

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib

Faculté des Sciences et de Technologie

Département Électroniques et Télécommunications



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master en : Télécommunications

Domaine : Science et Technologie

Filière : Télécommunications

Spécialité : Réseaux Télécommunications

Thème

Modélisation et conception des fibres à cristaux photoniques

Présenté Par :

- 1) Mr Hamlat Fares Kamel
- 2) Mr Ahmed Belbachir Mouhamed Ryad

Devant le jury composé de :

Dr FEROUANI Souheyla	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Présidente
Dr SLIMANE Zohra	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Dr DEBBAL Mohammed	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dr RABAH Mohamed Amin	MRA	CDS (Oran)	Invité

Année Universitaire 2020/2021

♠ Remerciement ♠

En préambule à ce mémoire nous remercions « **ALLAH** » le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience durant toutes ces années d'études.

Nos remerciements aussi chaleureux respectueux vont à notre encadrant : « Dr **DEBBAL Mohammed** », pour son aide très précieuse. Sans oublier ses qualités humaines et son professionnalisme dont il a toujours fait preuve, ainsi que ses conseils pertinents, et ses orientations judicieuses, qui nous ont facilité ce travail, Nous tenons à lui exprimer notre grand respect et notre admiration, on espère avoir été digne de sa confiance qu'il nous a accordée et que ce travail était finalement à la hauteur de ses espérances.

Nous exprimons notre gratitude au corps professoral et administratif de la faculté du département « Génie Electrique » de l'université de **Belhadj Bouchaib-Ain Témouchente**, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts et une grande technique pédagogique pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre thème en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions. Nous tenons encore à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Sans oublier nos chères familles bien aimées qui nous ont soutenus durant toutes ses années et qui ont fait de nous ce que nous sommes aujourd'hui.

Enfin, nous remercions toute personne qui a participé de près ou de loin pour l'accomplissement de ce modeste travail.

♠ Dédicace ♠

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer ma gratitude.

- *A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père Majid.*
- *A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux : mon adorable mère leila.*
- *A mes chers frères Ahmed, Nassim, qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.*
- *A mon adorable sœur Fatima et ma adorable petite nièce LiLi, qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.*
- *A mes grands-mères Kaissa et Ourdia, mes oncles et mes tantes. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.*
- *A mon cousin et ami d'enfance Majid disparu trop tôt. J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance, paix à son âme.*
 - *A mes chers collègues de la Pharmacie et a ma deuxième famille Boudieb. Karim, B. Abdullah, B. Hadj, H. Omar, Chamssou, B. Hatem, A. Toufik, D. Mama, A. Sara, B. bouchra, Nadjat, M. imane k. Bouchra, Zineb, Djihane, Halima, Hanane, Said merci de m'avoir toujours encouragé.*
- *Allhem Mired et Ahlem Harrat les futures enseignantes et jeunes doctorantes merci pour votre encouragement.*
 - *A mes chers amis E. Yassine, M. oussama, B. oussama, G. shemseddine, S. houmam, B. Mahi, M. Housseem, C. Bilal, M. Randaa, B. Houria, Chaima, S. chahinez, k. Amira, Halima, Maroua, L. Aisha, kader, B. kader S. Brahim, D. kader, B. Anes, Boukhari, L. Samad, Hadjar, M. Bouchra et tous mes collègues de la promo Telecom merci pour votre encouragements.*

*A Riad, cher ami avant d'être mon binôme
Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite*

Hamlat FARES Kamel

♠ **D**édicace ♠

A mes chères parents , leur sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,
A ma chère sœur pour son encouragement et le soutien
A mon chère frère pour son soutien
Et a tout ma famille la source d'espoir et de motivation
A tous mes amies ,
aFares, chère ami avant d'être mon binôme
A vous cher lecteur

Ahmed Belbachirmouhamedryad

Résumé

Les fibres optiques sont des supports de transmission de hautes performances conçus pour les environnements difficiles capable de transporter les informations de haut débit avec des longues distances mais pour répondre aux besoins de la technologie croissants il s'avère nécessaire d'améliorer toujours les caractéristiques de propagation dans les fibres, surtout celles relatives aux pertes et celles concernant la valeur et la pente de la dispersion chromatique sur toute la bande spectrale utilisée comme dans le cas de télécommunications.

La fibre microstructurées est une nouvelle génération de fibre optique optimisée pour avoir moins de perte.

Dans ce contexte, nous avons réalisé un travail théorique avec la simulation numérique des différents paramètres de propagations dans les fibres optiques microstructurées.

Ce travail nous a permis de mettre en évidence les paramètres que une fibre optique microstructurées peut atteindre pour assure une meilleur qualité de service de réseau

Abstract

The optical fiber is a high performance cable designed for harsh environment capable of carrying broadband information with the long distance but to meet the needs of technology it is necessary to always improve the propagation characteristics in fibers especially those relating the losses and those concerning the value and the slope of the chromatic dispersion throughout the used spectral band (optical telecommunications case).

The microstructured fiber is a new generation of optical fiber optimized to obtain lower losses.

In this context, we have realized a purely theoretical work based on modeling comparison and numerical simulations of the different parameters of the propagation in microstructured fibers.

The effect each parameter on the propagations characteristics has been calculated and have highlight the parameters that a microstructured optical fiber can achieve to ensure better quality of network service.

Table des matières

Remerciement.....	II
Dédicace	IV
Résumé.....	V
Table des matières	VI
Liste des figures.....	VII
Introduction Générale.....	1
Chapitre1 : Fibre optiques conventionnels	2
I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique.....	3
I.3. Définition	4
I.4. Principe de la propagation de l'onde lumineuse	5
I.5. Les principaux types de la fibre optique	6
I.5.1 Fibre optique monomode	7
I.5.2 Fibre optique multi-mode.....	7
I.5.3 Les fibres à saut d'indice	7
I.5.4 Les fibres à gradient d'indice.....	8
I.6. Comparaison des différents types de fibres optiques	9
I.7. Avantages et inconvénients des fibres optiques.....	9
I.7.1 Avantages.....	9
I.7.2 Inconvénients	9
I.8 Fabrication d'une fibre optique.....	10
I.9 Les applications de la fibre optique.....	11
I.10 Conclusion	11
Chapitre II : les fibres microstructures	Erreur ! Signet non défini.
Introduction	13
II.2 DEFINITION.....	13
II.3 LES TYPES DES FIBRES MICROSTRUCTURES	14
II.4 Les propriétés des FMAS	15
II.4.1 Des fibres infiniment monomodes.....	15
II.4.2 L'indice effectif de gaine.....	16
II.4.3 L'indice effectif	17
II.4.4 L'atténuation.....	18

Table des matières

II.4.5 Pertes par courbure	18
II.4.6 Dispersion Chromatique	19
II.5 Conclusion	20
Chapitre III : Résultats et interprétations.....	21
III.1 Introduction	22
III.2 Méthode du faisceau propage (BPM).....	22
III.3 Application de la méthode BPM sur les fibres microstructurées	22
III.4 Les paramètres des FMAS.....	22
III.4.1 La Fréquence Normalisé V_{eff}	22
III.4.2 Condition du monomode	23
Interprétation des résultats.....	24
III.4.3 La dispersion chromatique	24
III.4.4 L'indice effectif.....	26
III.5 Conclusion.....	27
Bibliographie.....	29

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma descriptif du guidage de la lumière dans un jet d'eau par Collado.....	4
Figure I. 2 : Lois de propagation du signal dans une fibre optique.....	5
Figure I. 3 : Représentation schématique d'une fibre optique.....	5
Figure I.4 : Guidage de la lumière dans la fibre optique.....	6
Figure I.5 : les types de fibres de verre.....	6
Figure I.6 : La fibre monomode.....	7
Figure I.7 : la propagation de la lumière dans fibre à saut d'indice.....	8
Figure I. 8 : la propagation de la lumière dans fibre à gradient d'indice.....	8
Figure I. 9 : Dopage de tronçon de silice fondu.....	10
Figure I. 10 : Méthode de tirage d'une fibre optique.....	11
Figure II.11 : Représentation de la fibre microstructures RTIM.....	14
Figure II.12 : Représentation de la fibre optique microstructures BIP.....	14
Figure II. 13 : Fonctionnement des fibres microstructures.....	15
FigureII.14 : Illustration de l'influence des paramètres optogéométriques sur la fréquence normalisée V	15
Figure II.15 : Variation de la dispersion chromatique en fonction des paramètres géométriques de la FMAS.....	20
Figure III.16 montre les variations de V_{eff} en fonction de Λ/λ pour des valeurs de d/Λ s'étendant de 0,01 à 0,45.....	23
Figure III.17 : Structure de la fibre photonique.....	25
Figure III.18 : Variation de la dispersion chromatique par rapport à la longueur d'onde.....	25
Figure III.19 : Variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde.....	26

INTRODUCTION GENERALE

Le monde numérique n'arrête pas de changer, toujours avec le principe d'aller en avant avec une grande vitesse de croissances qui a chamboulé la trajectoire de l'aérospatial, des communications sans fil et par satellite. La nécessité de l'utilisation des fibres optique est devenue primordiale pour une meilleure performance en qualité des services réseaux.

Tous d'abord, la fibre optique est un long câble composé de centaines nombre de brins en verre ultra purs mesurant le diamètre d'un cheveu.

Ces brins peuvent transmettent des signaux lumineux sur une grande distance avec objective à réduire les pertes.

Ainsi toujours dans le développement durable que reconnaît ce support de transmission une nouvelle génération de fibres est conçue dans le but d'obtenir des pertes moins que les fibres conventionnelles.

Ces fibres connues sous le nom de fibres microstructures, fibre à cristal photonique où fibre à bande interdite photonique.

Notre travail de projet de fin d'étude est divisé en trois chapitres, qui décrivent la conception de la fibre optique microstructures.

Le premier chapitre sera consacré à l'étude théorique pour but, de présenté les généralités et des spécificités des fibres conventionnelle comme le principe de guidage, les type de la fibre optique, la fabrication et les différent caractéristiques de la fibre optique, puis on parlera dans le deuxième chapitre sur les nouvelles fibres optiques appelé les fibres microstructurées généralités, types et les paramètres qui les rondes aussi spéciales.

Le dernier chapitre, qui sera entièrement dédié à une série de simulations qui seront réalisées, dans notre cas, à l'aide de la méthode de simulation numérique (BPM) et sera développer avec des programmes MATLAB, et comparer avec d'autres références bibliographiques.

Chapitre I : Fibre optiques conventionnels

I.1. Introduction

La fibre optique est un verre mince et transparent qui a révolutionné les télécommunications depuis sa découverte dans les années 1960. [1]

L'information est transmise à partir des guides électriques à bande passante limitée après que le monde a connu un nouveau principe et une nouvelle découverte qui a révolutionné le monde numérique et ce principe c'est la fibre optique qui possède une large bande passante et une faible atténuation, elle est devenue un excellent support de transmission de données pour les longues distances.

I.2. Historique

L'étude de la transmission des signaux lumineux est très ancienne, en 1841 le suisse Colladon montre qu'on peut guider les signaux lumineux dans les filets d'un jet d'eau (figure 1.1)

L'année suivante William Wheeler fait la même expérience mais avec des filets d'eau et des bâtons en verre [2] En 1888, Roth et Reuss utilisaient du verre en médecine pour éclairer les cavités et viscères du corps [3].

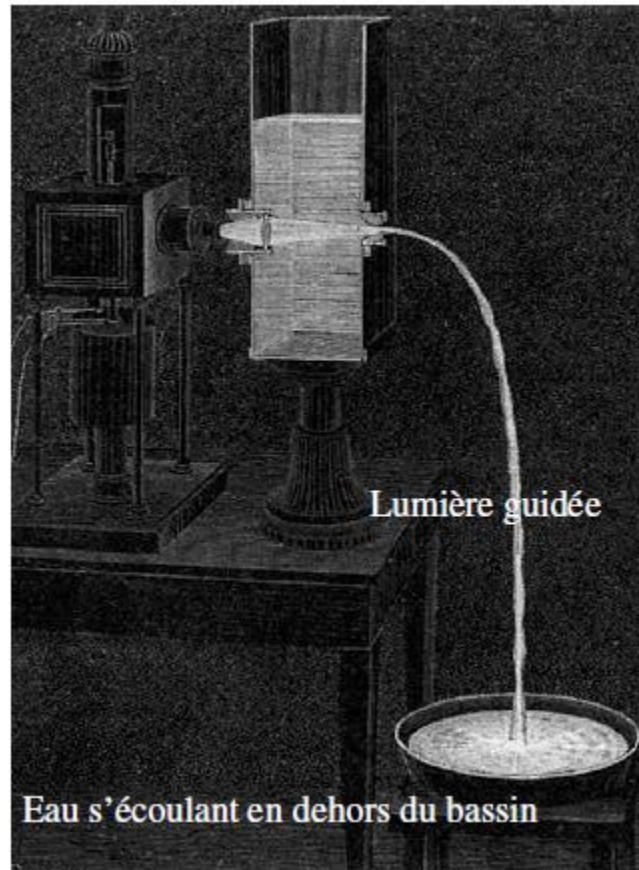


Figure I.1 : Schéma descriptif du guidage de la lumière dans un jet d'eau par Collado [4]

On commence à parler des fibres qu'à partir de 1926 puis en 1927 BRAID et HANSELL effectuent des recherches sur les fibres optiques.

C'est à partir de l'année 1930 que la réalisation de la fibre optique a pu être fabriquée puis en 1960 un nouveau concept a vu le jour qui est la fibre optique de silice à faible atténuation

En 1968, KWEN Chi Kao modifie par son tour les fibres de silices mais cette fois avec faible perte [5]

En 1970 Robert Maurer, Peter Schultz et Donald Keck de la compagnie Corning Glass Works de New-York ont pu réaliser une fibre optique avec objective qui atteindra environ. (20 dB/km à ~1000 nm) [6]

Par la suite ses trois savant on pue encore faire évolué cette technologie mais cette fois ils ont pu défier la distance avec des pertes limité de l'ordre dB/km [7]

En 1979 et cette fois a Chicago un autre nouveau exploit s'ajoute a la liste qui est la création du premier système de communication optique a pour but de rendre les pertes de l'ordre de 0,2 dB/km avec une longueur d'onde 1,55 μm [8].

I.3. Définition

La fibre optique est une ligne de transmission sous forme guide d'ondes diélectrique à symétrie circulaire est composé deux parties un partie central appelé cœur de diamètre varie

entre $8-10\mu\text{m}$ à $62,5\mu\text{m}$ selon le type de fibre et deuxième partie appelé la gaine de diamètre de $125\mu\text{m}$ (Figure I-2).

la fibre toute seule est très fragile et pour la protéger contre les facteurs externes (humidité, attaque chimique) elle est revêtue par le plastique puis par le nylon.

Le guidage du signal optique est basé sur la loi de Descartes. La lumière se propage le long de la fibre par réflexions successives entre le cœur et la gaine (Figure I-2).

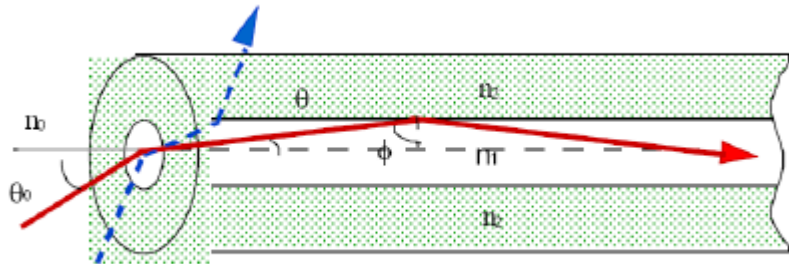


Figure I. 2 : Lois de propagation du signal dans une fibre optique

Une fibre classique est constituée d'un cœur d'indice entouré par l'indice d'une gaine optique, l'indice cœur $n_1=1.48$ et pour la gaine $n_2= 1.46$ [9].

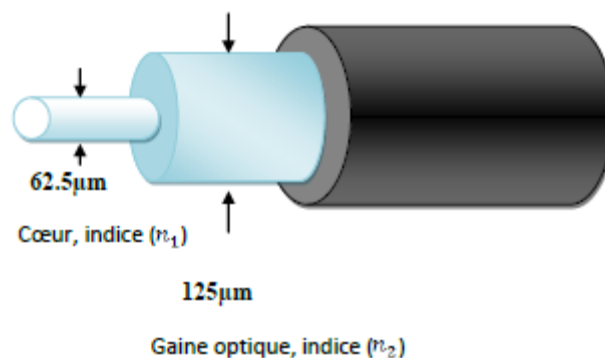


Figure I. 3 : Représentation schématique d'une fibre optique [10]

I.4. Principe de la propagation de l'onde lumineuse

Une fibre optique est une guide d'onde diélectrique de géométrie cylindrique. On éjecte un rayon lumineux dans le début de fibre optique avec un angle adéquat. Ce rayon se propage jusqu'au l'extrémité de la fibre. (Figure I.4).

Le guidage fait lorsque l'indice du cœur n_c est supérieur de la gaine n_g le rayon lumineux se propage et subis une réflexion totale lorsque l'angle d'indice est supérieur à l'angle critique [11].

$$\alpha_c = \arcsin\left(\frac{n_g}{n_c}\right) \text{Équation I.1}$$

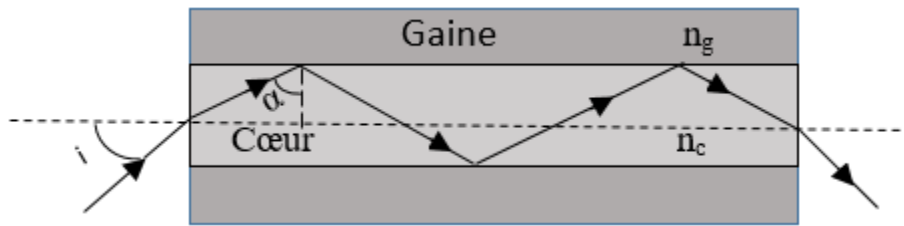


Figure I.4 : Guidage de la lumière dans la fibre optique

L'angle de signal lumineux doit être inférieur à l'ouverture numérique (O.N.) pour être guidée sans pertes, cet angle est mesuré par rapport à l'axe de la fibre .

$$ON = \sin \alpha_{max} \sqrt{n_{coeur}^2 - n_{gaine}^2} \text{Équation 2}$$

I.5. Les principaux types de la fibre optique

Les fibres optiques sont représenté en deux catégories fondamentale le mode monomode et le mode multi-mode.

En peux les distingués par rapport au saut d'indice, par fois le changement d'indice à l'interface entre cœur et gaine est brusque, et parfois l'indice est graduel.

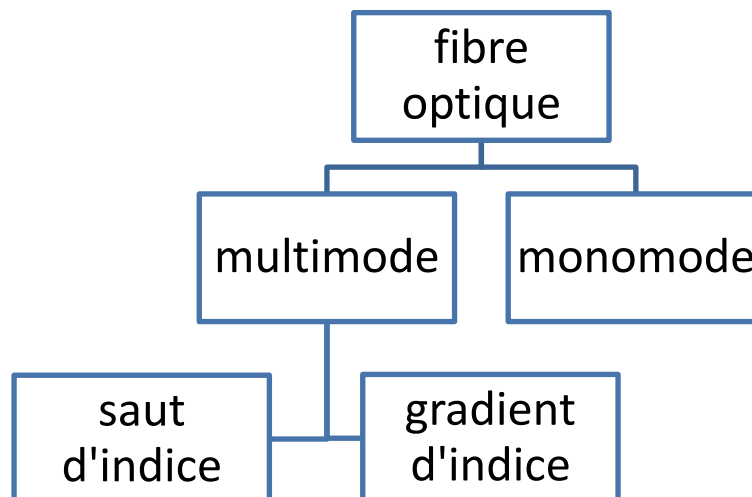


Figure I.5 : les types de fibres de verre

I.5.1 Fibre optique monomode

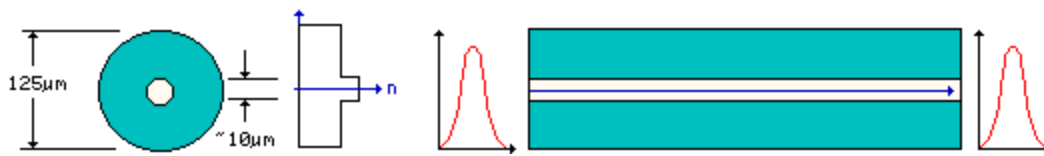


Figure I.6 : La fibre monomode.

Principalement les fibres monomodes ont un diamètre de cœur environ (10 μm), qui est faible par rapport au diamètre de la gaine qui mesure environ 125 μm et proche de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière injectée. [12]

L'onde se propage alors sans réflexion et il n'y a pas de dispersion modale.

Le petit diamètre du cœur des fibres monomodes nécessite une grande puissance d'émission qui est délivrée par des diodes laser.

Les caractéristiques essentielles d'une fibre optique monomode pour la transmission d'un signal sont : [13]

- 1- l'affaiblissement (dB) par unité de longueur (Km), qui est en fonction de la longueur d'onde, soit 0,36 dB/Km à 1300 nm et 0,2 dB/Km à 1550 nm [13]
- 2- La dispersion chromatique, qui conduit à un élargissement d'une impulsion lumineuse du fait de la variation des vitesses de propagation, ce qui est pénalisant dans le cas d'une modulation directe (1 ou 0) du signal optique [13]
- 3- la dispersion des modes de polarisation (PMD), qui se caractérise par un étalement spectral en ligne
- 4- les fibres avec profil à saut d'indice, avec un diamètre du cœur allant de 9 à 10 μm et un diamètre de gaine 125 μm, qui sont plus utilisées dans les télécommunications. Contrairement à la fibre multimodes ainsi la propagation dans la fibre monomode s'effectue avec un seul mode dit mode fondamental [13].

I.5.2 Fibre optique multi-mode

Les fibres multimodes ont un diamètre de cœur important et un rayon lumineux pénétrant dans le cœur de la fibre à l'une de ses extrémités, se propage longitudinalement jusqu'à l'autre extrémité grâce aux réflexions totales qu'il subit à l'interface entre le verre le cœur et le verre de gaine. Parmi les fibres multimodes, on distingue les fibres à faible indice ou saut d'indice (débit limité à 50 Mb/s) et les fibres à gradient d'indice (débit limité à 1 Gb/s). [14].

I.5.3 Les fibres à saut d'indice

Ce type de fibre est utilisé dans les petites distances comme les réseaux locaux de type LAN.

Le diamètre du cœur de la fibre saut d'indice est de $50\ \mu\text{m}$ ou $65\ \mu\text{m}$, le diamètre de gaine entre $100\ \mu\text{m}$ et $140\ \mu\text{m}$, et ouverture numérique entre 0.2 et 0.5 [15]

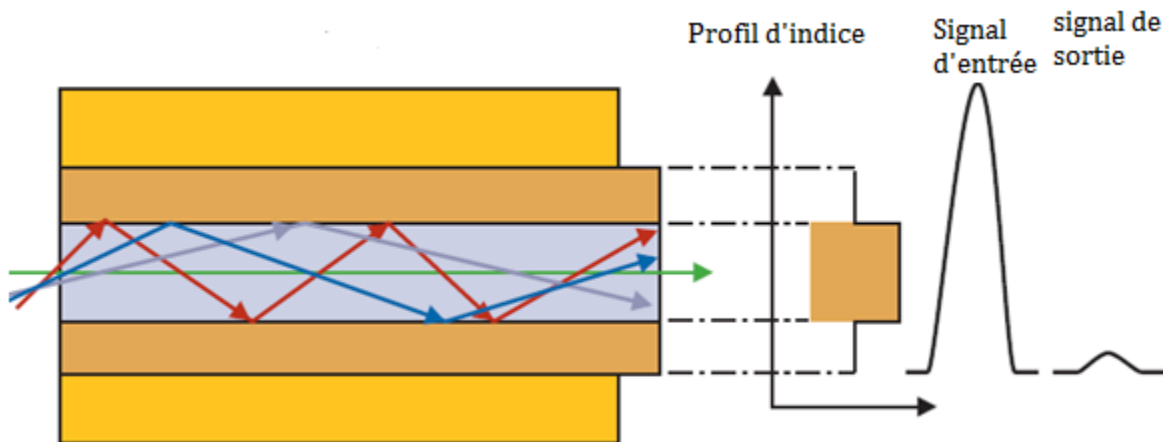


Figure I.7 : la propagation de la lumière dans fibre à saut d'indice [15]

I.5.4 Les fibres à gradient d'indice

Dans ce type de fibre, l'indice de réfraction n'est pas constant dans le cœur, bien au contraire il décroît graduellement du centre du cœur jusqu'à la limite de la surface qui sépare le cœur et la gaine

La fibre multimode à gradient d'indice est principalement utilisée dans les réseaux locaux [12].

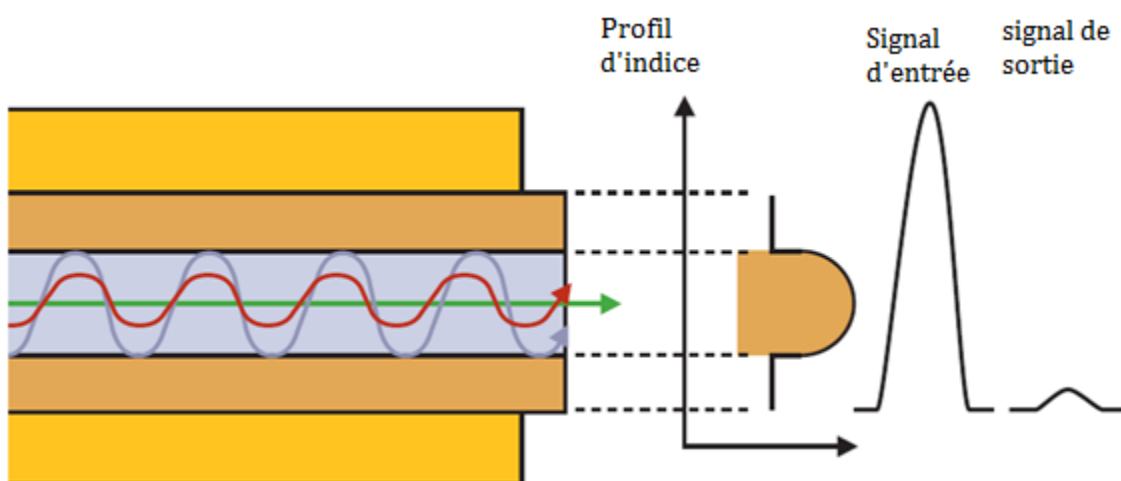


Figure I. 8 : la propagation de la lumière dans fibre à gradient d'indice [15]

I.6. Comparaison des différents types de fibres optiques

Structures	Avantages	Inconvénients	Applications pratiques
Multi mode	Grande ouverture numérique, connexion facile, faible prix, facilité de mise en œuvre(SI) Bande passante importante et bonne qualité de transmission(GI)	Perte et distorsion importante du signal(SI) Difficile à mettre en œuvre(GI)	Communications courtes distances, réseaux locaux(SI) Communications courtes et moyennes distances(GI)
Monomode	Bande passante très grande, aucune distorsion	Prix très élevé	Communications longues distances

Tableau I.1 : Comparaison des différents types de fibres optiques (GI « Grand indice», SI « saut indice [16]

I.7. Avantages et inconvénients des fibres optiques

I.7.1 Avantages

Les principaux avantages de la fibre optique sont les suivant :

✓ **Performances de transmission**

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

✓ **Avantages de mise en œuvre**

Très petite taille, grande souplesse, faible poids

✓ **Sécurité électrique**

Isolation totale entre terminaux, utilisation possible en Ambiance explosive ou sous de forte tension.

✓ **Sécurité électromagnétique**

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

✓ **Avantage économique**

Moindre coût, en comparaison avec d'autres supports [17].

I.7.2 Inconvénients

- Le cout élevé par rapport les conducteur électrique.

- Le cout d'installation d'élevé.
- Sensible aux courbures de câble, des connecteurs mal positionnés ou sales, des inhomogénéités dans le verre de la fibre.

I.8. Fabrication d'une fibre optique

Trois méthodes sont utilisées aujourd'hui pour fabriquer les fibres : modified chemical vapor deposition (MCVD), outsidar vapor deposition (OVD), and vapor axial deposition (VAD) nous allons commencer par voir la fabrication la plus utilisé MCVD. [18]

Le procédé MCVD, décrit la première fois par McChesney et al. (1974) du laboratoire AT & T. Bell, est devenu le principal procédé de fabrication des fibres de haute qualité pour les systèmes de communication. Ce procédé est basé sur l'oxydation à très haute température (autour de 1600°C) des différents constituants de la fibre (SiCl₄, GeCl₄, etc.) à l'intérieur d'un tube de silice en rotation chauffé par un chalumeau en translation le long de l'axe du tube.

Les réactions d'oxydation sont les suivantes :

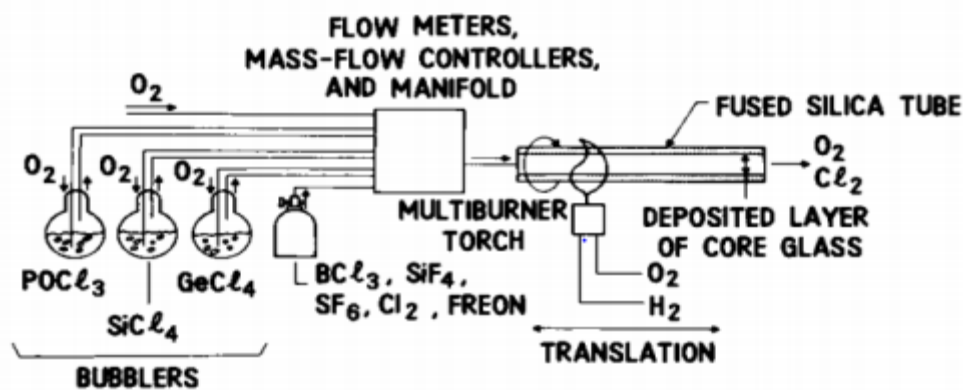
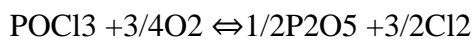
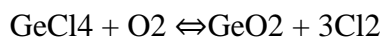
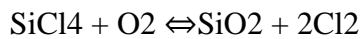


Figure I. 9 : Dopage de tronçon de silice fondu [19]

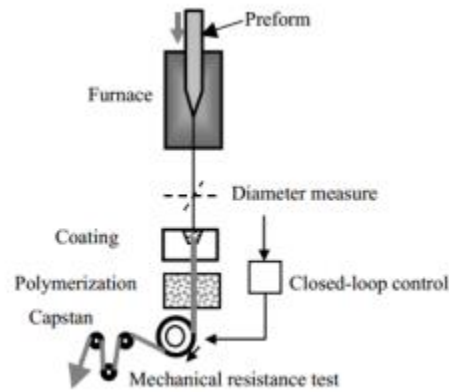


Figure I. 10 : Méthode de tirage d'une fibre optique [20]

I.9. Les applications de la fibre optique

De nos jours il faut de grand débit donc des grandes bands passants donc on utilise la fibre optique pour nos réseaux. Son utilisation permet de transmettre et recevoir l'information d'une manière plus vite par rapport les autres conducteur électrique qui est limiter à ces limitation physique et elle aussi plus performante dans les longues distance et son faible affaiblissement.

Le raccordement des station de base des réseaux mobile [21]

Les réseaux FTTX, Fiber to home, fiber to building [21].

La demande de réseaux large bande demande une exigence à utiliser la fibre optique pour les réseaux sous-marins pour lier les continent et ça capacité de transmette des gros volumes de données générés par l'internet

La fibre optique utilisée aussi dans la télémédecine, pour l'éclairage, visualisation, endoscopie et aussi pour les capteurs [21].

I.10. Conclusion

Nous avons expliqué la fibre optique conventionnel qui est un support très important dans le domaine de la télécommunication et en outre en a présenté ces avantages et ces inconvénients, et ainsi son impacte dans les divers domaines ainsi le support n'arrête pas d'évoluer par son concept de transmission pour assurer une meilleure qualité des services réseau non négligeable.

Chapitre II : les fibres microstructures

Introduction

Une fibre optique est un conducteur optique transmettant des informations lumineuses, son utilisation prend de l'ampleur de jour en jour, car elle permet des débits de plusieurs Gbits/s sur de très longues distances.

Le principe de la fibre optique microstructure n'est pas trop différent par rapport à la fibre optique conventionnel.

Pour commencer les fibres cristaux photoniques sont une classe de fibres optiques constituées d'un arrangement de trous d'air parallèles à l'axe d'une matrice de silice, dont les toutes premières ont été proposées par Mr KAISSEER aux Bell Labs en 1974. [22]. L'objectif était à l'époque d'obtenir un fort guidage dans un cœur de silice entouré d'une gaine optique à très forte proportion d'air. Mais ces fibres, très multimodes, n'ont pas suscité d'intérêt particulier dans la communauté car elles n'apportaient pas de progrès sensible en termes de propagation. De plus leur raccordement aux fibres classiques était très délicat. L'implantation des cristaux photoniques dans les fibres optiques est relativement récente. Ils constituent la gaine optique de la fibre, le cœur de cette dernière étant obtenu en créant un défaut dans le cristal.

Selon le cœur de la fibre a un indice de réfraction supérieur ou inférieur à celui de la gaine environnante. [23]

II.2 DEFINITION

Fibres microstructurées ou fibres à cristal photonique est un vaste domaine pourtant de la famille des fibres optiques, qui a vu le jour en 1996 [24] et qui s'est depuis imposée comme une technologie incontournable en Photonique.

Dans ce type de fibre, la gaine est constituée d'une matrice de canaux d'air parallèles à l'axe Z, Les fibres FMAS présentent une structure géométrique périodique sur deux dimensions et homogène sur la troisième (l'axe z), axe de propagation de la lumière. Elles sont généralement en silice et comportent des canaux d'air le long de la fibre dont les paramètres caractéristiques sont le diamètre des canaux « d » et le pas « Λ », distance inter canaux de centre à centre [25]

II.3 LES TYPES DES FIBRES MICROSTRUCTURES

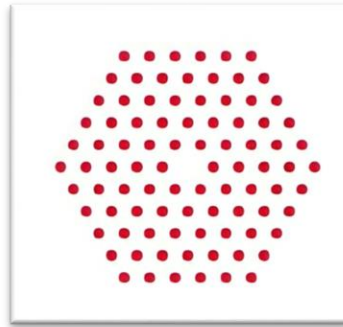


Figure II.11 : Représentation de la fibre microstructures RTIM

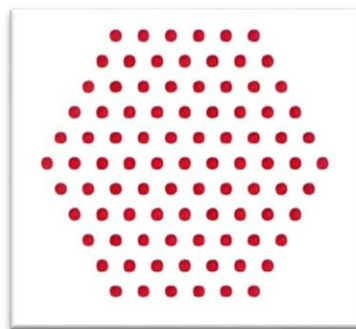


Figure II.12 : Représentation de la fibre optique microstructures BIP

Les FMAS sont généralement représentées d'une structure géométrique hexagonale. (Figure II.11 et Figure II.12)

C'est deux types de fibres on peut les classer en deux types : fibres à cœur creux qui assure le guidage par l'effet de la bande interdite photonique (BIP):

- ✓ très faibles non linéarités
- ✓ seuil de dommage faible
- ✓ faible coefficient de Fresnel à l'entrée de la fibre
- ✓ On a aussi les fibres à cœur plein qui obéissent à un guidage par réflexion totale interne modifiée (RTIM)
- ✓ non linéarités ajustables
- ✓ dispersion chromatique ajustable
- ✓ brisure de symétrie de la structure [26]

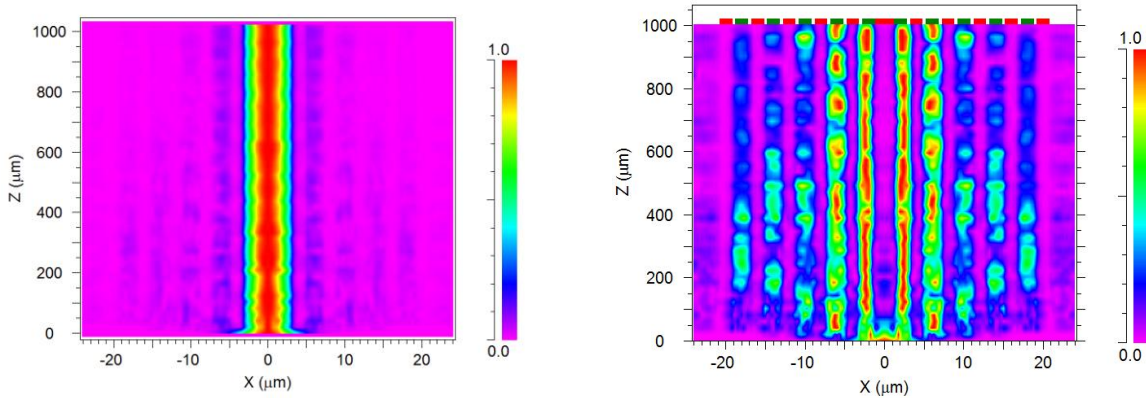


Figure II.13 : Fonctionnement des fibres microstructures [26]

II.4 Les propriétés des FMAS

II.4.1 Des fibres infiniment monomodes

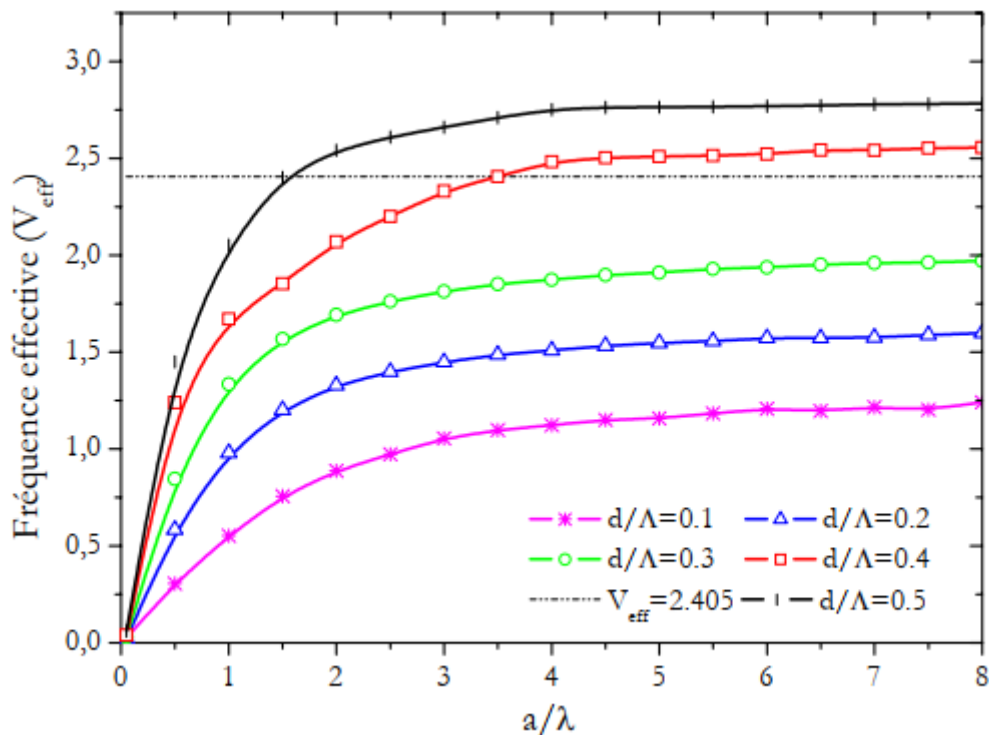


Figure II.14 : Illustration de l'influence des paramètres optogéométriques sur la fréquence normalisée V [26]

Parmi les propriétés spécifiques aux fibres microstructurées, leur capacité à offrir de nombreux degrés de liberté en matière de gestion de la dispersion d'indice de phase a donné lieu à de multiples applications.

Ainsi, il est apparu très tôt qu'un choix judicieux des paramètres d et Λ d'une fibre à cœur haut indice peut permettre d'obtenir une propagation monomode.

Lorsque le paramètre V est inférieur à 2.405 (ligne horizontale), donc la fibre est totalement monomode sur toute la longueur d'onde [27].

Il est nécessaire de rappeler la condition qui dicte l'apparition du premier mode d'ordre supérieur pour un guide donné, c'est-à-dire la longueur d'onde (dite longueur d'onde de coupure λ_c) en-dessous de laquelle le guide devient multimode. Pour cela, on définit le paramètre V , appelé fréquence normalisée, qui s'écrit :

$$V = \frac{\pi d_{\text{cœur}} \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{eff}}^2(\lambda)}}{\lambda} > 2.405 \quad (\text{II.1})$$

n_{gaine} et $n_{\text{cœur}}$ représentent respectivement l'indice de réfraction de la gaine et du cœur de la fibre.

$d_{\text{cœur}}$ représente le diamètre du cœur de la fibre.

Dans cette expression, le paramètre V est supérieur à 2.405 lorsque la longueur d'onde est inférieure à la longueur d'onde de coupure ($\lambda < \lambda_c$) et le guide est alors multimode.

Or, la différence d'indice cœur/gaine dépendant peu de la longueur d'onde, il apparaît ici qu'une fibre conventionnelle devient inévitablement multimode lorsque la longueur d'onde guidée diminue jusqu'à atteindre la longueur d'onde de coupure.

La situation est différente dans le cas d'une fibre à cœur haut indice pour laquelle la condition d'apparition du premier mode d'ordre supérieur s'écrit :

$$V = \frac{\pi d_{\text{cœur}} \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2}}{\lambda} > 2.405 \quad \text{Équation (II.2)}$$

Ici, l'indice de gaine est remplacé par $n_{\text{Geff}}(\lambda)$ qui représente l'indice effectif de la gaine (i.e., indice effectif du mode le plus bas se propageant dans la gaine).

Comme le montre (équation II.1), $n_{\text{Geff}}(\lambda)$ présente une dépendance spectrale marquée qui peut contrebalancer.

la dépendance en longueur d'onde du dénominateur de (L'équation II.2) et de faire en sorte que le paramètre V soit toujours inférieur à 2.405.

II.4.2 L'indice effectif de gaine

Le guidage par réflexion totale interne est opérant dans une fibre standard à saut d'indice pour tout mode dont la constante de propagation β vérifie la condition suivante :

$$kn_{\text{gaine}} < \beta < kn_{\text{cœur}} \quad (\text{II.3})$$

$kn_{\text{cœur}}$ est la constante de propagation maximale autorisée dans la région du cœur.

kn_{gaine} est la valeur limite de β en dessous de laquelle le mode le plus guidé dans le cœur car il peut fuir dans la gaine.

kn_{gaine} représente donc la constante de propagation maximale autorisée pour les modes de la gaine optique.

Dans une fibre à trous, cette condition est encore valable.

Les modes guidés dans le Cœur en silice sont les modes ayant une constante de propagation β telle que :

$$\beta_{\max \text{ gaine}} < \beta < kn_{\text{silice}} \quad (\text{II.4})$$

$\beta_{\max \text{ gaine}}$ Peut être définie comme la constante de propagation du mode fondamental existant dans le cristal photonique de la gaine de dimensions infinies, en l'absence de site de défaut. Le mode de gaine possédant la plus grande constante de propagation est le mode ayant la plus grande fraction de son énergie localisée dans la silice.

Par conséquent, l'intensité lumineuse du mode fondamental remplit l'espace entre les trous avec une pénétration minimale dans l'air. En raison de la distribution particulière de son énergie, ce mode est souvent appelé « Fundamental Space-filling Mode(FSM) » dans la littérature scientifique. Sa constante de propagation est notée β_{fsm} .

Comme dans une fibre standard, la détermination de β_{fsm} permet de définir un indice effectif du mode fondamental du cristal photonique $n_{\text{eff gaine}}$:

$$\beta_{\max \text{ gaine}} = \beta = kn_{\text{eff gaine}} \quad (\text{II.5})$$

II.4.3 L'indice effectif

Dans les fibres à cristaux photoniques - en l'occurrence celles à coeur solide utilisant le mécanisme de réflexion totale interne modifiée - l'indice de réfraction du coeur (n_c) est simplement celui du matériau dans lequel est composé le coeur.

Dans ce manuscrit, nous considérons la matrice de la fibre comme étant constituée de silice c'est-à-dire $n_c = 1,45$.

Par ailleurs, les valeurs de n_{eff} et n_{FSM} s'obtiennent par une résolution numérique. Knight et al (l'équation de base (II.6) et la valeur de coupure égale à 2,405.). [24]

ont proposé des formules analytiques empiriques permettant de calculer n_{eff} et n_{FSM} avec qui précision de près de 99% pour $\lambda / \Lambda < 2$. pour avoir un bon résultat de simulation, nous avons besoin de donner une valeur initiale à n_{eff} , celle-ci sera donc estimée par ces expressions empiriques.

En utilisant le formalisme développé dans la thèse de doctorat DAVY GERARD [28] la fréquence normalisée V est donnée par :

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} r \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad (\text{II.6})$$

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a_{\text{eff}} \sqrt{n_c^2 - n_{fsm}^2} = \sqrt{u^2 + w^2} \quad (\text{II.7})$$

$$U = \frac{2\pi}{\lambda} a_{\text{eff}} \sqrt{n_c^2 - n_{\text{eff}}^2} \quad (\text{II.8})$$

$$W = \frac{2\pi}{\lambda} a_{\text{eff}} \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_{fsm}^2} \quad (\text{II.9})$$

$$a_{\text{eff}} = \frac{\Lambda}{\sqrt{3}} \quad (\text{II.10})$$

En suite, à partir des valeurs de V et W calculées et des équations (II .7) et (II .9) ; nous déduisons les valeurs des indices effectifs de mode n_{eff} et de gaine n_{FSM}

$$n_{eff} = \left(n_c^2 - \frac{3\lambda^2(V^2 - W^2)}{4\pi^2\lambda^2} \right)^{1/2} \quad (II.11)$$

$$n_{FSM} = \left(n_c^2 - \frac{3\lambda^2V^2}{4\pi^2\lambda^2} \right)^{1/2} \quad (II.12)$$

II.4.4 L'atténuation

L'atténuation permet de caractériser toutes les pertes de puissance optique que subit la lumière pendant sa propagation à travers la fibre. Cette atténuation est causée par les interactions entre la lumière et son milieu de propagation. Elle dépend du type de matériau qui compose le milieu et de la longueur L de la fibre. On peut donc écrire :

$$PL = P_{in} e^{-\alpha' L} \quad (II.13)$$

où P_{in} et P_{out} représentent respectivement les puissances optiques à la sortie et à l'entrée de la fibre. α' désigne le coefficient d'affaiblissement de la fibre en Np/km (N : Neper) si L est exprimée en km. Lorsque ce coefficient α' est donné en unité logarithmique dB/km, il est désigné par α , comme dans la relation

$$PL = P_{in} 10^{-(\alpha/10)L} \quad (II.14)$$

On peut donc écrire :

$$\alpha = \frac{10}{L} \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}} = 4.343 \alpha' \quad (II.15)$$

Les origines de l'atténuation sont de deux sortes : les pertes *intrinsèques* et *extrinsèques* : [29]

Les pertes intrinsèques sont dues au matériau lui-même et ne peuvent être modifiées qu'à une condition de changer de matériaux. Il s'agit par exemple de la diffusion et de l'absorption du matériau à travers les transitions électroniques et les vibrations moléculaires. Quant aux pertes extrinsèques, elles sont causées durant le processus de fabrication et peuvent donc ces pertes sont dues au fait que le mode redevient préparatif dans la gaine de silice extérieure à la micro structuration. Dans le cas de notre travail, ce sont ces pertes qui vont être les plus significatives pour les PCF de diamètre de cœur inférieur à 2 μm . Pour une valeur de Λ choisie, les pertes par confinement diminuent lorsque d/Λ augmente. A l'opposé, ces pertes augmentent si le rapport Λ/d augmente mais cette fois-ci pour une valeur choisi. Il y a également les pertes causées par les imperfections aux interfaces cœur-gaine (silice-air dans notre cas) et les impuretés. Remarquons que les pertes diminuent avec l'augmentation du nombre de couronnes de trous, les pertes dans une fibre à cristaux photoniques pouvaient descendre jusque 0,28 dB/km à la longueur d'onde de 1,55 μm [30]

II.4.5 Pertes par courbure

Lorsque la proportion d'air diminue, ce qui équivaut à dire que le rapport d/Λ diminue aussi, la fréquence spatiale normalisée s'éloigne de la limite V [31].

L'indice n_{FSM} se rapproche alors de celui du cœur et l'efficacité du guidage diminue, ce qui augmente les pertes par courbure [32].

Dans une fibre microstructurée donnée (d/Λ fixé), une diminution de la longueur d'onde de travail amène un meilleur confinement du champ et une augmentation de l'indice de gain n_{FSM} qui se rapproche de $n_{cœur}$ par valeurs inférieures. Dans ce cas aussi, l'efficacité du guidage diminue et les pertes par courbure augmentent. [24]

Le domaine spectral d'utilisation des fibres microstructurées est de ce fait limité du côté des courtes longueurs d'onde. Vers les grandes longueurs d'onde, l'extension du champ est de plus en plus importante dans la gaine et le confinement devient insuffisant (pertes de confinement).

II.4.6 Dispersion Chromatique

Lorsqu'un signal lumineux se propage dans un milieu, il subit un élargissement dans le temps que l'on appelle dispersion.

Cet élargissement limite le débit dans un système de communication optique, car il force à augmenter le délai entre deux impulsions.

Dans les fibres monomodes, la dispersion chromatique vient du fait que l'indice de réfraction d'un milieu dépend de la longueur d'onde et que les sources utilisées pour transmettre le signal ne sont pas purement monochromatiques.

Les différentes composantes spectrales d'une source ont donc des temps de propagation différents, ce qui provoque l'élargissement d'une impulsion.

La dispersion chromatique, exprimée en picoseconde d'élargissement temporel de largeur spectrale de la source et par kilomètre de fibre [33]

$$Ps. nm^{-1}. km^{-1}$$

Elle est généralement obtenue par la relation suivante :

$$D_C = D_M + D_G \quad (II.16)$$

Avec D_M la dispersion de l'indice du matériau qui dépend de la longueur d'onde et D_G la dispersion du guide qui dépend de sa géométrie.

La dispersion du matériau est à son tour définie par la relation suivante :

$$D_M = -\frac{\lambda d^2 n_{cœur}}{c d\lambda^2} \quad (II.17)$$

Rappelons que dans les fibres standards, la dispersion du matériau est négative pour $\lambda < 1,27 \mu m$ et toujours positive pour $\lambda > 1,27 \mu m$, la dispersion du guide est toujours négative.

La dispersion chromatique ne peut donc être annulée en dessous de $1,27 \mu m$. [33]

Cependant, la dispersion chromatique d'une FMAS dépend étroitement de la proportion d'air présente dans la gaine optique, valeur liée au rapport d/Λ . En jouant sur ces paramètres géométriques, il est possible de modifier l'allure de la courbe de dispersion, et par exemple annuler la dispersion chromatique pour des longueurs d'onde inférieures à $1,27 \mu m$.

D'où la possibilité décompensation de la dispersion.

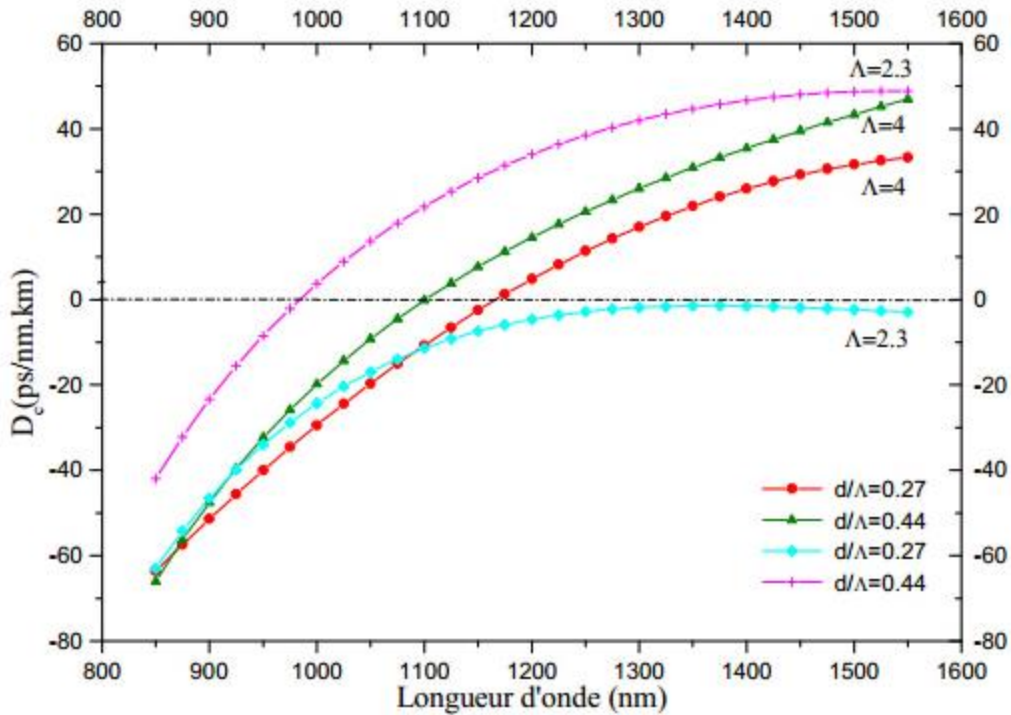


Figure II.15 : Variation de la dispersion chromatique en fonction des paramètres géométriques de la FMAS [33]

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les nouvelles générations des fibres optiques microstructures est qui a un grand pacte sur l'évolution du terme de la transmission à grande vitesse. De ce fait on a pu constater qu'il y'a deux type de FMAS guidage par l'effet de la bande interdite photonique et la deuxième obéissent à un guidage par réflexion totale et par la suite on a présenté plusieurs propriété optique de cette fibre et on a conclu que ces fibres présentent un nombre de degrés de liberté plus important que les fibres conventionnelles à saut d'indice et les propriétés de ces fibres sont plus ajustables qui entraine une multitude d'application pénitentiel et élevées.

Chapitre III : Résultats et interprétations

III.1 Introduction

La modélisation des cristaux photonique est un domaine vaste en programmation et par ailleurs elle exige des activités exigeantes et des compétences proportionnels au temps en analyse numérique.

Il existe Plusieurs méthodes de simulations pour l'étude de ces matériaux, comme la méthode des différences finies dans le domaine temporel (Finite Difference Time Domaine, FDTD), la méthode des ondes planes (Plane Wave Expansion, PWE), la méthode de la décomposition en mode propre (Eigen Mode Expansion, EME),...etc.

La méthode BPM et la méthode la plus utilisée pour La Modélisation et pour donner des structure à bande interdite photonique 2D, et les différents diagrammes.

III.2 Méthode du faisceau propage (BPM)

BPM est la méthode de propagation la plus utilisée pour la modélisation des fibres optiques, et la plupart des logiciels commerciaux pour la modélisation sont basée sur elle.

Le principe de cette technique s'agit de calculer successivement dans chaque tranche δz le nouveau profil du champ et d'une correction de phase due au milieu initial. [34]

En conclusion, elle offre la possibilité d'étudier des guides sans connaître au préalable ses propriétés modales.

De plus, la rapidité de calcul et le peu de capacité mémoire nécessaire, en raison de la discrétisation spatiale dans une seule des deux directions. [35]

III.3 Application de la méthode BPM sur les fibres microstructurées

Considérons le cas des FMAS de type RTIM Dans ce cas l'indice effectif de la gaine microstructurée est inférieur à celui du cœur.

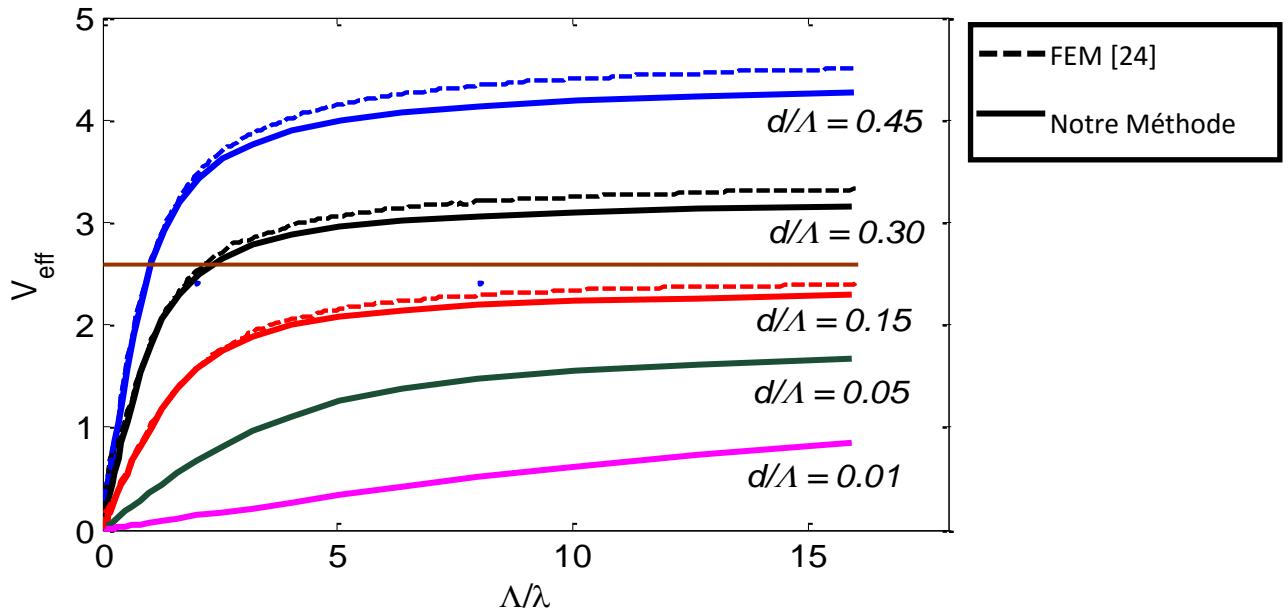
La lumière sera donc guidée par réflexion totale interne modifiée tout comme dans les fibres standards. Il est donc judicieux de chercher à définir des fibres à saut d'indice équivalentes à cette nouvelle classe de fibres.

III.4 Les paramètres des FMAS

III.4.1 La Fréquence Normalisé V_{eff}

Pour cette situation, le mode semble être bien guidé. Cependant, comme la longueur d'onde devient beaucoup plus grande, une grande partie du champ ne sera plus aussi confinée au cœur.

Nous pourrions utiliser la méthode de corrélation avec un grand domaine, mais cela pourrait être très prohibitif en termes de calcul et de temps.



**Figure III.17 : Variation de la fréquence effective
Notre méthode avec la méthode des éléments finis [24]**

Nous avons comparé les résultats de Knight et al [24] avec nos résultats, les paramètres utilisés pour cette structure sont : nombre de couche = 4 couronnes ; $\Lambda = 2\mu\text{m}$; $d = 0.8\mu\text{m}$. Nous avons utilisé comme méthode de simulation numérique la méthode des faisceaux propagés (BPM), tant que les résultats de Knight et al [24] sont simulés avec la méthode des éléments finis (FEM).

Figure III.16 montre les variations de V_{eff} en fonction de Λ/λ pour des valeurs de d/Λ s'étendant de 0,01 à 0,45.

La ligne horizontale dans le graphique indique que $V_{eff} = 2,405$.

En interprétant les résultats, notre méthode (BPM) semble presque la même allure qu'avec la méthode des éléments finis (FEM), ça prouve que notre méthode est fiable et correcte ainsi c'est la raison principale pour laquelle la suite des simulations sera basée sur cette dernière.

III.4.2 Condition du monomode

Afin d'explorer la condition monomode, nous devons résoudre le mode fondamental sur une large gamme de longueurs d'onde. Dans une fibre conventionnelle, le nombre de modes liés est régi par le nombre V , qui augmente sans limite lorsque la longueur d'onde diminue.

L'équation ci-dessus montre qu'il est possible de définir un nombre V effectif pour les FMAS qui indique raisonnablement avec précision si une fibre est monomode ou non :

$$V_{eff} = (2\pi a/\lambda) \sqrt{n_0^2 - n_{eff}^2} \quad (\text{III.1})$$

Contrairement aux fibres à saut d'indice, le V_{eff} pour un FMAS converge vers une valeur finie lorsque la longueur d'onde diminue. Si la valeur finie est inférieure à environ 2,405, alors on pourra dire que la FMAS est totalement monomode.

Interprétation des résultats

Figure III.17 La ligne horizontale représente la condition d'une fibre monomode.

Remarque : nous savons que notre fibre est monomode si V_{eff} est inférieur à 2,405 (ligne horizontale). Les géométries de fibre qui se trouvent sous la ligne sont monomodes, et une fibre avec rapport de remplissage $d/\Lambda=0,15$ sera infiniment monomode pour toutes les longueurs d'onde.

Si on compare nos courbes de simulation avec la méthode BPM à celle des résultats de Knight et al [24], on pourra dire que nos résultats sont presque égaux par rapport à la méthode des éléments finis par conséquent nos résultats sont réalistes et justes.

III.4.3 La dispersion chromatique

La dispersion est un problème très important dans les communications optiques, il est donc très avantageux de l'intégrer dans les simulations.

Tout d'abord pour calculer la courbe de dispersion de cette structure on doit calculer les modes optiques à plusieurs longueurs d'onde.

Ensuite, plusieurs paramètres de dispersion communs tels que les dérivées de la constante de propagation par rapport au vecteur d'onde k , l'indice de groupe, n_g et le paramètre de dispersion D seront calculés.

Alors la dispersion du matériau se produit parce que l'indice de réfraction du matériau change en fonction de la longueur d'onde optique.

Ce changement d'indice de réfraction peut être bien approximé par l'équation de Sellmeier :

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^M \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \quad (\text{III.2})$$

Où λ est la longueur d'onde de résonance et A_i est la force de l'oscillateur.

La définition de l'indice matière est désormais logiquement liée au longueur d'onde de simulation lorsque la valeur de la longueur d'onde est changée, les valeurs d'index changeront systématiquement selon l'équation ci-dessus (III.2)

Pour calculer la dispersion chromatique directement à l'aide des méthodes numériques (BPM), nous avons repris la structure de Rym Cherif [26] sur notre simulateur (figure III.18).

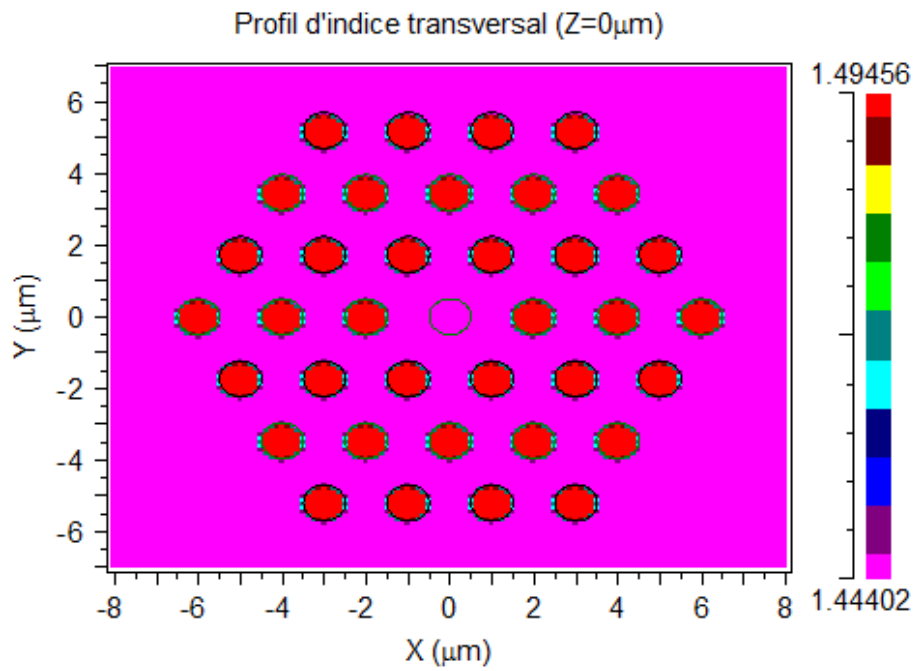


Figure III.17 : Structure de la fibre photonique

Dans la référence [26], ils ont utilisé une structure à trois couronnes avec la méthode des éléments finis (FEM), avec $\Lambda = 2\mu\text{m}$ et $d = 1\mu\text{m}$.

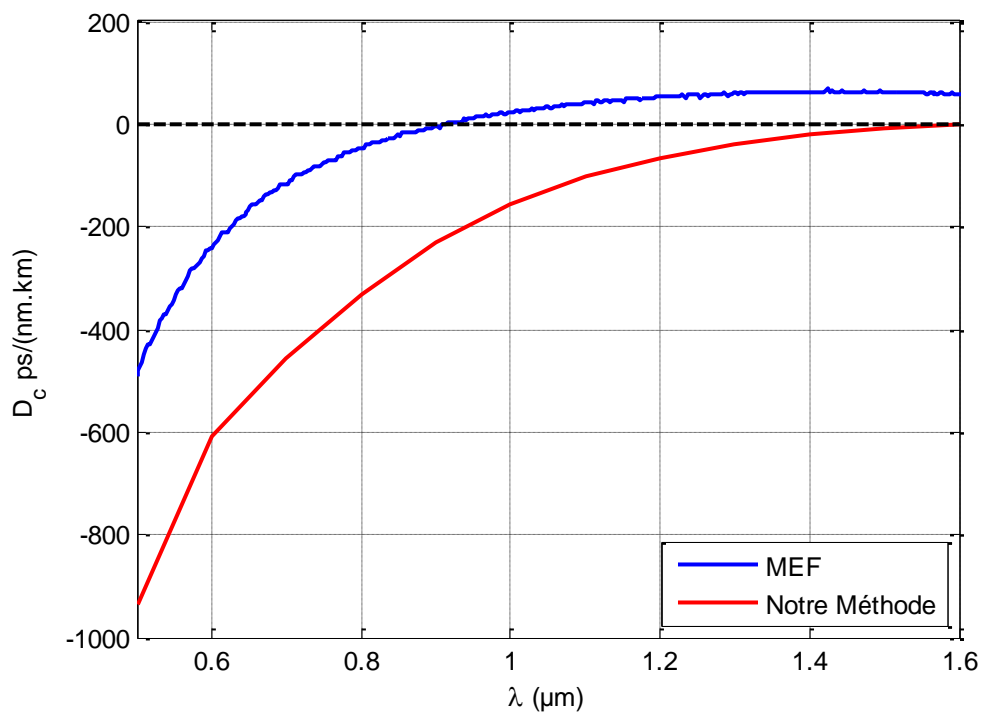


Figure III.18 : Variation de la dispersion chromatique par rapport à la longueur d'onde

La figure III.19 présente la variation de la dispersion chromatique en fonction la longueur d'onde, en bleu c'est la courbe de dispersion de Rym Cherif [26] de la méthode des éléments finis, en rouge c'est notre courbe de dispersion avec la méthode des faisceaux propagé (BPM).

La première courbe (FEM) présente un zéro de dispersion à une longueur d'onde $\lambda = 0.91\mu\text{m}$. Toutes les valeurs de dispersion qui sont supérieures à cette longueur d'onde présente une dispersion chromatique positif. Par contre, la deuxième courbe (BPM), présente une fibre photonique qui a une dispersion chromatique négatif sur la totalité de la plage de de transmission optique ($\lambda = 0.8\mu\text{m}$, $1.3\mu\text{m}$ et $1.55\mu\text{m}$).

Par l'utilisation de la méthode BPM, nous avons pu avoir une amélioration de la courbe de dispersion.

III.4.4 L'indice effectif

L'indice du cœur est supérieur à celui de la gaine des FMAS.

Elle sera donc guidée par réflexion totale interne modifiée (RTIM) tout comme les fibres conventionnel.

Il est donc judicieux de chercher à définir des fibres à saut d'indice équivalentes à cette nouvelle classe de fibres.

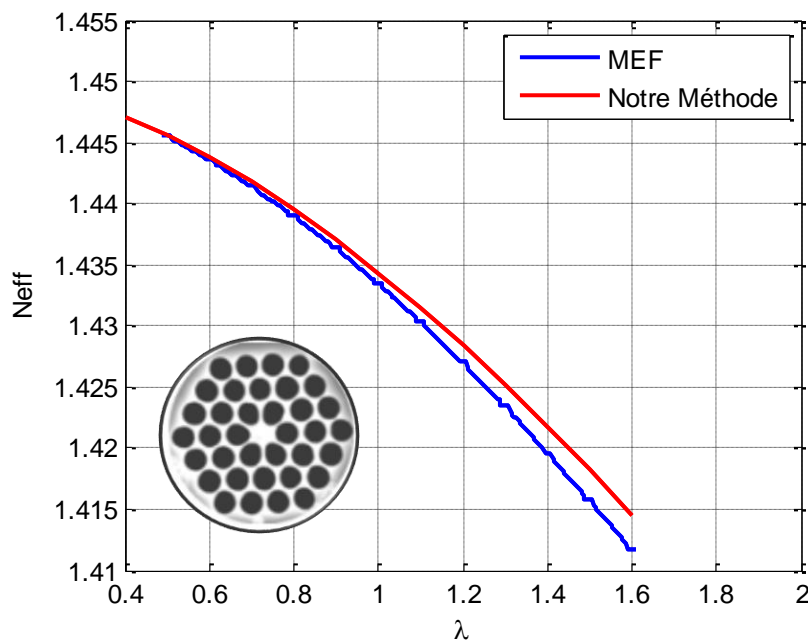


Figure III.19 : Variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde

La variation de l'indice effectif de la gaine est à la base de la compréhension du phénomène de guidage. Il représente l'indice de réfraction moyen de la gaine pondéré par la distribution

de l'intensité lumineuse dans la gaine. Cet indice dépend considérablement de la longueur d'onde.

Dans le but d'évaluer cette dépendance, l'étude de la variation de l'indice effectif d'une FMAS a été réalisée par la méthode (BPM).

En titre de comparaison, la référence [26] a utilisé une structure à 3 couches avec un diamètre des trous d'air $d=1.8\mu\text{m}$; un espacement entre les trous d'air $\Lambda =2.4\mu\text{m}$. La structure a été étudiée par la méthode des éléments finis (courbe bleue) [26]. Les résultats sont présentés dans la figure III.21.

Nous avons étudié la même structure mais en changeant la méthode de simulation numérique, la méthode sélectionnée est la BPM. Les résultats de simulations sont présentés dans la figure III.21 (courbe rouge).

Contrairement à la fibre standard, on remarque que ces résultats montrent une décroissance importante de l'indice effectif pour une augmentation de la longueur d'onde, Les résultats obtenus montrent des variations très fortes : de 1.413 à 1.4446. L'indice effectif décroît de manière linéaire lorsque la longueur d'onde augmente, comme on peut le remarquer sur la figure, $N_{\text{eff}} = 1.413$ pour une longueur d'onde de $\lambda = 1.6\mu\text{m}$.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation numérique des différents paramètres de propagations dans les fibres optiques microstructurées.

Tout d'abord, nous avons présenté la méthode BPM.

Nous avons donné le N_{eff} ainsi que la condition monomode est on est arrivé au point que la fibre microstructurée peut être totalement monomode en toute longueur d'onde.

L'indice effectif (n_{eff}) a été aussi analysé. Les variations calculées présentent ainsi une variation exponentielle qui se traduit par une droite.

Pour le problème qui est la dispersion chromatique est son impact, on a pu constater un bon résultat qui a été conclu négative par rapport à la méthode qu'on a comparé avec.

C'est résultat peuvent être interpréter a bon profil d'une FMAS suivant l'application visée pour divers domaines d'application : télécommunication, industrie, médicale...

Conclusion générale

Dans le 1^{er} chapitre on a présenté la fibre optique conventionnelle ainsi que ses paramètres et ses domaines d'application ainsi que ses avantages. Le 2eme chapitre dédié pour la fibre optique microstructure (FMAS), nous avons aussi d'écrit ces types et ces paramètres.

Nous avons présenté dans le dernier chapitre les RTIM avec méthode BPM que nous avons utilisé au cours du troisième chapitre.

Par la suite, nous avons étudié les paramètres les plus importants de fibre photonique, tel que l'indice effectif, la fréquence effectif et la dispersion chromatique qui cause un réel problème dans la fibre optique conventionnel. Malgré cet effet indésirable, nous avons pu comparer notre méthode avec la méthode des éléments finis, nous avons obtenu des très bons résultats, une dispersion négative sur la totalité des longueurs d'onde.

Pour conclure, notre but de ce projet était d'étudier et de présenter ses dernières générations de fibre optique (FMAS), ensuite de comparer leurs performances avec d'autres méthodes numériques. On conclue que cette nouvelle technologie de fibre dépasse en toute notoriété à celle de la précédente.

Bibliographie

1. **Auzel, F, Baldacchini, G.** *Radiation trapping and self-quenching*. s.l. : Laversenne, Boulon, G., 2003.
2. **AMRAOUI, MOHAMMED EL.** fibres optiques microstures chalcogenures fortement non lineaires a base de AS₂S₃ vers de nouvelles sources supercontinuum infrarouges . *these de doctorat de l'université de la bourgogne*. 2010.
3. *delayed-choice experiment to space. wheeler's, extending*. 2017, futura science.
4. *realisation d'une fontaine laser. forget, sebastien*. grenoble : s.n., 2007. congres "optique 2007".
5. **Hockham,] K. C. Kao and G. A.** *Dielectric-fibre surface waveguides for optical*. Hong KONG : proc IEEE, 1996. pp. 1151-1158.
6. **Robert Maurer, Peter Schultz et Donald Keck.** INDUSTRIE-TECHNO . [En ligne] 01 12 2008. [Citation : 28 06 2021.] <https://www.industrie-techno.com/article/la-fibre-optique-a-faible-attenuation-voit-le-jour.18317>.
7. **Maurer R., Beck D., Schultz P.** *Optical wave guide Fibers*. US : Patent N°3711262 , 1970.
8. *Directions in Optical Fibers. K.L. WALKER, AT&T.* 1990, TECHNICAL JOURNAL, p. 6.69.92.100.
9. **MEBAREK.Z, SIDI ALI.** *Telecommunication optique*. s.l. : 2 11 4216 2.1-2.17, 2001.
10. **JM, caussignac.** *les fibres optiques 'instrumentation de mesures'*. paris : 89-90, 2002.
11. **M. Thual, D. Malarde, B. Adherve-guegen, P. Rochard.** *Truncated Gaussian Beams through microlenses based on a graded-index section, Optical Engineering*. s.l. : 46(1), 2007.
12. **FERDINAND, Pierre.** "Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg." *Techniques de l'ingenieur mesures et controle*. s.l. : R6735-1, 1999.
13. **SAIDI, RIADH.** , ETUDE D'UNE STRUCTURE DE LIAISON PAR FIBRE OPTIQUE : CARACTERISATION DE LA PROPAGATION ET BILANENERGETIQUE,. *Mémoire de magister* . 2009.
14. **Hana, Boudemagh.** IMPACT DE LA DISPERSION CHROMATIQUE SUR LA TRANSMISSION SUR FIBRE OPTIQUE SIMULATION PAR COMSIS . *Mémoire de fin d'étude master Informatique Industrielle*. OUM EL BOUAGUI : s.n.
15. **Laferrière, J. et al.** *guide to fiber optic testing. JDS Uniphase Corporation*. 2007.
16. **Zahoum, Hachemi.** Etude Et Simulation d'une Chaîne De Transmission Pour Un Débit De 40 G.Bit/S. . *Mémoire De Master 2*. 2016.
17. **D, RINALD-MAREEL.** *AMELIORATION DES PROPRIETES OPTIQUES*. 2005.
18. **Hayes, Jim.** *Fiber Optics Technician's* . s.l. : .DelmarCengage Learning, , 2000.
19. **Senior, John.** *Optical fiber communications principles and practice third* . s.l. : Prentice Hall, pp 116-125 , 2008.

20. **Irène et Michel Joindot.** *Les télécommunications par fibres optiques.* s.l. : Dunod, (1996).
21. **Pierrelecoy.** *Communication Sur Fibres Optiques .* Lavoisier paris : Parisisbn : 978-2-7462-4660-7 , 2015.
22. *Bell System Technical Journal*,. **Kaiser, P.** HW Astle : Wiley Online Librar, 1974 .
23. **OTMANI, Hamza.** Doctorat troisième cycle En électronique . *Etude théorique des propriétés magnéto-optiques de cristaux magnéto photoniques à structure ferrite grenat de bismuth (BIG).* 2014.
24. **J.C. Knight, T.A. Birks, P.St.J. Russel et D.M. Atkin,** «. *All-Silica Single-MODE OPTICAL FIBER WITH PHOTONIC CRYSTAL Cladding.* s.l. : opt lett 21(19) pp 1547-1549, 1996.
25. **F.BAHOUL.** ETUDE DES FIBRES OPTIQUES MICROSTRUCTURES AIR/SILICE ET DE LEURS APPLICATION AUX SYSTEME DE TELECOMMUNICATION. *THESE DOCTORAT .* 2006.
26. ., **Rim Cherif.** Thèse Doctorat . *Des Effets Non-Linéaires Dans Les Fibres A Cristaux Photoniques.* A Carthage : s.n., 2009.
27. **Roy., Philippe.** "Fibres à cristal photonique: 10 ans d'existence et un vaste champ d'application. s.l. : 71-80, 2007.
28. **GERARD, DAVY.** ETUDE EN CHAMP PROCHE ET EN CHAMP LOINTAIN DE COMPOSANTS PERIODIQUEMENT NANO STRUCTURES : CRISTAUX PHOTONIQUES ET TAMIS A PHOTONS . *Thèse de doctorat.* Université de Bourgogne : s.n., 09 juillet 2004.
29. **B. J. Eggleton, P. S. Westbrook, R. S. Windeler, S. Spälter, and T. A.Strasser.** *grating resonaasin air-silica microstructures optical fibers.* s.l. : Opt lett vol 24 no 21 pp , 2006.
30. **[20] L. Labonté, D. Pagnoux.** "Analyse théorique et expérimentale des principales caractéristiques du mode fondamental dans les fibres optiques microstructures . *these doctorat.* limoges : s.n., 17 octobre 2005.
31. **Sakai J.I., Kimura T."** *Bending loss of propagation modes in arbitrary- index PROFILE OPTICAL FIBRES .* s.l. : APPLIED OPTICS VOL 17 N 10, 1978.
32. **HILAIRE, Stéphane et "Conception, fabrication et caractirisation de fibres.** "Conception, fabrication et caractirisation de fibres microstructure doppées erbium pour application aux amplificateur optique . *these.* limoges : s.n., 2004.
33. **walidAbdeljallil., LABIDI.** «Etude des fibres microstructurées Aire/silice à réseau circulaire. *these doctorat.* s.l. : el ouadi, 2014.
34. **BENAISSA, Fatima.** Etude et Simulation des Ondes Electromagnétiques dans les guides d'Ondes à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques. *these doctorat.* DISS : s.n., 2013.
35. **Bontoux, P.** Conception, réalisation et test de systèmes d'interconnexions optiques. *Thèse de doctorat.* école centrale de Lyon : s.n., (2003).

