gaine d'autant plus que la longueur d'onde est grande. L'indice de réfraction vu par l'onde est donc une moyenne entre de l'indice de réfraction du cœur et celui de la gaine. Les longueurs d'ondes les plus petites auront donc tendance à se propager plus lentement que les longueurs d'ondes plus grande, d'où un élargissement de l'impulsion lumineuse [12].

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.14).

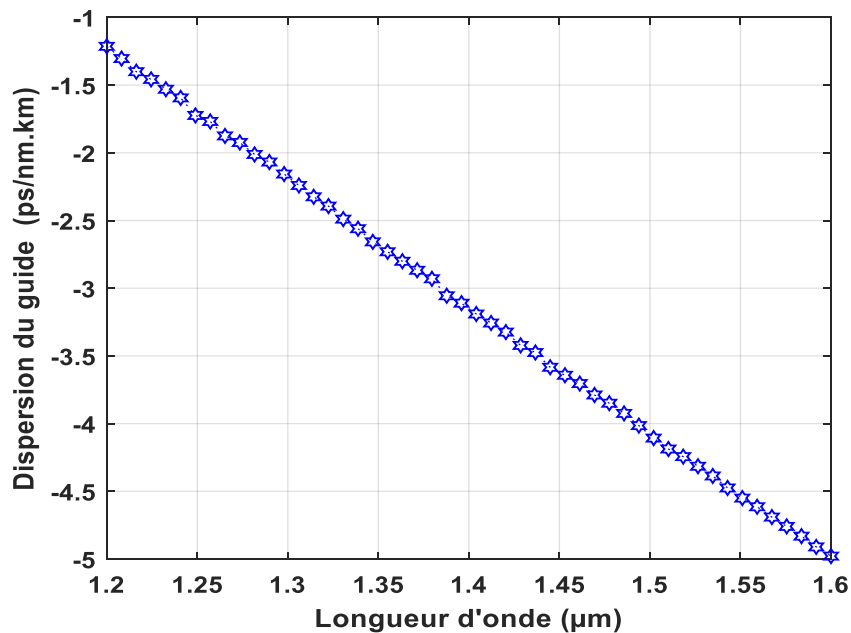


Figure II.14. Dispersion du guide en fonction de la longueur d'onde.

Les deux types de dispersion, guide et matériau, se compensent ainsi exactement à la longueur d'onde de 1310nm donnant ainsi une dispersion chromatique nulle pour cette longueur d'onde, ce qui est le principal avantage à travailler dans la seconde fenêtre de transmission (Figure II.15).

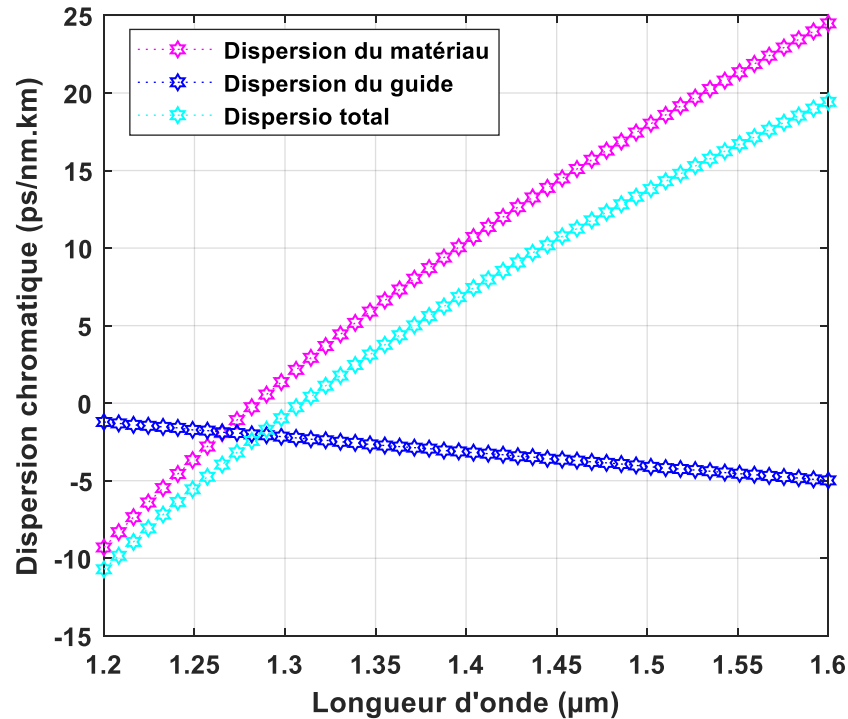


Figure II.15. Dispersion du guide, du matériau et dispersion chromatique d'une fibre optique.

VII.3.2.3 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. Cet élargissement τ se calcule ainsi :

$$\tau = D(\text{ps/nm.km}) * L(\text{km}) * \Delta\lambda(\text{nm})$$

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 [13].

Sur la figure II.16 nous vérifions que plus la longueur de la fibre et long plus l'atténuation et l'étalement subi lors de la propagation est important.

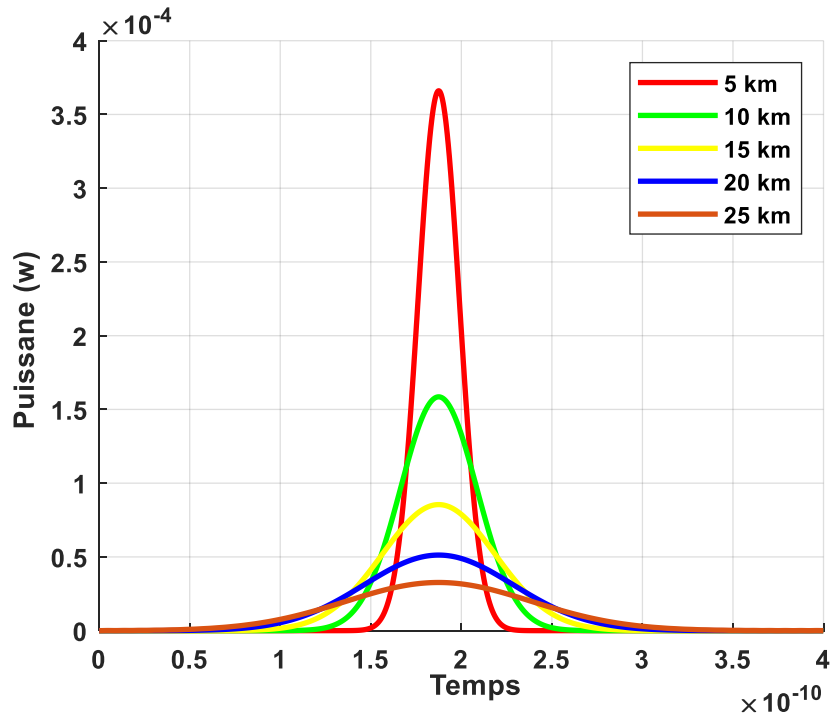


Figure II.16. L'effet de l'atténuation et de la dispersion chromatique sur la transmission.

VII.4 La biréfringence

La biréfringence dans les fibres est une notion très importante dans le domaine des capteurs à fibres optiques. Elle est à la base de nombreuses applications [5, 10].

Elle est toujours associée à celle d'état de polarisation qui est décrit par la direction moyenne du vecteur champ électrique. Une modification ou une variation de biréfringence entraîne une évolution de l'état de polarisation incident, d'où la nécessité de bien connaître les différents mécanismes de la biréfringence [9].

Les capteurs à fibres optiques "intrinsèques" où la fibre est l'élément sensible à une grandeur physique extérieure (pression, température ...), font appel non seulement, aux biréfringences induites par la grandeur en question mais aussi aux biréfringences internes ou intrinsèques, c'est à dire qui sont propres à la fibre (généralement introduites volontairement lors de la fabrication) [14].

La biréfringence de phase est définie comme la différence entre les constantes de propagation des deux états de polarisation β_y et β_x , elle est traditionnellement notée B_θ . Elle peut s'exprimer en fonction des indices effectifs, $n_{eff,y}$ et $n_{eff,x}$, vus par les champs électriques respectifs des deux états de polarisation :

$$B_\theta = \frac{|\beta_y - \beta_x|}{k_0} = |n_{eff,y} - n_{eff,x}|$$

Avec

k_0 le module du vecteur d'onde dans le vide.

VII.4.1 la dispersion de polarisation PMD

Cette dispersion due à la biréfringence de la fibre, provoque une déformation des impulsions lumineuses par le fait que les deux principaux états de polarisation ont des constantes de propagation légèrement différentes.

Pour pouvoir compenser avec précision la dispersion de polarisation de la fibre installée, il est nécessaire de l'avoir préalablement mesurée [13].

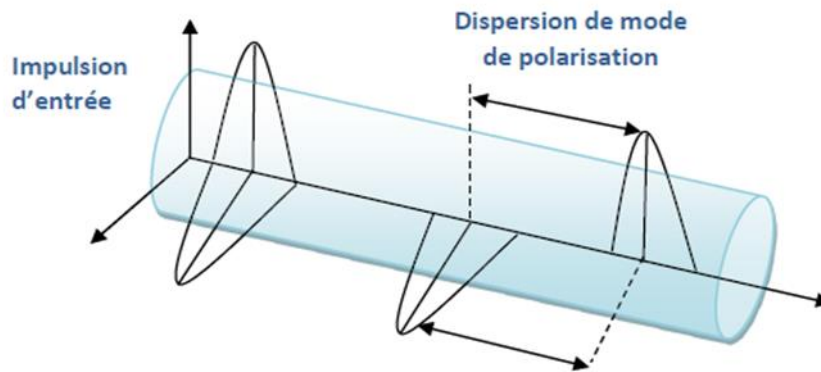


Figure II.17. Effet de la PMD sur le mode.

VIII. Les fenêtres utilisées dans les télécommunications optiques

La fibre en silice (Si), actuellement utilisée pour les télécommunications optiques, présentent trois bandes d'intérêts appelées fenêtres optiques [10] :

- 1ère fenêtre optique (0.85 μm) : (5 Km pour une perte par absorption de 90% du signal et grande dispersion $>25\text{ps}^2/\text{km}$).

- 2ème fenêtre optique (1.31 μm): utilisée dans les réseaux de communication standards (80Km).
- 3ème fenêtre optique (1.55 μm): utilisé dans les réseaux de communication de longues distances (105 km avec une dispersion de 20 ps^2/km).

La transmission d'information sur FO en silice ne peut donc se faire que dans ces trois fenêtres optiques, et sachant que les pertes par absorption décroissent rapidement de la 1 ère à la 3ème fenêtre, les transmissions optiques se font dans les deux dernières fenêtres.

La 1 ère fenêtre ne permet que des transmissions locales (quelques centaines de mètres).

IX. Les techniques de transmission dans Les fibres optiques

Les fibres optiques possèdent, dans la fenêtre spectrale généralement utilisée, une bande utilisable très importante (environ 15 THz autour de la longueur d'onde 1,55 μm) [13].

Théoriquement, les débits qui peuvent être transmis sont donc extrêmement élevés. C'est d'autant plus intéressant qu'aujourd'hui le nombre et la taille des informations échangées sont de plus en plus importants. Néanmoins, actuellement, le traitement électronique des signaux électriques avant modulation et après détection n'atteint pas de telles fréquences. C'est pourquoi diverses solutions ont été imaginées pour profiter des capacités de la fibre optique et donc augmenter le transfert d'informations sur un même canal. Dans la plupart des cas, le principe reste identique : utiliser N signaux au débit D équivalent en termes de capacité à un signal au débit ($N * D$), irréalisable à l'heure actuelle. C'est ce qu'on appelle le multiplexage, et les débits transportés seraient désormais plus importants. Le signal concentré des flux d'origines diverses est appelé signal multiplex. Pour conserver l'intégrité de chaque signal sur le canal, le multiplexage introduit, entre les signaux, une séparation temporelle, spatiale ou fréquentielle [13].

IX.1 Le multiplexage temporel (TDM)

Le multiplexage TDM (Time Division Multiplexing, multiplexage à répartition temporelle (MRT)) consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant, ceci à tour de rôle pour chaque utilisateur.

L'allocation de cette bande passante se fait en divisant l'axe du temps en périodes de durée fixe, et chaque utilisateur ne va transmettre que pendant une de ces périodes déterminée. Un intervalle de temps fixe (IT) est successivement assigné à une source [13].

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

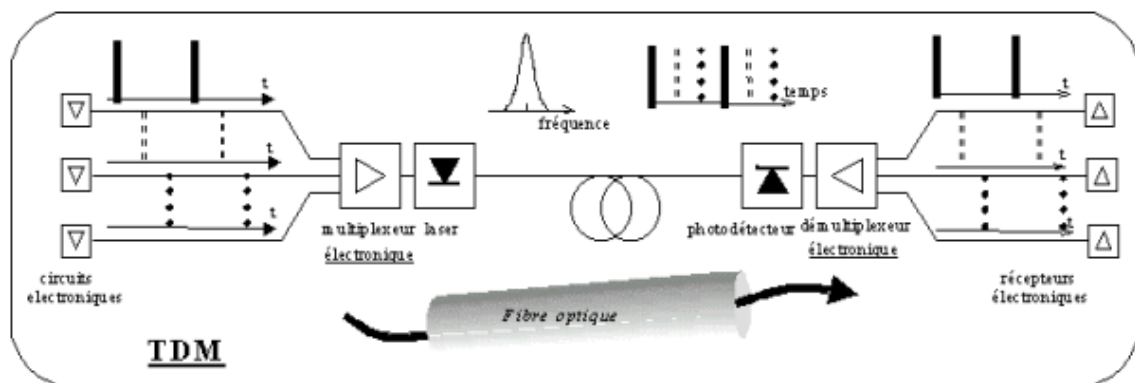


Figure II.18. Schéma de principe du multiplexage ETDM dans les communications par fibre optique.

IX.2 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.

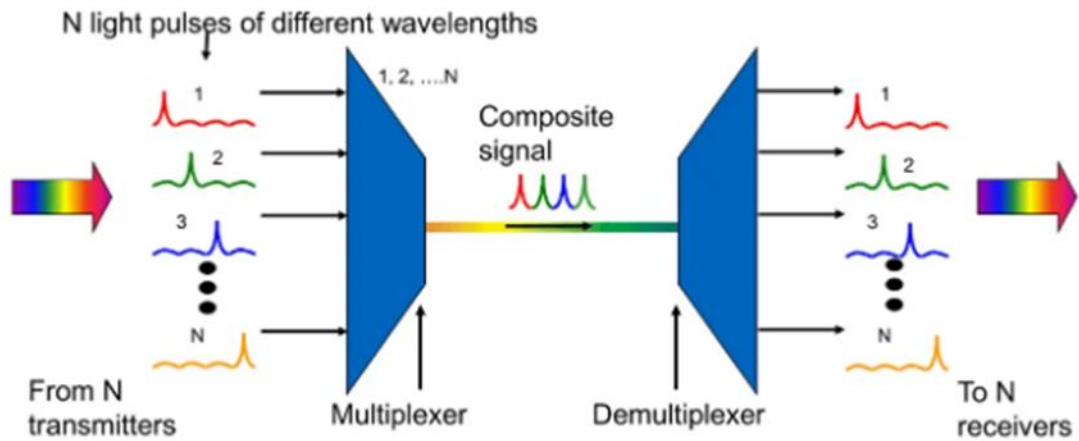


Figure II.19. Schéma de principe du multiplexage WDM dans les communications par fibre optique.

X. Conclusion

Les fibres optiques sont très utilisées actuellement grâce à leur large bande passante. Dans ce chapitre, nous avons décrit brièvement les différentes générations et l'évolution de la fibre optique et nous avons présenté ses caractéristiques ainsi que les avantages et inconvénients et les problèmes que peuvent être posés lors de la transmission.

Chapitre III

Simulation des fibres optiques à cristaux photonique

I. Introduction

La notion de "cristaux photoniques" a été proposée pour la première fois en 1987. Le premier cristal photonique a été réalisé en 1991.

Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans une, deux ou trois dimensions. Ce milieu périodique produit sur la lumière qui se propage dans le cristal photonique un effet analogue à celui du potentiel périodique sur les électrons dans un cristal.

Ce chapitre a pour but de présenter les fibres à cristaux photonique que l'on nomme également fibres microstructurées. 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.

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 [18].

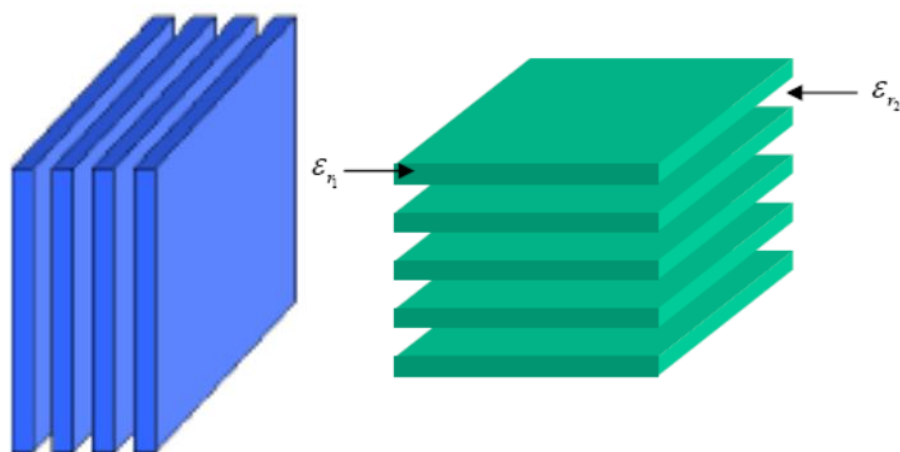


Figure III.1. Exemple de structure périodique unidimensionnel.

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 (Figure III.2). 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 [18].

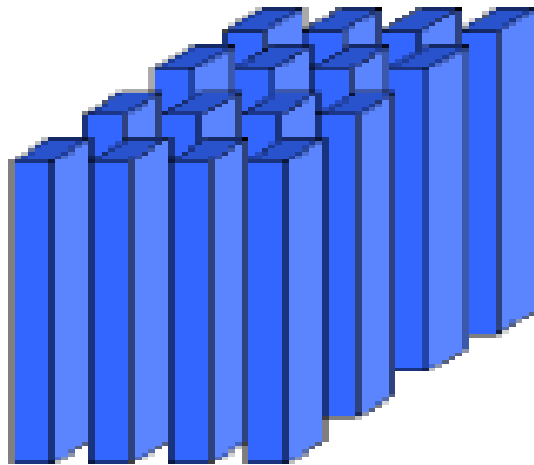


Figure III.2. Exemple de structure périodique bidimensionnel.

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 micro-niques 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 [17].

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 [18].

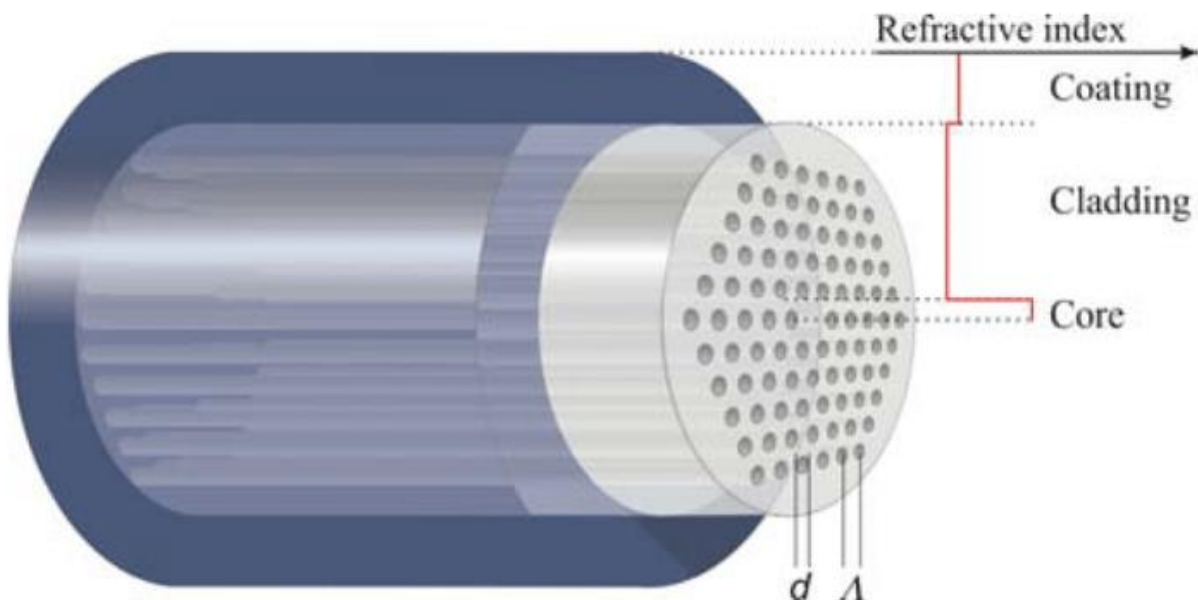


Figure III.3. Concept des fibres à cristaux photoniques.

IV. Type des fibres cristaux photoniques

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 :

IV.1. Bande Interdite Photonique (BIP)

La "renaissance" des fibres microstructures remonte à 1995 lorsqu'un groupe de chercheurs britanniques animé par 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 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. 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. L'onde lumineuse injectée dans une Fibre cristaux photoniques BIP est réfléchiée par la gaine microstructure périodique et se retrouve confinée transversalement dans la région où la périodicité est brisée (zone du défaut constituant le cœur) (figure III.4). 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 ($\lambda \approx 2\Lambda$).

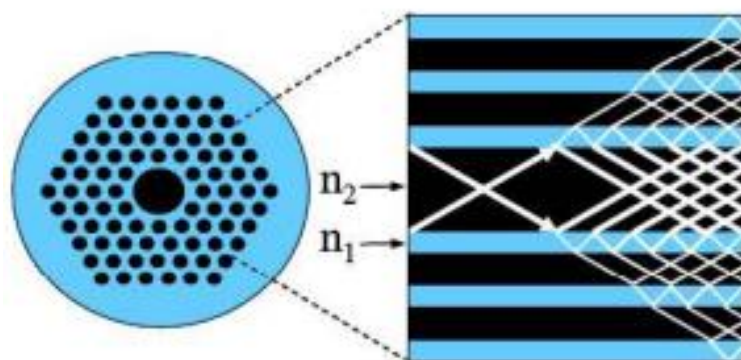


Figure III.4. Guidage par effet BIP, $n_1=1.45$ (silice) et $n_2=1$ (air).

IV.2. Réflexion totale interne modifiée (RTIM)

En 1997, Russel et son groupe croit fabriquer pour la première fois une Fibre cristaux photonique 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.

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) (figure III.5). Toutefois, il n'existe pas d'interface clairement définie entre le cœur et la gaine comme il en existe dans les FSI (Fibres à Saut d'Indice). C'est pourquoi le mode de guidage qui permet la propagation dans les PCF dépourvues de BIP est appelé "guidage par réflexion totale interne modifiée" [19].

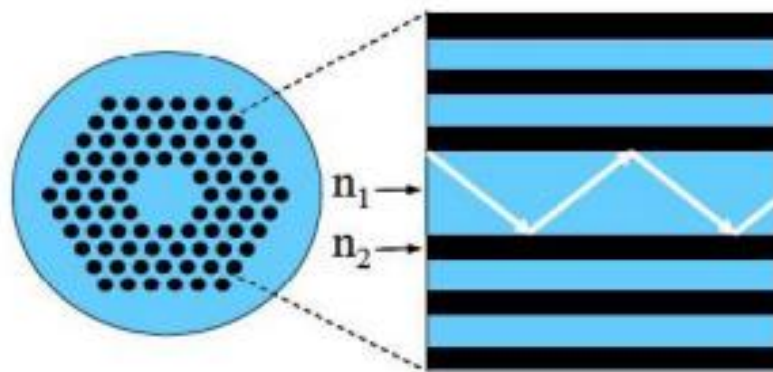


Figure III.5. Guidage par RTIM, $n_1=1.45$ (silice) et $n_2=1$ (air) (bleu=silice, noir=air).

V. Introduction à COMSOL Multiphysics

Pour l'études et simulation de la fibre à cristaux photonique on a utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics (figure III.6).

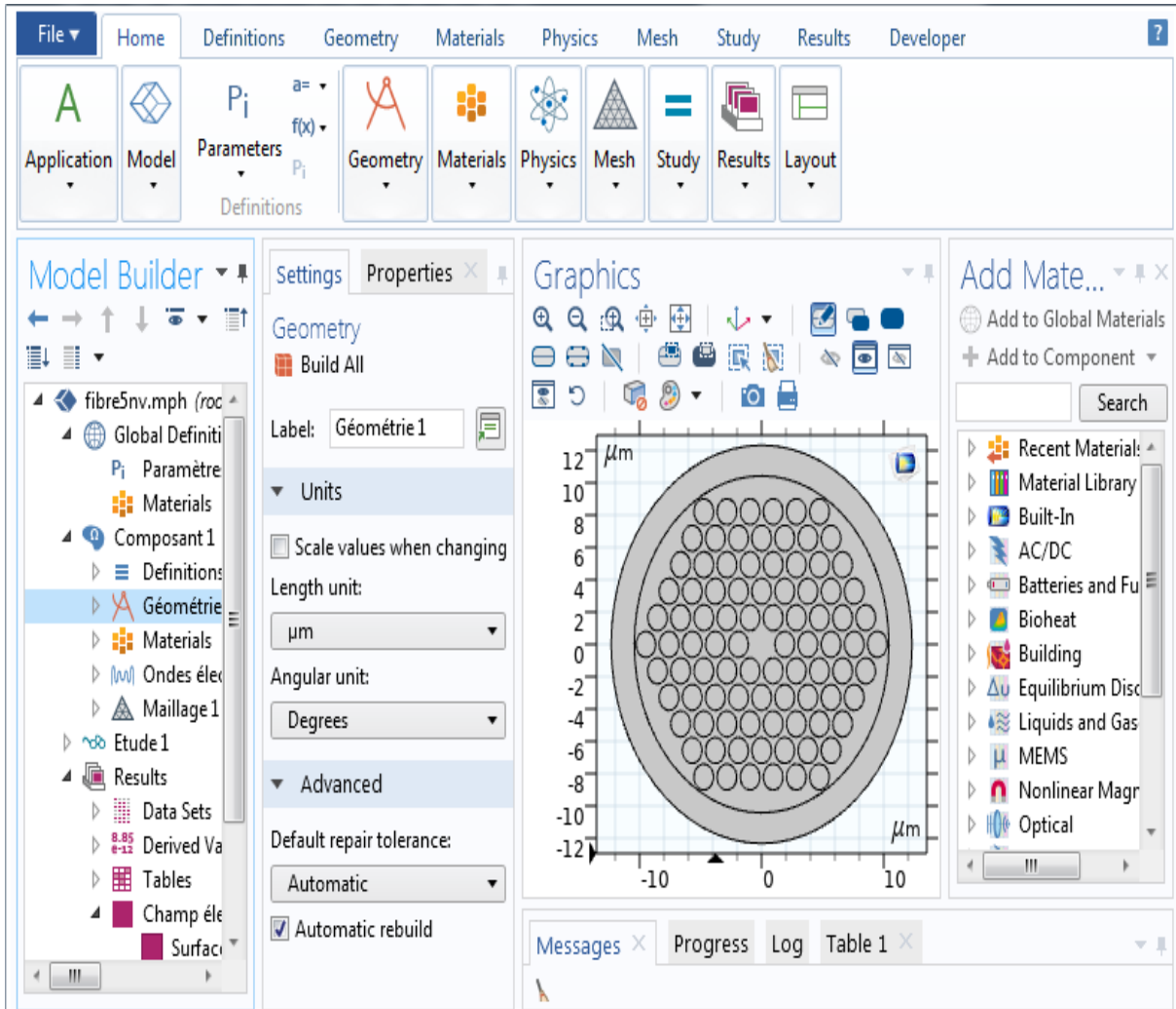


Figure III.6. L'interface de travail sur COMSOL.


C'est un logiciel conçu par l'entreprise «Comsol » qui est fondée en 1986. Elle se spécialise dans le domaine de développement de logiciels de support technique et de formation spécialisé et de conseil. Le logiciel est utilisé par plusieurs grandes entreprises à travers le monde .Vous pouvez modéliser et simuler tout système basé sur la physique en utilisant un logiciel de COMSOL®.

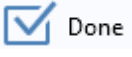
Basé sur la méthode des éléments finis, le logiciel COMSOL Multiphysics est recommandé pour la création de modèles utilisés dans les domaines d'applications spécialisés ou les domaines d'ingénieries.

V. 1 Création du modèle de la simulation

1. Ouvrez une nouvelle simulation COMSOL, sélectionnez *Model Wizard*. Cette option permet de définir pas à pas les modalités du problème.

2. Choisissez ensuite un modèle spatial en 2D.

3. Vous devez par la suite choisir le modèle physique approprié. Sélectionnez le modèle *Wave Optique* après choisi *Electromagnetic waves Frequency Domain (ewfd)* dans la catégorie Cliquez sur 

4. Après avoir sélectionné le modèle, vous devez sélectionner le type d'étude désiré. Sous mode analysis puis cliquez sur 

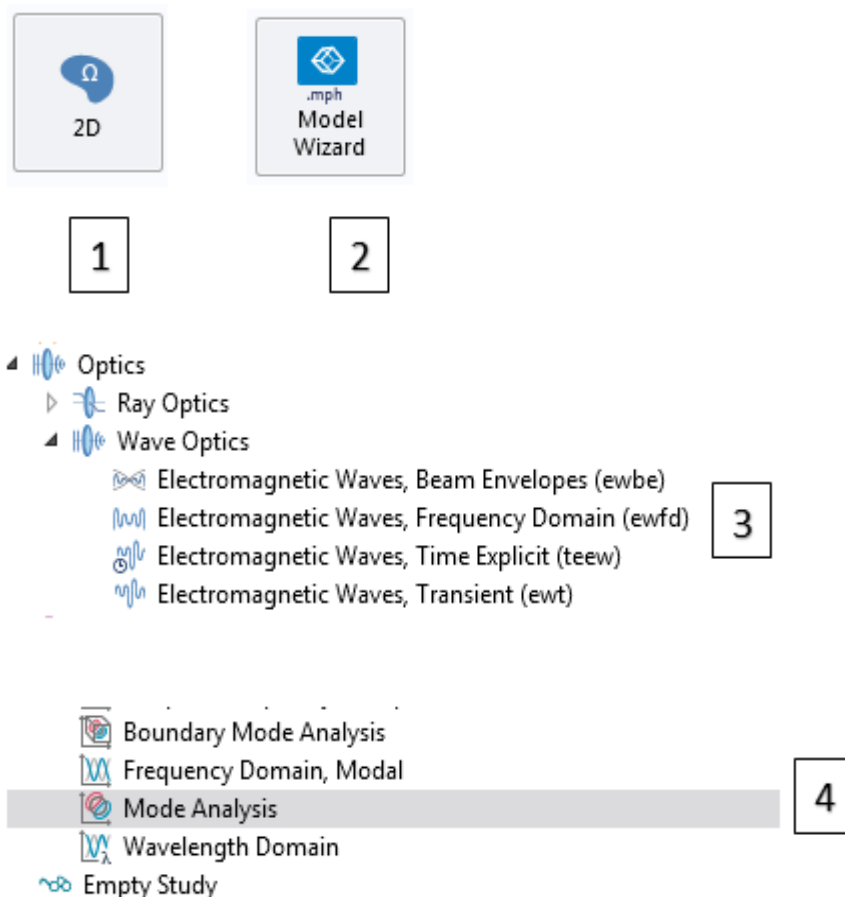


Figure III.7. Type de l'étude désiré sous comsol.

➤ **Sauvegardez** la simulation dans votre répertoire personnel

Les solutions recherchées du problème étant la constante de propagation (la résolution de l'équation de Helmholtz donne les indices effectifs des modes) 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.

▼ Equation

Afficher les équations en considérant:

Etude 1, Analyse modale

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E} = \mathbf{0}$$

$$\lambda = -j\beta - \delta_z$$

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \tilde{\mathbf{E}}(x, y) e^{-ik_z z}$$

Figure III.8. L'équation à résoudre.

V.2 Définition des paramètres globaux et création de la géométrie :

Dans le Model Builder, faites apparaître le menu contextuel (clic droit de la souris) de Global Definitions et cliquez sur Parameters

▼ Parameters

» Name	Expression	Value	Description
H	50[cm]	0.5 m	hauteur de la plaque
L	30[cm]	0.3 m	largeur de la plaque
Ts	21[degC]	294.15 K	temp. du bas de la plaque
Ti	60[degC]	333.15 K	temp. à gauche de la plaque
To	-20[degC]	253.15 K	temp. à droite de la plaque
hi	20[W/m^2/K]	20 W/(m^2·K)	coeff. de conv. à gauche
ho	15[W/m^2/K]	15 W/(m^2·K)	coeff. de conv. à droite

Figure III.9. Déclaration des paramètres.

V.3 Détermination du profil d'indice

La première étape du calcul consiste à définir la géométrie de la fibre à modéliser.

La Fibre optique conventionnelle est constituée d'un cœur cylindrique de Silice d'indice n_1 entouré par une gaine dont l'indice de réfraction n_2 est plus faible que celui du cœur. Un revêtement supplémentaire en polymère assure une protection à la fois mécanique et chimique à cette structure.

La structure de la fibre standard sera modélisée par trois couches circulaires régulièrement réparties (figure III.10).

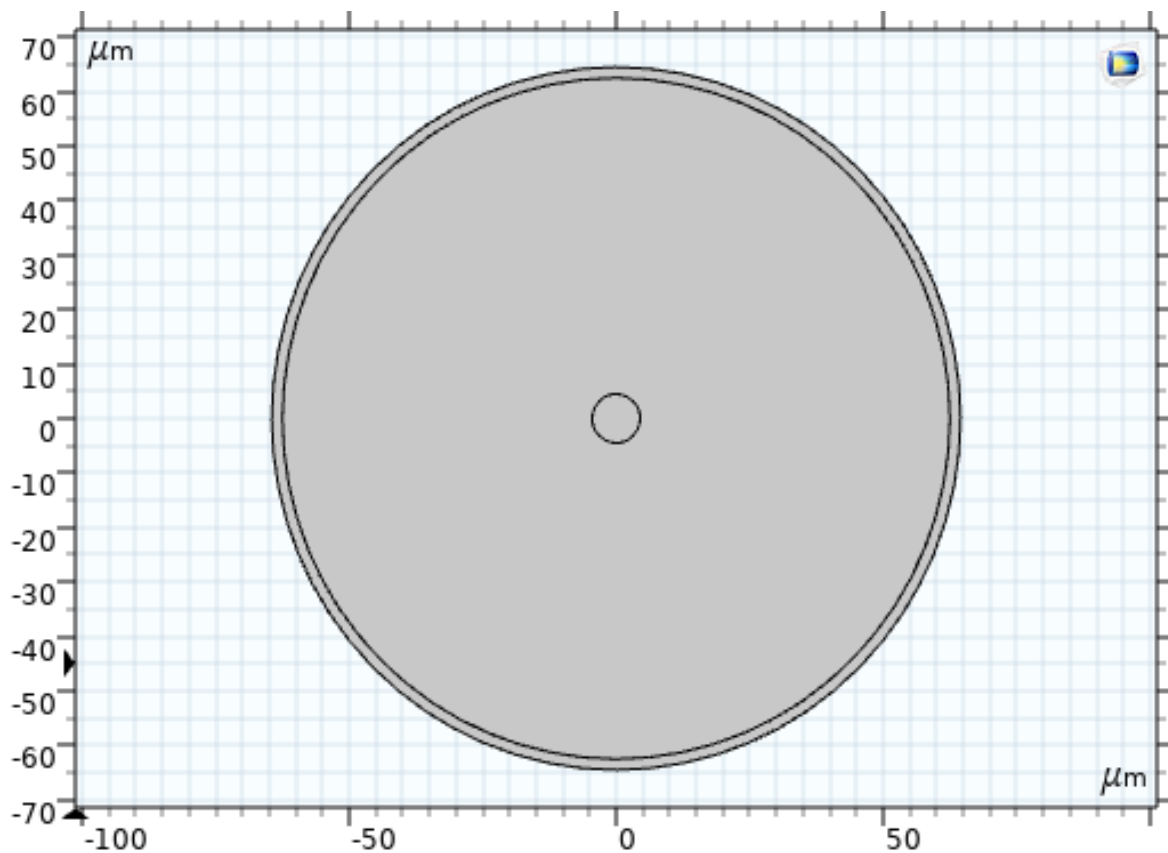


Figure III.10. Schéma d'une Fibre standard dessinée par le logiciel

V.4 Choix de matériaux

Après l'étape précédente, il faut maintenant affecter un matériau à chaque couche ou géométrie. Pour ajouter un matériau, nous pouvons soit nous référer à la bibliothèque de matériau existante dans COMSOL Multiphysics, ou bien créer un matériau vierge et introduire les paramètres que nous souhaitons utiliser.

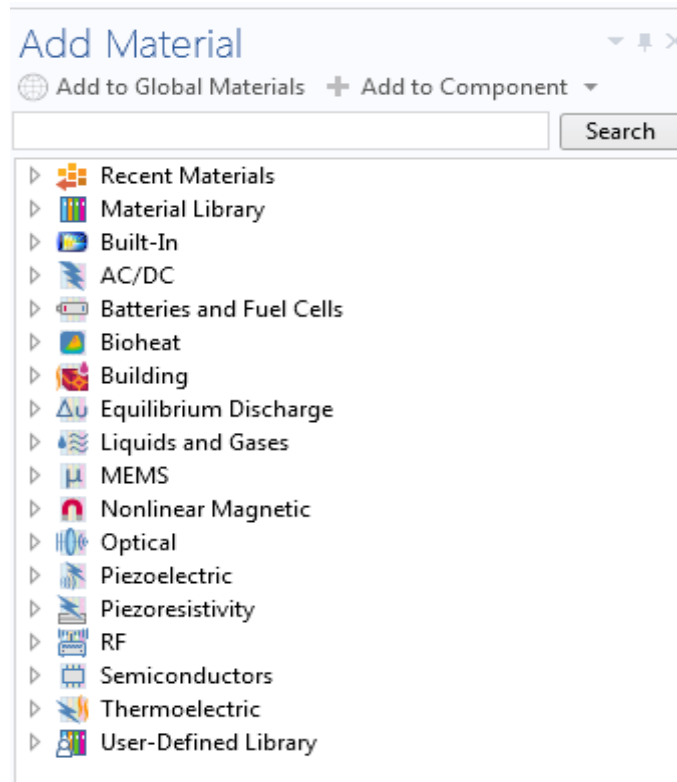


Figure III.11. Bibliothèque des matériaux dans COMSOL Multiphysics.

V.4.1 Insertion des nouveaux matériaux

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. L'indice de réfraction de l'aire 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 PCF 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 [21].

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

V.5 Le Maillage

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

La justesse des résultats dépend de la régularité des sous espaces ainsi que de la finesse du maillage [22]. 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 $\lambda/6$ [21]. 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 [22].

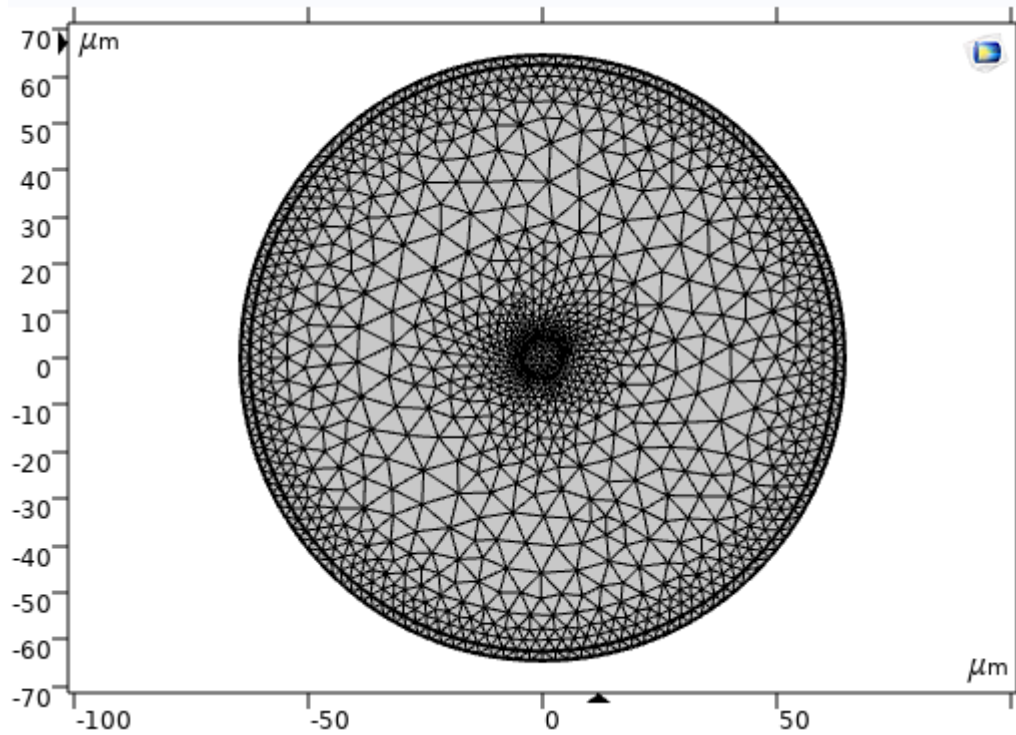


Figure III.12. Maillage de la géométrie obtenue avec Comsol.

V.6 Détermination de la distribution du mode d'une fibre optique standard

La dernière étape consiste à la détermination de l'indice effectif (ou constante de propagation) du mode étudié. La figure III.13 montre la distribution du mode fondamental d'une PCF à une longueur d'onde de 1550 nm.

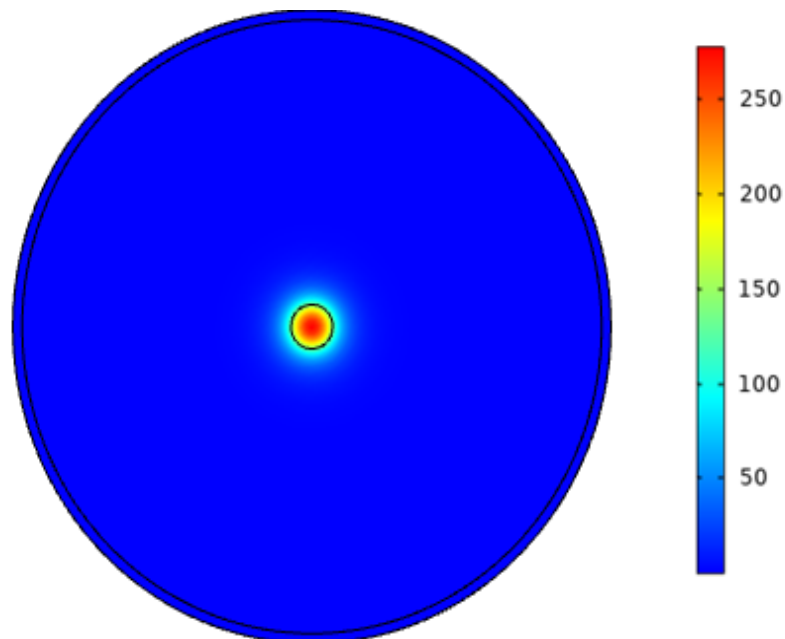


Figure III.13. Représentation du champ électrique du mode guidé.

VI. Etude de la biréfringence dans les fibres optiques conventionnelles

Pour réaliser des mesures sur le principe de la modulation de polarisation, une des conditions essentielles est d'utiliser des fibres permettant de préserver l'état de polarisation des ondes lors de la propagation. En théorie, les fibres standards devraient garder l'état de polarisation mais dans la pratique une onde entrant avec un certain état de polarisation ressortira après quelques dizaines de centimètres avec une polarisation complètement aléatoire, ceci étant dû notamment à des micro-perturbations introduites lors de la fabrication. On a donc recours à des fibres optiques biréfringentes qui possèdent deux axes orthogonaux principaux. Ces deux axes sont appelés axe lent et rapide au vue de la différence de vitesse de propagation des ondes suivant ces axes. Une onde guidée polarisée suivant l'axe ayant un indice de réfraction élevé (axe lent) aura une vitesse plus petite que l'onde polarisée suivant un axe orthogonal (axe rapide) La biréfringence d'une fibre est donnée par la différence des indices de réfraction des deux axes :

$$B = n_x - n_y \quad (\text{III.2})$$

Où n_x et n_y sont respectivement les indices de réfraction des axes lent et rapide. La biréfringence est communément définie par la longueur de battement L_B , traduisant la longueur de fibre nécessaire pour que la différence de phase entre les deux polarisations orthogonales soit de 2π [20].

$$L_B = \frac{\lambda}{n_x - n_y} \quad (\text{III.3})$$

Si la fibre est soumise à des perturbations mécaniques de période comparable à L_B , il en résultera un fort couplage entre les deux polarisations orthogonales. Lors de la fabrication des fibres, de telles perturbations peuvent être introduites c'est pourquoi un effort particulier est fait pour éviter toute courbure et twist de la fibre lors de l'étirage. Le maintien de la polarisation sera assuré si la longueur de battement est plus petite que la dizaine de centimètres. Dans le cas où la lumière injectée a sa polarisation alignée sur l'un des axes principaux, elle sera guidée sans variation de son état de polarisation. Il existe une principale méthode pour introduire de la biréfringence dans les fibres optiques [23] :

On peut modifier les caractéristiques de guidage du cœur par altération de sa géométrie, par exemple en cassant la symétrie circulaire. On peut citer les fibres à cœur elliptique qui ont des longueurs de battement de quelques millimètres.

VI.1. Fibres optiques conventionnelles à cœur circuler

La figure III.14 représente l'évolution de la biréfringence de phase d'une fibre monomode standard pour une plage de longueurs d'onde allant de 1200 à 1700 nm. Cette courbe indique la différence entre les indices effectifs des deux états de polarisation du mode fondamental. Nous constatons que B varie de $1.58 \cdot 10^{-8}$ à $2.8 \cdot 10^{-8}$, en passant par une valeur de $1.75 \cdot 10^{-8}$ à 1550 nm.

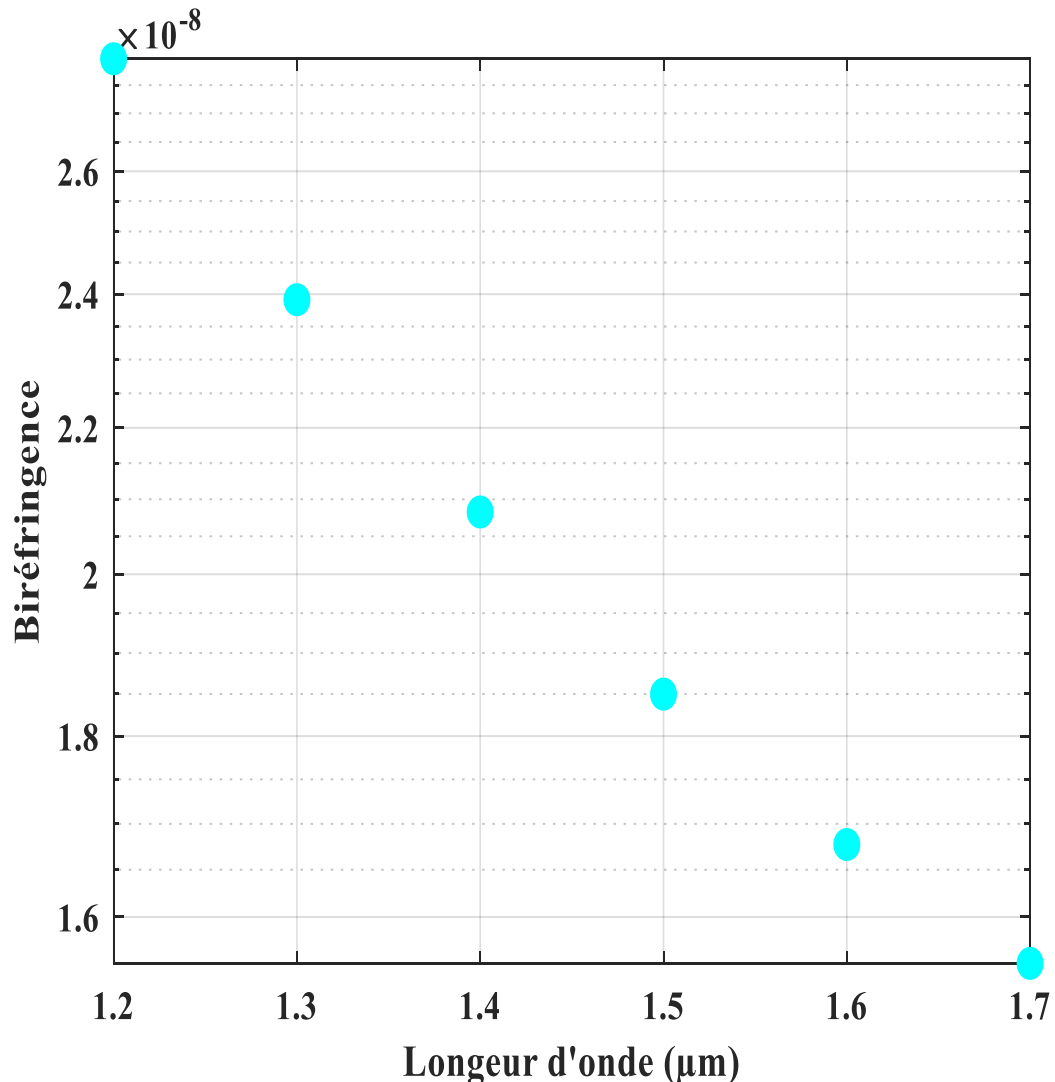


Figure III.14. La variation de biréfringence de la fibre en fonction de la longueur d'onde.

VI.2. Fibres optiques conventionnelles à cœur elliptique

Nous nous sommes intéressés dans cette étude à analyser l'impact de la déformation géométrique du cœur sur la biréfringence. Les déformations géométriques pouvant briser la symétrie de la fibre optique.

Afin d'évaluer l'impact de l'ellipticité du cœur sur la biréfringence, nous allons changer la forme du cœur de la forme circulaire à la forme elliptique dont l'ellipticité est :

$$\eta = \frac{dx}{dy} \quad (\text{III.4})$$

Pour ce faire, les paramètres de la FO sont conservés avec l'introduction d'une diminution de 25%, 50% et 75 % sur le rapport d'ellipticité η du cœur. La figure III.15 représente la distribution du champ électrique du mode fondamental avec un cœur elliptique.

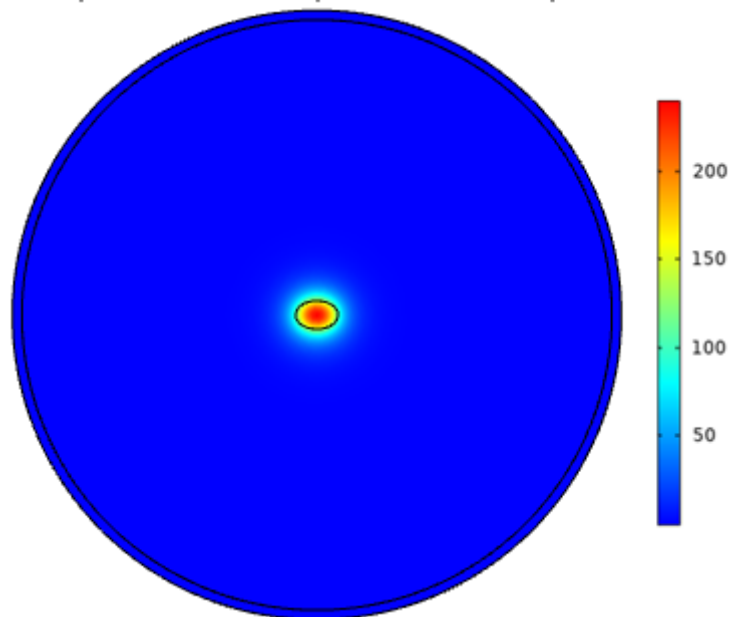


Figure III.15. Distribution du champ du mode fondamental à cœur elliptique pour $\lambda=1.55 \mu\text{m}$.

La figure III. 16 présentes les courbes de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde pour la FO à cœur elliptique avec diminution de 25 %, 50% et 75% sur le rapport d'ellipticité.

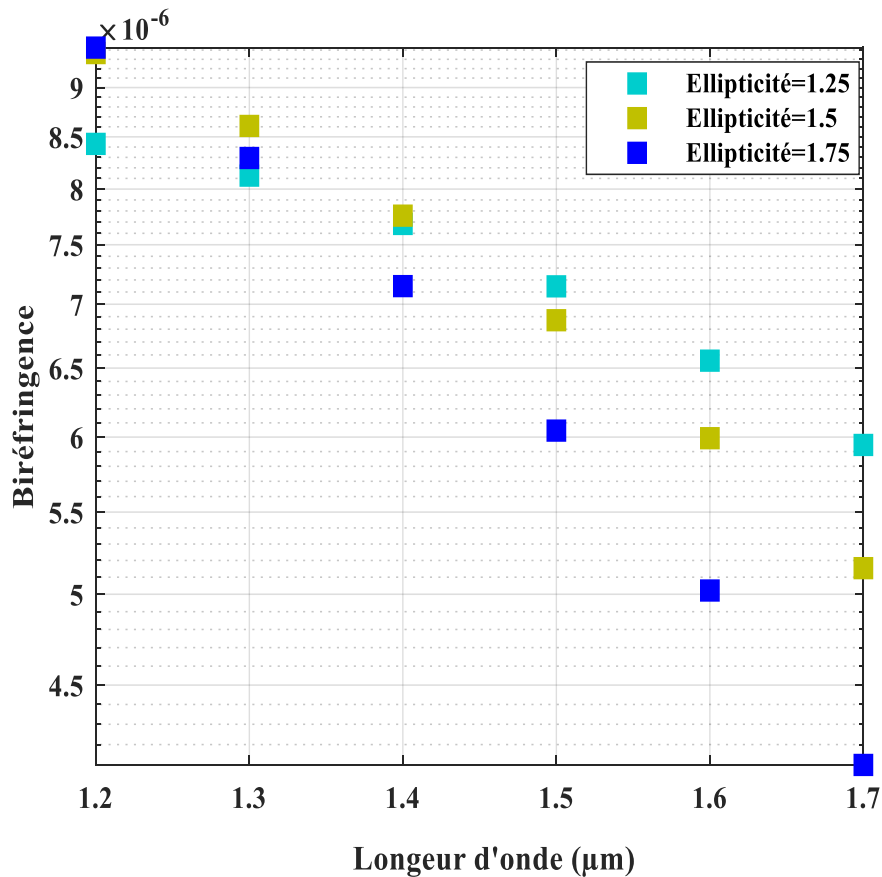


Figure III.16. La variation de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde pour différente valeur de η .

D'après la figure III.16, on constate qu'il y a une grande variation de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde. Nous pouvons aussi observer que lorsqu'en introduisant une ellipticité sur le cœur de FO, on remarque que la biréfringence est de l'ordre de 10^{-6} , ce qui est deux ordres de grandeur supérieur à celle de la FO à cœur circulaire (10^{-8}). Donc on peut conclure, que l'effet d'un défaut accidentel qui peut être introduit lors de la fabrication d'une FO, peut induire une biréfringence de deux ordres de grandeur supérieure à celle prédite. Cela est dû au fait que la déformation du cœur introduit une extension du champ dans la direction du petit axe de l'ellipse (direction horizontale), ce qui augmente la différence entre l'indice effectif de x et y ce qui augmente la biréfringence.

VII. Détermination de la distribution du mode fondamental de la fibre à cristaux photonique

La première étape du calcul consiste à définir la géométrie de la FCP 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 FCP dessinée présente des trous circulaires régulièrement répartis sur un motif de base hexagonal (FCP-H) (figure III.17)

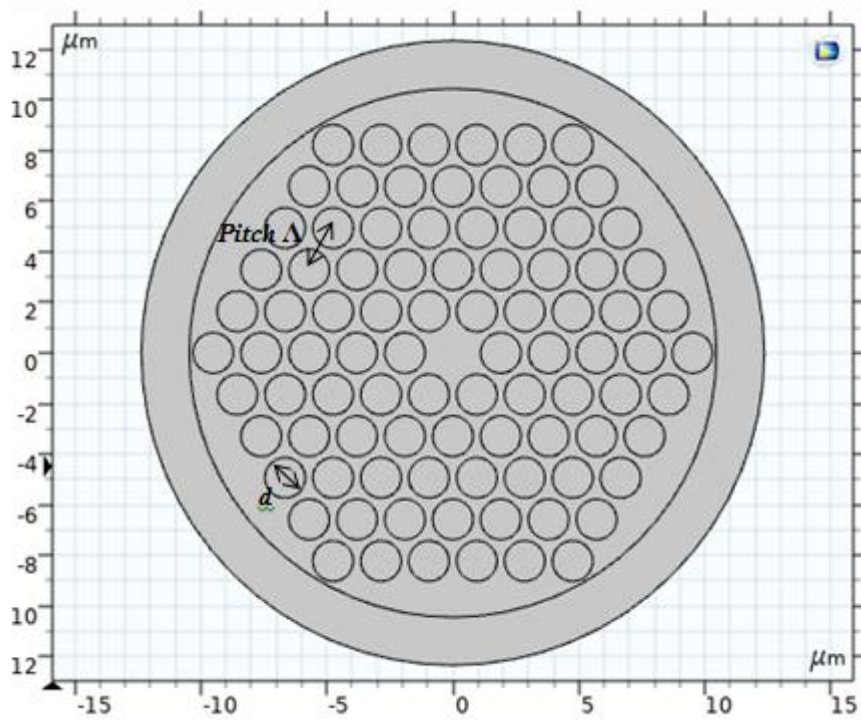


Figure III.17. Schéma d'une FCP dessinée par le logiciel.

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 (Fig. III.18). Dans chaque triangle élémentaire, la résolution de l'équation de Helmholtz donne les indices effectifs des modes.

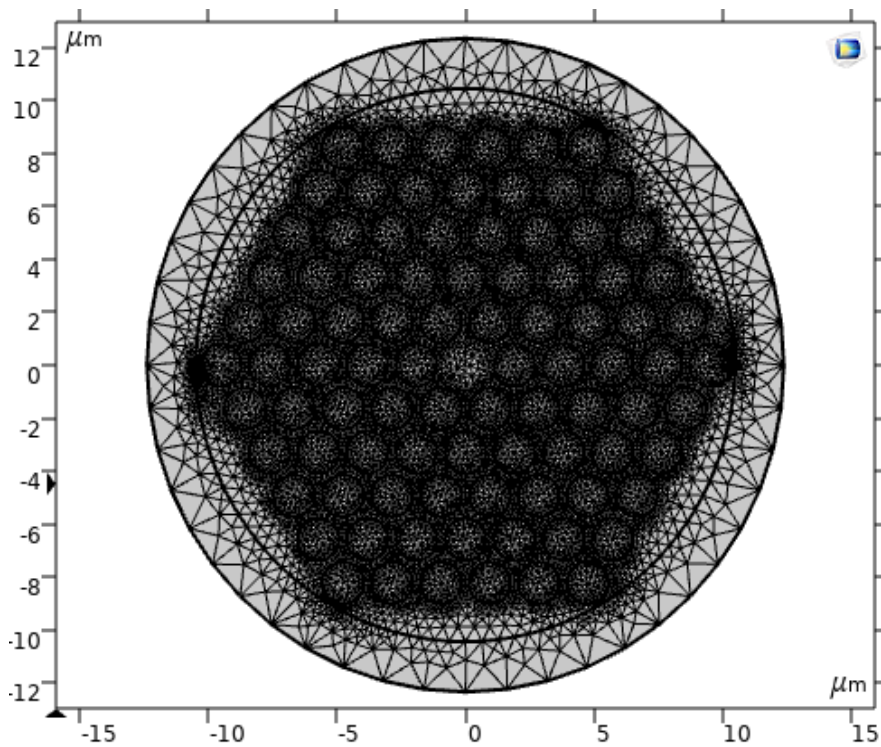


Figure III.18. Maillage de la FCP-H obtenue avec Comsol.

La figure III.19 montre la distribution du mode fondamental d'une PCF à une longueur d'onde de 1550 nm

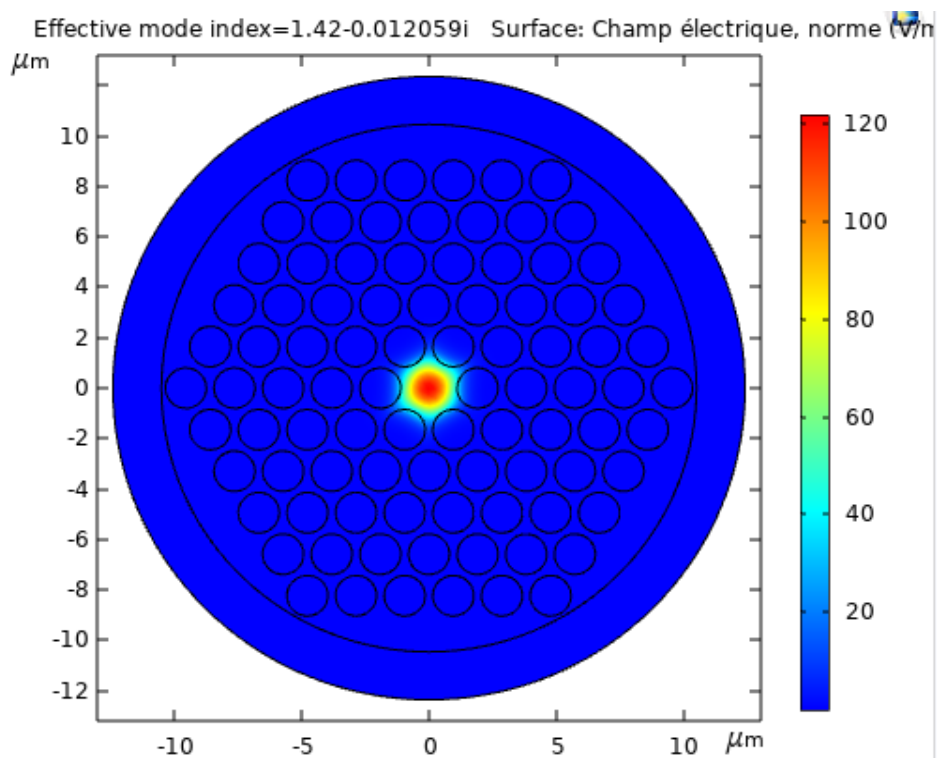


Figure III.19. Représentation du mode fondamental guidé dans la FCP-H à 1550 nm.

dans la FCP-H à 1550 nm.

VII.1 Etude de la biréfringence dans les fibres à cristaux photoniques

En raison de nombreuses potentialités d'applications nécessitant le maintien de la polarisation, l'introduction d'une biréfringence contrôlée dans les nouvelles 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 de la FCP-H pour une plage de longueurs d'onde allant de 1200 à 1700 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 $4.5 \cdot 10^{-8}$ à $7.2 \cdot 10^{-8}$, en passant par une valeur de $6,75 \cdot 10^{-8}$ à $1,55 \mu\text{m}$. D'après cette figure, on remarque que la courbe de la biréfringence de la FCP-H est supérieure à celle de la FO conventionnelle, mais avec le même ordre de grandeur (10^{-8}). Donc on peut conclure, que la structure FO conventionnelle est un peu plus symétrique que la structure FCP-H.

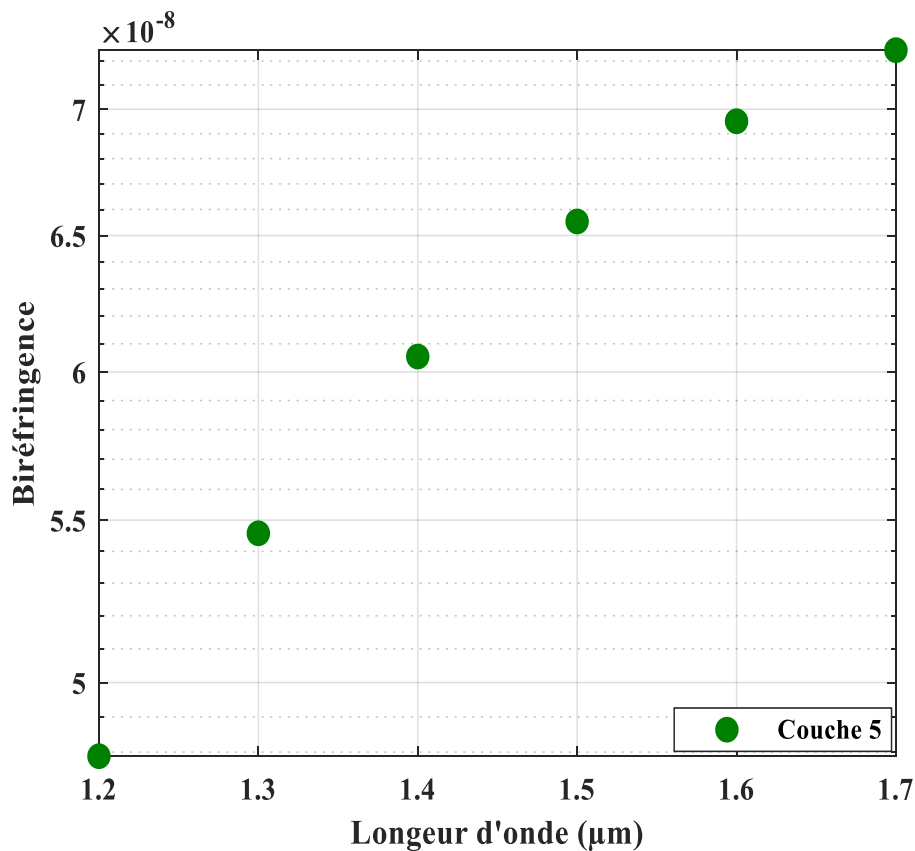


Figure III.20. La variation de biréfringence de la FCP-H en fonction de la longueur d'onde.

VII.2 Influence des déformations elliptiques des trous d'air de la première couche de la FCP-H sur la biréfringence

Nous sommes intéressés dans cette étude d'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.21) sur la biréfringence de la FCP-H proposé, nous avons présenté sur la figure III.22 la variation de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde pour différents 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.

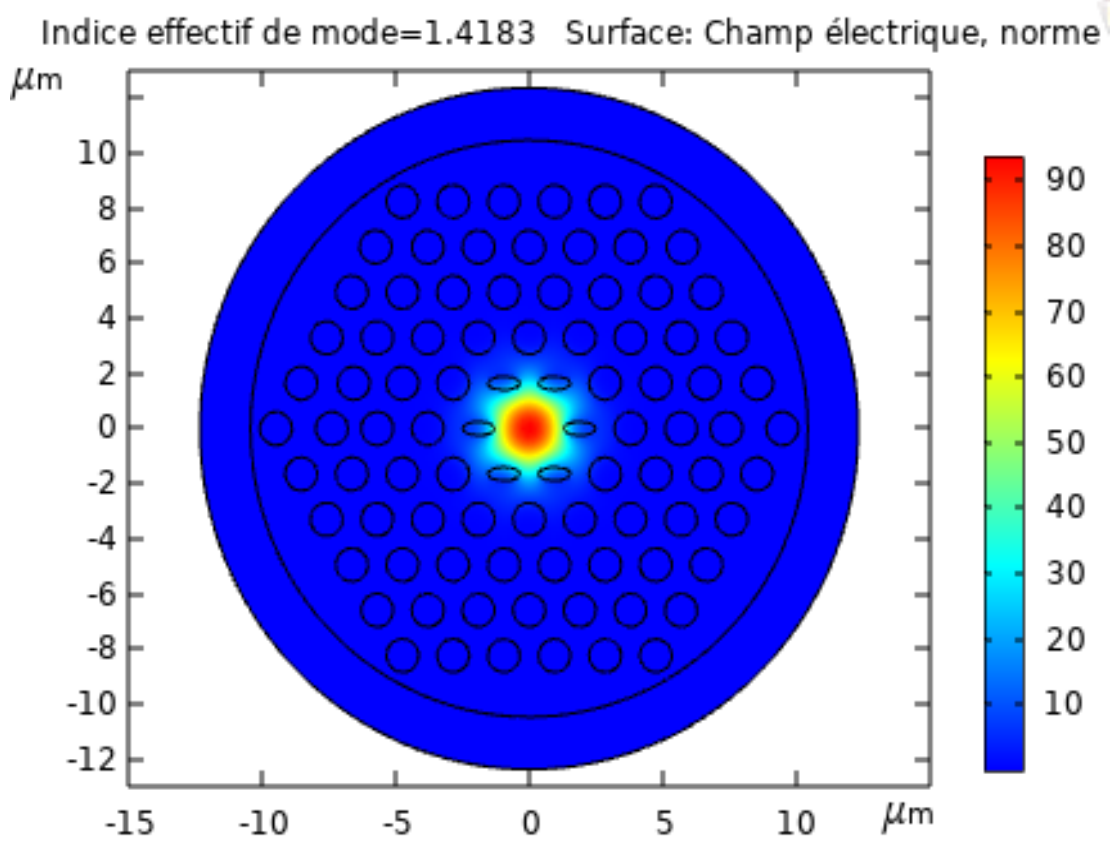


Figure III.21. Section transverse du mode fondamental de la FCP-H avec ellipticité des trous d'air dans la première couche.

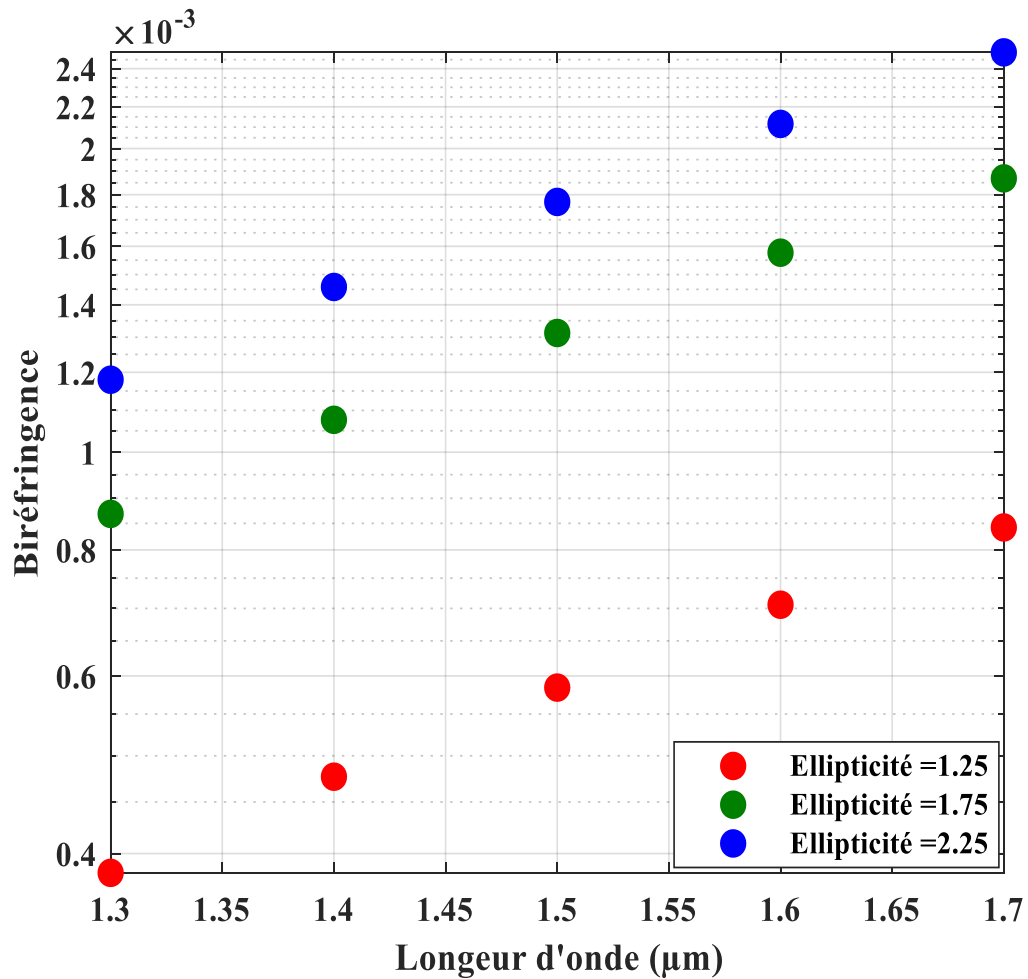


Figure III.22. Variation de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde de la FCPH avec différente valeur d'ellipticité des trous d'air de la première couche.

D'après la figure III.22, on voit que l'évolution de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde est croissante pour les trois changements ($\eta = 1.25, 1.75$ et 2.25) et on observe clairement que lorsqu'on introduit 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.

VIII. Etude des pertes par confinement dans une FCP-H

La gaine optique microstructurée a une extension radiale limitée au-delà de laquelle se trouve une zone de silice d'indice moyen plus élevé. Si le confinement du champ dans le cœur est insuffisant, une fraction de l'onde évanescente peut déborder au-delà de la gaine optique, ce qui est à l'origine des pertes par confinement

L'un des premiers avantages des FCPs est la capacité à bien confiner le mode guidé sur de 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 de la longueur d'onde pour différents nombre de couches N . La figure III.23 montre les sections transverses des FCPs pour différents nombre de couches ($N = 3, 4$ et 5 couches d'air).

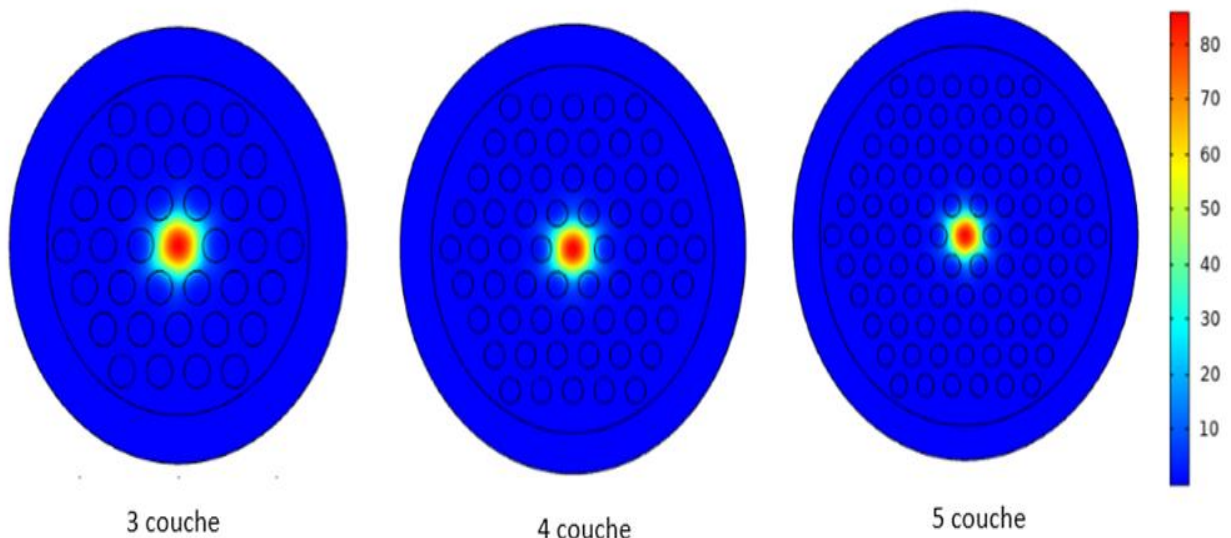


Figure III.23. Section transverses du mode fondamental de la FCP-H pour différents couches.

Ces pertes sont calculées suivant la formule suivante :

$$\alpha \left(\frac{dB}{km} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{20}{\ln 10} \text{Im}g(n_{eff}) \quad (\text{III.5})$$

La figure III.24 montre les pertes par confinement en fonction de longueur d'onde pour différente valeur 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. A l'inverse, aux courtes longueurs d'onde, la lumière évite les trous d'air et l'indice effectif de gaine augmente.

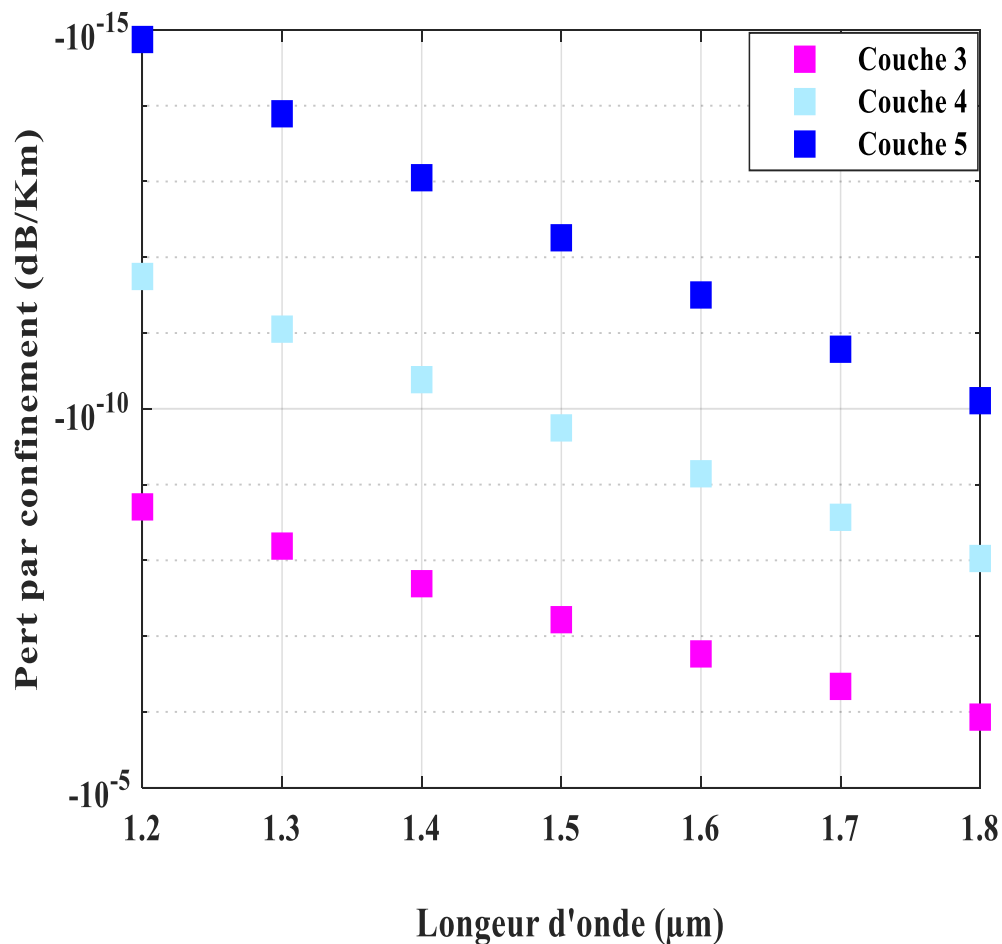


Figure III.24. Pertes par confinement de la FCP-H pour différentes couches en fonction de longueur d'onde.

La figure III.25 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.24. On observe clairement que lorsque la longueur d'onde diminue (figure III.24 (a)), le champ est confiné dans la région constituant le cœur de la fibre. Au contraire, lorsque la longueur d'onde augmente (figure III.24 (b)), le champ s'étend de plus en plus dans la gaine.

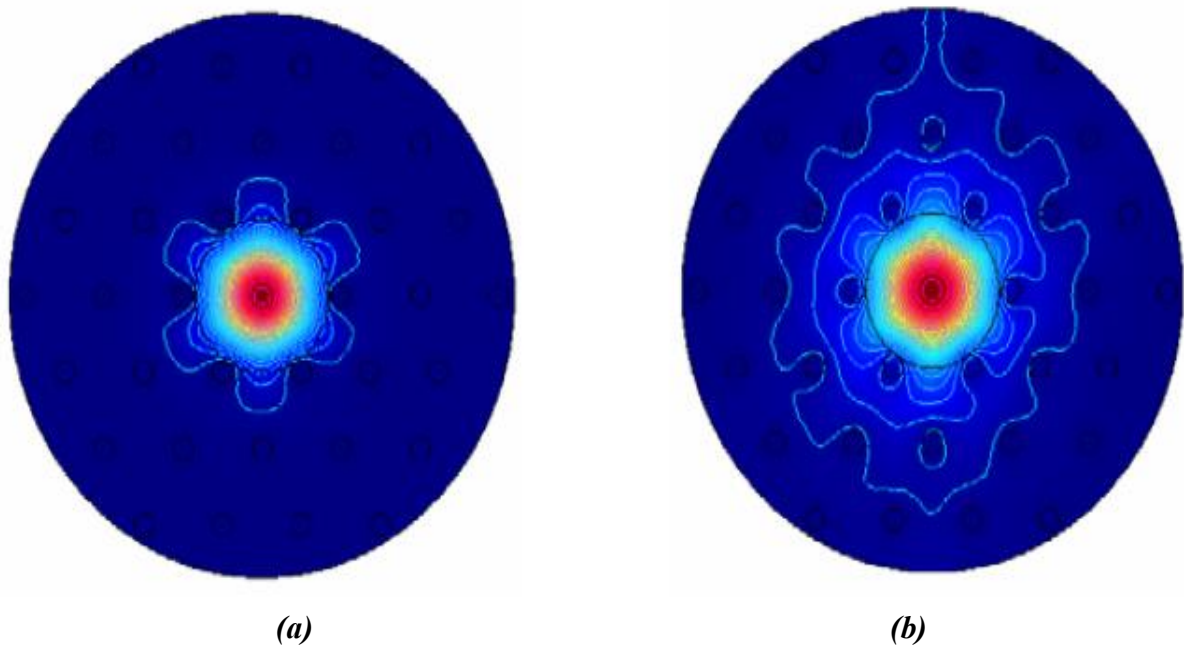


Figure III.25. Intensité modale du mode fondamental dans une FCP-H à longueur d'onde de (a) 600 nm et (b) 1550 nm.

La figure III.26 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.

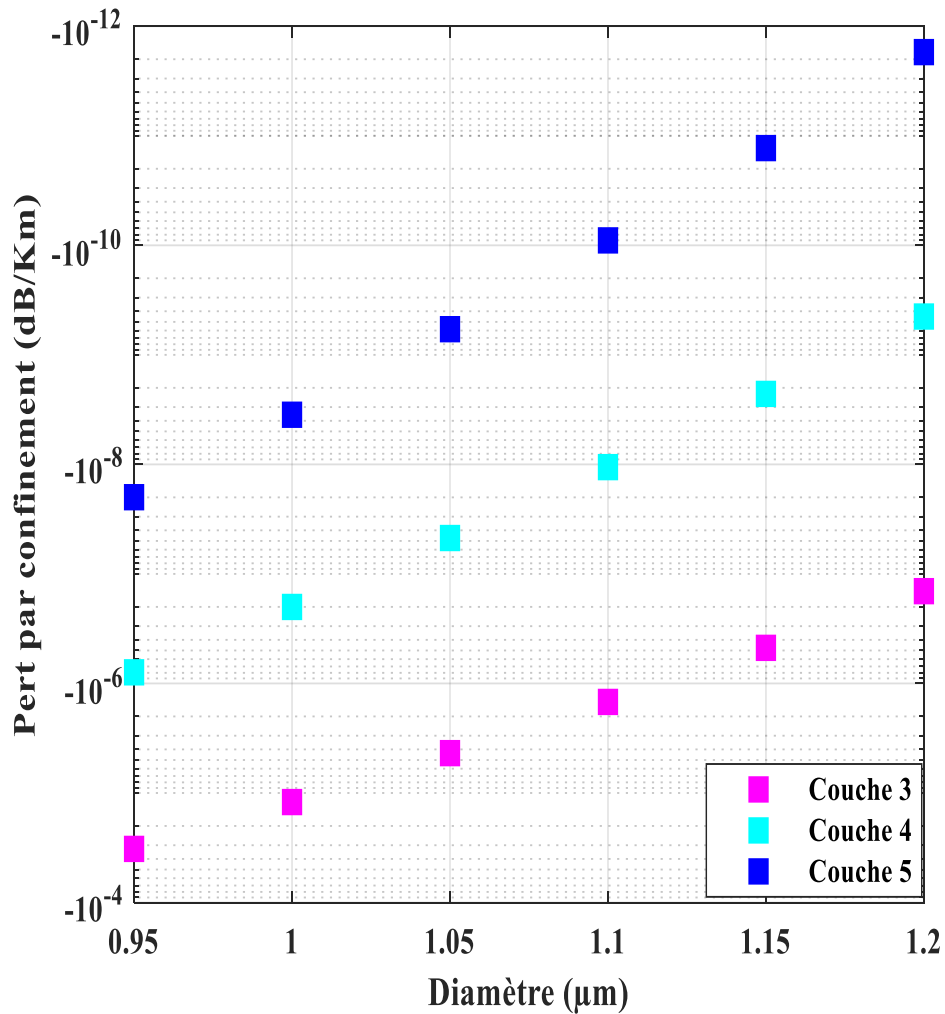


Figure III.26. Pertes de confinement de FCP-H à 1550 nm en fonction d pour différentes valeurs de N .

IX. Conclusion

Au travers ce dernier chapitre, nous avons évalué les potentialités offertes par la géométrie du profil d'indice de la FCP en termes d'amélioration de la biréfringence, et les pertes par confinement. Nous avons alors calculé à l'aide d'un logiciel (Comsol) de résolution des équations de Maxwell qui est basée sur la méthode des éléments finis, les indices effectifs du mode fondamental des fibres conventionnelles et les FCPs. Tout d'abord nous avons étudié l'indice effectif des fibres conventionnelles, puis nous avons analysé l'impact de déformations géométriques (ellipticité du cœur) sur la biréfringence des FO conventionnelles.

Puis nous avons montré que l'on pouvait augmenter la valeur de la biréfringence en changeant la forme du cœur de la forme circulaire à la forme elliptique. Ensuite, après une étude sur la biréfringence de la FCP-H, nous avons montré que l'on pouvait améliorer la biréfringence en changeant la forme de la première couche des trous d'air à la forme elliptique. Dans l'exemple étudié, cette biréfringence passe de $6,75 \cdot 10^{-8}$ à $1,55 \mu\text{m}$ pour $\eta = 1$ (forme circulaire) à $1,95 \times 10^{-3}$ pour $\eta = 2,25$ (forme elliptique). Nous avons aussi mené une étude sur la caractérisation des pertes par confinement. Après analyse, nous avons constaté que l'augmentation de la fraction d'air dans la gaine confine mieux le mode dans le cœur de la FCP.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Ce mémoire porte sur l'étude, la modélisation et la simulation de quelques propriétés lumineuses dans les fibres optiques conventionnelles et les fibres optiques de nouvelle génération communément dénommées "Fibres à Cristaux Photoniques (FCP)".

La description rigoureuse des propriétés optiques de ces fibres nécessite la prise en compte du caractère vectoriel des ondes électromagnétiques. Le formalisme analytique ne permet pas de traiter, et d'analyser complètement le comportement des ondes lumineuses dans ce type de guide d'onde. Et c'est pour cette raison que nous avons eu recours aux méthodes numériques qui tiennent compte des propriétés vectorielles de la lumière pour le calcul des propriétés optiques comme la dispersion chromatique, la biréfringence et les pertes de confinement. Le logiciel commercial Comsol Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis est un outil numérique efficace qui nous a permis de modéliser le comportement, simuler, et générer nos propres structures en tenant compte du choix des matériaux, ainsi que des conditions aux limites.

Les progrès réalisés dans le domaine des télécommunications sont tellement importants et rapides, que les structures des systèmes de transmission connaissent de véritables bouleversements. C'est pourquoi il nous a paru intéressant de commencer ce mémoire par une description des différentes couches constituant les réseaux de télécommunications, ainsi que les différentes techniques employées. Une description de la plupart des composants présents dans ces liaisons sur fibre optique complète les bases à posséder pour aborder ce mémoire et aide à la compréhension de la conception d'un système de transmission.

Nous avons consacré le deuxième chapitre à une présentation générale des caractéristiques des fibres optiques conventionnelles. Il avait pour objectif de donner une description de ces fibres : contexte historique, structure, types, propriétés lumineuses.

Le troisième chapitre a été consacré à l'étude et l'analyse des FCPs. Nous avons estimé numériquement l'effet des paramètres géométriques des PCFs sur la variation de la biréfringence et les pertes par confinement.

Conclusion générale

Nous avons aussi pu montrer également que les caractéristiques de la biréfringence pouvaient être contrôlées en changeant la forme des trous d'aire de la première couche a fin de brisé la symétrie de la structure.

D'autre part, nous avons pu confirmer que l'augmentation du la fraction d'air dans la gaine microstructuré confine mieux le mode dans le cœur de la FCP.

Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] : Parfait, R. (2002). Les réseaux de télécommunications. Hermès Science publications.
- [2] : Lorenz, P. (2001). Architectures des réseaux et télécommunications. Ellipses.
pp. 188–189
- [3] : Dupret, A., & Fischer, A. (2003). Cours de télécommunication. Dép. GTR-IUT
Villetaneuse Paris.
- [4] : Toffano, Z. (2001). Optoélectronique: Composants photoniques et fibres optiques.
Ellipses-Marketing.
- [5] : Laude, J. P. (2002). DWDM fundamentals, components, and applications (pp. 19-82).
Norwood, MA: Artech House.
- [6] : Stringfixer.com. 2022. Communication par fibre optique. [online] à l'adresse:
<https://stringfixer.com/fr/Fiber-optic_communication> [Consulté le 2 Avril 2022].
- [7] : BAKIR H, A. (2019). Polycopié de cours destiné aux étudiants Master 2 en
télécommunication (Matière : Communications optiques) Université Hassiba Benbouali de
Chlef.
- [8] : Bouzinaoui, D, & Zaidane, B. (2019). Etude théorique et pratique des fibres optiques de
verre (SiO₂). Université de Biskra.
- [9] : Merabta, T, & Chadouli, S. Compensation De La Dispersion Chromatique Dans Une
Ligne De Transmission Optique.
- [10] : Boudemagh, H. (2016). Impact de la Dispersion chromatique sur la Transmission sur
fibre optique.
- [11] : Kamel, L. (2011). Etude et réalisation d'une liaison optique à sortie variable pour
multiplexage en puissance (Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf des sciences et
de la technologi).

- [12] : Hammache, H. (2016). Etude et simulation des pertes dans une liaison fibre optique avec application. Université de Bejaïa
- [13] : Verneuil, J. L. (2003). Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s. Université de Limoges, Limoges, 297.
- [14] : Julien , M. (2003). Étude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique, Université de Limoges
- [15] : Joindot, M., & Joindot, I. (1999). Fibres optiques pour télécommunications. Techniques de l'ingénieur. Télécoms, (E7110), E7110-1.
- [16] : Buck, J. A. (2004). Fundamentals of optical fibers (Vol. 50). John Wiley & Sons.
- [17] : Cherid, S. (2014). Étude des phénomènes de transport dans les cristaux photoniques à désordre corrélé (Thèse de doctorat), université abdelhamid ebin badis–mostaganem.
- [18] : Jamier, R. (2007). Propriétés linéaires des fibres optiques à cristal photonique à cœur solide (Thèse de doctorat, Limoges).
- [19] : KIdari, A., & Mahroug, M. (2016). L'approximation analytique et l'analyse de différentes propriétés des fibres cristaux photoniques. Université de Telmcen.
- [20] : Benoît, D (2013) Génération et micro-confinement de plasmas microondes dans des fibres optiques creuses microstructurées Université de Limoges
- [21] : Bekarra, A., & R'bibess, M. (2018). Simulation et optimisation d'un diviseur à base des fibres à cristaux photoniques bidimensionnel. Université de Telmcen.
- [22] : Sonne, A., Ouchar, A., & Sonne, K. (2016). Improving of high birefringence with negative dispersion using double octagonal lattice photonic crystal fiber. *Optik*, 127(1), 8-10.
- [23] : Sonne, A. (2016). Etude, conception et simulation des fibres optiques à base de nouveaux matériaux (Thèse de doctorat, Université Amar Telidji de Laghouat, Département D'Electron).