

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER Professionnalisant**

**En** : Télécommunications

**Spécialité** : Télécommunications optiques

**Par** : HACHEMI Meriem Yasmine

### Sujet

**Etude et modélisation du transfert thermique dans la fibre optique microstructurée (FOM) en Silice, GeO<sub>2</sub> et TeO<sub>2</sub>**

Soutenu publiquement, le 05/06/ 2024, devant le jury composé de :

Karim FethAllah	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Badaoui Hadjira	Professeur	Université de Tlemcen	Examinatrice
Djelti Hamida	MCA	Université de Tlemcen	Encadrante

Année Universitaire : 2023/2024

## **Remerciements**

Je remercie en premier lieu notre bon Dieu ALLAH tout puissant de m'avoir accordé la puissance et la volonté pour achever ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à la directrice de ce mémoire, Mademoiselle Hamida DJELTI, Maitre de conférences au Département de Télécommunications, Université de Tlemcen, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je suis très honoré à remercier de la présence à mon jury de mémoire et je tiens à remercier : Monsieur FethAllah KARIM, Professeur au Département de Télécommunications, Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de ce mémoire.

Madame Hadjira Badaoui, Professeur au Département de Télécommunications, Université de Tlemcen, trouve ici l'expression de mes vifs remerciements pour avoir bien voulu juger ce travail.

Mes remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont aidée à la réalisation de ce modeste mémoire et ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

## **Dédicace**

Je dédie ce modeste travail aux êtres les plus chers, entre autres, mes parents pour leurs soutiens et leurs patiences durant ces années d'études, ainsi que mes sœurs "Assia" et "Safaa".

Je voudrai remercier, aussi, tous ceux et celles qui m'ont accordée leurs aides et leurs encouragements.

## Résumé

Ce projet de fin d'études a pour objectif d'étudier théoriquement et par simulation le comportement des champs électriques et magnétiques dans deux types de structures des fibres optiques micro-structurées ; carrée et circulaire, en utilisant trois matériaux différents, la silice (SiO<sub>2</sub>), le dioxyde de germanium (GeO<sub>2</sub>) et le dioxyde de tellure (TeO<sub>2</sub>). Il s'agit d'analyser les performances de la fibre optique à bande interdite photonique à base de SiO<sub>2</sub>, GeO<sub>2</sub> et TeO<sub>2</sub>. En effet, les verres de tellurite possèdent un indice non linéaire environ 20 fois supérieur à celui du verre de silice et une longueur d'onde de dispersion nulle. Cette analyse consiste à évaluer les performances de la FOM a six et a cinq couches de trou d'air tout en étudiant la variation des différents paramètres électriques et optiques en fonction de la température comme le confinement du champ électrique, l'indice de réfraction effectif, pertes de confinement, etc.

**Mots clés :** Fibre optique micro-structurée, TeO<sub>2</sub>, GeO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, transfert thermique, COMSOL Multiphysique.

## Abstract

This project aims to study theoretically and by simulation the behavior of electric and magnetic fields in two types of microstructured optical fiberstructures : square and circular, using three different materials : silica (SiO<sub>2</sub>), germanium dioxide (GeO<sub>2</sub>) and tellurium dioxide (TeO<sub>2</sub>). The objective is to analyze the performance of the photonic bandgap optical fiber based on SiO<sub>2</sub>, GeO<sub>2</sub> and TeO<sub>2</sub>. Indeed, tellurite glasses have a non linear index about 20 times higher than that of silica glass and a zero dispersion wave length. This analysis consists of evaluating the performance of the optical fiber with six and five layers of air holes while studying the variation of different electrical and optical parameters as a function of temperature, such as electric field confinement, effective refractive index, confinement losses, etc.

**Keywords :** Microstructured optical fiber, TeO<sub>2</sub>, GeO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, heat transfer, COMSOL Multiphysics.

## الملخص

يهدف مشروع نهاية الدراسات هذا إلى الدراسة النظرية ومن خلال محاكاة سلوك المجالات الكهربائية والمغناطيسية في نوعين من ، ثاني أكسيد الجرمانيوم ( $\text{SiO}_2$ ) هياكل الألياف الضوئية ذات البنية الدقيقة؛ مربعة ودائرية، باستخدام ثلاث مواد مختلفة، السيليكا ( $\text{TeO}_2$ ) وثاني أكسيد التيلوريوم ( $\text{GeO}_2$ ). يتضمن ذلك تحليل أداء الألياف الضوئية ذات فجوة الحزمة الضوئية بناءً على السيليكا ( $\text{TeO}_2$ ) وثاني أكسيد التيلوريوم ( $\text{GeO}_2$ ).

في الواقع، تحتوي نظارات التيلوريوم على مؤشر غير خطي أعلى بنحو 20 مرة من مؤشر زجاج السيليكا وطول موجة تشتتت صفر. يتكون هذا التحليل من تقييم أداء هياكل الألياف الضوئية ذات البنية الدقيقة مع ست وخمس طبقات من فتحات الهواء مع دراسة تباين المعلمات الكهربائية والبصرية المختلفة كدالة لدرجة الحرارة مثل حصر المجال الكهربائي، ومعامل الانكسار الفعال، وفقدان الاحتواء . . إلخ

## الكلمات المفتاحية

COMSOL Multiphysics، النقل الحراري،  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{GeO}_2$ ،  $\text{TeO}_2$  الألياف الضوئية ذات البنية الدقيقة،

## Table de matières

Remerciements .....	i
Dédicace .....	ii
Résumé .....	iii
Abstract .....	iii
الملخص .....	iv
Liste des figures : .....	v
Liste des tableaux : .....	ix
Liste des abréviations : .....	x
Introduction générale : .....	1
<b>Chapitre I :État de l’art sur les fibres optiques micro-structurées</b>	
I.1 Introduction : .....	2
I.2 Historique : .....	2
I.3 Un aperçu des fibres optiques micro-structurées .....	3
I.3.1 Principe de propagation .....	3
I.4 Fibres à cristaux photoniques PCF .....	4
I.4.1 Différents types des cristaux photoniques .....	5
Cristaux photoniques 1 D : .....	5
Cristaux photoniques 2 D .....	5
Cristaux photoniques 3 D .....	6
I.4.2 Modèles physiques et bandes interdites .....	6
A-Modèle ARROW .....	7
B-Modèle des liaisons fortes : .....	8
I.4.3 Topologie et fabrication des fibres PCF .....	9
I.4.3.1 La topologie du PCF .....	9
I.4.3.2 Fabrication de la PCF .....	11
I.4.4 Types des fibres optiques micro-structurées .....	13
I.4.5 Mécanisme de guidage dans les fibres optiques FMS .....	14
I.4.5 FMS à guidage par réflexion totale interne modifiée .....	16
I.4.5.1 Modèle de l’indice effectif de gaine .....	17
I.5 Les modes à pertes dans les fibres optiques micro-structurées .....	24

I.5.1 Modes de perturbation.....	24
I.5.2 Modes de fuite .....	24
I.5.3 Modes de couplages .....	24
I.6 Avantages et inconvénients des fibres optiques FMS.....	25
I.6.1 Avantages .....	25
I.6.2 Inconvénients.....	25
I.7 Applications des fibres FMS.....	25
I.8 Conclusion .....	27
Chapitre II :Modélisation électro-thermo-optique de la fibre optique micro-structurée	
II.1 Introduction .....	29
II.2 Matériaux GeO <sub>2</sub> et TeO <sub>2</sub> .....	29
I.2.1 Propriétés physiques.....	29
II.2.2 Propriétés électriques .....	30
II.2.3 Les propriétés optiques .....	30
II.2.4 Les propriétés thermiques : .....	31
II.3 Modélisation de la fibre optique micro-structurée .....	31
II.3.1 La méthodes des fonctions localisés (MFL) .....	31
II.3.2 La méthode de l'indice moyenné en azimut (MIM) : .....	35
II.3.3 La méthode multipolaire (MM) .....	37
II.3.4 La méthode des éléments finis (MEF) .....	38
II.3.4.1 Discrétisation du problème physique .....	38
Découpage géométrique du domaine étudié et choix du maillage : .....	38
II.3.4.2 Conditions aux limites .....	40
II.4 Ondes électromagnétiques dans le domaine fréquentiel.....	43
II.4.1 Propriétés de base des pertes dans MOF.....	43
II.4.2 Caractéristiques de la dispersion.....	44
a) La dispersion chromatique.....	44
b) La dispersion modale :.....	45
c) La dispersion de polarisation :.....	45
II.4.3 Modes optiques .....	45
II.5 Transfert de la chaleur dans les solides .....	46
II.5.1 Modes de transfert thermique.....	46

II.5.1.1 Par conduction .....	47
II.5.1.2 Par rayonnement .....	48
II.5.1.3 Par convection .....	48
II.5.2 Effet thermique sur les fibres optiques.....	49
II.6 Sensibilité des propriétés thermo-physiques de GeO <sub>2</sub> et TeO <sub>2</sub> sur la température .....	50
II.6.1 Influence de la conductivité thermique : .....	50
II.6.2 Influence de capacité calorifique .....	50
II.7 Conclusion .....	51
<b>Chapitre III : Résultats et interprétation</b>	
III.1 Introduction .....	52
III.2 Description du logiciel Comsol multiphysique .....	52
III.3 Résultats et interprétation .....	53
III.3.1 Fibre optique micro-structurée 6 couches de trous d'air à base de SiO <sub>2</sub> : .....	53
III.3.1.1 Structure carrée (1 cœur).....	54
III.3.1.2 Structure carrée double cœurs .....	57
III.3.2 Fibre optique micro-structurée 6 couches à base de GeO <sub>2</sub> .....	58
III.3.2.1 Structure carrée 1 cœur.....	58
III.3.2.2 Structure carrée double cœurs .....	59
III.3.3 Fibre optique micro-structurée 6 couches à base de TeO <sub>2</sub> .....	60
III.3.3.1 Structure carrée 1 cœur.....	60
III.3.3.2 Structure carrée double cœurs .....	61
III.3.4 Effet de rayon des trous d'air et du pas .....	62
III.3.5 Effet de la longueur d'onde .....	65
III.3.6 Fibre optique micro-structurée 5 couches (structure circulaire).....	68
III.3.7 Effet de la température.....	73
III.3.7.1 FCP à base de la silice.....	73
III.4 Conclusion.....	76
Conclusion générale : .....	78
Bibliographie :.....	79

# Liste des figures :

## Chapitre 01

Figure I.1: Fibre optique micro-structurée.....	3
Figure I.2: Principe de propagation de la lumière dans une fibre conventionnelle .....	4
Figure I.3:Fibre à cristal photonique.....	4
Figure I.4: Cristal photonique 1D .....	5
Figure I.5: Cristal photonique 2 D .....	6
Figure I.6: Cristal photonique 3D .....	6
Figure I.7: :(a) Schéma du guide d'onde dont le confinement est réalisé dans la couche supérieure, par réflexion totale interne audessus et par réflexion antirésonante en dessous.....	8
Figure I.8: :(a) illustration d'un guide optique ainsi que le diagramme de dispersion des deux premiers modes pouvant se propager dans ce guide. ....	9
Figure I.9: Représentation schématique de différentes structures des fibres micro-structurées .....	10
Figure I.10: Exemple de sections transverses des deux familles de fibres micro-structurées.....	11
Figure I.11:Représentation schématique de la microstructure d'une section de fibre faisant apparaître les paramètres $d$ et $\Lambda$ .....	13
Figure I.12:Présentation schématique des différentes étapes de fabrication des fibres micro-structurées ....	14
Figure I.13:Les types des fibres optiques micro-structurées .....	15
Figure I.14:Diagramme représentant le continuum de modes autorisé .....	15
Figure I.15: Guidage par effet bande interdite.....	16
Figure I.16:Spectre de transmission discret obtenu dans une fibre à bandes interdites photoniques à cœur solide.....	17
Figure I.17: Propagation par réflexion totale interne modifiée dans une fibre PCF à cœur plein .....	18
Figure I.18 : Représentation de l'indice effectif de gaine d'une PCF .....	18
Figure I.19: Dispersion chromatique.....	19
Figure I.20: Dispersion modale de la polarisation.....	19
Figure I.21: Dispersion intermodale .....	20
Figure I.22: ouverture numérique .....	21
Figure I.23: Schéma de fabrication de préforme en verre de chalcogénures par la technique de moulage ...	22
Figure I.24: Schéma descriptif d'une courbure au niveau d'une fibre conventionnelle, montrant les phénomènes de guidage et de fuit de lumière en fonction des angles $\theta$ et $\theta_c$ .....	24
Figure I.25: Schéma récapitulatif des différents types de pertes dans une fibre optique .....	25
Figure I.26:Fibre optique utilisée dans les télécommunications.....	27
Figure I.27: Fibre optique utilisée pour les capteurs.....	27
Figure I.28:laser à fibre optique .....	27
Figure I.29: Spectromètre à fibre optique .....	28

## Chapitre 02

Figure II.1: Estimation d'un profil d'indice réel en utilisant 60*60 fonctions de Hermite-Gauss .....	33
Figure II.2: La distribution d'énergie observée en sortie de la fibre .....	34
Figure II.3: Représente un profil d'indice 2D d'une FMAS.....	36
Figure II.4: La notation conventionnelle utilisée dans le domaine d'étude $\Omega$ .....	39
Figure II.5: Disposition correcte des éléments.....	40
Figure II.6: L'analyse du mode HE11 pour l'étude de la structure en deux façons.....	41
Figure II.7: Courbes de dispersion d'une MOF à cœur suspendu pour différentes tailles de cœur .....	45
Figure II.8: Les modes de transfert thermique.....	47
Figure II.9: Le transfert thermique par conduction.....	48
Figure II.10: Le transfert de chaleur par rayonnement .....	49
Figure II.11: Le transfert thermique par convection.....	50

## Chapitre 03

Figure III.1: Illustration de l'écran du logiciel Comsol Multiphysique .....	53
Figure III.2: Structure carrée.....	54
Figure III.3: Illustration des paramètres de la structure .....	54
Figure III.4: maillage avec un seul cœur.....	55
Figure III.5: Distribution des champs dans la FOM sur SiO2 avec : (a) champ électrique et (b) magnétique .....	56
Figure III.6: Variation des champs tout au long de la MOF sur SiO2 : (a) électrique et (b) magnétique .....	56
Figure III.7: maillage de la FOM double cœurs .....	57
Figure III.8: Distribution du champ électrique et magnétique de la FOM sur SiO2 avec double cœurs.....	57
Figure III.9: Variation du champ dans la FOM double cœur sur SiO2 .....	58
Figure III.10: Distribution des champs dans la FOM sur GeO2.....	58
Figure III.11: Variation du champ dans la FOM sur GeO2.....	59
Figure III.12: Distribution du champ électrique et magnétique dans la FOM double cœurs sur GeO2 .....	59
Figure III.13: Variation du champ (a) électrique et (b) magnétique en fonction du diamètre de la fibre optique. ....	60
Figure III.14: Distribution des champs dans la FOM sur TeO2 .....	60
Figure III.15: Variation du champ dans la FOM sur TeO2 .....	61
Figure III.16: Distribution du champ électrique et magnétique dans la FOM double cœurs à base de TeO2 .....	61
Figure III.17: Variation du champ dans la FOM double cœur à base de TeO2 .....	62

Figure III.18: Effet du rayon des trous d'air sur le champ électrique dans la FOM sur SiO <sub>2</sub> avec :a) $r = 5 \mu\text{m}$ , b) $r = 6 \mu\text{m}$ .....	63
Figure III.19:Variation du champ électrique le long le long de la FOM sur SiO <sub>2</sub> .....	63
Figure III.20: Effet du rayon des trous d'air sur le champ électrique dans la FOM sur GeO <sub>2</sub> avec :a) $r = 5 \mu\text{m}$ , b) $r = 6 \mu\text{m}$ .....	64
Figure III.21:Variation du champ électrique le long le long de la FOM sur GeO <sub>2</sub> .....	64
Figure III.22: Effet du rayon des trous d'air sur le champ électrique dans la FOM sur TeO <sub>2</sub> avec :a) $r = 5 \mu\text{m}$ , b) $r = 6 \mu\text{m}$ .....	64
Figure III.23: Variation du champ électrique le long le long de la FOM sur TeO <sub>2</sub> .....	65
Figure III.24: Effet de la longueur d'onde sur le champ électrique dans la FOM sur SiO <sub>2</sub> avec :a) avec $\lambda = 1.33\mu\text{m}$ , b) $1.55\mu\text{m}$ , c) $2 \mu\text{m}$ .....	66
Figure III.25: Variation du champ électrique le long le long de la FOM sur SiO <sub>2</sub> pour $\lambda = 2 \mu\text{m}$ .....	66
Figure III.26: Effet de la longueur d'onde sur le champ électrique dans la FOM sur GeO <sub>2</sub> avec :a) avec $\lambda = 1.33\mu\text{m}$ , b) $1.55\mu\text{m}$ , c) $2 \mu\text{m}$ .....	67
Figure III.27: Variation du champ électrique le long le long de la FOM sur GeO <sub>2</sub> .....	67
Figure III.28: Effet de la longueur d'onde sur le champ électrique dans la FOM sur TeO <sub>2</sub> avec :a) avec $\lambda = 1.33\mu\text{m}$ , b) $1.55\mu\text{m}$ , c) $2 \mu\text{m}$ .....	67
Figure III.29: Variation du champ électrique le long le long de la FOM sur TeO <sub>2</sub> pour $\lambda = 2 \mu\text{m}$ .....	68
Figure III.30: Structure circulaire de la FOM.....	68
Figure III.31: Maillage de la structure avec (a) maillage fin et (b) extra gros .....	69
Figure III.32: Distribution des champs dans la FOM circulaire sur SiO <sub>2</sub> pour $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ .....	69
Figure III.33: Distribution des champs dans la FOM circulaire sur SiO <sub>2</sub> pour $\lambda = 2 \mu\text{m}$ .....	69
Figure III.34: Variation du champ électrique le long de la MOF circulaire sur SiO <sub>2</sub> avec (a) $\lambda = 1.55$ et (b) $\lambda = 2 \mu\text{m}$ .....	70
Figure III.35: Distribution des champs dans la FOM circulaire sur GeO <sub>2</sub> pour $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ .....	70
Figure III.36: Distribution des champs dans la FOM circulaire sur GeO <sub>2</sub> pour $\lambda = 2 \mu\text{m}$ .....	70
Figure III.37: Variation du champ électrique le long de la MOF circulaire sur GeO <sub>2</sub> avec (a) $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ et (b) $\lambda = 2 \mu\text{m}$ .....	71
Figure III.38: Distribution des champs dans la FOM circulaire sur TeO <sub>2</sub> pour $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ .....	71
FigureIII.39: DISTRIBUTION DES CHAMPS DANS LA FOM CIRCULAIRE SUR TEO2 POUR $\Lambda = 2\mu\text{m}$ .....	71
Figure III.40: Variation du champ électrique le long de la MOF circulaire sur TeO <sub>2</sub> avec (a) $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ et (b) $\lambda = 2 \mu\text{m}$ .....	72
Figure III.41: Effet des trous d'air sur la distribution du champ dans la MOF .....	72
Figure III.42: Comparaison entre (a) structure carrée et (b) structure circulaire .....	73

Figure III.43: Cartographie de la température dans FOM sur TeO <sub>2</sub> , r = 5 μm.....	74
Figure III.44: Variation de la température le long de la MOF sur TeO <sub>2</sub> .....	74
Figure III.45: Cartographie de la température dans FOM sur TeO <sub>2</sub> , r = 4 μm.....	75
Figure III.46: Variation de la température le long de la MOF sur TeO <sub>2</sub> avec λ=1.55 μm et r = 4 μm .....	75
Figure III.47: Contour isothermique de la FOM sur TeO <sub>2</sub> , r = 4 μm et λ=1.55 μm.....	76

## Liste des tableaux :

Tableau I.1: Position des principales bandes d'absorptions extrinsèques dans un verre As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> .....	22
Tableau II.1: Les propriétés physiques du GeO <sub>2</sub> et du TeO <sub>2</sub> .....	30
Tableau II.2: Les propriétés électriques du GeO <sub>2</sub> et du TeO <sub>2</sub> .....	30
Tableau II.3: Les propriétés thermiques de GeO <sub>2</sub> et de TeO <sub>2</sub> .....	31

## Liste des abréviations :

FOM : Les fibres optiques micro-structurées

FMAS : Fibres micro-structurées Aire/Silice

BIP : Bande Interdite Photonique

FCP : Fibres cristaux photoniques

PML : Perfectly Matched Layer

MFL : Méthode des fonctions localisés

MIM : Méthode de l'indice moyenné en azimut

MM : Méthode multipolaire

MEF : Méthode des éléments finis

## **Introduction générale**

# Introduction générale

La fibre optique a révolutionné la transmission des informations grâce à sa capacité à acheminer des signaux lumineux sur de longues distances avec peu de pertes. Cependant, les performances des fibres optiques conventionnelles peuvent être limitées à cause de la dispersion chromatique et l'atténuation. Pour pallier ces limitations, les fibres optiques micro-structurées, notamment les fibres à cristaux photoniques (PCF), offrent de nouvelles perspectives.

Ce mémoire se focalise sur la conception et la simulation du transfert thermique dans les fibres optiques micro-structurées à base de silice, de dioxyde de tellure ( $\text{TeO}_2$ ) et de dioxyde de germanium ( $\text{GeO}_2$ ), avec deux formes différentes : carrée et circulaire. L'objectif principal est d'explorer en profondeur les propriétés de propagation de ces fibres, en mettant l'accent sur la modélisation électro-thermo-optique pour comprendre leur comportement sous différentes conditions.

La structure de ce mémoire est articulée autour de trois chapitres principaux :

Le premier chapitre offre un aperçu détaillé des avancées récentes dans le domaine des fibres optiques micro-structurées. Nous y examinons les différentes structures de fibres, les matériaux utilisés, ainsi que les méthodes de fabrication et les applications potentielles dans les domaines des télécommunications, de la santé et de la recherche scientifique.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les différentes approches de modélisation utilisées pour étudier le comportement électro-thermo-optique des fibres optiques micro-structurées. Nous décrivons en détail notre méthodologie de modélisation, en mettant l'accent sur la simulation des paramètres électriques, thermiques et optiques qui influent sur les performances de la fibre.

Le dernier chapitre se concentre sur la présentation et l'analyse des résultats obtenus à partir de nos simulations en utilisant le logiciel COMSOL. Nous discutons des différentes formes de fibres étudiées, de leurs caractéristiques de propagations et de leurs performances. En outre, nous interprétons ces résultats pour fournir des informations précieuses pour la conception et l'optimisation des fibres optiques micro-structurées dans divers domaines.

---

**Chapitre I**  
**État de l'art sur les fibres optiques**  
**Micro-structurées**

### **I.1 Introduction**

Les récents progrès dans le domaine des matériaux ont permis de concevoir de nouveaux dispositifs pour manipuler la lumière en contrôlant les propriétés électromagnétiques des matériaux. Ces avancées incluent la création de structures artificielles périodiques à l'échelle nanométrique grâce aux nanotechnologies. La capacité à contrôler et à comprendre la propagation de la lumière dans ces structures ouvre des opportunités tant sur le plan technologique que scientifique, notamment dans le domaine de l'optique. En exploitant ces propriétés, de nouvelles applications peuvent être envisagées dans divers domaines.

### **I.2 Historique**

Les fibres optiques micro-structurées ont une histoire fascinante. Leur développement remonte aux années 1990, lorsque des chercheurs ont commencé à explorer des moyens de manipuler la propagation de la lumière dans les fibres optiques en induisant des structures périodiques dans leur géométrie.

Les premières recherches sur les fibres optiques micro-structurées ont débuté au début des années 1990 dans les laboratoires principalement à l'université de Bath [1] au Royaume-Uni, sous la direction du professeur Philip Russell. Ils explorent les propriétés des fibres à cristaux photoniques (PCF), par des structures périodiques dans leur cœur. En 1996 Philip Russell et ses collègues publient un article décrivant la conception et les propriétés des premières fibres optiques micro-structurées. Ils démontrent la possibilité de créer des guides d'onde optiques efficaces en exploitant les propriétés des cristaux photoniques. En 1997 Thomas A. Birks [1], Jonathan C. Knight et Philip Russell publient un article décrivant une nouvelle classe de fibres optiques micro-structurées, appelée fibre à indice d'air, caractérisée par la présence de multiples cœurs dans une structure périodique. Cette publication attire l'attention sur le potentiel des fibres optiques micro-structurées pour la transmission des données à très haut débit. Au début des années les recherches sur les fibres optiques micro-structurées se multiplient dans le monde entier, avec des contributions de laboratoires de recherches universitaires, d'institut de recherche et de l'industrie. Des progrès sont réalisés dans la fabrication de ces fibres, permettant des applications pratiques dans les télécommunications, la spectroscopie et les capteurs optiques. Des expériences de transmission optique à longue distance utilisant des fibres optiques micro-structurées sont menées avec succès, démontrent la viabilité de ces fibres pour les réseaux de communication à haut débit. En 2010 les fibres optiques micro-structurées sont devenues un domaine de recherche établi, avec des

applications pratiques. Les progrès dans les techniques de fabrication ont permis de produire des fibres avec des propriétés optiques sur mesure, ouvrant la voie à de nouvelles applications innovantes.

Les fibres optiques micro-structurées continuent de susciter un vif intérêt dans la communauté scientifique et industrielle. De plus des efforts sont déployés pour développer des fibres encore plus performantes et pour explorer de nouvelles applications potentielles, notamment dans les domaines de la photonique quantique et des technologies des capteurs avancées.

### **I.3 Un aperçu des fibres optiques micro-structurées**

Les fibres optiques micro-structurées sont des structures optiques innovantes qui présentent une géométrie périodique à l'échelle microscopique le long de leur longueur. Contrairement aux fibres optiques conventionnelles, qui ont un cœur et une gaine uniforme, les fibres optiques micro-structurées comportent des arrangements périodiques de trous, de cavités ou d'autres motifs géométriques dans leur structure. Cette architecture spécifique permet un contrôle précis des propriétés optiques de la fibre, offrant ainsi une flexibilité accrue pour répondre aux besoins spécifiques des applications.

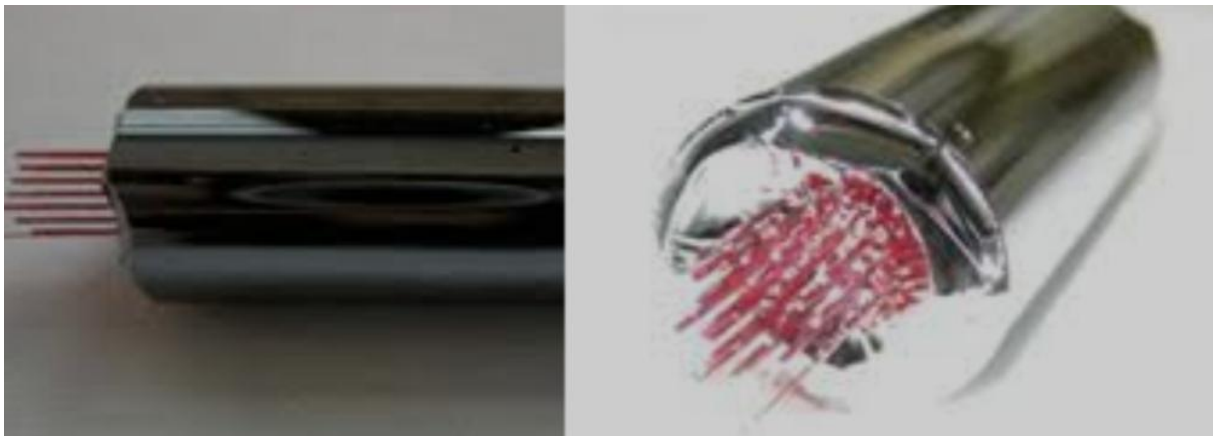


Figure I.1: Fibre optique micro-structurée [2].

#### **I.3.1 Principe de propagation**

Dans une fibre optique conventionnelle, la lumière est guidée à travers un cœur de matériau d'indice de réfraction supérieur, entouré d'une gaine d'indice de réfraction inférieur. La lumière est confinée dans le cœur par des réflexions totales internes à l'interface entre le cœur et la gaine, ce qui permet une propagation le long de la fibre.

En revanche, dans une FOM, la lumière est guidée à travers une structure périodique de micro-canaux ou de trous dans la fibre. Ces microstructures créent des variations périodiques de l'indice de réfraction à l'intérieur de la fibre, ce qui permet de manipuler la propagation de la lumière de manière plus précise et contrôlée que dans une fibre conventionnelle.

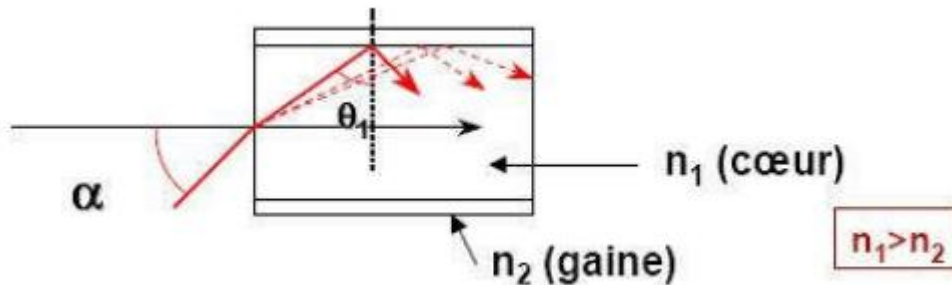


Figure I.2: Principe de propagation de la lumière dans une fibre conventionnelle [3].

#### **I.4 Fibres à cristaux photoniques PCF**

Les fibres à cristaux photoniques sont des fibres optiques qui intègrent des structures périodiques de matériaux diélectriques présentant des propriétés optiques remarquables. Ces structures permettent de manipuler et de contrôler la propagation de la lumière à des échelles sub-longueur d'onde, offrant ainsi des fonctionnalités avancées telles que la guidance d'ondes à bande interdite, la dispersion contrôlée, et des effets optiques non linéaires. Ces fibres sont utilisées dans diverses applications, notamment les télécommunications, les capteurs, la photonique intégrée et les lasers.

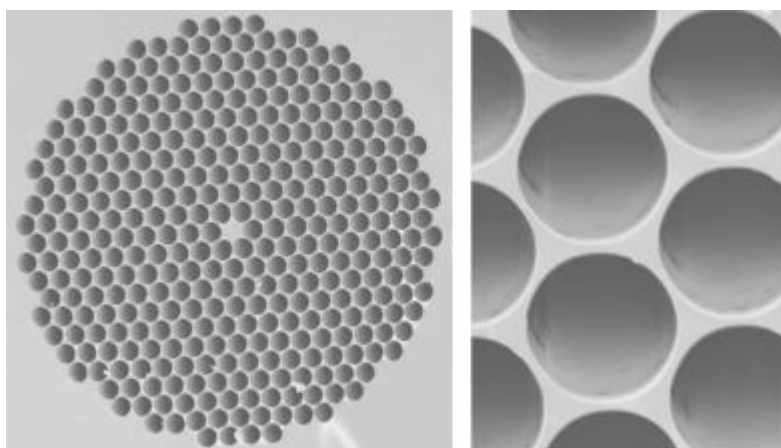


Figure I.3: Fibre à cristal photonique (PCF) [4].

### I.4.1 Différents types des cristaux photoniques

Il existe trois principales catégories sont :

#### Cristaux photoniques 1 D :

Les cristaux photoniques 1 D, également appelés miroir de Bragg, sont des structures optiques périodiques composées d'une alternance de couches diélectriques à différents indices de réfraction. Cette alternance crée un motif périodique de haute et basse permittivité qui interfère avec la propagation de la lumière à certaines longueurs d'onde [3].



Figure I.4: Cristal photonique 1D [3].

#### Cristaux photoniques 2 D

Un cristal photonique 2 D ou bidimensionnel est une structure qui présente une modulation périodique de la permittivité diélectrique dans deux directions de l'espace, tandis qu'elle reste homogène dans la troisième direction. Cette modulation crée des propriétés optiques particulières, souvent avec une forte dépendance envers la polarisation de l'onde électromagnétique qui le traverse.

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces structures 2 D. Par exemple, on peut utiliser des tiges diélectriques placées dans un milieu tel que l'air ou un autre diélectrique. Pour obtenir des bandes interdites larges, c'est-à-dire des gammes de fréquences pour lesquelles la propagation de la lumière est interdite, il est nécessaire d'avoir un contraste d'indice élevée entre le milieu et les tiges diélectriques.



Figure I.5: Cristal photonique 2 D [5].

### **Cristaux photoniques 3 D**

Les cristaux photoniques tridimensionnels ou 3 D sont des structures périodiques qui manipulent la propagation de la lumière à l'échelle nanométrique. Le premier exemple de cristal photonique 3 D a été réalisé en disposant des sphères de silicium de manière ordonnée sur une structure en forme de diamant [9]. Cette disposition spécifique permet de créer des bandes interdites pour certaines longueurs d'onde de lumière, ce qui les rend intéressants en optique et en photoniques.

Ces structures offrent un contrôle précis sur la propagation de la lumière, ce qui les rend utiles dans plusieurs domaines, tels que les technologies de communication optique, les capteurs optiques et les dispositifs photoniques intégrés.



Figure I.6: Cristal photonique 3D [3].

#### **I.4.2 Modèles physiques et bandes interdites**

Les modèles physiques et les bandes interdites photoniques sont des concepts fondamentaux dans le domaine de la physique des matériaux et de l'optique. Ces modèles permettent de comprendre et de prédire le comportement des matériaux en fonction de leurs

propriétés électromagnétiques. Les bandes interdites photoniques, également connues sous le nom de bandes interdites optiques, sont des intervalles d'énergie dans lesquels les photons ne peuvent pas se propager. Elles sont essentielles pour concevoir des matériaux ayant des propriétés de transmission de la lumière spécifiques, telles que les cristaux photoniques utilisés dans les technologies de communication optique et les cellules solaires à haut rendement. Parmi ces modèles deux des plus importants sont :

### **A-Modèle ARROW**

Développé par le physicien Kenneth Arrow, est un cadre théorique utilisé pour étudier les propriétés électroniques des matériaux, en particulier leur conductivité électrique des matériaux en fonction de leur structure cristalline et de la répartition des électrons dans les bandes d'énergie.

Initialement conçu pour analyser la transmission d'une onde à travers un guide planaire, le modèle ARROW fut élaboré en intégrant un cœur à faible indice et une couche anti-résonante (connue sous le nom de « POLY-Si » [6]), caractérisé par un indice supérieur à celui du cœur, ces couches sont conçues de manière à créer un effet d'antirésonance, ce qui permet de confiner efficacement la lumière dans le cœur du guide d'ondes tout en minimisant les pertes par la propagation dans les couches environnantes[7].

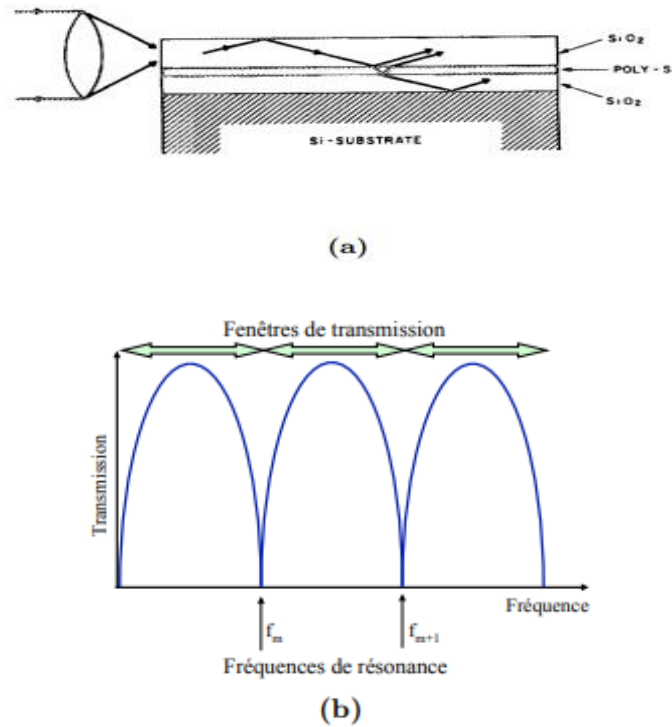


Figure I.7 : (a) Schéma du guide d'onde dont le confinement est réalisé dans la couche supérieure, par réflexion totale interne audessus et par réflexion antirésonante en dessous [8].

(b) Illustration des bandes de transmissions du guide, interrompues par les fréquences de résonances.

Les guides Arrow sont largement utilisés dans divers domaines de l'optique intégrée, tels que les dispositifs photoniques intégrés, les capteurs optiques, les modulateurs optiques et les lasers. Ils offrent des avantages tels qu'une faible sensibilité aux défauts de fabrication, une grande flexibilité de conception et une compatibilité avec les technologies de fabrication de semi-conducteurs.

### B-Modèle des liaisons fortes

Le modèle des liaisons fortes, également connu sous le nom de modèle de liaisons fortes de valence, est une théorie utilisée en physique de la matière condensée pour décrire les interactions entre les électrons et les atomes dans les solides. Il repose sur le concept que les électrons de valence, ceux situés dans la couche la plus externe des atomes, participent à la formation de liaisons chimiques fortes entre les atomes adjacents. Ces liaisons forment la structure cristalline des solides et déterminent leurs propriétés physiques et chimiques. Le modèle des liaisons fortes permet d'expliquer divers phénomènes, tels que la conductivité

électrique, la bande interdite et la formation de bandes d'énergie dans les matériaux cristallins.

Le mécanisme des liaisons fortes dans les cristaux à base de dioxyde de tellure ( $\text{TeO}_2$ ) peut être similaire dans les cristaux à base d'un dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ). En partant d'une structure composée de guides optiques en dioxyde de tellure dans de l'air, chaque guide agit comme un confinement de la lumière par réflexion totale interne (RTI), avec des modes de propagation définis. Lorsque ces guides sont régulièrement répartis, des bandes de modes apparaissent autour des modes de propagation de chaque guide, et les modes équivalents peuvent se coupler en raison de la distance entre les guides, générant ainsi des bandes de modes autorisés [9].

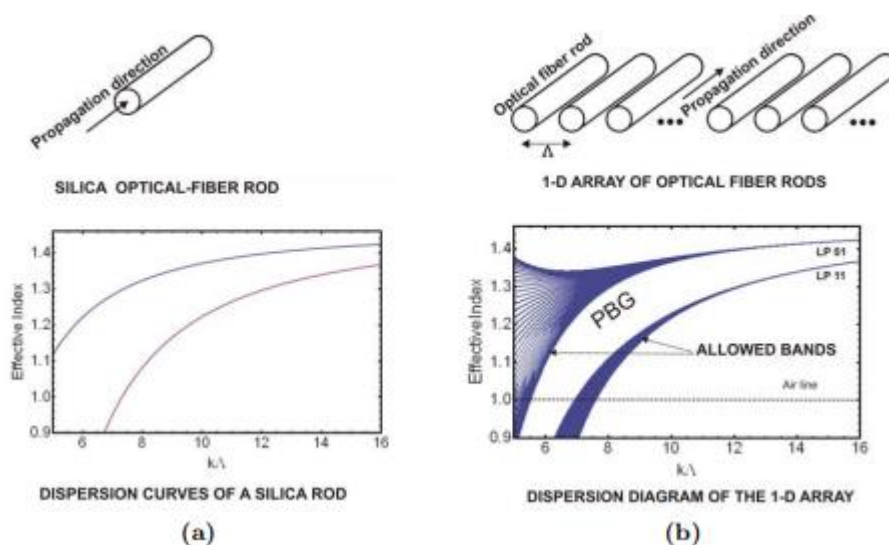


Figure I.8:(a) illustration d'un guide optique ainsi que le diagramme de dispersion des deux premiers modes pouvant se propager dans ce guide.

(b) illustration de plusieurs guides régulièrement espacées avec le diagramme de dispersion de cette structure [10].

### I.4.3 Topologie et fabrication des fibres PCF

#### I.4.3.1 La topologie du PCF

Les fibres à cristaux photoniques (PCF) constituent une catégorie de guides d'ondes fibrés caractérisés par une structure régulière de canaux d'air autour d'un cœur, pouvant être soit creux soit solide. Le terme PCF est souvent utilisé de manière générale pour décrire ces

différentes fibres, bien que la terminologie puisse varier selon les contextes. Les FOM ou les fibres optiques micro-structurées.

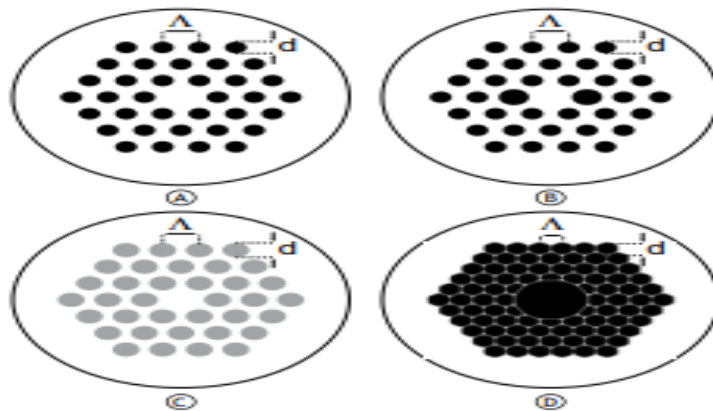


Figure I.9 : Représentation schématique de différentes structures des fibres micro-structurées [11].

Avec :

- (A) : Fibres micro-structurées à cœur haut indice.
- (B) : Fibres micro-structurées à maintien de polarisation.
- (C) : Fibres toutes solides à bandes interdites et cœur bas indice.
- (D) : Fibres à bandes interdites et cœur creux.

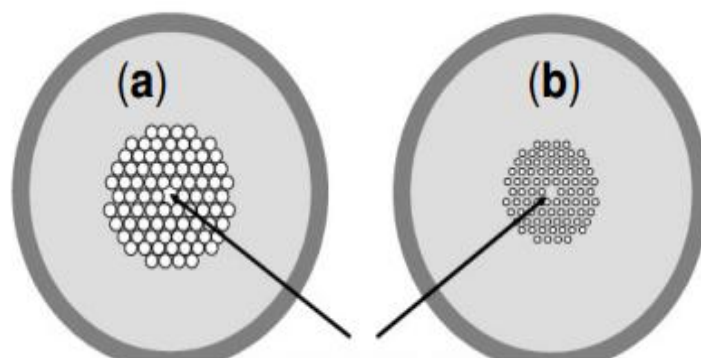


Figure I.10 : Exemple de sections transversales des deux familles de fibres micro-structurées [12] :

- (a) A bande interdite photonique « cœur creux »
- (b) à réflexion totale interne « cœur plein ».

Les fibres micro-structurées sont constituées d'un arrangement d'inclusions sur la section transverse de la fibre [12]. Cette structure est invariante le long de l'axe de la fibre. Les deux paramètres principaux décrivant un tel arrangement sont la distance  $\Lambda$  entre le centre de deux trous adjacents et le diamètre des trous  $d$  qui permettent de définir le rapport  $d/\Lambda$  correspondant à la fraction d'air présente dans la fibre. Le nombre de couronnes de trous utilisé pour former la gaine est également un critère important pour la réduction des pertes de guidage.

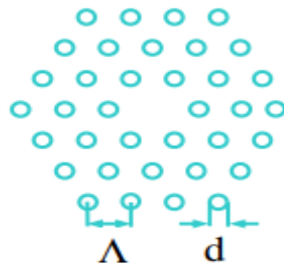


Figure I.11 : Représentation schématique de la microstructure d'une section de fibre faisant apparaître les paramètres  $d$  et  $\Lambda$  [10].

### I.4.3.2 Fabrication de la PCF

La fabrication des fibres à cristaux photoniques (PCF) implique plusieurs techniques, dont l'assemblage-étirage est la plus répandue pour les fibres. Voici une explication détaillée de ce processus :

#### 1-Préparation de la préforme :

Les fibres à cristaux photoniques et les FOM commencent généralement par la préparation d'une préforme, qui est une structure de base qui sera étirée pour former la fibre optique finale. Cette préforme peut-être composée de couches minces de matériaux isolants, de cristaux photoniques, ou d'autres structures spécifiques en fonction de conception de la fibre.

#### 2-Contrôle de la microstructure :

La préforme permet de contrôler la microstructure de la future fibre optique de manière plus précise. En ajustant la disposition et la taille des capillaires et des barreaux, on peut influencer les propriétés optiques de la fibre résultante, notamment son indice de réfraction et sa capacité de guidage.

3-Fibrage de la préforme :

Une fois la préforme préparée, elle est chauffée et étirée pour former la fibre optique. Pendant ce processus, la structure périodique des cristaux photoniques est conservée dans le cas des PCF, tandis que les FOM peuvent avoir une variété de structures micro-structurées en fonction de leur conception.

4-Contrôle de la géométrie :

Pendant le processus de fibrage, la géométrie de la fibre est soigneusement surveillée et contrôlée pour garantir qu'elle corresponde aux spécifications requises pour ses applications prévues. Cela inclut la surveillance de la taille, de la forme et de la distribution des inclusions de haut et bas indice, ainsi que d'autres caractéristiques importantes de la fibre.

5-Propriétés de guidage ajustées :

La grande diversité des géométries réalisables grâce à cette technique permet d'ajuster les propriétés de guidage de la fibre de manière spectaculaire. Par exemple, en contrôlant l'espacement périodique des inclusions de haut et bas indice, on peut modifier les propriétés de propagation de la lumière dans la fibre, ce qui peut être crucial pour certaines applications spécifiques.

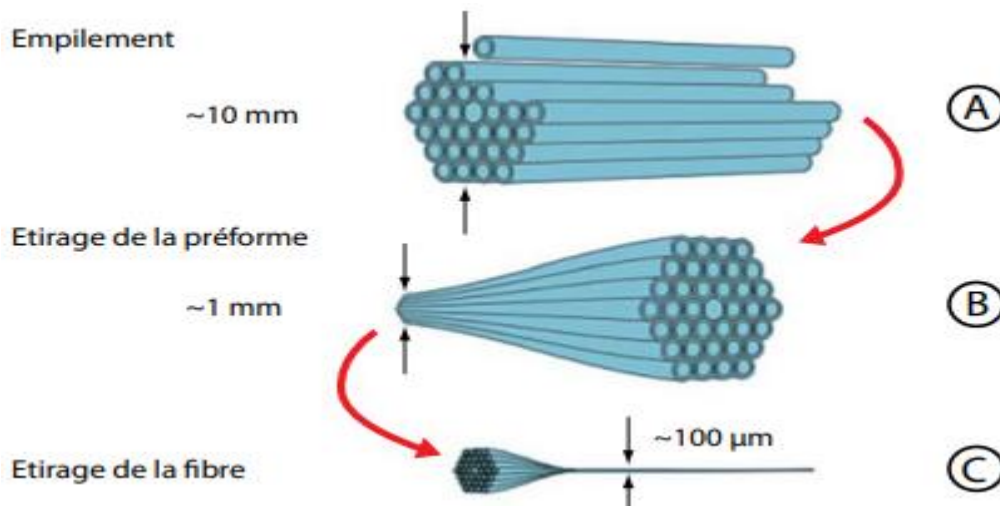


Figure I.12 : Présentation schématique des différentes étapes de fabrication des fibres micro-structurées [3].

#### **I.4.4 Types des fibres optiques micro-structurées**

Elles peuvent être divisées en deux catégories, qui sont :

A/ Fibres à guidage dans un milieu d'indice supérieur à celui de la gaine :

\*Fibres à grande ouverture numérique : Ces fibres ont un grand angle d'acceptation de la lumière, ce qui signifie qu'elles peuvent recueillir la lumière provenant divers angles. Elles sont souvent utilisées dans les applications nécessitant une collecte efficace de la lumière, comme la spectroscopie et les communications optiques à courte distance.

\*Fibres infiniment monomode : Ces fibres ont un cœur de grande taille, mais elles sont conçues pour guider la lumière de manière monomode, ce qui signifie qu'elles ne supportent qu'un seul mode de propagation. Elles sont utilisées lorsque la précision et la stabilité de la transmission du signal sont essentielles, par exemple dans les systèmes de télécommunications longues distance.

\*Fibres fortement non linéaires : Ces fibres ont un très petit cœur et sont conçues pour présenter une réponse non linéaire significative à l'intensité lumineuse. Elles sont utilisées dans des applications telles que la génération d'harmoniques optiques, les lasers à fibre à haute puissance et les systèmes de traitement optique de l'information.

B/ Fibres à guidage dans un milieu d'indice inférieur à celui de la gaine :

\* Fibres à cœur creux : Dans ces fibres, la lumière est guidée dans un espace vide à l'intérieur du cœur, plutôt que dans un matériau solide. Elles sont souvent utilisées dans les applications nécessitant une transmission de lumière à large bande passante ou une sensibilité aux changements de pression, comme la spectroscopie à haute résolution ou les capteurs de pression.

\* Fibres de Bragg constituées de couches concentriques d'indices différents : Ces fibres sont dotées de couches alternées de matériaux d'indices de réfraction différents, créant ainsi une structure de réseau de Bragg le long de la fibre. Elles sont utilisées dans les applications de filtrage optique, de capteurs de température et de détection de contrainte.

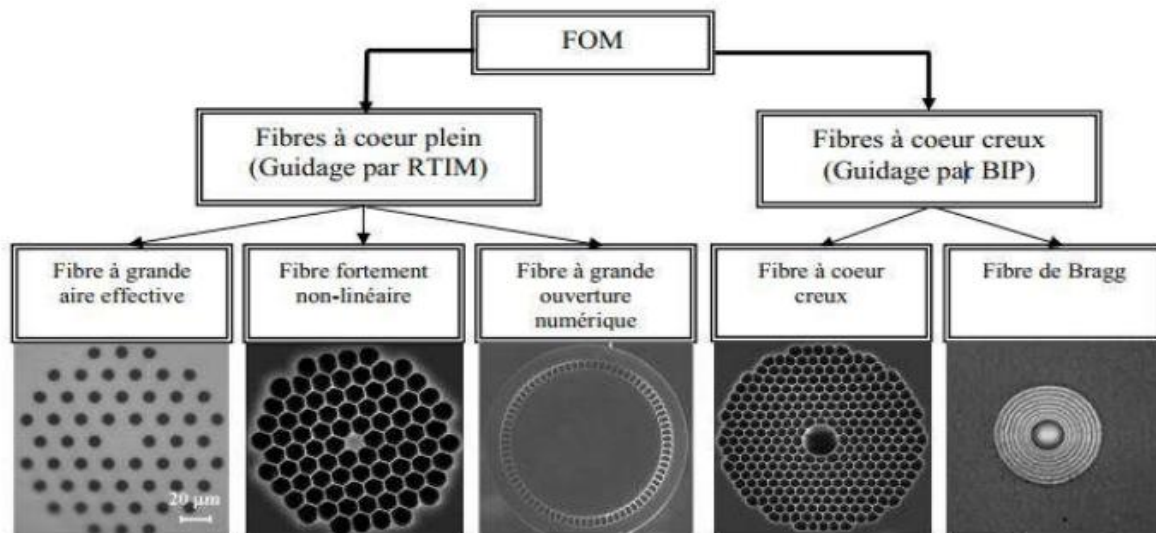


Figure I.13 : Les types des fibres optiques micro-structurées [13].

#### I.4.5 Mécanisme de guidage dans les fibres optiques FMS

La lumière peut être guidée suivant deux mécanismes :

A/ Principe du guidage par résonance transverse :

Également connu sous le nom de guidage par bande interdite photonique BIP, est une méthode utilisée pour confiner la lumière dans une structure à l'échelle nanométrique en exploitant les propriétés dans un matériau périodique.

La BIP est une plage de longueurs d'onde pour laquelle la propagation de la lumière n'est possible que dans la direction de l'invariance, c'est-à-dire à travers le cœur de la fibre. Cela dû à la périodicité bidimensionnelle de l'indice de réfraction dans la gaine de la fibre.

Pour créer une BIP pour une plage spécifique de longueurs d'onde, il est nécessaire de choisir soigneusement les paramètres de la structure périodique de la fibre (représentés par  $d$  et  $\Lambda$ ) et de bien maîtriser le processus de fabrication. En ajoutant une perturbation périodique à la structure, comme l'insertion d'un autre matériau ou de trous d'air, cela modifie le spectre des modes autorisés. Cela se traduit par l'apparition des bandes autorisées pour certains modes de propagation de la lumière, tandis que d'autres modes sont interdits dans cette plage de longueurs d'ondes spécifique [14].

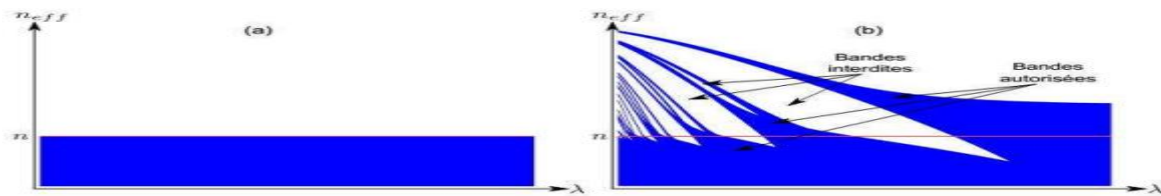


Figure I.14: Diagramme représentant le continuum de modes autorisés avec :

(a) d'un matériau homogène d'indice  $n$  [15].

(b) du même matériau avec ajout périodique d'inclusions de haut indice.

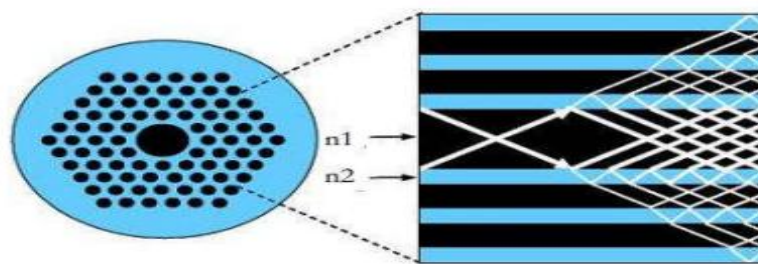


Figure I.15: Guidage par effet bande interdite [12].

Les fibres de Bragg ou BIP 1D, sont des fibres optiques construites avec des couches alternées de haut et bas indice de réfraction, entourant un cœur d'air ou d'un autre matériau. Lorsque la lumière est injectée dans la fibre, elle subit une réflexion et une réfraction à chaque interface cœur-gaine. En raison de la stratification périodique de l'indice de réfraction, les ondes réfléchies présentent un déphasage bien défini, ce qui entraîne des interférences constructives ou destructives. Pour certaines longueurs d'onde et angles d'incidence spécifiques, la structure multicouche agit comme un miroir, renforçant la réflexion de la lumière à ces longueurs d'onde. En remplaçant les couches diélectriques par des canaux d'air formant un miroir de Bragg à deux dimensions, on obtient une fibre à cristal photonique 2 D, permettant un contrôle plus précis des propriétés optiques de la fibre.

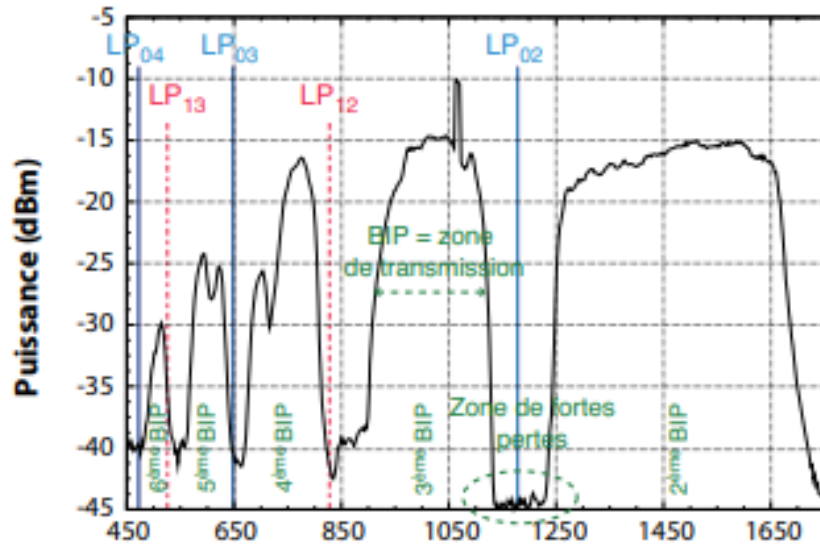


Figure I.16 : Spectre de transmission discret obtenu dans une fibre à bandes interdites photoniques à cœur solide [16].

#### I.4.5 FMS à guidage par réflexion totale interne modifiée

Lorsque l'indice de réfraction du cœur est supérieur à celui de la gaine dans une fibre optique, cela permet de confiner la lumière dans le cœur de la fibre en utilisant des phénomènes de réflexion totale, ce qui crée une conditio

n de réflexion totale entre le cœur et la gaine [17].

Pour qu'un mode soit guidé par réflexion totale RTIM, la condition suivante doit être remplie [12] :

$$\beta_{FSM} < \beta < K_{nsilice}$$

Avec :  $\beta$  : constante de propagation du mode guidé.

$K_{nsilice}$  : constante de propagation maximale possible pour un mode dans la région du cœur de dioxyde de tellure.

$\beta_{FSM}$  : valeur maximale de la constante de propagation autorisée pour les modes de la gaine optique.

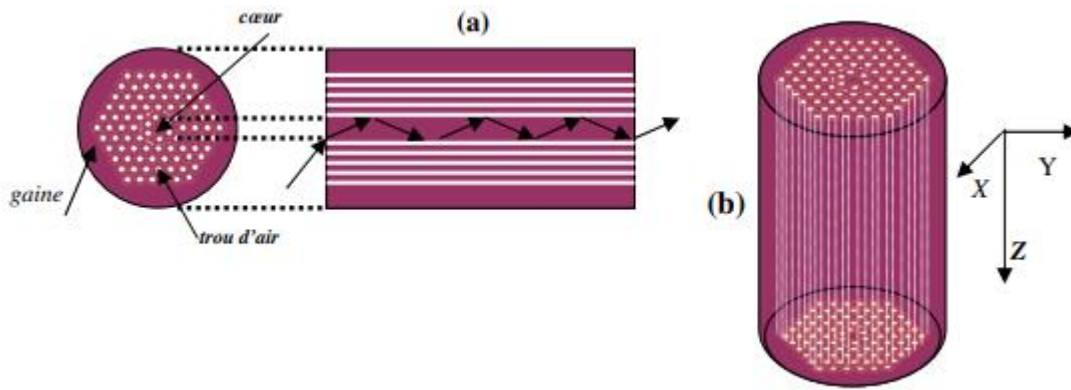


Figure I.17: Propagation par réflexion totale interne modifiée dans une fibre PCF à cœur plein avec :

- (a) Illustre la section transversale d'une fibre micro-structurée à cœur plein (entouré de cinq couronnes de trous d'air en arrangement hexagonal) et le guidage par réflexion totale interne au niveau du cœur.
- (b) Est une représentation schématique de sa section longitudinale [3].

#### I.4.5.1 Modèle de l'indice effectif de gaine

Est utilisé en optique pour décrire le comportement de la lumière lorsqu'elle se propage à travers une fibre optique à indice gradué. Contrairement aux fibres optiques à indice constant, où l'indice de réfraction reste constant sur toute la section transversale de la fibre, les fibres à indices gradués ont un indice de réfraction qui varie progressivement le long du rayon de la fibre. Le modèle de l'indice effectif de gaine prend en compte cette variation d'indice pour calculer efficacement la propagation de la lumière dans la fibre optique.

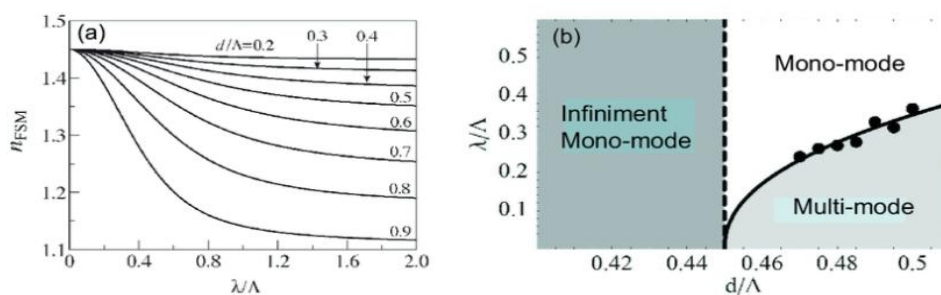


Figure I.18: (a) Représentation de l'indice effectif de gaine d'une PCF.

- (b) Représentation des trois régimes de fonctionnement d'une fibre optique micro-structurée [3].

⇒ Propriétés de propagation :

\*Comportement monomode large bande :

Le comportement monomode large bande se réfère à la capacité d'une fibre optique à soutenir un seul mode de propagation sur une large plage de longueurs d'onde. En d'autres termes, cela signifie que la fibre peut transmettre efficacement la lumière sur une gamme étendue de longueurs d'onde tout en maintenant un seul mode de propagation.

- Dispersion

La dispersion en optique, se réfère à la variation de l'indice de réfraction d'un matériau en fonction de la longueur d'onde de la lumière traversant ce matériau. En d'autres termes cela signifie que la lumière de différentes couleurs se propage à des vitesses légèrement différentes à travers le matériau, ce qui entraîne une séparation des couleurs. Les trois principaux types sont :

- Dispersion chromatique

La dispersion chromatique définit la manière dont les impulsions lumineuses se propagent à travers une fibre optique en fonction de leur longueur d'onde, et elle limite la capacité de transmission des systèmes de communication optique en obligeant à augmenter le délai entre les impulsions pour éviter les interférences, elle est exprimée par la relation suivante :

$$Dc = \left(\frac{\lambda}{c}\right) * \left(\frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2}\right)$$

Avec :  $DC$  : La dispersion chromatique.

$n_{eff}$  : est l'indice effectif du mode guidé.

$C$  : La vitesse de la lumière dans le vide.

$\lambda$  : Longueur d'onde.

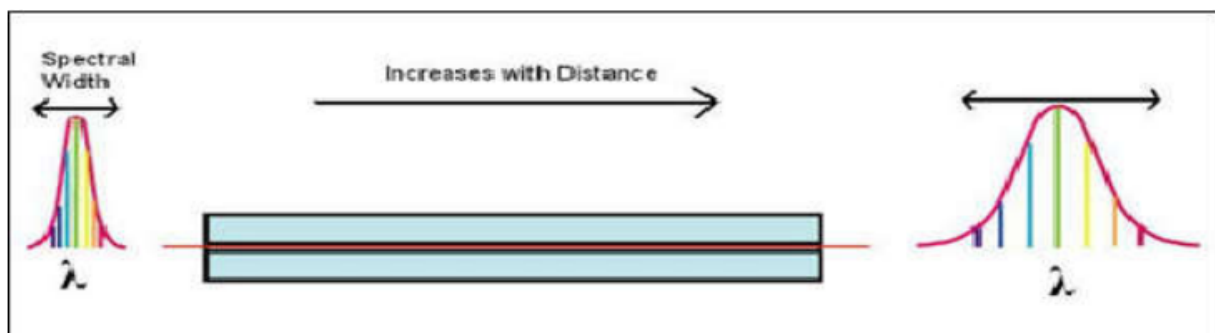


Figure I.19: Dispersion chromatique [3].

### -Dispersion modale de la polarisation

Il existe deux modes électromagnétiques dégénérés du mode fondamental d'une fibre optique monomode (LP<sub>01</sub>), caractérisés par deux directions de polarisation perpendiculaires. Dans une fibre monomode, ces deux modes, se propagent à des vitesses identiques. Lorsque la fibre présente une biréfringence, qui peut être due à des contraintes, on observe une levée de la dégénérescence des constantes de propagation entre les deux modes. Les deux composantes du mode se propagent alors à des vitesses différentes. Ce phénomène gênant a pour conséquence l'allongement temporel des impulsions. Pour le supprimer totalement, il faut utiliser une fibre exempte de toute biréfringence ou au contraire employer une fibre à maintien de polarisation hautement biréfringente.

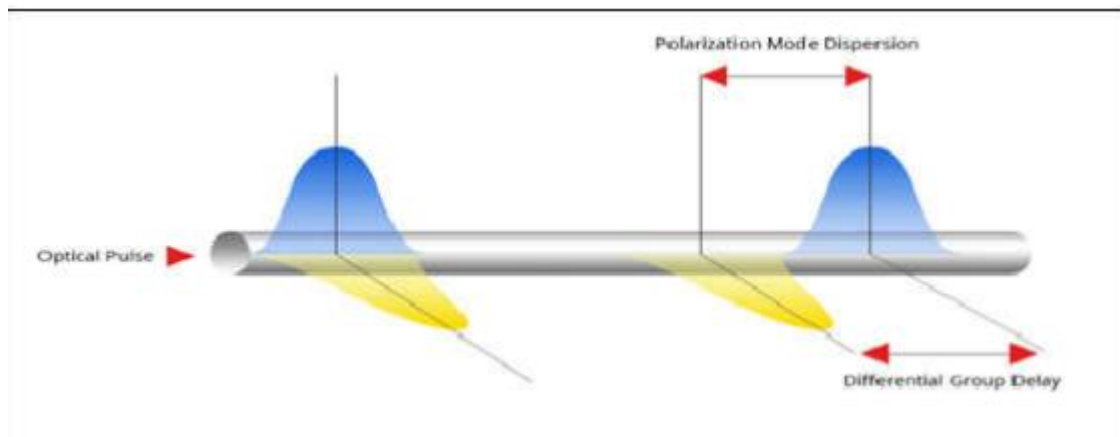


Figure I.20: Dispersion modale de la polarisation [3].

### -Dispersion intermodale :

Ce type de dispersion se produit également dans les fibres optiques, mais il est lié à la dispersion temporelle des différents modes de lumière à des longueurs d'onde données. Cela peut se produire en raison de la dispersion chromatique et la dispersion modale combinées.

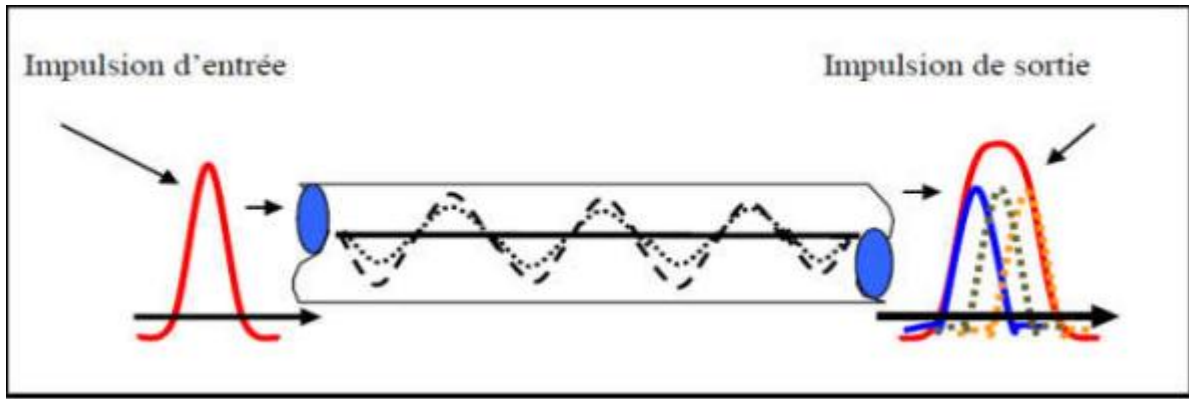


Figure I.21: Dispersion intermodale [3]

\*Ouverture numérique :

L'ouverture numérique ON est une mesure de la capacité d'un système optique, tel qu'une lentille ou une fibre optique, à collecter la lumière provenant d'une source interne. Elle est définie selon deux manières :

La première est la différence d'indice normalisé :

$$\Delta = \frac{n_c - n_g}{n_c}$$

La deuxième représente le sinus de l'angle d'entrée maximal de la lumière dans la fibre pour que la lumière puisse être guidée sans perte.

$$ON = \sin \theta_{\max} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

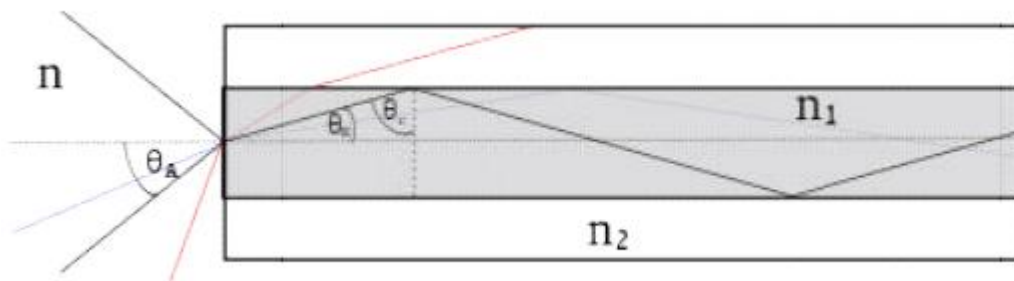


Figure I.22: Ouverture numérique [17].

\*Prévisions des pertes par courbure :

L'atténuation du signal optique lors de sa propagation est influencée par divers phénomènes. Certains sont associés aux caractéristiques du matériau de la fibre, tels que son taux d'absorption et de diffusion. D'autres phénomènes sont liés aux pertes résultant de la fuite du champ électromagnétique à l'extérieur de la fibre optique.

-Perte par absorption

La plage de transparence d'un matériau est définie par deux bandes d'absorption intrinsèques qui sont la bande d'absorption électronique, qui se situe aux faibles longueurs d'ondes, et la bande d'absorption de réseau, qui se trouve aux grandes longueurs d'ondes. Ces deux bandes déterminent les longueurs dans lesquelles le matériau peut être utilisé efficacement. Par exemple pour la silice, cette plage se situe entre 200 et 2000 nm, tandis que pour un verre de chalcogénure comme l'As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, elle se situe entre 600 et 9000 nm [17].

Entre ces deux bandes, il peut y avoir des bandes extrinsèques causées par la présence d'impuretés telles que le carbone, les métaux de transition, ou l'eau. Ces impuretés peuvent provenir des matières premières utilisées dans la fabrication du matériau ou être introduites pendant le processus de synthèse.

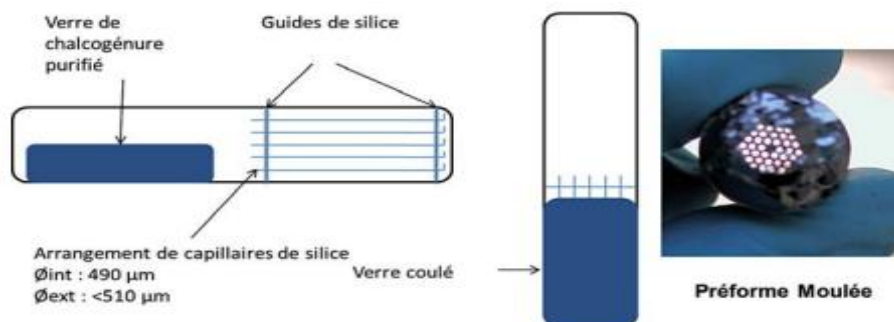


Figure I.23 : Schéma de fabrication de préforme en verre de chalcogénures par la technique de moulage [12].

### 1: POSITION DES PRINCIPALES BANDES D'ABSORPTIONS EXTRINSEQUES DANS UN VERRE $As_2S_3$

Impureté	OH	SH	CO <sub>2</sub>	CS	CS <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	AsO
Position $\lambda(\mu\text{m})$	2.9	4.03	4.26	4.94	6.62	2.29	7.5
	2.92	4.1		7.6		6.3	7.9

Tableau I.1 : Position des principales bandes d'absorptions extrinsèques dans un verre  $As_2S_3$  [17].

-Perte par diffusion :

Il existe deux processus de diffusion lors de la propagation dans une fibre optique : la diffusion de Rayleigh et la diffusion de Mie.

a) Diffusion de Rayleigh :

La diffusion de Rayleigh est un phénomène optique qui se produit lorsque la longueur d'onde du rayonnement est beaucoup plus grande que la taille des centres diffusants présents dans le matériau. Ce phénomène est nommé d'après Lord Rayleigh, qui l'a étudié au 19<sup>ème</sup> siècle.

Lorsque la lumière traverse un matériau, le champ électrique oscillant de la lumière crée des dipôles. Ces dipôles peuvent être des moments dipolaires électroniques, qui se forment lorsque les électrons du matériau sont soumis au champ électrique oscillant de la lumière.

Une caractéristique importante de la diffusion Rayleigh est que l'intensité du rayonnement diffusé est inversement proportionnelle à la quatrième puissance de la longueur d'onde de la lumière incidente. Cela signifie que pour des longueurs d'onde plus courtes, l'intensité de la diffusion Rayleigh est plus grande, tandis que pour des longueurs d'onde plus longues, elle est plus faible.

b) Diffusion de Mie

La diffusion de Mie est un phénomène optique qui se produit lorsque la longueur d'onde du rayonnement qui se propage est de l'ordre de la taille des centres diffusants présents dans le matériau. Contrairement à la diffusion de Rayleigh, qui est causée par des dipôles atomiques ou moléculaires, la diffusion de Mie est due à la présence d'éléments diffusants discrets, tels que des particules ou des cristallites. Ces éléments diffusants peuvent être intrinsèques au matériau ou peuvent résulter d'imperfections géométriques telles que des défauts dans la fibre optique, comme une mauvaise qualité de l'interface cœur-gaine.

L'intensité de la diffusion de Mie est inversement proportionnelle à la puissance de la longueur d'onde, ce qui signifie que pour des longueurs d'onde plus courtes l'intensité de la diffusion est plus grande, et pour des longueurs d'onde plus longues elle est plus faible.

### -Perte par rayonnement

Lorsque la lumière est injectée dans le cône d'acceptance d'une fibre optique, les conditions de réflexion totale à l'interface cœur-gaine sont satisfaites, ce qui permet aux modes de se propager à l'intérieur du cœur sans échapper dans la gaine. Cependant, lorsque la fibre est courbée, les conditions de guidage changent, ce qui peut entraîner une réduction de la réflexion totale à l'interface cœur-gaine pour certains modes. Ces modes peuvent alors être réfractés dans la gaine, ce qui conduit à une perte de signal [17].

Une étude spécifique sur la courbure d'une fibre à saut d'indice a été réalisée par C. Vassalo. Cette étude a probablement examiné les effets de la courbure sur les propriétés de guidage de la fibre et son impact sur les pertes de signal [17].

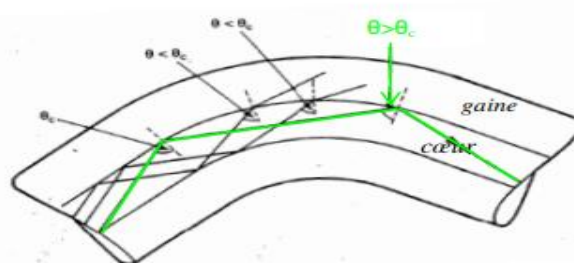


Figure I.24:Schéma descriptif d'une courbure au niveau d'une fibre conventionnelle, montrant les phénomènes de guidage et de fuite de lumière en fonction des angles  $\theta$  et  $\theta_c$  [17].

### -Perte par couplage :

Lorsque la lumière passe à travers une interface entre deux milieux avec une différence d'indice de réfraction, une partie de la lumière est à cette interface. Cette réflexion est connue sous le nom de réflexion de Fresnel. Plus la différence d'indice entre les deux milieux est grande, plus la quantité de lumière réfléchie est importante. Cette réflexion se produit à l'entrée de la fibre, ainsi qu'à la sortie lorsque la lumière passe du cœur de la fibre à l'espace libre. La qualité de couplage de la lumière dans la fibre dépend donc de la qualité de la surface traverse de la fibre, notamment du processus de clivage.

Pour les fibres avec un petit cœur, la dimension de la tache au point de focalisation des optiques de couplage peut être plus grande que le diamètre du cœur de la fibre. Cela signifie qu'une partie de la lumière est injectée dans la gaine de la fibre, ou elle peut se propager sur une certaine distance en tant que mode de gaine, au lieu de se propager dans le cœur.

Pour se propager efficacement dans la fibre optique, la lumière doit être injectée dans le cône d'acceptance de la fibre. Les rayons lumineux en dehors de ce cône sont réfractés dans la gaine. Pour éviter ces pertes, il est nécessaire d'adapter l'optique d'injection à l'ouverture numérique de la fibre. Comme pour le premier point la qualité de la surface transverse de la fibre est également critique pour le couplage efficace de la lumière dans le cœur de la fibre.

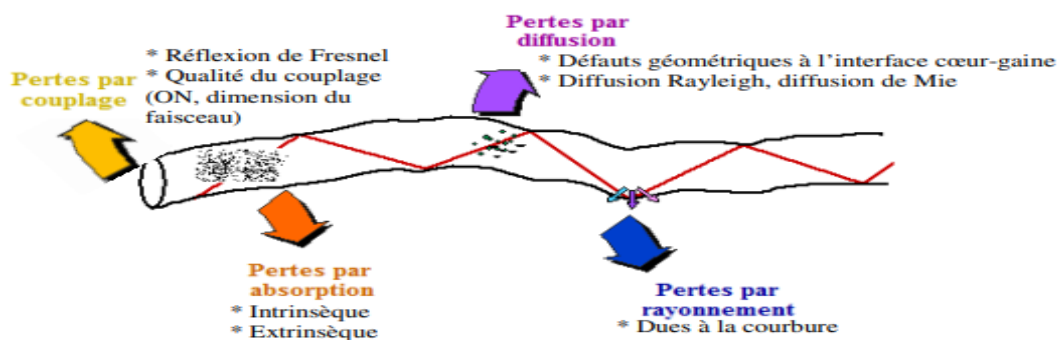


Figure I.25 : Schéma récapitulatif des différents types de pertes dans une fibre optique [17]

## I.5 Les modes à pertes dans les fibres optiques micro-structurées

### I.5.1 Modes de perturbation

Ce sont des modes qui se propagent dans la fibre avec une atténuation élevée en raison de leur sensibilité à la structure micro-structurée de la fibre. Ces modes peuvent être le résultat de réflexions, de diffusions, ou d'autres interactions avec les caractéristiques de la fibre.

### I.5.2 Modes de fuite

Ce sont des modes qui fuient hors du cœur de la fibre et sont perdus dans la gaine environnante. Ces modes peuvent être causés par des variations locales dans la structure de la fibre ou par des défauts dans sa fabrication.

### I.5.3 Modes de couplages

Sont des modes qui se couplent avec d'autres modes ou structures externes, ce qui entraîne une perte d'énergie de propagation dans la fibre.

## **I.6 Avantages et inconvénients des fibres optiques FMS**

### **I.6.1 Avantages**

Il convient également de souligner qu'il existe plusieurs avantages associés aux FOM, parmi lesquels :

- Large bande passante.
- Faible perte de signal.
- Flexibilité de conception.
- Résistance aux environnements difficiles.
- Multiplicité d'applications.
- Faible latence.
- Immunité aux bruits.
- Absence de diaphonie.

### **I.6.2 Inconvénients**

Parmi les inconvénients on peut citer :

- Complexité de fabrication.
- Sensibilité à la contamination.
- Défis de connectivité.
- Limitations de longueur.
- Sensibilité à la courbure.
- Dégradation thermique.
- Interférences électromagnétiques.
- Sélection limitée des matériaux.

## **I.7 Applications des fibres FMS**

Pour les applications de Télécommunications, elles sont utilisées pour la transmission de données à haut débit sur de longues distance, offrent une bande passante élevée et une faible atténuation.

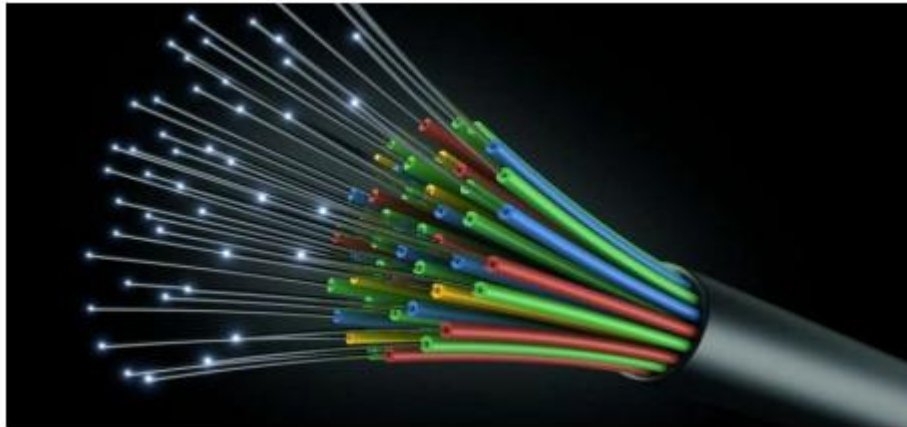


Figure I.26: Fibre optique utilisée dans les télécommunications [3].

Pour les applications de capteurs, leur structure permet de créer des capteurs sensibles aux variations de pression, de température, de contrainte, etc. Elles sont utilisées dans des applications telles que la surveillance des structures, la détection des gaz et des liquides, la médecine, etc.

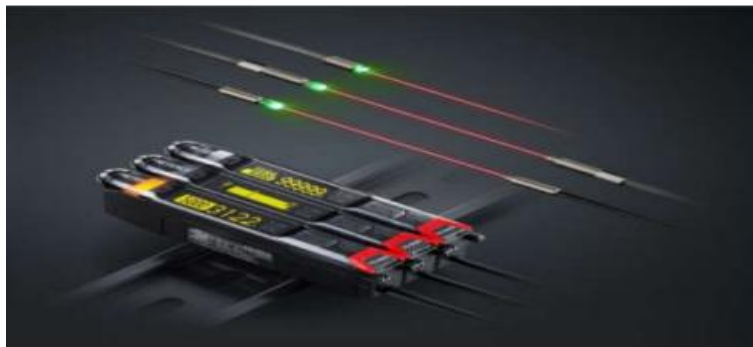


Figure I.27: Fibre optique utilisée pour les capteurs [3].

Dans le domaine d'imagerie médicale, les fibres optiques micro-structurées sont utilisées dans les endoscopes et les sondes d'imagerie médicale pour fournir des images de haute qualité et pour des interventions mini-invasives.

Elles sont utilisées comme milieu actif dans les lasers à fibre, offrant une efficacité élevée, une bonne qualité de faisceau et une grande stabilité.



Figure I.28: laser à fibre optique [3]

Elles sont employées dans des instruments de spectroscopie pour l'analyse de substances chimiques, la détection de polluants, la surveillance de l'environnement, etc.



Figure I.31: Spectromètre à fibre optique [3].

Leur capacité à résister à des environnements extrêmes en fait un choix idéal pour les applications de détection de rayonnement dans les centrales nucléaires, les laboratoires de recherche, etc. Ainsi, leur faible poids et leur résistance aux radiations en font des candidats prometteurs pour les communications spatiales.

## **I.8 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques notions de base sur les fibres optiques micro-structurées, nous avons décrit leur structures, fabrication et leur avantages et inconvénients.

Les fibres optiques micro-structurées représentent une avancée significative dans le domaine des guides d'ondes optiques. Leur structure innovante permet des propriétés optiques impossible à obtenir avec les guides d'ondes classiques. La capacité à ajuster les paramètres opto-géométriques selon l'application visée offre une flexibilité sans précédent.

**Chapitre II :**  
**Modélisation électro-thermo-optique**  
**de la fibre optique micro-structurée**

### II.1 Introduction

La modélisation électro-thermo-optique de la fibre optique micro-structurée est un domaine d'étude crucial dans le développement et la compréhension des dispositifs optiques modernes. Cette approche multidisciplinaire fusionne les concepts de l'optique, de l'électromagnétisme, de la thermodynamique et de la modélisation des matériaux pour analyser et prédire le comportement des fibres optiques dans des environnements complexes et variés.

Dans ce chapitre, nous explorerons en profondeur les propriétés des matériaux  $\text{GeO}_2$  et  $\text{TeO}_2$ . Ces matériaux présentent des caractéristiques uniques qui les rendent essentiels dans la conception et l'optimisation des composants optiques. De plus nous aborderons les différentes méthodes de modélisation de la fibre optique micro-structurée, telles que la méthode des fonctions localisées. Ensuite, nous examinerons le transfert de chaleur dans les solides. Enfin, nous explorerons la sensibilité des propriétés thermo-physique de dioxyde de germanium et de dioxyde de tellure sur la température.

Ce chapitre vise à fournir une base solide pour la compréhension et la modélisation avancée des fibres optiques micro-structurées, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles avancées dans les domaines de la communication optique, de la photonique intégrée et des technologies émergentes.

### II.2 Matériaux $\text{GeO}_2$ et $\text{TeO}_2$

Le  $\text{GeO}_2$  est le dioxyde de germanium, est un composé chimique utilisé comme matériau diélectrique dans la fabrication de couches d'oxyde de germanium dans les semi-conducteurs. Il est aussi utilisé dans la production de verre optique pour ses propriétés de transmission infrarouge, le dioxyde de germanium est un composé stable à haute température, ce qui en fait un matériau adapté pour des applications nécessitant une résistance thermique élevée [18].

Le  $\text{TeO}_2$  est le dioxyde de tellure, il est connu pour ses propriétés acousto-optiques, ce qui signifie qu'il peut modifier la propagation de la lumière en réponse à des ondes acoustiques. Il est également utilisé dans les modulateurs et les filtres optiques acoustiques et aussi dans les capteurs acoustiques pour sa sensibilité aux ondes sonores [19].

#### I.2.1 Propriétés physiques

### 2: LES PROPRIETES PHYSIQUES DU GeO2 ET DU TeO2

	Point de fusion (°C)	Point d'ébullition (°C)	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Masse molaire (g/mol)	Solubilité dans l'eau	Indice de réfraction
GeO2	1115	1890	6.24	104.7	Faible	1.7
TeO2	733	1240	5.67	159.60	Faible	2.5

Tableau II.1: Les propriétés physiques du GeO2 et du TeO2 [20].

### II.2.2 Propriétés électriques

#### 3: LES PROPRIETES ELECTRIQUES DU GeO2 ET DU TeO2

	Résistivité électrique (Ω.cm)	Bande interdite (ev)	Constante diélectrique	Conductivité ionique
GeO2	10 <sup>11</sup>	4	7 à 8	Faible
TeO2	10 <sup>11</sup>	4.7	6 à 10	Faible

Tableau II.2 : Les propriétés électriques du GeO2 et du TeO2 [20].

### II.2.3 Les propriétés optiques

#### a) Pour le dioxyde de germanium GeO2

-La biréfringence : Elle est de l'ordre de 0.02 à 0.05 dans le domaine visible.

-La polarisation : La biréfringence du GeO2 peut affecter la polarisation de la lumière incidente, bien que dans une moindre mesure en raison de sa biréfringence plus faible.

#### b) Pour le dioxyde de tellure TeO2 :

-La biréfringence : Le TeO2 est un cristal biréfringent avec une biréfringence typique de l'ordre de 0.1 à 0.2 dans le domaine visible, dépendant de l'orientation cristalline.

-La polarisation : Le dioxyde de tellure peut modifier la polarisation de la lumière incidente en fonction de son orientation cristalline et de la direction de propagation.

La biréfringence de ces matériaux peut induire une polarisation de la lumière qui les traverse. Cela signifie que la direction de vibration de la lumière peut être influencée par la structure cristalline du matériau. Dans le cas du TeO2, cette influence est généralement plus forte que

dans le cas de GeO<sub>2</sub>, ce qui signifie que le dioxyde de tellure peut polariser la lumière plus efficace que GeO<sub>2</sub>.

### II.2.4 Propriétés thermiques

Le tableau II.3 résume les principales propriétés thermiques de GeO<sub>2</sub> et de TeO<sub>2</sub>.

	Température de fusion (°C)	Conductivité thermique (W/m.K)	Coefficient de dilatation thermique (°C <sup>-1</sup> )	Stabilité thermique
GeO <sub>2</sub>	1120	2.2	$6.1 \cdot 10^{-6}$	Stable
TeO <sub>2</sub>	733	4.23	$5.8 \cdot 10^{-6}$	Stable

Tableau II.3 : Les propriétés thermiques de GeO<sub>2</sub> et de TeO<sub>2</sub> [20].

### II.3 Modélisation de la fibre optique micro-structurée

La modélisation des fibres optiques micro-structurées nécessite une méthode de résolution des équations de Maxwell, qui sont les équations fondamentales décrivant le comportement du champ électromagnétique dans un guide d'onde. Ces équations prennent en compte la propagation des ondes électromagnétiques à travers un milieu, tel qu'une fibre optique en fonction des propriétés du milieu, tel que la permittivité, la perméabilité et l'indice de réfraction.

Pour résoudre ces équations plusieurs techniques numériques avancées sont souvent utilisées, telles que la méthode des fonctions localisées (MFL), la méthode des éléments finis (MEF), ou des techniques de résolution spécifiques adaptées aux géométries complexes.

Ces méthodes permettent de prendre en compte les géométries arbitraires, les transitions abruptes d'indices de réfraction et pour obtenir des résultats exactes et précis sur le comportement des fibres optiques micro-structurées en fonction des conditions de fabrication et de conception spécifiques.

#### II.3.1 La méthode des fonctions localisées (MFL)

La méthode des fonctions localisées est une approche utilisée pour résoudre l'équation d'onde scalaire approximée, elle permet de simplifier l'équation de Maxwell complète dans le contexte des fibres optiques ou des guides d'ondes optiques en remplaçant le champ

électromagnétique et le profil d'indice de réfraction par une combinaison de fonctions de Hermite-Gauss, ce qui permet d'obtenir une solution précise et efficace pour les modes de propagation de la lumière dans ces structures [21].

$$\frac{\partial^2 E(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E(x,y)}{\partial y^2} + k^2 n^2(x,y) E(x,y) = \beta^2 E(x,y) \quad (\text{II.1})$$

Le champ  $E(x,y)$  dans l'équation (II.1) est représenté par une série de fonctions orthonormées de Hermite-Gauss [22].

$$E(x,y) = \sum_{a=0}^{N-1} \sum_{b=0}^{N-1} E_{ab} \Psi_a^x(x) \Psi_b^x(y) \quad (\text{II.2})$$

Les fonctions  $\Psi$  de Hermite-Gauss sont des fonctions normalisées dérivées des polynômes orthonormés de Hermite H [22].

$$\Psi_a^x(x) = \frac{2^{-a/2} \pi^{-1/4}}{\sqrt{\chi^a}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\chi^2}\right) H_a\left(\frac{x}{\chi}\right) \quad (\text{II.3})$$

L'expression des polynômes de Hermite [22] est :

$$H_n(x) = (-1)^n \exp(x^2) \frac{d^n \exp(-x^2)}{dx^n}, (n=0,1,2,\dots) \quad (\text{II.4})$$

Les fonctions  $\Psi_a^x$  et  $\Psi_b^x$  sont orthonormées sauf si elles vérifient [22] :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi_a^x(x) \Psi_b^x(x) dx = \delta_a^b \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$\delta_a^b$  Est le symbole de Kronecker, il vaut 0 si  $a \neq b$  et 1 si  $a = b$ .

Lorsque le profil transverse est symétrique par rapport aux axes du repère cartésien (X, Y), les calculs des décompositions peuvent être simplifiés en ne considèrent que les fonctions paires de Hermite-Gauss [22], ce qui réduit la durée des calculs.

$$\Psi_a^x(x) = \frac{2^{-a} \pi^{-1/4}}{\sqrt{\chi(2a)!}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\chi^2}\right) H_{2a}\left(\frac{x}{\chi}\right) \quad (\text{II.6})$$

Le carré de l'indice de réfraction,  $n^2(x,y)$  est normalisé et décomposé de la même manière que le champ électrique.

$$n^2(x,y) = n_{air}^2 + (n_{silice}^2 - n_{air}^2) \sum_{a=0}^{P-1} \sum_{b=0}^{P-1} d_{ab} \Psi_a^n(x) \Psi_b^n(y) \quad (\text{II.7a})$$

Où :

$$d_{ab} = \int \int n^2(x, y) \Psi_a^n(x) \Psi_b^n(y) dx dy \quad (\text{II.7b})$$

L'indice du matériau utilisé, tel que le GeO<sub>2</sub> ou le TeO<sub>2</sub> vaut égale à 1 et l'indice de l'air normalisé vaut 0 [22].

Les coefficients  $\chi$  et  $\eta$  sont utilisés dans les expressions des fonctions de Hermite-Gauss pour définir respectivement le champ et le carré de l'indice, ils sont déterminés avant la résolution du système. Leur sélection vise à garantir une précision optimale dans les approximations par décomposition, tout en minimisant le nombre de fonctions utilisées. La constante  $\chi$  est définie comme  $\Lambda/2$ . Pour chaque figure de mérite d'approximation spectrale considérée, la valeur de  $\eta$  est optimisée en comparant le profil reconstitué au profil initial. Les expressions de champ  $E$  et de la permittivité sont incluses dans l'équation d'onde. Pour résoudre cette équation différentielle, chaque terme est ensuite multiplié par  $\chi \chi \Psi^c \Psi^d$  et intégré sur toute la section transverse considérée. Ce processus aboutit à un système matriciel aux valeurs propre, qui peut être exprimé de manière générale pour la résolution [22].

$$[M] [E] = \beta^2 [E] \quad (\text{II.8})$$

Les composantes du vecteur propre  $[E]$  représentent les coefficients  $E_{ab}$  recherchés, définis dans la décomposition du champ (II.2). Une fois les intégrales de recouvrement de la matrice  $[M]$  calculées, la résolution de ce système à une longueur d'onde fixée fournit les valeurs propres  $\beta = k_{\text{neff}}$ . Pour chaque valeur propre la répartition du module de champ  $E$  qui lui associé est également calculée. Enfin à partir de ces résultats, la dispersion chromatique, la pente de la dispersion et l'air effectif du mode fondamental peuvent être déduites.

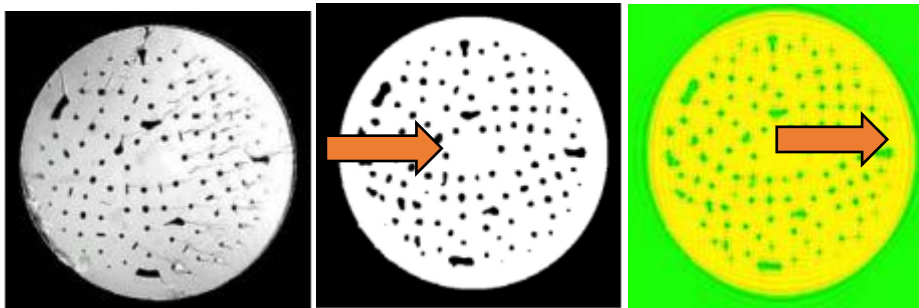


Figure II.1: Estimation d'un profil d'indice réel en utilisant 60\*60 fonctions de Hermite-Gauss [22].

La conversion de l'image du profil au niveau de gris en une image bicolore, où chaque teinte représente un matériau distinct. La grille résultante de 501\*501 pixels, discrétisée après la transformation en image bicolore, est associée à des valeurs d'indice normalisées, différenciant les zones d'air et de matériau utilisé (silice, TeO<sub>2</sub>, GeO<sub>2</sub>...).

Les distributions du champ électrique calculées à des longueurs d'onde de 0.8 μm et 1.55 μm par la MFL avec le profil précédent sont illustrées dans la figure II.2.

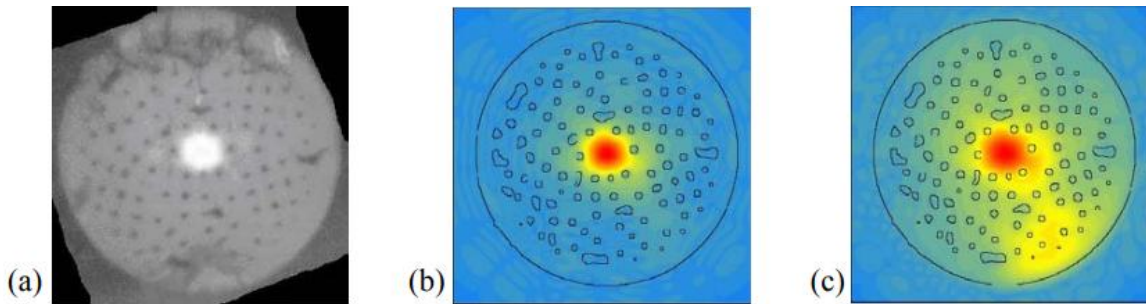


Figure II.2: (a) La distribution d'énergie observée en sortie de la fibre pour la lumière blanche

(b) La distribution d'énergie calculée à 0.8 μm

(c) La distribution d'énergie calculée à 1.55 μm [22].

La méthode des fonctions localisées s'inspire de l'approche de Monro et ses collègues. Dans leur méthodes le profil d'indice est divisé en deux zones distinctes : la zone périodique, représentant le cristal photonique, et la zone de défaut de cristal. Ils décomposent le champ électromagnétique et la zone de défaut en utilisant des bases de fonctions de Hermite-Gauss, tandis que la zone périodique est décrite à l'aide de fonctions continues. En effet la convergence des calculs pour la reconstruction du profil est améliorée et plus rapide lorsque nous utilisons uniquement des fonctions localisées. De plus, la résolution de l'équation d'onde scalaire ne permet pas d'étudier l'influence de la polarisation du champ sur sa polarisation dans la fibre à modes faiblement guidés (FMAS). Enfin, l'approximation de l'équation d'onde scalaire est valable tant que la condition de guidage est respectée ( $\Delta = \frac{n_{\text{coeur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2}{2n_{\text{coeur}}^2} \ll 1$ ).

Cette méthode montre une moindre fiabilité lorsqu'elle est appliquée à des profils d'indice de fonctions mathématiques d'air et de surface (FMAS) comportant une forte proportion d'air. De plus, elle nécessite une capacité mémoire importante pour stocker les matrices calculées. En revanche, la décomposition du profil d'indice sur une base de fonctions permet le calcul

analytique des intégrales de recouvrement du système matriciel à résoudre, offrant ainsi un avantage considérable pour les profils transverses à deux dimensions considérées.

### II.3.2 La méthode de l'indice moyenné en azimut (MIM)

Cette méthode résout l'équation d'onde scalaire en utilisant un profil d'indice transverse 2D substitué par un profil à symétrie de révolution équivalent. Pour illustrer, considérons un profil d'indice 2D de fibre optique micro-structurée avec des trous disposés en couronnes hexagonales autour d'une région centrale sans trou. Ce profil est représenté par  $n(r, \phi)$ , tandis que la répartition transverse du module du champ électrique est noté  $E(r, \phi)$ , où  $r$  est la coordonnée radiale et  $\phi$  est la coordonnée azimutale. Ainsi, le champ électrique peut être exprimé comme suit [22]:

$$E = E(r, \phi) \exp j(\omega t - \beta z) \quad (\text{II.9})$$

Les profils des FMAS considérées possèdent une symétrie de rotation d'angle  $\frac{2\pi}{6}$ . En conséquence, on peut décomposer le profil  $n(r, \phi)$  et le module de champ  $E(r, \phi)$  en série de Fourier de la manière suivante [22] :

$$n^2(r, \phi) = \overline{n^2(r)} + \sum_{m \neq 0} \alpha_m(r) \cos(6m\phi), \text{ avec } \alpha_m(r) = \frac{\pi}{2} \int_0^\pi n^2(r, \phi) \cos(6m\phi) d\phi$$

$$E(r, \phi) = \overline{E(r)} + \sum_{m \neq 0} a_m(r) \cos(6m\phi), \text{ avec } a_m(r) = \frac{\pi}{2} \int_0^\pi E(r, \phi) \cos(6m\phi) d\phi \quad (\text{II.10}).$$

$\alpha_m(r)$  et  $a_m(r)$  représentent les termes d'ordre supérieur des séries de Fourier, tandis que  $\overline{n^2(r)}$  et  $\overline{E(r)}$  sont les termes moyens [22].

$$\overline{n^2(r)} = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} n^2(r, \phi) d\phi \quad (\text{II.11})$$

$$\overline{E(r)} = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} E^2(r, \phi) d\phi \quad (\text{II.12})$$

Dans le contexte de cette méthode, seuls les composants moyens des séries de Fourier sont pris en considération. En adoptant un profil équivalent unidimensionnel, on parvient à réduire les temps de calcul en substituant la résolution de l'équation d'onde bidimensionnelle par celle de l'équation d'onde unidimensionnelle [22] :

$$\frac{\partial^2 \overline{E(r)}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \overline{E(r)}}{\partial r} + k^2 \overline{n^2(r)} \overline{E(r)} = \beta^2 \overline{E(r)} \quad (\text{II.13})$$

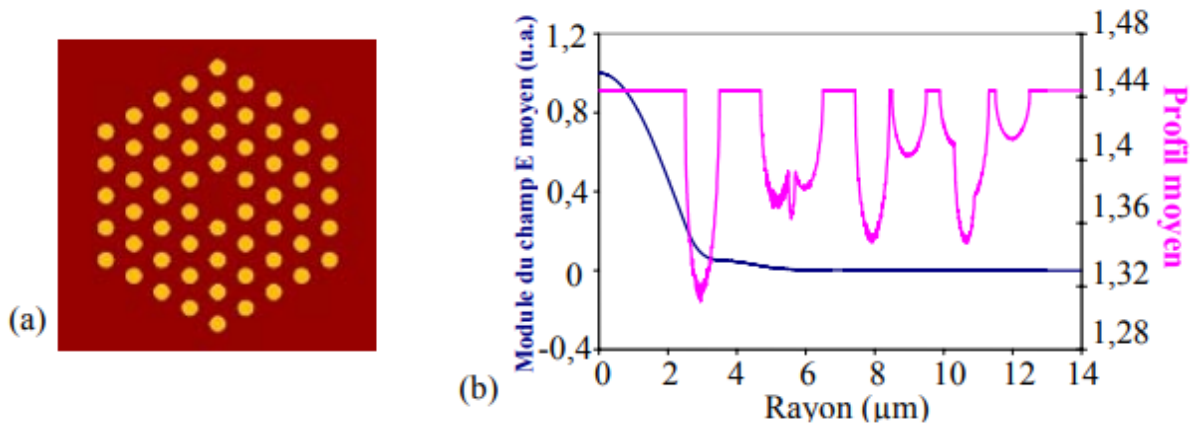


Figure II.3 : (a) Représente un profil d'indice 2D d'une FMAS

(b) Représente un profil 1D équivalent et champ E calculé à partir de cet indice [22].

En utilisant une méthode de Runge Kutta (avec des pas séparés et d'ordre 3), la résolution du système (II.3) permet de trouver les valeurs exactes de  $\beta = K_{neff}$  des modes à symétrie de révolution, ainsi que les distributions des champs scalaires qui leur sont liées. Ainsi, le champ électrique final exhibe une symétrie de révolution, comme illustré dans la figure II.3.

Pour évaluer la dispersion, on dérive deux fois la courbe de l'indice effectif par rapport à la longueur d'onde. Cependant, les légères irrégularités présentes dans la courbe calculées rendent difficile le calcul direct de cette dérivée. Ainsi, il est nécessaire de lisser la courbe avant de procéder à la dérivation. Ce processus de lissage consiste à approximer la courbe d'indice effectif par un polynôme de degré 3 ou plus, en utilisant la méthode des moindres carrés.

La méthode d'indice moyenné en azimut (MIM) se distingue par sa simplicité d'application. En se basant sur la résolution de l'équation d'onde unidimensionnelle, les calculs sont nettement plus rapides que dans les modèles tenant compte d'un profil transverse à deux dimensions. Bien que le profil d'indice à une dimension 1D reflète adéquatement la proportion moyenne d'air à une distance donnée du centre de la fibre, il ne peut pas prendre en considération les variations selon la coordonnée azimutale. Par conséquent, cette méthode offre une modélisation simplifiée de la propagation dans une fibre à des modes d'air, bien qu'elle soit a priori considérée comme plus réaliste que le modèle d'indice effectif, qui s'appuie sur une analogie avec la propagation dans une fibre à saut d'indice.

### II.3.3 La méthode multipolaire (MM)

Cette méthode est une approche vectorielle implique de caractériser chaque trou en utilisant sa propre matrice de diffraction. Chaque matrice de diffraction représente le champ électromagnétique dans un système de coordonnées cylindriques locaux, décomposé en une composante incidente et une composante réfléchi. Ce champ est ensuite décomposé en séries de fonctions de Fourier-Bessel. En exploitant les propriétés de translation des fonctions de Bessel, on peut exprimer toutes les matrices de diffraction dans le même système de coordonnées. Cette démarche conduit la formulation d'un système matriciel spécifique [22].

$$[M][B]=[0] \quad (II.14)$$

[B] correspond au champ électromagnétique d'un mode spécifique de la structure, tandis que [M] représente la matrice de diffraction généralisée de la structure étudiée, dépendant de la constante de propagation longitudinale complexe  $\gamma = \alpha + j\beta$ . Une solution du système associée à  $\gamma$  est représentée par [B] lorsque le déterminant de [M] est nul. On suppose que le profil d'indice reste constant le long de la direction longitudinale. Pour accélérer les calculs, il est possible de prendre en compte les symétries du champ électromagnétique guidé par la structure. Par exemple, pour trouver le mode fondamental d'une fibre micro-structurée à trous hexagonaux autour du cœur, les calculs peuvent être effectués sur un secteur de profil d'indice de  $30^\circ$ .

La fibre est délimitée par une matrice de diffraction, ce qui permet d'étudier l'effet de l'augmentation du nombre de couches de trous sur les pertes de confinement de chaque mode. Ces pertes exprimées en dBm, sont déduites de la partie imaginaire de l'indice effectif  $n_{eff}$  du mode considéré, elles sont égales à [22] :

$$\text{Pertes}(dB/m) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{20}{\ln(10)} \Im_m(n_{eff}), \text{ avec } \lambda \text{ en nm} \quad (II.15)$$

La méthode multipolaire est une approche vectorielle rigoureuse, bien qu'elle soit complexe à mettre en pratique. Son principal avantage réside dans sa capacité à exploiter la circularité des trous d'air, ce qui lui permet de converger rapidement et avec précision, même pour des structures comportant un grand nombre de trous. En modifiant légèrement le programme, elle peut également être adaptée pour traiter des FMAS avec des trous d'air non circulaire. Cependant, cela nécessite le recours à des méthodes intégrales ou différentielles pour calculer les matrices de diffraction, ce qui rallonge les temps de calcul. Cette méthode permet une

analyse approfondie des caractéristiques de la propagation dans les fibres optiques micro-structurées, incluant l'air effectif, la dispersion chromatique, la biréfringence, et les pertes de confinement. Elle est capable de modéliser à la fois la propagation par réflexion totale interne modifiée et la propagation par résonance transverse.

### II.3.4 La méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis (MEF) est une technique numérique largement utilisée pour résoudre des équations aux dérivées partielles décrivant divers phénomènes physiques. Elle consiste à approximer les variables inconnues en transformant un système continu d'équations aux dérivées partielles en un système discret d'équations algébriques. Pour cela, est nécessaire de diviser le domaine d'étude en sous-espaces élémentaires et de définir des conditions aux limites appropriées pour garantir l'unicité des solutions. Cette étape initiale implique la création d'un maillage de la structure étudiée, où les sous-espaces générés sont appelés les éléments du maillage. Des fonctions d'approximation de la solution sont ensuite définies sur chaque élément en utilisant un nombre fini de points, appelés nœuds du maillage, ces valeurs nodales également appelées degré de liberté, permettent de calculer la solution approximée sur l'ensemble du domaine en combinant de manière pondérée les fonctions d'approximation définies par morceaux.

#### II.3.4.1 Discrétisation du problème physique

Dans cette analyse, nous examinons le domaine de la fibre dans son ensemble, ce qui le caractérise comme un espace tridimensionnel. Nous prenons en compte que la forme transversale de la fibre est définie dans le plan ( $XOY$ ), avec l'axe  $z$  aligné sur sa direction longitudinale.

##### a) Découpage géométrique du domaine étudié et choix du maillage

La région d'étude, que nous désignerons par  $\Omega$ , présente une géométrie variée. Elle peut contenir divers milieux, qu'ils soient isotropes ou anisotropes, avec ou sans pertes, chacun caractérisé par ses tenseurs de permittivité relative  $\epsilon_r$  et de perméabilité relative  $\mu_r$ .

Les différents milieux remplissent un domaine ouvert  $\Omega_i$  (où  $i$  prend des valeurs de 1 à  $N$ , pour  $N$  milieux dans  $\Omega = \bigcup_{i=1}^N \Omega_i$ ). On désignera  $\Gamma_{ij}$  comme l'interface entre deux milieux  $\Omega_i$  et  $\Omega_j$  ( $\Gamma_{ij} = \Omega_i \cap \Omega_j$ ).

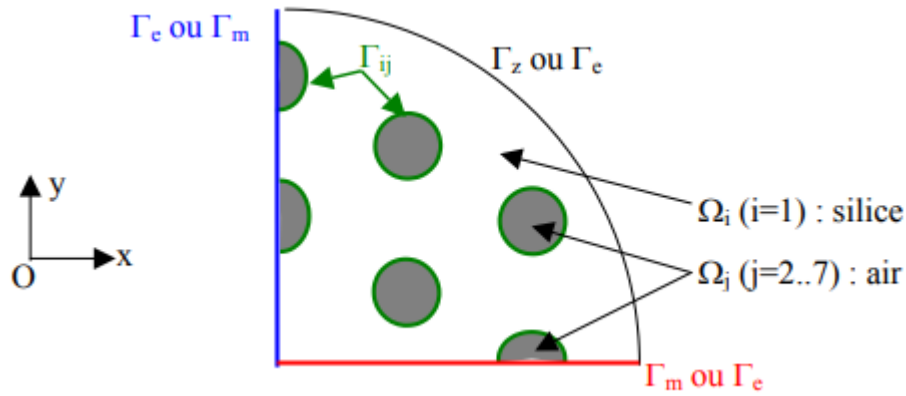


Figure II.4 : La notation conventionnelle utilisée dans le domaine d'étude  $\Omega$  [22].

Le domaine d'étude est subdivisé en éléments tels que des segments en 1D, des triangles en 2D et des tétraèdres en 3D (d'autres formes géométriques telles que les quadrilatères en 2D et les parallélépipèdes en 3D peuvent également être utilisées). Ces éléments doivent satisfaire aux conditions géométriques suivantes :

- Le domaine d'étude est entièrement représenté par l'ensemble des  $N$  éléments  $\omega_i$ .
- Deux éléments adjacents dans le maillage doivent partager soit un sommet, soit une face (dans le cas 3D). La figure II.5 illustre la disposition géométrique des éléments dans un domaine bidimensionnel.

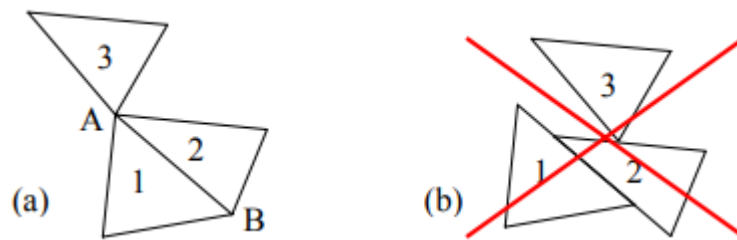


Figure II.5: (a) Disposition correcte des éléments : le côté AB est partagé par les éléments 1 et 2, tandis que le sommet A est partagé par les éléments 1,2 et 3.

(b) Disposition incorrecte [19].

Pour réaliser l'approximation de l'inconnue, on utilise des fonctions polynomiales définies par morceaux sur chaque élément géométrique (comme des triangles dans notre cas en deux dimensions). Ces fonctions d'approximations doivent refléter les mêmes variations que la grandeur inconnue, c'est-à-dire les champs électromagnétiques dans notre contexte. Elles

doivent notamment respecter les conditions de continuité des champs électromagnétiques lors du passage d'un élément à un autre : la continuité des composantes tangentielles du champ électrique le long des arêtes communes et la possible discontinuité de sa composante normale (cette discontinuité se produit lorsque les deux éléments sont définis dans des milieux diélectriques différents). S. Sobolev a introduit la notation d'espace des fonctions vectorielles  $H(\text{rot})$  qui satisfait ces conditions de continuité. Cet espace, noté  $H(\text{rot})$ , est défini comme suit [22] :

$$H(\text{rot}) = \left\{ \vec{f} \in (L^2)^2 \mid \vec{f} \Big|_{\text{rot}} \in (L^2)^2 \right\} \quad (\text{II.16})$$

L'espace  $L^2$  correspond à l'ensemble des fonctions scalaires dont le carré est intégrable.

$$L^2 = \left\{ f : \Omega \rightarrow \mathbb{C} \mid \iint |f|^2 < +\infty \right\} \quad (\text{II.17})$$

Il est important de noter que dans la définition de  $H(\text{rot})$ , nous avons considéré des fonctions vectorielles à deux composantes, bien que les champs électromagnétiques en possèdent trois. Étant donné qu'il est possible de déduire la composante longitudinale (le long de la direction de propagation) des champs à partir de leurs composantes transverses dans un guide d'onde, les grandeurs inconnues sont les champs électromagnétiques transverses  $\vec{E}_t$  et  $\vec{H}_t$ . Les fonctions d'approximation adoptées sont des fonctions vectorielles de type  $H(\text{rot})$ . L'espace de ces fonctions, associé à la grille de maillage utilisée, constitue un sous-espace de  $H(\text{rot})$  formé à partir de fonctions polynomiales d'ordre 2. Sa dimension est équivalente au nombre de degrés de liberté du maillage. Les degrés de liberté correspondent à des fonctions nodales  $v_i$ , définies sur les  $N$  nœuds  $i$  du maillage. Elles sont construites à partir des coordonnées locales des nœuds dans chaque triangle, de sorte que :

Pour chaque nœud  $i$  dans le repère des coordonnées locales :  $v_i=1$ , et pour tout nœud  $j$  différent de  $i$  :  $v_i=0$ .

La somme des  $v$  sur tous les nœuds d'un élément est égale à 1 dans le repère des coordonnées locales d'un point quelconque de l'élément.

### II.3.4.2 Conditions aux limites

Les parties de contour  $\Gamma_1$  et  $\Gamma_2$  doivent nécessairement observer la symétrie du guide et garantir celle du champ électromagnétique. Pour cela, des courts-circuits électriques (CCE,

également connus sous le nom de murs électriques) et des courts-circuits magnétiques (CCM, également appelés murs magnétiques) sont utilisés pour établir ces conditions.

En imposant des conditions aux limites sur  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$  et  $\Gamma_3$  pour les champs électromagnétiques, on garantit la singularité de solution.

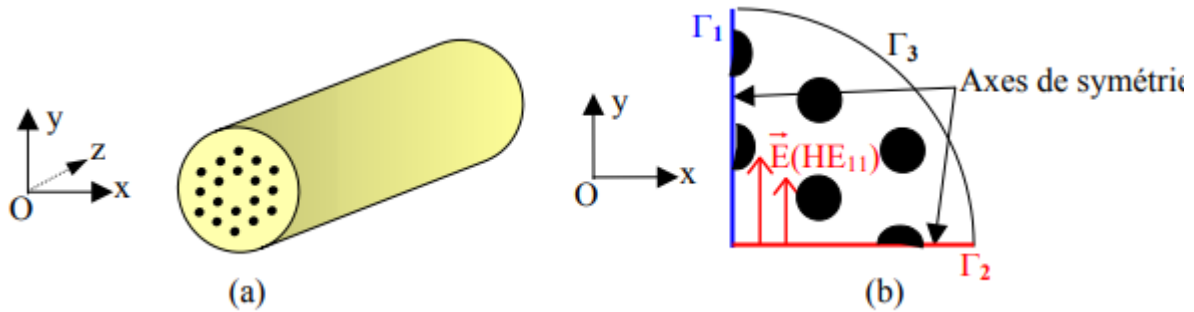


Figure II.6 : L'analyse du mode HE11 pour l'étude de la structure en deux façons :

(a) En caractérisant la structure 3D [22].

(b) En utilisant une représentation 2D qui suffit à modéliser la structure 3D.

A) Condition de mur électrique :

Définissons  $\Gamma_e$  comme le contour où un court-circuit électrique est appliqué, avec  $\vec{n}_e$  le vecteur unitaire normal à ce contour. Sur  $\Gamma_e$ , les champs électriques  $E_r$  et magnétiques  $H_r$  sont tels que [30]

$$\vec{n}_e \wedge \vec{E} = \vec{0} \quad (\text{II.18a})$$

$$\vec{n}_e \cdot \vec{E} = 0 \quad (\text{II.18b})$$

$$\vec{n}_e \wedge \vec{H} = \vec{J}_e \quad (\text{II.18c})$$

Dans un mur électrique, le champ électrique est perpendiculaire à  $\Gamma_e$ , tandis que le champ magnétique est parallèle à  $\Gamma_e$ .

En plus de garantir les conditions de symétrie, l'application de courts-circuits électriques et magnétiques sur les parties de contour  $\Gamma_1$  et  $\Gamma_2$  permet de définir la polarisation de la solution du champ électromagnétique. Par exemple, pour obtenir le champ électrique polarisé,  $\Gamma_1$  doit être un court-circuit magnétique (CCM) et  $\Gamma_2$  un court-circuit électrique (CCE). Ainsi, on

sélectionne une solution unique parmi une multitude de possibilités basées sur la polarisation du champ pour un seul mode électromagnétique.

B) Condition de mur magnétique

Considérons  $\Gamma_m$  comme le chemin sur lequel un court-circuit magnétique est placé, avec  $\vec{m}$  représentant le vecteur unitaire normal à ce chemin. Les champs électriques ( $E_r$ ) et magnétique ( $H_r$ ) doivent obéir aux relations spécifiées le long de  $\Gamma_m$  [19]:

$$\vec{n}_e \wedge \vec{H} = \vec{0} \quad (\text{II.19a})$$

$$\vec{n}_m \cdot \vec{E} = 0 \quad (\text{II.19b})$$

$$\vec{n}_m \wedge \vec{E} = \vec{J}_m \quad (\text{II.19c})$$

Sur  $\Gamma_m$ , nous avons défini la grandeur  $\vec{J}_m$  comme le produit vectoriel entre  $\vec{n}$  et  $\vec{m}$  et  $\vec{E}$  donnant une densité de courant surfacique non nulle et homogène. Cette grandeur, utilisée pour simplifier les expressions, ne suppose pas l'existence d'une source de courant dans la structure modélisée. Les deux premières relations impliquent que les composantes tangentes du champ magnétique le long de  $\Gamma_m$  sont nulles, tandis que la composante normale du champ électrique est également nulle. Aux murs magnétiques, le champ électrique est parallèle à  $\Gamma_m$  et le champ magnétique est orthogonal à  $\Gamma_m$ .

C) Condition d'impédance de surface :

Sur une partie externe du domaine d'étude, une impédance surfacique  $Z_s$  peut être définie. Cette partie du contour est  $\Gamma_z$ , avec  $\vec{n}_z$  représentant le vecteur unitaire normal à ce contour, dirigé vers l'intérieur du domaine. La condition d'impédance de surface impose une relation entre les composantes tangentes du champ électrique  $\vec{E}$  et du champ magnétique à la surface ou elle est définie [19].

$$\vec{n}_z \wedge \vec{E} = Z_s \left( \vec{n}_z \wedge \vec{H} \right) \wedge \vec{n}_z \quad (\text{II.20a})$$

$$\vec{J}_{zm} = Z_s \vec{H}_{tang} \wedge \vec{n}_z \wedge \vec{E} \quad (\text{II.20b})$$

$$\frac{1}{Z} = \frac{J_{ze}}{E_{tang}} = \frac{H}{n_z} \quad (II.20c)$$

L'impédance de surface doit correspondre à l'impédance de l'onde présente dans la structure pour prévenir les réflexions indésirables qui pourraient altérer significativement les caractéristiques du mode de calcul, avec  $\eta_{eff} = \eta_0 \sqrt{\frac{\mu_{eff}}{\epsilon_{eff}}}$  et  $\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$  est appelée l'impédance de vide, l'impédance de surface normalisée est symbolisée par  $Z$  [19]:

$$Z = \frac{Z_s}{\eta_0} = \frac{\eta_{eff}}{\eta_0} = \sqrt{\frac{\mu_{eff}}{\epsilon_{eff}}} \quad (II.21)$$

La correspondance d'impédance est mise en œuvre lorsque le champ électrique est perpendiculaire au contour comportant l'impédance  $Z$ . Cette restriction introduite dans les calculs conduit à une constante de propagation complexe lorsque la partie réelle de  $Z_s$  est non nulle.

## II.4 Ondes électromagnétiques dans le domaine fréquentiel

Les ondes électromagnétiques dans le domaine fréquentiel sont des oscillations d'énergie qui se propagent à travers l'espace sous forme de champs électrique et magnétique avec une fréquence spécifique, Elles couvrent une vaste de gamme de fréquences, allant des basses fréquences (comme les ondes radio) vers des hautes fréquences (comme les rayons gamma). Chaque type d'onde a une longueur d'onde correspondante, la fréquence représente le nombre d'oscillations par seconde, tandis que la longueur d'onde est la distance entre deux crêtes successives de l'onde. Chaque partie de spectre électromagnétique a des propriétés et des caractéristiques spécifiques qui déterminent ses applications potentielles, par exemple les ondes radio sont largement utilisées pour la communication à longue distance, tandis que les rayons X sont utilisés pour les l'imagerie médicale et l'inspection des matériaux.

### II.4.1 Propriétés de base des pertes dans MOF

Ces propriétés sont liées à la conception particulière et à la structure micro-structurée et ils sont influencés par plusieurs facteurs fondamentaux. La diffusion Rayleigh, résultant des imperfections structurelles internes, provoque la dispersion de la lumière et contribue aux pertes. Les matériaux constitutifs peuvent également absorber une partie de la lumière propagée, ajoutant aux pertes par absorption. De plus, les courbures de la fibre peuvent entraîner des pertes par réflexion interne incomplète ou par diffusion. La structure micro-

structurée influe sur la manière dont la lumière est confinée et guidée, impactant les pertes. La dispersion de la lumière et l'interaction avec les impuretés ou les défauts peuvent également contribuer aux pertes.

En plus de ces facteurs, d'autres éléments peuvent également influencer les pertes dans une fibre optique micro-structurée. Par exemple, la température ambiante et les conditions environnementales peuvent jouer un rôle dans la stabilité et les performances de la fibre. De plus, la longueur d'onde de la lumière propagée peut avoir un impact sur les pertes, car certaines fibres peuvent présenter des propriétés de transmission différentes selon la longueur d'onde. Les variations de la structure micro-structurée, telles que les défauts ou les déformations, peuvent également affecter les pertes de manière significative.

En tenant compte de ces aspects supplémentaires, il est possible de mieux comprendre les performances et les applications potentielles de la fibre optique micro-structurée dans un large éventail de domaines.

### II.4.2 Caractéristiques de la dispersion

Les fibres optiques micro-structurées présentent des caractéristiques de dispersion uniques résultant de leur structure interne spécifique.

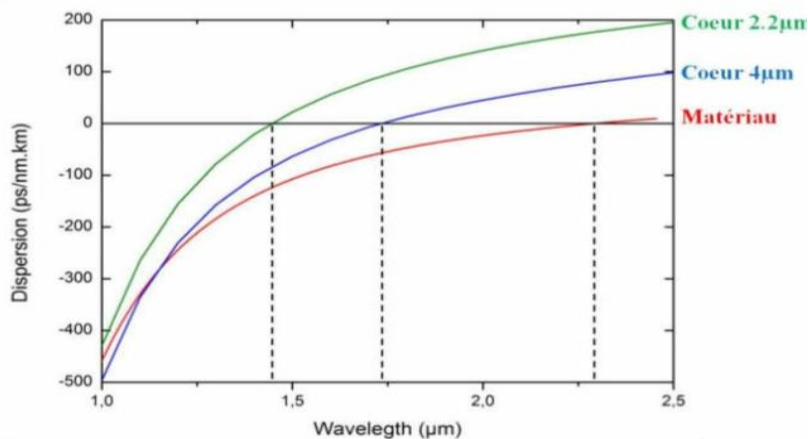


Figure II.7: Courbes de dispersion d'une FOM à cœur suspendu pour différentes tailles de cœur [22]

- La dispersion chromatique:

Elle est causée par la dépendance de la vitesse de propagation de la lumière par rapport à sa longueur d'onde. Dans les fibres optiques micro-structurées, la conception de la structure interne peut être optimisée pour minimiser ou exploiter cette dispersion. Par exemple, en ajustant la taille et la forme des trous dans la fibre, on peut obtenir des propriétés de dispersion chromatique spécifiques. Cette capacité de contrôle permet de concevoir des fibres adaptées à des applications telles que la transmission à haut débit ou la génération d'impulsions ultra-courtes dans les lasers à fibre.

b) La dispersion modale:

Dans ce type de dispersion, la structure interne peut être utilisée pour la contrôler en favorisant certains modes lumineux par rapport à d'autres. Cela peut permettre une transmission à large bande passante et une meilleure compensation de la dispersion chromatique, améliorant ainsi les performances des systèmes de communication optique à haute vitesse.

c) La dispersion de polarisation :

Elle se réfère à la variation de la vitesse de propagation de la lumière en fonction de son état de polarisation. Les MOF peuvent présenter des propriétés de dispersion de polarisation spécifiques. Cette dispersion peut être exploitée pour des applications telles que la séparation sélective des polarisations ou la gestion précise de la polarisation dans les systèmes de communication optique.

### II.4.3 Modes optiques

Les modes optiques dans les FOM se réfèrent aux différentes manières dont la lumière peut se propager à travers ces fibres dans le domaine fréquentiel des ondes électromagnétiques. Ces modes sont influencés par la géométrie spécifique de la fibre. Chacun de ces modes présente des caractéristiques uniques en termes de confinement de la lumière, de dispersion, de sensibilité aux perturbations externes et d'autres propriétés optiques, ce qui permet une grande flexibilité dans la conception des MOF pour diverses applications. Parmi ces modes on peut citer :

-Modes de cœur : Ces modes sont centrés autour du cœur de la fibre, ou la majorité de la puissance de la lumière est confinée. Les modes de cœur sont principalement influencés par la taille et la forme du cœur de la fibre.

-Modes de coquille : Ils se propagent le long de la région entourant le cœur, ils peuvent être sensibles à la structure périodique des trous dans la fibre et peuvent donc varier en fonction de la taille et de la forme de ces trous.

-Modes de résonance de Bragg : Ces modes résultent de la réflexion périodique de la lumière à l'intérieur de la fibre, similaire au phénomène de réflexion des ondes électromagnétiques à l'intérieur d'une structure de Bragg optique. Ils sont principalement sensibles à la période et à la profondeur des variations de la structure périodique de la fibre.

-Modes de guidage de surface (SGM) : Ces modes se propagent le long de la surface externe de la fibre, les modes de guidage de surface peuvent offrir des fonctionnalités uniques telles que la possibilité de coupler efficacement la lumière dans et hors la fibre.

-Modes de couplage de noyau-coquille (CSM) : Dans une MOF avec une structure cœur-coquille, les modes peuvent être associés à des interactions entre le cœur de la fibre et la région de coquille environnante.

### II.5 Transfert de la chaleur dans les solides

Le transfert de chaleur dans les solides se produit principalement par conduction. La conduction thermique est le processus par lequel la chaleur est transférée à travers un matériau sans déplacement de matière. Cela se produit lorsque les particules adjacentes d'un matériau vibrent et transmettent de l'énergie thermique les unes aux autres. Ce processus se produit généralement plus efficacement dans les matériaux solides que dans les fluides. En revanche, dans les solides, la convection (transfert de chaleur par déplacement de matière) joue un rôle moins important que dans les fluides.

#### II.5.1 Modes de transfert thermique

Les modes de transfert thermique décrivent les différentes façons dont la chaleur peut être transférée d'un endroit à un autre, les problèmes de transfert de chaleur sont variés, et ils peuvent être différenciés en fonction des objectifs visés, parmi lesquels les principaux sont :

- L'accroissement de l'énergie transférée ou captée par une surface.
- Optimiser le rendement d'une source de chaleur.
- Moduler le transfert thermique entre deux milieux en augmentant ou en réduisant le débit thermique.

Le transfert de chaleur à l'intérieur d'une phase, ou plus généralement entre deux phases, s'effectue selon trois modes :

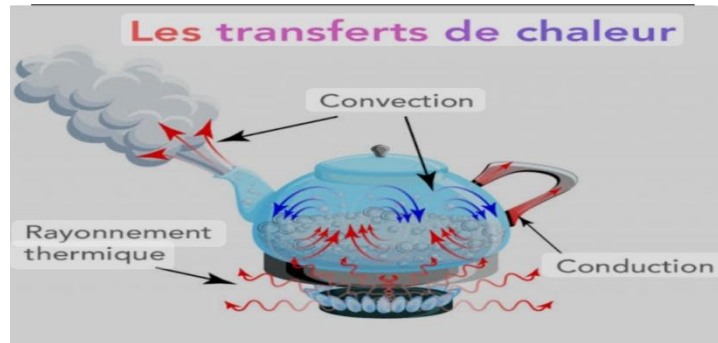


Figure II.7 : Les modes de transfert thermique [22].

### II.5.1.1 Par conduction

Ce processus est basé sur la transmission d'énergie cinétique entre les particules voisines d'un matériau. Lorsque les particules à haute énergie entrent en collision avec des particules à basse énergie (froide), elles transfèrent de l'énergie thermique, ce qui entraîne une augmentation de l'agitation thermique des particules froides. Les matériaux conducteurs, tels que les métaux, sont efficaces pour transférer la chaleur par conduction en raison de leur structure moléculaire qui permet un mouvement rapide des électrons.

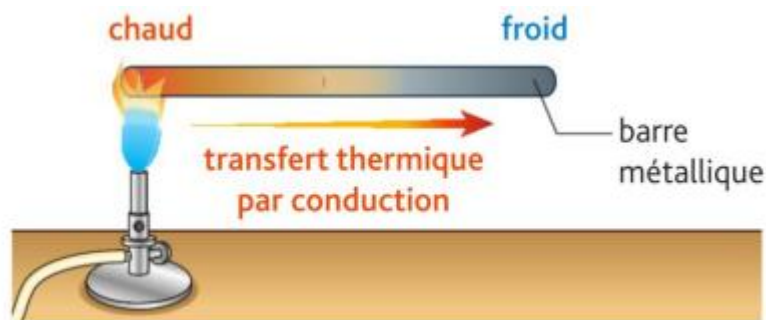


Figure II.8 : Le transfert thermique par conduction [22].

Le principe de la modélisation thermique repose sur la résolution de l'équation de diffusion de la chaleur (II.22) [23, 24].

$$\rho C_p \frac{\partial T_L}{\partial t} - \text{div} \left( k_L \vec{\nabla}(T_L) \right) = H \quad (\text{II.22})$$

Dans l'expression(II.22), $\rho$  est la masse volumique du matériau en  $\text{Kg/m}^3$ ,  $C_p$  est la capacité calorifique massique en  $\text{J/Kg.K}$ ,  $k_L$  est la conductivité thermique du matériau en  $\text{W/mK}$ .

Le terme H indique le terme de la génération de chaleur qui se manifeste par l'émission des phonons optiques et acoustiques.

### II.5.1.2 Par rayonnement

Le rayonnement thermique est le transfert de chaleur sous forme d'ondes électromagnétiques, telles que la lumière infrarouge, qui se propagent à travers le vide ou à travers un milieu transparent. Contrairement à la conduction et à la convection, le rayonnement thermique ne nécessite pas de support matériel pour se propager. Il peut donc se produire dans le vide comme dans l'espace.

Les objets chauds émettent du rayonnement thermique selon la loi de Stefan-Boltzmann. La quantité de chaleur rayonnée dépend de la température de l'objet et de sa surface émissive.

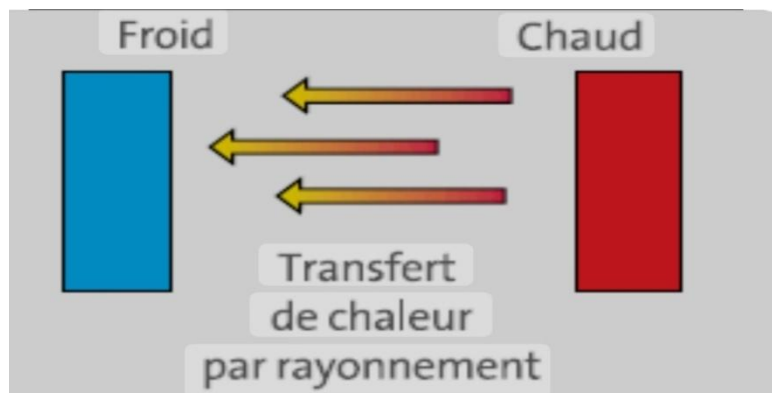


Figure II.9 : Le transfert de chaleur par rayonnement [22].

### II.5.1.3 Par convection

La convection thermique se produit lorsque la chaleur est transférée par le déplacement de matière, généralement dans les fluides comme les liquides ou les gaz. Il existe deux types de convection : la convection naturelle et la convection forcée.

-La convection naturelle : se produit en raison des différences de densité thermique dans un fluide, créant des courants de convection qui transfèrent la chaleur.

-La convection forcée : se produit lorsqu'un fluide est forcé de se déplacer par des moyens externes, tels que des ventilateurs ou des pompes, augmentant ainsi le taux de transfert de chaleur.

Ces trois modes de transfert thermique sont omniprésents dans de nombreuses applications technologiques et naturelles, jouant un rôle crucial dans le contrôle de la température des systèmes et des environnements.



Figure II.10 : Le transfert thermique par convection [22].

### II.5.2 Effet thermique sur les fibres optiques

L'effet thermique sur les fibres optiques se réfère aux changements de propriétés optiques et de performances des fibres en réponse aux variations de température environnante. Ces variations thermiques peuvent influencer plusieurs aspects, notamment :

a) Longueur d'onde critique de dispersion (CDL) :

Les changements de température peuvent modifier la CDL, affectant ainsi la propagation de la lumière à différentes longueurs d'onde à travers la fibre optique.

b) Perte par insertion :

Les fluctuations de température peuvent causer des variations dans la perte par insertion, ce qui peut impacter la performance globale du système optique.

c) Indice de réfraction :

La température peut modifier l'indice de réfraction du matériau constituant la fibre, ce qui influence la vitesse de propagation de la lumière à l'intérieur de la fibre.

d) Effet de cross-talk :

Les gradients thermiques le long de la fibre peuvent entraîner des perturbations dans la distribution de la chaleur, pouvant potentiellement générer des phénomènes de cross-talk entre les différents canaux optiques.

Pour atténuer les effets thermiques sur les fibres optiques, des techniques telles que la gestion thermique passive ou active peuvent être mises en œuvre, ainsi que l'utilisation de matériaux à faible coefficient de dilatation thermique pour la fabrication des fibres [5].

### **II.6 Sensibilité des propriétés thermo-physiques de GeO<sub>2</sub> et TeO<sub>2</sub> sur la température**

La sensibilité des propriétés thermo-physiques du dioxyde de germanium (GeO<sub>2</sub>) et du dioxyde de tellure (TeO<sub>2</sub>) à la température fait référence à la mesure dans laquelle ces propriétés, telles que la conductivité thermique, la capacité calorifique, changent en réponse aux variations de température. En d'autres termes, elle indique comment ces matériaux réagissent aux fluctuations de température et comment cela affecte leur comportement thermique et leurs performances dans différentes applications.

#### **II.6.1 Effet de la conductivité thermique**

Lorsque la conductivité thermique du GeO<sub>2</sub> et du TeO<sub>2</sub> est réduite, cela peut également avoir des conséquences significatives sur le transfert de chaleur dans les systèmes où ces matériaux sont utilisés. Par exemple, une diminution de la conductivité thermique de ces oxydes peut entraîner une accumulation de chaleur à des endroits spécifiques dans le système, ce qui peut provoquer une augmentation locale de la température. Cela peut avoir un impact sur les performances globales du système, en introduisant des écarts entre les résultats numériques et expérimentaux, en raison de l'augmentation inattendue de la température à certains points critiques.

En conséquence, une compréhension approfondie de la sensibilité de la conductivité thermique du GeO<sub>2</sub> et du TeO<sub>2</sub> est essentielle pour concevoir et optimiser les systèmes où ces matériaux sont impliqués.

#### **II.6.2 Influence de capacité calorifique**

Lorsque la capacité calorifique du GeO<sub>2</sub> et du TeO<sub>2</sub> est modifiée, cela peut également influencer le comportement thermique des systèmes où ces matériaux sont utilisés. Par exemple, une augmentation de la capacité calorifique peut conduire à une meilleure capacité du matériau à absorber et à stocker la chaleur, ce qui peut être avantageux dans les applications de stockage thermique ou de régulation de la température. Cependant, une capacité calorifique plus élevée peut également entraîner une réponse thermique plus lente du

matériau aux changements de température, ce qui peut affecter la réactivité thermique des dispositifs dans lesquels ils sont intégrés. En outre, une capacité calorifique plus élevée peut également influencer les profils de température à l'intérieur des dispositifs, ce qui peut avoir des répercussions sur leur efficacité et leur fiabilité à long terme. Ainsi, la capacité calorifique du dioxyde de germanium et de dioxyde de tellure est un paramètre important à prendre en compte dans la conception et l'optimisation des systèmes où ces matériaux sont impliqués.

### **II.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exploré en profondeur le modèle électro-thermo-optique de la fibre optique micro-structurée, mettant en lumière son importance cruciale dans le domaine des communications optiques et des capteurs optiques, ce modèle offre une approche holistique pour comprendre et concevoir des dispositifs optiques avancés. En exploitant les interactions complexes entre les champs électriques, thermiques et optiques à l'intérieur de la fibre optique micro-structurée, ce modèle ouvre la voie à de nouvelles perspectives passionnantes dans le domaine de l'optique intégrée et de la photonique.

## **Chapitre III**

### **Résultats et interprétation**

### III.1 Introduction

La compréhension de l'effet thermique et du confinement du champ électromagnétique dans les fibres optiques micro-structurées revêt une importance cruciale dans le développement de dispositifs optiques avancés. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulations réalisées à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysique, visant à explorer ses aspects dans les fibres optiques micro-structurées composées de trois matériaux différents : la silice ( $\text{SiO}_2$ ), le dioxyde de germanium ( $\text{GeO}_2$ ) et le dioxyde de tellure ( $\text{TeO}_2$ ).

L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'effet thermique induit par la dissipation d'énergie dans la fibre et d'examiner le confinement du champ électromagnétique associé à chacun de ces matériaux. Nous avons utilisé les outils de modélisation avancés de COMSOL pour simuler les comportements thermiques et électromagnétiques de ces fibres dans des conditions variées.

### III.2 Description du logiciel Comsol multiphysique

COMSOL multiphysique est un logiciel de modélisation et de simulation multiphysique avancée basé sur la méthode des éléments finis. Il permet aux ingénieurs, aux chercheurs et aux scientifiques de modéliser et de résoudre des problèmes complexes impliquant plusieurs phénomènes physiques simultanément, tels que la mécanique des fluides, la thermique, l'électromagnétisme et la chimie. Grâce à son interface conviviale, ses outils de modélisation flexibles et sa large gamme de modules d'application, ce logiciel permet aux utilisateurs de concevoir, simuler et optimiser une grande variété de systèmes et de dispositifs dans divers domaines, notamment l'électronique, l'ingénierie mécanique, la biologie et la chimie.

Ce logiciel est utilisé dans notre simulation en raison de sa capacité de modéliser de manière précise et efficace les interactions complexes entre la chaleur, la lumière et la structure de la fibre micro-structurée, il permet de coupler plusieurs phénomènes physiques simultanément, offrant ainsi une flexibilité pour définir la géométrie de la fibre, les propriétés des matériaux, les conditions aux limites et les paramètres de simulation pour obtenir des résultats précis.

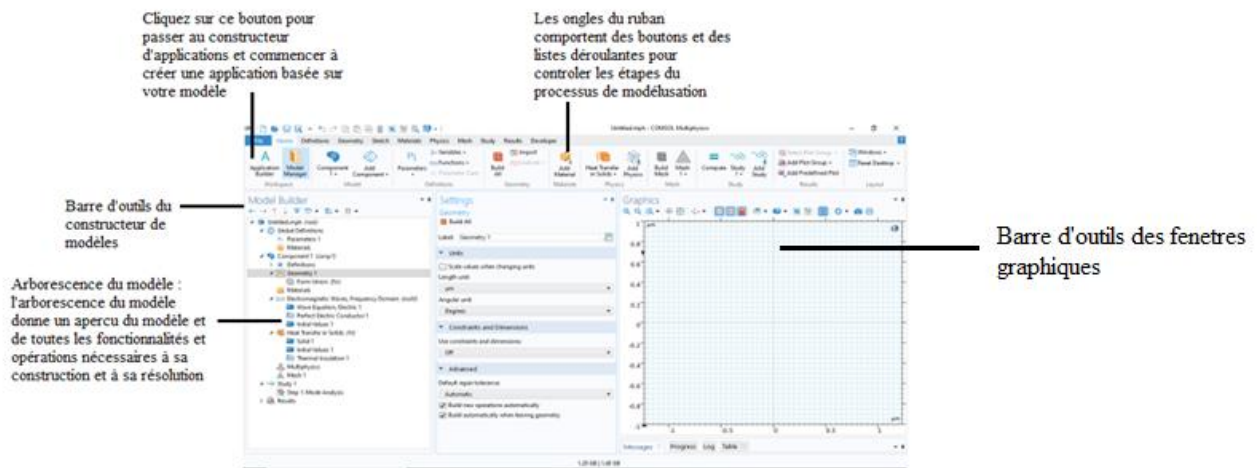


Figure III.1: Illustration de l'écran du logiciel Comsol Multiphysique.

### III.3 Résultats et interprétation

#### III.3.1 Fibre optique micro-structurée 6 couches de trous d'air à base de SiO<sub>2</sub>

Dans cette phase, notre objectif est de représenter de manière schématique les structures réelles des configurations proposées. Cela implique de définir les dimensions géométriques des différents éléments.

Les structures en question, telles qu'illustrées dans la figure III.2, consistent en des fibres composées de cristaux photoniques. Ces fibres présentent un agencement périodique de trous d'air gravés dans un matériau diélectrique tel que la silice, disposés selon une matrice carrée et circulaire.

Avec les paramètres technologiques suivants [26] :

- Le diamètre des trous d'air :  $d = 10 \mu\text{m}$ .
- Le pas (distance entre les trous d'air) :  $p = 7.7 \mu\text{m}$ .
- Un paramètre  $k$  (le rapport entre le diamètre des trous d'air et le pas) :  
 $k = 0.65$ .
- La longueur d'onde :  $L = 1.55 \mu\text{m}$ .

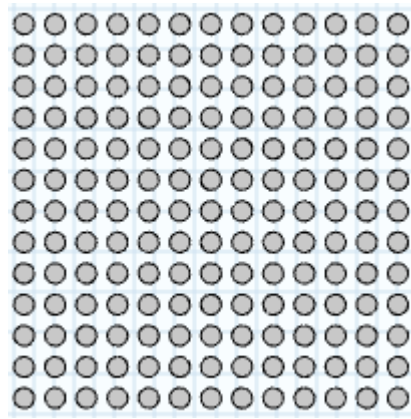


Figure III.2: Structure carrée.

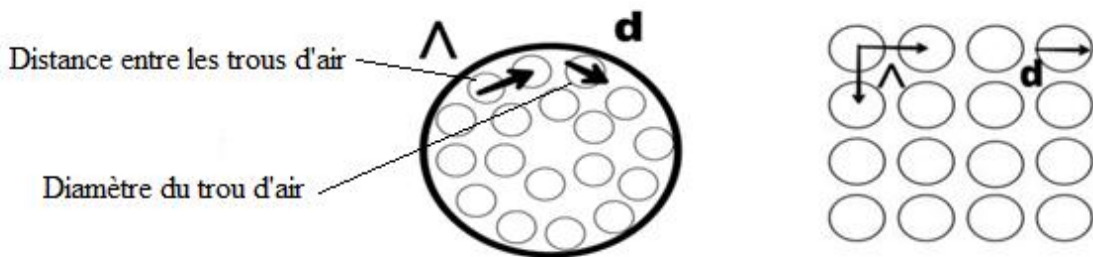


Figure III.3: Illustration des paramètres de la structure.

Les structures simulées se composent d'un agencement de trous d'air (avec un indice de 1), alignés parallèlement à l'axe d'une matrice de silice présentant un indice de réfraction de  $n=1.7$ .

### III.3.1.1 Structure carrée (1 cœur)

La résolution des équations d'ondes dans une structure donnée nécessite de définir spécifiquement les conditions aux limites. En effet, le comportement des champs électromagnétiques dans le milieu considéré est fortement influencé par les frontières de la structure utilisée. Les conditions aux limites couramment employées sont les PMLs (Perfectly Matched Layer) de Bérenger, comme illustré dans la figure III.4 suivantes.

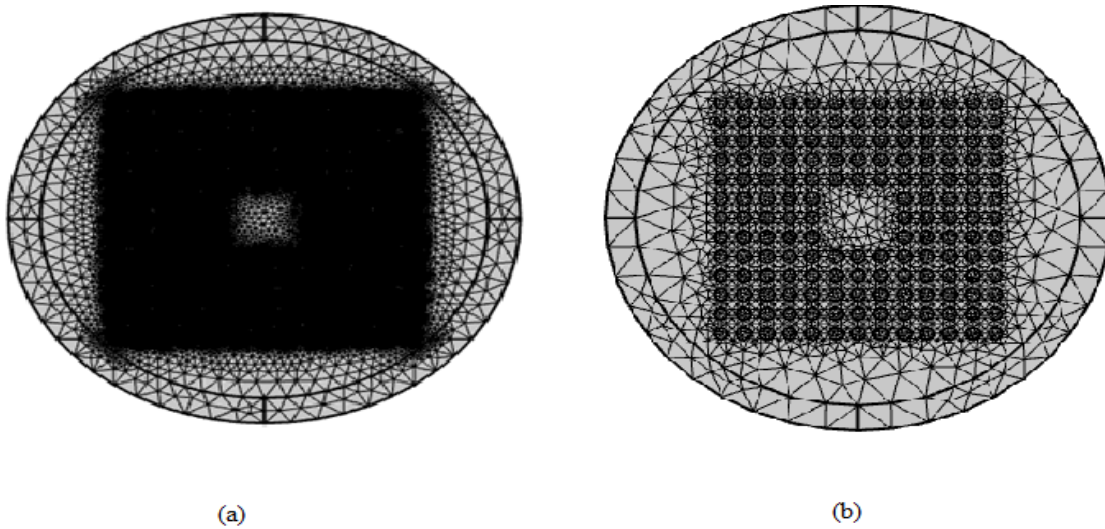


Figure III.4: (a) Maillage fin avec un seul coeur.

(b) Maillage extra gros avec un seul coeur.

Le but du maillage dans la simulation par éléments finis, comme dans le l’outil de simulation Comsol, est de diviser la géométrie en éléments plus petits afin de résoudre les équations physiques sur chaque élément de manière précise. Cela permet d’obtenir une solution numérique approximative qui converge vers la solution exacte lorsque la densité du maillage augmente.

La figure III.4 montre deux types de maillage, (a) un maillage fin qui consiste en des éléments très petits, permettant une haute précision en capturant les détails fins de la géométrie et des variations de champ mais il nécessite plus de temps de calcul et de mémoire. A l’inverse (b) un maillage extra gros se compose d’éléments beaucoup plus grands, offrant une solution plus rapide et moins gourmande en mémoire, mais avec une précision réduite car il ne capture pas les détails bien. Le choix entre les deux dépend donc du compromis entre précision et ressources disponibles pour la simulation.

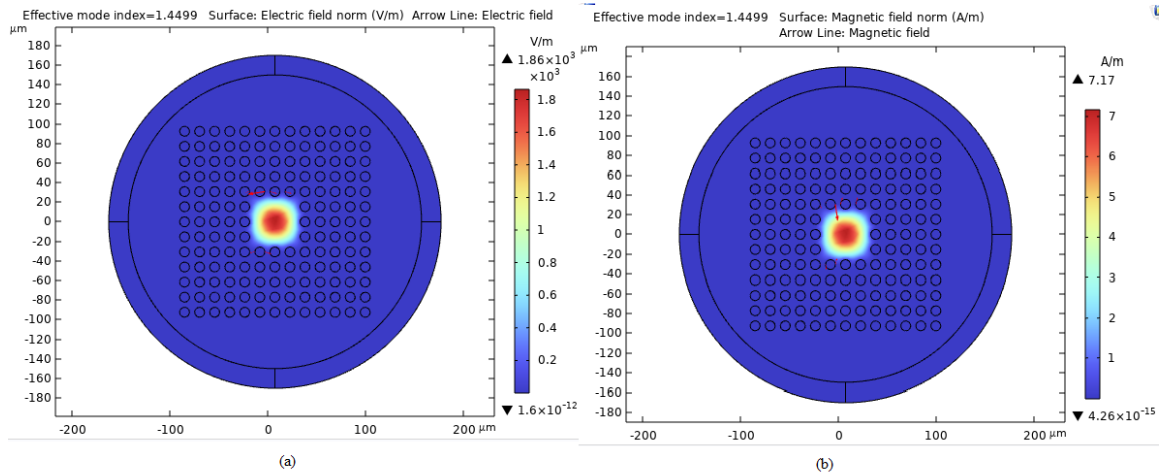


Figure III.5 : Distribution des champs dans la FOM sur SiO2 avec : (a) champ électrique et (b) magnétique.

Les cartographies du champ sont obtenues en utilisant l'analyse modale, il est utilisé pour déterminer les modes propres d'oscillation ou de propagation d'une structure donnée. Le but principal de cette analyse est de comprendre le comportement vibratoire ou électromagnétique d'un système dans ses modes fondamentaux, ce qui est essentiel pour concevoir des structures robustes et performantes dans une variété d'applications.

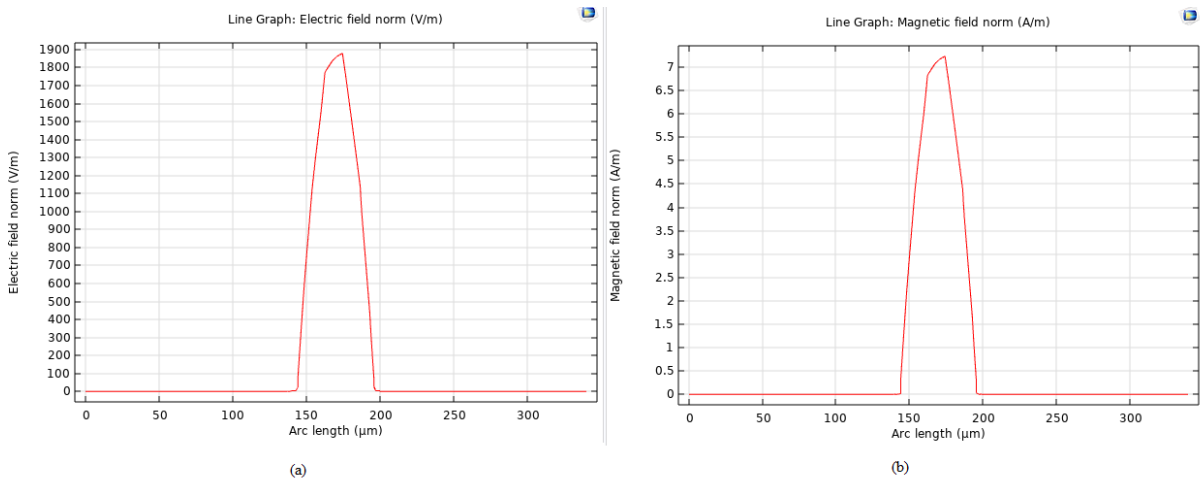


Figure III.6 : Variation des champs tout au long de la FOM sur SiO2: (a) électrique et (b) magnétique.

La figure III.6 illustre la variation du champ électrique et magnétique tout au long de la FOM, pour examiner et donner une vision claire de comment ces champs varient le long d'un chemin spécifique dans un modèle.

Le champ électrique et magnétique sont maximales dans le cœur et quasiment nul dans la gaine en raison du principe de réflexion totale interne et des propriétés des modes guidés. La différence d'indice de réfraction entre le cœur et la gaine assure que les champs restent confinés dans le cœur et décroissent exponentiellement dans la gaine, rendant les champs dans cette région négligeables.

#### III.3.1.2 Structure carrée double cœurs

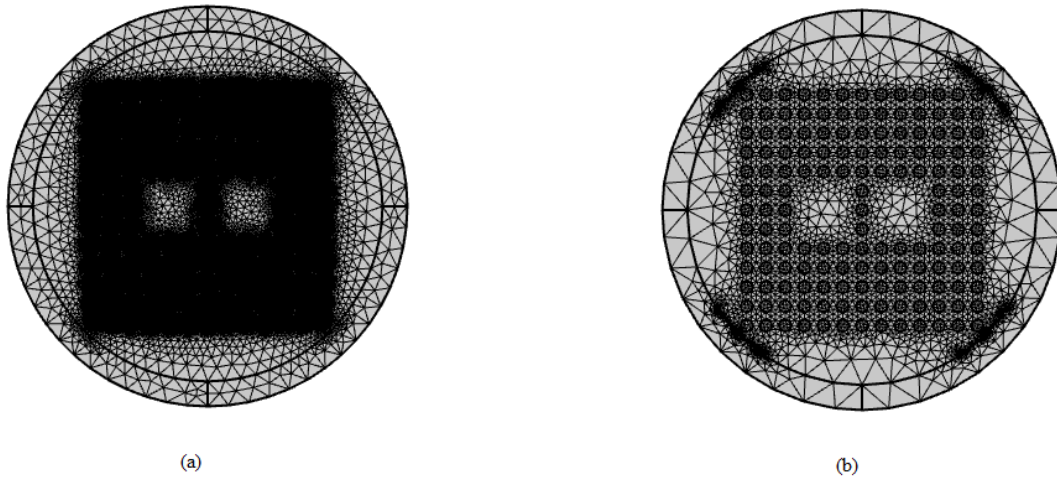


Figure III.7: (a) maillage fin de la FOM double cœurs.

(b) maillage extra gros de la FOM double cœurs.

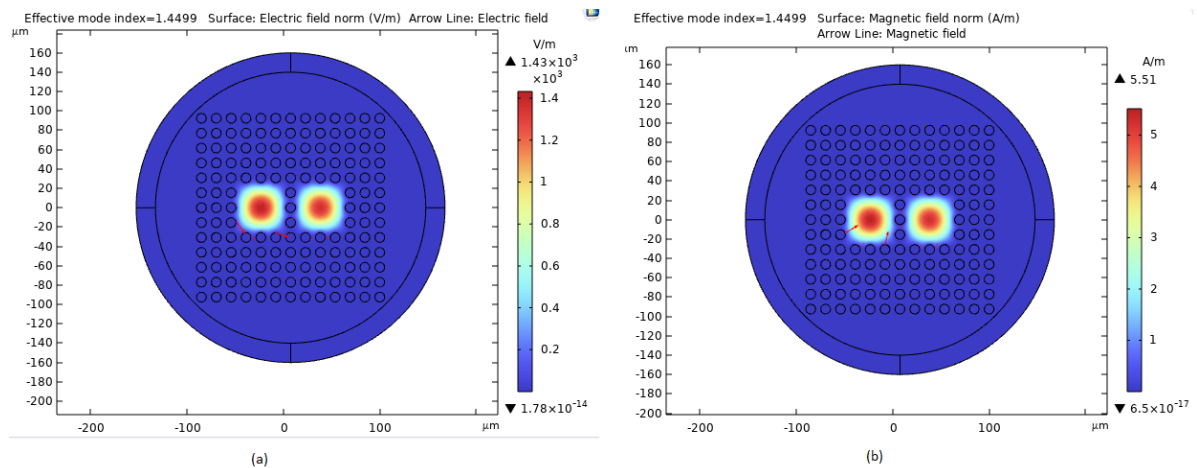


Figure III.8: Distribution du champ électrique et magnétique de la FOM sur SiO<sub>2</sub> avec double cœurs.

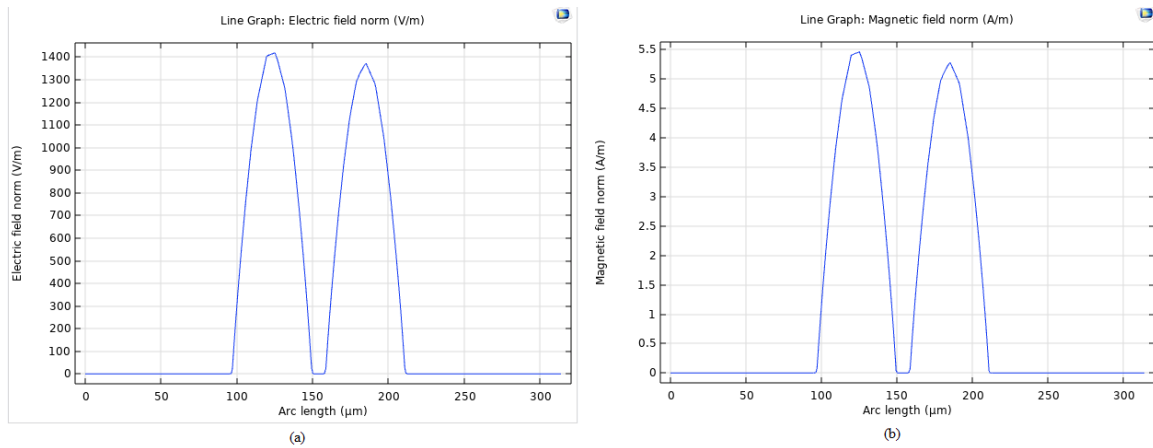


Figure III.9 : Variation du champ dans la FOM double cœur sur SiO<sub>2</sub> :

(a) électrique et (b) magnétique.

Lors de l'utilisation d'une seule unité de calcul (un seul cœur) pour simuler une structure, le maillage peut être moins dense, ce qui peut entraîner une résolution moins précise du champ. En revanche, en utilisant plusieurs cœurs (double cœurs), la charge de calcul est répartie, permettant ainsi une densité de maillage plus élevée et une meilleure résolution du champ, même si les valeurs du champ peuvent être diminuées un peu. Cela est souvent dû à des techniques de parallélisation utilisées pour répartir la charge de calcul.

### III.3.2 Fibre optique micro-structurée 6 couches à base de GeO<sub>2</sub>

#### III.3.2.1 Structure carrée 1 cœur

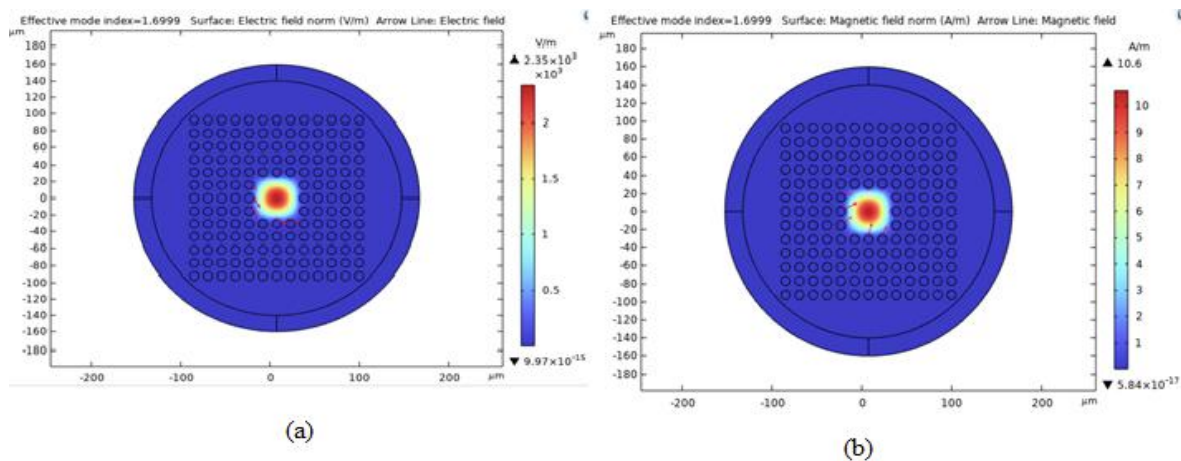


Figure III.10 : Distribution des champs dans la FOM sur GeO<sub>2</sub> :

(a) champ électrique et (b) magnétique.

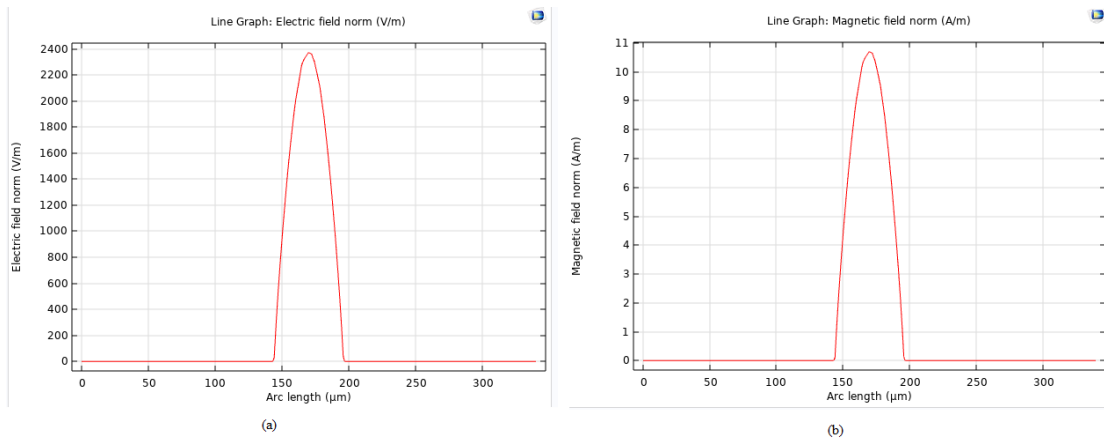


Figure III.11 : Variation du champ dans la FOM sur GeO<sub>2</sub> :  
 (a) champ électrique, (b) champ magnétique

### III.3.2.2 Structure de la FOM double cœurs sur GeO<sub>2</sub>

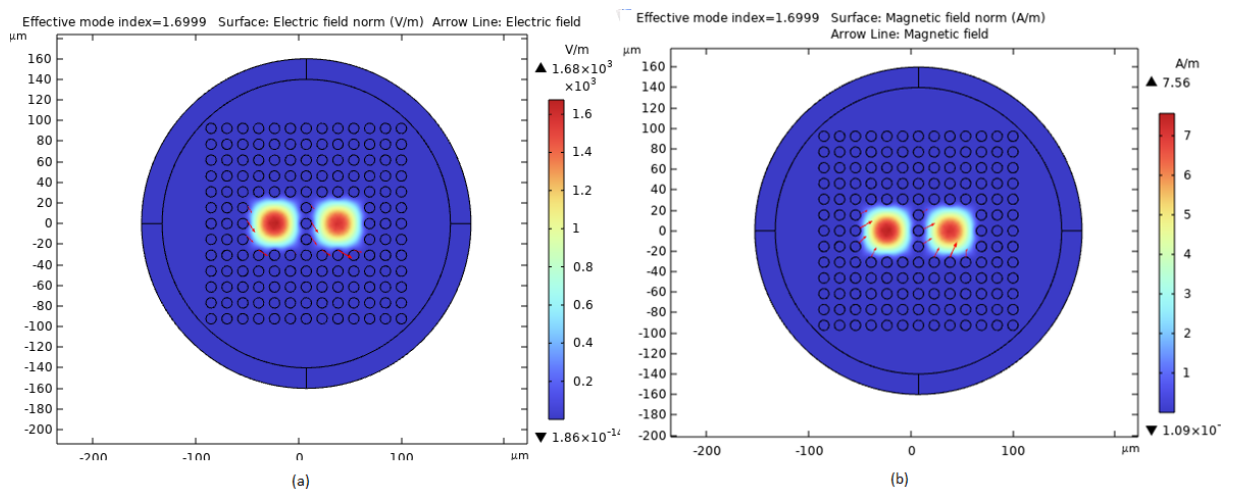


Figure III.12: Distribution du champ électrique et magnétique dans la FOM double cœurs sur GeO<sub>2</sub>.

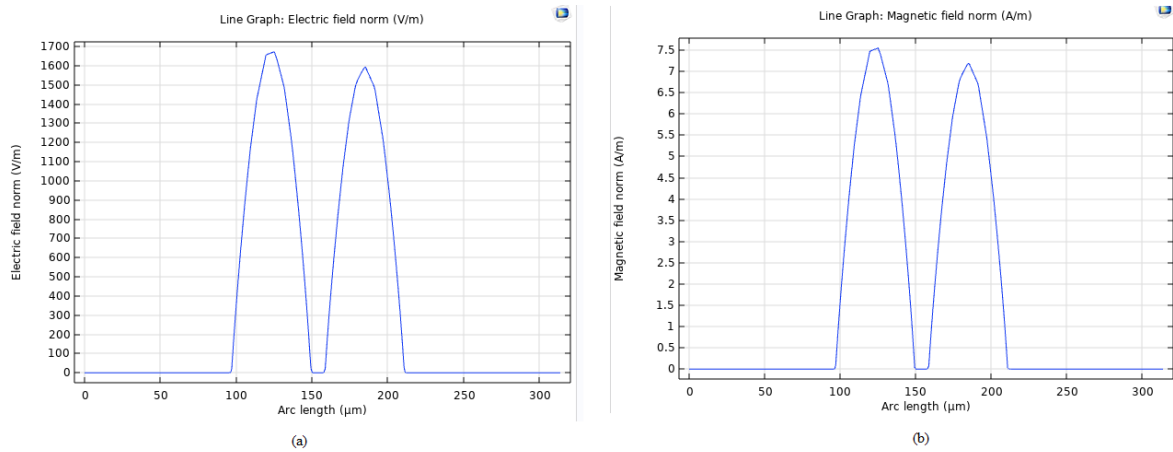


Figure III.13 : Variation du champ (a) électrique et (b) magnétique en fonction du diamètre de la fibre optique.

### III.3.3 Fibre optique micro-structurée 6 couches à base de TeO<sub>2</sub>

#### III.3.3.1 Structure carrée 1 cœur

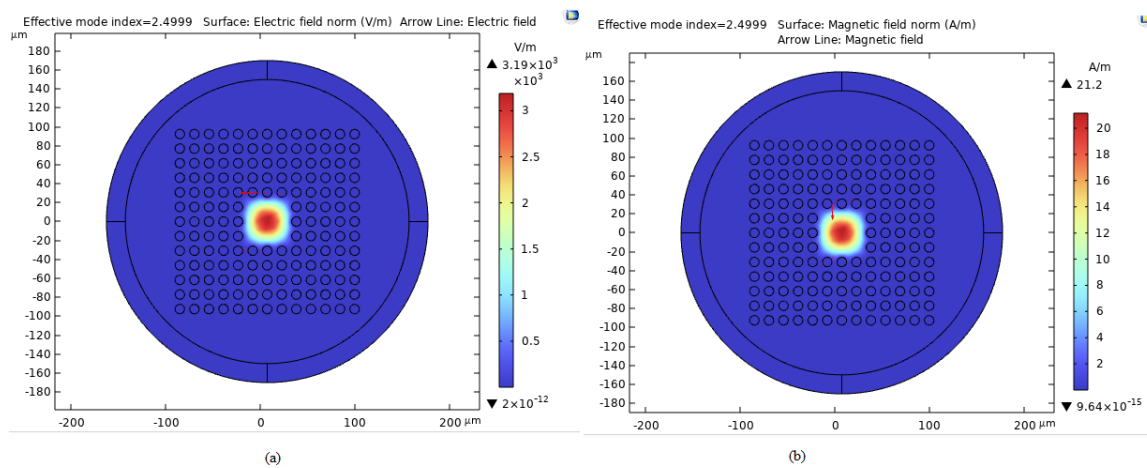


Figure III.14 : Distribution des champs dans la FOM sur TeO<sub>2</sub>

(a) champ électrique et (b) champ magnétique.

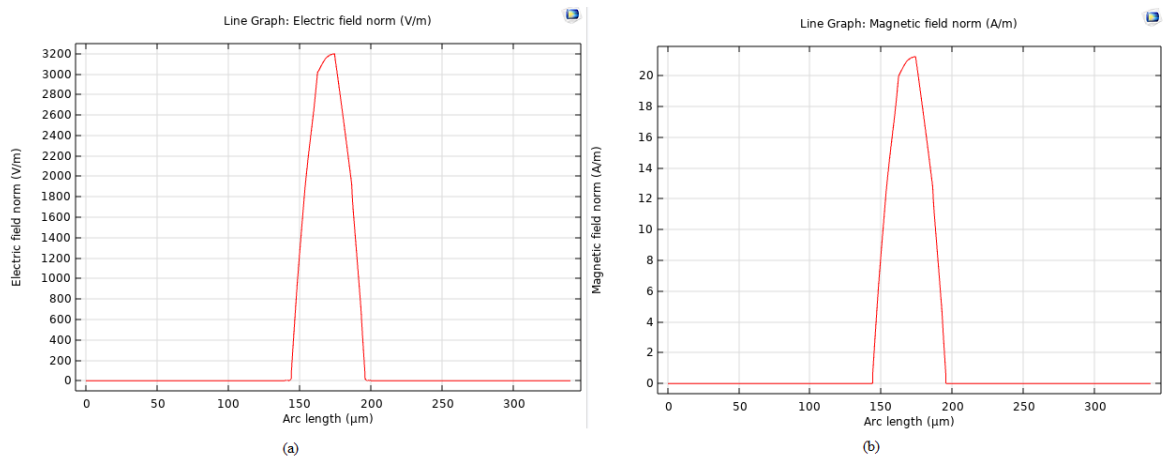


Figure III.15 : Variation du champ dans la FOM sur TeO2

(a) champ électrique, (b) champ magnétique.

### III.3.3.2 Structure carrée de la FOM double cœurs sur TeO2

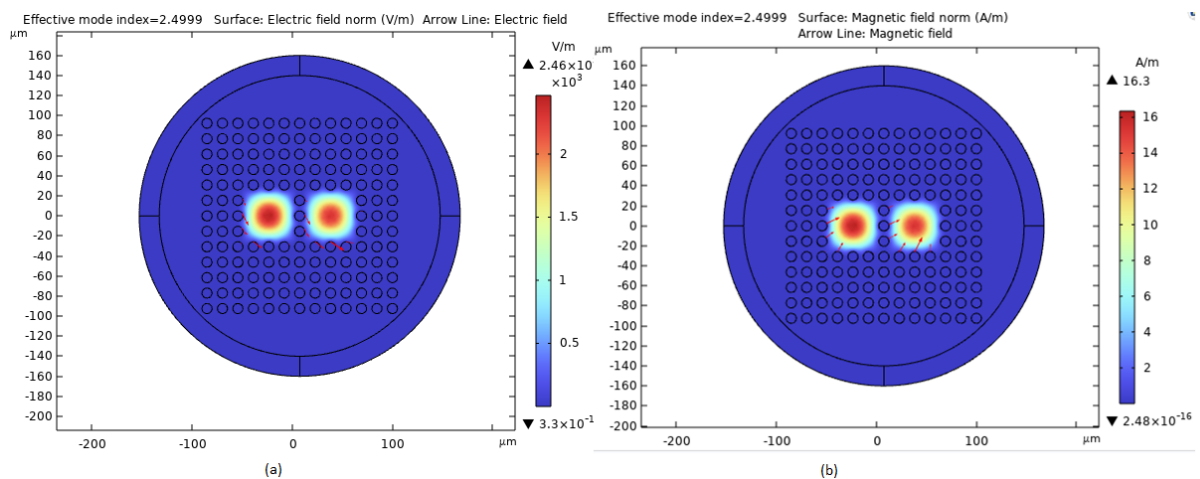


Figure III.16: Distribution du champ électrique et magnétique dans la FOM double cœurs à base de TeO2.

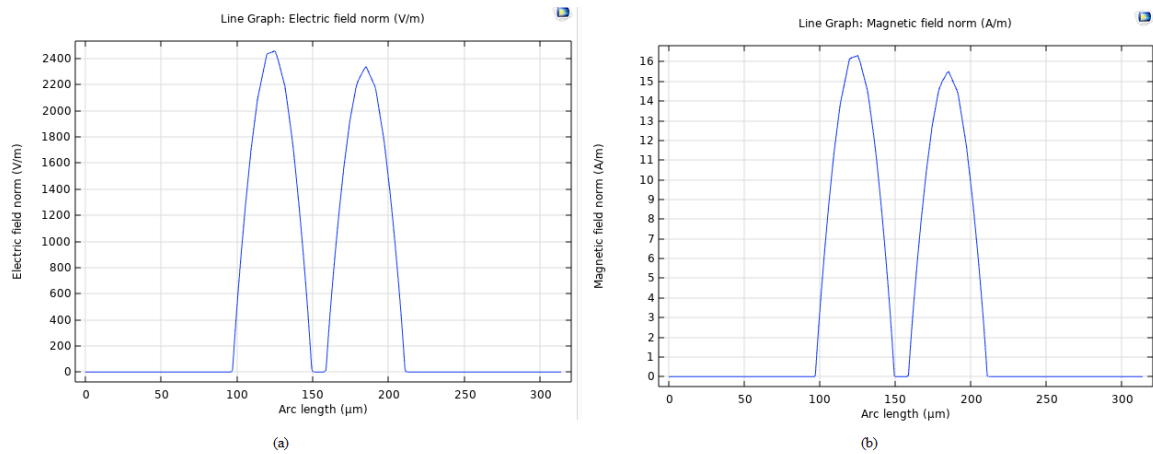


Figure III.17 : Variation du champ dans la FOM double cœur à base de TeO2 :

(a) électrique et (b) magnétique en fonction du diamètre de la fibre optique.

La différence majeure dans le confinement des champs électriques et magnétiques entre ces matériaux réside dans leurs propriétés optiques et diélectriques, telles que l'indice de réfraction (la silice a un indice de réfraction relativement bas ( $n=1.45$ ) par rapport au GeO2 ( $n=1.7$ ) et au TeO2 ( $n=2.5$ ), ce qui peut conduire à un confinement du champ moins efficace que lorsqu'on utilise le TeO2 et le GeO2.

Pour obtenir un confinement plus fort du champ électromagnétique, il est généralement préférable d'utiliser des matériaux avec un indice de réfraction plus élevé. Car ces matériaux ont la capacité de ralentir la propagation de la lumière et de confiner efficacement les photons et les ondes électromagnétiques à l'intérieur de la structure, ce qui entrainer un confinement plus important du champ.

### III.3.4 Effet de rayon des trous d'air et du pas $\Delta$

Le changement du rayon des trous d'air dans une structure peut avoir un impact significatif sur le comportement électromagnétique de la structure.

Nous avons modifié le rayon des trous d'air de  $5 \mu\text{m}$  à  $6 \mu\text{m}$  pour étudier l'impact sur les propriétés électromagnétique de la structure, la longueur d'onde est fixée à  $1.55 \mu\text{m}$ .

L'augmentation du rayon des trous d'air dans une simulation COMSOL affecte à la fois le pas automatique du maillage et les valeurs de confinement du champ électromagnétique (figure III-18 a III.23). Pour garantir un confinement efficace du champ, il est recommandé de réduire la distance entre les trous en augmentant le rayon des trous. Ce processus permet de maintenir

une résolution de maillage suffisante tout en maximisant le confinement du champ électromagnétique.

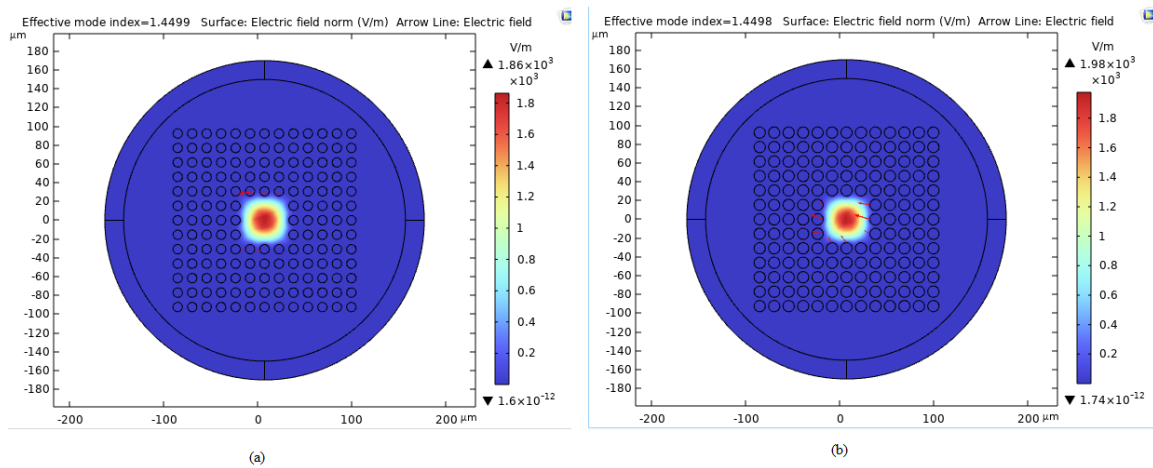


Figure III.18 : Effet du rayon des trous d'air sur le champ électrique dans la FOM sur SiO<sub>2</sub> avec :a)  $r=5 \mu\text{m}$ , b)  $r=6 \mu\text{m}$ .

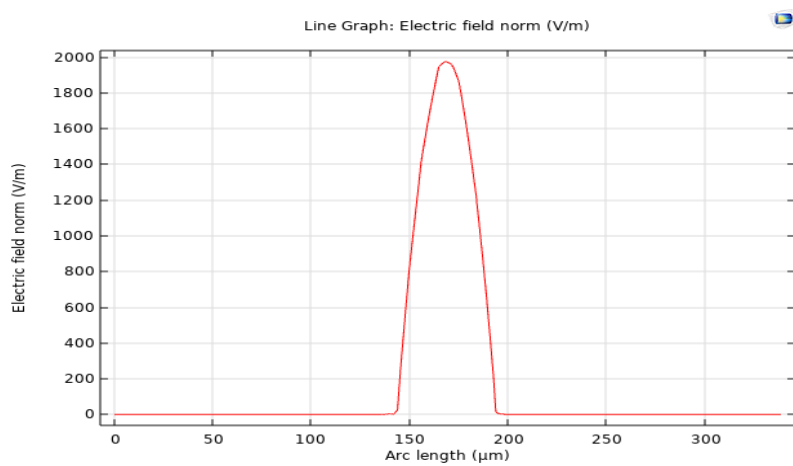


Figure III.19 : Variation du champ électrique le long de la FOM sur SiO<sub>2</sub> pour  $r=6 \mu\text{m}$ .

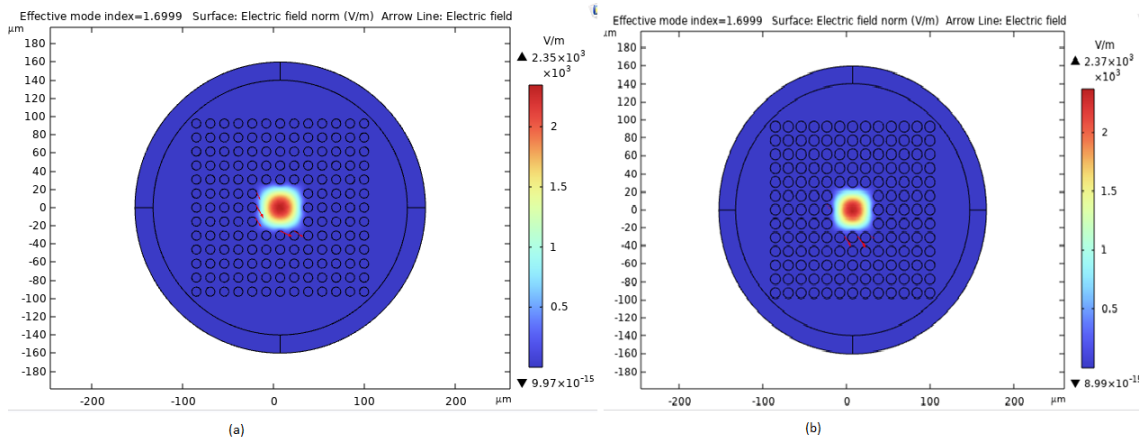


Figure III.20 : Effet du rayon des trous d'air sur le champ électrique dans la FOM sur GeO2 avec :a)  $r = 5 \mu\text{m}$ , b)  $r=6 \mu\text{m}$ .

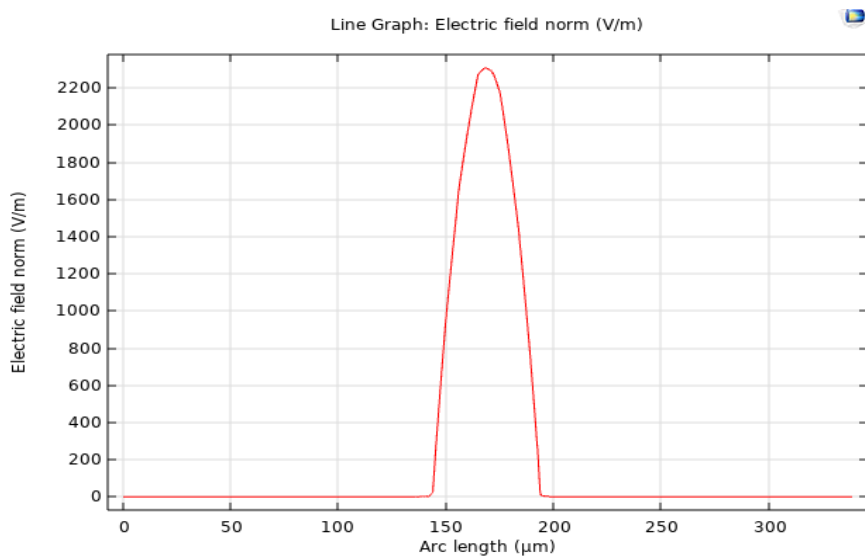


Figure III.21 : Variation du champ électrique le long de la FOM sur GeO2 pour  $r=6 \mu\text{m}$ .

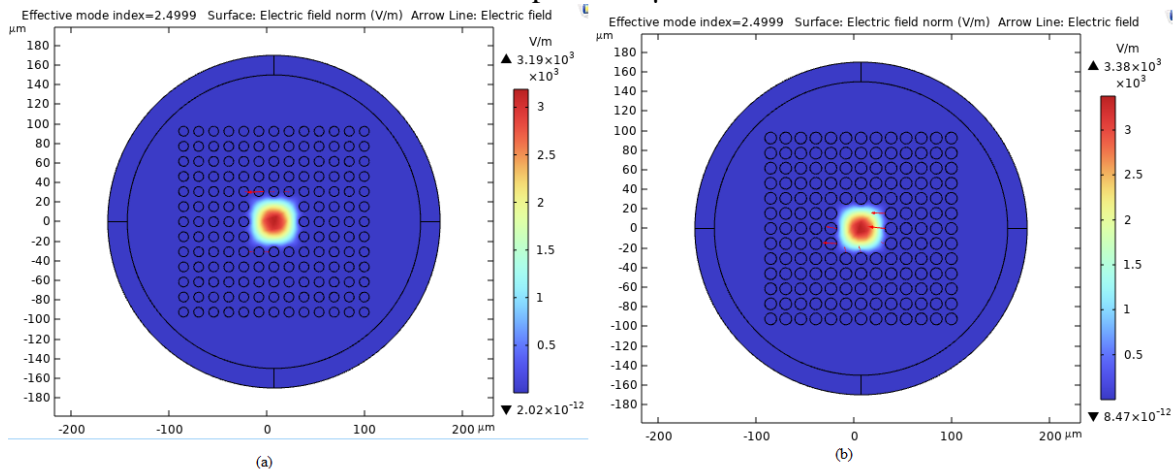


Figure III.22 : Effet du rayon des trous d'air sur le champ électrique dans la FOM sur TeO2 avec :a)  $r = 5 \mu\text{m}$ , b)  $r=6 \mu\text{m}$ .

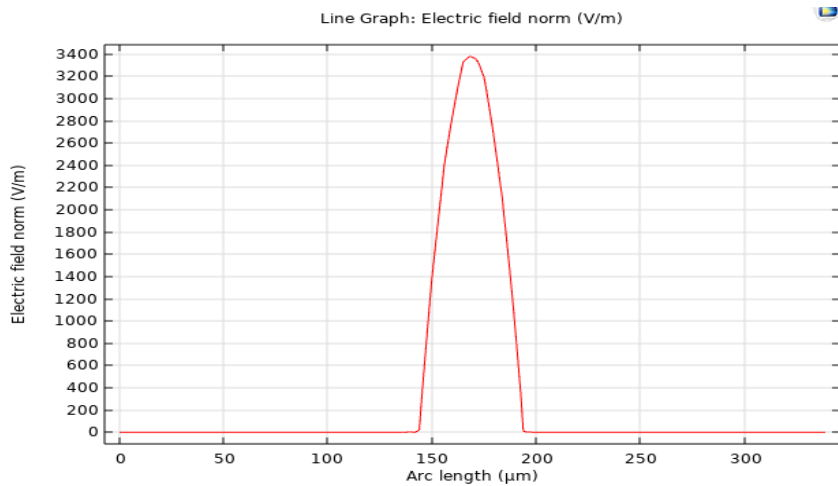


Figure III.23 : Variation du champ électrique le long de la FOM sur TeO<sub>2</sub> pour  $r=6 \mu\text{m}$ .

### III.3.5 Effet de la longueur d'onde

Les figures III.24, III.25, III.26, III.27, III.28 et III.29 montrent l'effet de la longueur d'onde d'émission sur le champ électrique des fibres optiques micro-structurées à base de SiO<sub>2</sub>, TeO<sub>2</sub> et GeO<sub>2</sub>. Le rayon des trous d'air est fixé à  $5 \mu\text{m}$ , nous avons le confinement du champ à différentes longueurs d'onde, en examinant les caractéristiques spécifiques des trois fenêtres optiques ( $\lambda=0.8 \mu\text{m}$ ,  $\lambda=1.33 \mu\text{m}$  et  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ ).

La différence dans le confinement du champ électrique entre ces longueurs d'onde peut être attribuée aux propriétés optiques spécifiques des matériaux utilisés dans la simulation, et aussi à la taille relative de la structure par rapport à la longueur d'onde.

Le confinement du champ électrique diminue avec l'augmentation de la longueur d'onde de  $1.33 \mu\text{m}$  à  $2 \mu\text{m}$ . Cela est dû au fait que, à des longueurs d'onde plus longues, les modes guidés s'étendent davantage dans la gaine, réduisant l'intensité du champ dans le cœur. Ce comportement est attendu car à des longueurs d'onde plus longues les champs électriques sont moins confinés.

Lorsque la longueur d'onde diminue, la différence d'indice de réfraction entre les matériaux de la fibre et le milieu extérieur devient plus grande. Cela augmente l'effet de confinement du champ électromagnétique à l'intérieur de la fibre, car les modes de propagation sont davantage piégés et guidés à travers la structure. En d'autres termes, les modes

### Chapitre III : Résultats et interprétation

électromagnétiques sont plus fortement confinés dans la fibre lorsque la longueur d'onde diminue en raison de la plus grande différence d'indice de réfraction.

La 3-ème fenêtre optique autour de 1.55  $\mu\text{m}$  est particulièrement utilisée pour les télécommunications en raison de la faible atténuation et des propriétés de dispersion favorables, ce qui explique pourquoi les fibres optiques micro-structurées sont optimisées pour cette plage de longueurs d'onde.

Cette interprétation met en lumière l'importance de prendre en compte la relation entre la taille de la structure et la longueur d'onde lors de l'analyse du confinement du champ électromagnétique.

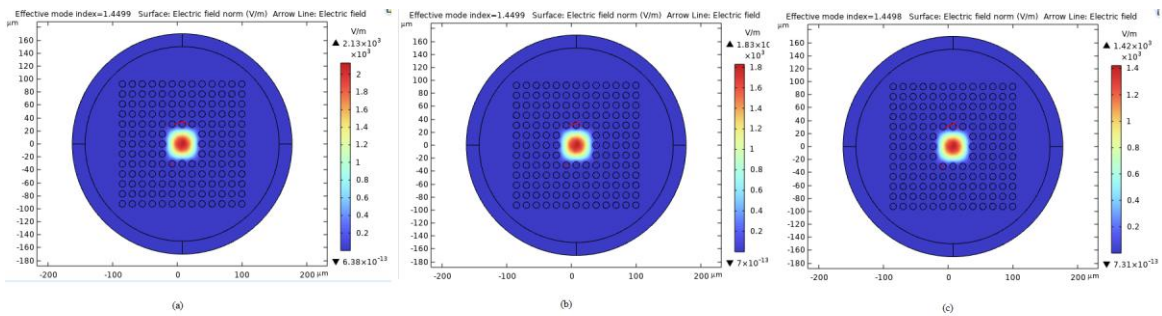


Figure III.24 : Effet de la longueur d'onde sur le champ électrique dans la FOM sur SiO<sub>2</sub> avec : a) avec  $\lambda = 1.33 \mu\text{m}$ , b)  $1.55 \mu\text{m}$ , c)  $2 \mu\text{m}$

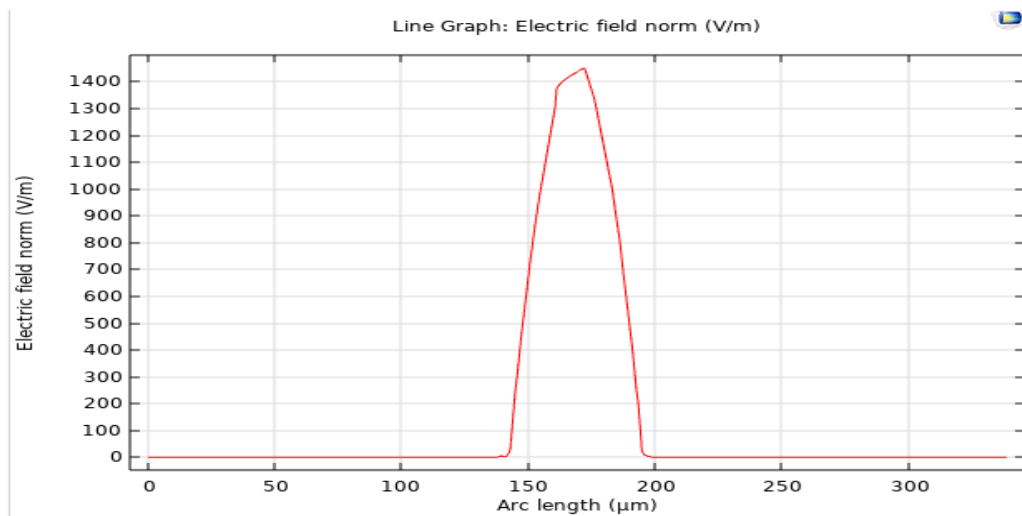


Figure III.25 : Variation du champ électrique le long de la FOM sur SiO<sub>2</sub> pour  $\lambda = 2 \mu\text{m}$ .

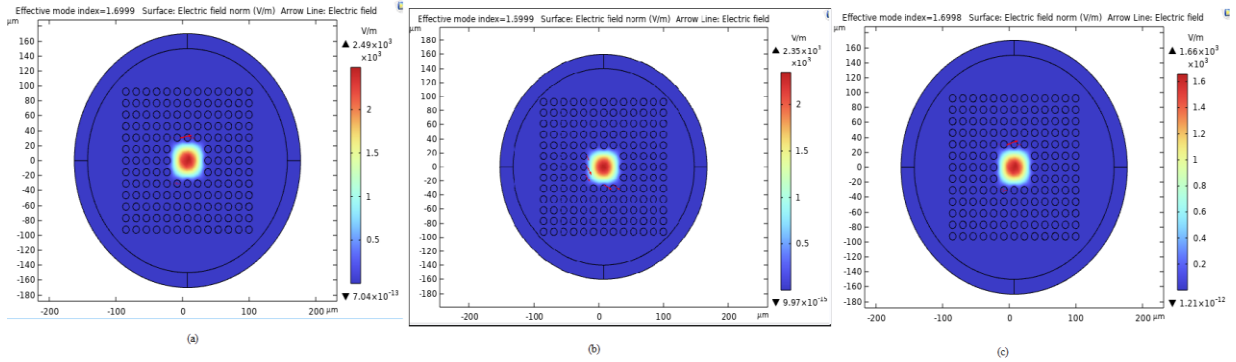


Figure III.26 :Effet de la longueur d’onde sur le champ électrique dans la FOM sur GeO2 avec :a) avec  $\lambda= 1.33\mu\text{m}$ , b)  $1.55\mu\text{m}$ , c)  $2 \mu\text{m}$

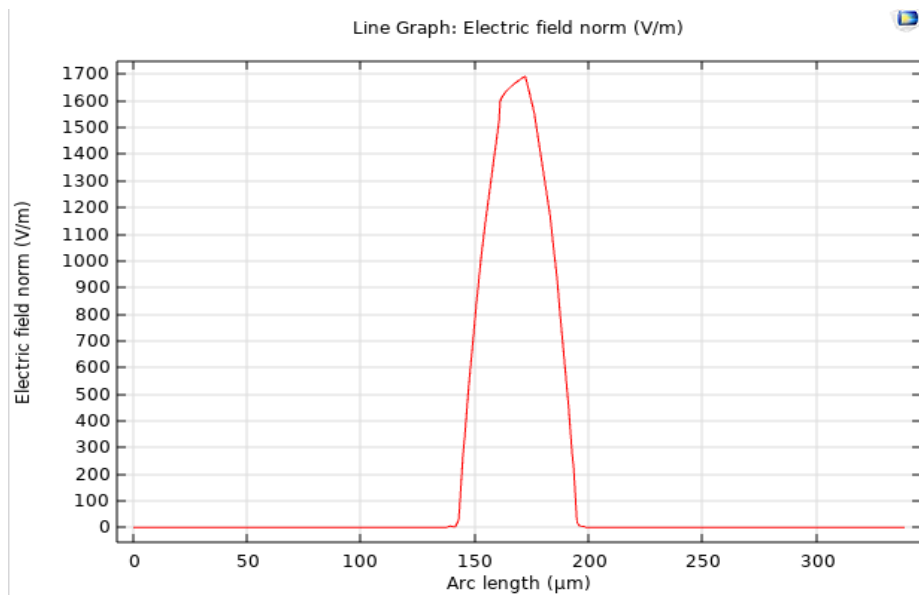


Figure III.27 : Variation du champ électrique le long le long de la FOM sur GeO2 pour  $\lambda = 2 \mu\text{m}$ .

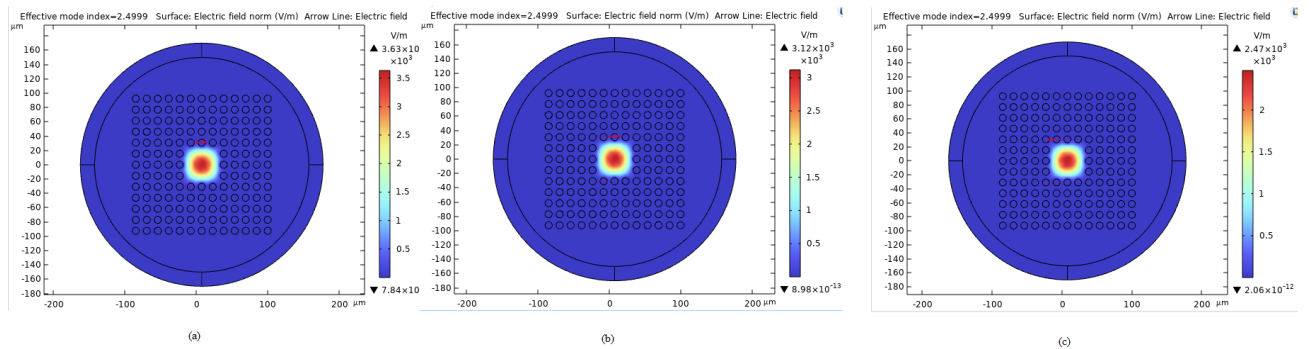


Figure III.28: Effet de la longueur d’onde sur le champ électrique dans la FOM sur TeO2 avec :a) avec  $\lambda= 1.33\mu\text{m}$ , b)  $1.55\mu\text{m}$ , c)  $2 \mu\text{m}$

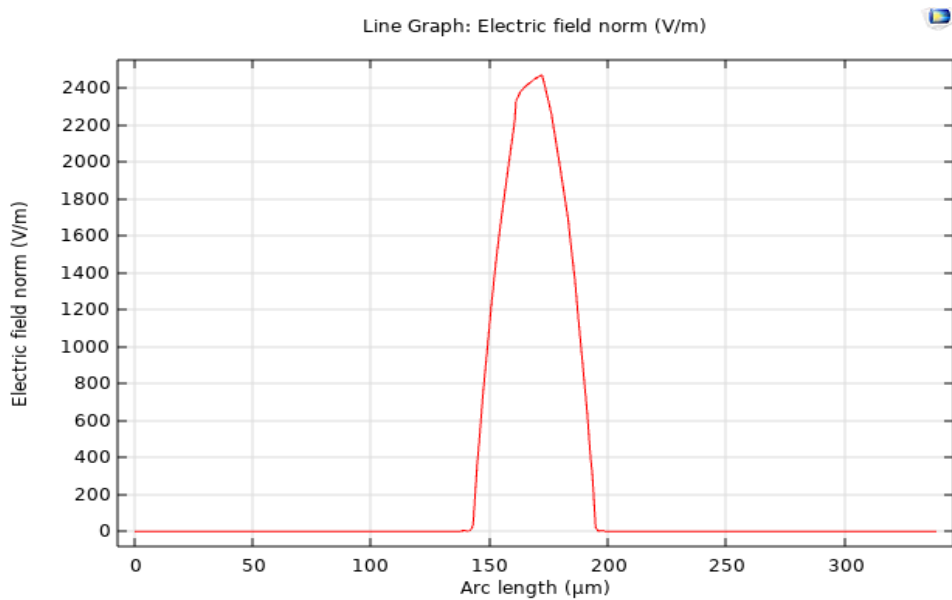


Figure III.29 : Variation du champ électrique le long le long de la FOM sur TeO2 pour  $\lambda = 2 \mu\text{m}$ .

### III.3.6 Fibre optique micro-structurée 5 couches (structure circulaire)

Nous avons conçu une structure circulaire à 5 couches, en utilisant 3 matériaux distincts : SiO<sub>2</sub>, TeO<sub>2</sub> et GeO<sub>2</sub>. L'objectif était de visualiser le comportement des champs électriques et magnétiques à deux longueurs d'onde spécifiques 1.55 et 2 micromètres. Chaque matériau a été sélectionné en raison de ses propriétés optiques uniques, influençant ainsi la propagation des ondes à ces longueurs d'ondes.

Avec :

- Le rayon des trous d'air :  $r = 4 \mu\text{m}$ .
- Le pas (distance entre les trous d'air) :  $p = 7.7 \mu\text{m}$ .
- Un paramètre  $k$  (le rapport entre le rayon des trous d'air et le pas) :  $k = 0.65$ .

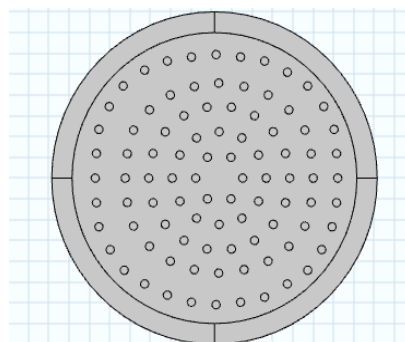


Figure III.30 : Structure circulaire de la FOM.

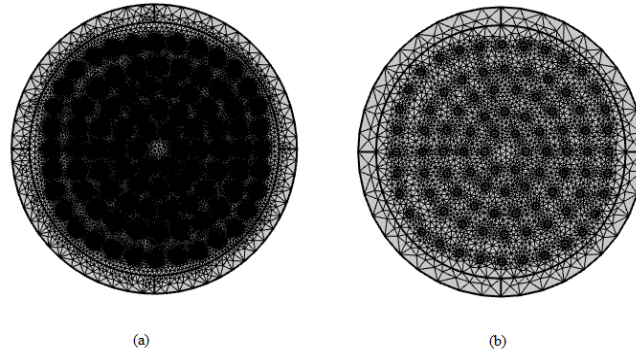


Figure III.31 : Maillage de la structure avec (a) maillage fin et (b) extra gros.

Les figures III.32 à III.40 illustrent l'impact de la longueur d'onde ( $\lambda = 1.55\mu\text{m}$  et  $2\mu\text{m}$ ) sur le comportement du champ électrique et magnétique dans la FOM de forme circulaire à base de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{GeO}_2$  et  $\text{TeO}_2$ .

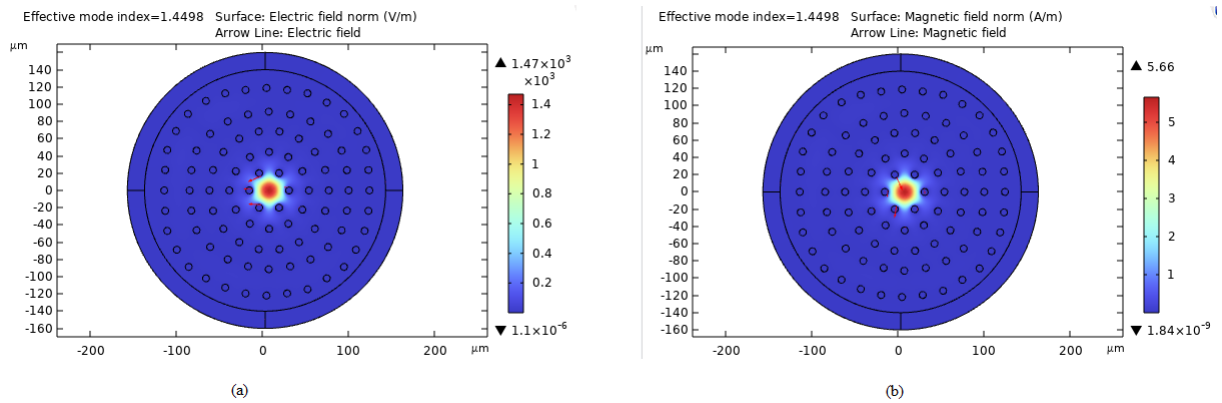


Figure III.32 : Distribution des champs dans la FOM circulaire sur  $\text{SiO}_2$  pour  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ , (a) champ électrique, (b) champ magnétique

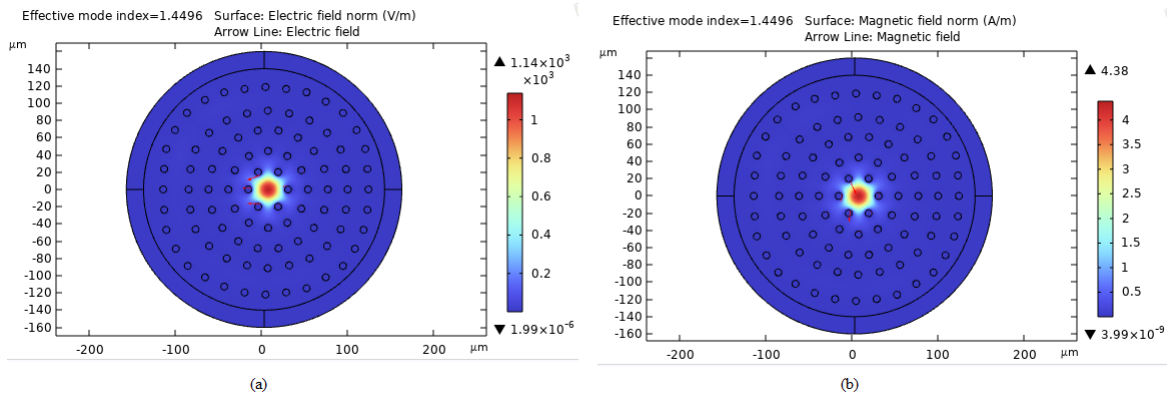


Figure III.33 : Distribution des champs dans la FOM circulaire sur  $\text{SiO}_2$  pour  $\lambda = 2 \mu\text{m}$ , (a) champ électrique, (b) champ magnétique

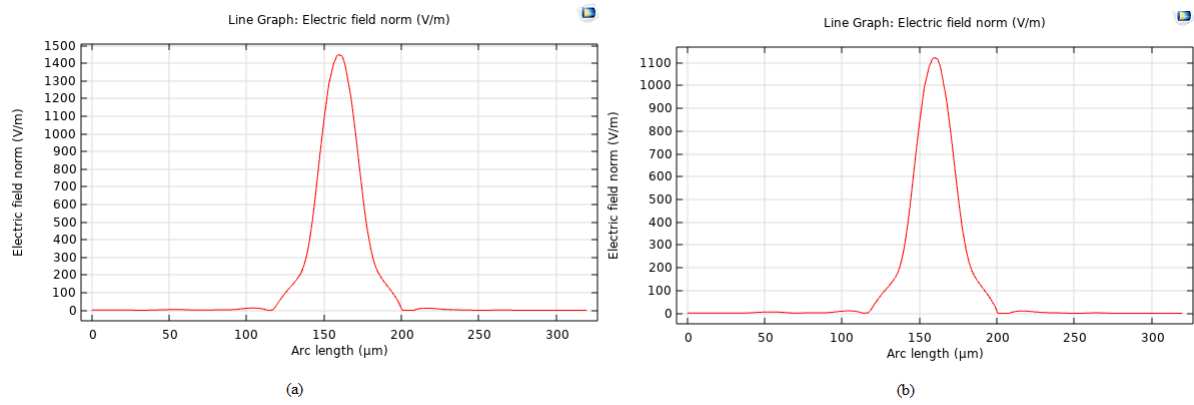


Figure III.34 : Variation du champ électrique le long de la FOM circulaire sur SiO<sub>2</sub> avec (a)  $\lambda=1.55\mu\text{m}$  et (b)  $\lambda=2\mu\text{m}$ .

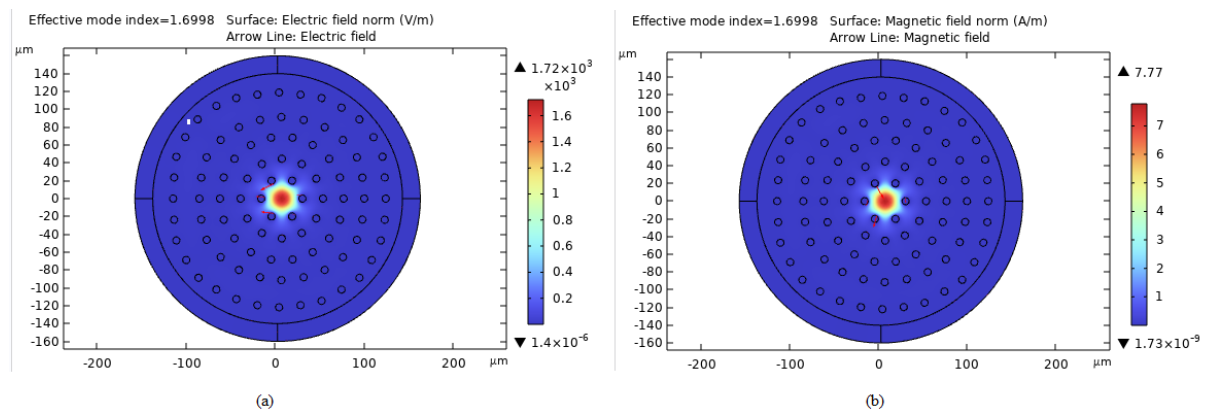


Figure III.35 : Distribution des champs dans la FOM circulaire sur GeO<sub>2</sub> pour  $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ , (a) champ électrique, (b) champ magnétique

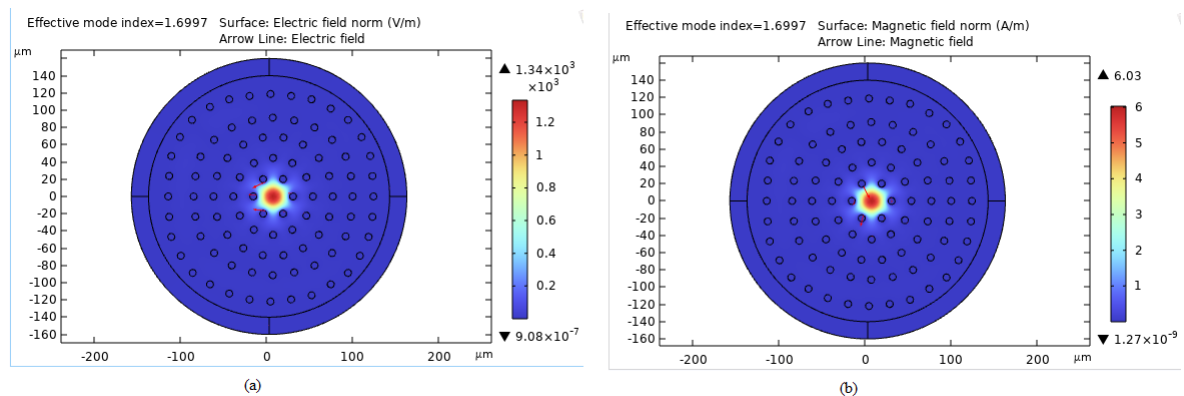


Figure III.36 : Distribution des champs dans la FOM circulaire sur GeO<sub>2</sub> pour  $\lambda = 2\mu\text{m}$ , (a) champ électrique, (b) champ magnétique

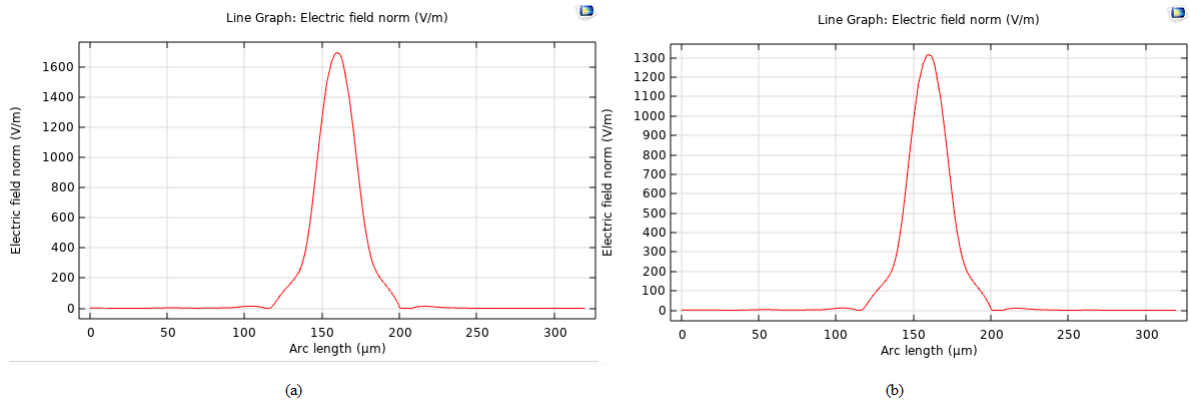


Figure III.37 : Variation du champ électrique le long de la FOM circulaire sur GeO<sub>2</sub> avec (a)  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  et (b)  $\lambda = 2 \mu\text{m}$ .

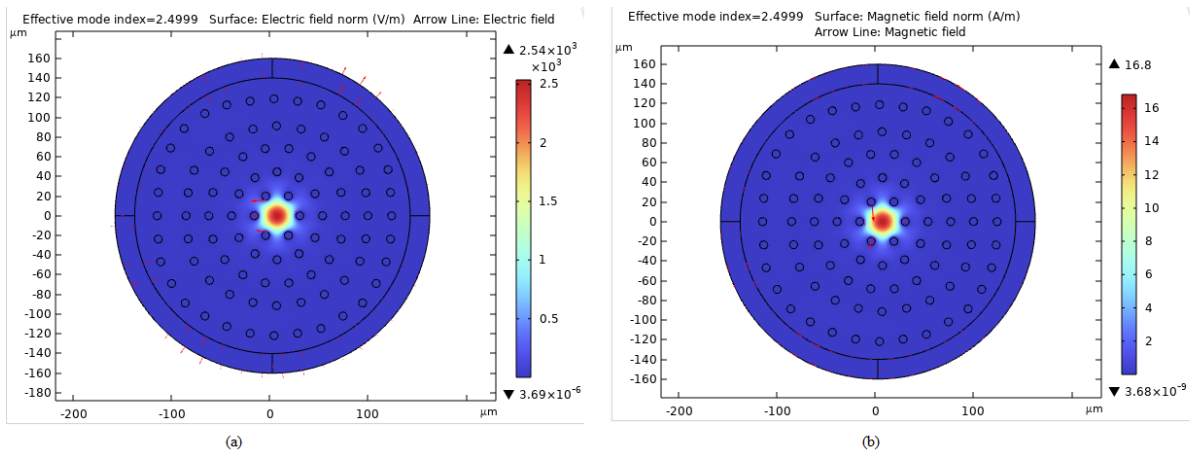


Figure III.38 : Distribution des champs dans la FOM circulaire sur TeO<sub>2</sub> pour  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ , (a) champ électrique, (b) champ magnétique

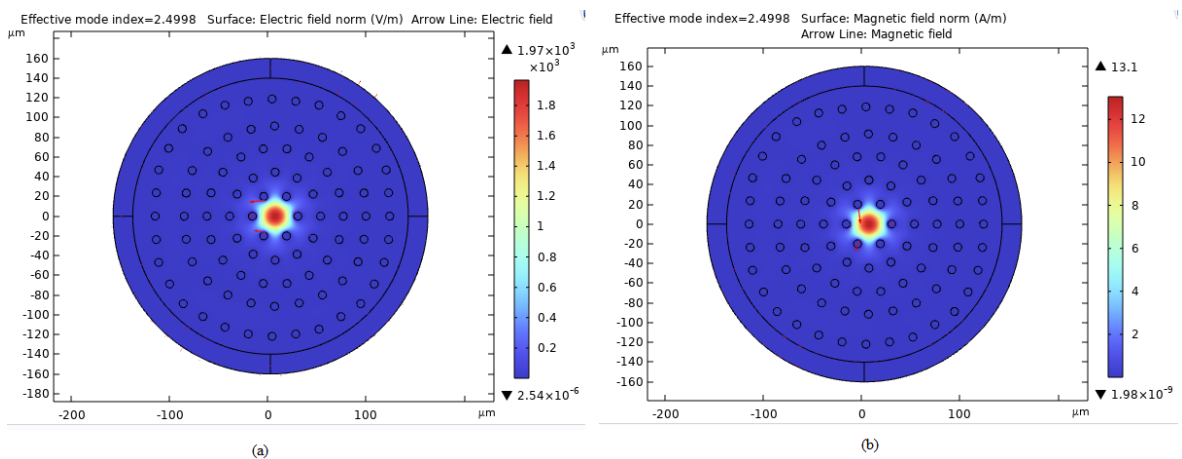


Figure III.39 : Distribution des champs dans la FOM circulaire sur TeO<sub>2</sub> pour  $\lambda = 2 \mu\text{m}$ , (a) champ électrique, (b) champ magnétique

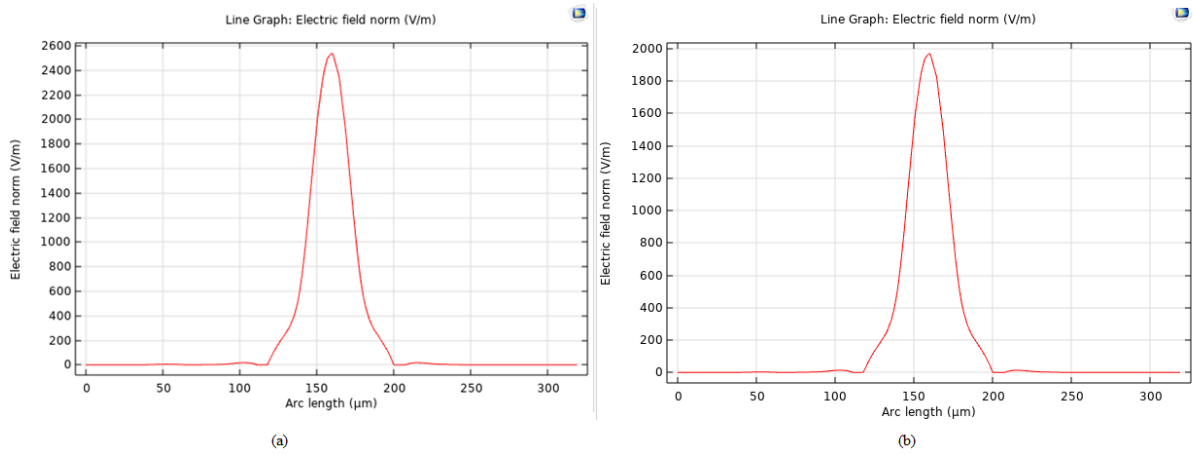


Figure III.40 : Variation du champ électrique le long de la FOM circulaire sur TeO2 avec (a)  $\lambda=1.55\mu\text{m}$  et (b)  $\lambda=2\mu\text{m}$ .

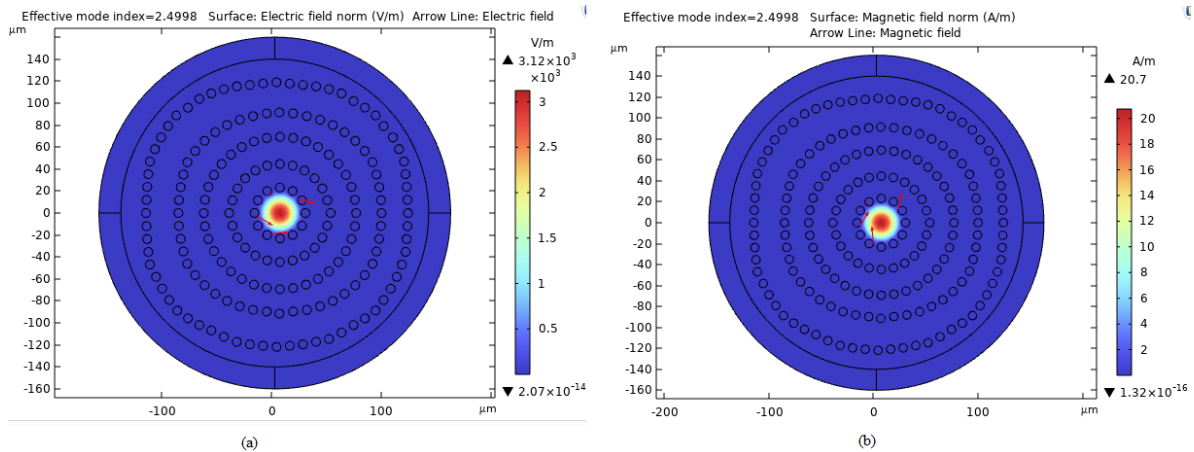


Figure III.41 : Effet des trous d’air sur la distribution du champ dans la FOM (a) champ électrique et (b) magnétique.

La figure III.41 illustre la distribution des champs électriques et magnétiques après avoir augmenté le nombre des trous d’air dans la structure avec  $\lambda=1.55\mu\text{m}$ .

Les résultats montrent clairement que le nombre des trous d’air joue un rôle très important dans le comportement de champ. En effet, une augmentation du nombre de ces trous intensifie le champ. Par exemple, dans la figure (III.39), le champ électrique, initialement de  $1.97 \times 10^3 \text{V/m}$  et dans la figure III.41, s’élève jusqu’à  $3.12 \times 10^3 \text{V/m}$ . Cette amplification du champ est due à l’augmentation des résonances et des effets de confinement causés par les

trous d'air additionnels, ce qui améliore la capacité de la structure à manipuler et intensifier les champs.

Dans l'étape suivante, nous avons comparé une structure circulaire à 5 couches avec une structure carrée aussi à 5 couches, chacune possédant un seul cœur à base de TeO<sub>2</sub>.

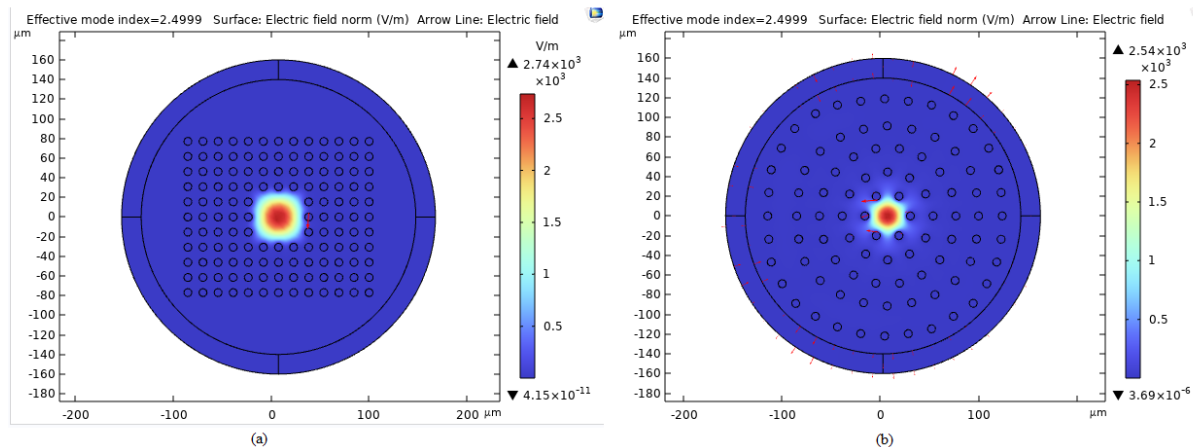


Figure III.42 : Comparaison entre (a) structure carrée et (b) structure circulaire.

Les résultats dans la figure III.42 ont révélé que le comportement du champ électrique est plus intense dans la structure carrée que dans la structure circulaire.

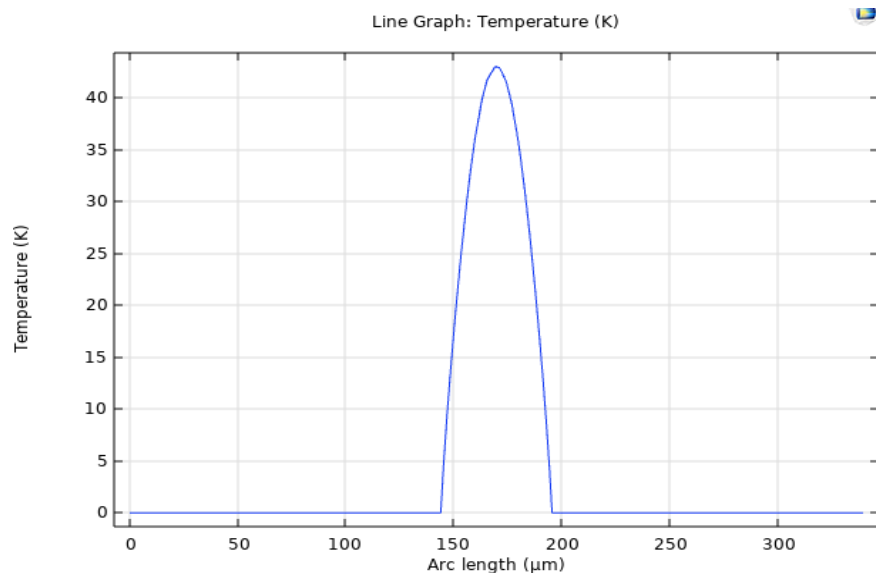
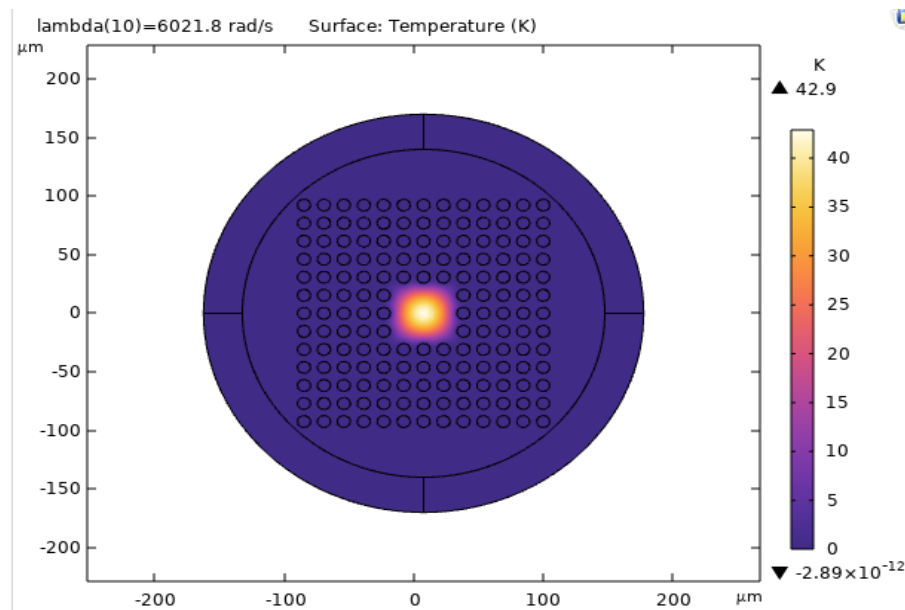
Cette différence peut être attribuée à la géométrie des couches et à la distribution du champ dans chaque structure. La structure carrée favorise une répartition plus uniforme et un confinement plus efficace du champ électrique en raison de ses angles et de ces faces planes, ce qui conduit à une intensité de champ plus élevée par rapport à la structure circulaire où le champ peut se disperser de manière moins concentrée.

### III.3.7 Effet de la température

La plage de températures des fibres optiques se situe généralement entre -40 °C et 70 °C [25], bien que certaines fibres spécialisées puissent fonctionner dans des environnements à températures plus élevées ou plus basses. La température a un impact significatif sur les performances des fibres optiques, affectant des paramètres tels que l'atténuation, la dispersion et la fiabilité.

#### III.3.7.1 Effet thermique dans la FOM de TeO<sub>2</sub>

Les figures III.43-III.47 présentent la distribution de la température dans la fibre optique micro-structurée conçu sur le TeO<sub>2</sub>. Le rayon des trous d'air fixé à 5  $\mu\text{m}$  et à 4  $\mu\text{m}$ , respectivement. Il est important de noter que la température n'affecte pas les performances de notre FOM proposée. Ainsi, le flux de la chaleur est concentré dans le cœur de la fibre optique là où le champ électrique est très important.



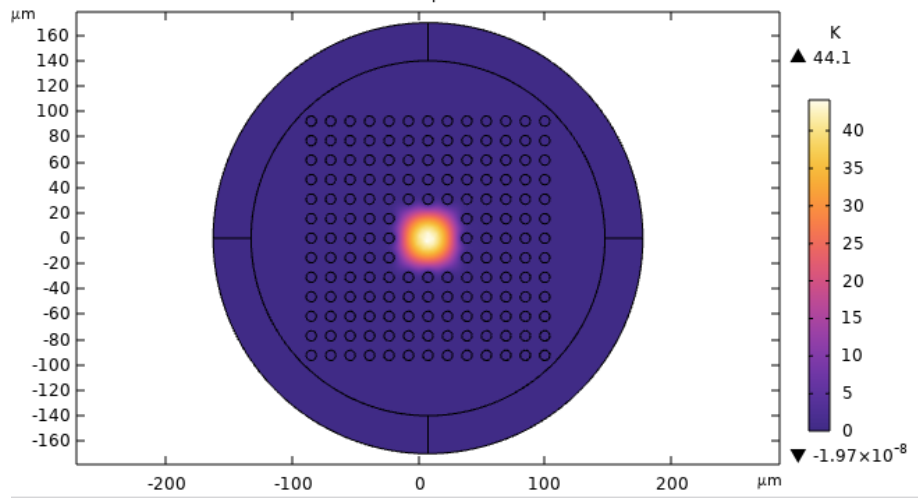


Figure III.45 : Cartographie de la température dans FOM sur TeO<sub>2</sub>,  $r = 4 \mu\text{m}$  .

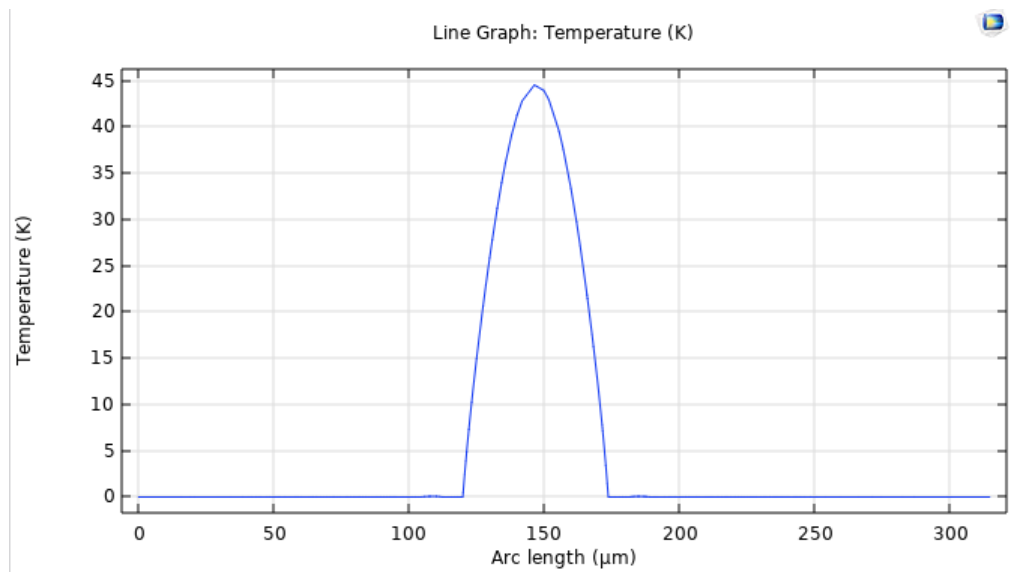


Figure III.46 : Variation de la température le long de la FOM sur TeO<sub>2</sub> avec  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  et  $r = 4\mu\text{m}$ .

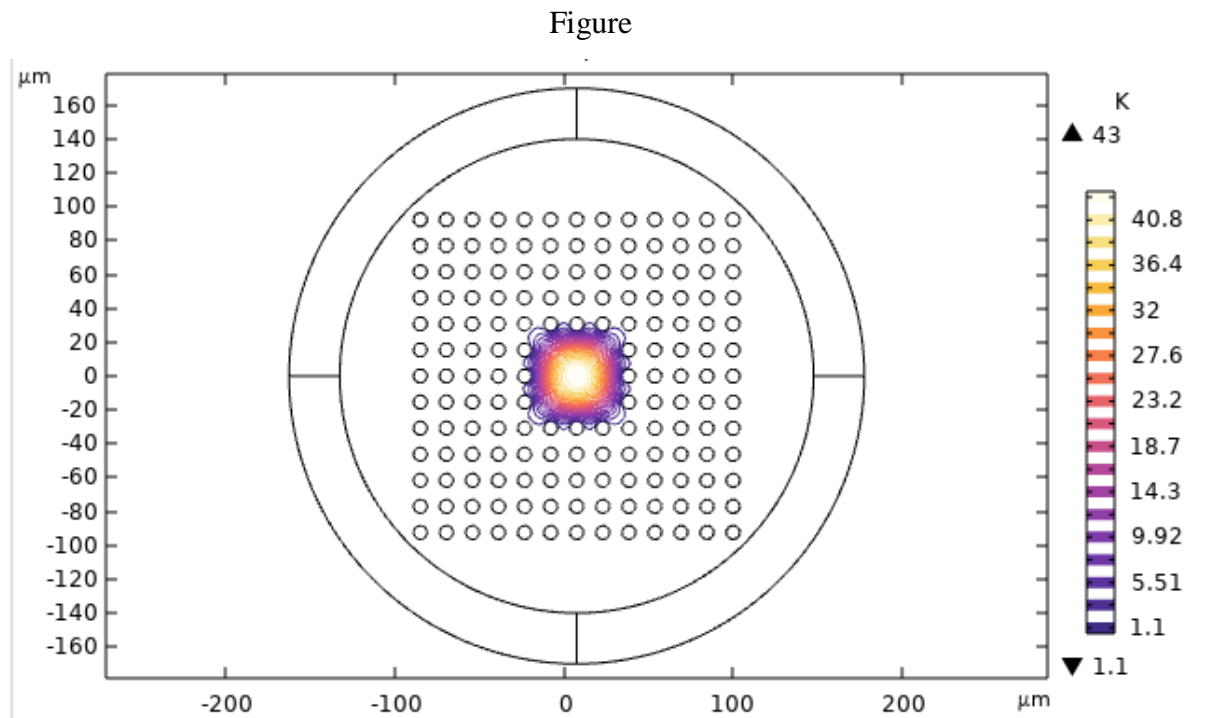


Figure III.47 : Contour isothermique de la FOM sur TeO<sub>2</sub>,  $r = 4 \mu\text{m}$  et  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ .

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement des champs électriques et magnétiques dans deux types de structures ; carrée et circulaire, en utilisant trois matériaux différents. Les résultats ont démontré que pour obtenir un bon confinement des champs il est crucial d'utiliser un matériau avec indice de réfraction élevé, tel que le TeO<sub>2</sub>. De plus, un bon confinement est également favorisé par l'augmentation du rayon des trous d'air et la diminution de la distance entre eux. L'utilisation de la 3-ème fenêtre optique s'est avérée optimale pour ces configurations.

Enfin, nous avons constaté que les fibres optiques micro-structurées s'échauffent moins, ce qui peut attribuer à l'efficacité des matériaux utilisés pour minimiser les pertes thermiques. Le TeO<sub>2</sub>, en particulier avec son fort indice de réfraction, contribue à une meilleure gestion de la chaleur. Ces observations suggèrent que la sélection judicieuse des matériaux et la configuration géométriques des structures sont essentielles pour optimiser le confinement et réduire l'échauffement dans les fibres avancées

---

**Conclusion générale**

### Conclusion générale

Ces dernières années, le développement de fibres optiques présentant une stabilité thermique améliorée a suscité un intérêt croissant pour répondre aux exigences des environnements difficiles tels que les applications aérospatiales, automobiles et industrielles. Des recherches sont en cours pour améliorer les performances thermiques des fibres optiques grâce à des avancées en matière de matériaux et à des optimisations de conception.

Cette étude met en lumière les avantages thermiques des fibres optiques micro-structurées à base de silice, de dioxyde de tellure et  $\text{GeO}_2$ . En utilisant la modélisation électro-thermo-optique avec le logiciel COMSOL, nous avons démontré que ces fibres, qu'elles soient de structure carrée ou circulaire, présentent une capacité supérieure à limiter l'échauffement comparé aux fibres optiques conventionnelles. Cette caractéristique est cruciale pour les applications à haute puissance où la gestion thermique est essentielle pour maintenir l'intégrité et la performance des signaux optiques.

Les résultats obtenus montrent que les fibres micro-structurées, en particulier celle composée de  $\text{TeO}_2$ , permettent une meilleure dissipation de la chaleur, réduisant ainsi les risques de dégradation et de défaillance des fibres en condition de fonctionnement intensif. Cette propriété ouvre des perspectives intéressantes pour leur utilisation dans des domaines exigeants tels que les télécommunications à haute performance, les capteurs optiques de précision et les dispositifs optiques utilisés dans des environnements industriels sévères.

En termes de perspectives, il est essentiel d'optimiser encore davantage les structures micro-structurées et les matériaux utilisés pour maximiser leur performances thermiques et optiques. Des études expérimentales complémentaires sont nécessaires pour valider les modèles théoriques et les simulations numériques, et ainsi confirmer les avantages observés. De plus, explorer les applications pratiques de ces fibres dans des contextes réels, permettra de mieux comprendre leur comportement et de les adapter aux besoins spécifiques des industries.

En conclusion, cette étude a montré que les fibres optiques micro-structurées offrent une solution prometteuse pour améliorer la gestion thermique dans les systèmes optiques, ouvrant ainsi la voie à des innovations significatives dans le domaine des technologies optiques.

## Bibliographie

- [1] : Russel, P. St. J. « Photonic crystal fibers. » Science, vol. 299, no. 5605, pp. 358-362, 2003
- [2] : Smith, & Jones, A., « Observation microscopique d'une fibre optique à structure microscopique ». Journal de la société optique, 2018
- [3] : Kessab Badr Eddin, Karaoui Afid, « Etude et analyse des propriétés optiques des fibres optiques micro-structurées », Université Kasdi Mesbah, 2022.
- [4] :D.Azzedine "Etude théorique et simulation des cristaux photoniques et leurs applications en chimie et biochimie" USTHB, 2010.
- [5] : K.M. Ho, Chan C.T and C.M Soukoulis. Physical Review Letters 65(25), 3152,1990.
- [6] : Slimioudette, 'micro-lentillage d'une fibre optique', Le dossier du Ministère del'Industrie\_France : "Étude générique sur les technologies optoélectroniques : La fibre optique, une technologie de pointe", 2011.
- [7] :F. Bahloul, « Etude des fibres optiques microstructures air/silice et de leurs applications aux systemes de telecommunication », thèse de Doctorat de l'université de Tunis El Manar, années 2006.
- [8] :M. A. Duguay, Y. Kokubun, T. L. Koch, and L. Pfeiffer, "Antiresonant reflecting optical waveguides in SiO<sub>2</sub>-Si multilayer structures," Applied Physics Letters, vol. 49, no. 1, pp. 13–15, 1986.
- [9] : N. M. Litchinitser, S. C. Dunn, B. Usner, B. J. Eggleton, T. P. White, R. C. McPhedran, and C. M. de Sterke, "Resonances in microstructured optical waveguides," Optics Express, vol. 11, no. 10, pp. 1243–1251, 2003.
- [10] :F. Benabid and P. J. Roberts, "Guidance mechanisms in hollow-core photonic crystal fiber," in Proceedings of SPIE 6901, vol. 6901, pp. 69010U–69010U, Spie, 2008. (Cité en pages x, 78, 79, 87 et 101).
- [11] :H. P. Uranus, H. J. W. M. Hoekstra and E. VAN groesen, "Galerkin finite element scheme with bayliss-gunzburger turkel-like boundary conditions for vectorial optical mode solver", Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials, 13(2), 175-194, 2004. :

## Bibliographie

---

- [12] : Laurent Provino, Laurent Brilland, Achille Monteville, David Landais, Olivier Le Goffic, Denis Tregcoat, David Mechin Photonics Bretagne, 11 rue Louis de Broglie, 22300 Lannion.
- [13] : R.Cherif, "Étude des effets non-linéaires dans les fibres à cristaux photoniques", Thèse de doctorat, Université de Carthage, 2009.
- [14] : K. Emmanuel. "Les microstructurations dans les fibres optiques". Lille, 2005.
- [15] : Boutelli Khaoula, Bentouati Soumia, « Étude et conception des fibres optiques microstructurées », Université Kasdi Merbah, 2021.
- [16] : J. C. Knight, T. A. Birks and P. St. J. Russell, "Properties of photonic crystal fiber and the effective index model", Journal of optical society of America A, 1998.
- [17] :M. El Amraoui, "Fibres optiques microstructurées halogénures fortement non linéaires a base de As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>: vers de nouvelles sources super continuum infrarouges", Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2010.
- [18] L. A. Osminkina et al., "Germanium oxide thin films for electronic and photonic applications," Materials Science in Semiconductor Processing, vol. 16, no 5, pp. 1268-1273, 2013.
- [19] :L. McCaughan et al., "Telluriumdioxideacousto-optic Bragg modulator," Optical Engineering, vol. 37, no 1, pp. 254-261, 1998.
- [20] :CRC handbook of chemistry ambiante and physics, 97th Edition, 2016.
- [21]:Peyrilloux A., Berthlot L, Pagnoux D., Sansonetti P. Comparisonbetweentwomethodsused for modellingphotoniccrystal fibres. 2nd ElectromagneticOptics Symposium, Paris, 26-30 août 2001.
- [22] :Ambre PEYRILLOUX, Modélisation et caractérisation des fibres microstructurées air/silice pour application aux télécommunications optiques, université de LIMOGES, 2003.
- [23] Eric. Pop, "Energy Dissipation and Transport in Nanoscale Devices", Nano Research 3, pp. 147-169, 2010.
- [24] Maryam Eilchi and Parviz Parvin, « Heat Generation and Removal in Fiber Lasers », Fiber Laser, Edited by Mukul Chandra Paul, <http://dx.doi.org/10.5772/62102>, 2016.
- [25] [https://www.genuinmodules.com/what-is-the-temperature-range-for-optical-fiber\\_a8881](https://www.genuinmodules.com/what-is-the-temperature-range-for-optical-fiber_a8881)
- [26] Anton V. Bourdine and all., « Six-Core GeO<sub>2</sub>-Doped Silica Microstructured Optical Fiber with Induced Chirality »,Fibers 2023, 11(3), 28; <https://doi.org/10.3390/fib11030028>