

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Belhadj Bouchaib, Ain-Temouchent
Faculté de Science et Technologie
Département d'électronique et télécommunications
Laboratoire des structures intelligentes (SSL).



THÈSE

*Pour l'obtention du titre de Docteur en Télécommunications
Domaine : Science et Technologie
Filière : Télécommunications
Spécialité : Télécommunications optiques et micro-ondes*

Thème :

**Etude et conception des composants optiques à base
de fibres à cristaux photoniques.**

Présentée et soutenue publiquement le 10 octobre 2024

HARRAT ASSIA AHLEM

Devant le jury composé de :

Mme MOULESSEHOUL Wassila	MCA	Président	U.B.B Ain-Temouchent
Mr DEBBAL Mohammed	MCA	Directeur de thèse	U.B.B Ain-Temouchent
Mr OUADAH Mohammed Chamse eddine	MCA	Co- Directeur de thèse	U.M.M Tizi-Ouzou
Mr MERADI Abdelhafid	MCA	Examineur	U.B.B Ain-Temouchent
Mme KANDOUCI Chahinaz	MCA	Examineur	U.D.L Sidi Bel Abbes
Mr BENDIMERAD Mohammed Yassine	MCA	Examineur	U.A.B.B Tlemcen
Mr BOUREGAA Mouweffeq	MCA	Invité	U.M.S Mascara

Année universitaire 2023 - 2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Je dédie cette thèse

À ma mère, la source de mon existence, l'incarnation de la compassion, celle qui a tout sacrifié pour ma prospérité et celle qui m'a encouragé dans tout ce que j'ai fait depuis ma naissance;

À mon père, qui m'a donné une éducation respectable et dont son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui, pour le goût à l'effort qu'il a suscité en moi, de par sa rigueur ;

À mon mari oussama, ma fille lylia, mes frères Amali, Rabie, Djamel, Belkacem et mes belles sœurs Samia et Asma, qui m'ont toujours soutenu et encouragé tout au long de ces années d'études, ainsi qu'à mes bien-aimés neveux Adam et Yanis ;

À toute ma famille et mes amis, sans exception, pour leur existence et leur soutien moral.

Remerciements

Louange à ALLAH, le créateur de l'univers, pour toute sa bonté, pour la science qu'il nous a enseignée, pour la fois qu'il sème dans nos cœurs, et pour sa miséricorde. Que les jours qui viennent soient des instants de succès, de bénédictions et d'amour.

Un grand merci au Dr Mohammed DEBBAL, mon directeur de thèse. Au cours des intenses et rationnelles discussions, j'apprécie sa gentillesse, sa disponibilité et sa patience, qui m'ont permis de mener à bien cette modeste tâche. J'apprécie sincèrement tout ce qu'il a fait pour moi, notamment son soutien moral et ses encouragements.

Je tiens également à exprimer ma gratitude au Dr Mohammed Chamse Eddine OUADAH pour avoir accepté de m'encadrer et pour son aide dans mes recherches.

Je remercie également le président Dr MOULESSEHOUL Wassila, et j'apprécie sa volonté de présider le jury afin d'évaluer ce modeste effort.

J'apprécie l'acceptation des membres du jury de prendre en considération cette thèse, notamment Dr Meradi Abdelhafid, Dr KANDOUCI Chahinaz et Dr BENDIMERAD Mohammed Yassine. Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à notre invité Dr BOUREGAA Mouweffeq, de nous avoir honorés de sa présence. Qu'il me soit permis de lui exprimer ma profonde gratitude.

Je tiens à exprimer ma gratitude à mes parents, mon mari, ma fille, mes frères et mes superbes belles sœurs, ma belle-famille pour toute leur aide. C'est sans aucun doute la famille la plus belle que je connaisse.

Enfin, je dois remercier mon mari Oussama d'avoir toujours cru en moi et d'être là pour me soutenir et m'encourager.

الملخص

تستكشف هذه الأطروحة تطبيقات الألياف البلورية الفوتونية في مجال الاتصالات البصرية، مع التركيز على تحسين التشتت اللوني للألياف البلورية الفوتونية من أجل تعزيز أدائها في نقل البيانات. وقد أجريت دراسة معمقة على المكونات البصرية المعتمدة على هذا النوع من الألياف، محققةً تقدماً كبيراً في تصميم أجهزة التجميع والتجزئة وكذلك مقسمات الطاقة. تُستخدم طريقة الحزم المنتشرة لنمذجة هذه الهياكل، مما يؤكد فعالية الحلول المقترحة. النتائج المتحصل عليها مدعومة بمحاكاة مفصلة وتحليلات دقيقة، مما يعزز مكانة هذه الألياف كحل واعد لشبكات الاتصالات البصرية الحديثة. وقد تم الاعتراف بمساهمات الأطروحة من خلال نشرها في مجلات علمية مرموقة وتقديمها في مؤتمرات وطنية ودولية. مستقبلاً، يوفر التحسين المستمر للهياكل الحالية وتصميم مكونات جديدة أكثر تعقيداً فرصاً مثيرة لتوسيع استخدام هذه الألياف في الأنظمة البصرية المتقدمة

الكلمات المفتاحية: الألياف البلورية الفوتونية، التشتت اللوني، المكونات البصرية، شبكات الاتصالات البصرية.

RÉSUMÉ

Cette thèse explore les applications des fibres à cristaux photoniques (FCP) dans les télécommunications optiques. L'accent est mis sur l'optimisation de la dispersion chromatique des Fibres a cristaux photonique pour améliorer leur performance dans la transmission de données. Une recherche approfondie est menée sur les composants optiques basés sur ce type de fibres, avec des avancées significatives dans la conception de multiplexeurs/démultiplexeurs et de diviseurs de puissance. La méthode des faisceaux propagé (BPM) est utilisée pour modéliser les structures, confirmant l'efficacité des solutions proposées. Les résultats obtenus sont soutenus par des simulations détaillées et des analyses rigoureuses, renforçant ainsi la position de ces fibres comme une solution prometteuse pour les réseaux de télécommunications optiques modernes. Les contributions de la thèse sont reconnues à travers des publications dans des revues réputées et des présentations lors de conférences nationales et internationales. En perspective, l'optimisation continue des structures existantes et la conception de nouveaux composants plus complexes offrent des opportunités passionnantes pour étendre l'utilisation de ces fibres dans les systèmes optiques avancés.

Mots clés : fibres à cristaux photoniques, dispersion chromatique, composants optiques, réseaux de télécommunications optiques.

ABSTRACT

This thesis explores the applications of photonic crystal fibers (PCFs) in optical telecommunications. The focus is on optimizing the chromatic dispersion of PCFs to enhance their performance in data transmission. Extensive research is conducted on optical components based on PCFs, with significant advancements in the design of multiplexers/demultiplexers and power splitters. The Beam Propagation Method (BPM) is employed to model the structures, confirming the effectiveness of the proposed solutions. The results are supported by detailed simulations and rigorous analyses, thus strengthening the position of PCFs as a promising solution for modern optical telecommunication networks. The contributions of the thesis are recognized through publications in reputable journals and presentations at national and international conferences. Looking ahead, ongoing optimization of existing structures and the design of new, more complex components offer exciting opportunities to expand the use of PCFs in advanced optical systems.

Keywords : Photonic crystal fibers, chromatic dispersion, optical components, optical telecommunication networks.

Table des matières

Dédicace.....	II
Remerciements	III
الملخص	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VI
Table des matières	VII
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XIII
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur les fibres optiques et les fibres à cristaux photoniques	6
I.1 Introduction	7
I.2 Description	7
I.3 Les différentes sortes des fibres optiques.....	8
I.3.1 La fibre multimode	8
I.3.2 La fibre monomode	9
I.3.3 Bilan général des différentes fibres	10
I.4 Les applications des fibres optiques.....	10
I.4.1 Utilisation de la fibre optique pour les réseaux informatiques.....	10
I.4.2 Utilisation de la fibre optique pour la diffusion	10
I.4.3 Utilisation de la fibre optique pour le médical	11
I.4.4 Utilisation de la fibre optique pour le militaire	11
I.5 Le principe de guidage	12
I.6 La fabrication de la fibre optique	12
I.6.1 La préforme	12
I.6.2 Le fibrage.....	12
I.6.3 Le polissage	13
I.7 Les avantages et les inconvénients de la fibre optique.....	13
I.7.1 Les avantages.....	13
I.7.2 Les inconvénients	13
I.8 Introduction sur les fibres à cristaux photoniques.....	14
I.9 Concept de fibres à cristaux photoniques.....	14
I.10 Mécanisme de guidage	15
I.10.1 Le guidage par réflexion totale interne modifié	15
I.10.2 Le guidage par effet de bandes interdites photoniques.....	16
I.11 Classification des fibres a cristaux photoniques	16
I.11.1 Les fibres à cœur plein	16
I.11.2 Les fibres à cœur creux.....	17
I.12 Caractéristiques optiques.....	18

I.12.1 La longueur d'onde de coupure	18
I.12.2 L'indice effective.....	18
I.12.3 La fréquence effective	19
I.12.4 La dispersion	20
I.12.5 L'atténuation.....	22
I.12.6 L'air effective	23
I.12.7 La biréfringence.....	23
I.13 Techniques de fabrication	25
I.14 Les applications des fibres à cristaux photoniques	26
I.15 Les avantages des fibres à cristaux photoniques	26
I.16 Les inconvénients des fibres à cristaux photoniques	27
I.17 Conclusion.....	27
Références	29
Chapitre 2 : Composants optiques à base de fibres à cristaux photoniques.....	34
II.1 Introduction aux composants optiques.....	35
II.1.1 Importance des composants optiques dans les systèmes de communication	35
II.1.2 Rôle des fibres à cristaux photoniques dans la conception de ces composants	35
II.2 Multiplexeur et Démultiplexeur à base de fibres à cristaux photoniques	36
II.2.1 Multiplexage en longueur d'onde (WDM) dans les réseaux optiques.....	36
II.2.2 Principes de fonctionnement des multiplexeurs à base de fibres à cristaux photoniques	37
II.2.3 Types de multiplexeurs	38
II.3 Diviseur de puissance à base de fibres à cristaux photoniques.....	40
II.3.1 Compréhension du concept de division de puissance dans les fibres optiques.....	40
II.3.2 Types des Diviseurs de puissance	41
II.3.3 Avantages et performances des diviseurs de puissance à base de fibres à cristaux photoniques par rapport aux techniques traditionnelles	43
II.4 Extracteur de signal à base de fibres à cristaux photoniques.....	44
II.4.1 Importance des multiplexeurs a insertion/extraction de signal dans les applications de traitement optique du signal	44
II.4.2 Principes de fonctionnement des multiplexeurs a insertion/extraction de signal à base de fibres à cristaux photoniques	44
II.4.3 Utilisation des extracteurs de signal pour l'amplification sélective et la détection de signaux optiques	45
II.5 Autres composants à base de fibres à cristaux photoniques	46
II.5.1 Filtres optiques à base de fibres à cristaux photoniques	46
II.5.2 Isolateurs optiques à base de fibres à cristaux photoniques	49
II.5.2.1 Le Principe des isolateurs optique.....	49
II.5.2.2 Application des isolateurs optique	50
II.6 Applications des composants à base de fibres à cristaux photoniques	52
II.7 Perspectives et défis futurs	55
II.8 Conclusion.....	56
Références	57

Chapitre 3 : État de l'art des techniques de modélisation des fibres à cristaux photoniques

61

III.1 Introduction	62
III.2 Modélisation analytique des fibres à cristaux photoniques	62
III.2.1 Résolution des équations de Maxwell pour les structures périodiques.....	62
III.2.2 Approximations et simplifications courantes	63
III.2.3 Analyse des modes de guidage et des propriétés optiques	64
III.3 Méthodes numériques pour la modélisation des fibres à cristaux photoniques	65
III.3.1 Méthode de la différence finie dans le domaine temporel (FDTD).....	65
III.3.2 Méthode des éléments finis (FEM) appliquée aux cristaux photoniques	66
III.3.3 Méthodes de différences finies vectorielles (VFDTD) pour les cristaux photoniques anisotropes	67
III.3.4 Méthode multipolaire (MM)	67
III.3.5 Méthode des faisceaux propagés (BPM)	68
III.3.6 Méthode des ondes planes « PWE »	69
III.3.7 Méthode de matrice de transfert (TMM)	69
III.4 Modélisation avancée des fibres à cristaux photoniques.....	70
III.4.1 Modélisation des défauts et des imperfections de structure.....	70
III.4.2 Modélisation des non-linéarités dans les cristaux photoniques	71
III.4.3 Modélisation des effets de couplage dans les guides d'ondes périodiques	72
III.5 Validation des modèles.....	73
III.6 Conclusion	75
Références	76
Chapitre 4 : Résultats et discussions	80
IV.1 Introduction	81
IV.2 Diagrammes des propriétés optiques pour applications aux télécommunications optiques.....	82
IV.2.1 L'indice effectif	82
IV.2.2 La dispersion chromatique.....	82
IV.3 Coupleur à base de FCP pour la séparation de longueurs d'onde.....	84
IV.4 Diviseur de puissance 1 x 2 basé sur les FCP	86
IV.5 Extracteur de longueurs d'ondes 1x3 basé sur les FCP.....	88
IV.6 Les multiplexeurs et démultiplexeurs à base de fibre à cristaux photoniques	90
IV.6.1 Multiplexeur 1 x 2	90
IV.6.2 Démultiplexeur 1 x 2	93
IV.6.3 Multiplexeur 1 x 4	97
IV.6.4 Démultiplexeur 1 x 4	100
IV.6.5 Multiplexeur 1 x 8	104
IV.7 Conclusion.....	107
Références	109
Conclusion générale et perspectives	110
Liste des travaux.....	113

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les fibres optiques et les fibres à cristaux photoniques

Figure I. 1: Schéma représentatif d'une fibre optique [22].	8
Figure I. 2: propagation de la lumière à travers plusieurs types de fibres [22].	9
Figure I. 3: Réflexion/réfraction [35].	12
Figure I. 4: Une fibre a cristaux photoniques.	15
Figure I. 5: Guidage par réflexion total interne modifiée.	16
Figure I. 6: Guidage par effet BIP, $N_1=1$ (air) et $N_2=1.45$ (silice).	16
Figure I. 7: Classification des fibres à cristaux photoniques suivant le principe de guidage [44].	17
Figure I. 8: L'indice effectif des deux méthodes BPM et MEF [54].	19
Figure I. 9: Comportement modal des FCPs en fonction de a/λ pour différents rapports d/Λ [44].	20
Figure I. 10: Un exemple d'une Courbe de dispersion chromatique.	21
Figure I. 11: Caractéristiques de perte optique du FCP à la perte la plus faible [65].	22
Figure I. 12: Aire effective calculée à la longueur d'onde $1.55 \mu\text{m}$ pour différents rapports d/Λ [44].	23
Figure I. 13: La biréfringence en fonction de la longueur d'onde pour des paramètres de conception optimaux [68].	24
Figure I. 14: Les techniques de fabrication [69].	25

Chapitre II : Composant optiques à base de fibres à cristaux photoniques

Figure II. 1 : Le principe du multiplexage en longueur d'onde [21].	36
Figure II. 2: Un exemple du fonctionnement des multiplexeurs à base de fibres à cristaux photoniques [24].	37
Figure II. 3: L'influence du réseau de Bragg sur le signal optique [26].	38
Figure II. 4: Un exemple d'un réseau de phase[28].	39
Figure II. 5: <i>Le fonctionnement d'un Mux a réseau de phase</i> [29].	40
Figure II. 6 : Exemple d'un diviseur optique.	41
Figure II. 7: Exemple d'un diviseur de puissance en Y [13].	41
Figure II. 8: Un exemple d'un diviseur de puissance en jonction T [33].	42
Figure II. 9: Un exemple d'un diviseur directionnel [35].	42
Figure II. 10 : Le principe du fonctionnement du OADM [25].	45
Figure II. 11: Un exemple d'un extracteur de signaux optique.	45
Figure II. 12: Principe d'un filtre a réseau de Bragg.	46
Figure II. 13: Un exemple d'un filtre passe-bas.	47
Figure II. 14: Un exemple d'un filtre passe-haut.	47
Figure II. 15: Un exemple d'un filtre dichroïque.	48
Figure II. 16: Un exemple d'un filtre passe bande.	48
Figure II. 17: Un exemple d'un filtre coupe bande.	49
Figure II. 18: Exemple d'un électron élastiquement lié.	49

Figure II. 19: Schéma du principe d'un isolateur [48].	50
Figure II. 20: Schéma représentatif d'un capteur.	51
Figure II. 21: Un amplificateur a fibre dopée.	51
Figure II. 22: Un amplificateur a effet Raman [53].	52
Figure II. 23: Un schéma de la technologie de fibre optique jusqu'au domicile (FTTH).	52

Chapitre III : État de l'art des techniques de modélisation des fibres à cristaux photoniques

Figure III-1 : La répartition du champ en utilisant la FDTD [26].	66
Figure III-2 : La répartition transverse du champ électrique dans une FCP avec les paramètres $d/\Lambda = 0.46$ et $\Lambda = 8\mu\text{m}$ [31].	66
Figure III-3: Mode fondamental par la méthode multipolaire [34].	68
Figure III-4: La répartition transverse du champ électrique dans une FCP avec la méthode BPM	68

Chapitre IV : Résultats et discussions

Figure IV. 1 : La comparaison d'indice effectif entre les deux méthodes.	82
Figure IV. 2 : L'emplacement des diamètres d_1, d_2, d_3, d_4 dans la structure.	83
Figure IV. 3: FCP avec quatre cercles de trous d'air qui guident l'index.	83
Figure IV. 4: La variation de la dispersion en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de d .	84
Figure IV. 5: Comparaison de dispersion chromatique entre les deux méthodes BPM et FEM.	84
Figure IV. 6: La structure en section transversale.	85
Figure IV. 7: Transfert de puissance entre cœurs, (a) : $\lambda=1.47\mu\text{m}$ et (b) : $\lambda=1.55\mu\text{m}$.	85
Figure IV. 8: Les résultats de la puissance normalisée par rapport à la distance pour la longueur d'onde $1.47\mu\text{m}$ et $1.55\mu\text{m}$.	86
Figure IV. 9: Le profil d'intensité en vue horizontal et verticale et la distribution du champ.	87
Figure IV. 10: La puissance d'entrée et des deux sorties du diviseur de puissance.	88
Figure IV. 11 : Le profil d'indice de diviseur en vue XY et XZ.	89
Figure IV. 12 : La distribution du champ au port de sortie pour (a): $\lambda=0.85\mu\text{m}$, (b): $\lambda=1.45\mu\text{m}$, (c): $\lambda=1.2\mu\text{m}$.	89
Figure IV. 13 : La puissance en fonction de la distance pour les trois ports de sortie.	90
Figure IV. 14 : Le profil d'indice selon la vue de face (a) et la vue de côté (b).	91
Figure IV. 15 : Le profil d'intensité des deux longueurs d'onde $1.46\mu\text{m}$ et $1.48\mu\text{m}$.	91
Figure IV. 16 : La distribution du champ d'entrée et de sortie pour les deux longueurs d'ondes $1.46\mu\text{m}$ et $1.48\mu\text{m}$.	92
Figure IV. 17 : La puissance d'entrée et de sortie en fonction de la distance pour les deux longueurs d'onde $1.48\mu\text{m}$ et $1.46\mu\text{m}$.	93
Figure IV. 18 : L'amplitude d'entrée et de sortie des deux longueurs d'onde 1.46 et $1.48\mu\text{m}$.	93

Figure IV. 19 : Le profil d'indice en vue XY à $z=0$ et 7.5mm et XZ.	94
Figure IV. 20 : Le profil d'intensité des deux longueurs d'onde 1.46 μm et 1.48 μm	95
Figure IV. 21 : La distribution du champ à l'entrée (a) et à la sortie (b-c).	95
Figure IV. 22 : La puissance en fonction de la distance pour les ports d'entrée et de sortie des deux longueurs d'onde.	96
Figure IV. 23 : L'amplitude d'entrée et de sortie des deux longueurs d'ondes.	96
Figure IV. 24 : Le profil d'indice de la structure en vue XY à $z=0$ et 6mm et XZ.....	97
Figure IV. 25 : La distribution du champ d'entrée (a-d) et de sortie (e-h) des 4 longueurs d'onde.	98
Figure IV. 26 : Le profil d'intensité des longueurs d'onde 0.85 (a), 1.1 (b), 1.19 (c) et 1.35 μm (d).	99
Figure IV. 27 : La puissance d'entrée et de sortie pour les 4 longueur d'ondes.	99
Figure IV. 28 : Profil d'indice de réfraction.....	100
Figure IV. 29 : La distribution du champ d'entrée (a) et de sortie (b-e) des 4 longueurs d'onde.	101
Figure IV. 30 : Le profil d'intensité des longueurs d'onde (a) : $\lambda=0.85\mu\text{m}$, (b) : $\lambda=1.1\mu\text{m}$, (c) : $\lambda=1.19\mu\text{m}$ et (d) : $\lambda=1.35 \mu\text{m}$	102
Figure IV. 31 : La puissance d'entrée et de sortie pour les 4 longueur d'ondes.	103
Figure IV. 32 : La répartition du champ d'entrée (a) et de sortie (b-f) des 4 longueurs d'ondes.	104
Figure IV. 33 : Profil d'indice selon l'axe XZ et XY à $z=0$ et à $z=6\text{mm}$	104
Figure IV. 34 : La distribution du champ d'entrée des huit longueurs d'onde.	105
Figure IV. 35 : La distribution du champ de sortie des huit longueurs d'onde.....	105
Figure IV. 36 : Le profil d'intensité des huit longueurs d'onde.....	106
Figure IV. 37 : La puissance d'entrée et de sortie pour les 8 longueurs d'ondes.....	107

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Généralités sur les fibres optiques et les fibres à cristaux photoniques

Tableau I-1: Bilan général sur les différentes fibres optique [27]..... 10

Chapitre 3 : État de l'art des techniques de modélisation des fibres à cristaux photoniques

Tableau III. 1:Avantages et inconvénients des différentes méthodes numériques..... 74

Tableau III. 2:Une comparaison des résultats de paramètres de dispersion et d'indice effectif entre la méthode des différence finis FEM [64] et la BPM [65]..... 75

Chapitre 4 : Résultats et discussions

Tableau IV. 1 : Les valeurs des diamètres de la figure IV.3. 82

Liste des acronymes

APVD	Advanced Plasma Vapor Deposition
AWG	Array Wave-Guide
BIP	Bande Interdite Photonique
BPM	Beam Prop Method
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
Demux	Demultiplexeur
EM	Electromagnetic
FCP	Fibre a Cristaux Photonique
FDTD	Finite Difference Time Domain
FMAS	Fibre microstructurées air/silice
FSM	Fundamental Space Filling Mode
FTTH	Fiber To The Home
MAN	Réseau metropolitain
MEB	Microscopie électronique à Balayage
MEF	Méthode des élément finis
MM	Multipolar Method Method
Mux	Multiplexeur
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer
PON	Passive Optical Network
PWE	Plane Wave Expansion
TMM	Transfert Matrix Method
V-FDTD	Vector Finite Difference Time Domain
WDM	Wavelength Division Multiplexing
ZDW	Zero Dispersion Wavelength

Introduction générale

La fibre optique est le canal de transmission recommandé pour les communications à haut débit. L'amélioration des propriétés des fibres optiques, en particulier celles associées à la dispersion chromatique est essentielle pour répondre aux demandes toujours croissantes.

La transmission de données à travers les fibres optiques revêt une importance capitale dans notre ère numérique. Les fibres optiques offrent une méthode de transmission de données rapide, fiable et sécurisée, essentielle pour soutenir la croissance exponentielle des réseaux de communication. Leur capacité à transmettre de grandes quantités d'informations sur de longues distances avec une faible atténuation et une grande immunité aux interférences électromagnétiques en fait un choix privilégié pour les réseaux de télécommunications, Internet, et même les réseaux locaux dans les entreprises. De plus, les fibres optiques jouent un rôle crucial dans le développement de technologies de pointe telles que la télémédecine, la réalité virtuelle, les villes intelligentes et les réseaux de capteurs. Leur utilisation favorise également des économies d'énergie significatives par rapport aux systèmes de transmission traditionnels, contribuant ainsi à réduire l'empreinte environnementale des infrastructures de communication. En somme, les fibres optiques représentent une infrastructure essentielle pour la transmission rapide, efficace et durable des données, soutenant ainsi notre société numérique en constante évolution.

Une nouvelle génération de fibres optiques appelées fibres à cristaux photoniques (FCP) a fait ses débuts dans les années 1990, elle est composée d'une matrice de silice avec de nombreux trous d'air avec des propriétés singulières, inaccessibles aux fibres conventionnelles. Elle se décline ainsi en deux classes. La première classe de type Réflexion totale interne modifiée (RTIM), et la deuxième de type Bande interdite photonique (BIP).

En 1996, le groupe Knight et Russell a réalisé la première expérimentation d'une fibre à cristal photonique dotée d'un cœur en silice encerclé de trous d'air. Depuis cette avancée, ces fibres ont attiré une attention particulière en raison de leurs propriétés optiques hors du commun, qui dépassent celles des fibres optiques traditionnelles. Grâce à leurs bandes de transmission exceptionnellement larges, pouvant s'étendre jusqu'à une octave, à leurs faibles pertes de transmission et à leur faible couplage optique entre le mode de cœur et la gaine en silice, ces fibres présentent des performances de transmission remarquables. Leurs structures flexibles les distinguent également des fibres conventionnelles. Contrairement aux fibres traditionnelles, il est possible de modifier les propriétés optiques géométriques des profils de réfraction pour adapter les caractéristiques de propagation des fibres selon les besoins spécifiques des

applications. Les fibres à cristal photonique permettent notamment de choisir un cœur à trous d'air et de concentrer la lumière dans un cœur à faible indice, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités en matière de conception optique.

Les fibres optiques conventionnelles sont limitées par l'incapacité d'atteindre un régime monomode à large bande, ce qui signifie que la dispersion chromatique ne pouvait être annulée qu'à des longueurs d'onde spécifiques, tandis que l'atténuation était maintenue à environ 0.2 dB/km dans la troisième fenêtre. C'est pourquoi les composants optiques basés sur les fibres à cristaux photoniques ont été développés pour résoudre ces problèmes. Ces fibres offrent la possibilité d'atteindre un régime monomode à large bande, d'éliminer la dispersion à des longueurs d'onde précises voire sur toute la plage de longueurs d'onde, de décaler le point de zéro-dispersion et de réduire l'atténuation. Elles permettent également d'adapter leurs caractéristiques de propagation en ajustant les paramètres opto-géométriques de leur profil. Contrairement aux fibres standard, les fibres à cristaux photoniques peuvent supporter des densités de puissance très élevées dans leur cœur sans subir de dommages, ce qui en fait des candidates plus performantes que les fibres optiques classiques.

Les recherches menées dans le cadre de cette thèse ont apporté des contributions significatives et innovantes dans le domaine des fibres à cristaux photoniques (FCP), en mettant en lumière leurs applications potentielles et en proposant des solutions pour surmonter les limitations des composants optiques existants.

Une de nos contributions majeures réside dans l'amélioration des paramètres optiques des FCP, notamment en ce qui concerne la dispersion chromatique. En mettant au point des techniques novatrices, nous avons pu optimiser ces paramètres, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités pour l'utilisation des FCP dans diverses applications.

Par ailleurs, nos travaux ont été axés sur l'évaluation et le développement de nouveaux composants optiques basés sur les FCP, avec un accent particulier sur leur utilisation dans les télécommunications optiques. Nous avons développé des multiplexeurs/démultiplexeurs FCP avancés, offrant des performances améliorées en termes de combinaison et de séparation des longueurs d'onde, ainsi que des diviseurs de puissance et des extracteurs optimisés pour assurer une transmission maximale de la lumière tout en minimisant les pertes de puissance.

Ces contributions ont été étayées par des analyses approfondies et des simulations détaillées, confirmant l'efficacité et la fiabilité des solutions proposées. En valorisant ces avancées, notre

recherche ouvre de nouvelles perspectives et renforce la position des FCP en tant que solution prometteuse pour les défis actuels et futurs dans le domaine des communications optiques.

La thèse s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre de cette thèse examine les caractéristiques optiques des fibres classiques appelées conventionnelles, ainsi que celles des FCP aux caractéristiques novatrices. L'objectif est de présenter aux lecteurs une vision globale des normes concernant les fibres optiques classique et a base des cristaux photoniques, incluant leurs applications, les différentes catégories, les méthodes de fabrication et les principes de transmission, tout en répertoriant les avantages et les inconvénients, ainsi qu'une évaluation globale des différentes fibres disponibles.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les composants optiques, leurs principes et leurs utilisations dans des systèmes de communication à haut débit et à grande échelle, en soulignant les avantages qu'ils offrent par rapport aux composants électriques, ainsi que le potentiel d'utilisation des FCP dans le développement de ces composants tel que les diviseurs de puissance, les multiplexeurs, les démultiplexeurs. etc.

Le troisième chapitre abordera diverses méthodes de modélisation, en mettant l'accent sur la méthode des faisceaux propagés (BPM) que nous avons employée pour évaluer les caractéristiques optiques du FCP. La modélisation des défauts et des effets de couplage, ainsi que la répartition du champ électromagnétique du mode électromagnétique fondamental selon différentes approches méthodologiques ont été abordée. Nous avons prouvé que, peu importe la complexité de la structure, l'approche de modélisation BPM reste une méthode solide et extrêmement précise pour simuler les différentes caractéristiques de guidage du FCP.

Le chapitre quatre détaille les résultats de simulations obtenus à travers la méthode BPM (Beam Propagation Method), permettant de prédire les caractéristiques des fibres à cristaux photoniques (FCP) en fonction des paramètres géométriques. Une attention particulière est accordée à ces paramètres en fonction des applications envisagées. Pour introduire cette section, une comparaison détaillée est réalisée entre les indices de réfraction obtenus à l'aide de notre méthode de propagation (BPM) et ceux obtenus par la méthode des éléments finis. Cette analyse met en lumière la validité et la pertinence de notre approche, représentant ainsi une contribution significative.

Enfin, le chapitre se conclut en mettant en avant notre contribution novatrice dans la conception et l'optimisation des FCP pour des applications spécifiques. Ces contributions incluent des

techniques avancées pour réaliser des coupleurs, des diviseurs de puissance, des extracteurs de longueurs d'ondes, ainsi que des multiplexeurs et démultiplexeurs adaptés aux exigences des réseaux de télécommunications optiques modernes. Les résultats obtenus et les analyses détaillées qui les accompagnent renforcent la position des FCP comme une solution prometteuse et viable pour répondre aux défis complexes des communications optiques actuelles et futures.

***Chapitre 1 : Généralités sur les
fibres optiques et les fibres à
cristaux photoniques***

I.1 Introduction

En raison du besoin de systèmes communicatifs optiques de haute qualité dépassant les bandes passantes disponibles de 100 Go/s, et vu que la création et le développement de ces systèmes est désespérée sans les dispositifs tout-optiques ultra-rapides, la fibre optique a été créée et développée pour conduire aux meilleurs résultats et aux performances les plus élevées [1].

Le principe des fibres optiques remonte au début du XXe siècle, mais ce n'est qu'en 1970 que les laboratoires de la Corning Glass Works (aujourd'hui Corning Incorporated) aux États-Unis ont développé des fibres optiques pouvant être utilisées dans les télécommunications [2].

Avec l'avènement de la fibre optique, Le secteur des télécoms a vu une croissance à un rythme incroyable. La découverte du maser en 1962 [3], et des lasers ultérieurs a grandement facilité l'évolution des technologies à base de la fibre optique [4]. A l'origine avec une atténuation de l'ordre de 100 dB/km , la fibre standard d'aujourd'hui appelée "Fibre Monomode SMF 28" a une atténuation inférieure à 0,2 dB/km [5]. La fibre optique joue un rôle de plus en plus important dans les systèmes de communication optique [6]. Il sert de référence et de point de départ pour le développement de plusieurs composants optiques, notamment des filtres [7], des réseaux de Bragg [8], des amplificateurs à fibre dopée à l'erbium [9], et des coupleurs [10], des multiplexeurs et démultiplexeurs [11-14], des diviseurs de puissance [15, 16], des extracteurs de signaux [17]. L'objectif de ce chapitre consiste à offrir aux lecteurs une vue d'ensemble des normes relatives aux fibres optiques, englobant leurs applications, les diverses catégories, les méthodes de production, les principes de transmission, tout en répertoriant les avantages et inconvénients, avec une évaluation globale des différentes fibres disponibles.

I.2 Description

Les fibres optiques sont des brins de verre très fins, environ un dixième de la taille d'un cheveu humain, son diamètre varie entre 50 et 100 micromètres. Ils sont employés pour le transfert de données numériques et ont la capacité de conduire la lumière et l'investigation visuelle dans les milieux médicaux. On distingue plus d'avantages en utilisant la fibre optique qu'on utilisant des réseaux câblés traditionnels, tels que l'atténuation des interférences électromagnétiques [18], des taux de transfert de données sensiblement plus rapides [19], et des bandes passantes beaucoup plus élevées qui permettent le transfert de fichiers volumineux [20]. La réfraction de la lumière sert de base au fonctionnement des fibres optiques. Il se déplace en zigzag à travers le cœur de la fibre sous l'indice n_c . En raison de son faible indice de réfraction, la gaine qui

entoure le cœur joue le rôle de faciliter la transmission du signal n_g . Par conséquent, nous avons besoin d'une source lumineuse, d'un laser ou d'une diode électroluminescente [21].

Pour le soin et la conservation, les fils de verre sont recouverts de plusieurs épaisseurs. Le cœur ou l'âme est situé au centre de la fibre. En conséquence, le signal peut être transporté d'un endroit à un autre jusqu'au récepteur. Les deux premières parties de la fibre optique, le cœur et la gaine optique, sont blindées par une gaine protectrice qui protège contre les chocs violents et la flexion. Son épaisseur varie entre 250 et 900 microns selon le type de fibre. Pour renforcer le fil, il existe des fibres de renfort pour écraser l'installation, la sur-tendre et protection contre les souris. Plusieurs formes de fibres de renforcement, telles que le gel ou le Kevlar, sont disponibles. Une coque finale entièrement opaque et réfractant la lumière recouvre ces quatre composants. La figure (I.1) montre les parties d'une fibre optique typique.

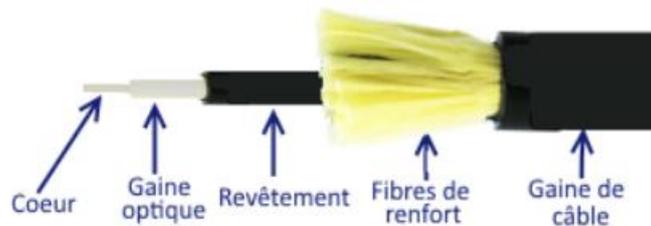


Figure I. 1: Schéma représentatif d'une fibre optique [22].

I.3 Les différentes sortes des fibres optiques

Il existe deux catégories distinctes de fibres optiques :

I.3.1 La fibre multimode

Dans un premier temps, la fibre était multimode, son application est simple mais contrainte par la bande passante, intéressante pour les courtes distances inférieures à 5 km, elle a un grand diamètre du cœur et peut laisser passer plusieurs ondes lumineuses en même temps [23]. Il existe quatre types de fibre multimode :

OM1 a une bande passante de 200 MHz/km et un cœur de 62.5 μm .

OM2 a une bande passante de 500 MHz/km et une taille du cœur plus petite de 50 μm .

OM3 a un cœur de 50 μm et une bande passante de 2000 MHz/km.

OM4 fournit jusqu'à 4700 MHz/km.

OM5 fournit jusqu'à 28000 MHz/km.

Deux familles de fibres distinctes se sont développées à partir de ce groupe de fibres :

I.3.1.1 Fibres à saut d'indice

Les fibres à saut d'indice ont un diamètre de cœur plus important (entre 50 et 85 μm). Les lois de l'optique géométrique régissent le trajet de la lumière, où les rayons sont totalement réfléchis à l'interface cœur-gaine. Elle est efficace à courte portée [24].

I.3.1.2 Fibres à gradient d'indice

Fibres à gradient d'indice, dont le diamètre de cœur varie de 50 à 62,5 μm . Entre le cœur et l'interface de la gaine, l'indice de réfraction diminue régulièrement. La propagation dans ce cas est sinusoidale, Elle est utilisée pour des lignes téléphoniques de moyenne portée [25].

I.3.2 La fibre monomode

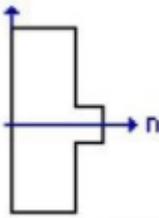
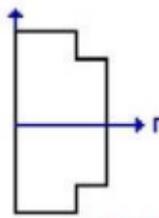
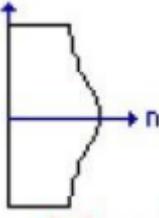
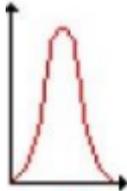
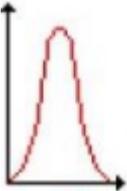
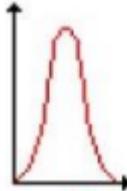
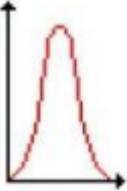
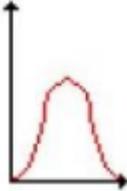
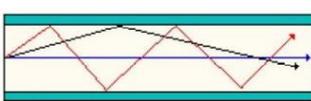
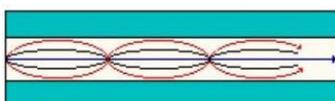
Fibre monomode	Fibre multimode a saut d'indice	Fibre multimode a gradient d'indice
		
		
		
		

Figure I. 2: propagation de la lumière à travers plusieurs types de fibres [22].

Elle n'a qu'un seul mode de propagation (une seule longueur dans le cœur de la fibre), de ce fait, il n'y a pas d'interférence ni de chevauchement entre les différentes longueurs d'onde, contrairement aux fibres multimodes. La fibre monomode a une bande passante quasi infinie, elle est utilisée pour les longues distances.

Les fibres monomodes sont classées via le diamètre de la fibre. Il n'y a que deux types de monomode, OS1 et OS2. Leur écoulement est libre et leur diamètre est d'environ 9 microns [26].

La figure I.2 nous montre les différents types des fibres avec leurs indices de réfraction et signal d'entrée et de sortie ainsi que le mode de propagation.

I.3.3 Bilan général des différentes fibres

Des capacités et des attributs variables reflètent des structures de fibre distinctes. Les avantages et les inconvénients de chaque structure sont brièvement résumés dans le tableau (I.1) ci-dessous.

Tableau I-1: Bilan général sur les différentes fibres optique [27].

Structures	Aspects positifs	Aspects négatifs
Multimode a saut d'indice	-bas prix -facilité d'exécution	-perte de signal et distorsion notable
Multimode a gradient d'indice	-bande passante acceptable -une remarquable qualité de transmission	-difficulté de mise en œuvre
Monomode	-une bande passante importante -pas de distorsion	-très couteuse

I.4 Les applications des fibres optiques

Les fibres optiques sont utilisées dans l'industrie des télécommunications pour transférer des données et des informations, notamment des appels téléphoniques, des images et d'autres supports visuels. C'est peut-être l'une des utilisations les plus importantes et les plus prometteuses de la technologie de la fibre optique [28]. On distingue des utilisations de la fibre dans plusieurs domaines tel que :

I.4.1 Utilisation de la fibre optique pour les réseaux informatiques

On peut facilement obtenir des informations sur Internet grâce à cette technologie. Le phénomène du « cloud computing » a également été rendu possible par l'expansion rapide d'internet. Le transfert de données en temps réel est désormais possible [29].

I.4.2 Utilisation de la fibre optique pour la diffusion

La radio et la télévision ont commencé à émettre au début du XXe siècle. C'était un concept facile. Il transmet les données d'un émetteur à plusieurs antennes en utilisant des ondes électromagnétiques qui existent déjà dans l'air. Bien qu'encore en usage, les réseaux de câbles

à fibres optiques se substituent progressivement à cette technologie. Les fournisseurs de télévision par câble se sont préparés à cette transition dans les années 1950 en utilisant le câble coaxial, qui est en cuivre conventionnel enveloppé dans une gaine métallique blindée pour éviter les interférences de diaphonie. Après cela, de plus, ils ont pris la décision de déplacer la transmission de l'analogique au numérique [30]. Heureusement, une solution qui a rendu tout cela possible avait déjà été découverte par des scientifiques. Un seul câble à fibre optique capable de transporter la lumière et les données pour des centaines de stations de télévision a été présenté pour la première fois par Charles Cao et son collaborateur George Hockham en 1966 [31].

I.4.3 Utilisation de la fibre optique pour le médical

Les autres applications de la fibre optique incluent la possibilité de voir les patients sans intervention chirurgicale, qui existe depuis 50 ans. De nos jours, les gastroscopes sont plus indispensables que jamais, mais la fibre optique peut avoir de nouvelles applications. En particulier, on envisage de nouvelles méthodes de diagnostic médical et de numérisation. L'insertion de câbles à fibres optiques extrêmement fins avec des capteurs dans le corps du patient est l'une des percées les plus récentes rendues possibles par la fibre optique.

Ces fibres ressemblent aux fibres trouvées dans les fils téléphoniques. Le corps du patient subit divers changements physiques lorsque la lumière traverse la fibre. Tant que la lumière est présente, les instruments réglés à l'autre extrémité de la fibre peuvent surveiller des parties importantes de la réaction physiologique d'un patient en fonction de la quantité de lumière transmise (en utilisant des méthodes comme l'interférométrie), et garder une trace d'informations telles que la température, la fréquence cardiaque et le pH cellulaire. ou la consommation de drogue étant détectée dans le sang [32]

I.4.4 Utilisation de la fibre optique pour le militaire

Il est simple de concevoir que les internautes sont connectés par d'énormes câbles à fibres optiques. Il n'est pas si évident que la puissance militaire soit liée de la même manière. Les câbles à fibre optique sont peu coûteux, légers, fins, durables et extrêmement sécurisés. C'est une approche fantastique pour relier les installations militaires avec d'autres installations, comme les bases de lancement de missiles, stations radars, etc. Il n'y a pas de rayonnement électromagnétique que les adversaires puissent détecter car ils ne véhiculent pas de signaux électriques. Ils sont également très résistants aux interférences électromagnétiques, ce qui les rend insensibles aux perturbations de leurs adversaires [33].

I.5 Le principe de guidage

Le principe physique le plus important qui a influencé la technologie de la fibre optique est la "réflexion interne totale". Cela est dû à la loi de réfraction, qui stipule que les ondes traversant la frontière entre deux milieux de densités différentes sont déviées. Cependant, Il y a un angle minimal entre la direction de l'onde et la normale à la frontière auquel l'onde ne sera pas déviée, mais elle devient sensible lorsqu'elle essaie de se déplacer d'un milieu de densité relativement élevée à un milieu de faible densité. Ainsi les ondes lumineuses peuvent se propager à l'infini à l'intérieur d'un cylindre de verre [34]. La figure I.3 montre le principe de guidage.

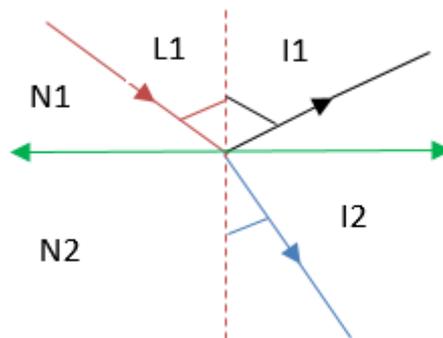


Figure I. 3: Réflexion/réfraction [35].

I.6 La fabrication de la fibre optique

Une fibre optique est créée en trois étapes :

I.6.1 La préforme

La fabrication de fibres optiques implique la production de préformes cylindriques en barreau de silice. La silice est un composé de silicium, qui contient de l'oxygène et à la formule chimique SiO_2 ; on le trouve dans divers minéraux tel que l'opale, le quartz et la calcédoine. Les fibres sont par la suite étirées de ce barreau. Le cœur représente le centre de la fibre. Plus en détail, Alcatel souhaitait remplacer le processus de « sleeve » [36] via son précédent « Advanced Plasma » [37], and « Vapor Deposition » [38] (APVD). En résumé, la technologie consiste à utiliser une torche à plasma à induction afin de faire fondre du quartz naturel incroyablement pur sur une préforme primaire [39].

I.6.2 Le fibrage

Le procédé consiste à transformer la préforme en une fibre optique. Une silice de faible qualité qui forme la gaine optique entoure le cœur. Pour créer une différence d'indice de réfraction

entre le cœur et le gaine, du germanium et du phosphore sont introduits comme dopants. De ce fait, ils rendent l'indice de la gaine moins élevé tout en rendant l'indice de noyau ou bordure plus élevé. A titre d'illustration, considérons une préforme en verre d'un diamètre de 10 cm et d'une longueur de 1 m. Cela permet de créer une fibre monomode d'une longueur d'environ 150 kilomètres par un étirement [40].

I.6.3 Le polissage

Pour obtenir des faces d'entrée et de sortie parfaitement planes, certains procédés de fabrication de fibres optiques nécessitent une étape de polissage. Le but de cette étape est d'éviter les réflexions indésirables ce qui se traduit par une baisse de la qualité de la fibre optique. Une fois la production terminée, des tests seront effectués tel que la conductivité pour le cas des fibres sous-marines, et des test de débit, dispersion, atténuation, indice de réfraction...etc [41].

I.7 Les avantages et les inconvénients de la fibre optique

I.7.1 Les avantages

La fibre optique présente de nombreux avantages par rapport aux réseaux ADSL ou cuivre. Une bande passante élevée et une haute vitesse en même temps. Le nombre d'informations envoyées par unité de câble a fibre optique est le meilleur avantage. Comme cela peut paraître, ce n'est pas cher vu que des kilomètres de câble peuvent être moins chers que des longueurs équivalentes en fil de cuivre. Le signal est également mieux retenu (moins de dégradation). Elle offre un meilleur ajustement vu qu'elle est légères et minces. Elle vit également environ 100 ans de plus et elle présente une capacité de charge plus élevé. En conclusion, l'utilisation de la fibre optique est révolutionnaire à l'ère numérique puisqu'elle offre une bande passante illimitée. Des débits de transmission 100 fois plus rapides que l'ADSL le rend indispensable, notamment pour les entreprises professionnelles proposant des services de visioconférence et de téléphonie, etc. [42].

I.7.2 Les inconvénients

Par rapport au fil de cuivre, la fibre optique nécessite un blindage supplémentaire entourant le câble.

Les câbles sont peu coûteux à fabriquer et durables, mais coûteux à installer.

Le verre foncé perd sa couleur plus facilement lorsqu'il est exposé aux radiations nucléaires.

Les brins de fibre de verre se cassent facilement.

Les deux point émetteur et récepteur doivent être proche. Sinon, vous devrez utiliser un répéteur.

Il existe de nombreux types de connecteurs ce qui implique qu'ils ne sont pas normalisés.

Les oiseaux aiment picorer les coquilles de Kevlar pour la construction du nid

Les requins sont connus pour endommager les câbles à fibre optique [43].

I.8 Introduction sur les fibres à cristaux photoniques

Une nouvelle génération de fibres optiques appelées fibres à cristaux photoniques (FCP) a fait ses débuts dans les années 1990 et est composée d'une matrice de silice avec de nombreux trous d'air [44].

La création d'une fibre optique à bande interdite photonique (BIP) basée sur une répartition uniforme des trous d'air au sein de la structure de la fibre, est l'idée de P. St. J. Russell, professeur à l'Université de Bath (Royaume-Uni). Cependant, dans ces premières fibres, nous avons observé que contrairement aux fibres optiques typiques, le processus de guidage ne dépendait pas de l'effet BIP mais plutôt d'un simple contraste d'indice de réfraction [45]. Ainsi, la première réalisation expérimentale d'une fibre à cristal photonique avec un cœur en silice entouré de trous d'air d'un diamètre de $0,6 \mu\text{m}$ espacés d'environ $2,3 \mu\text{m}$ a été faite dans le groupe Knight et Russell en 1996 [46]. Depuis, ces fibres ont été discutées avec une attention particulière et cela est dû aux propriétés optiques que les fibres standard ne peuvent pas atteindre.

Dans cette section, il sera d'abord nécessaire de fournir quelques concepts fondamentaux concernant les FCP. Cela permet d'identifier l'environnement dans lequel se déroulent les recherches développées dans ce travail. Ils seront ensuite classés et leurs caractéristiques optiques, telles que l'indice et la fréquence effectifs, la longueur de couplage, la biréfringence, la dispersion chromatique, l'air effectif et l'atténuation, seront discutés. Nous nous concentrerons ensuite sur leurs fabrications avant de passer à leurs applications et avantages.

I.9 Concept de fibres à cristaux photoniques

Une nouvelle famille de guides d'ondes optiques avec de nouvelles propriétés optiques est appelée fibres à cristaux photoniques (FCP). Ils nous permettent d'amplifier de manière significative les effets de non-linéarité en utilisant beaucoup de paramètres de dispersion. De ce fait, en conséquence, ces fibres suscitent un intérêt croissant, notamment dans l'industrie des télécommunications [22].

La lumière se propage à travers une gaine photonique formé de trous d'air dans la silice. Elle a un indice de réfraction moyen inférieur à celui d'un noyau de silice pure. Ce principe de

propagation est basé sur l'utilisation du guidage par l'indice de réfraction, un peu comme la fibre optique standards, mais il est souvent appelé réflexion interne totale modifiée car il confère de nouvelles propriétés aux modes guidés. Dans ce cas, le terme "fibre à cristal photonique" (FCP) est généralement remplacé par le terme plus général "fibre microstructurée air/silice" (FMAS) ou "fibre trouée" [47]

En éliminant les trous (défauts retenus) dans la gaine, qui dans ce type de fibre est une grille de canaux d'air parallèles à l'axe optique, le noyau solide de la fibre est créé. Les fibres microstructurées présentent un troisième axe de propagation de la lumière cohérent et une structure géométrique périodique en deux dimensions (axe z). Ils sont généralement construits en silice et ont des canaux d'air sur toute la longueur de la fibre, les propriétés distinctives de ces canaux sont leur pas Λ (entraxe entre canaux) et leur diamètre de canal d [48].

La figure (I.4) nous montre les sections transversales d'une fibre à cristaux photoniques.

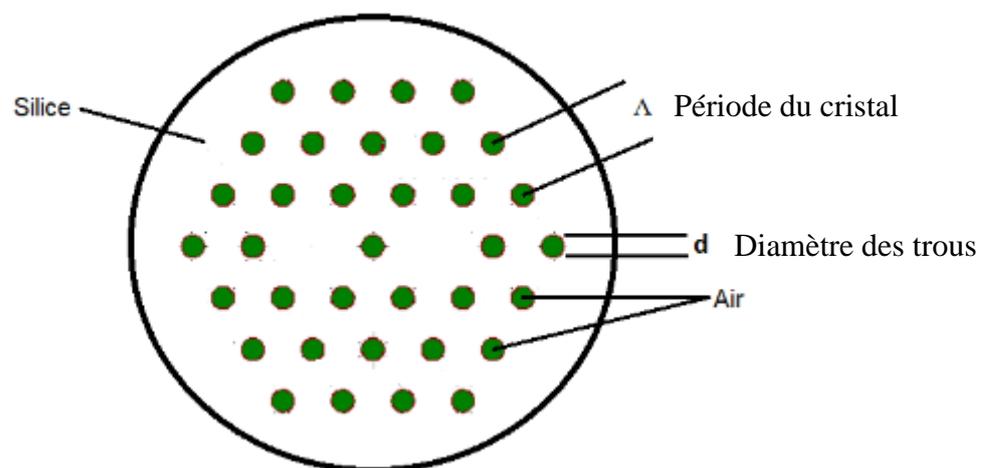


Figure I. 4: Une fibre a cristaux photoniques.

I.10 Mécanisme de guidage

I.10.1 Le guidage par réflexion totale interne modifié

La propagation totale de la réflexion interne modifié (RTIM) se produit lorsque l'indice de réfraction du cœur est supérieur à celui de la gaine, comme son nom l'indique. C'est ainsi que fonctionnent les fibres optiques standards [49].

La figure I.5 montre le guidage par réflexion totale interne modifié.

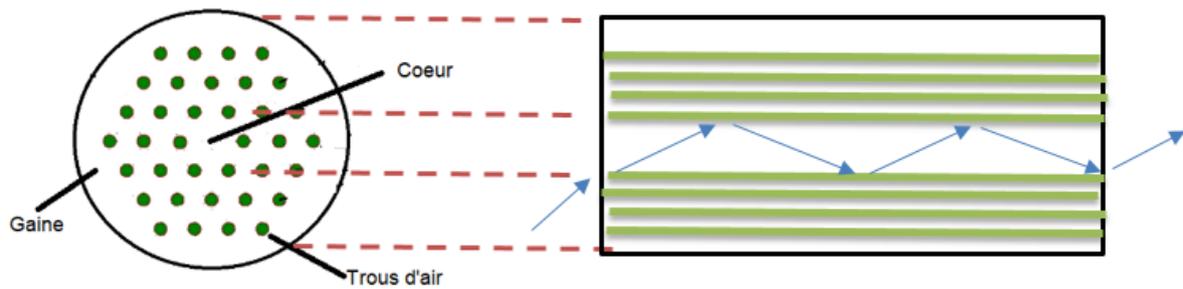


Figure I. 5: Guidage par réflexion total interne modifiée.

I.10.2 Le guidage par effet de bandes interdites photoniques

La présence de BIP et la création de modes de défaut guident la lumière dans cette bande. Le cœur fonctionne comme un miroir de Bragg en raison de la structure périodique des trous percés autour de lui. Ce type de fibre a l'avantage du guidage de la lumière qui peut être à travers un noyau à faible indice de réfraction, tel que l'air ou le vide. Néanmoins, cette fibre ne permet le guidage que dans une bande spectrale limitée. Ce guidage est démontré dans la figure I.6.

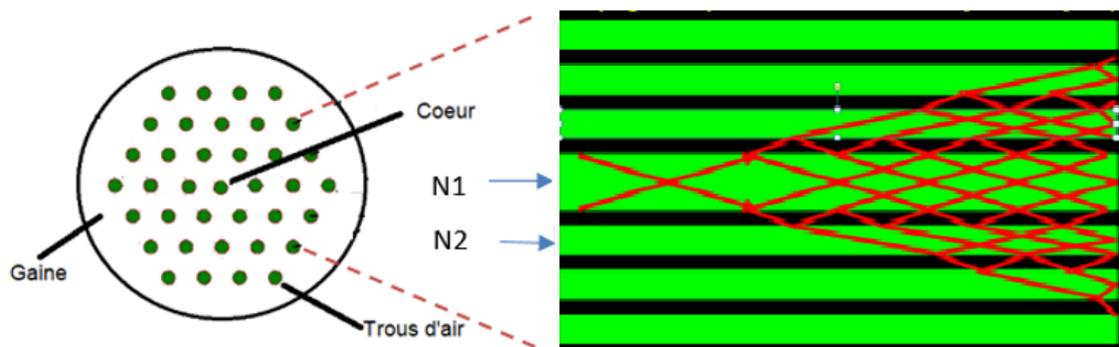


Figure I. 6: Guidage par effet BIP, $N1=1$ (air) et $N2=1.45$ (silice).

I.11 Classification des fibres a cristaux photoniques

La lumière peut être dirigée de deux manières en fonction d'une version particulière du FCP, selon que l'indice de réflexion du cœur est supérieur ou inférieur à celui de la gaine.

I.11.1 Les fibres à cœur plein

Elles portent encore les noms de "fibres microstructurées" ou "fibres trouées" et ressemblent aux fibres d'indice courantes utilisées dans les télécommunications. Elles présentent cependant un contraste latéral considérable, ce qui le distingue des fibres typiques. En fait, l'indice de

réfraction effectif de gaine diffère grandement en fonction de la longueur d'onde, produisant des propriétés spectrales étranges [50].

Les fibres à guidage dans un milieu à haut indice (fibres microstructurées à cœur solide) comprennent "les fibres infiniment monomode " avec des cœurs larges et des modes diffus forts, "les fibres a grande ouverture numérique " et "les fibres avec une forte non-linéarité " avec un très petit noyau et supportent des densités de puissance élevées au niveau du cœur [51].

I.11.2 Les fibres à cœur creux

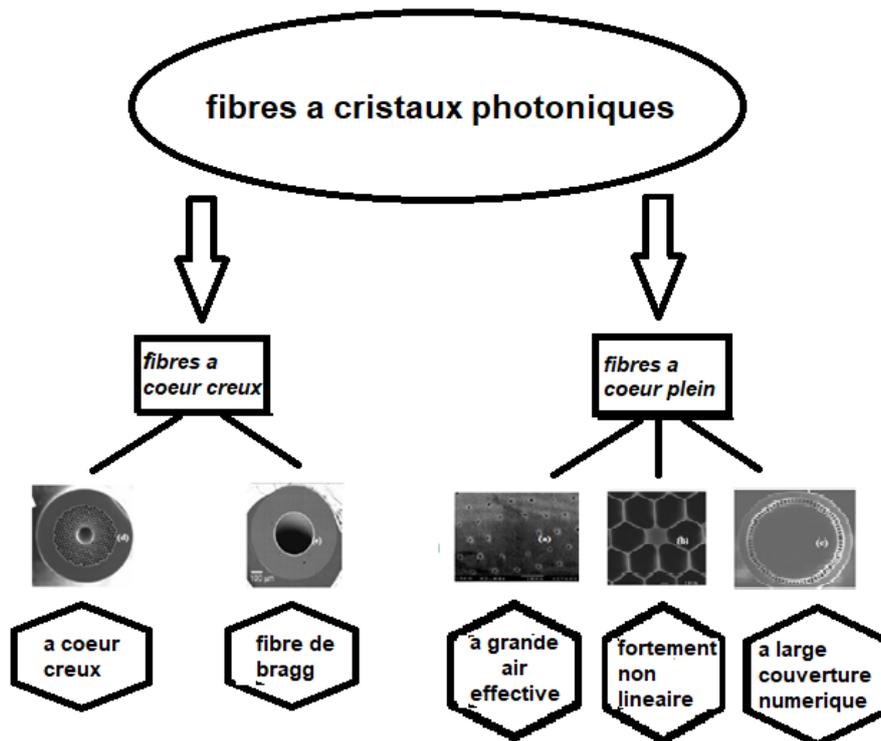


Figure I. 7: Classification des fibres à cristaux photoniques suivant le principe de guidage [44].

Aussi appelées "fibres creuses", Ils tentent la tâche difficile d'éclairer un cœur avec un indice de réfraction inférieur à celui de la gaine. La longueur de ces fibres est divisée en canaux d'air réguliers positionnés au microscope. Un cœur contenant de l'air ou un autre gaz convenant à la silice. La lumière peut être guidée par l'action du BIP [52].

Lors du guidage de fibres dans des milieux à faible indice de réfraction (fibres microstructurées à cœur creux), une distinction générale est faite entre les fibres dites « de Bragg » et « à cœur creux », constituées de couches concentriques d'indices de réfraction différents. Où la lumière

est guidée dans l'air [53]. La figure I.7 nous montre la division des fibres à cristaux photoniques en catégories basées sur le principe de guidage.

I.12 Caractéristiques optiques

I.12.1 La longueur d'onde de coupure

Il est crucial de garder à l'esprit la condition, ou longueur de l'onde (appelée aussi longueur de l'onde de coupure λ_c en dessous de laquelle le guide devient multimode), qui établit quand le premier mode d'ordre supérieur pour un certain guide apparaîtra.

On peut rapporter la longueur d'onde de coupure λ_c à la valeur $V = 2,405$ qui détermine le passage du régime monomode au régime multimode :

$$\lambda_c = \frac{2\pi \cdot a \cdot ON}{2.405} \quad \text{I.1}$$

Ou a est le rayon du cœur et ON décrit l'ouverture numérique qui est égale à :

$$ON = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad \text{I.2}$$

I.12.2 L'indice effective

La condition physique qui doit être vérifiée pour que la lumière soit dirigée par des réflexions entières est que la constante de propagation β soit constituée entre kn_{silice} et β_{fms} .

$$\beta_{fms} < \beta < kn_{silice} \quad \text{I.3}$$

Pour le mode de gaine de la fibre négligeable qui correspond au mode fondamental qui se propagerait dans un milieu hétérogène, identique à la gaine d'extension infinie, β_{fms} est la constante de propagation, tandis que kn_{silice} est la constante de propagation maximale pour le mode dans la région du cœur composé de silice. L'indice de réfraction équivalent de la gaine d'une fibre microstructurée peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$n_{fsm} = \frac{\beta_{fsm}}{k} \quad \text{I.4}$$

La structure des fibres microstructurées est plus complexe, et définir l'indice de réfraction de la gaine n'est pas si simple car la gaine optique est un milieu hétérogène constitué de canaux d'air au sein d'une matrice de silice. On définit alors un indice de gain effectif anciennement connu sous le nom de n_{fsm} (FSM pour "Fundamental Space Filling Mode"). Dans une microstructure de la gaine optique de dimension infinie en l'absence de défauts, il est 0 égal à l'indice effectif

du mode fondamental. C'est le mode avec le maximum d'énergie localisé dans la silice pure. La constante de propagation de ce mode est donc là plus élevée de toutes les constantes de propagation associées aux modes pouvant se propager dans cette gaine infinie et sans défauts.

$$n_{fsm} = \frac{\iint n^2 |E|^2 ds}{\iint |E|^2 ds} - \frac{\iint \left| \frac{E}{dr} \right|^2 ds}{k_0^2 \iint |E|^2 ds} \quad \text{I.5}$$

La figure I.8 montre l'indice effectif tracé par deux méthodes différentes qui sont la BPM (beamprop) et MEF (la méthode des élément finis).

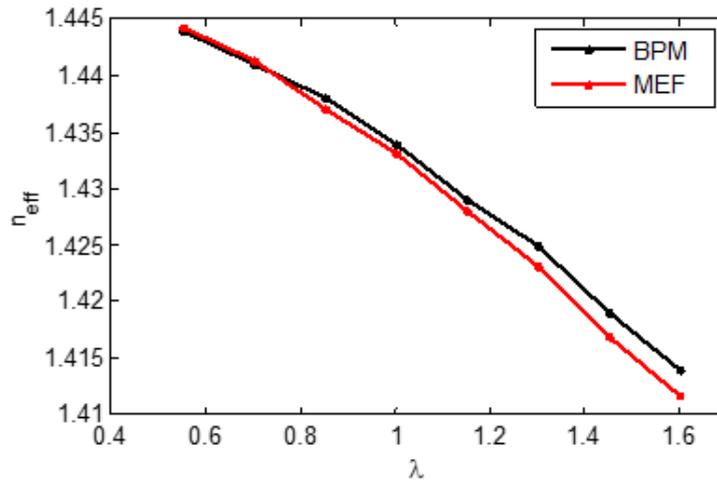


Figure I. 8: L'indice effectif des deux méthodes BPM et MEF [54].

I.12.3 La fréquence effective

Les diagrammes de phase qui différencient trois zones distinctes en fonction des paramètres de la microstructure (une région multimode, une région monomode et une région infiniment monomode) sont le résultat d'études théoriques sur les limites entre comportement monomode et multimode. Ces diagrammes, appelés « diagramme de phase du deuxième mode », sont réalisés en calculant l'évolution du rapport λ / Λ en fonction du rapport d/Λ dans la (figure I.9). Après avoir défini le concept d'indice de réfraction effectif, qui sous-tend notre compréhension des propriétés originales des FCP, depuis la fréquence effective ν_{eff} , des propriétés monomodales infinies peuvent être exprimées.

$$\nu_{eff} = \frac{2\pi a_{eq}}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_{fsm}^2} \quad \text{I.6}$$

Où λ est la longueur d'onde de la lumière et a_{eq} est le rayon de cœur de la fibre a saut d'indice.

La valeur V de la fibre détermine si elle est multimode ou monomode.

- Un seul mode fondamental de la fibre, encore appelé mode HE11 ou LP01, se propage dans la fibre si « $V < 2.405$ ». La fibre est dite monomode.
- Une fibre est dite multimode si « $V > 2.405$ », elle permet la propagation de plusieurs modes.

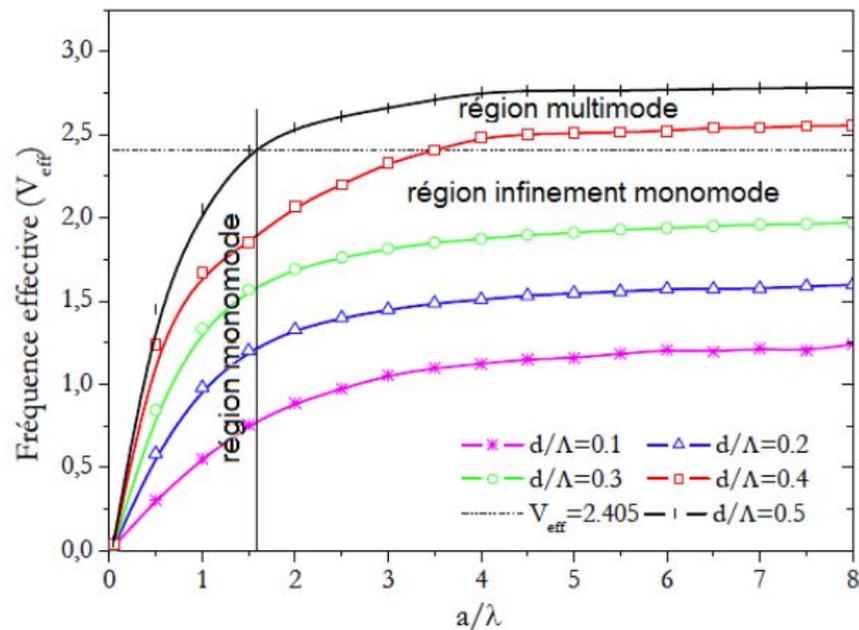


Figure I. 9: Comportement modal des FCPs en fonction de a/λ pour différents rapports d/Λ [44].

Trouver un rayon de cœur équivalent « a_{eq} » est difficile lorsque l'on tente d'appliquer l'équation (I.6) au FCP. Afin d'appliquer cette idée de la valeur de « V » au FCP, un certain nombre de rayons de cœur effectifs ont été suggérés, notamment $a=\Lambda$ [55], $\Lambda/2$ [56], $2\Lambda-d$ [57], $\Lambda/\sqrt{3}$ [58], et c'était mentionné aussi que l'on peut choisir n'importe quelle dimension transversale [59].

I.12.4 La dispersion

Une source lumineuse couplée à une fibre n'est pas complètement monochrome, mais émet dans une largeur spectrale spécifique. Par conséquent, le signal se propageant sur toute la longueur de la fibre se dilate avec le temps. La propagation de ce signal est Intra-modal ou chromatique. A cet effet, cette propagation peut être liée à deux processus différents qui sont la dispersion du guide et du matériel. Le total des deux est à peu près la dispersion chromatique D_c .

$$D_c = D_{mat} + D_{guide} \quad \text{I.7}$$

Contrairement au FCP, où la longueur de l'onde affecte significativement l'indice d'effet de mode, les fibres conventionnelles ont souvent une dispersion plus faible que celle du matériau. L'influence de la dispersion du guide sur l'expression de la dispersion chromatique totale est ainsi fortement renforcée par la structure.

La quantité de données qu'un dispositif de communication optique peut diffuser est limitée par la dispersion colorimétrique. La décomposition temporelle limite la quantité de transmission car elle nécessite un intervalle de temps plus important entre deux impulsions.

$$D_c = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2} \quad \text{I.8}$$

Où n_{eff} est l'indice d'efficacité du mode guidé [60].

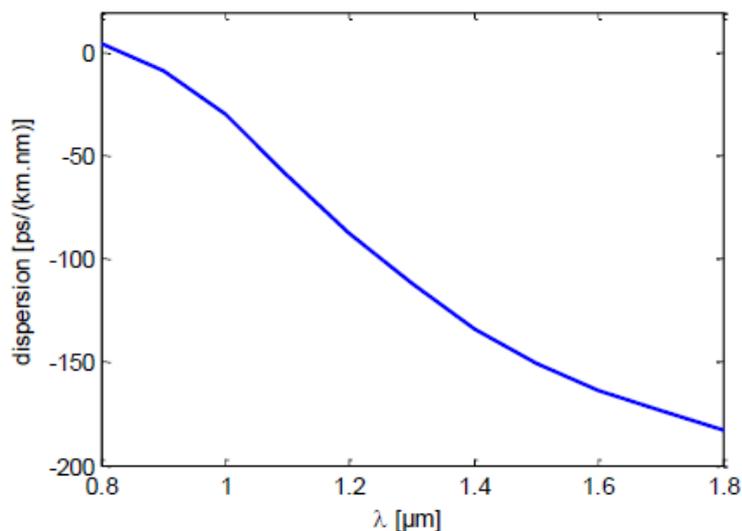


Figure I. 10: Un exemple d'une Courbe de dispersion chromatique.

La dispersion du FCP dépend de la forme et du matériau du FCP. Par conséquent, on peut manipuler *ZDW* : (Zero Dispersion Wavelength) en manipulant ces paramètres. Ainsi, il est possible de placer le zéro de dispersion chromatique à proximité de la longueur d'onde choisie, notamment dans le visible. Ceci n'est pas possible dans les fibres monomodes conventionnelles où la dispersion chromatique est très prononcée en raison des contributions matérielles. Cet accord de longueur d'onde de dispersion nulle est extrêmement important lorsque l'on veut limiter l'étalement temporel de l'impulsion optique lors de sa propagation [61]. La figure I.10 montre un exemple de dispersion chromatique.

I.12.5 L'atténuation

La perte globale qui définit la fibre optique englobe une variété de types de perte. Cette atténuation résulte de l'interaction de la lumière et de l'environnement dans lequel elle se propage. La valeur est exprimée en décibels par kilomètre (dB/km) et est influencée par la composition du matériau de l'environnement ainsi que la longueur L de la fibre. L'équation est la suivante :

$$\alpha \text{ (dB/km)} = -\frac{10}{L} \log \left[\frac{P_s}{P_e} \right] \quad \text{I.9}$$

Où P_s et P_e sont respectivement les puissances optiques de sortie et d'entrée de la fibre et L représente la longueur de la fibre.

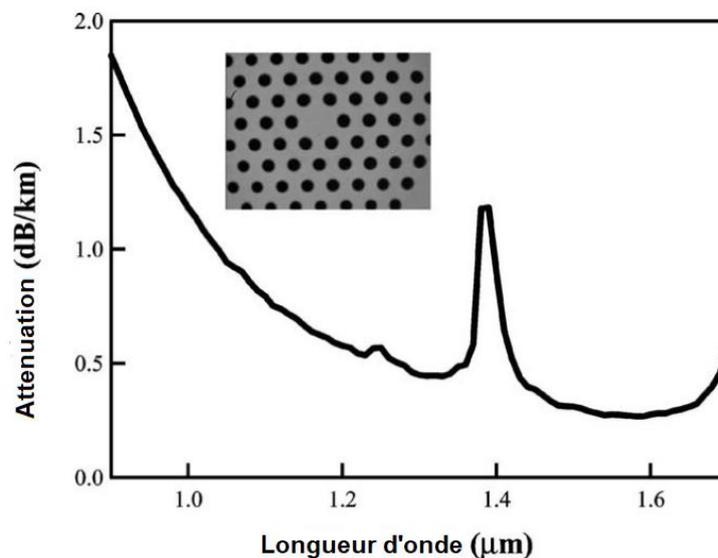


Figure I. 11: Caractéristiques de perte optique du FCP à la perte la plus faible [65].

Dans les fibres optiques en verre, la lumière est atténuée en dépendant de plusieurs effets, notamment la diffusion Rayleigh, l'absorption des matériaux et l'absorption par des impuretés telles que les ions OH [62]. Plusieurs recherches ont déjà été faites pour réduire la perte optique des FCP. Dans la première version des fibres, une perte de 0,82 dB/km a été signalée. Après l'amélioration de cette fibre, la perte la plus faible signalée était de 3,2 dB/km à une longueur d'onde de 1,55 μm en 2002 [63]. En 2005, un groupe de chercheurs japonais a pu obtenir une perte minimale de 0,28 dB/km pour un coefficient de diffusion de Rayleigh de 1 dB/km.μm⁴ à 1,55 μm [64]. La figure I.11 représente les caractéristiques de perte optique du FCP à l'atténuation la plus faible.

I.12.6 L'air effective

L'air effective des modes de propagation, est l'autre paramètre optique dans les fibres FCP qui est particulièrement variable, autrement dit c'est la taille de leur distribution spatiale. Pour des fibres typiques, les diamètres du cœur vont de 9 μm à 62.5 μm , selon qu'elles ont des propriétés monomodes ou multimodes. Cette dimension peut être inférieure à 1,5 mm pour les FCP.

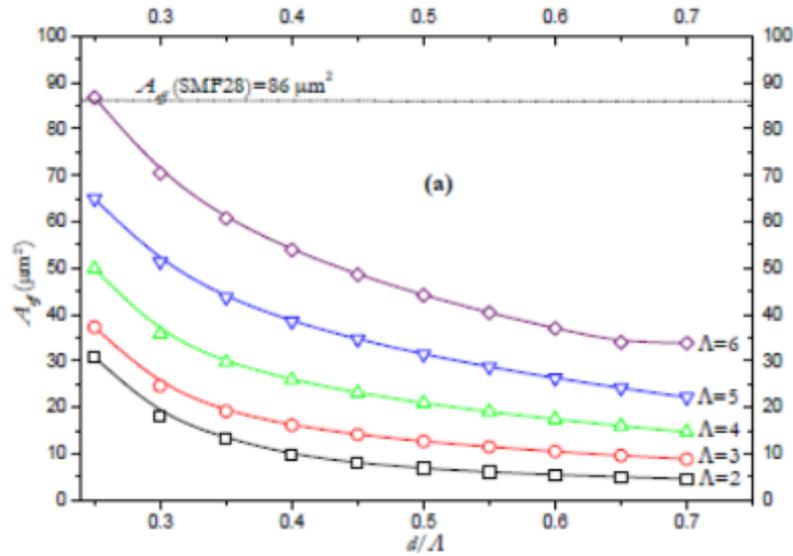


Figure I. 12: Aire effective calculée à la longueur d'onde 1.55 μm pour différents rapports d/Λ [44].

L'air effective A_{eff} est dérivée de la distribution transversale du coefficient de champ électrique $\vec{E}(x, y)$ [66].

$$A_{eff} = \frac{\left[\iint_{-\infty}^{\infty} |\vec{E}(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\iint_{-\infty}^{\infty} |\vec{E}(x, y)|^4 dx dy} \quad \text{I.10}$$

Basée sur les paramètres géométriques du FCP, la figure I.12 affichera une « carte » de l'air efficace à l'échelle mondiale. En utilisant une valeur de pression atmosphérique effective particulière comme point de départ, celle-ci peut être utilisée pour calculer les paramètres FCP géométriquement idéaux.

I.12.7 La biréfringence

La symétrie de rotation $\pi/3$ d'une fibre FCP dont la gaine est composée de trous d'air identiques placés triangulairement. Ils sont considérés comme isotropes et doivent avoir une biréfringence nulle. Certainement dans une certaine mesure, la biréfringence peut se produire dans la plupart

des fibres malgré leur structure apparemment régulière. Il existe deux sources uniques d'anisotropie dans ces fibres qui provoquent la dégénérescence de deux modes de polarisation et la formation d'une biréfringence de phase. Le premier est la brisure de symétrie $\pi/3$ de la partie rectiligne de la fibre, qu'elle soit spontanée ou non. La deuxième possibilité est que le matériau constitutif de la fibre puisse être soumis à des limitations anisotropes, ce qui conférerait à l'indice de réfraction une qualité de traction. La biréfringence est une propriété des ondes lumineuses qui résulte d'une différence d'indice de réfraction effectif entre deux polarisations orthogonales. La relation ci-dessous peut être utilisée pour présenter la biréfringence [67] :

$$B = \Delta n = |n_x - n_y| \quad \text{I.11}$$

Où n_x et n_y sont les indices d'efficacité pour les deux états de polarisation qui correspondent aux orientations x et y de la fibre.

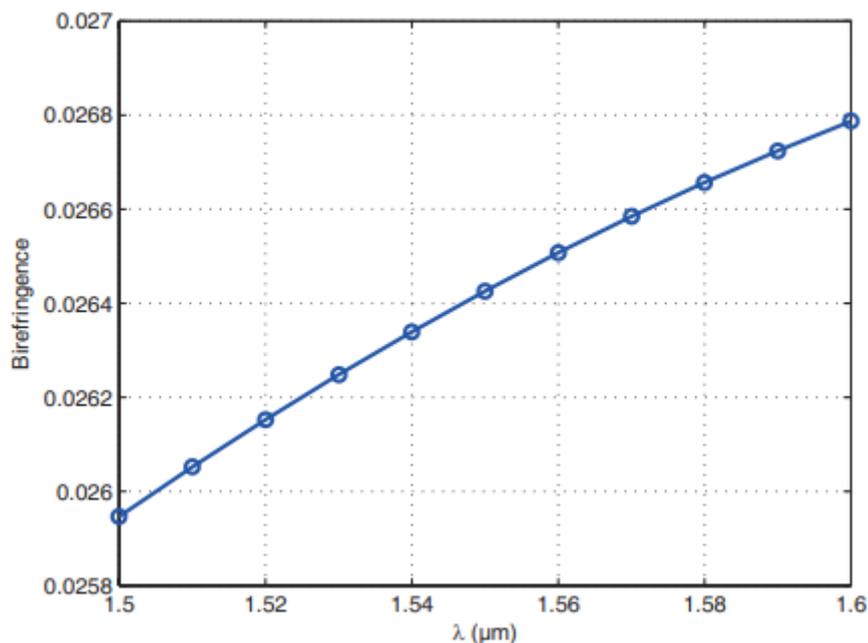


Figure I. 13: La biréfringence en fonction de la longueur d'onde pour des paramètres de conception optimaux [68].

Avec des fibres de silice ordinaires, les imperfections du matériau et les défauts géométriques créent une biréfringence résiduelle de l'ordre de 10^{-6} . Avec une FCP qui change de forme sur sa longueur, l'absence de circulation complète se traduit par une biréfringence résiduelle qui peut dépasser 10^{-4} . Le résultat d'un certain nombre de failles associées à chaque trou est la biréfringence géométrique. L'écart entre leurs tailles réelles et idéales ou toute distorsion de

forme potentielle sont les principaux facteurs à prendre en compte. Ces défauts ne peuvent pas être évalués avec précision et sont très difficiles à identifier.

Aujourd'hui, cette biréfringence résiduelle présente une réduction à des valeurs de l'ordre de 10^{-5} grâce à la qualité de fabrication des FCP.

La figure I.13 montre un exemple sur la variation de biréfringence en fonction de la longueur d'onde pour des paramètres de conception idéaux.

I.13 Techniques de fabrication

Presque toutes les fibres photoniques en silice existantes à ce jour ont été produites à l'aide de la technique d'empilement et d'étirage ("stack and draw"). Il y a principalement deux étapes dans le processus. Dans la première étape, des tubes de silice pleins et crevassés d'un diamètre d'environ 1 mm sont insérés pour former une préforme. La microstructure cible a été considérablement élargie par ce mélange. Pour obtenir de la fibre, un tube complet est utilisé à la place d'un tube creux, ce qui entraîne l'introduction périodique de failles dans la structure. La préforme est enduite de polymère une seconde fois, et l'ensemble est étiré selon le même procédé que la fibre ordinaire. La figure I.14 illustre ces différentes phases.

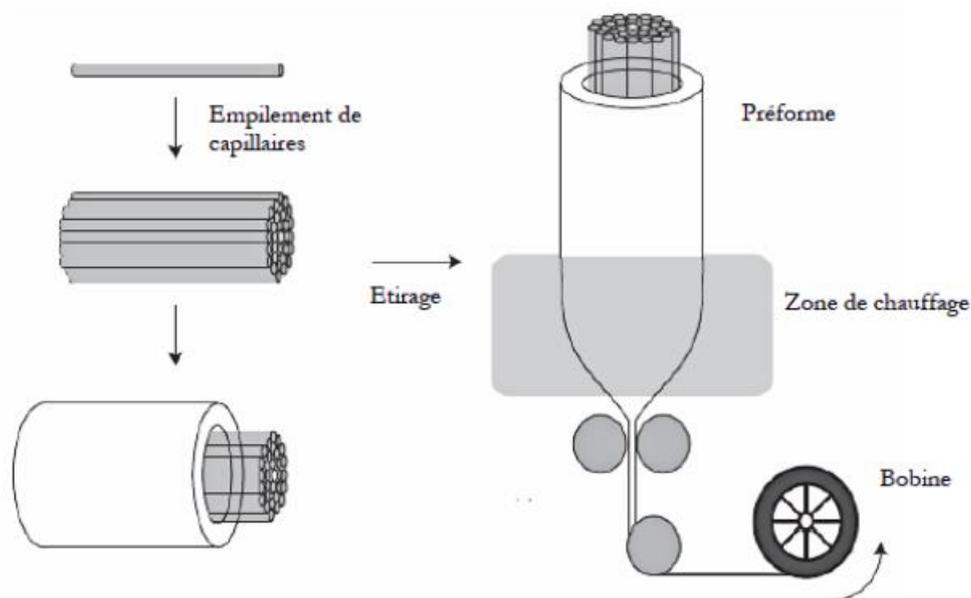


Figure I. 14: Les techniques de fabrication [69].

Les tours de fibrage permettent de répondre aux besoins des capillaires, élément de base de la microstructure. Pendant le fibrage, divers paramètres doivent être contrôlés pour garantir le diamètre des fibres et la vitesse d'étirage souhaitée. La vitesse de descente de la préforme dans

le four est touchée par ce control. Il est difficile de contrôler les variables critiques de l'étape de fibrage (pente de la préforme, vitesse d'étirage, température, etc.) essentielles pour obtenir les bonnes qualités de fibre FCP. Ainsi, les paramètres de fibrage ont un impact important sur la qualité structurale des fibres étirées. Ainsi, bien que cette technique soit largement utilisée dans les verres de silice, certaines œuvres qui utilisent des matériaux plus inhabituels (silices modifiées, chalcogénures) ont aussi été mises en évidence [70]. Les techniques de fabrication FCP sont maîtrisées et les fibres sont disponibles dans le commerce, mais le modelage de ses propriétés optiques est encore essentiel pour établir l'applicabilité du FCP en question.

I.14 Les applications des fibres à cristaux photoniques

Les FCP sont toujours l'une des meilleures options pour construire les amplificateurs, les lasers à fibre optique de haute puissance (jusqu'à 1 kW) [71], l'électronique non linéaire, les systèmes de communications par fibre optique de très grande capacité, et les détecteurs à haute sensibilité.

Le filtrage sélectif des longueurs d'onde optiques à l'intérieur d'une cavité laser est une application pour les fibres à bas indice [72]. Ces fibres sont donc d'excellentes options pour conserver la polarisation et créer des coupleurs en raison de la large gamme de profils d'indice réalistes. Dans d'autres cas, un environnement gazeux ou humide peut être utilisé à la place de l'air dans les tubes, et des dispositifs de filtrage peuvent également utiliser la bande spectrale de propagation. Les fibres peuvent fonctionner comme des capteurs (capteurs de gaz, capteurs de pollution de l'eau, etc.) en exploitant l'interaction entre la lumière et la matière dans le cœur [73, 74]. On peut également l'utiliser dans le matériel médical [70], et les réseaux d'accès multiservices de grande capacité [75].

I.15 Les avantages des fibres à cristaux photoniques

Les performances, la compacité et la fiabilité sont toutes considérablement améliorées par l'utilisation de fibres à cristaux photoniques (FCP).

Une caractéristique de ces fibres est la possibilité de modifier les caractéristiques optiques géométriques des profils de réfraction afin d'adapter les caractéristiques de propagation des fibres à certaines applications [76].

La capacité de ces fibres à focaliser la lumière dans un cœur à faible indice est l'un de ses nombreux avantages. Le choix d'un noyau à trous d'air est ainsi rendu possible, ce qui n'est évidemment pas envisageable avec des guides basés sur un guidage par réflexion intégrale. Les

pertes inhérentes aux interactions lumière/matière sont réduites au minimum du fait que la lumière se propage dans l'air. Sans montrer aucun signe de claquage du matériau, des densités de puissance extrêmement élevées peuvent être pompées dans le cœur, les effets non linéaires et les intensités d'apparition seuil de l'émission stimulée par Raman, la diffusion de Brillouin sont reflétées.

La capacité du FMAS à modifier la dispersion chromatique en réponse à la taille et à la répartition des trous est l'un de ses principaux avantages par rapport aux autres fibres optiques [62]. Ces fibres surpassent les fibres ordinaires en raison de leurs bandes de transmission exceptionnellement larges, qui peuvent atteindre jusqu'à une octave, de faibles pertes de transmission et d'un faible couplage optique entre le mode de cœur et la silice qui compose la gaine [77].

En raison des qualités de transmission exceptionnelles du FCP, de sa structure flexible et de son faible volume, les chercheurs lui accordent une attention particulière.

I.16 Les inconvénients des fibres à cristaux photoniques

La longue durée de production et le coût élevé du FCP font un support de transmission moins souhaitable pour les télécommunications, d'où ils peuvent devenir moins utiles en conséquence pour certaines utilisations, ainsi que la biréfringence et le bruit de phase font partie de ces désavantages. De plus, les fibres à cristaux photoniques pourraient être plus vulnérables aux dommages mécaniques et environnementaux, ce qui pourrait réduire leur durée de vie et compromettre leur fiabilité. Elles pourraient également avoir besoin de procédés de fabrication et de traitement plus sophistiqués, ce qui pourrait compliquer leur production. Leur utilisation dans certaines applications peut être plus délicate car elles peuvent avoir des propriétés optiques plus compliquées à gérer que celles des fibres ordinaires.

La préoccupation suivante est de savoir s'il est possible de les joindre et de les connecter à d'autres guides d'ondes et équipements [78].

I.17 Conclusion

En conclusion, nous avons présenté les FCP ainsi que leurs principales caractéristiques et procédés de fabrication, en soulignant les avantages, les inconvénients et les applications qu'ils offrent par rapport aux fibres optiques conventionnelles. Cette partie a permis d'identifier le contexte dans lequel la recherche développée dans cette thèse a été menée. Nous avons commencé en donnant une description qualitative de la structure de ces fibres et de leurs

caractéristiques distinctives, comme la longueur d'onde, l'indice de réfraction, la fréquence effective, la dispersion, l'air effective et la biréfringence. Ensuite, nous avons présenté les techniques de fabrication ainsi que les avantages et les applications de ces fibres.

La fibre à cristaux photonique fait l'objet d'un effort de recherche continu. Aujourd'hui arrivés à maturité, ceux-ci permettent d'envisager des améliorations significatives des composants existants, tels que ceux utilisés pour le transfert de données jusqu'aux abonnés. C'est également un candidat de choix pour le développement d'alimentations industrielles et de sources fibrés de lumière blanche pour le domaine médical. Le potentiel d'utilisation de ces fibres dans le développement de composants est une autre caractéristique intéressante tel que les diviseurs de puissance, les multiplexeurs, les démultiplexeurs. etc, En conséquence, l'utilisation de ces fibres pour créer des composants optiques est possible. Cet aspect objet de notre travail de thèse est revu en détails dans ce qui suit.

Références

- [1] J.-L. Verneuil, "Simulation De Systèmes De Télécommunications Par Fibre Optique À 40 Gbits/S", "Université de Limoges, Limoges", p. 297, 2003.
- [2] K. Boutelli and S. Bentouati, "Étude Et Conception Des Fibres Optiques Microstructurées, Thesis, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [3] G. Lepointe, "Nouvelles Diverses", "Revue historique de droit français et étranger (1922-)", pp. 113-128, 1962.
- [4] J. Sevin, "L'effet Laser Dans Les Solides", "Revue d'histoire des sciences et de leurs applications", pp. 359-372, 1963.
- [5] R. M. a. N. Aina, "Etude De L'atténuation Dans Une Liaison Par Fibre Optique".
- [6] I. Ziri and L. Mehdi, "Système De Communication Optique: Etude Des Différents Éléments Et De Leurs Bruits Respectifs, Thesis, Université Mouloud Mammeri, 2013.
- [7] S. Boj, "Réalizations De Filtres Sélectifs En Fréquence Intégrés Dans Les Fibres Optiques Et Applications, Thesis, Lille 1, 1995.
- [8] C. Martinez, "Etude Et Réalisation De Composants À Réseaux De Bragg Dans Les Fibres Optiques, Thesis, Paris 11, 1999.
- [9] L. Gagné-Godbout, "Modélisation, Fabrication Et Caractérisation D'un Amplificateur À Fibre Optique À Sept Cœurs Dopés À L'erbium, Thesis, Université Laval, 2014.
- [10] M.-H. Bussièrès-Hersir, "Développement De Procédés De Fabrication De Coupleurs À Fibre Optique: Application Aux Hybrides Optiques", Book, "Ecole Polytechnique, Montreal (Canada)", 2018
- [11] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C. E. Ouadah, "Design of a New 2-Channel Demultiplexer Based on Photonic Crystal Fiber", "Results in Optics", vol. 12, p. 100496, 2023.
- [12] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C. E. Ouadah, "Numerical Analysis of 1 X 4 Photonic Crystal Fiber Multiplexer", "Progress In Electromagnetics Research M", vol. 118, pp. 127-136, 2023.
- [13] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C. E. Ouadah, "Design of a Novel 1x4 Two-Dimensional Demultiplexer Based on Multicore Photonic Crystal Fiber", "International Journal of Electronics and Telecommunications", pp. 469-473-469-473, 2023.
- [14] F. D. Fornel, "Propagation Dans Les Fibres Optiques Et Dans Les Coupleurs: Analyse Et Application À La Réalisation De Polariseurs Et De Multiplexeurs-Demultiplexeurs, Thesis, Université de Limoges. Faculté des sciences et techniques, 1989.
- [15] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C.-E. Ouadah, "1×2 Power Splitter Based on Photonics Crystals Fibers", "Journal of Optical Communications", vol. 44, no. 4, 2023.
- [16] F. Kiheli and K. Djebrit, "Conception Des Diviseurs De Puissance Optique 1x2, 1x3 Et 1x4 À Base Des Cristaux Photoniques, Thesis, UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA, 2020.
- [17] K. Lenglé, "Traitement Tout Optique Du Signal À Base De Composants À Cristaux Photoniques En Matériaux Semiconducteurs Iii-V, Thesis, Rennes 1, 2013.
- [18] B. Badreddin, B. Yassine, and D. Abdelali, "Etude et simulation De La diffraction d'un réseau de fentes", 2022.
- [19] M. Tan, B. Corcoran, X. Xu, J. Wu, A. Boes, T. G. Nguyen, S. T. Chu, B. E. Little, R. Morandotti, and A. Mitchell, "Ultra-High Bandwidth Optical Data Transmission with a

- Microcomb,conference proceedings," in *2020 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*, 2020: IEEE, pp. 78-82.
- [20] I. Amiri, A. N. Z. Rashed, S. Jahan, B. K. Paul, K. Ahmed, and P. Yupapin, "Technical Specifications of the Submarine Fiber Optic Channel Bandwidth/Capacity in Optical Fiber Transmission Systems", *Journal of Optical Communications*, 2019.
- [21] A. Brientin, "Capteurs À Fibre Optique Basés Sur La Réflexion De Fresnel: Applications Aux Fibres À Maintien De Polarisation, Aux Fibres Multimodes Et À La Spectroscopie,Thesis, Nantes, 2021.
- [22] R. Boufenar, "Amélioration De La Sensibilité Des Capteurs Par L'utilisation Des Fibres À Cristaux Photoniques,Thesis, Université de M'sila, 2018.
- [23] D. Stellinga, D. B. Phillips, S. P. Mekhail, A. Selyem, S. Turtaev, T. Čížmár, and M. J. Padgett, "Time-of-Flight 3d Imaging through Multimode Optical Fibers", *Science*, vol. 374, no. 6573, pp. 1395-1399, 2021.
- [24] T. S. Saini, N. P. T. Hoa, T. H. Tuan, X. Luo, T. Suzuki, and Y. Ohishi, "Tapered Tellurite Step-Index Optical Fiber for Coherent near-to-Mid-Ir Supercontinuum Generation: Experiment and Modeling", *Applied optics*, vol. 58, no. 2, pp. 415-421, 2019.
- [25] R. Dylla-Spears, T. D. Yee, K. Sasan, D. T. Nguyen, N. A. Dudukovic, J. M. Ortega, M. A. Johnson, O. D. Herrera, F. J. Ryerson, and L. L. Wong, "3d Printed Gradient Index Glass Optics", *Science advances*, vol. 6, no. 47, p. eabc7429, 2020.
- [26] H. A. Mohammed, S. A. Rashid, M. H. A. Bakar, S. B. A. Anas, M. A. Mahdi, and M. H. Yaacob, "Fabrication and Characterizations of a Novel Etched-Tapered Single Mode Optical Fiber Ammonia Sensors Integrating Pani/Gnf Nanocomposite", *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 287, pp. 71-77, 2019.
- [27] M. A. Jima, "Nonlinear Propagation in Multimode Optical Fiber Amplifiers,Thesis, Limoges, 2021.
- [28] M. S. Islam, C. M. Cordeiro, M. A. Franco, J. Sultana, A. L. Cruz, and D. Abbott, "Terahertz Optical Fibers", *Optics express*, vol. 28, no. 11, pp. 16089-16117, 2020.
- [29] A. Khelouf, N. Afrid, and A. Hamouda, "Génération De Multi Porteuses À (40 Ghz, 80 Ghz, 160 Ghz, 320 Ghz) Pour Application Aux Systèmes De Télécommunications Avancés", 2022.
- [30] J. D. Costabile, E. Alaswad, S. D'souza, J. A. Thompson, and D. R. Ormond, "Current Applications of Diffusion Tensor Imaging and Tractography in Intracranial Tumor Resection", *Frontiers in oncology*, vol. 9, p. 426, 2019.
- [31] Y. Cao, "*Design and Simulation of Gain-Flattened Ultra Wideband Fiber Amplifiers Covering S-, C-, and L-Bands*",Book,"The University of North Carolina at Charlotte",2003
- [32] P. Roriz, S. Silva, O. Frazao, and S. Novais, "Optical Fiber Temperature Sensors and Their Biomedical Applications", *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 2113, 2020.
- [33] Y. Wang, H. Yuan, X. Liu, Q. Bai, H. Zhang, Y. Gao, and B. Jin, "A Comprehensive Study of Optical Fiber Acoustic Sensing", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 85821-85837, 2019.
- [34] M. A. Lediju Bell, "Photoacoustic Imaging for Surgical Guidance: Principles, Applications, and Outlook", *Journal of applied physics*, vol. 128, no. 6, p. 060904, 2020.
- [35] J. Bures, "*Optique Guidée: Fibres Optiques Et Composants Passifs Tout-Fibre*",Book,"Presses inter Polytechnique",2009
- [36] O. Allix, E. Baranger, and L. Blanchard, "A Computational Method for the Prediction of Damage and Delamination in Composite Pipes,conference proceedings," in *ICF 11-11th International Conference on Fracture*, 2005.

- [37] E. Sarajlić, M. J. De Boer, H. V. Jansen, N. Arnal, M. Puech, G. Krijnen, and M. Elwenspoek, "Advanced Plasma Processing Combined with Trench Isolation Technology for Fabrication and Fast Prototyping of High Aspect Ratio MemS in Standard Silicon Wafers", *"Journal of Micromechanics and microengineering"*, vol. 14, no. 9, p. S70, 2004.
- [38] S. Li, H. Zhang, Z. Liu, J. Xu, G. Fan, W. Li, Q. Li, X. Hu, and G. Jing, "Time of Flight–Secondary Ion Mass Spectroscopy Profiling of Self-Assembled Monolayer Patterns Based on Vapor Deposition Technique", *"Applied Surface Science"*, vol. 588, p. 152961, 2022.
- [39] T. Oriekhov, C. M. Harvey, K. Mühlberger, and M. Fokine, "Specialty Optical Fiber Fabrication: Preform Manufacturing Based on Asymmetrical Co Laser Heating", *"JOSA B"*, vol. 38, no. 12, pp. F130-F137, 2021.
- [40] Y. Chu, X. Fu, Y. Luo, J. Canning, Y. Tian, K. Cook, J. Zhang, and G.-D. Peng, "Silica Optical Fiber Drawn from 3d Printed Preforms", *"Optics letters"*, vol. 44, no. 21, pp. 5358-5361, 2019.
- [41] A. Krishnan and F. Fang, "Review on Mechanism and Process of Surface Polishing Using Lasers", *"Frontiers of Mechanical Engineering"*, vol. 14, no. 3, pp. 299-319, 2019.
- [42] R. Min, Z. Liu, L. Pereira, C. Yang, Q. Sui, and C. Marques, "Optical Fiber Sensing for Marine Environment and Marine Structural Health Monitoring: A Review", *"Optics & Laser Technology"*, vol. 140, p. 107082, 2021.
- [43] Y. Xu, P. Bai, X. Zhou, Y. Akimov, C. E. Png, L. K. Ang, W. Knoll, and L. Wu, "Optical Refractive Index Sensors with Plasmonic and Photonic Structures: Promising and Inconvenient Truth", *"Advanced Optical Materials"*, vol. 7, no. 9, p. 1801433, 2019.
- [44] R. Cherif, "Étude Des Effets Non-Linéaires Dans Les Fibres À Cristaux Photoniques, Thesis, thèse de Doctorat, 2009.
- [45] P. S. J. Russell, "Photonic-Crystal Fibers", *"Journal of Lightwave Technology"*, vol. 24, no. 12, pp. 4729-4749, 2006.
- [46] J. Knight, T. Birks, P. S. J. Russell, and D. Atkin, "All-Silica Single-Mode Optical Fiber with Photonic Crystal Cladding", *"Optics letters"*, vol. 21, no. 19, pp. 1547-1549, 1996.
- [47] T. M. Monro and H. Ebendorff-Heidepriem, "Progress in Microstructured Optical Fibers", *"Annu. Rev. Mater. Res."*, vol. 36, pp. 467-495, 2006.
- [48] V. Portosi, D. Laneve, M. C. Falconi, and F. Prudenzano, "Advances on Photonic Crystal Fiber Sensors and Applications", *"Sensors"*, vol. 19, no. 8, p. 1892, 2019.
- [49] H. F. FakhruLdeen, A. Z. Zahid, R. M. Jaafar, and A. Abdulkareem, "An Overview of Photonic Crystal Fiber (Pcf)", *"Indian Journal of Natural Sciences"*, vol. 9, no. 53, pp. 0976-0997, 2019.
- [50] I. K. Yakasai, P. E. Abas, and F. Begum, "Review of Porous Core Photonic Crystal Fibers for Terahertz Waveguiding", *"Optik"*, vol. 229, p. 166284, 2021.
- [51] V. Kaur and S. Singh, "Design Approach of Solid-Core Photonic Crystal Fiber Sensor with Sensing Ring for Blood Component Detection", *"Journal of Nanophotonics"*, vol. 13, no. 2, p. 026011, 2019.
- [52] M. M. Eid, M. A. Habib, M. S. Anower, and A. N. Z. Rashed, "Hollow Core Photonic Crystal Fiber (Pcf)–Based Optical Sensor for Blood Component Detection in Terahertz Spectrum", *"Brazilian Journal of Physics"*, vol. 51, pp. 1017-1025, 2021.
- [53] R. Yu, Y. Chen, L. Shui, and L. Xiao, "Hollow-Core Photonic Crystal Fiber Gas Sensing", *"Sensors"*, vol. 20, no. 10, p. 2996, 2020.
- [54] M. D. Ahlem Harrat, Mohammed Chamseedine Ouadah, Ilhem Mired, "Dispersion Comparison of Photonic Crystal Fiber", conference, presented at the Conférence

- Nationale sur les Télécommunications et ses Applications " « CNTA 2021 », 20 – 21 décembre 2021, 2021.
- [55] T. A. Birks, J. C. Knight, and P. S. J. Russell, "Endlessly Single-Mode Photonic Crystal Fiber", *"Optics letters"*, vol. 22, no. 13, pp. 961-963, 1997.
- [56] A. Ferrando, E. Silvestre, J. J. Miret, P. Andrés, and M. V. Andrés, "Vector Description of Higher-Order Modes in Photonic Crystal Fibers", *"JOSA A"*, vol. 17, no. 7, pp. 1333-1340, 2000.
- [57] J. Knight, J. Arriaga, T. Birks, A. Ortigosa-Blanch, W. Wadsworth, and P. S. J. Russell, "Anomalous Dispersion in Photonic Crystal Fiber", *"IEEE Photonics Technology Letters"*, vol. 12, no. 7, pp. 807-809, 2000.
- [58] H. Li, A. Mafi, A. Schülzgen, L. Li, V. L. Temyanko, N. Peyghambarian, and J. V. Moloney, "Analysis and Design of Photonic Crystal Fibers Based on an Improved Effective-Index Method", *"Journal of Lightwave Technology"*, vol. 25, no. 5, pp. 1224-1230, 2007.
- [59] D. Mohammed and C.-B. Mohammed, "Analysis and Modeling of Microstructured Fiber Using the Analytical Method Based on the Empirical Equation", *"arXiv preprint arXiv:1307.8379"*, 2013.
- [60] A. K. Amoah, E. K. Akowuah, G. Nukpezah, S. Haxha, and H. Ademgil, "A Theoretical Investigation of a Photonic Crystal Fibre with Ultra-Flattened Chromatic Dispersion with Three Zero Crossing Dispersion Wavelengths", *"Optical Fiber Technology"*, vol. 53, p. 102032, 2019.
- [61] A. Medjouri, E.-B. Meraghni, H. Hathroubi, D. Abed, L. M. Simohamed, and O. Ziane, "Design of Zblan Photonic Crystal Fiber with Nearly Zero Ultra-Flattened Chromatic Dispersion for Supercontinuum Generation", *"Optik"*, vol. 135, pp. 417-425, 2017.
- [62] K. Boutelli and S. Bentouati, "Étude Et Conception Des Fibres Optiques Microstructurées, Thesis, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2021.
- [63] K. Tajima, K. Nakajima, K. Kurokawa, N. Yoshizawa, and M. Ohashi, "Low-Loss Photonic Crystal Fibers, conference proceedings," in *Optical Fiber Communication Conference, 2002: Optica Publishing Group*, p. ThS3.
- [64] J. Zhou, K. Tajima, K. Nakajima, K. Kurokawa, C. Fukai, T. Matsui, and I. Sankawa, "Progress on Low Loss Photonic Crystal Fibers", *"Optical Fiber Technology"*, vol. 11, no. 2, pp. 101-110, 2005.
- [65] M. El Amraoui, "Fibres Optiques Microstructurées Chalcogénures Fortement Non Linéaires À Base As₂S₃: Vers De Nouvelles Sources Supercontinuum Infrarouges, Thesis, Université de Bourgogne, 2010.
- [66] M. S. Hossain, S. Sen, and M. M. Hossain, "Performance Analysis of Octagonal Photonic Crystal Fiber (O-Pcf) for Various Communication Applications", *"Physica Scripta"*, vol. 96, no. 5, p. 055506, 2021.
- [67] P. A. Agbemabiese and E. K. Akowuah, "Numerical Analysis of Photonic Crystal Fiber of Ultra-High Birefringence and High Nonlinearity", *"Scientific Reports"*, vol. 10, no. 1, pp. 1-12, 2020.
- [68] M. C. E. Ouadah, M. Debbal, H. Chikh-Bled, and M. Bouregaa, "Effect of the Temperature and the Geometrical Parameters on the Modal Properties of Circular Photonic Crystal Fiber", *"Progress In Electromagnetics Research M"*, vol. 115, pp. 1-10, 2023.
- [69] L. Provino, A. Monteville, D. Landais, O. Le Goffic, A. Haboucha, T. Taunay, and D. Mechin, "Les Fibres Microstructurées: 20 Ans D'existence Et Un Vaste Éventail D'applications", *"Photoniques"*, no. 99, pp. 40-44, 2019.

- [70] I. Sassi, "*Conception De Fibres à Cristaux Photoniques En Utilisant Les Méthodes D'aide Multicritère à La Décision*", Book, "Library and Archives Canada= Bibliothèque et Archives Canada, Ottawa", 2010
- [71] P. Roy, P. Leproux, S. Février, D. Pagnoux, J.-L. Auguste, J.-M. Blondy, S. Hilaire, L. Lavoute, R. Jamier, and A. Desfarges-Berthelemot, "Photonic Crystal Fibres for Lasers and Amplifiers", "*Comptes Rendus Physique*", vol. 7, no. 2, pp. 224-232, 2006.
- [72] L. Provino, L. Brilland, A. Monteville, D. Landais, O. Le Goffic, D. Tregot, and D. Mechin, "Les Fibres Optiques Microstructurées", "*Photoniques*", no. 65, pp. 47-50, 2013.
- [73] I. Mired, M. Debbal, and H. Chikh-Bled, "Pressure Sensing Based on Photonic Crystal Fiber by Infiltrating the Air-Holes with Water", "*Progress in Electromagnetics Research C*", vol. 130, 2023.
- [74] I. Mired, M. Debbal, and H. Chikh-Bled, "Design and Simulation of a Highly Sensitive Photonic Crystal Fiber Sensor for Malaria Detection", 2023.
- [75] D. S. Loum, "Transmission Radio Haut Débit Multiservices Sur Fibres Optiques. Application À L'optimisation De La Capacité Multi-Utilisateurs En Emprises De Transport", Thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2012.
- [76] J. Tawney, F. Hakimi, R. Willig, J. Alonzo, R. T. Bise, F. Dimarcello, E. M. Monberg, T. Stockert, and D. J. Trevor, "Photonic Crystal Fiber Ifogs, conference proceedings," in *Optical Fiber Sensors*, 2006: Optica Publishing Group, p. ME8.
- [77] J. N. Dash and R. Jha, "Graphene-Based Birefringent Photonic Crystal Fiber Sensor Using Surface Plasmon Resonance", "*IEEE Photonics Technology Letters*", vol. 26, no. 11, pp. 1092-1095, 2014.
- [78] Y. Wang, L. Xiao, D. Wang, and W. Jin, "In-Fiber Polarizer Based on a Long-Period Fiber Grating Written on Photonic Crystal Fiber", "*Optics letters*", vol. 32, no. 9, pp. 1035-1037, 2007.

Chapitre 2 : Composants optiques à base de fibres à cristaux photoniques

II.1 Introduction aux composants optiques

II.1.1 Importance des composants optiques dans les systèmes de communication

Il est concevable que les systèmes de communication optique ne puissent pas être développés sans dispositifs ultra-rapides tout optiques étant donné la demande actuelle pour de tels systèmes, qui dépasse les 100 Gb/s de bande passante. L'utilisation de composants électroniques dans le traitement du signal est donc réduite grâce aux efforts dans ce domaine.

Un besoin croissant de composants actifs et passifs en optique guidée a résulté de la croissance rapide des technologies de la fibre optique dans les systèmes de télécommunications et plus récemment l'instrumentation [1]. Les séparateurs de polarisation [2], les extracteurs de longueurs d'onde [3], les connecteurs, les coupleurs directionnels [4], les multiplexeurs [5], les démultiplexeurs [6], les commutateurs [7], les modulateurs et les capteurs sont quelques exemples de pièces optiques cruciales pour les transmissions [8, 9], et les connexions optiques dans les différents réseaux optiques sont réalisées à l'aide de l'ensemble de ces composants.

Quand les signaux qui entrent et sortent sont de nature optique, on qualifie le composant d'optique.

Une connexion ou un réseau sur fibre optique est construit à partir de différents composants qui peuvent être classés selon leur fonction et leur technologie (diélectrique, semi-conducteur ou optique) : Il existe des composants optiques passifs ou actifs. Les futurs réseaux de télécommunications sont confrontés à des défis liés à l'amélioration de l'efficacité des équipements utilisés pour traiter des signaux tout-optiques, qui doivent être légers, durables, abordables et rapides.

Les dispositifs optiques compacts fonctionnant avec de faibles puissances optiques restent difficiles à réaliser, ce qui motive les chercheurs dans le domaine à créer des fibres de plus en plus efficaces et, par conséquent, de plus en plus non linéaires.

II.1.2 Rôle des fibres à cristaux photoniques dans la conception de ces composants

La première originalité de ce type de fibre à cristaux photoniques était sa structure périodique, qui lui permettait de focaliser la lumière sur un matériau précis. Ces nouvelles fibres optiques ont démontré après plus de dix ans de recherche une très large gamme d'applications dans des domaines très variés [10].

La discussion du chapitre précédent sur les propriétés physiques des fibres à cristaux photoniques (FCP) a clairement montré que ces propriétés ne sont qu'un point de départ pour

la création de diverses applications, et la communauté scientifique a rapidement réalisé l'énorme potentiel de ces fibres. La création d'amplificateurs optiques et de sources laser est un domaine crucial dans lequel les particularités de modalité et de dispersion des FCP peuvent être appliquées. Un laser et un amplificateur de forte puissance peuvent être conçus tout en évitant la saturation du gain et en minimisant les effets non linéaires défavorables grâce notamment à la capacité de ces fibres à ne supporter qu'un seul mode transverse [11], même pour de très larges tailles de mode. De nombreux dispositifs essentiels, tels que les multiplexeurs, démultiplexeur, diviseur de puissance, etc, ne peuvent fonctionner que lorsque la transmission de la lumière à travers une fibre a cristal photonique peut être contrôlée. La réalisation des défauts dans la structure (création des cœurs), qui permettent de contrôler les ondes électromagnétiques depuis leur point d'entrée jusqu'à leur point de sortie a rendu tout cela possible. Notre objectif est de rendre le composant plus petit afin qu'il puisse être utilisé en optique intégrée. Pour y parvenir, les dispositifs de ligne de transmission doivent être construits en utilisant du FCP, le meilleur matériau actuellement disponible pour produire de minuscules composants optiques de la taille du micron. Le but de ce chapitre est de présenter un aperçu des applications potentielles des composants à base de fibre à cristaux photoniques et de leur mise en œuvre [2, 12-18].

II.2 Multiplexeur et Démultiplexeur à base de fibres à cristaux photoniques

II.2.1 Multiplexage en longueur d'onde (WDM) dans les réseaux optiques

L'objectif principal de cette technologie est d'utiliser efficacement l'énorme débit des fibres optiques. Elle peut actuellement transmettre 160 canaux en longueur d'onde à un débit total de 6,4 Tbits/s ou encore 100 millions de communications vocales à 64 kbits par seconde sur une seule fibre optique. Chaque canal est multiplexé dans le temps a un débit binaire de 40 Gbits/s [19].

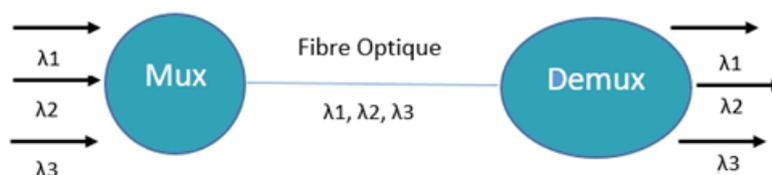


Figure II. 1 : Le principe du multiplexage en longueur d'onde [20].

Partant de l'observation que la propagation de la lumière est régie par des lois linéaires dans le domaine optique de faible puissance, il est désormais clair qu'il est possible de provoquer la propagation de la lumière sur la même fibre plus d'une longueur d'onde en utilisant un multiplexeur (Mux) pour les combiner en entrée et un démultiplexeur (Demux) pour les séparer en sortie. Tant que les signaux n'interfèrent pas les uns avec les autres, ces signaux de différentes longueurs d'onde peuvent être cadencés à différents débits binaires ou correspondre à différents schémas de codage sans poser de problèmes [21]. La figure II.1 montre le principe du multiplexage en longueur d'onde.

II.2.2 Principes de fonctionnement des multiplexeurs à base de fibres à cristaux photoniques

La transmission simultanée d'une sortie modifiée à partir de nombreuses sources utilisant diverses longueurs d'onde optiques est le concept de base qui sous-tend le multiplexage. On utilise un multiplexeur [22, 23] et un démultiplexeur en début et en fin de raccordement pour la superposition et la séparation de différentes longueurs d'onde.

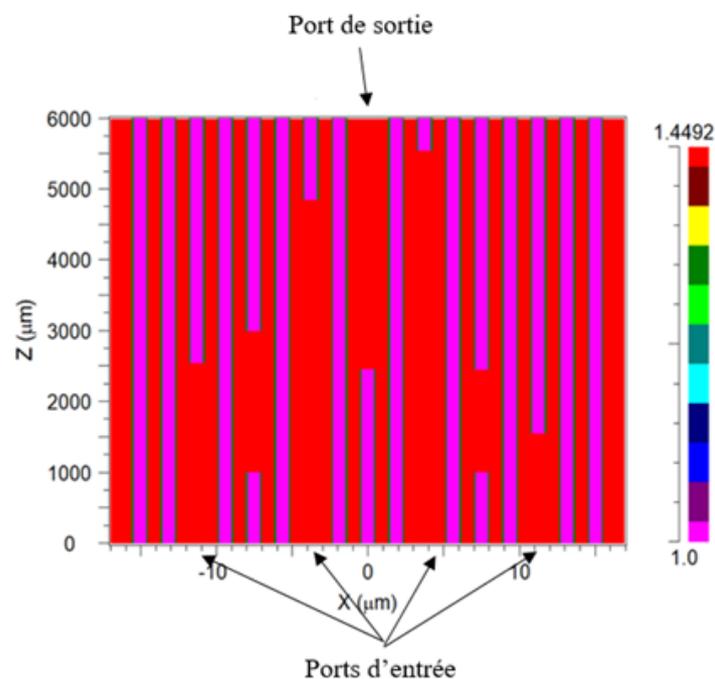


Figure II. 2: Un exemple du fonctionnement des multiplexeurs à base de fibres à cristaux photoniques [24].

Il est essentiel de développer un multiplexeur basé sur une fibre à cristal photonique (FCP) en raison du fort confinement de la lumière, car ces fibres sont d'excellents candidats pour créer de futurs dispositifs optiques passifs et actifs.

En raison des caractéristiques uniques de la fibre à cristal photonique, de nombreux composants optiques doivent avoir des tailles nettement très réduite.

À ce jour, un certain nombre de multiplexeurs optiques basés sur des fibres à cristaux photoniques ont été créés. Pour permettre à la lumière injectée au cœur de la fibre de se propager à l'intérieur de celle-ci, ces dispositifs utilisent le principe de guidage par réflexion totale interne modifié, où l'indice de cœur de la fibre est supérieur à l'indice de la gaine. En injectant plusieurs longueurs d'onde dans plusieurs cœurs à l'entrée se fera le couplage (entre les matériaux ayant le même indice de réfraction) pour être combinés dans un seul cœur à la sortie. La figure II.2 montre un exemple du fonctionnement des multiplexeurs à base de fibres à cristaux photoniques. La valeur 1.4492 sur la figure représente l'indice de silice (la zone rouge) et la valeur 1 représente l'indice des trous d'air (la zone violette).

II.2.3 Types de multiplexeurs

II.2.3.1 Multiplexeurs à réseaux de Bragg

Dans le domaine des transmissions optiques, le réseau Bragg [25] est devenu un élément crucial et stratégique. Il est généralement présent dans tous les éléments de la chaîne de transmission, en particulier lors des opérations de multiplexage et de démultiplexage pour insérer ou supprimer plusieurs longueurs d'onde dans la fibre.

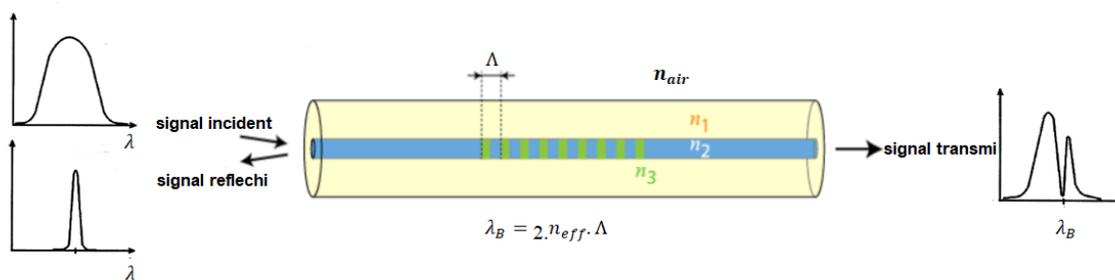


Figure II. 3: L'influence du réseau de Bragg sur le signal optique [26].

Cette technologie semble très intrigante. Ils sont faciles à réaliser. Les fibres de transmission peuvent y être directement connectées. Ils peuvent être utilisés pour bien d'autres choses et ont un faible coût de production. Un réseau de Bragg est une variante périodique de l'indice de réfraction du cœur de la fibre. Le réseau reflète les longueurs d'onde qui vérifient la relation

II.1, lorsque la lumière se propage dans la fibre. La figure II.3 montre l'influence de ce réseau sur le signal optique [25].

$$\lambda_B = 2.n_{eff}.\Lambda \quad \text{II.1}$$

II.2.3.2 Multiplexeurs à réseaux de phase

Les réseaux d'ondes guidées matricés (AWG : Array wave-guide) sont fréquemment utilisés comme (dé)multiplexeurs optiques dans les systèmes de multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM). Ces dispositifs augmentent considérablement la capacité de transmission du réseau optique en multiplexant de nombreuses longueurs d'onde dans une seule fibre optique.

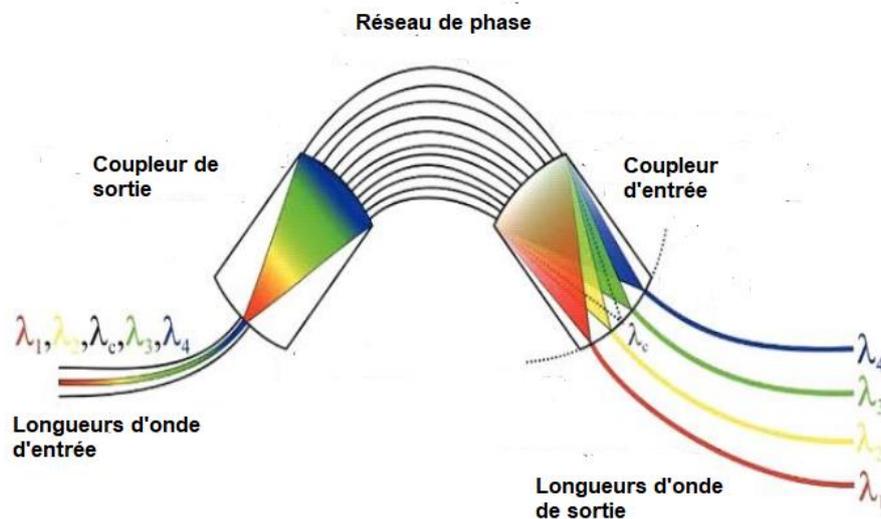


Figure II. 4: Un exemple d'un réseau de phase[27, 28].

Il permet de choisir une longueur d'onde particulière présente sur chacune des m voies de sortie. Le principe de l'optique sous-jacent, selon lequel les ondes électroluminescentes de différentes longueurs d'onde n'interfèrent pas linéairement les unes avec les autres, constitue la base de ces dispositifs. En conséquence, la lumière provenant de plusieurs canaux peut être transportée par une seule fibre optique avec une diaphonie négligeable entre les canaux si un réseau de canaux de communication optique utilise une lumière de longueurs d'onde légèrement différentes. La figure II.4 montre un exemple de ce composant.

La figure II.5 montre une lumière mobile (1) traverse un espace libre (2) et obstrue les canaux des guides d'ondes (3). Étant donné que les longueurs des fibres varient, elles appliquent un

déphasage différent à la sortie. La lumière traverse ensuite une zone ouverte différente (4) et interfère avec les entrées des guides d'onde de sortie (5), ce qui fait que chaque canal de sortie ne reçoit que la lumière d'une longueur d'onde particulière. La figure II.5 montre le fonctionnement de ce composant. Les lignes rouges montrent uniquement le chemin de la lumière. De (5) à (1), le trajet lumineux est un multiplexeur, et de (1) à (5), c'est un démultiplexeur.

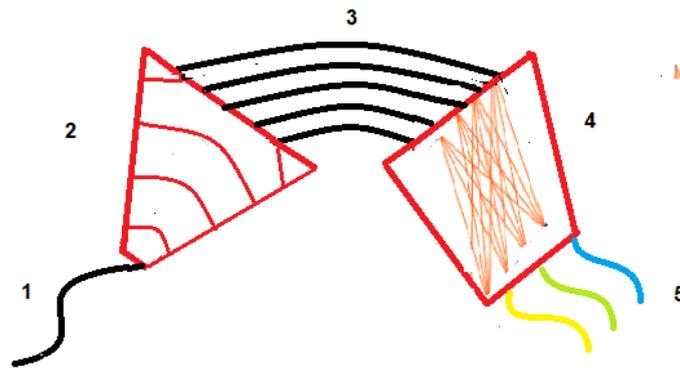


Figure II. 5: Le fonctionnement d'un Mux à réseau de phase [29].

II.2.4 Applications des multiplexeurs et démultiplexeurs dans les systèmes de télécommunications

Dans les télécommunications, la bande passante est la principale ressource rare ; les utilisateurs souhaitent transmettre à des débits binaires plus élevés et les fournisseurs de services souhaitent offrir davantage de services, ce qui nécessite un système à haut débit, plus rapide et plus fiable. Plusieurs signaux peuvent être combinés et transmis d'un endroit à un autre à l'aide d'un système de multiplexage et séparés à la sortie à l'aide d'un démultiplexeur tout en utilisant moins de coûts matériels. Le multiplexeur optique assure la commutation optique des signaux dans les télécommunications et autres domaines du traitement et de la transmission du signal. On peut aussi l'utiliser dans l'internet de la prochaine génération. Il est également utile pour le traitement et la numérisation des images. Les applications concernent aussi la sélection d'un mode laser, la modulation non linéaire [30].

II.3 Diviseur de puissance à base de fibres à cristaux photoniques

II.3.1 Compréhension du concept de division de puissance dans les fibres optiques

Afin de maximiser la fonctionnalité des circuits du réseau optique et d'atteindre la branche des faisceaux lumineux, les diviseurs optiques comportent souvent de nombreuses bornes d'entrée et de sortie. Un diviseur optique passif peut diviser ou séparer un seul faisceau lumineux

incident en plusieurs faisceaux lumineux en fonction du rapport. Un exemple simple de la façon dont un séparateur optique divisé 1x4 peut diviser un seul faisceau lumineux entrant en quatre faisceaux lumineux distincts est illustré à la figure II.6. Ces diviseurs optiques individuels divisés 1x4 peuvent ensuite être utilisés pour transmettre les quatre faisceaux lumineux séparés. Chaque utilisateur à l'extrémité du diviseur à fibre optique sortant, par exemple, peut utiliser le réseau avec une bande passante de 250 Mbps si le diviseur à fibre optique entrant à une bande passante de 1 000 Mbps [31].

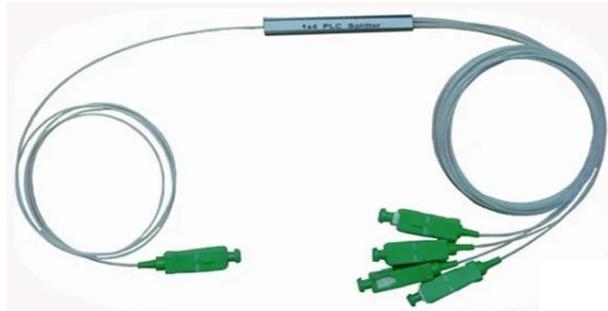


Figure II. 6 : Exemple d'un diviseur optique.

II.3.2 Types des Diviseurs de puissance

II.3.2.1 Diviseurs de puissance en Y

Un diviseur de jonction de type Y est constitué d'un guide d'entrée, une partie de jonction en Y et deux à quatre guides de sortie. On peut obtenir autant de sorties que l'on souhaite en les empilant les unes sur les autres. L'avantage d'utiliser ce type de composant est qu'il offre une réponse spectrale plate pour une large gamme de longueurs d'onde tout ou rien.

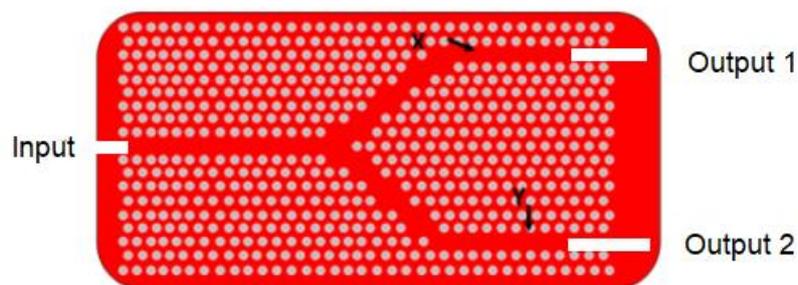


Figure II. 7: Exemple d'un diviseur de puissance en Y [13].

En conséquence, cette partie a la capacité de diviser un signal provenant d'un seul guide en plusieurs guides de sortie. De plus, les signaux provenant de nombreux guides d'entrée peuvent être combinés en un ou plusieurs guides de sortie. L'avantage d'avoir des pertes plus minimales

est qu'elles varient de 1 à 2 dB pour des diviseurs de 1 vers 2 jusqu'à 1 vers 8 [32]. La figure II.7 montre un exemple d'un diviseur en Y.

II.3.2.2 Diviseurs de puissance en T

Un réseau simple à trois ports appelé répartiteur de puissance et T peut être utilisé pour la division ou la combinaison de puissance. Il peut être mis en service en utilisant différents types de lignes de transmission [31]. La figure II.8 présente un exemple d'un diviseur de puissance photonique en jonction T, T ou la puissance de la longueur d'onde injecté en entrée est divisé en égalité sur les deux ports de sortie, avec R1 et R2 sont les rayons des tiges indiqués dans la figure.

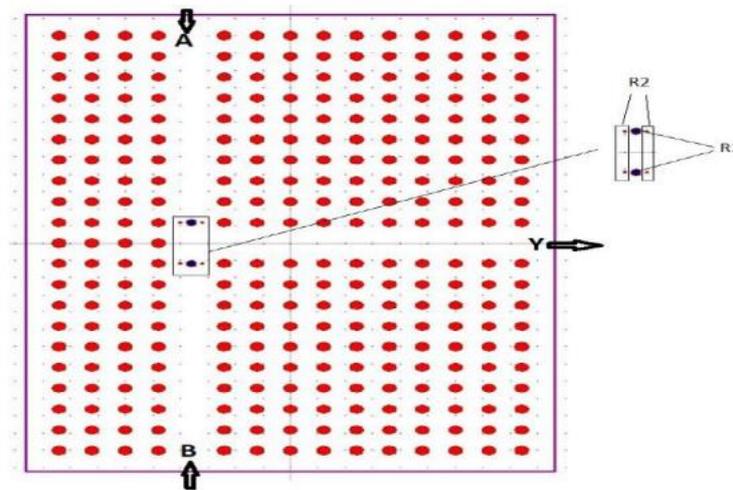


Figure II. 8: Un exemple d'un diviseur de puissance en jonction T [33].

II.3.2.3 Diviseurs directionnels

Un diviseur directionnel [34] est l'intersection de chaque ligne d'alimentation avec les chemins menant aux prises est marquée par un diviseur directionnel. La terminaison de chaque ligne d'alimentation par une charge adaptée permet un fonctionnement tout ou rien, simplifiant grandement la description d'une telle structure.

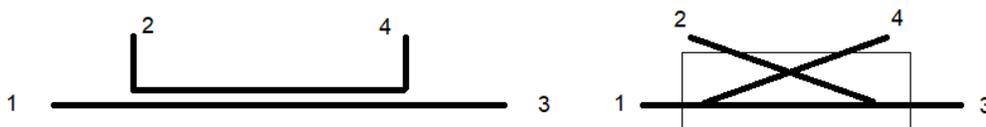


Figure II. 9: Un exemple d'un diviseur directionnel [35].

L'un des N éléments rayonnants d'un réseau linéaire est connecté à chaque sortie. On remarque que l'inclinaison des lignes d'alimentation change progressivement d'une entrée à l'autre. Le but est d'utiliser une progression arithmétique pour créer par entrée un déphasage. La figure II.9 montre un exemple d'un diviseur directionnel [34].

Les coupleurs directs fonctionnent en utilisant les concepts d'interférence à la fois constructive et destructrice entre deux ondes. En réalité, le signal entrant est divisé en deux ondes qui entrent dans la porte isolée en opposition de phase et s'annulent par conséquent, et deux ondes qui arrivent en phase à la porte couplée et s'additionnent [36]. Les paramètres de ce composant sont :

- Le couplage :

$$C(\text{dB}) = 10 \log P_3/P_1 \quad \text{II.2}$$

- L'isolation :

$$I(\text{dB}) = 10 \log P_4/P_1 \quad \text{II.3}$$

- La directivité :

$$D(\text{dB}) = I(\text{dB}) - C(\text{dB}) \quad \text{II.4}$$

II.3.3 Avantages et performances des diviseurs de puissance à base de fibres à cristaux photoniques par rapport aux techniques traditionnelles

Le diviseur de puissance à base de fibres à cristaux photoniques présente des avantages lorsqu'il est utilisé dans des applications de communications optiques, comme la technologie FTTH par rapport au diviseur traditionnel [37]. Ces diviseurs sont des diviseurs optiques qui utilisent les propriétés des FCP pour contrôler la propagation de la lumière le long d'une direction spécifique, et présentent plusieurs avantages tels que :

- Une faible perte de propagation qui est dû au confinement fort de la lumière
- Une large bande passante
- Une faible diaphonie
- Une forte dispersion chromatique
- Une flexibilité de la conception vu Les propriétés optiques des FCP qui peuvent être ajustées en modifiant la géométrie de la structure, permettant ainsi une grande variété de designs pour des applications spécifiques, et beaucoup d'autres avantages qui facilite les réalisations des dispositifs dans les circuits intégrés et les dispositifs de la télécommunication (le potentiel

des dispositifs intégrés) vu que les FCP sont des matériaux de taille micronique, et donc ça nous permet de réduire la taille de ces appareils [38].

II.4 Extracteur de signal à base de fibres à cristaux photoniques

II.4.1 Importance des multiplexeurs a insertion/extraction de signal dans les applications de traitement optique du signal

Le multiplexeur insertion/extraction ou appelé en anglais Optical add-drop multiplexeur (OADM) est un élément essentiel des réseaux de fibre optique. L'avantage d'accélérer la vitesse et l'efficacité de la manipulation du flux optique est fourni par la combinaison du multiplexage OADM et WDM. Sans l'OADM, il aurait fallu installer un nœud à chaque endroit où un signal était destiné à être extrait ou introduit dans le flux, ce qui aurait nécessité plus d'investissement. Dans les systèmes de transmission longue distance traditionnels, la capacité et la portée de transmission du système ont été mises en valeur. Cependant, dans les réseaux d'accès métropolitains, l'abordabilité et l'adaptabilité du système sont primordiales [39]. L'OADM est libre d'examiner les deux demandes. L'OADM a plusieurs types de service et parmi eux on a :

- Contrôle et alarmes SCADA
- La mise en réseau
- Vidéo SD / HD
- Audio Professionnel
- Télécommunications

II.4.2 Principes de fonctionnement des multiplexeurs a insertion/extraction de signal à base de fibres à cristaux photoniques

Le mot «add » décrit la propension d'un appareil à ajouter un ou plusieurs canaux de longueur d'onde à un signal WDM existant. Tandis que "Drop" désigne l'extraction d'un ou plusieurs canaux et la redirection du signal vers un chemin réseau différent. L'ODAM permet de faire tomber sélectivement différentes longueurs d'onde circulant dans une fibre. Il peut être configuré pour modifier le contenu des données tout en ajoutant la même longueur d'onde au flux de données. La figure II.10 nous montre le fonctionnement de ce composant [40].

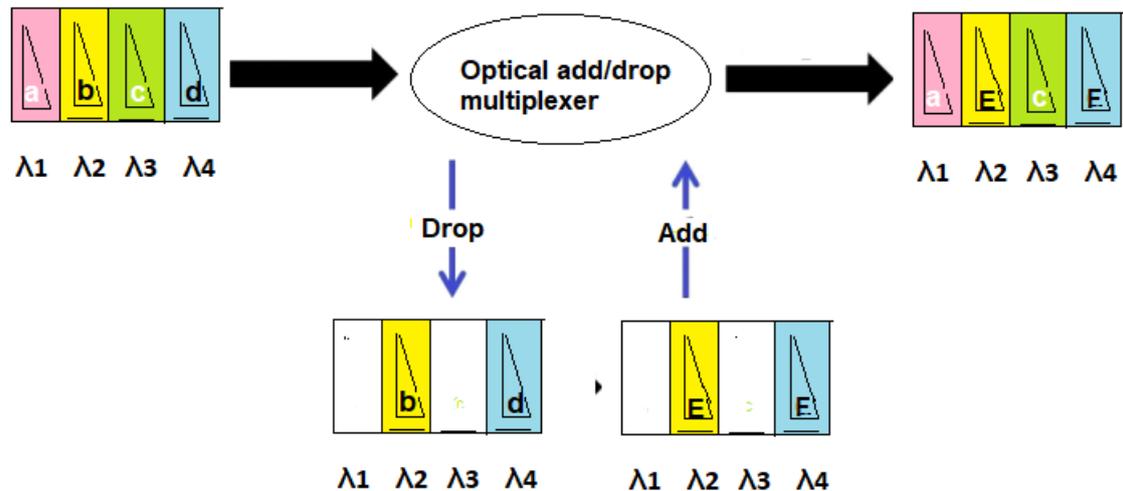


Figure II. 10 : Le principe du fonctionnement du OADM [25].

La figure II.11 illustre le principe de fonctionnement de ce composant. Deux réseaux de Bragg sont photodéposés, les longueurs d'antenne non réfléchies émergent dans le port 4, mais la longueur d'antenne Bragg insérée est extraite dans le port 2 après réflexion du réseau en raison du déphasage $\pi/2$ provoqué par chaque coupleur. La longueur de l'onde de Bragg placée dans le port 3 est extraite symétriquement dans le port 4 et ajoutée à celles du port 1.

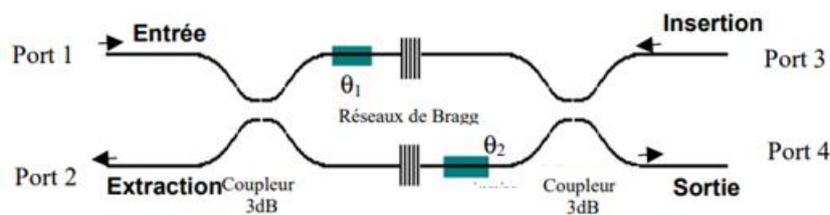


Figure II. 11: Un exemple d'un extracteur de signaux optique.

II.4.3 Utilisation des extracteurs de signal pour l'amplification sélective et la détection de signaux optiques

En raison de sa simplicité de configuration (flexibilité), de la mise à niveau, détection sélective et d'amplification, le MAN (réseau métropolitain) est le principal domaine pour l'application OADM. En tant que meilleure plate-forme de transport multiservices pour l'application MAN, OADM permet également de multiplexer un signal de multiplexage de différentes longueurs d'ondes à différents endroits. L'OADM est encore en développement même si ces composants relativement petits sont essentiels pour produire des appareils compacts, monolithiques et

rentables. Une mesure optique nécessite l'extraction d'un signal contenant des informations sur la taille à évaluer, comme toute autre mesure physique. Expérimentalement, une mesure est toujours représentée par la détection d'une intensité (ou d'une énergie) à l'aide du récepteur.

II.5 Autres composants à base de fibres à cristaux photoniques

II.5.1 Filtres optiques à base de fibres à cristaux photoniques

Les arrangements périodiques de matériaux capables de stocker, filtrer ou diriger la lumière sont appelés fibres à cristaux photoniques. Un filtre est un élément ou une fonction dont l'objectif est de sélectionner une ou plusieurs longueurs d'onde et d'en éliminer d'autres. On distingue plusieurs types de filtres et parmi eux on a :

II.5.1.1 Filtres à réseau de Bragg

Un réseau de Bragg, ou changement permanent de l'indice de réfraction, se produit lorsque la fibre optique est exposée à un faisceau laser ultraviolet. Une petite partie de la lumière incidente est réfléchiée chaque fois que l'indice de réfraction fluctue. L'ensemble des ondes lumineuses réfléchies est combiné en une large gamme de réflexion à une longueur d'onde particulière, lorsqu'un mode de couplage très puissant est présent ; c'est ce qu'on appelle la condition de Bragg. La longueur d'onde à laquelle la réflexion a eu lieu est appelée « longueur d'onde de Bragg ». À la longueur de Bragg, la réflectivité de la lumière entrante atteint un pic. La figure II.12 montre le principe de ce composant.

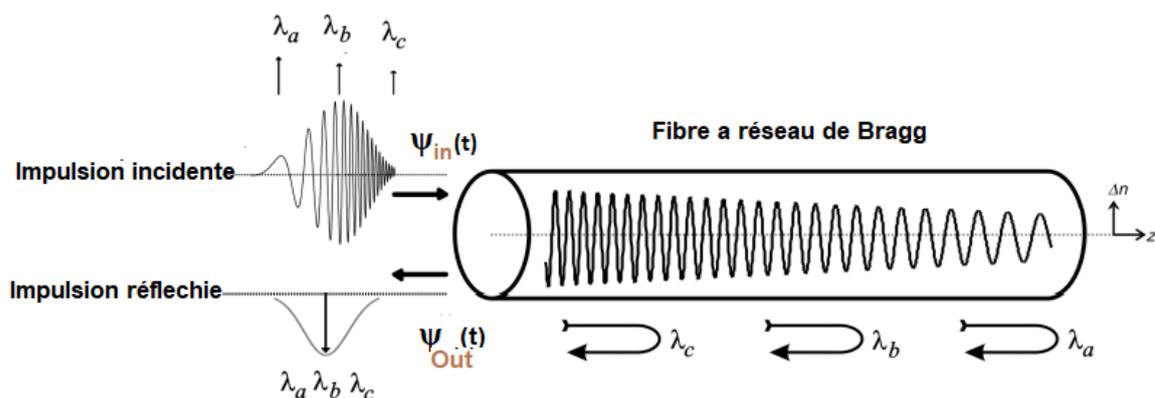


Figure II. 12: Principe d'un filtre à réseau de Bragg.

II.5.1.2 Filtre passe bas

Les filtres répertoriés ci-dessous atténuent et bloquent les hautes fréquences lors de la transmission et permettent le passage de toutes les longueurs d'onde en dessous de la longueur

d'onde de coupure cut-off spécifiée (Figure II.13). Dans de nombreux appareils photo numériques, il est placé devant le capteur d'image. Son objectif principal est d'éliminer les informations haute fréquence des images et de réduire les phénomènes de moiré et d'altération des couleurs provoqués par les ondes haute fréquence [41].



Figure II. 13: Un exemple d'un filtre passe-bas.

II.5.1.3 Filtre passe haut

Les fréquences inférieures sont atténuées par les filtres passe haut, qui transmettent et laissent passer toutes les longueurs d'onde situées au-dessus de la longueur d'onde de coupure cut-on spécifiée (figure II.14) [42].



Figure II. 14: Un exemple d'un filtre passe-haut.

II.5.1.4 Filtre dichroïque

D'origine grecque, le mot « dichroïque » décrit la bichromie physique qui se produit dans les cristaux lorsque la lumière les traverse. Les filtres dichroïques sont utilisés pour séparer les couleurs en fonction des interférences électriques.

Seules certaines longueurs d'onde peuvent traverser ces verres en raison de leur traitement qui reflète le reste du spectre. Plus précisément, ils permettent d'ajuster au mieux la lumière

provenant d'une source d'éclairage à l'objet éclairé. Ils sont principalement appliqués à l'éclairage des aliments [43].

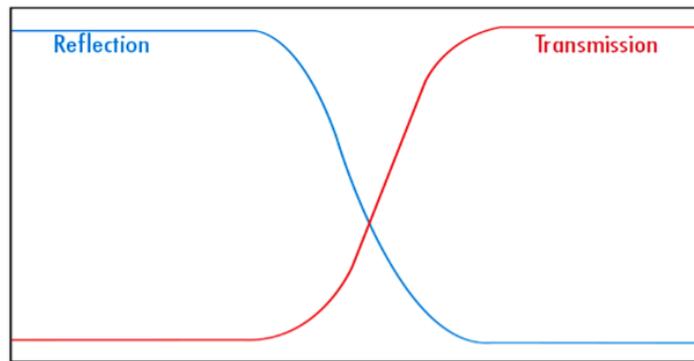


Figure II. 15: Un exemple d'un filtre dichroïque.

II.5.1.5 Filtre passe et coupe bandes

Les filtres passe-bande sont utilisés pour transmettre sélectivement une partie du spectre tout en rejetant les autres longueurs d'onde. Seule une plage de bandes ou de longueurs d'onde entre une petite et une grande longueur d'onde de coupure du filtre est autorisée à passer à travers les filtres passe-bande (figure II.16) [44].



Figure II. 16: Un exemple d'un filtre passe bande.

Contrairement au filtres passe-bandes, la petite et la grande longueur d'onde de coupure seulement sont autorisées à passer à travers les filtres coupe bandes [45].



Figure II. 17: Un exemple d'un filtre coupe bande.

II.5.2 Isolateurs optiques à base de fibres à cristaux photoniques

II.5.2.1 Le Principe des isolateurs optique

Un isolateur est un composant optique qui permet la propagation distincte de la lumière dans un sens unique. Les processus physiques sous-jacents à un isolateur optique peuvent être simulés à l'aide du modèle simple d'un électron lié élastiquement [46].

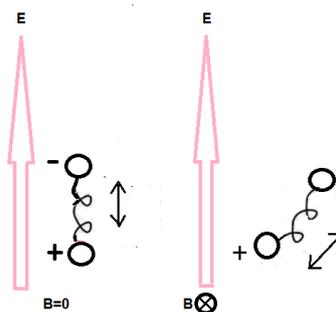


Figure II. 18: Exemple d'un électron élastiquement lié.

La force de Lorentz sous-jacente au dipôle ajoute un terme qui dépend du champ magnétique lorsque le matériau est exposé à un champ magnétique. En conséquence, ce composant manque de réciprocité. Le ressort polarisé inversement, qui revient à sa position de départ à 90°, a une valeur de 45° [47].

$$F_L = -e.E \quad \text{II.5}$$

Avec e est la charge élémentaire de l'électron, et E est le vecteur champ électrique de l'onde. La figure II.19 montre le principe de fonctionnement de ce composant.

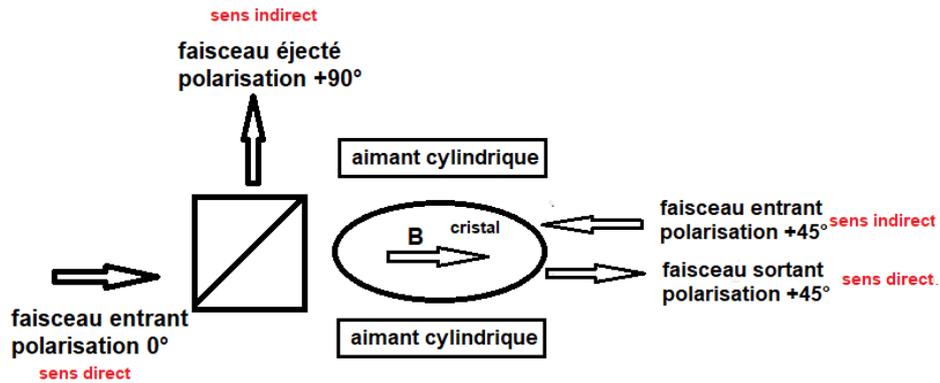


Figure II. 19: Schéma du principe d'un isolateur [48].

II.5.2.2 Application des isolateurs optique

Les isolateurs optiques peuvent assurer une protection pour les sources laser et les amplificateurs réfléchissant la lumière. Ce pourrait être une bonne idée d'installer des isolateurs lors de l'utilisation d'amplificateurs en série pour empêcher l'amplification des photons spontanés. Dans le domaine des communications, une amplification régulière du signal est nécessaire et les amplificateurs doivent être entourés d'isolateurs.

Dans les résonateurs, les propriétés de polarisation des isolateurs peuvent être utilisées soit pour forcer une polarisation linéaire, soit pour produire une rotation de phase avec une rotation de polarisation non linéaire.

Ils sont généralement utilisés pour protéger les cavités laser et autres oscillateurs optiques parasites des réflexions [49].

II.5.3 Autres dispositifs à base de fibres à cristaux photoniques émergents et innovants

II.5.3.1 Les capteurs optiques

Un capteur optique est un dispositif qui utilise des ondes lumineuses traversant une ou plusieurs fibres optiques pour collecter des données indicatives des grandeurs mesurées. La lumière transmise ou réfléchi par la fibre peut alors subir une modulation en amplitude, en phase ou en fréquence due à la transduction. Dans ce cas, un photodétecteur qui émet un signal de sortie, généralement un signal électrique, peut détecter le signal de mesure [50].

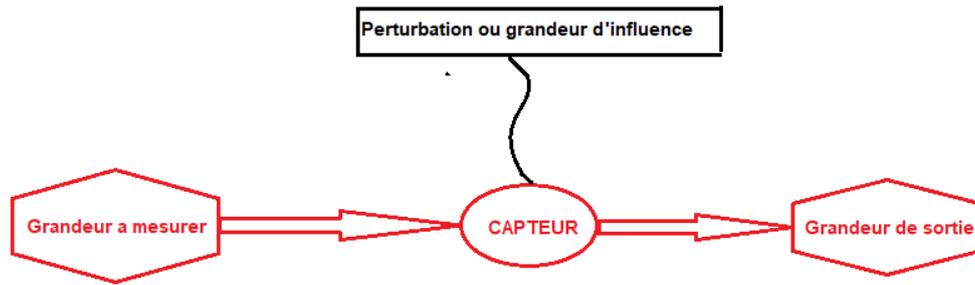


Figure II. 20: Schéma représentatif d'un capteur.

II.5.3.2 Les amplificateurs et lasers

Un dispositif qui amplifie un signal lumineux sans le convertir d'abord en signal électrique, puis en employant des techniques d'amplification électronique conventionnelles, est appelé « amplificateur optique ». Le domaine des capteurs et des télécommunications devrait grandement bénéficier de l'utilisation de fibres monomodes avec des amplificateurs laser dopés aux terres rares. Par exemple, la largeur de la bande de fluorescence des ions des terres rares de la silice peut permettre de concevoir des sources accordables et les amplificateurs [51].

- Amplificateur a fibre dopée : Un amplificateur à fibre optique fonctionne de la même manière qu'un laser. Une section de fibre optique est dopée et pompée optiquement avec un laser pour exciter les ions dopants. Les ions présents dans cette zone de la fibre optique sont désactivés lorsqu'un signal lumineux les traverse, produisant un photon totalement identique à la lumière incidente. Le signal lumineux a ainsi doublé (Figure II.21)[52].

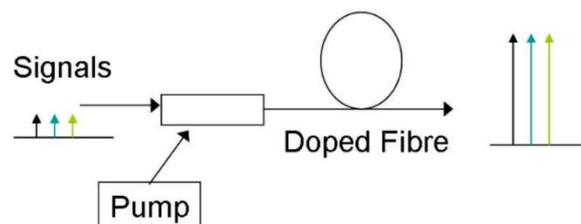


Figure II. 21: Un amplificateur a fibre dopée.

- Amplificateur a effet Raman : Au lieu des transitions atomiques des fibres dopées aux ions terres rares, les amplificateurs Raman s'appuient sur un échange d'énergie par diffusion Raman. Chaque substance possède un spectre Raman unique. Un faisceau laser de pompage sera injecté dans la fibre (soit dans le sens de propagation du signal, soit, préférentiellement, dans le sens opposé), amplifiant la lumière vers les basses

fréquences de l'ordre de 13,2 THz (térahertz), typiques de la désintégration Raman dans silice (Figure II.22) [53].

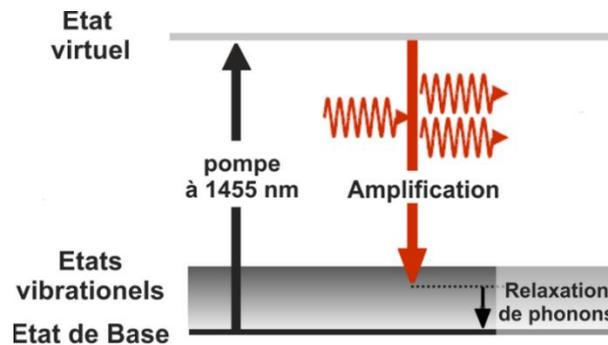


Figure II. 22: Un amplificateur a effet Raman [53].

II.6 Applications des composants à base de fibres à cristaux photoniques

II.6.1 Intégration des composants à base de fibres à cristaux photoniques dans les systèmes de communication haut débit

Théoriquement, on pense que chaque composant construit à l'aide de fibres à cristaux photoniques à un taux de transmission de 100 %, un débit binaire élevé et presque aucune réflexion. Commençons par le multiplexage optique, qui combine plusieurs trains de données à faible débit) pour créer un train de données à débit extrêmement élevé [5].

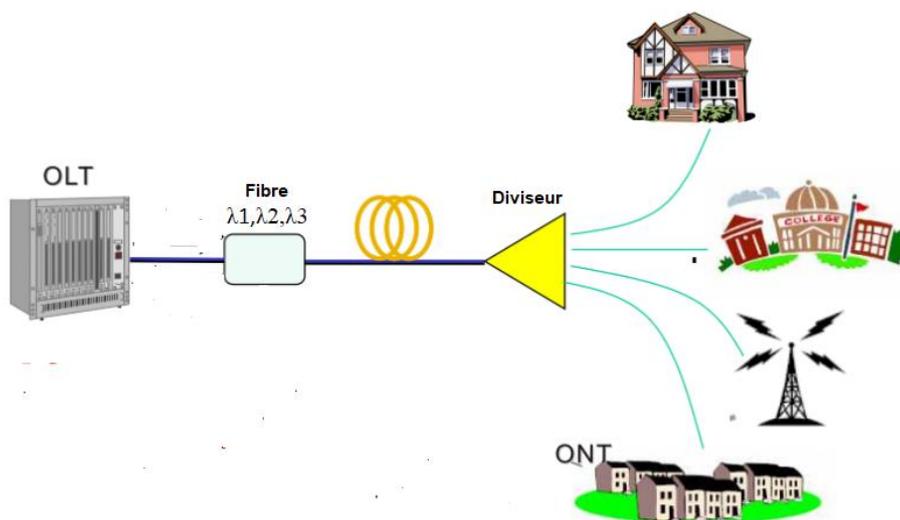


Figure II. 23: Un schéma de la technologie de fibre optique jusqu'au domicile (FTTH).

Avec les systèmes optiques, le but est d'utiliser au maximum l'énorme bande passante disponible, contrairement au multiplexage qui servait autrefois à répartir la bande passante

limitée du support entre ses différents émetteurs. Afin de mettre en œuvre des communications optiques, il est nécessaire de ré-amplifier périodiquement le signal à l'aide d'un amplificateur optique car l'atténuation à longue distance peut atteindre plusieurs dB. Dans le contexte des technologies de communication, les diviseurs de puissance jouent un rôle essentiel dans les circuits utilisés dans les réseaux optiques [54]. En permettant le partage d'une seule interface PON (Passive Optical Network) entre plusieurs abonnés, ils jouent un rôle important dans les réseaux FTTH (Fibre to the Home). Ils offrent également des performances optiques supérieures, une fiabilité et une stabilité élevées pour répondre aux diverses exigences de l'application FTTH [55].

Le développement incroyablement rapide des systèmes de communication nécessite le développement de nouveaux composants pour les équipements de communication, telles que les composants de base FCP. Le développement de la technologie de multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) a permis d'utiliser toute la capacité de la fibre optique et de générer des débits de données très élevés. Il permet la combinaison de signaux, la transmission sur une seule fibre optique (multiplexage), puis le démultiplexage du signal par des utilisateurs individuels [56, 57]. Les principales applications de cette technologie sont la 5G et la FTTH.

Dans ces systèmes, les composants à base de FCP sont considérés comme une solution pour résoudre les problèmes causés par la dispersion, la non-linéarité, la polarisation.

L'incorporation de composants à fibres photoniques dans les systèmes de communication haut débit ne se fait pas sans difficultés techniques. La bande nécessaire pour supporter des débits élevés, ainsi que la compatibilité avec les protocoles de communication actuels doit être prise en compte. Une faible latence et une transmission de données fiable sur de longues distances doivent également être garanties. Une étude approfondie et une innovation continue sont nécessaires pour améliorer les capacités des systèmes de communication haut débit afin de résoudre ces problèmes.

II.6.2 Utilisation des composants pour les réseaux optiques à grande échelle

Les dispositifs optiques intégrés peuvent transmettre des données à des vitesses élevées sur de longues distances avec peu d'atténuation du signal et une large bande passante, car ils contiennent des composants tels que des modulateurs optiques, des multiplexeurs, des diviseurs et des filtres...

L'utilisation de la technologie des dispositifs optiques intégrés permet de miniaturiser et d'intégrer de nombreuses fonctions optiques sur une seule puce, produisant ainsi des systèmes optiques plus rapides, plus compacts et plus efficaces tout en ayant des coûts de fabrication inférieurs. Ils ont de nombreuses utilisations, notamment dans les communications optiques, la spectroscopie [58], l'imagerie médicale [59], la science des matériaux [60], et le multiplexage.

De nombreuses opportunités pour les réseaux optiques à grande échelle sont rendues possibles par l'utilisation de composants basés sur des fibres photoniques. Ces éléments permettent une capacité de multiplexage importante, une faible atténuation du signal et une transmission à haut débit. Ils offrent également un contrôle amélioré de la dispersion et une résistance accrue aux perturbations extérieures [61]. Pour répondre réellement aux demandes croissantes des réseaux optiques à grande échelle, il s'agit d'une solution prometteuse.

II.6.3 Applications dans les domaines de la télémétrie, de la détection optique et de la spectroscopie

Le domaine de la télémétrie présente de nombreuses utilisations pour les composants à FCP. Ils permettent de mesurer avec précision divers paramètres, dont la pression, la température, la déformation et bien d'autres. Ces composants sont parfaits pour la surveillance et le contrôle à distance car ils offrent un niveau élevé de sensibilité et une large plage de fonctionnement. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications différentes, telles que la télé-médecine, les réseaux de capteurs, la surveillance environnementale et la surveillance des infrastructures. Les systèmes de télémétrie à distance sont plus efficaces et sécurisés grâce à ces avancées technologiques [62].

Un laser est un appareil qui utilise un processus d'amplification optique pour émettre un faisceau lumineux cohérent. La technologie laser a un large éventail d'applications, telles que :

- La télémétrie laser [63]
- La spectroscopie laser [64]
- L'imagerie holographique [65].

Les photodiodes sont des éléments qui transforment la lumière incidente en courant électrique et sont utilisées dans des applications telles que la détection de présence/position, la mesure de l'intensité lumineuse et la détection d'impulsions optiques à grande vitesse [66]. Les mesures de mouvement, de vibration, de température, de pression, d'humidité, d'ondes acoustiques et d'autres phénomènes sont toutes traitées par le capteur optique [67]. Il permet une large

détection de paramètres physiques comme la température, de paramètres chimiques comme le pH, ou encore de paramètres biologiques comme la concentration de molécules spécifiques.

Les composants à base des FCP permettent également l'exécution d'opérations de mesure délicates dans des environnements difficiles et la détection de signaux optiques faibles. Ils confèrent à la spectroscopie pour l'analyse des substances une haute résolution spectrale et une sensibilité accrue [68]. Ces applications sont essentielles dans divers domaines, notamment l'industrie, la médecine, et les recherches scientifiques.

II.7 Perspectives et défis futurs

II.7.1 Perspectives d'avenir pour l'évolution des composants à base de fibres à cristaux photoniques

Les composants à base des FCP offrent de nombreuses perspectives fascinantes sur l'évolution. Ils pourraient améliorer les technologies de communication en matière de capteurs, quantiques et optiques. C'est un domaine d'étude passionnant.

Les domaines de la médecine [69], les systèmes d'imagerie avancée et de détection [70], et de la réalité virtuelle et augmentée [71] pourraient tous bénéficier de leur utilisation. Ils peuvent utiliser diverses techniques créatives grâce à leur capacité à contrôler la lumière avec précision et efficacité.

II.7.2 Défis technologiques à relever pour optimiser les performances et l'intégration des composants dans les systèmes optiques

Pour maximiser la fonctionnalité et l'intégration des composants dans les systèmes optiques, il est nécessaire de surmonter un certain nombre d'obstacles technologiques, tels que la réduction des pertes de transmission, l'amélioration de l'efficacité de conversion de la lumière, la miniaturisation des composants et le contrôle de la dissipation thermique. Pour permettre la production en masse de ces composants, il est également crucial de développer des techniques de fabrication abordables et reproductibles. Le développement de techniques de couplage efficaces entre les FCP et d'autres composants optiques est crucial en plus de ces difficultés. Des travaux doivent être effectués pour réduire les coûts de production, améliorer la stabilité et la fiabilité des composants et accroître l'accessibilité des composants. Trouver des moyens d'intégrer de manière transparente ces éléments dans les conceptions architecturales actuelles est également crucial [72].

II.8 Conclusion

Nous avons présenté les composants optiques, leurs principes et leurs utilisations dans des systèmes de communication à haut débit et à grande échelle, en soulignant les avantages qu'ils offrent par rapport aux composants électriques. Une intention particulière a été réservée au Mux/Demux, diviseur de puissance et extracteur de signal qui ont fait l'objet de notre travail de thèse. On a fait une recherche bibliographique approfondie sur les composants optiques à base des FCP pour tirer les briques de base afin de bien se situer. La propriété intéressante de ces composants basés sur FCP est la capacité de modéliser de manière réaliste et précise les propriétés optiques, permettant de prévoir leur comportement dans des situations réelles. De plus, ils permettent une grande flexibilité et une analyse rapide et efficace de diverses configurations structurelles, ce qui accélère les processus d'idéation et d'optimisation des structures innovantes pour des applications optiques variées.

L'état de l'art des techniques de modélisation des fibres à cristaux photoniques sera discuté dans le chapitre suivant.

Références

- [1] M. Le Goff, "Etude Et Développement D'un Banc De Mesure Quasi Optique Pour La Caractérisation De Composants Passifs Et Actifs: Application À La Définition D'une Structure D'amplificateur Quasi Optique,Thesis, Brest, 1999.
- [2] R. Alrifai, "Fonctions Optiques Robustes Dans Des Structures De Guides D'onde: Liens Avec Des Phénomènes Quantiques,Thesis, Université de Lorraine, 2022.
- [3] P. Yu, H. Qiu, T. Dai, R. Cheng, B. Lian, W. Li, H. Yu, and J. Yang, "Ultracompact Channel Add-Drop Filter Based on Single Multimode Nanobeam Photonic Crystal Cavity", "*Journal of Lightwave Technology*", vol. 39, no. 1, pp. 162-166, 2020.
- [4] D. Drolet, "Fibre a Deux Coeurs Comme Coupleur Directionnel,Thesis, Université Laval, 1994.
- [5] C. Kherici, "Etude Comparative Des Différentes Méthodes De Multiplexage Optique Pour Les Télécommunications,Thesis, 2021.
- [6] M. Manimaraboopathy, G. S. Kumar, J. Mohanraj, and M. Valliammai, "Realization of All-Optical Multiplexer–Demultiplexer in Mid-Ir Wavelengths Using Triple-Core Photonic Quasi-Crystal Fiber", "*Optics Communications*", vol. 481, p. 126556, 2021.
- [7] V. V. Thalakkatukulathil, D. Passerieux, and A. Crunteanu, "Commutateurs Rf Rapides Utilisant L'activation Optique Des Films De Dioxyde De Vanadium (Vo2),conference proceedings," in *XXIèmes Journées Nationales Microondes*, 2019.
- [8] P. Travers, F. Louf, P.-A. Boucard, Y. Léguillon, G. Arpison, I. Ghorbel, V. Crozatier, and V. Kemlin, "Mesure De Champ De Déformation Par Capteur À Fibre Optique,conference proceedings," in *Congrès Français de Mécanique 2022-CFM 2022*, 2022.
- [9] E. Weckenmann, "Applications Des Modulateurs En Silicium Pour Les Communications Optiques Haut Débit À Courte Portée,Thesis, Université de Rennes, 2023.
- [10] M. De, T. K. Gangopadhyay, and V. K. Singh, "Prospects of Photonic Crystal Fiber as Physical Sensor: An Overview", "*Sensors*", vol. 19, no. 3, p. 464, 2019.
- [11] Z. Lv, Z. Yang, Q. Li, F. Li, Y. Wang, W. Zhao, and X. Yang, "Photonic Crystal Rod-Based High-Performance Ultrafast Fiber Laser System", "*High Power Laser Science and Engineering*", vol. 8, p. e40, 2020.
- [12] E. Ducharme, "Étude Des Paramètres De Conception D'un Coupleur Fusionné En Verre Fluoré,Thesis, Polytechnique Montréal, 2022.
- [13] F. Kiheli and K. Djebrit, "Conception Des Diviseurs De Puissance Optique 1x2, 1x3 Et 1x4 À Base Des Cristaux Photoniques,Thesis, UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA, 2020.
- [14] M. Najem, "Conception, Fabrication Et Caractérisation D'un Capteur Optique Multimodal À Nanostructures,Thesis, Université de Montpellier (2022-....), 2022.
- [15] M.-N. N. Sadiq, M. Le Roy, A. Pérennec, M.-B. Martin, P. Laurent, A. Pérénec, N. Martin, D. Passerieux, A. Crunteanu, and R. Boyer, "Caractérisations Rf Et Optique De Commutateurs Hyperfréquences Ultra-Rapides À Base De Vo2,conference proceedings," in *16 èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux 2020, Toulouse, France*, 2020, pp. 1-4.
- [16] L. Deniel, D. Perez-Galacho, E. Weckenmann, M. Gay, C. Baudot, L. Bramerie, F. Boeuf, L. Vivien, C. Peucheret, and D. Marris-Morini, "Génération De Peigne De

- Fréquence Électro-Optique Par Un Modulateur Mach-Zehnder En Silicium,conference proceedings," in *Journée du Club Optique et Micro-ondes (JCOM 2019)*, 2019.
- [17] L. Bey and M. R. E. Beghoul, "Etude D'une Liaison Optique Pour Les Télécommunications,Thesis, Université de Jijel, 2019.
- [18] L. S. Boufrida Naim, "Planification Et Dimensionnement D'un Réseau D'accès Optique",memoire de fin d'étude, 2021.
- [19] M. E. G. Electric, "Etude Comparative Du Multiplexage Wdm Et Otdm Dans Les Systèmes Radio Sur Fibre,Thesis, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2021.
- [20] F. Payoux, "Étude Des Réseaux D'accès Optiques Exploitant Le Multiplexage En Longueur D'onde,Thesis, Télécom Bretagne, 2006.
- [21] A. Dafeur, "Optimisation Du Routage Multicast Dans Les Réseaux Optiques Wdm,Thesis, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, 2021.
- [22] G. Simon, "Introduction Des Technologies De Multiplexage En Longueur D'onde Dense Dans Les Futures Générations De Réseaux D'accès Optique,Thesis, Paris, ENST, 2016.
- [23] V. Beugin, "Étude De La Photosensibilité Dans Les Guides Planaires Et Les Fibres À Cristal Photonique,Thesis, Lille 1, 2007.
- [24] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C. E. Ouadah, "Numerical Analysis of 1 X 4 Photonic Crystal Fiber Multiplexer", "*Progress In Electromagnetics Research M*", vol. 118, pp. 127-136, 2023.
- [25] D. Mechin, "Etude Et Réalisation De Multiplexeurs Insertion-Extraction À Réseaux De Bragg,Thesis, Université Jean Monnet-Saint-Etienne, 2001.
- [26] M. Bennoune,"*Contribution à La RéAlisation De Composants Optiques à Base Des Fibres MicrostructuréEs Air/Silice*",Book,"Library and Archives Canada=Bibliothèque et Archives Canada, Ottawa",2008
- [27] Y. Chen, "Integrated Optical Phased Array for Scalable Vortex Beam Multiplexing", 2023.
- [28] H. Ramenah, "Multiplexage En Volume De Modulations Physiques Opérant Comme Réseaux Diffractants De Phase Dans Les Couches Épaisses De Polypeptides Applications À Des Mémoires Numériques,Thesis, Université Louis Pasteur (Strasbourg)(1971-2008), 1996.
- [29] E. S. D. T. De Casablanca, "Détermination De La Structure D'un Phasar Dans La Filière Inp",conference, 2005.
- [30] G. Hill, I. Hawker, and P. Chidgey, "Applications of Wavelength Routing in a Core Telecommunication Network,conference proceedings," in *International Conference on Integrated Broadband Services and Networks, 1990.*, 1990: IET, pp. 63-67.
- [31] A. Boudraa and R. Bouhali, "Etude Et Conception D'un Diviseur De Puissance Reconfigurable Pour Les Applications Mobiles,Thesis, university of M'sila.
- [32] A. Fedaouche, "Application De La Méthode Des Différences Finies Dans Le Domaine Temporel Fdtd-2d Pour L'analyse Et L'optimisation De Composants À Base Des Cristaux Photoniques Bidimensionnels Cps-2d Pour L'optique Intégrée,Thesis, Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid, 2018.
- [33] L. S. C. Avila and A. Peden, "Méthode Graphique De Conception Des Jonctions T Siw Pour La Division De Puissance Non Uniforme Et Équi-Phase,conference proceedings," in *JNM2013: 18èmes Journées Nationales Microondes*, 2013.
- [34] X. Hu, "Etude Et Caractérisation De Composants D'optique Intégrée Exploitant Les Propriétés Électro-Optiques D'oxydes Fonctionnels Épitaxiés,Thesis, Lyon, INSA, 2015.

- [35] B. Lakhdar, "Etude Et Conception D'un Coupleur Directionnel, Thesis, Faculte de technologie/Universite Mohamed Boudiaf-M'sila, 2015.
- [36] D. Sendid, "Coupleurs Directifs Siw Reconfigurables Multi-Standards Pour Les Systèmes De Télécommunications, Thesis, Université de Sidi Bel Abbès-Djillali Liabes.
- [37] D. Tidiani Mathieu, "Etude D'un Réseau D'accès Ofdm-Pon", memoire de fin d'étude, 2022.
- [38] A. Fedaouche, "Les Diviseurs De Puissance À Base Des Cristaux Photoniques 2d, Thesis, Éditions universitaires européennes, 2018.
- [39] I. Joindot and M. Joindot, "Influence Des Multiplexeurs D'insertion-Extraction Optiques, Fondés Sur Des Filtres En Cascade, Sur Un Réseau Dorsal Entièrement Optique, conference proceedings," in *Annales Des Télécommunications*, 2007, vol. 62: Springer, pp. 550-566.
- [40] J. J. V. Olmos, M. Tokushima, and K.-I. Kitayama, "Photonic Add-Drop Filter Based on Integrated Photonic Crystal Structures", "*IEEE journal of selected topics in quantum electronics*", vol. 16, no. 1, pp. 332-337, 2009.
- [41] C. Hoarau, "Dispositifs Accordables En Radiofréquence: Exemples D'un Adaptateur D'impédance Accordable Et D'un Filtre Passe-Bas Contrôlé Optiquement, Thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2008.
- [42] M. Duris, "Conception Et Réalisation De Filtre Optique Multicouche À Grand Nombre De Couches Minces Dans Le Domaine Spectral De 0, 3 À 15 μm , Thesis, Rennes 1, 2020.
- [43] F. Optiques and D. L'instrumentation, "Filtres Spectraux Pour Le Multiplexage De Fluorescence", "*COMPLEXES*", p. 56.
- [44] M. C. Farah and F. Salah-Belkhodja, "Conception En Technologie Microstrip D'un Diplexeur Microondes Basé Sur Des Filtres À Saut D'impédance, Thesis, 2022.
- [45] F. Le Borgne, "Etude De Résonateurs Et Filtres Coupe-Bande Planaires Accordables Par Mems Ou Diode Varactor, Thesis, Brest, 2022.
- [46] P. Chavel, "La Cohérence Temporelle En Optique Classique", "*Photoniques*", no. 111, pp. 51-55, 2021.
- [47] J.-P. Garayt, "Etude De La Réalisation D'un Isolateur Optique Intégré Sur Verre, Thesis, Université de Lyon, 2017.
- [48] W. Chekchak, E. Belaribi, and F. E. Boukerroum, "Caractérisation Et Simulation De Quelques Structures D'antennes Et Circuits Planaires, Thesis, Université de Jijel, 2022.
- [49] T. Cardinal, M. Lancry, L. Canioni, B. Poumellec, and W. Blanc, "Fonctionnaliser Le Verre Pour De Nouvelles Propriétés Optiques", "*Reflète de la Physique*", no. 74, pp. 70-75, 2022.
- [50] R. Boufenar, "Amélioration De La Sensibilité Des Capteurs Par L'utilisation Des Fibres À Cristaux Photoniques, Thesis, Université de M'sila.
- [51] I. Vasilief, "Guides D'onde Canaux Amplificateurs En Verres De Fluorures Dopés Erbium: Spectroscopie Et Amplification Optique, Thesis, Lyon 1, 2003.
- [52] D. Neveux, "Amplification Optique Dans Les Fibres Dopées Aux Terres Rares Et Photochromisme, Thesis, Grenoble INPG, 1991.
- [53] C. Chluda, "Bruit Basse Et Moyenne Fréquence Des Amplificateurs Optiques Distribués À Effet Raman, Thesis, Montpellier 2, 2006.
- [54] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C.-E. Ouadah, "1x2 Power Splitter Based on Photonics Crystals Fibers", "*Journal of Optical Communications*", no. 0, 2023.
- [55] T. Pfeiffer, P. Dom, S. Bidkar, F. Fredricx, K. Christodouloupoulos, and R. Bonk, "Pon Going Beyond Ftth [Invited Tutorial]", "*Journal of Optical Communications and Networking*", vol. 14, no. 1, pp. A31-A40, 2022.

- [56] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C. E. Ouadah, "Design of a New 2-Channel Demultiplexer Based on Photonic Crystal Fiber", *"Results in Optics"*, vol. 12, p. 100496, 2023.
- [57] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C. E. Ouadah, "Design of a Novel 1x4 Two-Dimensional Demultiplexer Based on Multicore Photonic Crystal Fiber", *"International Journal of Electronics and Telecommunications"*, pp. 469-473-469-473, 2023.
- [58] R. Hammoum, "Etude Par Spectroscopie Raman De La Structure Des Domaines Périodiquement Polarisés Dans Le Niobate De Lithium (Ppln),Thesis, Université de Metz, 2008.
- [59] J.-L. Coatrieux, J. Velut, J.-L. Dillenseger, and C. Toumoulin, "De L'imagerie Médicale À La Thérapie Guidée Par L'image-Représentation En Sciences Du Vivant (3)", *"médecine/sciences"*, vol. 26, no. 12, pp. 1103-1109, 2010.
- [60] T. Hamieh, "Cinquième Conférence Internationale Sur La Science Des Matériaux (Csm5)", 2006.
- [61] A. Fatma, "Effet D'une Hétéro-Jonction Dans Une Fibre Optique Multi-Matériau,Thesis, Faculté des Sciences et Technologies, 2018.
- [62] C. Finot, "Autour De L'équation De Schrödinger Non-Linéaire Dans Les Fibres Optiques: Similaritons, Régénération, Sources Fibrées Et Évènements Extrêmes,Thesis, Université de Bourgogne, 2009.
- [63] T. Bosch, "Modélisation De Fonctions Optoélectroniques Appliquées À La Télémétrie Laser Par Déphasage,Thesis, Toulouse, 1992.
- [64] A. F. Sougueh, "Spectroscopie Optique D'émission Et Spectroscopie Laser Pour Le Diagnostic Des Plasmas Induits Par Laser,Thesis, Université d'Orléans, 2015.
- [65] S. Hassad, "Imagerie Holographique Pour L'étude De Champs Acoustiques-Ouverture Vers La Tomographie Holographique De Champs Acoustiques,Thesis, Le Mans Université; Université Ferhat Abbas Sétif 1 Algérie, 2022.
- [66] L. Virot, "Développement De Photodiodes À Avalanche En Ge Sur Si Pour La Détection Faible Signal Et Grande Vitesse,Thesis, Université Paris Sud-Paris XI, 2014.
- [67] I. Mired, M. Debbal, and H. Chikh-Bled, "Pressure Sensing Based on Photonic Crystal Fiber by Infiltrating the Air-Holes with Water", *"Progress in Electromagnetics Research C"*, vol. 130, 2023.
- [68] N. Le Cong, "Développement D'un Spectromètre Femtoseconde À Base D'une Fibre À Cristaux Photoniques Et Photophysique Ultra-Rapide Du Vert De Malachite,Thesis, Strasbourg, 2010.
- [69] S. H. A. Tandjè, "Conception Et Caractérisation De Fibres Optiques À Modes À Moment Angulaire Orbital,Thesis, Université de Lille (2018-2021), 2019.
- [70] A. N. Ghosh, "Design, Simulations Et Expériences De Génération De Supercontinuum Dans L'infrarouge Moyen Dans Des Fibres À Cristaux Phoniques En Verre Souple,Thesis, Bourgogne Franche-Comté, 2020.
- [71] B. Meynard, "Dispositif De Réalité Augmentée Basé Sur Des Concepts De Couplage Guide D'onde/Hologramme,Thesis, Université Grenoble Alpes, 2021.
- [72] P. Russell, "Les Fibres À Cristaux Photoniques", *"Les modes de résonance acoustique dans les fibres optiques microstructurées-Applications aux capteurs répartis"*, p. 7, 2011.

*Chapitre 3 : État de l'art des
techniques de modélisation des
fibres à cristaux photoniques*

III.1 Introduction

Lors de la modélisation de fibres à cristaux photonique, des techniques mathématiques et numériques sont utilisées pour simuler la façon dont la lumière se déplace à travers ces fibres uniques [1]. Afin de créer des FCP avec des propriétés spécifiques [2], il est essentiel de pouvoir analyser et prédire leur comportement optique. La recherche en optiques et en télécommunications utilise fréquemment ces techniques.

Le calcul des modes de propagation est nécessaire afin de modéliser avec précision les FCP.

Ce calcul est réalisé en résolvant les équations de Maxwell [3], qui régissent le comportement du champ électromagnétique dans un guide d'onde tout ou rien. Le développement d'outils capables de traiter des profils transversaux aux géométries complexes et à fort contraste d'indice transversal a grandement bénéficié des progrès des méthodes de calcul.

Il est nécessaire de concevoir un modèle qui décrira avec précision les propriétés optiques des FCP car leurs propriétés optiques varient considérablement en fonction de la géométrie de la fibre, notamment du diamètre des trous d'air d et de l'espacement entre les trous adjacents Λ .

Pour prévoir la réponse électromagnétique des FCP [1], de nombreux modèles numériques ont été développés. Les chercheurs ont utilisé ces modèles pour expliquer des phénomènes physiques liés aux propriétés uniques de ces structures.

Dans ce chapitre, nous parlerons de différentes approches de modélisation, avec un accent particulier sur la méthode des faisceaux propagés que nous avons utilisée pour déterminer les caractéristiques optiques du FCP dans le chapitre suivant.

III.2 Modélisation analytique des fibres à cristaux photoniques

III.2.1 Résolution des équations de Maxwell pour les structures périodiques

La résolution des équations de Maxwell pour les structures périodiques est une méthode de modélisation utilisée dans l'étude des fibres à cristaux photoniques [4]. Ces équations décrivent les interactions entre les champs électromagnétiques et les matériaux périodiques de la fibre. Il est possible de prévoir comment la lumière se déplacera à travers la fibre et comment la structure périodique affectera ses caractéristiques optiques en résolvant ces équations. Ou, pour le dire autrement, elle permet une description mathématique du comportement de la lumière dans ces structures tout en prenant en compte leurs caractéristiques périodiques. Concevoir et

améliorer des fibres à cristaux photoniques dotées de propriétés spécifiques est désormais possible. La résolution des équations de Maxwell est généralement la première étape dans la modélisation d'un problème électromagnétique impliquant des structures périodiques. Les deux équations de Maxwell (électrique et magnétique selon l'axe x, y, z) se trouvent ci-dessous [5].

$$\partial E_x / \partial t = 1/\varepsilon (\partial H_z / \partial y - \partial H_y / \partial z) \quad \text{III.1}$$

$$\partial E_y / \partial t = 1/\varepsilon (\partial H_x / \partial z - \partial H_z / \partial x) \quad \text{III.2}$$

$$\partial E_z / \partial t = 1/\varepsilon (\partial H_y / \partial x - \partial H_x / \partial y) \quad \text{III.3}$$

$$\partial H_x / \partial t = 1/\mu (\partial E_y / \partial z - \partial E_z / \partial y) \quad \text{III.4}$$

$$\partial H_y / \partial t = 1/\mu (\partial E_z / \partial x - \partial E_x / \partial z) \quad \text{III.5}$$

$$\partial H_z / \partial t = 1/\mu (\partial E_x / \partial y - \partial E_y / \partial x) \quad \text{III.6}$$

Avec E est le champ électrique, H le champ magnétique, ε est la densité de charge, et μ est la perméabilité.

III.2.2 Approximations et simplifications courantes

Lors de la modélisation des FCP, certaines simplifications actuelles sont souvent utilisées pour simplifier les calculs [6]. L'une de ces simplifications traite la fibre comme un environnement homogène avec un indice moyen et est connue sous le nom « approximation de l'indice effectif » [4]. La géométrie de la fibre peut également être décrite grossièrement pour la rendre plus simple à comprendre, par exemple en la représentant comme la fibre cylindrique idéale [7]. Ces réductions de la complexité des calculs permettent de produire des résultats raisonnablement précis. Un autre choix est l'approximation en mode unique [8]. Cela simplifie grandement les calculs en supposant que la fibre ne peut supporter qu'un seul mode de propagation. On peut faire abstraction des résultats de dispersion ou d'interactions avec d'autres composants afin de simplifier davantage les choses. On peut aussi ignorer les pertes d'énergie ou utiliser les conditions aux limites idéales pour simplifier les calculs. Une symétrie axiale est une autre option pour réduire la complexité du modèle [9]. Ces simplifications permettent souvent de produire rapidement des résultats raisonnablement précis.

La linéarisation des équations de Maxwell est une autre approximation fréquemment utilisée dans la modélisation des cristaux photoniques faiblement perturbés [10]. En supposant des interactions linéaires entre photons et cristaux, cette approximation simplifie les calculs et facilite l'analyse des caractéristiques optiques des cristaux photoniques. Lors de la simulation

de guides d'ondes périodiques, il est courant de se rapprocher du modèle de matrice de transfert [11]. En présentant le guide périodique comme une collection de couches avec des matrices de transfert qui décrivent la propagation de la lumière à travers chaque couche, ce modèle simplifie l'analyse. Les propriétés optiques des guides d'ondes périodiques [12] peuvent être prédites efficacement et précisément à l'aide de cette approximation. Pour évaluer l'influence de ces approximations sur les résultats, il est crucial d'analyser leurs conditions de validité. Par exemple, pour les fibres à cristaux photoniques présentant des variations lentes de l'indice de réfraction, une approximation du facteur d'effet est généralement valide. Toutefois, si les variations sont significatives, cette approximation peut introduire des erreurs importantes. De plus, si la fibre ne peut prendre en charge qu'un seul mode de propagation dominant, l'approximation d'un mode de propagation unique peut toujours être valable. Cette approximation pourrait ne pas être exacte si d'autres modes sont significatifs. Par conséquent, afin d'obtenir des résultats fiables, il est crucial de considérer les caractéristiques uniques du système étudié et de vérifier l'exactitude des approximations utilisées.

Certains pensent que les méthodes numériques [5] sont parfois meilleures que les méthodes analytiques [13], parce qu'elles permettent de considérer des aspects de systèmes plus complexes. Pour résoudre les équations mathématiques qui décrivent le système étudié, elles utilisent des algorithmes et des calculs numériques. Cela permet d'obtenir des résultats plus précis et réalistes. Cependant, les méthodes numériques peuvent nécessiter plus de temps et de puissance de calcul que les approches analytiques, qui utilisent des formules mathématiques pour obtenir des résultats plus rapidement et plus simplement. La meilleure méthodologie doit être choisie à la lumière des besoins particulières de l'analyse.

III.2.3 Analyse des modes de guidage et des propriétés optiques

Dans les FCP, les modes de propagation sont influencés à la fois par la structure du cristal et par les caractéristiques de la fibre [14]. Les modes pourraient inclure des modes de guide d'ondes [15], des modes de surface [16], des modes de guidage en bande interdite [17] et d'autres modes propres à la géométrie de la fibre. La fréquence de résonance, le profil de champ et la polarisation de chaque mode ont tous des caractéristiques de propagation uniques. Les recherches sur les modes de propagation dans les fibres à cristaux photoniques sont nécessaires pour comprendre et exploiter les propriétés optiques de ces fibres.

L'analyse des modes fondamentaux [18] et d'ordre supérieur [19] dans les structures périodiques est nécessaire pour comprendre les caractéristiques de propagation de la lumière

dans ces structures. Les modes supérieurs sont des modes d'ordre supérieur ayant le potentiel de se propager à des fréquences plus élevées ou dans des directions différentes. Les modes fondamentaux sont les modes de propagation de base.

Caractériser les propriétés optiques des FCP par rapport à leurs paramètres, tels que le diamètre, la géométrie de la structure et la composition du matériau, est crucial pour comprendre comment ces facteurs affectent la propagation de la lumière. Cela permet de concevoir et d'optimiser des dispositifs optiques avancés basés sur ces fibres [20-23], ce qui ouvre un large éventail d'opportunités dans des secteurs tels que les communications optiques et la technologie des capteurs optiques. Par exemple, on peut améliorer la conception de la fibre pour obtenir des caractéristiques de dispersion particulières en étudiant la relation entre la dispersion et les paramètres de la fibre. Cela permet d'adapter la fibre à différentes applications tel que les sources de lumière à spectre large, et pour le cas de biréfringence, on peut la contrôler et l'optimiser pour des applications tel que dispositifs de modulation de la polarisation.

Les propriétés optiques des fibres à cristaux photoniques ont une influence significative sur leurs performances dans différentes applications. Par exemple, la bande interdite [24] qui déterminent la plage de longueurs d'onde pour laquelle elle est transparente ou réfléchissante. La dispersion, la biréfringence et l'atténuation sont également des aspects importants qui influencent la transmission de la lumière à travers la fibre [1]. On peut améliorer la fonctionnalité des fibres à cristaux photoniques dans diverses applications en comprenant et en mesurant ces propriétés optiques.

III.3 Méthodes numériques pour la modélisation des fibres à cristaux photoniques

III.3.1 Méthode de la différence finie dans le domaine temporel (FDTD)

Une approche numérique permettant la résolution d'équations différentielles dans le domaine temporel et la compréhension visuelle de la propagation d'une onde électromagnétique dans un environnement structuré est la méthode FDTD (Finie Différence Time Domain), également connue sous le nom de méthode des différences fines dans le domaine temporel. Elle n'impose aucune restriction ou approximation significative. L'optique intégrée fait fréquemment appel à cette technique.

Il s'agit d'une approche numérique extrêmement approfondie pour gérer les problèmes électromagnétiques qui fonctionne à la fois dans les environnements conducteurs et diélectriques. Cette technique est particulièrement intéressante pour calculer les distributions

de champ dans des structures de dimensions finies et pour déterminer la réponse spectrale d'un système qui n'est pas nécessairement périodique [25].

La figure III.1 présente la répartition du champ en utilisant cette méthode.

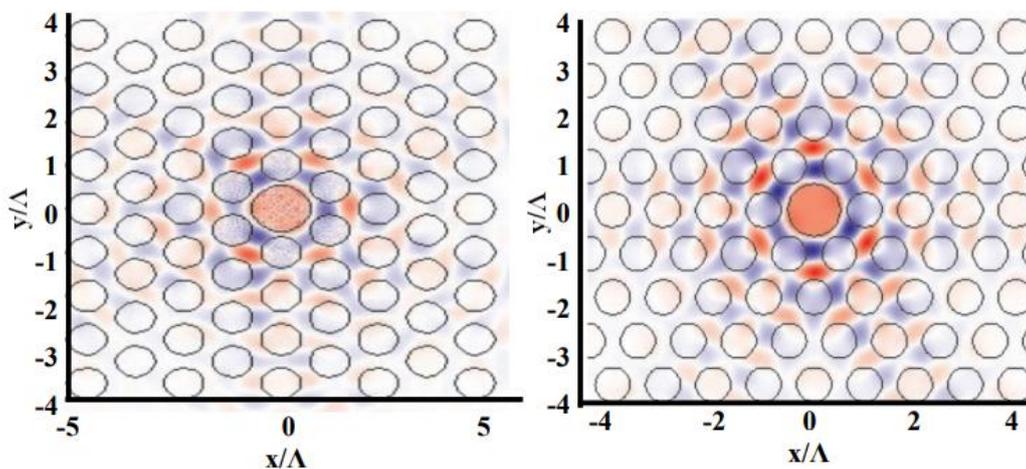


Figure III-1 : La répartition du champ en utilisant la FDTD [26].

III.3.2 Méthode des éléments finis (FEM) appliquée aux cristaux photoniques

La méthode des éléments finis est une technique numérique utilisée pour résoudre divers problèmes d'ingénierie depuis les années 1940 [27], lorsqu'elle a été utilisée pour la première fois pour résoudre un problème d'ingénierie électrique. Depuis lors, elle a été utilisée pour résoudre un nombre croissant de problèmes d'ingénierie, notamment ceux impliquant l'application des mathématiques à l'électromagnétique. L'une des premières étapes des méthodologies FEM consiste à découper la structure ou à diviser l'espace de travail en composants plus petits [28]. La plupart des techniques des éléments finis utilisent des méthodes variationnelles créées à l'aide des équations de Maxwell [29, 30].

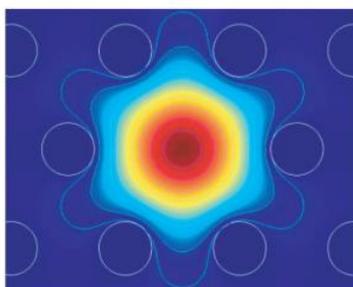


Figure III-2 : La répartition transverse du champ électrique dans une FCP avec les paramètres $d/\Lambda = 0.46$ et $\Lambda = 8\mu\text{m}$ [31].

La figure III.2 nous montre la répartition transverse du champ électrique dans une FCP avec les paramètres $d/\Lambda = 0.46$ et $\Lambda = 8\mu\text{m}$.

Grâce à cette méthode, la modélisation des fibres à cristaux photoniques est faite. Les champs électromagnétiques pouvant être excités dans la fibre sont les grandeurs mesurables. Les équations de Maxwell qui décrivent leur comportement sont résolues pour les déterminer. Un domaine spatial qui décrit la structure optique-géométrique de la fibre est la zone d'étude.

III.3.3 Méthodes de différences finies vectorielles (VFDTD) pour les cristaux photoniques anisotropes

Dans les cristaux photoniques anisotropes, les équations de Maxwell sont résolues numériquement à l'aide d'un processus appelé méthode de différence finie vectorielle. Elles permettent la discrétisation de l'espace et la détermination des variations du champ électromagnétique en chaque point de maillage. Cela permet d'étudier le comportement de la lumière dans ces cristaux et d'obtenir une approximation des solutions des équations de Maxwell. La modélisation et la simulation de cristaux photoniques anisotropes utilisent largement ces méthodes. Elle est utilisée pour confirmer les résultats obtenus pour des durées de simulation plus courtes [32].

III.3.4 Méthode multipolaire (MM)

Une technique de simulation de fibres à cristaux photoniques guidées par un indice ou une résonance transversale est la méthode multipolaire (MM).

Chaque trou est décrit à l'aide de sa matrice de diffraction dans cette approche entièrement vectorielle. L'idée fondamentale de la méthode est d'identifier la matrice de diffraction correspondante pour chaque trou. Le champ électromagnétique de chaque matrice de diffraction est représenté par la somme de la composante incidente et de la composante sortante dans une représentation locale cylindrique. L'avantage de cette approche est qu'elle prend en compte à la fois les parties réelles et fictives de la constante de propagation modale de la fibre.

La partie imaginaire permet d'accéder aux pertes induites par le confinement des fibres. Ces pertes sont liées à l'extension finale de la microstructuration. La constante de propagation complexe et les vecteurs de champ électrique et magnétique sont obtenus en entrant la fréquence (c'est-à-dire que le calcul est effectué à une longueur d'onde fixe) [33]. La figure III.3 nous montre la répartition du mode fondamental d'une FCP hexagonale avec la méthode multipolaire.

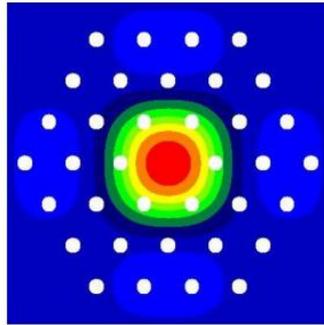


Figure 0-3: Mode fondamental par la méthode multipolaire [34].

Bien que la méthode multipolaire soit une approche vectorielle rigoureuse, elle est extrêmement difficile à utiliser. Son principal avantage est la capacité de gérer des structures comportant de nombreux trous d'air en utilisant la circularité des trous d'air, ce qui lui permet de converger rapidement et avec une grande précision. Elle permet un examen complet des propriétés du FCP (air effectif, dispersion chromatique, biréfringence, pertes de confinement, etc.). Elle est capable de simuler la propagation à travers des bandes optiquement interdites ainsi que la propagation à travers une réflexion totalement modifiée interne [35]. Elle peut être utilisée pour modéliser des fibres à coeur creuse et à coeur pleine.

III.3.5 Méthode des faisceaux propagés (BPM)

La « méthode des faisceaux propagés » ou « Beam Propagation Method » est le nom de la technique numérique qui simule la propagation des ondes. En utilisant un champ électrique comme point de départ, le BPM peut être utilisé pour prévoir la manière dont un champ sera distribué à l'intérieur d'un composant optique. L'idée de base de cette approche est de partitionner la structure en tranches élémentaires ou cellules z-distances, puis de déterminer la limite de chaque tranche en partant de la limite de la précédente [1].

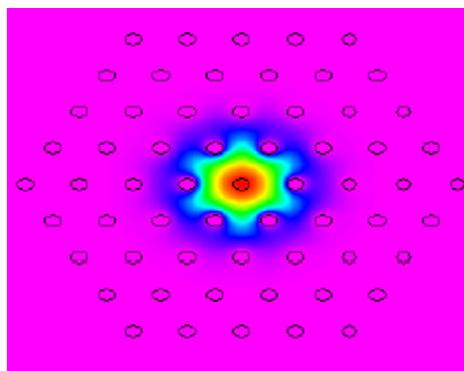


Figure 0-4: La répartition transverse du champ électrique dans une FCP avec la méthode BPM.

Le champ électromagnétique doit être modélisé comme une superposition d'ondes se propageant dans un environnement uniforme, ce qui est l'idée de base du BPM conventionnel ou scalaire. La totalité de toutes les ondes planes du domaine spectral sert de représentation de la propagation dans un environnement hétérogène. Une simple correction de phase spatiale peut être utilisée pour interpréter la nature imprévisible de l'environnement. s

III.3.6 Méthode des ondes planes « PWE »

La méthode de décomposition en ondes planes, peut être utilisée pour résoudre les équations de Maxwell en les transformant en un problème avec des valeurs spécifiques. Afin de déterminer la structure de bande (relation de dispersion) des cristaux ayant une géométrie spécifique, cette méthode est utilisée dans les cristaux photoniques. Elle permet de calculer la répartition des champs électriques et magnétiques de chaque mode dans la structure. En réalité, une cellule et un réseau périodique, dans lequel la cellule est dupliquée pour remplir tout l'espace, définissent la structure [36].

III.3.7 Méthode de matrice de transfert (TMM)

Le comportement des signaux électriques ou optiques lorsqu'ils traversent divers types de matériaux ou de structures est étudié mathématiquement à l'aide d'une technique appelée méthode de la matrice de transfert. Elle est fréquemment employée dans la conception et l'analyse de divers dispositifs, notamment des circuits électroniques, des réseaux de fibres optiques, des conceptions de filtres et des systèmes de communication.

La méthode de transfert matriciel représente le chemin qu'emprunte un signal à travers un système utilisant des matrices. Les matrices de transfert sont utilisées pour décrire les effets de la réflexion, de la transmission et de la dispersion des signaux lorsqu'ils traversent divers types de matériaux ou de structures. La matrice de transfert est désignée dans le domaine de l'optique comme une matrice mathématique permettant de relier les caractéristiques du champ EM (électromagnétique) transmis par un système optique à celles du champ EM incident. Elle explique ensuite en détail comment la lumière change lorsqu'elle se déplace dans le système optique concerné. Les lentilles, miroirs [37], filtres [38] et autres composants optiques peuvent tous voir leurs performances évaluées et optimisées à l'aide de la matrice de transfert [39].

Connaissant uniquement les caractéristiques du champ électromagnétique incident, la matrice de transfert peut être utilisée pour prédire les caractéristiques du champ électromagnétique transmis pour un système spécifique.

III.4 Modélisation avancée des fibres à cristaux photoniques

III.4.1 Modélisation des défauts et des imperfections de structure

Des variations dans la composition ou la structure du matériau peuvent être à l'origine de défauts et d'imperfections dans la fibre à cristaux photoniques. La transmission de la lumière peut être gênée par ces variations, ce qui peut entraîner une dégradation ou une amplification du signal. Mais il est également possible d'exploiter ces lacunes pour créer des fonctionnalités spécialisées, telles que des guides d'onde ou des filtres, qui peuvent être utilisées dans de nombreuses applications. Les différents types de défauts dans la fibre à cristaux photoniques doivent être identifiés [40], puis ces défauts doivent être analysés. Des méthodes telles que la spectroscopie Raman [41] ou la microscopie électronique à balayage (MEB) [42] peuvent être utilisées pour y parvenir. Pour augmenter la fiabilité et les performances de la fibre optique, il est essentiel de pouvoir voir et comprendre les types de défauts de fibres.

La FCP peut présenter une variété de défauts [43], y compris des défauts étendus ou extrinsèques, défauts de surface et natifs, défauts ponctuel comme Les vides, les atomes interstitiels et les impuretés ainsi que des défauts de volume tels que les dislocations, lacunes, inclusions ou écarts à la stœchiométrie. Les défauts ponctuels sont des défauts localisés dans une région particulière de la fibre, par opposition aux défauts étendus, qui s'étendent sur une zone plus large. La surface de la fibre présente des défauts de surface. Les performances de la fibre optique peuvent être affectées différemment par chacun de ces types de défauts. Il est possible de simuler les défauts et les imperfections de la fibre à cristaux photoniques à l'aide de diverses approches de modélisation. Ces approches incluent la modélisation basée sur la théorie des perturbations, la simulation par éléments finis et la modélisation atomistique. Bien que chacune de ces méthodes présente ses propres avantages et limites, elles contribuent toutes à notre compréhension du comportement des défauts des fibres optiques.

Les paramètres de fabrication[5] peuvent avoir un impact significatif sur la façon dont la fibre à cristaux photoniques développe des défauts. Les changements de température, de pression ou de composition chimique peuvent avoir un impact sur la fréquence et le type de défauts de fabrication. Quelques exemples de paramètres de fabrication potentiels incluent la température de fusion, la vitesse de tirage, la composition chimique des matériaux utilisés et les conditions de refroidissement. Par exemple, lorsque les températures de fusion sont trop élevées, des bulles d'air ou des défauts de cristallinité peuvent se développer. Une vitesse de tirage incorrecte peut également entraîner des problèmes de tension ou de géométrie avec la fibre. Pour produire la

meilleure fibre tout en minimisant les défauts, ces paramètres doivent être contrôlés et optimisés.

III.4.2 Modélisation des non-linéarités dans les cristaux photoniques

Les non-linéarités [44] des matériaux à cristaux photoniques sont causées par des interactions optiques non linéaires, qui apparaissent lorsque la réponse optique d'un matériau n'est pas proportionnelle à l'intensité du champ électromagnétique appliqué. Ceci est provoqué par des phénomènes tels que la polarisation non linéaire [45], la modification des indices de réfraction [46], et la génération de nouvelles fréquences [47]. Des équations non linéaires, comme l'équation de Schrödinger [48] ou l'équation de propagation non linéaire [45], sont utilisées pour décrire mathématiquement ces interactions. La compréhension théorique et la modélisation de ces non-linéarités sont essentielles pour concevoir et optimiser des dispositifs à cristaux photoniques.

La non-linéarité des indices optiques, la non-linéarité de Kerr [49], et la non-linéarité de Raman [50, 51] sont quelques exemples actuellement utilisés. Ces non-linéarités pourraient produire des résultats intrigants tels que la conversion de longueur d'onde, l'amplification optique et la génération de fréquences harmoniques. Les cristaux photoniques offrent une plateforme prometteuse pour utiliser ces non-linéarités et développer de nouvelles applications optiques. La modélisation des non-linéarités des fibres à cristaux photoniques peut être réalisée de plusieurs manières. Des simulations numériques basées sur ces équations non linéaires sont utilisées dans certaines méthodes modernes. Comprendre et améliorer les capacités des fibres à cristaux photoniques nécessitent l'utilisation de ces méthodes.

L'analyse des effets non linéaires sur les propriétés de guidage et la génération d'harmoniques constitue un domaine de recherche important dans l'étude des fibres à cristaux photoniques. La dispersion et l'indice de réfraction, qui ont tous deux un impact sur la manière dont la lumière est guidée dans la fibre, peuvent tous deux être modifiés par les non-linéarités. Les non-linéarités peuvent également conduire à la génération d'harmoniques [52], dans lesquelles de nouvelles fréquences sont créées à la suite de la lumière incidente. Cette analyse aide à comprendre l'impact des non-linéarités sur les capacités des fibres à cristaux photoniques et peut être utilisée pour améliorer la conception des composants optiques. Les non-linéarités des fibres à cristaux photoniques ont de nombreuses applications dans le contrôle de la lumière. Ils permettent la modulation de forme d'onde optique, la génération d'harmoniques et la conversion de fréquence. De plus, ils sont utilisés dans la commutation optique et les amplificateurs. De

nouvelles technologies optiques avancés sont désormais possibles grâce aux possibilités intrigantes offertes par les non-linéarités pour contrôler et manipuler la lumière dans les fibres à cristaux photoniques.

III.4.3 Modélisation des effets de couplage dans les guides d'ondes périodiques

Dans les cristaux photoniques périodiques, le couplage est basé sur les principes interférents et diffractifs [53]. Lorsque la lumière arrive sur une structure périodique, elle est diffractée et se propage à travers les différentes périodes de la structure. L'interférence entre les ondes diffractées génère des motifs d'intensité qui peuvent être utilisés pour construire des structures optiques complexes, telles que des réseaux de guides d'ondes optiques. Ces fondements théoriques permettent la compréhension et la conception de dispositifs photoniques périodiques pour diverses applications, notamment les filtres optiques, les réseaux de Bragg et les résonateurs optiques. L'analyse des différents mécanismes de couplage dans les cristaux photoniques périodiques est nécessaire pour comprendre comment la lumière se couple aux mécanismes de guidage de la structure. Cela permet d'optimiser la conception de dispositifs optiques avancés et de mieux comprendre les interactions entre la lumière et le matériau dans ces systèmes. Le couplage par diffraction, le couplage par interférence et le couplage par résonance sont quelques-uns des différents mécanismes de couplage qui permettent à la lumière de se coupler aux modes de guidage de la structure périodique, ce qui a un impact sur la manière dont la lumière se propage dans le guide d'onde. Le couplage évanescent [40] a une fonction de couplage importante dans les cristaux photoniques périodiques. En raison de la diminution exponentielle du champ électromagnétique à l'extérieur de la structure, cela se produit lorsque les modes de guidage optique du cristal interagissent avec les modes de guidage extérieurs. Il est nécessaire pour de nombreux dispositifs optiques basés sur des cristaux photoniques périodiques car il permet le transfert d'énergie entre les modes, tandis que le couplage de modes [54] est un phénomène fondamental qui se produit lorsque les modes de guidage du cristal interagissent les uns avec les autres. De nombreux mécanismes, telles que le couplage par diffraction, le couplage par interférence et le couplage par résonance, peuvent être utilisés pour y parvenir. Ces interactions entre les modes permettent de contrôler la propagation de la lumière dans les cristaux photoniques périodiques, ce qui est essentiel pour la conception de dispositifs optiques avancés. Les résonances ont lieu et provoquent une onde amplifiée lorsque la fréquence de la lumière et la fréquence de résonance d'un mode de guidage spécifique correspondent. Les gammes de fréquences pour lesquelles le guide d'onde périodique interdit toute propagation lumineuse sont les bandes interdites. La modélisation de ces phénomènes est

nécessaire pour comprendre et améliorer les performances des guides laser périodiques dans diverses applications optiques. Les propriétés de couplage et de transmission des guides d'ondes périodiques [55] peuvent être considérablement influencées par des facteurs géométriques tels que la taille et la forme des structures périodiques. On peut modifier la force de couplage entre modes de guidage, par exemple en faisant varier la distance entre éléments périodiques. De la même manière, modifier la largeur ou la hauteur des structures peut modifier leur capacité à transmettre la lumière. Et de même la dispersion et la polarisation et la sensibilité peuvent être influencé par la taille et la forme de la structure. Ces paramètres géométriques doivent être modélisés afin de créer des guides d'ondes périodiques offrant les meilleures performances. La conception de composants optiques tels que des filtres [56] et des diviseurs [20]...etc, a utilisé le couplage de manière créative. En modifiant les paramètres de couplage des guides d'ondes périodiques, on peut construire des structures qui focalisent sélectivement la lumière dans diverses directions ou filtrent des plages de fréquences particulières. Cela permet de réaliser des fonctionnalités optiques sophistiquées et de créer des dispositifs efficaces et petits. Le couplage est donc un outil utile dans la conception de ces dispositifs optiques.

III.5 Validation des modèles

La majorité des logiciels de modélisation commerciaux sont basés sur la méthode des faisceaux propagés (BPM), qui est la technique de propagation la plus largement utilisée par rapport aux autres méthodes pour modéliser des dispositifs photoniques intégrés et à fibre optique. La popularité du BPM est due à un certain nombre de facteurs, mais l'un des plus importants est que la technique fondamentale peut être mise en œuvre rapidement grâce à sa simplicité conceptuelle. Puisqu'un non-expert en méthodes numériques peut facilement comprendre les résultats et savoir comment utiliser l'outil correctement, cette simplicité conceptuelle profite à la fois à l'implémenter et à l'utilisateur d'un outil de modélisation basé sur la méthode BPM. Elle est une méthode globalement très efficace en plus d'être relativement simple. Sa complexité de calcul peut, dans la plupart des cas, être optimale, ce qui signifie que l'effort de calcul est inversement proportionnel au nombre de points de grille utilisés dans la simulation numérique. Une autre caractéristique du BPM est qu'elle peut être utilisée pour résoudre des problèmes avec des géométries complexes sans qu'il soit nécessaire de créer des versions spécialisées de la méthode. De plus, la méthode prend automatiquement en compte les effets des champs guidés et rayonnants, du couplage de modes et de la conversion de mode. Enfin et surtout, la technique BPM est très adaptable et extensible, permettant d'inclure la majorité des effets intéressants (tels que la polarisation et les non-linéarités) par des modifications de la

méthode fondamentale qui adhèrent au même cadre général. La littérature contient de nombreux exemples d'utilisation du BPM pour simuler diverses caractéristiques de dispositifs ou de circuits photoniques tels que les filtres [57], les séparateurs de polarisation [58], les diviseurs de puissances [20], les multiplexeur/démultiplexeur [21, 59] ...

C'est pourquoi les simulations numériques dans la section suivante sont fondées sur cette approche, implémentées à l'aide de programmes Matlab qui utilisent également les fichiers de données issus de ces simulations numériques.

Le tableau (III.1) ci-dessous récapitule les principaux avantages, et inconvénients des principales méthodes numériques :

Tableau III. 1:Avantages et inconvénients des différentes méthodes numériques.

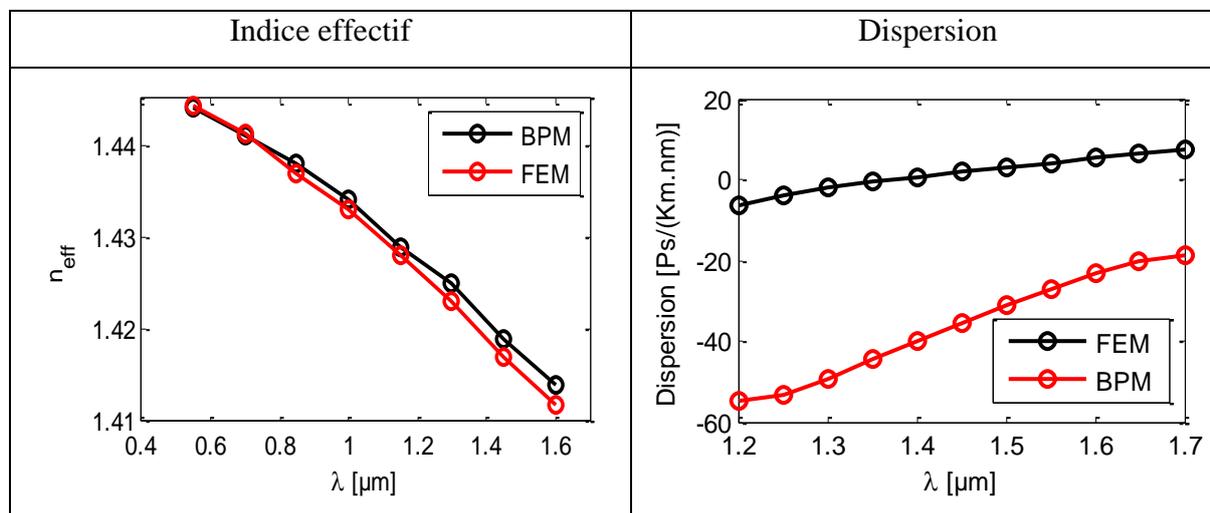
Méthode	Avantages	Inconvénients
BPM [60]	<ul style="list-style-type: none"> • Disponible dans le commerce • Calcul avec β complexe • Profils d'indice quelconques 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativement imprécise
FEM [61]	<ul style="list-style-type: none"> • Précise 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiert une quantité de mémoire vive importante
MM [62]	<ul style="list-style-type: none"> • Elle estime les perte 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de profils d'indices quelconques
FDTD [63]	<ul style="list-style-type: none"> • Approche de manière large 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiert une quantité de mémoire vive importante

Nous avons effectué une comparaison des résultats de paramètres de dispersion et d'indice effectif entre la méthode des éléments finis FEM [64] et la méthode des faisceaux propagés BPM dans le tableau III.2 [65]. Nous constatons que la méthode des éléments finis produit des résultats presque identiques à ceux de la méthode BPM pour le cas de l'indice effectif. Ceci dit que la BPM est approuvable et applicable, nous pouvons donc l'utiliser dans les simulations à venir.

Une disparité de résultats se manifeste dans le cas de la dispersion, illustrée par le tableau III.2, où l'on observe une diminution de la dispersion à la longueur d'onde souhaitée de 1,55 μm , passant de 2 ps/(km·nm) à -32 ps/(km·nm) pour la Méthode des Éléments Finis (FEM) et la Méthode de Propagation des Ondes (BPM). Cette réduction annule la composante positive de

la dispersion, démontrant ainsi que la BPM affiche des performances de dispersion supérieures par rapport à la FEM.

Tableau III. 2: Une comparaison des résultats de paramètres de dispersion et d'indice effectif entre la méthode des différence finis FEM [64] et la BPM [65].



III.6 Conclusion

Les principales méthodes de modélisation des FCP ont été abordées dans ce chapitre, notamment la FDTD (les différences finies dans le domaine temporel), la BPM (les faisceaux propagés), la FEM (les éléments finis), la TMM (la matrice de transfert), la VFDTD (les différences finies vectorielles dans le domaine temporel) et les techniques MM (multipolaire). Nous avons analysé les modes de guidage et les propriétés optiques, décrit les différentes approximations et résolution de l'équation de Maxwell.

Nous avons également discuté de la modélisation des défauts, de la non-linéarité et des effets de couplage, ainsi que de la distribution du champ électromagnétique du mode électromagnétique fondamental selon diverses méthodologies. Les deux techniques, BPM et FEM, ont également été comparées en termes d'indice effectif et dispersion chromatique

Nous avons également démontré que, indépendamment de la complexité de la structure, l'approche de modélisation BPM demeure une méthode robuste et hautement précise pour simuler les diverses propriétés de guidage du FCP.

Références

- [1] M. L. Houas and M. a.-B. Adaika, "Etude Et Simulation Des Fibres Optiques À Base Des Cristaux Photoniques Multi Coeurs, Thesis, UNIVERSITY OF OUARGLA.
- [2] J. Knight, T. Birks, P. S. J. Russell, and J. De Sandro, "Properties of Photonic Crystal Fiber and the Effective Index Model", "*JOSA A*", vol. 15, no. 3, pp. 748-752, 1998.
- [3] J. Arriaga, J. Knight, and P. S. J. Russell, "Modelling Photonic Crystal Fibres", "*Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*", vol. 17, pp. 440-442, 2003.
- [4] P. Russell, "Les Fibres À Cristaux Photoniques", "*Les modes de résonance acoustique dans les fibres optiques microstructurées-Applications aux capteurs répartis*", p. 7, 2011.
- [5] K. Boutelli and S. Bentouati, "Étude Et Conception Des Fibres Optiques Microstructurées, Thesis, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2021.
- [6] F. Reynaud, "Nouveaux Interféromètres Large Bande Pour L'imagerie Haute Résolution: Interféromètre Fibré Hectométrique; Utilisation Des Fibres A Cristaux Photoniques, Thesis, University of Limoges, 2005.
- [7] S. Laflamme, "*Fibres Microstructurées Effilées*", Book, "École Polytechnique de Montréal", 2007
- [8] S. H. A. Tandjè, M. Douay, A. Kora, B. Dussardier, C. Finot, C. Valentin, A. Vianou, L. Bigot, E. Andresen, and M. Dossou, "Conception Et Caractérisation De Fibres Optiques À Modes À Moment Angulaire Orbital, Thesis, EPAC/UAC, 2019.
- [9] P. Le Boudec, "Une Soudeuse Pour Fibres Optiques", "*Photoniques*", no. 108, pp. 49-52, 2021.
- [10] S. Leble and B. Reichel, "Coupled Nonlinear Schrödinger Equations in Optic Fibers Theory: From General to Solitonic Aspects", "*The European Physical Journal Special Topics*", vol. 173, no. 1, pp. 5-55, 2009.
- [11] S. Chatigny, "*Etude Des Guides D'onde Non-Lineaires a Emission De Surface*", Book, "Université Laval", 1998
- [12] F. Bougriou and T. Bouchemat, "Etude Des Guides D'ondes À Cristaux Photoniques Bidimensionnels", memoire de fin d'étude, 2008.
- [13] K. Yasumoto, "*Electromagnetic Theory and Applications for Photonic Crystals*", Book, "CRC press", 2018
- [14] I. Sassi, "*Conception De Fibres à Cristaux Photoniques En Utilisant Les Méthodes D'aide Multicritère à La Décision*", Book, "Library and Archives Canada= Bibliothèque et Archives Canada, Ottawa", 2010
- [15] B. Goursaud, "Etude Mathématique Et Numérique De Guides D'ondes Ouverts Non Uniformes, Par Approche Modale, Thesis, Ecole Polytechnique X, 2010.
- [16] J. C. Knight, "Photonic Crystal Fibres", "*nature*", vol. 424, no. 6950, pp. 847-851, 2003.
- [17] B. Kibler, T. Martynkien, C. Finot, J. Fatome, M. Szpulak, K. Wojcik, S. Wabnitz, and W. Urbanczyk, "Propagation Non-Linéaire D'impulsions Femtosecondes Dans Une Fibre Optique À Bande Interdite À Cœur Solide, conference proceedings," in *Colloque sur les Lasers et l'Optique Quantique (COLOQ 11)*, 2009, p. 84.
- [18] S. Brûlé, S. Enoch, and S. Guenneau, "Sols Structurés Sous Sollicitation Dynamique: Des Métamatériaux En Géotechnique", "*Revue française de Géotechnique*", no. 151, p. 4, 2017.
- [19] D. Voyer, "Modélisation Électromagnétique Par Changement D'échelle Appliquée Aux Structures Fractales Planaires, Thesis, 2005.
- [20] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C.-E. Ouadah, "1×2 Power Splitter Based on Photonics Crystals Fibers", "*Journal of Optical Communications*", vol. 4, no. 44, 2023.

- [21] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C. E. Ouadah, "Numerical Analysis of 1 X 4 Photonic Crystal Fiber Multiplexer", *"Progress In Electromagnetics Research M"*, vol. 118, pp. 127-136, 2023.
- [22] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C. E. Ouadah, "Design of a Novel 1x4 Two-Dimensional Demultiplexer Based on Multicore Photonic Crystal Fiber", *"International Journal of Electronics and Telecommunications"*, pp. 469-473-469-473, 2023.
- [23] I. Mired, M. Debbal, and H. Chikh-Bled, "Pressure Sensing Based on Photonic Crystal Fiber by Infiltrating the Air-Holes with Water", *"Progress in Electromagnetics Research C"*, vol. 130, 2023.
- [24] D. Cassagne, "Matériaux À Bandes Interdites Photoniques,conference proceedings," in *Annales de Physique*, 1998, vol. 23, no. 4: EDP sciences, pp. 1-91.
- [25] M. Qiu, "Analysis of Guided Modes in Photonic Crystal Fibers Using the Finite-Difference Time-Domain Method", *"Microwave and Optical Technology Letters"*, vol. 30, no. 5, pp. 327-330, 2001.
- [26] A. Dekhira, "Etude Théorique Et Simulation Des Cristaux Photoniques Et Leurs Applications En Chimie Et Biochimie,Thesis, Alger, 2010.
- [27] A. Beloufa, "Cours Et Applications De La Methode Des Elements Finis", 2021.
- [28] S. Guenneau, "Homogenization of Quasi-Crystals and Analysis of Modes in Photonic Crystal Fibres", *"HAL"*, vol. 2001, 2001.
- [29] T. M. Monro, P. Bennett, N. Broderick, and D. Richardson, "Holey Fibers with Random Cladding Distributions", *"Optics letters"*, vol. 25, no. 4, pp. 206-208, 2000.
- [30] J. Knight, T. Birks, P. S. J. Russell, and D. Atkin, "All-Silica Single-Mode Optical Fiber with Photonic Crystal Cladding", *"Optics letters"*, vol. 21, no. 19, pp. 1547-1549, 1996.
- [31] M. C. E. Ouadah, "Etude Des Fibres Microstructurées Compensatrices De Dispersion Chromatique,Thesis, Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2017.
- [32] D. Sarkar, S. M. Mikki, K. V. Srivastava, and Y. M. Antar, "Dynamics of Antenna Reactive Energy Using Time-Domain Idm Method", *"IEEE Transactions on Antennas and Propagation"*, vol. 67, no. 2, pp. 1084-1093, 2018.
- [33] J. Singh, "Couplage De La Méthode Intégrale Aux Frontières En Formulation Non-Primitive Et D'une Méthode Multipolaire Pour La Simulation D'écoulement Incompressibles,Thesis, Grenoble INPG, 2009.
- [34] M. Debbal, "Modélisation Et Optimisation Des Fibres À Cristal Photonique Dédiées Aux Télécommunications Optiques,Thesis, Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2013.
- [35] C. A. Koussikan, M. Assogba, M. Dossou, L. Djogbé, and V. Adanhounmè, "Modélisation Des Fibres À Cristaux Photoniques À Réflexion Totale Interne",memoire de fin d'étude, 2012.
- [36] I. Aouka and M. R. Beghoul, "Etude Des Guides Et Des Microcavités À Base De Structures À Cristaux Photoniques Sinx/Sio2,Thesis, Université de Jijel, 2022.
- [37] C. Chettah and A. Chaabi, "Application Des Méthodes Numériques Pour La Détermination Des Caractéristiques Physiques Et Optiques Des Structures Périodiques À Base Des Matériaux Artificiels,Thesis, Université Frères Mentouri-Constantine 1, 2021.
- [38] A. Zeghouane, S. Benhabiles, and M. R. E. Beghoul, "Etude Des Structures À Cristaux Photoniques À Base De Nitrure De Gallium Gan,Thesis, Université de Jijel, 2021.
- [39] B. Mamri and O. Barkat, "Etude Et Simulation Des Caractéristiques Des Structures Périodiques Métallodiélectriques,Thesis, Université Frères Mentouri-Constantine 1.
- [40] Z. Douibi, "Etude D'un Biocapteur Double Dace Avec Une Large Plage De Detection,Thesis, 2023.
- [41] N. Bonod, "Spectroscopie Optique", *"Photoniques"*, 2023.

- [42] D. Luneau, "Impact Des Conditions De Cristallisation Sur Les Défauts Et Les Contraintes Résiduelles Dans Le Saphir Et Cristallisation Par μ -Pd De Fibres De Grenats Yag-Dopées Ce Pour La Physique Des Hautes Énergies, Thesis, Université Lyon 1, 2019.
- [43] R. Bouaita, "Impact Des Conditions De Cristallisation Sur Les Défauts Et Les Contraintes Résiduelles Dans Le Saphir Et Cristallisation Par M-Pd De Fibres De Grenats Yag-Dopées Ce Pour La Physique Des Hautes Énergies, Thesis, Université de Lyon; Université Badji Mokhtar-Annaba, 2019.
- [44] S. Moulieras, "Effets Des Non Linéarités Sur La Propagation De La Lumiere".
- [45] S. Mohand Ousaid, "Etude De L'oscillation Paramétrique Optique Multi-Résonante Dans Les Cristaux Photoniques Non Linéaires De Litao₃ Sans Cavité Externe, Thesis, Paris 13, 2021.
- [46] J. Pillon, M. Rattier, F. Louf, E. Peter, P.-A. Boucard, L. Lablonde, and H. Lefèvre, "Dépendance Thermique De L'indice De Réfraction D'une Fibre Optique À Deux Revêtements, conference proceedings," in *CFM 2019-24ème Congrès Français de Mécanique*, 2019.
- [47] A. Parriaux, K. Hammani, and G. Millot, "Spectroscopie À Deux Peignes De Fréquences Électro-Optiques Pour La Mesure De Rapports Isotopiques", *"Photoniques"*, no. 121, pp. 42-46, 2023.
- [48] S.-E. Ahmedou, G. Walter, R. Dauliat, S. Février, J. Herbuvaux, C. Valentin, S. Petit, J. Lhermite, J.-C. Delagnes, and L. Labonte, "Taper À Fibre Optique Microstructurée Air/Slice À Dispersion Modifiée Pour Une Émission Large Bande Et Accordée Autour De 2 μ m Par Mélange À Quatre Ondes Dégénérées, conference proceedings," in *Optique Nice 2022*, 2022, pp. 08-B7.
- [49] B. C. D. Abderrahmane, "Etude D'un Régénérateur Tout Optique À Très Haut", mémoire de fin d'étude, 2021.
- [50] M. Ibnoussina, "Mesure Du Déphasage Non-Linéaire Par Détection Hétérodyne En Optique Guidée, Thesis, Bourgogne Franche-Comté, 2022.
- [51] S. Yiou, P. Delaye, A. Rouvie, J. Chinaud, R. Frey, G. Roosen, P. Viale, S. Février, P. Roy, and J.-L. Auguste, "Diffusion Raman Stimulée Dans Une Fibre À Cristal Photonique À Cœur Creux Rempli D'éthanol, conference proceedings," in *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 2006, vol. 135: EDP sciences, pp. 295-297.
- [52] V. Mytskaniuk, A. Lombardini, S. Sivankutty, J. Wenger, M. Fabert, E. R. Andresen, F. Louradour, A. Kudlinski, and H. Rigneault, "Endomicroscope Non-Linéaire Multimodale Utilisant Des Fibres À Cœur D'air".
- [53] R. Derdour and S. Mouetsi, "Etude D'une Structure a Cristaux Photoniques Pour Application a Des Portes Logiques, Thesis, Université De Larbi Ben M'hidi Oum EL Bouaghi, 2023.
- [54] A. Amsanpally, "Propriétés Linéaires Des Fibres Creuses À Cristal Photonique À Couplage Inhibé, Thesis, Université de Limoges, 2017.
- [55] A. Karbowski, "Characteristics of Waveguides for Long-Distance Transmission", *"CHANNELS"*, vol. 1, no. 2, p. 3, 1961.
- [56] B. Sid, F. Laala, and H. Otmani, "Conception Des Filtrés À Base Des Cristaux Photoniques", mémoire de fin d'étude, 2018.
- [57] V. Prajzler, R. Mastera, and M. Knietael, "Filter Embedded Optical Planar Splitter Connectable to Large Core Plastic Optical Fibers, conference proceedings," in *2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC)*, 2017: IEEE, pp. 1-2.

- [58] L. Ç. Özcan, "*Écriture Directe De Circuits Optiques Plans Dans Des Couches Mince De Silice Sur Silicium Par Ablation Au Laser Co₂*", Book, "École Polytechnique de Montréal", 2007
- [59] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C. E. Ouadah, "Design of a New 2-Channel Demultiplexer Based on Photonic Crystal Fiber", "*Results in Optics*", vol. 12, p. 100496, 2023.
- [60] F. Fogli, L. Saccomandi, P. Bassi, G. Bellanca, and S. Trillo, "Full Vectorial Bpm Modeling of Index-Guiding Photonic Crystal Fibers and Couplers", "*Optics express*", vol. 10, no. 1, pp. 54-59, 2002.
- [61] A. Peyrilloux, "Modélisation Et Caractérisation Des Fibres Microstructurées Air/Silice Pour Application Aux Télécommunications Optiques", Thesis, University of Limoges http://www.unilim.fr/theses/2003/sciences/2003limo0057/n_otice.htm, 2003.
- [62] T. White, B. Kuhlmeier, R. McPhedran, D. Maystre, G. Renversez, C. M. De Sterke, and L. Botten, "Multipole Method for Microstructured Optical Fibers. I. Formulation", "*JOSA B*", vol. 19, no. 10, pp. 2322-2330, 2002.
- [63] Z. Zhu and T. G. Brown, "Full-Vectorial Finite-Difference Analysis of Microstructured Optical Fibers", "*Optics express*", vol. 10, no. 17, pp. 853-864, 2002.
- [64] R. Cherif, "Étude Des Effets Non-Linéaires Dans Les Fibres À Cristaux Photoniques", Thesis, Thèse de doctorat, Université 7 novembre à Carthage, 2009.
- [65] M. D. Ahlem Harrat, Mohammed Chamseedine Ouadah, Ilhem Mired, "Dispersion Comparison of Photonic Crystal Fiber", conference, presented at the Conférence Nationale sur les Télécommunications et ses Applications " « CNTA 2021 », 20 – 21 décembre 2021, 2021.

Chapitre 4 : Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Les composants à base de cristaux photoniques sont des dispositifs optiques qui manipulent la lumière en tirant parti des propriétés uniques des cristaux photoniques. La capacité de réguler la dispersion, la polarisation et la propagation de la lumière est l'un des avantages de ces composants. Ces composants peuvent être conçus et optimisés pour répondre à des besoins spécifiques grâce aux méthodes appliquées aux cristaux photoniques tel que la méthode des faisceaux propagés.

Le chapitre IV de cette étude s'inscrit dans la continuité de notre exploration des fibres à cristaux photoniques (FCP), se concentrant spécifiquement sur leurs propriétés optiques et leurs applications potentielles dans les télécommunications optiques. Nos contributions novatrices se dévoilent à travers des analyses approfondies et des simulations, apportant ainsi des éclairages nouveaux au sein de ce domaine en constante évolution. Pour amorcer cette section, nous établissons une comparaison minutieuse entre les indices de réfraction obtenus par notre méthode de propagation des modes (BPM) et la méthode des éléments finis. Cette démarche, à elle seule, représente une contribution significative en démontrant la validité et la nouveauté de notre approche.

Par la suite, nous plongeons dans l'étude de la dispersion chromatique, mettant en évidence l'influence du diamètre des trous d'air sur cette caractéristique cruciale pour les réseaux optiques à multiplexage en longueur d'onde (WDM). Les résultats obtenus, ne se contentent pas de confirmer les tendances existantes, mais dévoilent des nuances subtiles et des améliorations notables par rapport aux méthodes traditionnelles. Ces découvertes représentent une avancée significative dans la compréhension et l'optimisation des propriétés de dispersion des FCP.

Enfin, le chapitre se clôture en explorant diverses applications des FCP, telles qu'un coupleur, un diviseur de puissance, un extracteur de longueurs d'ondes, ainsi que des multiplexeurs et démultiplexeurs. Chacune de ces applications est soutenue par des résultats novateurs et des analyses approfondies, élargissant ainsi les perspectives d'utilisation des FCP dans les réseaux de télécommunications optiques.

IV.2 Diagrammes des propriétés optiques pour applications aux télécommunications optiques

IV.2.1 L'indice effectif

Nous avons effectué une comparaison des indices de réfraction pour une structure caractérisée par des paramètres géométriques $d=1.8\mu\text{m}$ et $\Lambda=2.4\mu\text{m}$. Les résultats obtenus, présentés dans la figure IV.1, montrent une concordance quasi totale entre notre méthode BPM et la méthode des éléments finis [1]. En d'autres termes, notre méthode a démontré son applicabilité et son accord avec une méthode déjà validée. Par conséquent, elle sera utilisée dans les prochaines simulations.

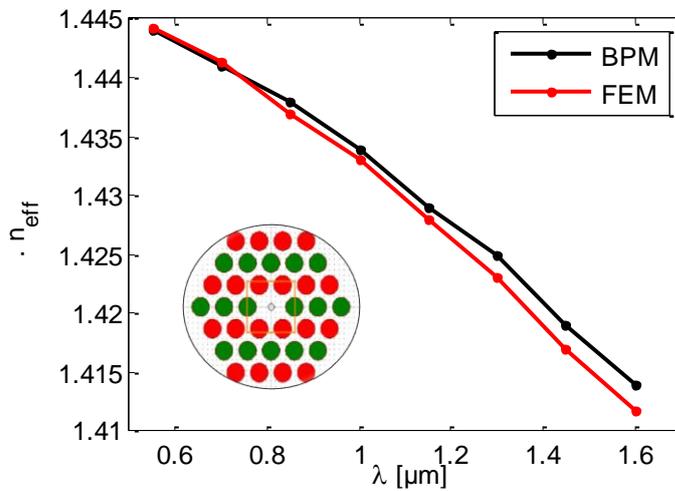


Figure IV. 1 : La comparaison d'indice effectif entre les deux méthodes.

IV.2.2 La dispersion chromatique

La dispersion chromatique constitue une limitation à la transmission dans les réseaux optiques WDM. Les paramètres géométriques de la structure proposée incluent le diamètre des trous d'air (d) et l'espacement entre les trous d'air ($\Lambda=2\mu\text{m}$). En ce qui concerne les diamètres des trous d'air, plusieurs ont été sélectionnés en fonction des cercles entourant le cœur (Figure IV.2), comme indiqué dans le tableau IV.1. La figure IV.3 représente une fibre à cristaux photoniques avec quatre cercles de trous d'air de différents diamètres (d_1, d_2, d_3, d_4) qui guident l'index.

Tableau IV. 1 : Les valeurs des diamètres de la figure IV.3.

Figure	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d_3(\mu\text{m})$	$d_4(\mu\text{m})$
IV.3.a	0.5	0.5	0.5	0.5
IV.3.b	0.5	0.6	0.6	0.6

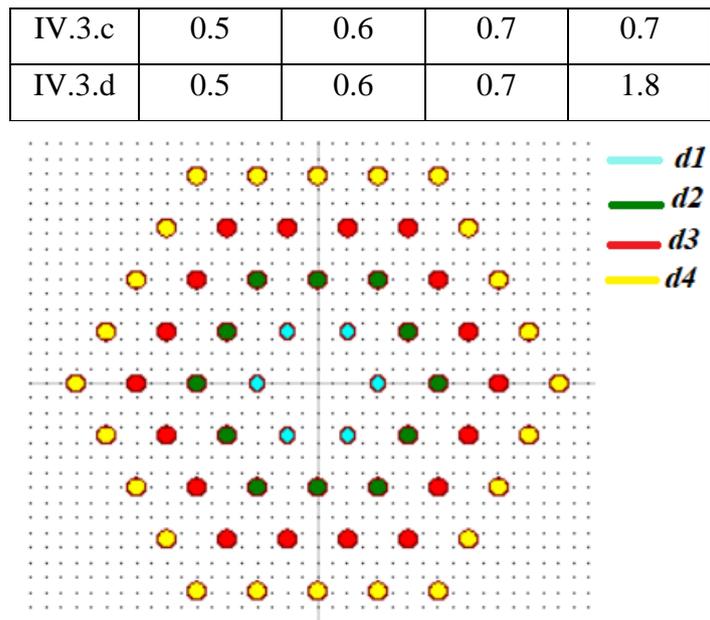


Figure IV. 2 : L'emplacement des diamètres d1, d2, d3, d4 dans la structure.

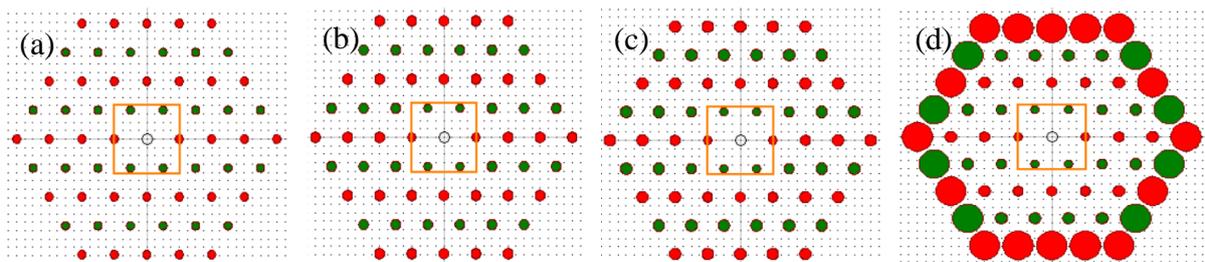


Figure IV. 3: FCP avec quatre cercles de trous d'air qui guident l'index.

La figure IV.4 illustre l'évolution de la dispersion en relation avec la longueur d'onde, ainsi que le décalage du zéro de dispersion par la modification du paramètre d (figure IV.4) à l'aide de la méthode BPM.

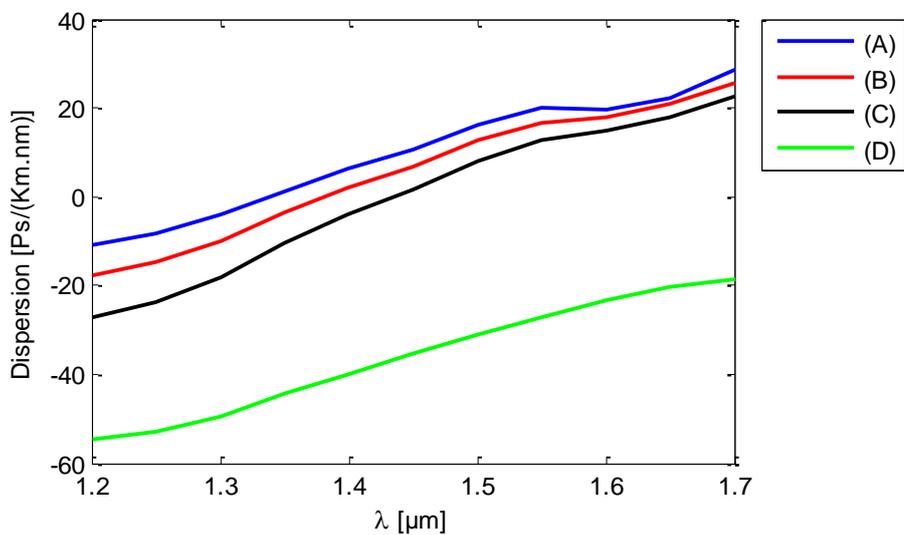


Figure IV. 4: La variation de la dispersion en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de d .

Cela démontre que la modification du diamètre de chaque trou d'air a un impact sur le profil de dispersion et que l'optimisation permet aux FCP à guidage d'indice de contrôler leurs propriétés de dispersion.

La figure IV.5 nous montre une différence de résultats entre la méthode BPM et la méthode FEM [2]. Nous avons réussi à obtenir des résultats améliorés par rapport à la méthode des éléments finis. On observe une réduction significative de la dispersion à la longueur d'onde cible de $1.55 \mu\text{m}$, passant de $2 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ à $-32 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$. Cela indique que notre méthode a permis d'éliminer la composante positive de la dispersion.

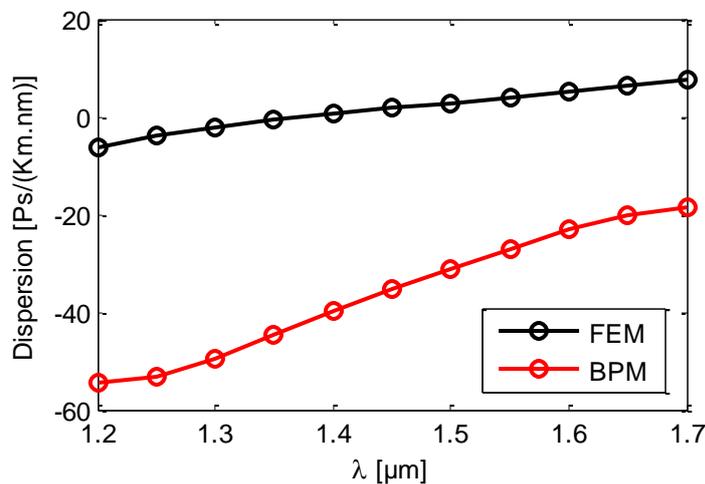


Figure IV. 5: Comparaison de dispersion chromatique entre les deux méthodes BPM et FEM.

IV.3 Coupleur à base de FCP pour la séparation de longueurs d'onde

Au cours de cette étude, nous avons élaboré un coupleur destiné à séparer, à la sortie, les deux longueurs d'onde de $1.47 \mu\text{m}$ et $1.55 \mu\text{m}$, injectées initialement dans un même cœur au début de la transmission. La figure IV.6 illustre la structure en section transversale, avec des paramètres géométriques fixés à $d=0.9 \mu\text{m}$ et $\Lambda=3 \mu\text{m}$.

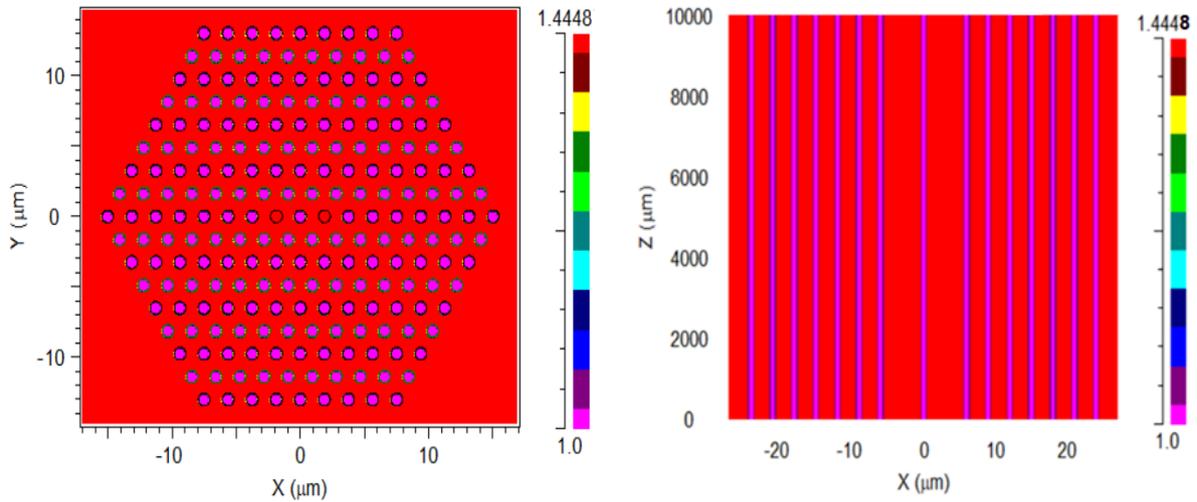


Figure IV. 6: La structure en section transversale.

Les deux longueurs d'onde, $1.55 \mu\text{m}$ et $1.47 \mu\text{m}$, sont introduites dans le premier cœur. Au cours de la transmission, chaque longueur d'onde suit, selon les ondes évanescentes, un transfert de puissance entre les deux cœurs adjacents. À une distance de propagation égale à 7.703 mm , nous avons observé une opposition de phase entre les deux longueurs d'onde. La phase de la première était nulle dans le premier cœur et maximale dans le deuxième cœur, tandis que la phase de la deuxième était inverse, comme illustré dans les figures IV.7 et IV.8.

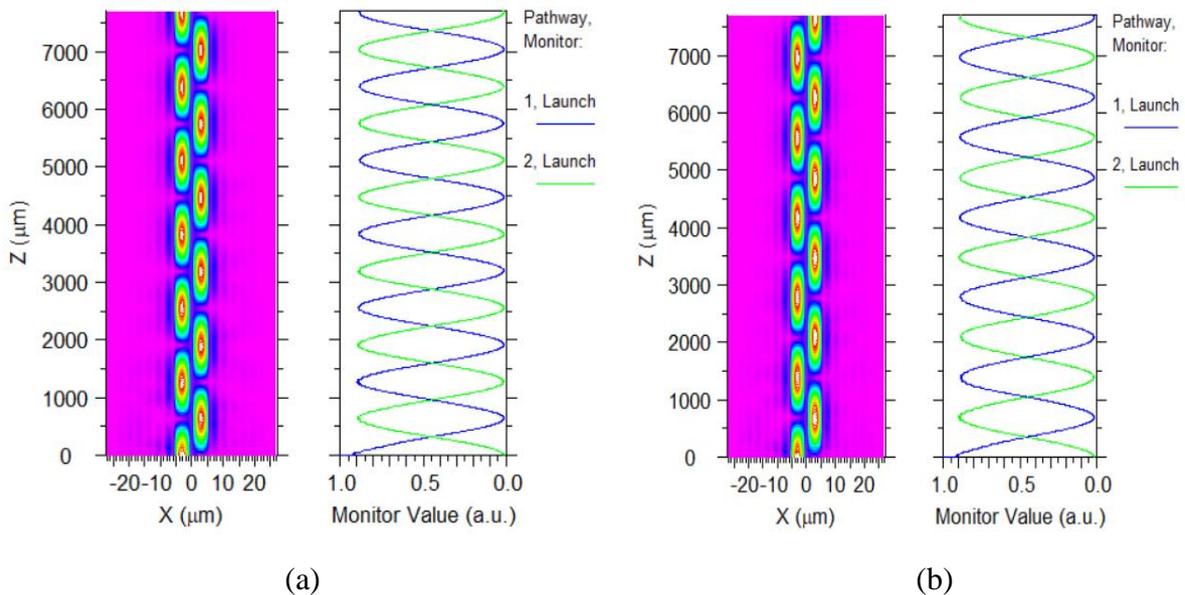


Figure IV. 7: Transfert de puissance entre cœurs, (a) : $\lambda=1.47\mu\text{m}$ et (b) : $\lambda=1.55\mu\text{m}$.

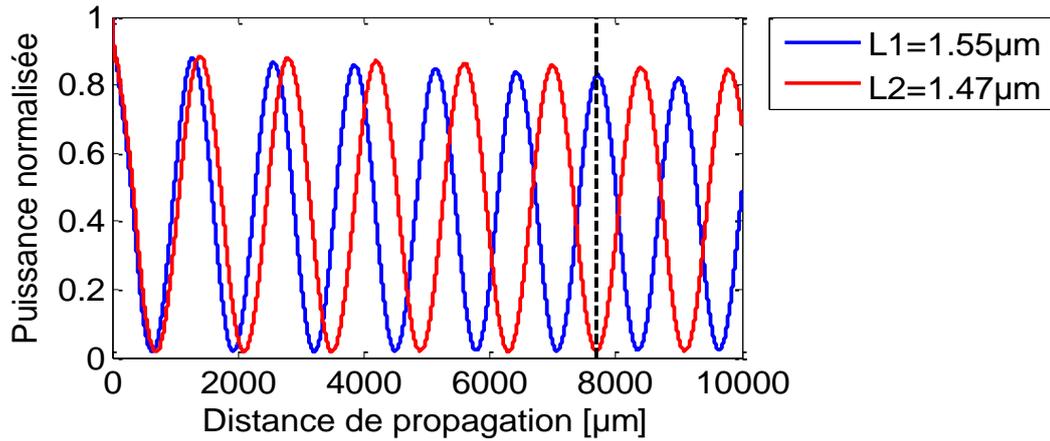
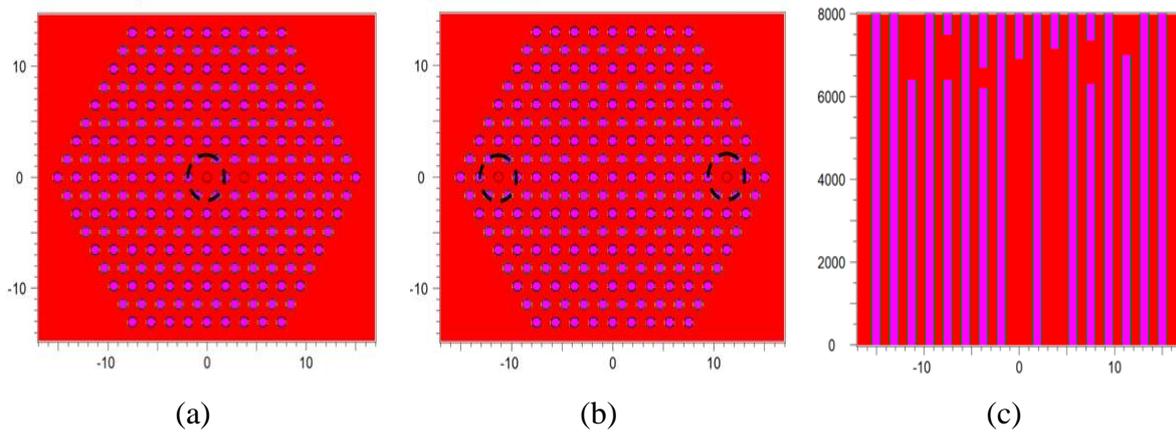


Figure IV. 8: Les résultats de la puissance normalisée par rapport à la distance pour la longueur d'onde 1.47 μm et 1.55 μm .

IV.4 Diviseur de puissance 1 x 2 basé sur les FCP

La figure IV.9 (a-c) nous présente la structure de la FCP proposé pour la conception d'un diviseur de puissance qui sert à diviser la puissance d'entrée a deux parties égales à la sortie, la figure 9 (d-f) représente le profil d'intensité en vue horizontale et verticale en passant par des différentes étapes de couplage entre les segments adjacents et la figure IV. 9(g-i) présente la distribution du champ du diviseur de puissance depuis le début de la transmission ou elle était maximale (100%) jusqu'à la division sur les deux ports de sortie en égalité (60%) [3].



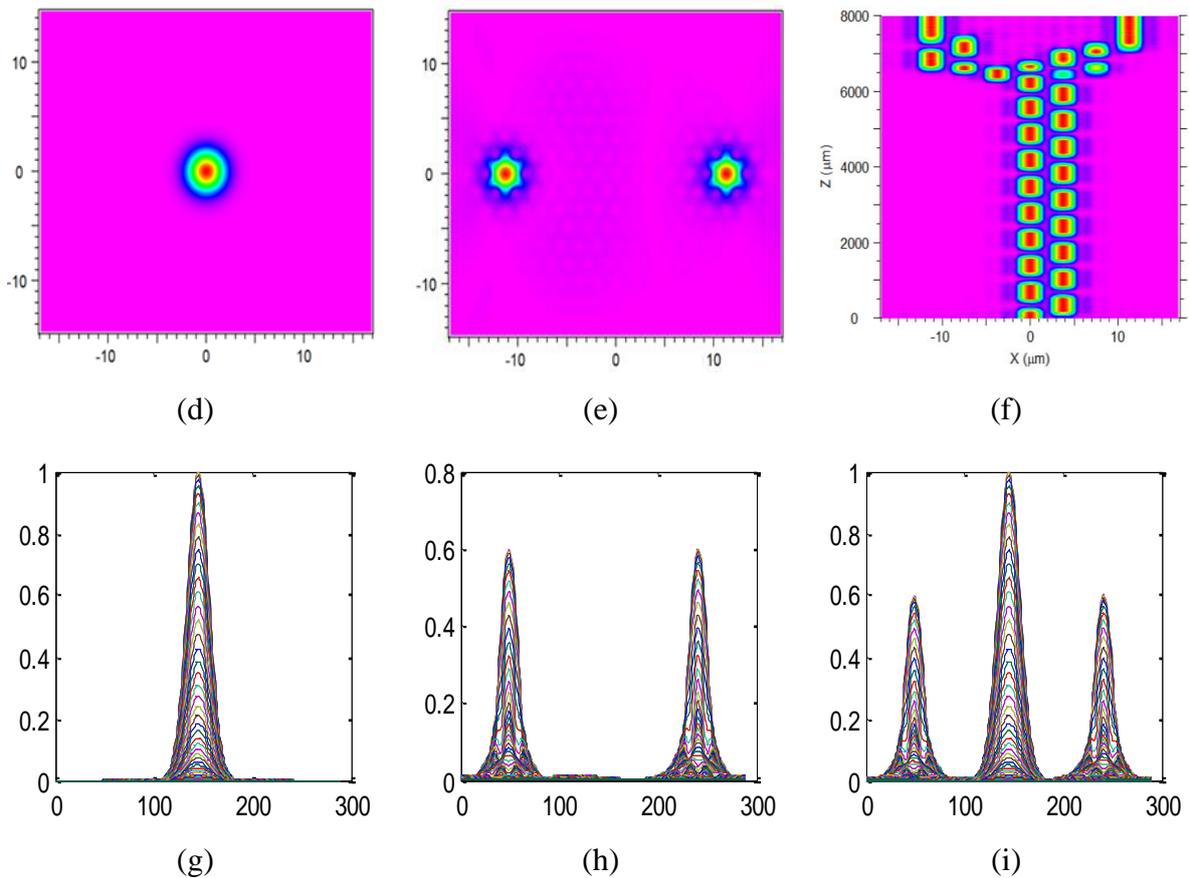


Figure IV. 9: Le profil d'intensité en vue horizontale et verticale et la distribution du champ.

On remarque qu'après la transmission de notre signal d'une longueur d'onde de $1.5\mu\text{m}$, il s'est divisé en deux parties, une partie vers le port de droite et une autre partie vers le port de gauche après une distance de $8000\mu\text{m}$. On peut observer dans la figure IV.10 qu'il y a une puissance d'entrée (en vert) qui est quasiment stable à 87% depuis le début de la transmission jusqu'à une distance de 6.909mm . Nous avons eu des pertes de transmission de 13%, en raison de l'absorption intrinsèque du matériau, des courbures et des pertes de connexion, mais ce sont des pertes négligeables, car nous avons une forte puissance qui traverse notre FCP. Après cette distance, le signal sera nul dans le segment d'entrée, car il sera dirigé vers les deux autres ports de sortie (rouge et noir) ou on voit que la puissance normalisée est à zéro jusqu'à 6.909mm , le premier port atteint jusqu'à 38% (rouge) et le deuxième port a atteint jusqu'à 41% (noir).

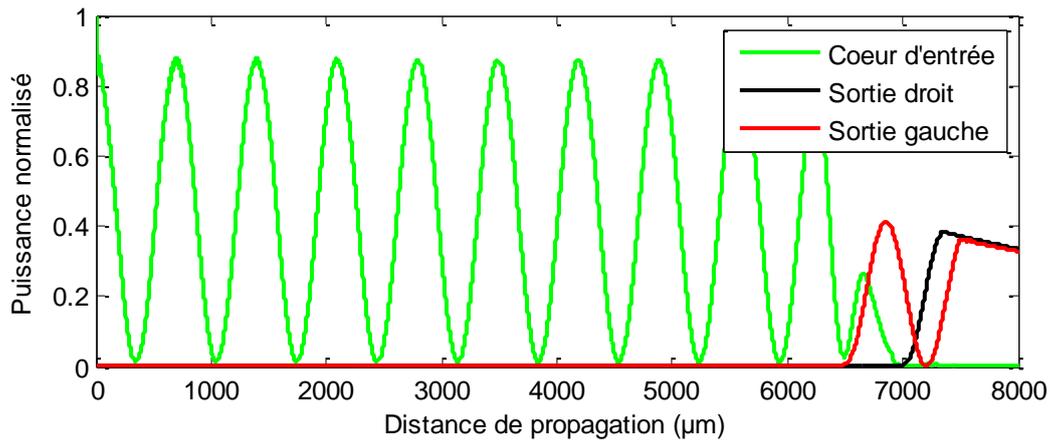
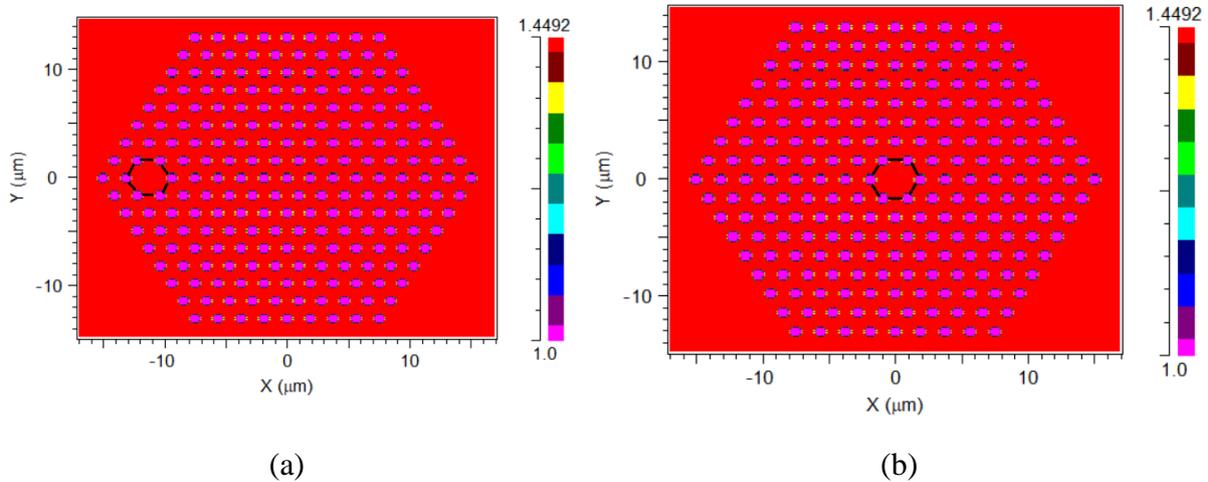
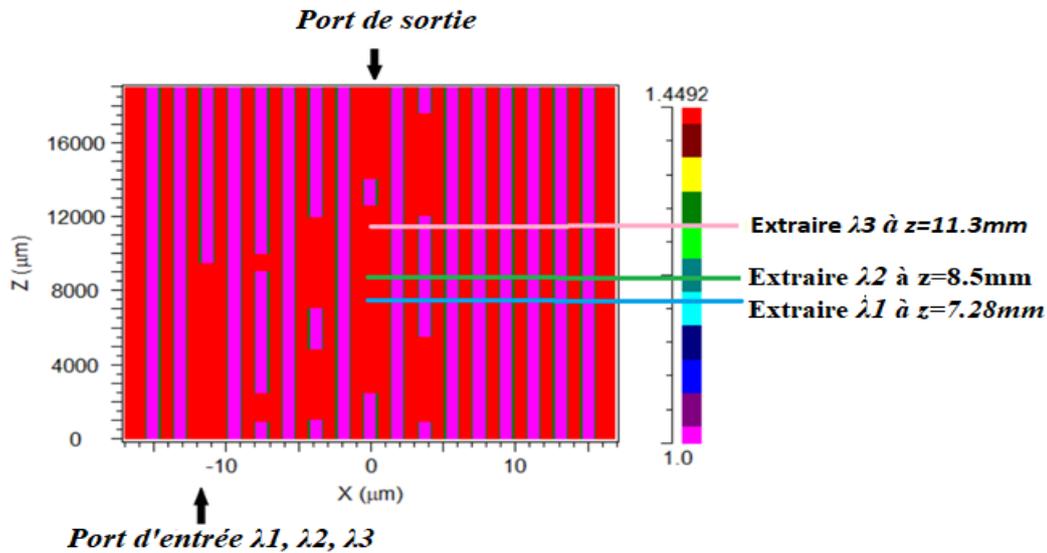


Figure IV. 10: La puissance d'entrée et des deux sorties du diviseur de puissance.

IV.5 Extracteur de longueurs d'ondes 1x3 basé sur les FCP

Ce composant est spécifiquement conçu pour la technologie FTTH [4], permettant l'extraction de longueurs d'onde injecté dans un port d'entrée à des distances variées jusqu'au même port de sortie. La figure IV.11 illustre le profil d'indice de la structure proposé selon une vue XY et XZ.





(c)

Figure IV. 11 : Le profil d'indice de diviseur en vue XY et XZ.

La figure IV.12 représente la répartition du champ pour les trois longueurs d'onde différentes, à savoir $0.85 \mu\text{m}$, $1.45 \mu\text{m}$ et $1.2 \mu\text{m}$, au niveau du port de sortie et à diverses distances z , soit 7.28 mm , 8.5 mm et 11.3 mm respectivement. Sur la droite des figures, les taux de transmission pour chaque longueur d'onde du port d'entrée vers le port de sortie sont indiqués, mesurant respectivement 98% , 71% et 90% .

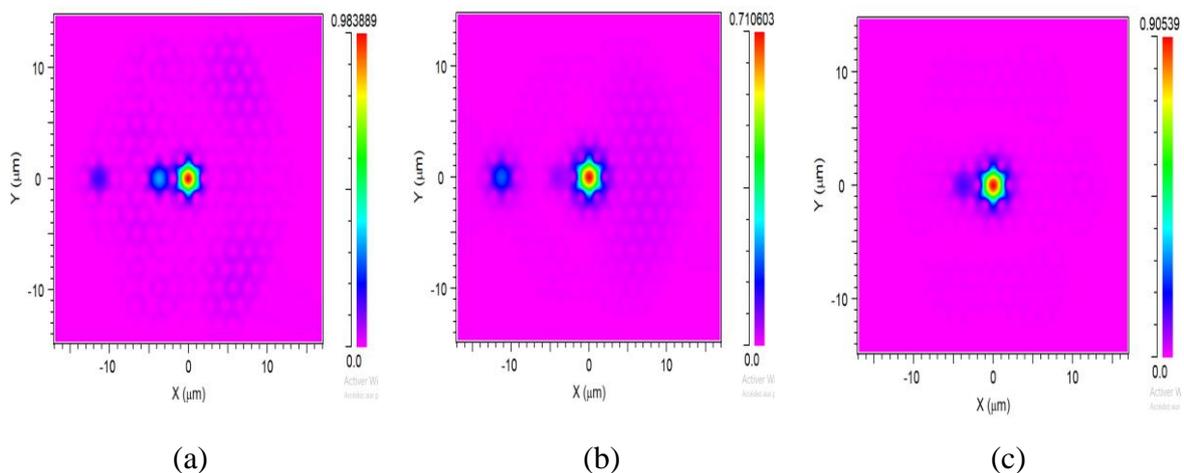


Figure IV. 12 : La distribution du champ au port de sortie pour (a): $\lambda=0.85\mu\text{m}$, (b): $\lambda=1.45\mu\text{m}$, (c): $\lambda=1.2\mu\text{m}$.

La figure IV.13 illustre l'évolution de la puissance en fonction de la distance pour les trois ports de sortie. Il est observé que chaque longueur d'onde est extraite à une valeur spécifique de z ,

tandis que les autres longueurs d'onde affichent des puissances nulles à cette même valeur. Cette caractéristique évite le risque et assure qu'à cette valeur de distance, seule une longueur d'onde est extraite.

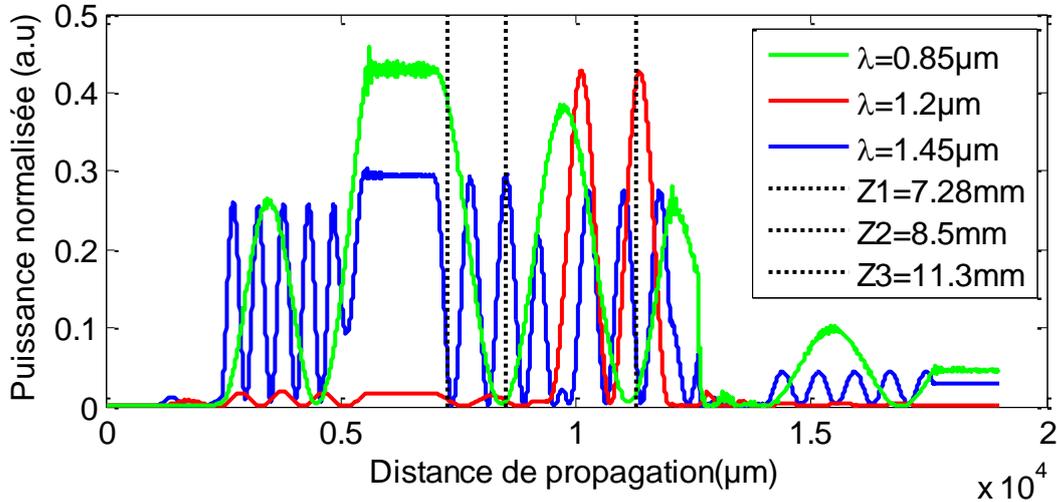
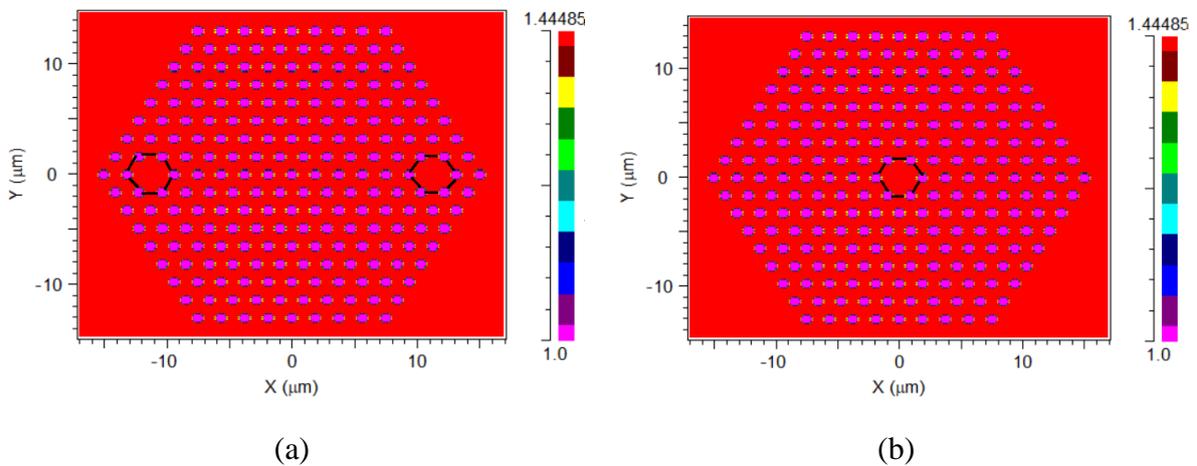


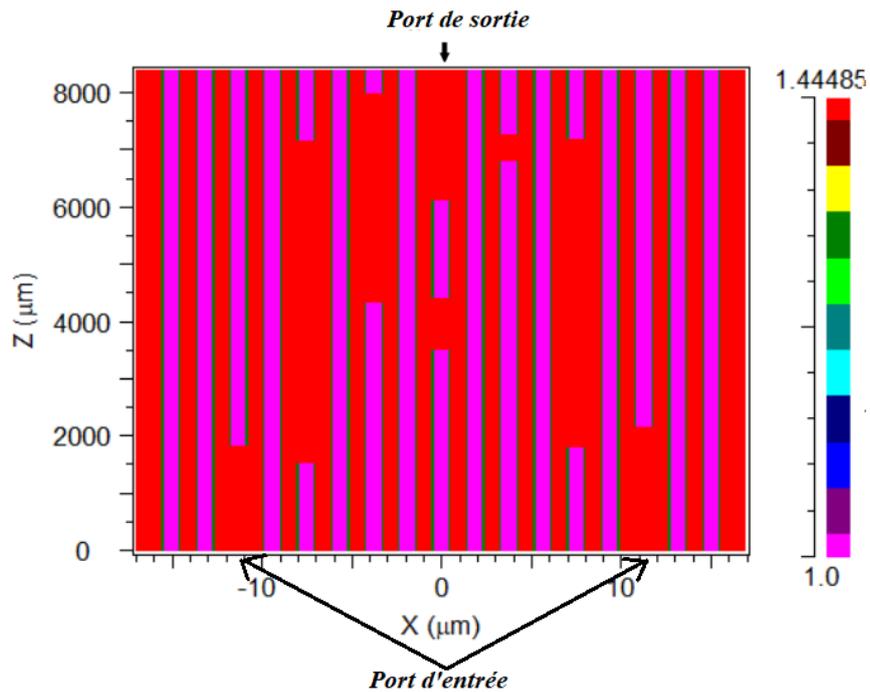
Figure IV. 13 : La puissance en fonction de la distance pour les trois ports de sortie.

IV.6 Les multiplexeurs et démultiplexeurs à base de fibre à cristaux photoniques

IV.6.1 Multiplexeur 1 x 2

Afin d'atteindre les performances et les caractéristiques requises, nous avons soigneusement défini des paramètres géométriques spécifiques. Le diamètre est de $0.9 \mu\text{m}$, Λ est de $1.88 \mu\text{m}$, avec une FCP mesurant 8.4 millimètres de long. La figure IV.14 présente le profil d'indice selon la vue de face (a-b) et la vue de côté (c) [5].





(c)

Figure IV. 14 : Le profil d'indice selon la vue de face (a) et la vue de côté (b).

La figure IV.14 représente la propagation de la lumière sur la longueur de la fibre et la connexion entre les cœurs du FCP pour les canaux de longueur d'onde sélectionnés selon l'axe XZ.

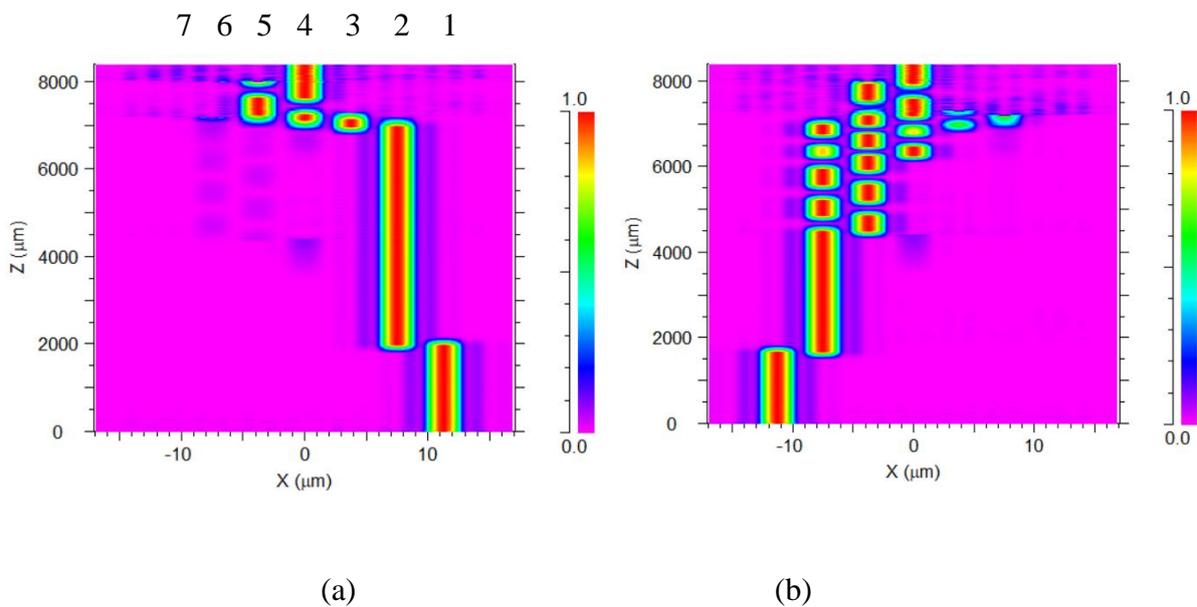


Figure IV. 15 : Le profil d'intensité des deux longueurs d'onde 1.46μm et 1.48μm.

Elle représente le chemin optique à travers les différentes phases depuis le début de la transmission (côté droit $\lambda_1 = 1.46 \mu\text{m}$ et côté gauche $\lambda_2 = 1.48 \mu\text{m}$) jusqu'au centre (la sortie) : du port 1 et 7 (ports d'entrée) au port 4 (port de sortie) par le couplage entre les ports adjacents qui ont les mêmes indices.

Le signal d'entrée/sortie selon l'axe XY pour les deux longueurs d'onde, $1.46 \mu\text{m}$ et $1.48 \mu\text{m}$, est visible sur la figure IV.16. Nous avons sélectionné ces deux longueurs d'onde car elles sont proches de la troisième fenêtre de transmission optique à $1.55 \mu\text{m}$ et parce qu'elles sont compatibles avec le multiplexage par répartition en longueur d'onde grossière (CWDM), qui a un espacement des canaux de l'ordre de 20 nm . Après 8.4 mm , on constate que nos signaux d'entrée ont été regroupés sur un seul port de sortie, démontrant l'efficacité du multiplexeur de puissance.

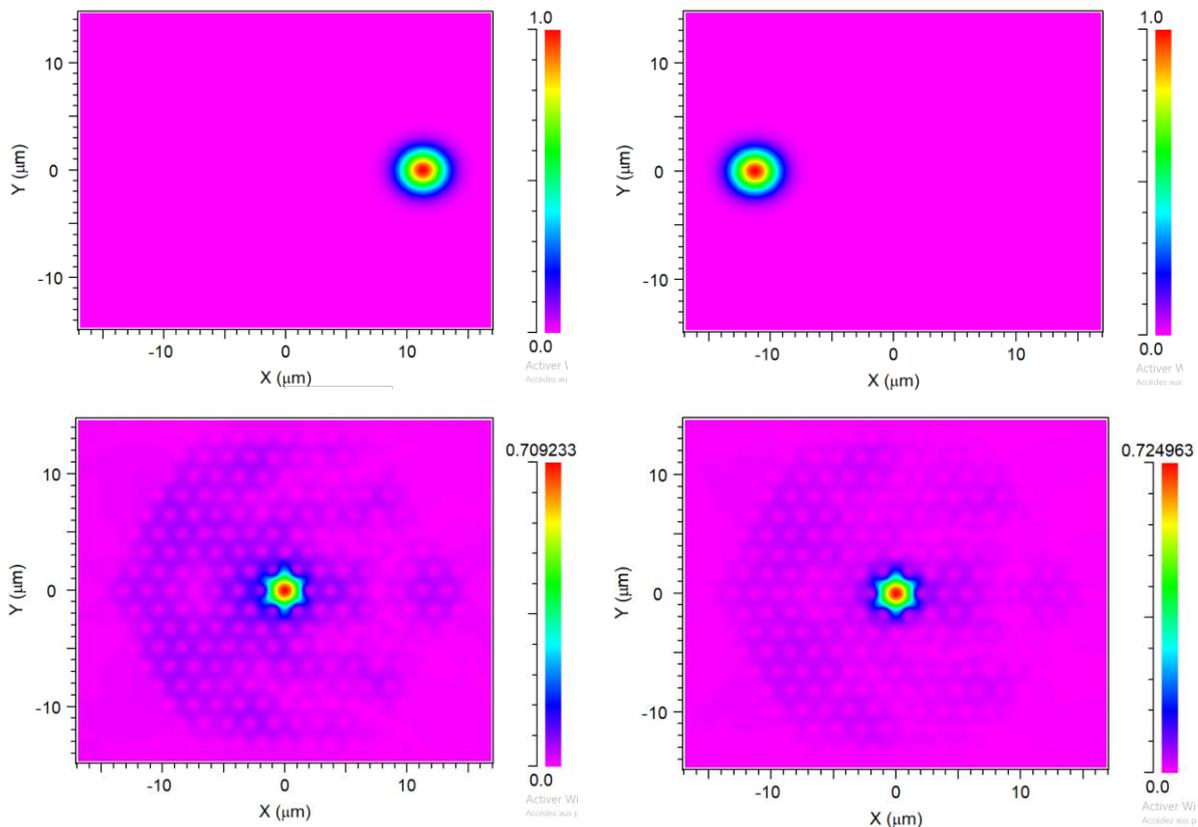


Figure IV. 16 : La distribution du champ d'entrée et de sortie pour les deux longueurs d'ondes $1.46 \mu\text{m}$ et $1.48 \mu\text{m}$.

Dans la figure IV.17.a, la transmission initiale présente une puissance de départ de 87% sur une distance de 1.839 mm . Cependant, une perte de 13% de cette puissance de départ est observée en raison de pertes de transmission. Au-delà de cette plage, le signal du segment d'entrée devient nul, dirigé vers le port de sortie avec une puissance de 39% . Dans la figure

IV.17.b, la puissance d'entrée décroît progressivement jusqu'à atteindre zéro à 2 mm, où elle est focalisée sur le port de sortie à la distance de 6,909 mm, affichant une puissance de 57%. Ce processus implique plusieurs étapes de couplage d'un segment à son segment adjacent.

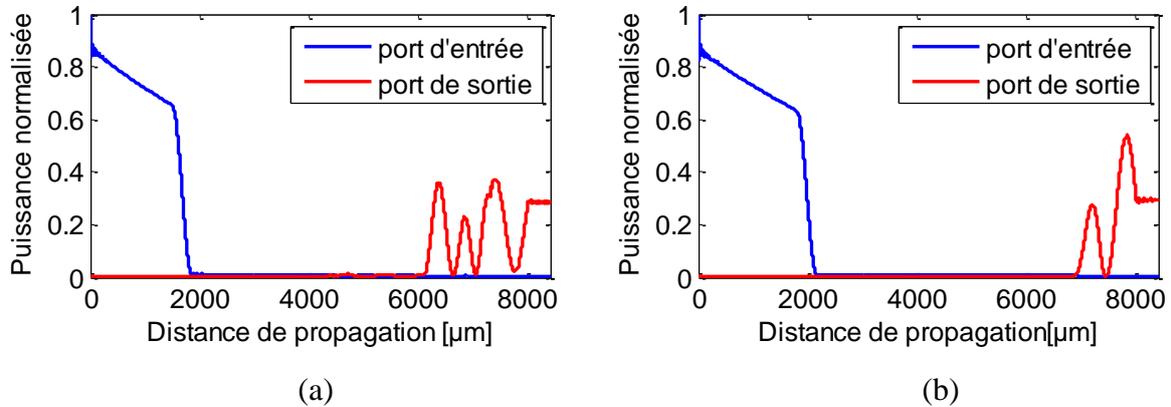


Figure IV. 17 : La puissance d'entrée et de sortie en fonction de la distance pour les deux longueurs d'onde 1.48 μm et 1.46 μm .

L'amplitude initiale des deux signaux est illustrée dans la figure IV.18.b, où ils affichent une amplitude équivalente à 100%. Lorsqu'ils sont regroupés vers la même sortie à une distance de 8.4 mm, la transmission atteint une valeur de 70% pour le cœur droit (1.46 μm) figure IV.18.a et de 72% pour le cœur gauche (1.48 μm) figure IV.18.c.

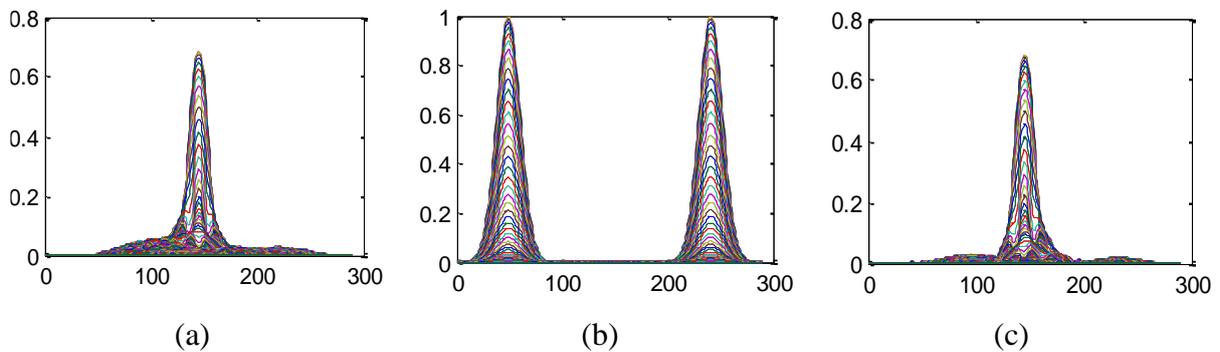


Figure IV. 18 : L'amplitude d'entrée et de sortie des deux longueurs d'onde 1.46 et 1.48 μm .

IV.6.2 Démultiplexeur 1 x 2

La figure IV.19 présente des perspectives détaillées en section transversale de la structure du démultiplexeur, avec une vue en XY à $z=0$ (figure IV.19.a), une vue XY à $z=7.5$ mm (figure IV.19.b) et une vue en XZ (figure IV.18.c). Cette représentation permet d'observer la répartition des zones de silice pure et d'air au sein du démultiplexeur.

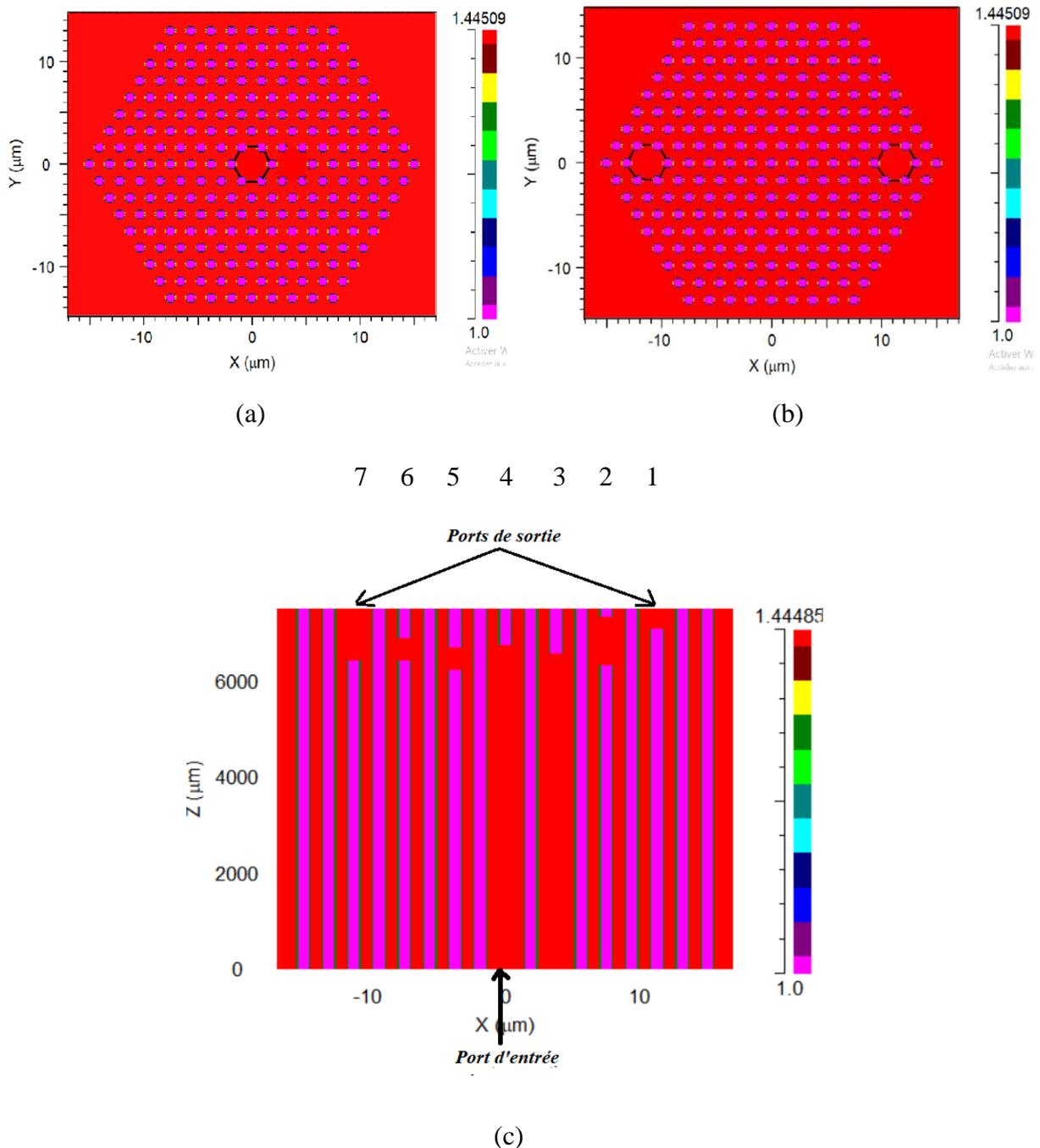


Figure IV. 19 : Le profil d'indice en vue XY à $z=0$ et 7.5mm et XZ.

La figure IV.20 décrit la propagation de la lumière le long de la fibre, ainsi que la connexion entre les cœurs du FCP pour les canaux de longueur d'onde sélectionnés selon l'axe XZ. Elle présente le trajet optique à travers différentes phases, débutant au centre de la transmission et se prolongeant vers le côté droit à $\lambda_1 = 1.46 \mu\text{m}$ (figure IV.20.a) et le côté gauche à $1.48 \mu\text{m}$ (figure IV.20.b). Ce cheminement s'effectue du port 4 (port d'entrée) vers les ports 1 et 7 (ports de sortie) grâce au couplage entre les ports adjacents qui partagent les mêmes indices [6].

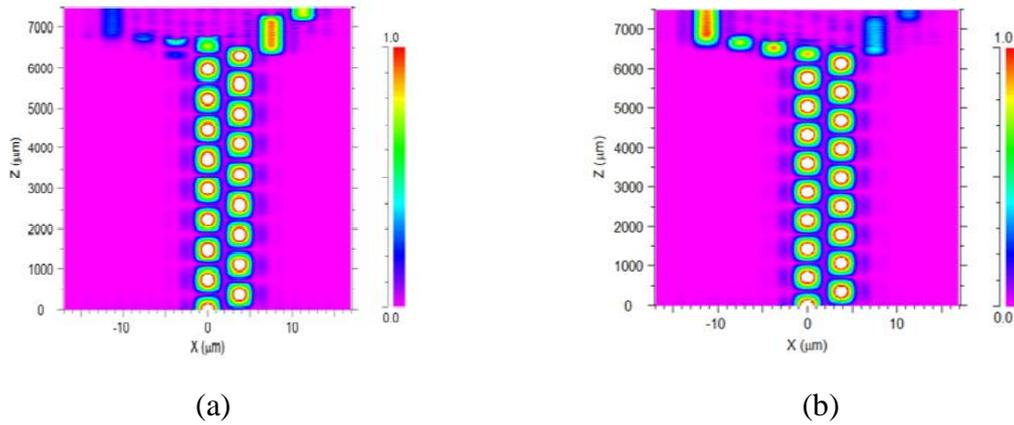


Figure IV. 20 : Le profil d'intensité des deux longueurs d'onde $1.46 \mu\text{m}$ et $1.48 \mu\text{m}$.

La figure IV.21.a illustre la répartition du champ à l'entrée du dispositif et après une distance de propagation de 7.5 mm , la sortie du dispositif peut séparer les deux signaux en deux parties distinctes : une partie droite (figure IV.21.b) et une partie gauche (figure IV.21.c). Cette caractéristique témoigne du fonctionnement d'un démultiplexeur ayant une seule entrée mais transmettant des données à deux sorties.

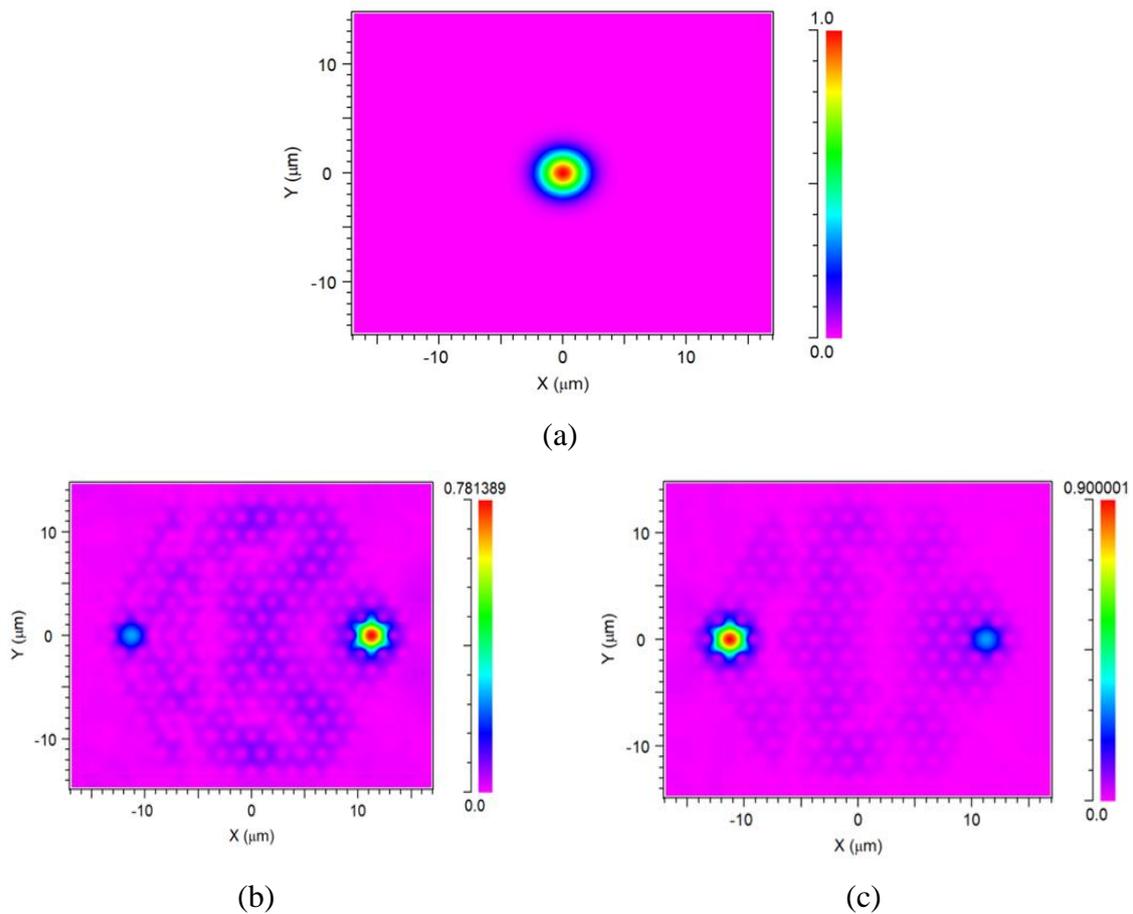


Figure IV. 21 : La distribution du champ à l'entrée (a) et à la sortie (b-c).

D'après la figure IV.22, on peut observer que le signal d'entrée reste à 87% pour des longueurs d'onde de $1.46 \mu\text{m}$ et $1.48 \mu\text{m}$, puis une chute à 0% lorsque les deux autres signaux de sortie émergent. La puissance du cœur gauche atteint 49 % à la sortie, tandis que la puissance du cœur droit atteint 37 %. La lumière est routée et couplée entre les segments adjacents, et a une distance de 6.5 mm, la lumière peut être efficacement transférée du port d'entrée au port de sortie grâce à ce mécanisme de couplage.

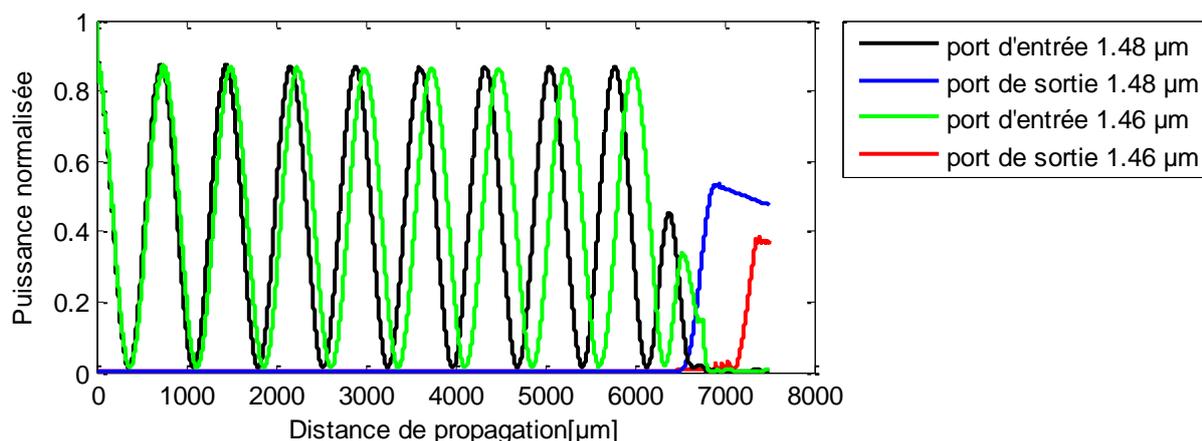


Figure IV. 22 : La puissance en fonction de la distance pour les ports d'entrée et de sortie des deux longueurs d'onde.

La figure IV.23 illustre l'amplitude à l'entrée, ainsi que les amplitudes de sortie correspondantes à une distance de propagation de 7.5 mm. Le signal d'entrée des deux signaux est à 100 % (vert. Après une distance de propagation de 7.5mm, le cœur gauche ($1.48 \mu\text{m}$) avait une transmission maximale de 90 % (couleur noire), tandis que le cœur droit ($1.46 \mu\text{m}$) avait une transmission maximale de 78 % (couleur rouge).

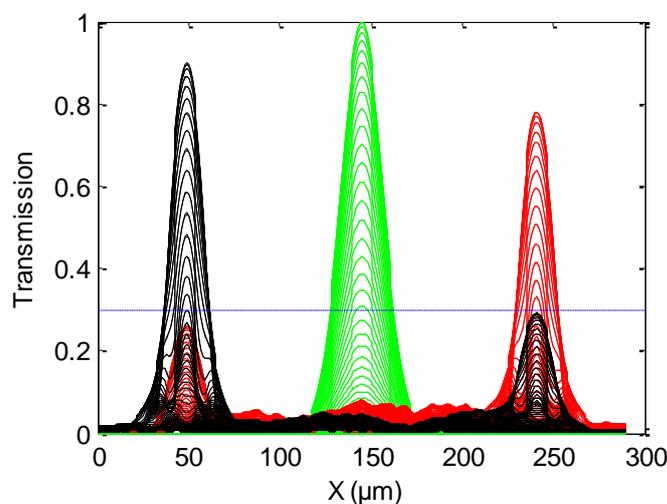


Figure IV. 23 : L'amplitude d'entrée et de sortie des deux longueurs d'ondes.

IV.6.3 Multiplexeur 1 x 4

La figure IV.24 (a-c) illustre l'ensemble de la structure du profil d'indice de réfraction a vue de face et a vue de côté [7].

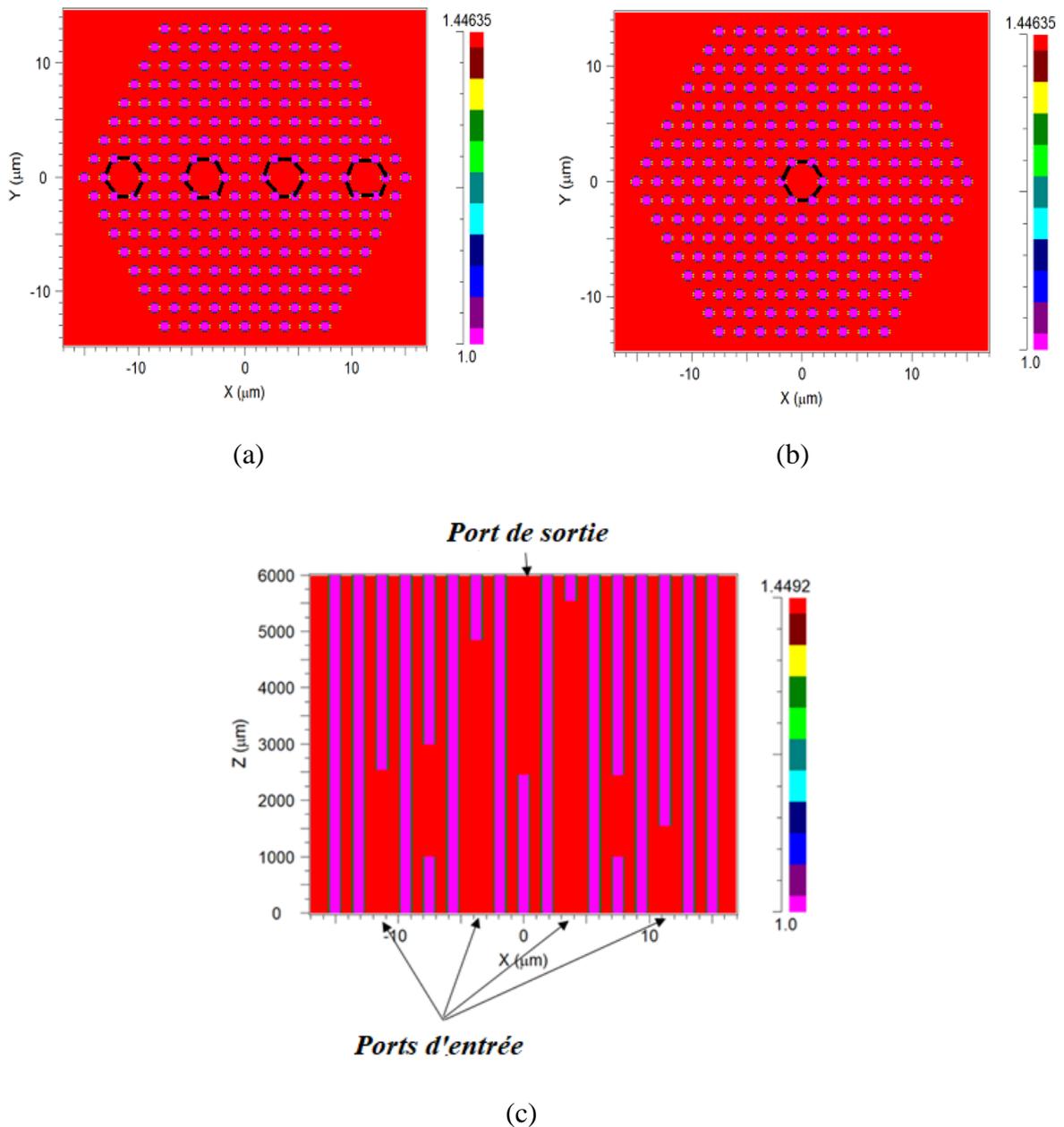


Figure IV. 24 : Le profil d'indice de la structure en vue XY à $z=0$ et 6mm et XZ.

La figure IV.25 illustre la distribution du champ des quatre longueurs d'onde 0.85-1.1-1.19 et 1.35 μm . Nos signaux d'entrée ont été combinés en un seul port de sortie après une distance de propagation de 6 mm, démontrant l'efficacité de notre multiplexeur.

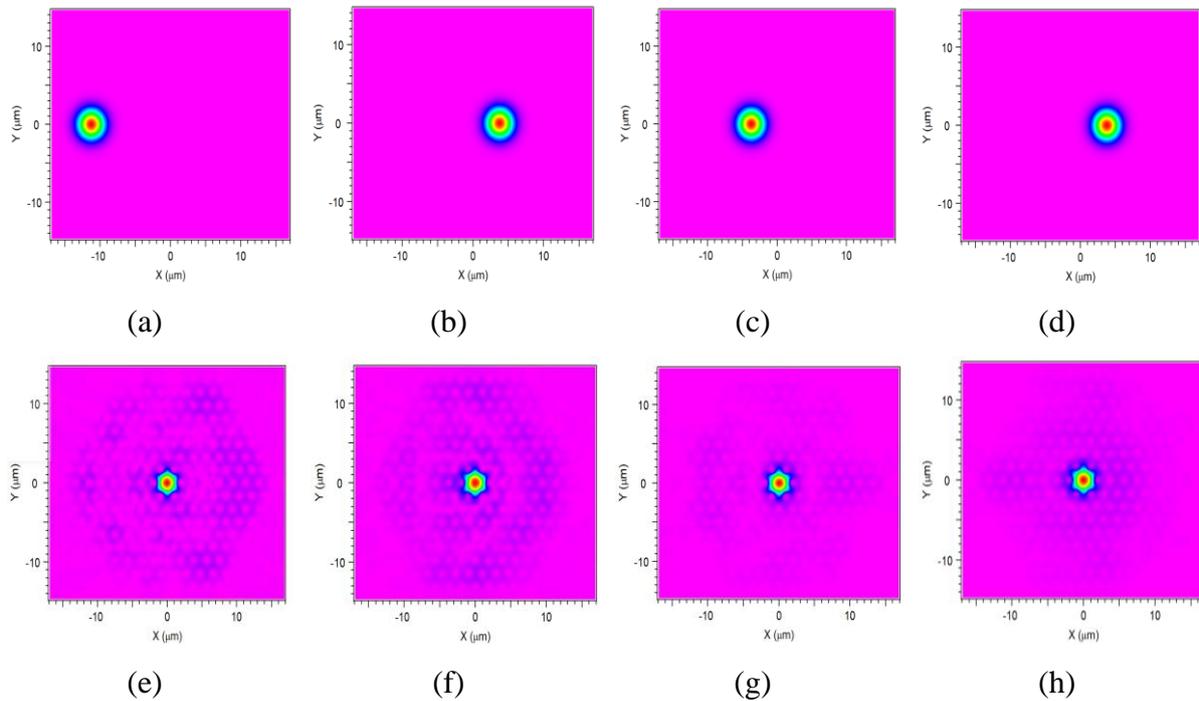
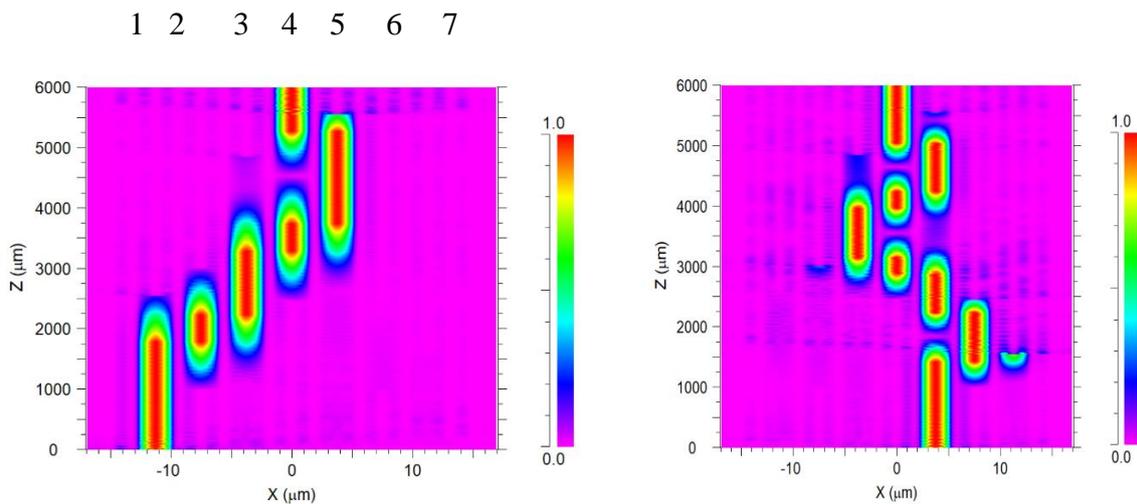


Figure IV. 25 : La distribution du champ d’entrée (a-d) et de sortie (e-h) des 4 longueurs d’onde.

Pour les canaux de longueur d’onde sélectionnés, la figure IV.26 montre comment la lumière est couplée entre les cœurs et se propage le long de la longueur de la fibre. Elle illustre le chemin optique via le couplage des ports voisins, qui mène à droite et à gauche au port 4, le port de sortie, à travers les différentes étapes depuis l’injection de la longueur d’onde.



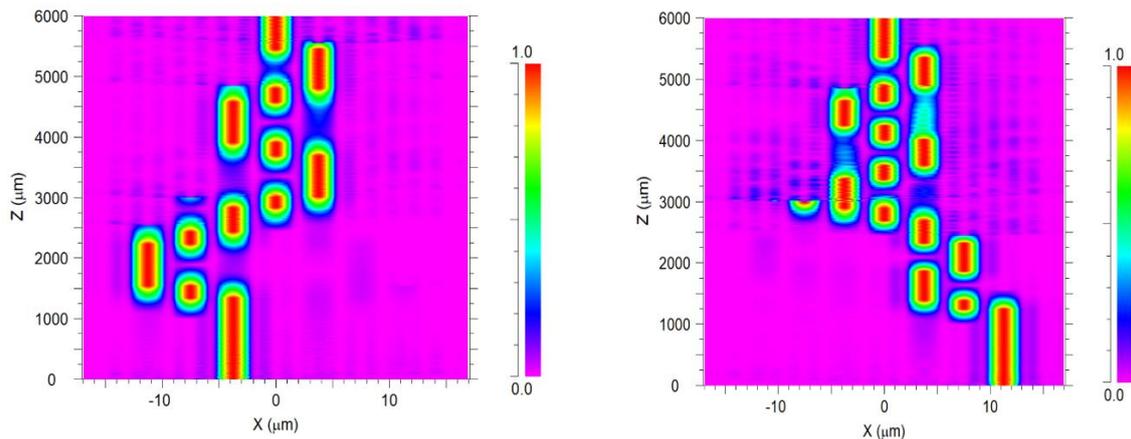


Figure IV. 26 : Le profil d'intensité des longueurs d'onde 0.85 (a), 1.1 (b), 1.19 (c) et 1.35 μm (d).

La puissance d'entrée atteint son apogée à 81 %, puis décroît jusqu'à zéro après avoir parcouru une distance d'environ 1.02 mm dans le cas de la figure IV.27.a. et IV.27.d. Pour les figures IV.27.b et c, cette chute se produit à des distances de 2.4 mm et 4.6 mm.

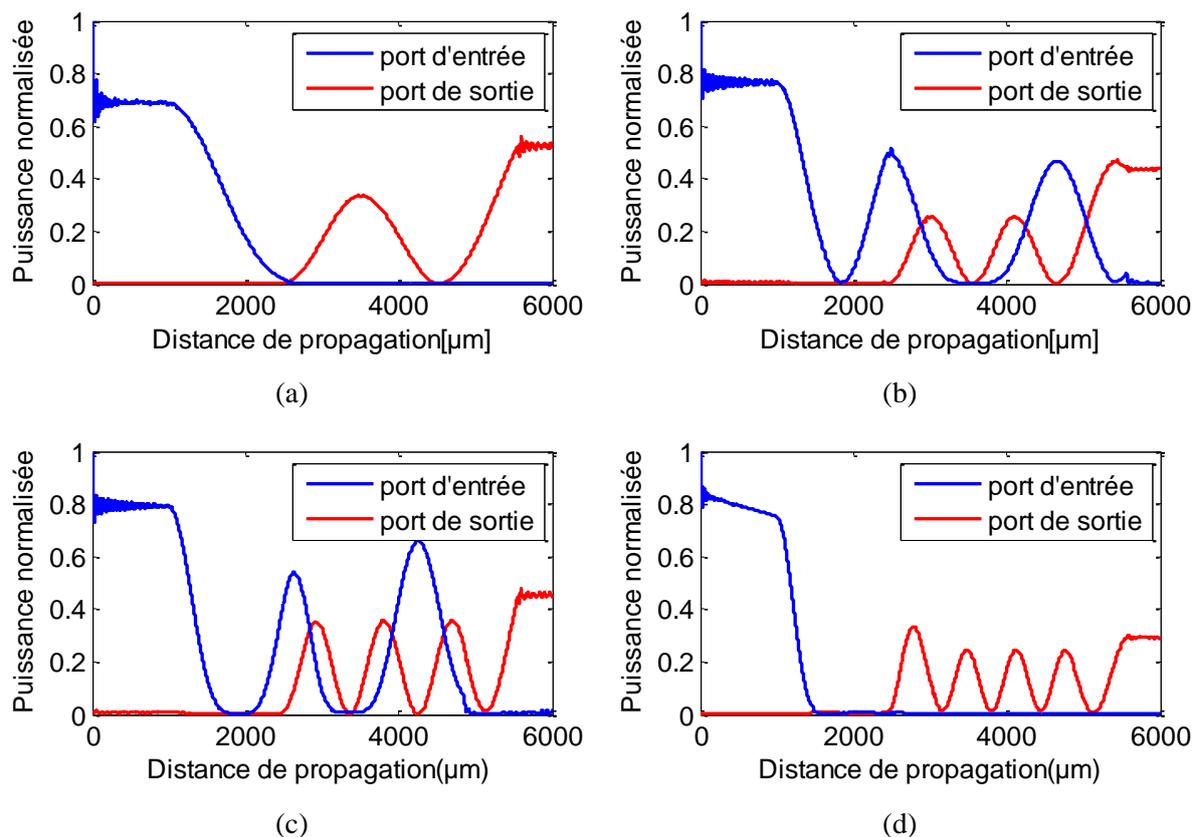


Figure IV. 27 : La puissance d'entrée et de sortie pour les 4 longueur d'ondes.

Cette variation permet à la puissance d'entrée de se concentrer au niveau du port de sortie après avoir traversé plusieurs étapes de couplage léger entre segments voisins. La puissance du port

de sortie commence à augmenter respectivement à 2.48 mm, 2.493 mm, 2.5 mm et 2.47 mm pour les figures (a-d), atteignant des valeurs maximales de 54 %, 42 %, 45.6 % et 33 %.

IV.6.4 Démultiplexeur 1 x 4

Le profil d'indice de réfraction de la structure est illustré dans la figure IV.28.

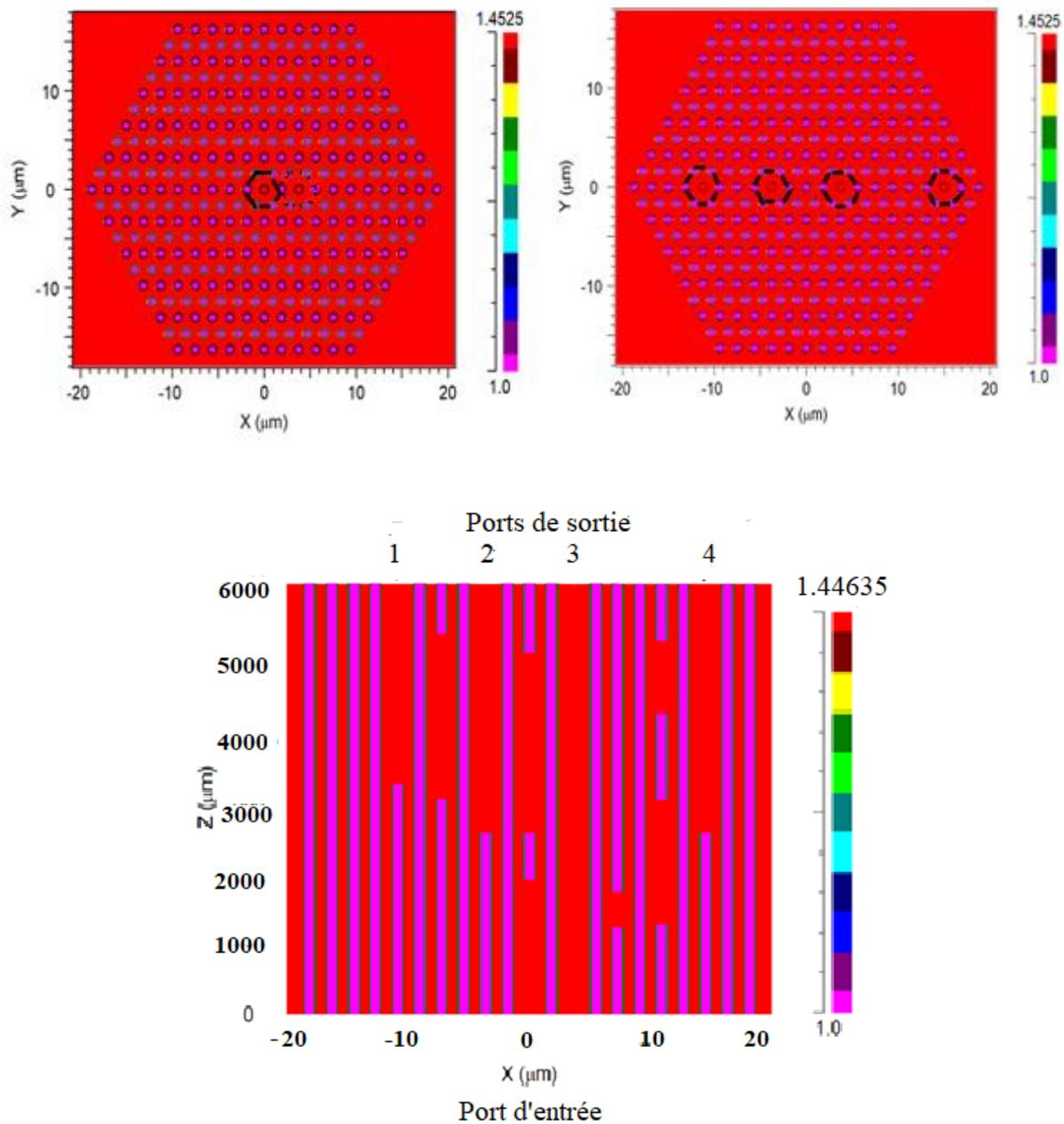


Figure IV. 28 : Profil d'indice de réfraction.

La figure IV.29 illustre la distribution du champ d'entrée/sortie pour les quatre longueurs d'onde de 0.85, 1.1, 1.19 et 1.35 μm . Après une distance de propagation de 6mm, nous avons observé que le démultiplexeur avait divisé notre signal d'entrée en quatre signaux de sortie [8].

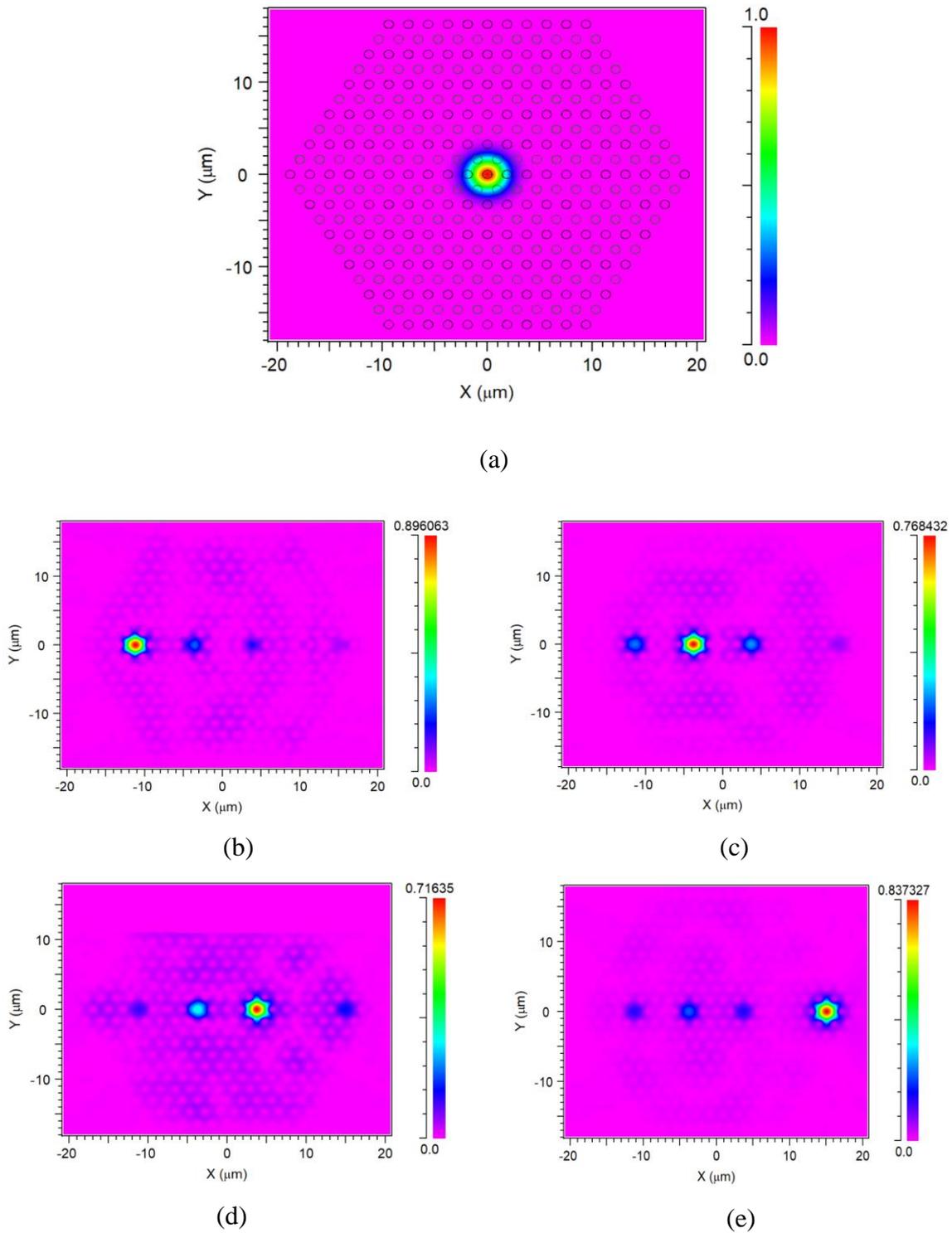


Figure IV. 29 : La distribution du champ d'entrée (a) et de sortie (b-e) des 4 longueurs d'onde.

La figure IV.30 illustre comment la lumière est couplée entre les segments et se propage sur toute la longueur de la fibre dans le plan XZ pour les canaux de longueur d'onde sélectionnés.

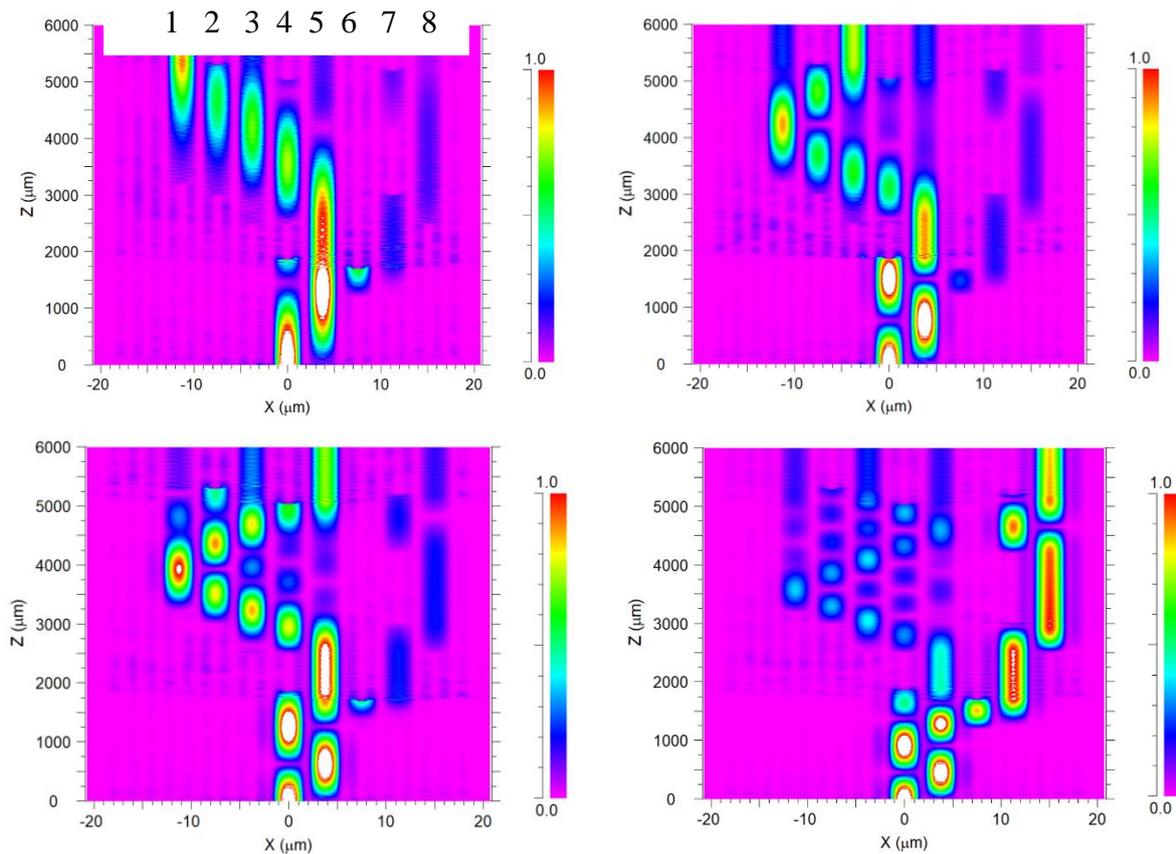


Figure IV. 30 : Le profil d'intensité des longueurs d'onde (a) : $\lambda=0.85\mu\text{m}$, (b) : $\lambda=1.1\mu\text{m}$, (c) : $\lambda=1.19\mu\text{m}$ et (d) : $\lambda=1.35 \mu\text{m}$.

La puissance d'entrée atteint son point culminant à 81 %, pour ensuite décroître à zéro à différentes distances selon les cas. Dans le cas de la figure IV.31.a, cette diminution se produit à des distances de 1.8 mm, 2 mm, puis 4.8 mm. Pour la figure IV.31.b, elle se manifeste à des distances de 0.9 mm, 2 mm, et 4.2 mm. Ensuite, dans le cas de la figure IV.31.c, les distances concernées sont de 0.8 mm, 2 mm, 3.8 mm, et 5 mm. Enfin, pour la figure IV.31.d, la chute se produit à des distances de 0.5 mm, 1.8 mm, et 2 mm. Cette variation permet à la puissance d'entrée de se concentrer au niveau du port de sortie après avoir traversé plusieurs étapes de couplage léger entre les segments voisins. Les puissances au niveau du port de sortie, pour les quatre figures (a-d), atteignent des valeurs maximales de 32 %, 27 %, 25 %, et 39 % à des distances respectives de 5.324 mm, 5.487 mm, 5.55 mm, et 5.86 mm.

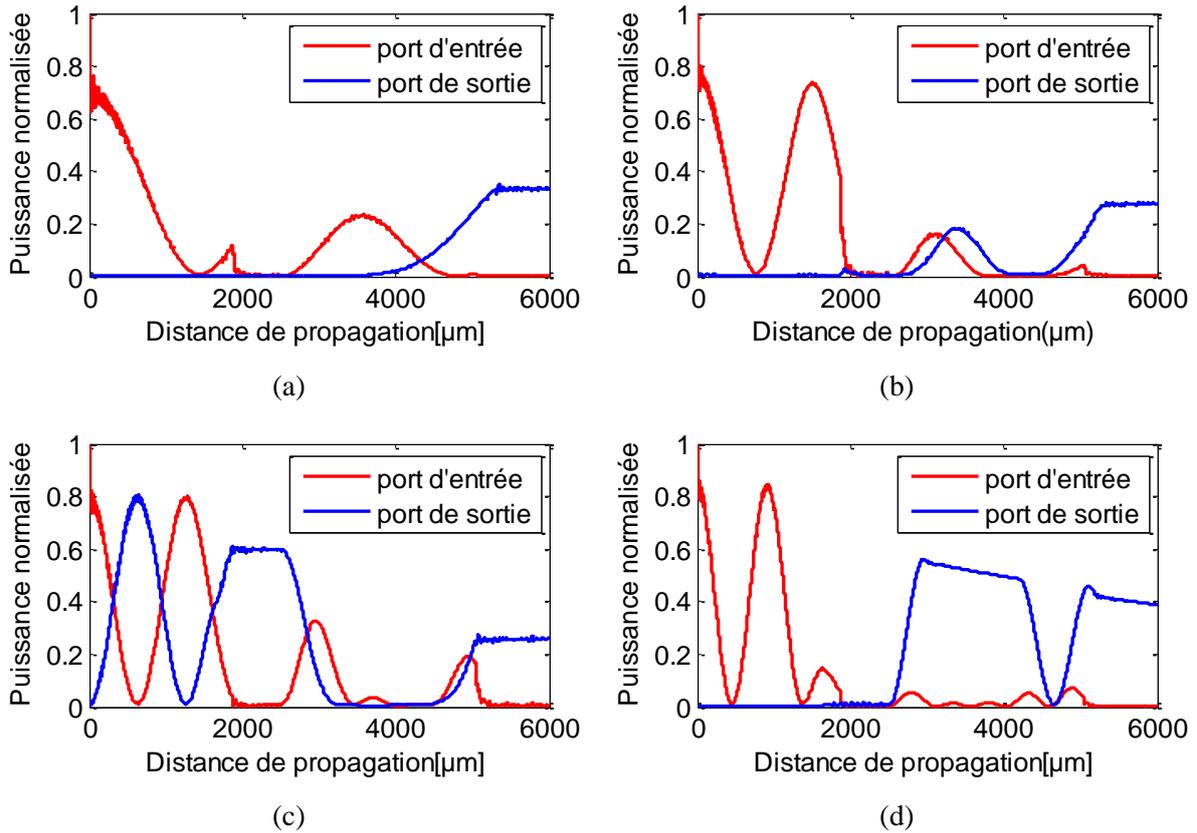
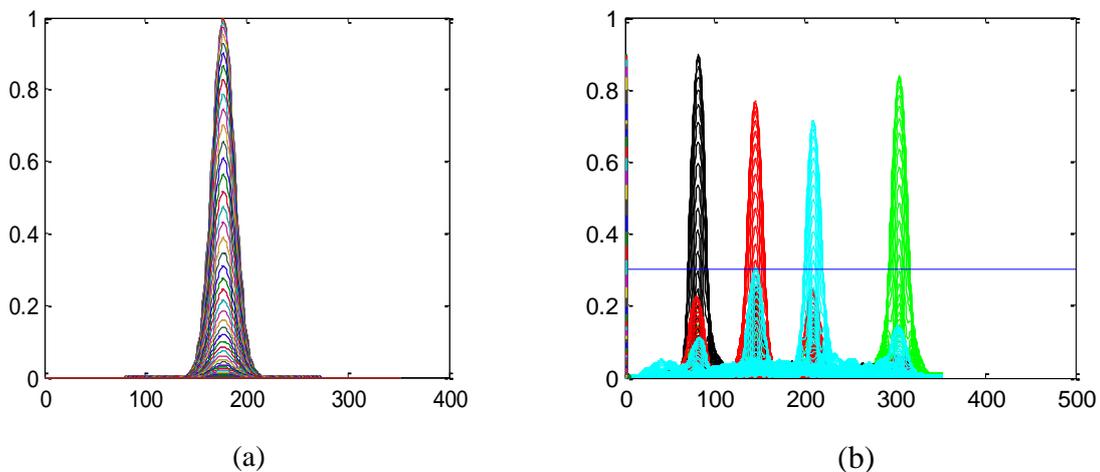


Figure IV. 31 : La puissance d’entrée et de sortie pour les 4 longueur d’ondes.

L’amplitude d’entrée des signaux au moment d’injection est à sa valeur maximale (autour de 100%) (figure IV.32.a). La figure IV32.b illustre la répartition du champ à la sortie qui est à 89 % pour le premier cœur ($0.85 \mu\text{m}$), 76 % pour le deuxième ($1.1 \mu\text{m}$), 71 % pour le troisième ($1.19 \mu\text{m}$), et 83 % pour le quatrième ($1.35 \mu\text{m}$). En tant que démultiplexeur, la sortie (après 6 mm) divise le signal d’entrée en quatre signaux.



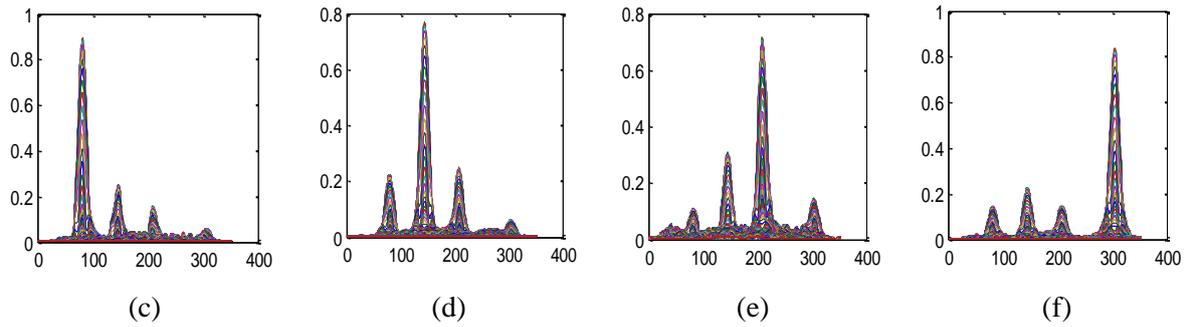


Figure IV. 32 : La répartition du champ d'entrée (a) et de sortie (b-f) des 4 longueurs d'ondes.

IV.6.5 Multiplexeur 1 x 8

La figure IV.33 présente le profil d'indice de réfraction.

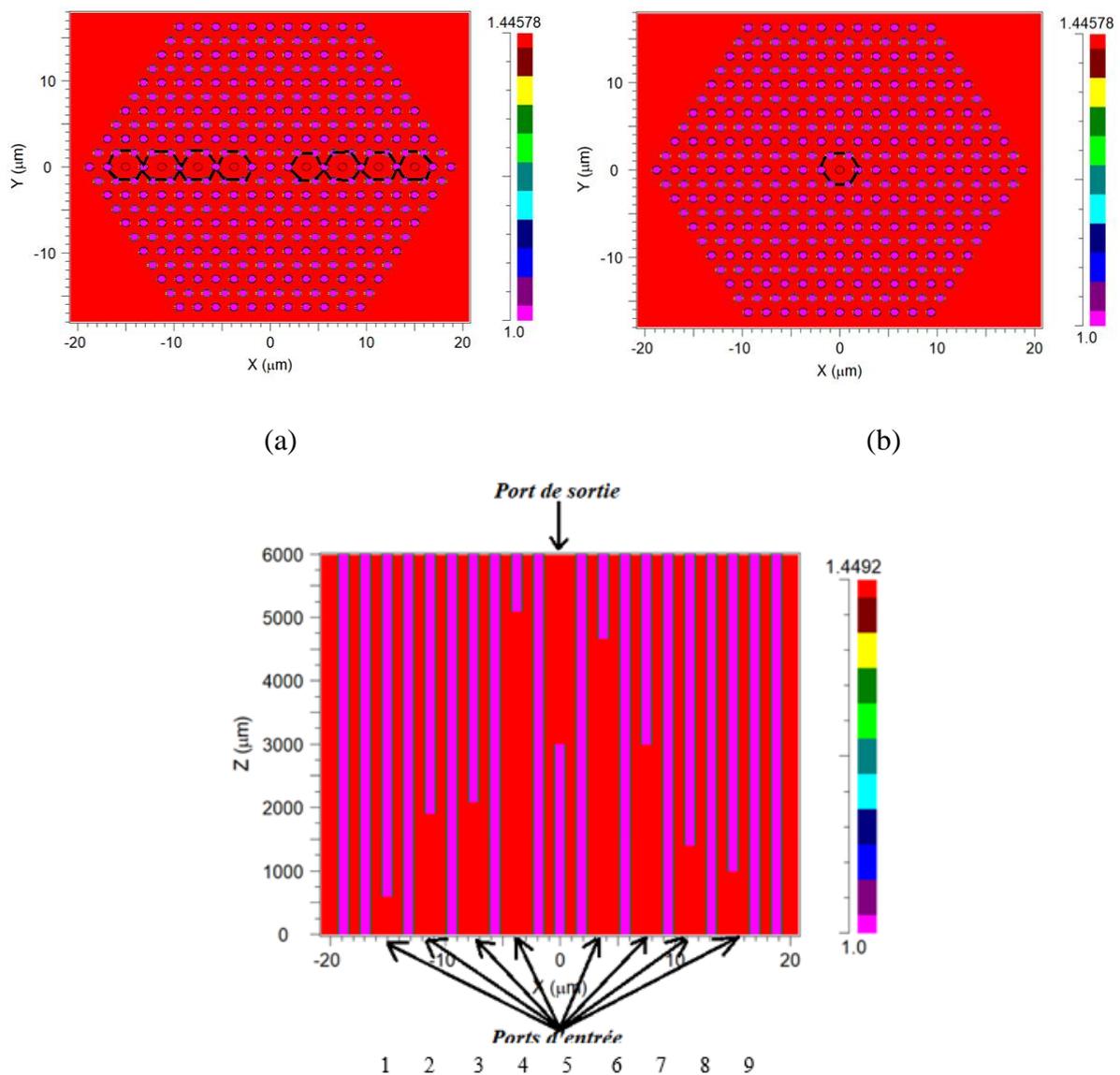


Figure IV. 33 : Profil d'indice selon l'axe XZ et XY à $z=0$ et à $z=6\text{mm}$.

Les figures IV.34 et IV.35 illustrent la répartition du champ d'entrée/sortie dans le plan XY pour les huit longueurs d'onde : 1.32, 1.3, 1.54, 1.19, 1.4, 0.98, 1.35 et 1.1 μm . Notre observation des signaux d'entrée combinés en un seul port de sortie après une distance de propagation de 6 mm confirme l'efficacité du multiplexeur.

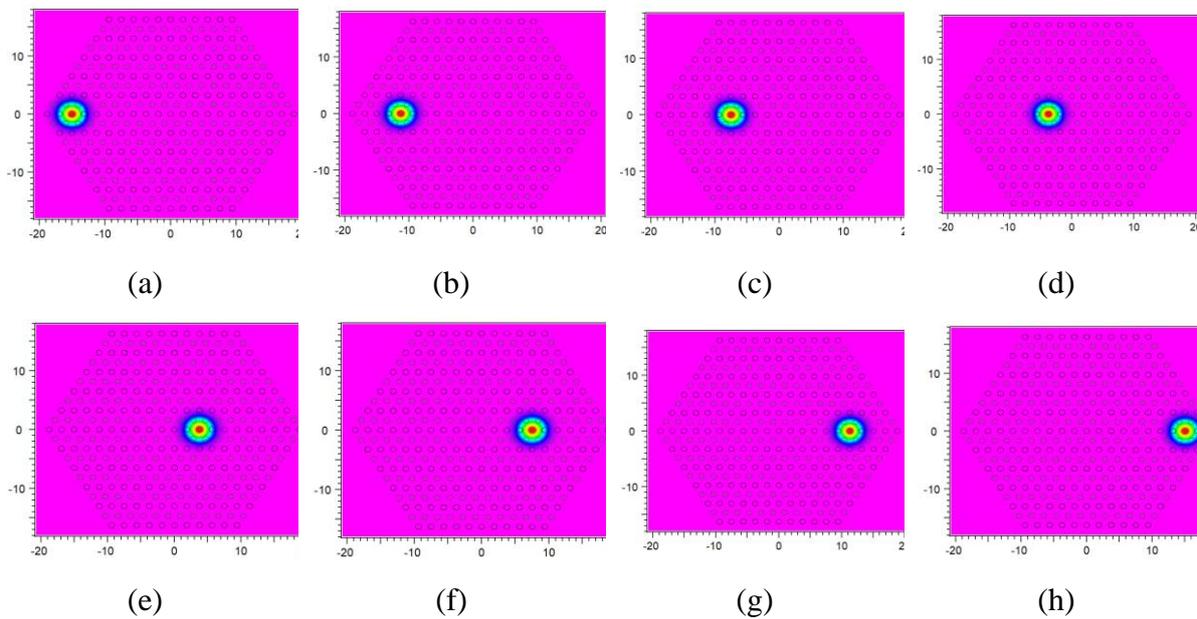


Figure IV. 34 : La distribution du champ d'entrée des huit longueurs d'onde.

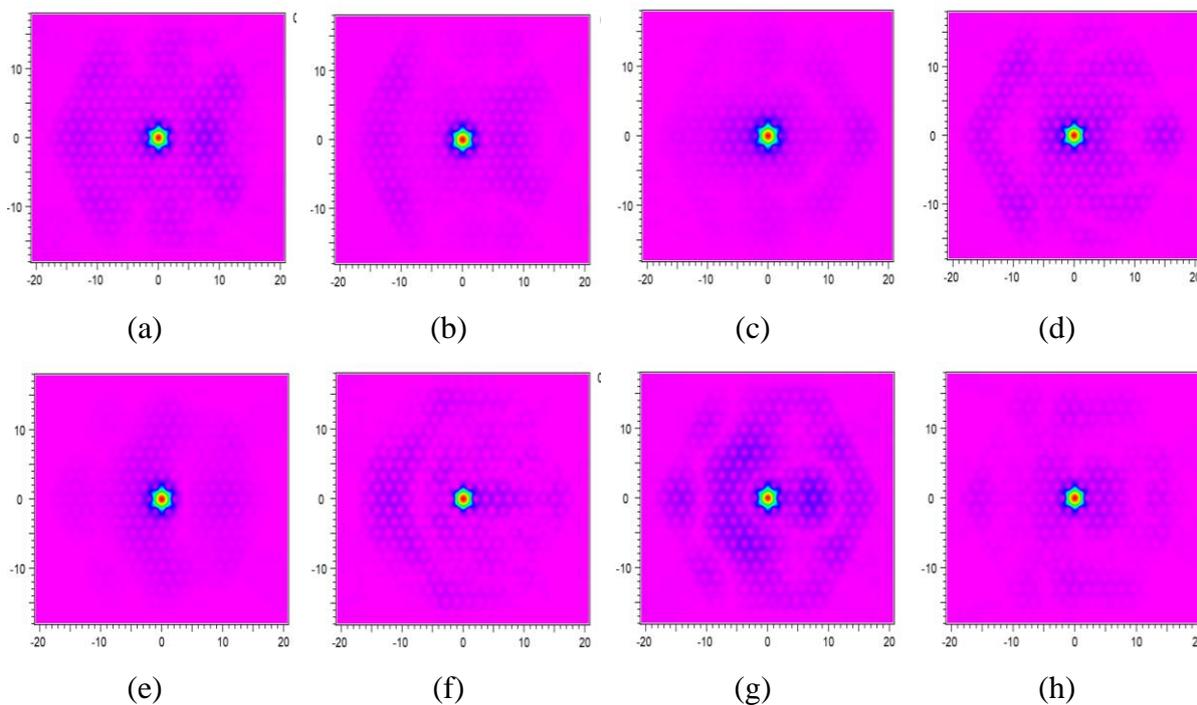


Figure IV. 35 : La distribution du champ de sortie des huit longueurs d'onde.

La figure IV.36 illustre le profil d'intensité associé à chacune des huit longueurs d'onde. Elle met en évidence la manière dont les ports adjacents, partageant le même indice, peuvent être couplés pour diriger la lumière du port d'entrée vers le port de sortie.

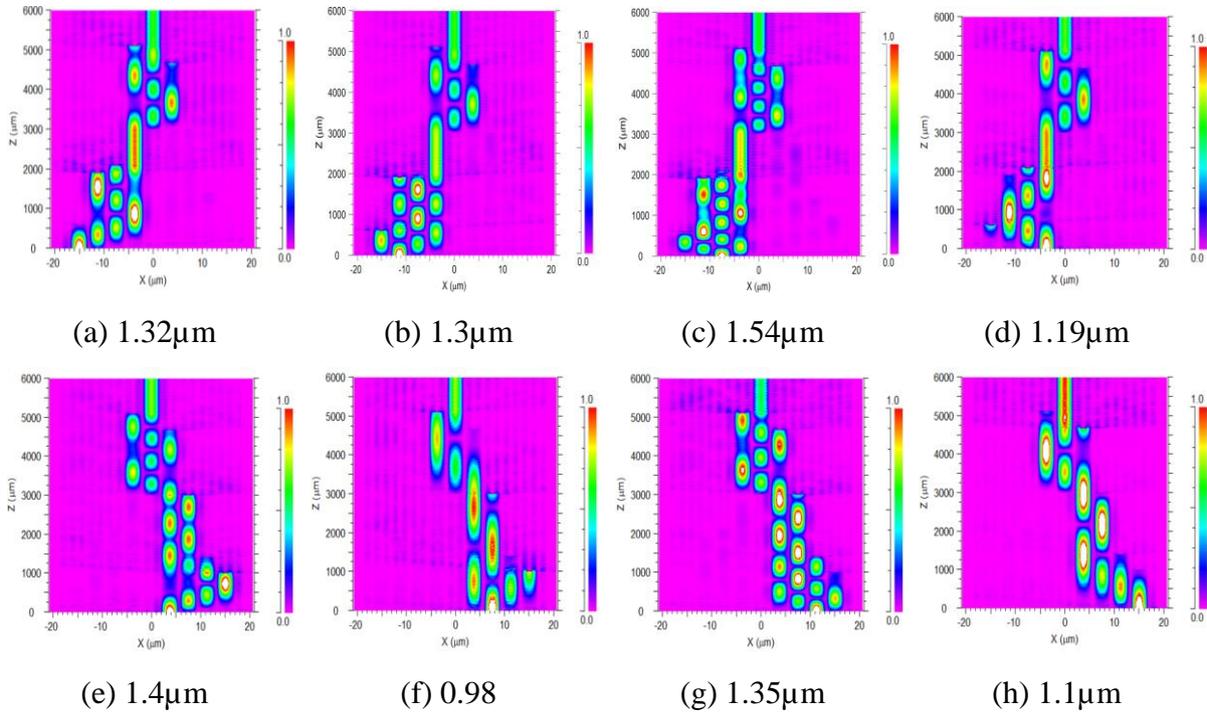
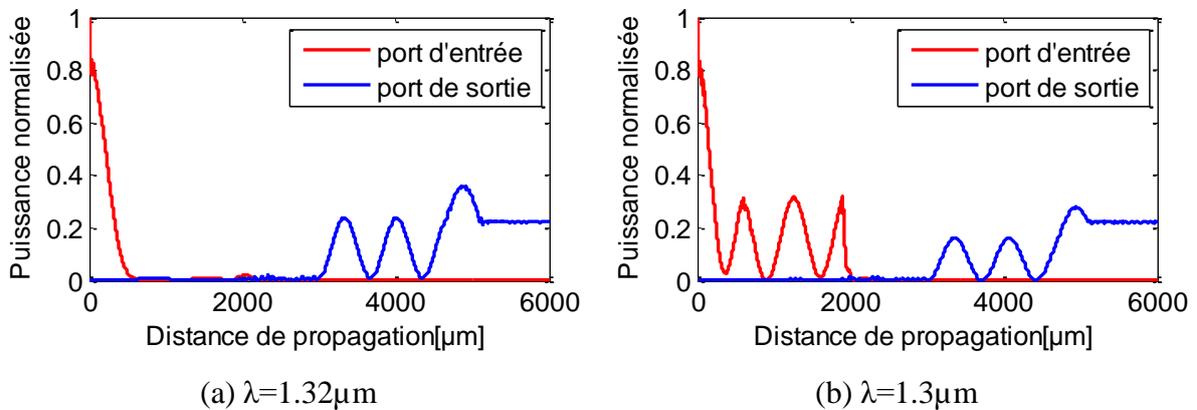


Figure IV. 36 : Le profil d'intensité des huit longueurs d'onde.

La puissance d'entrée est à 81 %, puis une chute à zéro (a–h), comme l'illustre la figure IV.36. Lorsque la puissance d'entrée traverse les segments avec un couplage léger, elle peut être concentrée au niveau du port de sortie à travers une série d'étapes utilisant cette technique. Les figures (a-g) et (h) montrent des taux de puissance maximale du port de sortie de 24 % et 50 %, respectivement.



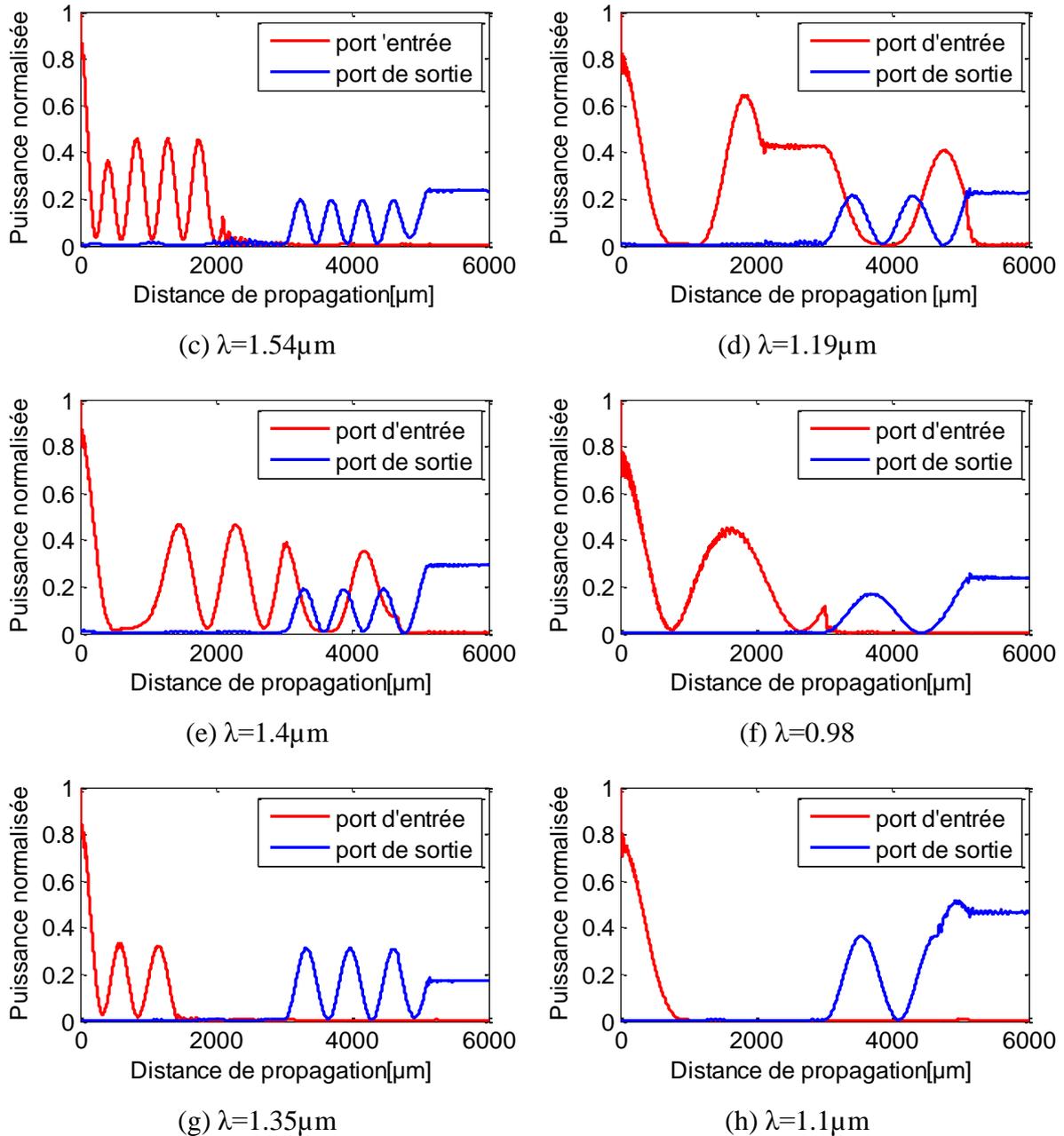


Figure IV. 37 : La puissance d'entrée et de sortie pour les 8 longueurs d'ondes.

IV.7 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous sommes fiers de mettre en lumière les contributions innovantes que nous avons apportées dans le domaine des fibres à cristaux photoniques (FCP). Notre étude approfondie a été guidée par le désir de repousser les limites de la compréhension et de l'application de ces structures fascinantes dans le contexte des télécommunications optiques. À travers une série d'analyses rigoureuses et de simulations compliquées, nous avons non seulement validé l'applicabilité de notre méthode de propagation des modes (BPM), mais

également révélé des aspects novateurs dans la conception et l'optimisation des composants à base de FCP.

L'une de nos contributions majeures réside dans la caractérisation de la dispersion chromatique au sein des FCP. En étudiant l'impact du diamètre des trous d'air sur cette propriété cruciale, nous avons non seulement confirmé des tendances établies, mais surtout introduit des nuances et des améliorations significatives. Les résultats présentés attestent de la pertinence et de la nouveauté de notre approche, ouvrant ainsi la voie à des avancées substantielles dans la gestion de la dispersion chromatique, un défi majeur dans les réseaux optiques modernes.

Par ailleurs, nous avons conçu, analysé et présenté plusieurs composants à base de FCP qui dépassent le stade de la simulation pour devenir des propositions tangibles pour des applications pratiques. Du coupleur à la séparation de longueurs d'onde au diviseur de puissance 1x2 et à l'extracteur de longueurs d'ondes 1x3, chaque composant a été élaboré avec soin pour répondre aux besoins spécifiques des télécommunications optiques modernes. Les figures présentent dévoilent des structures complexes qui ont été minutieusement analysées, prouvant ainsi la faisabilité et l'efficacité de nos propositions.

Ces dispositifs basés sur les FCP offrent des solutions innovantes pour des défis spécifiques tels que la séparation de longueurs d'onde, la distribution de puissance, et le multiplexage/démultiplexage.

Références

- [1] M. P. Gallion, "Rim Cherif, Thesis, TELECOM ParisTech, 2009.
- [2] K. Saitoh, M. Koshiba, T. Hasegawa, and E. Sasaoka, "Chromatic Dispersion Control in Photonic Crystal Fibers: Application to Ultra-Flattened Dispersion", *"Optics express"*, vol. 11, no. 8, pp. 843-852, 2003.
- [3] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C.-E. Ouadah, "1×2 Power Splitter Based on Photonics Crystals Fibers", *"Journal of Optical Communications"*, vol. 44, no. 4, 2023.
- [4] D. Nowak and J. Murphy, "Ftth: The Overview of Existing Technologies,conference proceedings," in *Opto-Ireland 2005: Optoelectronics, Photonic Devices, and Optical Networks*, 2005, vol. 5825: SPIE, pp. 500-509.
- [5] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C. E. Ouadah, "New Proposal for a Two-Channel Optical Multiplexer Based on Photonic Crystal Fibers", *"Optik"*, vol. 295, p. 171491, 2023.
- [6] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C. E. Ouadah, "Design of a New 2-Channel Demultiplexer Based on Photonic Crystal Fiber", *"Results in Optics"*, vol. 12, p. 100496, 2023.
- [7] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C. E. Ouadah, "Numerical Analysis of 1 X 4 Photonic Crystal Fiber Multiplexer", *"Progress In Electromagnetics Research M"*, vol. 118, pp. 127-136, 2023.
- [8] A. A. Harrat, M. Debbal, and M. C. E. Ouadah, "Design of a Novel 1x4 Two-Dimensional Demultiplexer Based on Multicore Photonic Crystal Fiber", *"International Journal of Electronics and Telecommunications"*, pp. 469-473-469-473, 2023.

Conclusion générale et perspectives

Les travaux présentés dans cette thèse, visent à prévoir les propriétés de propagation et de dispersion des FCP, afin de concevoir de nouveaux composants de communication optique. En fonction de la longueur d'onde, les caractéristiques du FCP ont été calculées à l'aide de la technique BPM.

Nos recherches ont validé les tendances identifiées précédemment tout en introduisant des nuances supplémentaires. De plus, nous avons démontré qu'en ajustant les paramètres géométriques de la microstructure, comme le diamètre du trou d'air, il est possible d'obtenir de nouvelles propriétés dispersives ainsi que des améliorations significatives.

Le premier chapitre de cette thèse offre un aperçu complet des propriétés des fibres conventionnelles et des fibres à cristaux photoniques (FCP), posant ainsi les bases nécessaires pour la compréhension du contexte dans lequel la recherche a été menée. Nous avons commencé par présenter en détail la structure de ces fibres ainsi que leurs caractéristiques distinctives telles que la longueur d'onde, l'indice de réfraction, la fréquence effective, la dispersion, l'air effective et la biréfringence. Ensuite, nous avons examiné les méthodes de fabrication, les avantages et les applications de ces deux types de fibres, fournissant ainsi un cadre solide pour la suite de notre étude.

Le deuxième chapitre de cette thèse s'est concentré sur une recherche bibliographique approfondie des composants optiques basés sur les fibres à cristaux photoniques (FCP), fournissant ainsi une base solide pour notre étude. Ces composants sont particulièrement fascinants en raison de leur modélisation précise et réaliste des propriétés optiques, ce qui permet d'anticiper leur comportement dans des conditions réelles avec une grande précision.

Au cours du troisième chapitre, nous avons passé en revue diverses approches de modélisation utilisées pour étudier les caractéristiques optiques des fibres à microstructure, telles que la méthode des éléments finis, la méthode des différences finies dans le domaine temporel, la méthode multipolaire, et autres. Notre choix s'est finalement porté sur la méthode de propagation des faisceaux (BPM), que nous avons mise en œuvre pour modéliser les différentes structures. Cette décision découle de son efficacité avérée et de sa simplicité conceptuelle, qui en font un outil adapté à notre objectif de recherche.

Dans le dernier chapitre de notre étude approfondie, notre objectif était de repousser les limites de la compréhension et de l'exploitation des structures fascinantes dans le domaine des télécommunications optiques. Nous avons confirmé l'applicabilité de notre méthode de propagation des modes (BPM) grâce à une série d'analyses rigoureuses et de simulations complexes. De plus, nos recherches ont révélé des avancées novatrices dans la conception et l'optimisation des composants à base de fibres à cristaux photoniques (FCP).

Nos contributions vont au-delà de simples simulations théoriques : nous avons élaboré, étudié et présenté plusieurs éléments à base de FCP, transformant ainsi des concepts abstraits en propositions concrètes pour des applications pratiques. Chaque composant, qu'il s'agisse de coupleurs, de séparateurs de longueurs d'onde, de diviseurs de puissance 1x2, de multiplexeurs/démultiplexeurs ou d'extracteurs de longueurs d'onde 1x3, a été minutieusement

conçu pour répondre aux exigences spécifiques des télécommunications optiques contemporaines.

Les figures présentées dans notre étude mettent en lumière des structures complexes qui ont été examinées en détail, démontrant ainsi la faisabilité et l'efficacité de nos concepts. Nos contributions ont été largement reconnues dans la communauté scientifique, donnant lieu à plusieurs articles publiés dans des revues réputées ainsi qu'à des présentations lors de conférences nationales et internationales.

Et comme perspectives à ces travaux :

Outre les nombreuses applications des fibres à cristaux photoniques (FCP) dans divers domaines, qui vont bien au-delà de la simple transmission optique entre deux points, il est possible de continuer à approfondir les recherches amorcées dans cette thèse afin d'optimiser les structures déjà traitées, que ce soit en termes de taux de transmission ou de puissance. Nous envisageons également d'élargir notre champ d'investigation pour concevoir de nouveaux composants basés sur les FCP, tout en élargissant le nombre d'entrées/sorties des multiplexeurs/démultiplexeurs 1x16 et 1x32, qui sont indispensables dans le domaine de l'optique intégrée. De plus, nous envisageons la conception de composants optiques basés sur les FCP avec des structures plus complexes et des paramètres géométriques différents, dans le but d'obtenir des résultats améliorés. Nous envisageons également d'explorer de nouvelles méthodes pour évaluer l'effet de ces variations sur les performances des composants. Ces perspectives offrent des opportunités passionnantes pour étendre nos connaissances sur les FCP et leur potentiel dans les systèmes optiques avancés.

Liste des travaux

Journée d'études

1- Assia Ahlem HARRAT, Mohammed DEBBAL, Mohammed Chamse Eddine OUADAH, « Journée d'études sur les Télécommunications JT'21, Ain-Témouchent, Algeria », **“Limitation des fibres optiques conventionnels”**.

2- Assia Ahlem HARRAT, Mohammed DEBBAL, Mohammed Chamse Eddine OUADAH, « Journée d'études sur les Télécommunications JT'22, Ain-Témouchent, Algeria », **“Analyse et comparaison des propriétés optiques d'une fibre a cristal photonique hexagonale “**.

3- Assia Ahlem HARRAT, Mohammed DEBBAL, Mohammed Chamse Eddine OUADAH, « Journée d'études sur l'électronique et les Télécommunications JEET'24, Ain-Témouchent, Algeria », **“The Two-Channel Optical Multiplexer and Demultiplexer Based on Photonic Crystal Fibers “**.

Conférence Nationale

1- Ahlem Assia Harrat, Mohammed Debbal, Mohammed Chemseddine Ouadah and Ilhem Mired, « Conférence Nationale sur les Télécommunications et ses Applications CNTA'21, Ain-Témouchent, Algeria », **“Dispersion comparison of photonic crystal fiber”**.

2- Mohammed Chamse Eddine Ouadah, Mohammed Debbal, Chikh-Bled Mohammed El-Kebir, Hicham Chikh-Blerd, Mouweffaq Bouregaa, Samir Benhamou, Ahlem Assia Harrat and Ilhem Mired, « Conférence Nationale sur les Télécommunications et ses Applications CNTA'21, Ain-Témouchent, Algeria », **“Designing of square photonic crystal fiber with high birefringence”**.

3- Ilhem Mired, Mohammed Debbal, Hicham Chikh-Bled and Ahlem Assia Harrat, « Conférence Nationale sur les Télécommunications et ses Applications CNTA'21, Ain-Témouchent, Algeria », **“The impact of geometric imperfections on chromatic dispersion in microstructured fibers”**.

4- Ilhem Mired, Mohammed Debbal, Hicham Chikh-Bled, Ahlem Assia Harrat, « Conférence Nationale sur les Télécommunications et ses Applications CNTA'22, Ain-Témouchent, Algeria », “**Study on some properties of a PCF pressure sensor**”.

Conférence Internationale

1- Assia Ahlem HARRAT, Mohammed DEBBAL, Mohammed Chamse Eddine OUADAH, Ilhem MIREDE, « 22st International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2021, Kyiv, Ukraine », “**The properties of photonic crystal fibers**”.

2- Ilhem MIREDE, Mohammed DEBBAL, Hicham CHIKH BLED, Ahlem Assia HARRAT, « 22st International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2021, Kyiv, Ukraine », “**Study of the sensitivity of sensors based on photonic crystal fibers**”.

3- OUADAH Mohammed Chamse Eddine, DEBBAL Mohammed, Assia Ahlem Harrat, CHIKH-BLED Hicham, BOUREGAA Mouwefeq, « IC-MSQUARE, Int'l Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences, 2023, Belgrade, Serbia», “**Creation of a Square Photonic Crystal Fiber lattice with Enhanced Birefringence**”.

4- Assia Ahlem HARRAT, Mohammed DEBBAL, Mohammed Chamse Eddine OUADAH, « 11th International Conference on Renewable Electrical Power Sources, 2023, Belgrade, Serbia», “**Numerical simulation and design of a photonic crystal fiber coupler for wavelength separation**”.

5- Mohammed Chamse Eddine OUADAH, Mohammed DEBBAL, Assia Ahlem Harrat, Hicham CHIKH-BLED, Mouwefeq BOUREGAA, « 11th International Conference on Renewable Electrical Power Sources, 2023, Belgrade, Serbia», “**Performance Analysis of Circular Photonic Crystal Fiber for Terahertz Applications**”.

6- HARRAT Assia Ahlem, DEBBAL Mohammed, OUADAH Mohammed Chamse Eddine, « 8th International Conference on Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems, ICAIRES2024, Tipasa, Algeria», “**Optical Characteristics of Photonic Crystal Fiber Splitters: A Study on Refractive Index, Chromatic Dispersion, and Effective Frequency**”.

Publications

Classe A :

1- Assia Ahlem Harrat, Mohammed Debbal and Mohammed Chamse Eddine Ouadah, (2023). **New proposal for a two-channel optical multiplexer based on photonic crystal fibers**. Optik, Vol 295, p 171491. Impact Factor : 3.1

<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.171491>

2- Assia Ahlem Harrat, Mohammed Debbal and Mohammed Chamse Eddine Ouadah, (2024). **Streamlining Data Transfer: Unlocking the Potential of 8-to-1 Photonic Crystal Fiber Multiplexing for Enhanced Connectivity**. Optical and Quantum Electronics. Vol 56, p 1606. Impact Factor : 1.9

<https://doi.org/10.1007/s11082-024-07485-2>

Classe B :

1- Assia Ahlem Harrat, Mohammed Debbal and Mohammed Chamse Eddine Ouadah, (2023). **1x2 Power Splitter Based on Photonics Crystals Fibers**, Journal of Optical Communications, Vol. 44, Issue 4, pp 417-420. SJR: 3.484

<https://doi.org/10.1515/joc-2022-0273>

2- Assia Ahlem Harrat, Mohammed Debbal and Mohammed Chamse Eddine Ouadah, (2023). **Design of a Novel 1x4 Two-Dimensional Demultiplexer Based on Multicore Photonic Crystal Fiber**, International Journal of Electronics and Telecommunications, Vol. 69, Issue 3, pp. 469-473. SJR: 0.851

<http://ijet.pl/index.php/ijet/article/view/10.24425-ijet.2023.146494>

3- Assia Ahlem Harrat, Mohammed Debbal and Mohammed Chamse Eddine Ouadah, (2023). **Design of a new 2-Channel demultiplexer based on photonic crystal fiber**. Results in Optics, Vol. 12, p. 100496. SJR: 2.12

<https://doi.org/10.1016/j.rio.2023.100496>

4- Assia Ahlem Harrat, Mohammed Debbal and Mohammed Chamse Eddine Ouadah, (2023). **Numerical Analysis of 1 X 4 Photonic Crystal Fiber Multiplexer**, Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 118, pp 127-136. SJR: 1.009

[doi:10.2528/PIERM23042703](https://doi.org/10.2528/PIERM23042703)

Résumé

Cette thèse explore les applications des fibres à cristaux photoniques (FCP) dans les télécommunications optiques. L'accent est mis sur l'optimisation de la dispersion chromatique des FCP pour améliorer leur performance dans la transmission de données. Une recherche approfondie est menée sur les composants optiques basés sur les FCP, avec des avancées significatives dans la conception de multiplexeurs/démultiplexeurs et de diviseurs de puissance. La méthode des faisceaux propagé (BPM) est utilisée pour modéliser les structures, confirmant l'efficacité des solutions proposées. Les résultats obtenus sont soutenus par des simulations détaillées et des analyses rigoureuses, renforçant ainsi la position des FCP comme une solution prometteuse pour les réseaux de télécommunications optiques modernes. Les contributions de la thèse sont reconnues à travers des publications dans des revues réputées et des présentations lors de conférences nationales et internationales. En perspective, l'optimisation continue des structures existantes et la conception de nouveaux composants plus complexes offrent des opportunités passionnantes pour étendre l'utilisation des FCP dans les systèmes optiques avancés.

Mots clés : fibres à cristaux photoniques, dispersion chromatique, composants optiques, réseaux de télécommunications optiques.

Abstract

This thesis explores the applications of photonic crystal fibers (PCFs) in optical telecommunications. The focus is on optimizing the chromatic dispersion of PCFs to enhance their performance in data transmission. Extensive research is conducted on optical components based on PCFs, with significant advancements in the design of multiplexers/demultiplexers and power splitters. The Beam Propagation Method (BPM) is employed to model the structures, confirming the effectiveness of the proposed solutions. The results are supported by detailed simulations and rigorous analyses, thus strengthening the position of PCFs as a promising solution for modern optical telecommunication networks. The contributions of the thesis are recognized through publications in reputable journals and presentations at national and international conferences. Looking ahead, ongoing optimization of existing structures and the design of new, more complex components offer exciting opportunities to expand the use of PCFs in advanced optical systems.

Keywords : Photonic crystal fibers, chromatic dispersion, optical components, optical telecommunication networks.