



N° d'ordre :
N° de série :

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

CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE
Département D'électronique

Mémoire de fin d'études présenté
Pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et techniques**
Filière : **Electronique**
Spécialité : **Télécommunications**

Présenté par : **LABIDI WALID Abdeljallil**

Etude des fibres microstructurées Aire/silice à réseau circulaire

Soutenu le 24 juin 2014

Devant le jury composé de :

M.	SAID GHENDIR	MAA.	Président
M.	ALI CHEMSA	MAA	Examinateur
M.	RIADH AJGOU	MAA	Examinateur
M.	ABDELKADER MADJOURI	MAA	Directeur du mémoire

2013-2014

Remerciement

*Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux,
qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*Je voudrais remercier en premier lieux mon père et ma mère pour leur soutien
et leur patience et leurs encouragements tout au long de mes études*

*Albert Einstein a dis : c'est le rôle essentiel du professeur d'éveiller la joie
de travailler et de connaître.*

*Sur ce je tiens à exprimer particulièrement ma gratitude à mon professeur
et mon encadreur Monsieur Abdelkader Madjouripour son précieux conseil
et son aide durant toute la période du travail de mon projet de fin d'étude*

*Un grand merci à vous monsieur Ali Chamsa et vous
monsieur Said Gendire pour votre aide votre soutien tout au long de mes
deux années passé au sein de ce département*

*Sans oublié tout mes professeurs qui m'ont enseigné et évalué et aidé à
avancer*

*Je voudrais enfin remercier tous ceux qui ont contribué d'une façon ou d'une
autre a la réalisation de ce travail*

Merci à tous



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail aux deux lumières de mon chemin à mes très chère parents qui ont largement contribué à mon éducation et à mon enseignement. À mes grands parents paternels et maternels, mes chères sœurs, mes oncles, tantes, cousins et cousines

À toute ma famille, À toute personne qui a participé de près ou de loin pour l'accomplissement de ce modeste travail.

. À tous mes amis avec qui j'ai partagé les plus beaux et inoubliables moments de ma vie,

À toutes les personnes qui m'ont connu, soutenu et aimé.

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Sommaire.....I

Liste des figuresIII

Introduction générale1

Chapitre 1

1. Introduction	4
2. Historique	5
3. Structure d'une fibre optique	6
4. Types de fibres optiques	7
4.1.Fibres monomodes	7
4.2.Fibre multimode	8
4.2.1. Fibres à saut d'indice	8
4.2.2. Fibres à gradient d'indice	9
5. Les applications et les avantages de la fibre optique	9
6. Fibres micro-structurées	10
7. Géométrie d'une FMAS	10
8. Fibres optiques micro-structurées silice	12
9. Deux types de guidage	14
9.1. Guidage par bande interdite photonique (BIP)	14
9.2. Guidage par réflexion interne totale modifiée	16
10. Fabrication	17
11. Application	21
11.1. Lasers, amplificateurs.....	22
11.2. Capteurs	23
12. Conclusion :	24

Chapitre 2

1. Introduction	26
2. Généralités sur les cristaux photoniques	26
3. Définition des cristaux Photoniques	27
4. Caractère indéfiniment monomode	27
5. Dispersion chromatique	29
6. Aire effective	32
7. Perte par courbure	34
8. Pertes de confinement	34
9. Conclusion	36

Chapitre 3

1. Introduction	38
2. Structure.....	38
3. Résultats de simulations.....	39
4. Effet de la courbure.....	42
5. Simulation sur une fibre microstructure aire/silice pour différente valeur de diamètre du cœur en silicone	46
6. Conclusion	52
Conclusion générale.....	54

Bibliographie

Résumé

Liste des figures

Chapitre 1

Figure (I-1): Constitution d'une fibre.....	6
Figure (I-2) : Topologie d'une fibre optique monomode.....	7
Figure (I-3) : Fibre à saut d'indice.....	8
Figure (I-4): Fibre multi mode à saut d'indice.....	9
Figure (I-5) : Fibre à gradient d'indice.....	9
Figure(I.6) : Représentation géométrique d'une fibre microstructure.....	11
Figure(I.7): Représente un exemple de fibre microstructurées à cœur solide.....	12
Figure (I.8): Représentation qui explique le principe de fabrication d'une fibre microstructure ..	13
Figure (I.9): Schéma de sections transverses (a) d'une fibre de Bragg, (b) d'une FMAS BIP à arrangement triangulaire et (c) hexagonal	15
Figure (I.10) Arrangement de la préforme primaire.....	18
Figure (I.11) Canne micro-structurée, préforme secondaire et FMAS.....	19
Figure (I.12): Exemple d'image de la section transversale d'une fibre réalisée à l'ircom.....	20
Figure (I.13): Figure Pertes optiques (gauche) de deux fibres (photos) réalisées à partir de la même préforme mère. Trace OTDR (droite) pour 800m de la fibre de faible aire effective.....	22
Figure (I.14): Amplification Raman (a) et génération de super continuum (b) dans les fibres microstructurées de faibles aires effective et faibles pertes.....	22

Chapitre 2

Figure (II.1): Comportement modal des FMAS en fonction de a/λ pour différents d/Λ	28
---	----

Figure (II.2): (a) Distribution du mode fondamental pour une FMAS ($d=1.8\mu\text{m}$; $\Lambda=2.4\mu\text{m}$) pour $\lambda=1550\text{nm}$ (b) Distribution modale pour la même FMAS pour $\lambda=980\text{nm}$	29
Figure (II.3): Variation de la dispersion chromatique en fonction des paramètres optogéométriques de la FMAS.....	31
Figure (II.4): (a) FMAS à large aire modale ($\Lambda=5\mu\text{m}$; $d/\Lambda=0.2$). (b) FMAS à petite aire modale ($\Lambda=5\mu\text{m}$; $d/\Lambda=0.7$).....	32
Figure (II.5): Aire effective en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de d/Λ	33
Figure (II.6): Pertes de confinement de FMAS RTI à 1550 nm en fonction de d , (a)) et du nombre de couronnes de trous (b)).....	35

Chapitre 3

Figure(III.1): Représentation d'une fibre optique microstructure a réseau circulaire avec un cœur en silice	39
Figure (III.2) : La variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs Λ	40
Figure (III.3) : La variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs Λ	40
Figure (III.4) : La variation des pertes en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs Λ	41
Figure (III.5): La variation de l'aire effective en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs Λ	42
Figure (III.6): La variation de l'aire effective en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs Λ avec une courbure de 50 cm	42
Figure (III.7): La variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs Λ avec une courbure de 50 cm	43

Figure (III.8): La variation des pertes en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs Λ avec une courbure de 50 cm	44
Figure (III.9): La variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs Λ avec une courbure de 50 cm	45
Figure (III.10): Schéma qui représente une fibre microstructure avec un cœur en silicone.....	46
Figure (III.11): Courbe qui représente la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de diamètre du cœur	47
Figure (III.12): Courbe qui représente des pertes en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de diamètre du cœur	48
Figure (III.13): Courbe qui représente l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de diamètre du cœur	49
Figure (III.14): Courbe qui représente l'aire effective en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de diamètre du cœur	50
Figure (III.15): Courbe qui représente la non linéarité en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de diamètre du cœur	51

Introduction générale

Introduction

Les premières expériences de transmission optique datent de la fin du XIX^{ème} siècle avec la modulation de l'intensité de la lumière par un signal acoustique. Faut-il dire que ne pas savoir guider efficacement la lumière jusqu'au destinataire, ces moyens ne sont pas développés pour la transmission, mais donnent naissance à l'enregistrement optique du son.

Utilisant le principe connu depuis longtemps des fontaines lumineuses, les fibres optiques, minces cheveux de verre très transparents, ont fait l'objet d'applications décoratives, puis plus utilitaires (éclairage et endoscopie où l'atténuation n'est pas un paramètre critique). À partir de 1000dB/Km en 1960, l'atténuation est descendue à 20 dB/Km en 1975, puis 0,2dB/Km en 1984. Le développement nous a permis actuellement de fabriquer des fibres ayant une atténuation inférieure à 0,2 dB/Km.

Le développement et l'apparition du laser depuis 1960 nous a permis d'envisager la transmission d'information à distance, sur le principe des faisceaux hertziens, à des fréquences beaucoup plus élevées (de l'ordre de 10^{14} Hz).

Déjà envisagées par les théoriciens, les transmissions sur fibres optiques deviennent un objectif réaliste à partir de 1966 lorsque furent fabriquées les premières fibres de silice.

Dans le développement spectaculaire le domaine des télécommunications a été rendu possible grâce à la maîtrise des diodes lasers à semi-conducteur, qui allient les performances des lasers à la facilité d'emploi des composants électroniques, et grâce aux progrès dans la technologie de fabrication des fibres optiques, permet une très faible atténuation et une résistance mécanique suffisante.

Malgré les nombreux avantages que présentent les fibres conventionnelles (classiques), on peut retrouver plusieurs défauts majeurs que nous ne pouvons pas les ignorer tels que la dispersion chromatique, ou principalement l'aspect multimodal qui présente un handicap considérable pour les transmissions à longue distance, où il est nécessaire d'élargir le cœur pour transmettre des données à des distances éloignées mais qui rendent les fibres plus monomodales. C'est en essayant d'éliminer ses inconvénients qu'il y a eu la naissance d'une nouvelle famille de fibre optique appelée fibre microstructurée.

Introduction générale

Pour comprendre cette nouvelle fibre nous allons expliquer les fibres conventionnelles dans le 1^{ier} chapitre et exposer son principe de fonctionnement et les différents composants que comportent les fibres optiques. Nous verrons que les fibres que nous étudions se rapprochent des fibres classiques, mais en éliminant leur faiblesse, comme nous allons le voir dans le 3^{ième} chapitre. Pour terminer le 1^{ier} chapitre, nous allons expliquer les paramètres des fibres microstructurées et comment il influe sur la lumière, le 1^{er} chapitre a été rédigé en guise d'introduction pour comprendre cette nouvelle fibre qui a vu le jour en 1996.

Dans le 2^{ième} chapitre on essaye d'expliquer le comportement de cette fibre et ses effets linéaires et non-linéaires. Nous allons étudier la dispersion chromatique et les pertes qui influent sur les fibres microstructurées sur le flux lumineux et les dégâts qu'elle peut engendrer sur la lumière ou sur l'information dans le cas d'une transmission de données.

Cette nouvelle fibre est un mélange entre une fibre verre/air comme nous pouvons le constater dans le chapitre 1. On peut retrouver d'autres types de fibres microstructurées comme les fibres optiques microstructurées à base de chalcogénures. Les fibres microstructurées air/silice ont une structure bien spéciale qui les caractérise, elle possède des trous d'air dans une matrice de silice, qui va nous permettre de confiner les faisceaux lumineux dans le cœur et éliminer les modes non fondamentaux et réduire l'effet non linéaire de la fibre. Cependant, la dispersion des trous n'est pas conforme à des règles précises; seule l'imagination est maîtresse de la disposition des trous, pour cette raison nous allons choisir dans notre 3^{ième} chapitre de disposer les trous de façon circulaire.

Tout au long de notre étude nous avons appris que la lumière se propage particulièrement dans des matériaux avec l'indice le plus élevé, c'est pour cela que nous avons changé en guise d'application de remplacer le cœur de notre fibre en silice par un cœur avec un indice plus élevé en silicium. C'est dans la 3^{ième} partie de la simulation du troisième chapitre.

chapitre 1: généralité sur les fibre optique
chapitre 1: généralité sur les fibre optique

Chapitre 1: Généralités sur les fibres optiques

1. Introduction

Fibres microstructurées, fibres à trous, fibres à cristaux photoniques ou à bandes interdites photoniques... autant d'appellations qui désignent cette jeune branche pourtant vaste de la famille des fibres optiques, qui a vu le jour en 1996 et qui s'est depuis imposée comme une technologie incontournable en photonique [1][2]. L'originalité de ces guides d'onde provient de leurs mécanismes de confinement de la lumière qui reposent sur la périodicité de leur profil d'indice. Cette dernière, va permettre, dans certains cas, d'utiliser l'air pour propager la lumière dans un cœur de verre ou d'air [2]. Arrivées à maturité aujourd'hui, ces fibres optiques permettent d'envisager une amélioration significative des composants existants comme ceux qui sont utilisés pour le transport de données jusqu'à l'abonné (pour la télécommunication) leur caractéristique spécifique et leur pouvoir de transporter la lumière sans beaucoup de dommage les place en tête pour prendre les rennes de la transmission optique bien devons les fibre classique ou autrement dis "fibre conventionnel" c'est pour cela que dans notre chapitre nous avons commencé par une introduction et une brève explication des fibres classiques, mais leur utilité n'est pas seulement confiné au système de télécom on peut les retrouvé dans plusieurs domaine comme la métrologie optique. Elles sont également des candidates sérieuses au développement de sources de puissance pour l'industrie ou de sources fibrées de lumière blanche pour les applications médicales [1].

2. Historique

En 1854, le physicien irlandais Tyndall a fait une première démonstration scientifique de ce phénomène dont l'expérience consistait à guider la lumière du soleil dans un jet d'eau.

En 1950, la première application fructueuse de la fibre optique a eut lieu avec le fibroscope flexible, permettant de transmettre une image le long d'une fibre de verre. Il fut particulièrement utilisé en endoscopie pour observer le corps humain. Cependant, la mauvaise qualité des fibres ne permettait pas de transmettre la lumière sur une longue distance.

A partir de 1970 les télécommunications par fibre optique ne furent possibles qu'après l'invention du laser et les fibres commencèrent à remplacer les fils de cuivre jusque là utilisés, grâce à la fabrication par trois scientifiques de la société Corning Glass Works de la première fibre avec des pertes acceptables (20 dB/km). Cette fibre était en mesure de transporter 65 000 fois plus d'information que le simple fil de cuivre traditionnel. L'avantage des fibres optiques sur les fils de cuivre est énorme. Tout d'abord, les fibres permettent de transporter une grande quantité d'information en même temps, grâce à une grande largeur de bande. De plus, le signal est beaucoup moins atténué (~100 fois moins), ce qui permet de limiter le nombre de répéteurs. [3]

Et depuis les années 1980, la structure de ces fibres est très simple : un cylindre en silice dont le cœur est dopé avec un oxyde de germanium. Les dimensions d'une fibre sont comparables à celles d'un cheveu.

En 1996 un nouveau type de fibre apparait appelé la fibre microstructurée, fibres à trous, fibres à cristal photonique ou à bandes interdites photoniques autant d'appellations qui désignent cette jeune branche pourtant vaste de la famille des fibres optiques

Enfin, les fibres optiques ne demandent pas d'entretien particulier et ont une très bonne durabilité chimique, alors que les fils de cuivre se dégradent vite à cause de la corrosion. Aujourd'hui, 80% des communications à longue distance se font par le réseau de fibres optiques [4].

3. Structure d'une fibre optique

La fibre optique la plus simple est obtenue à partir d'un tube et d'une barre de verre montés concentriquement de matériaux diélectriques (silice, plastique) d'indices de réfraction différents. L'ensemble est chauffé pour assurer l'homogénéité. Alors il suffit d'un barreau de verre d'un mètre de longueur et de 10 cm de diamètre pour obtenir une fibre monomode de 150km de longueur. Au final, le diamètre de la fibre est d'environ 125 μm et le cœur d'indice n_1 est placé au centre d'une gaine optique d'indice n_2 ($n_2 < n_1$) appelée « manteau » (cladding). Par ailleurs cette gaine en verre et de protection extérieure, permet un meilleur vieillissement (contrainte mécanique, humidité ...) et elle est à son tour enrobée d'un revêtement de protection (230 μm) Le câble final peut être composé d'un ou de plusieurs brins [3][4].

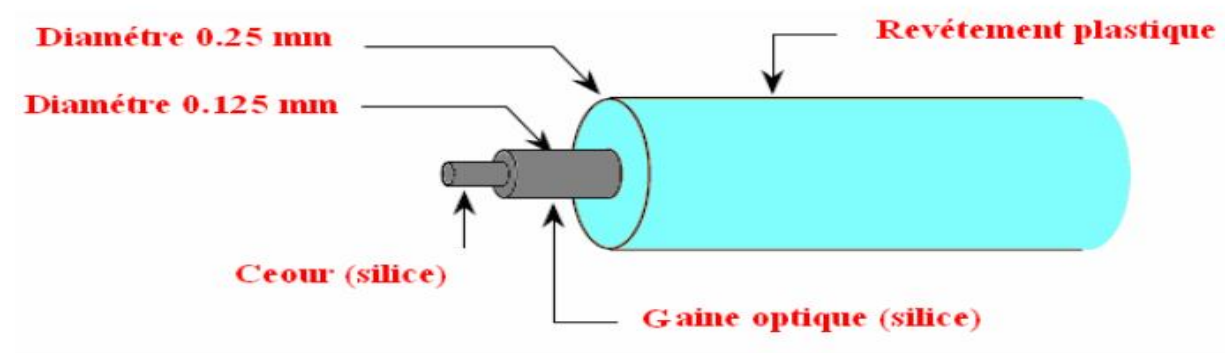


Figure (I-1): Constitution d'une fibre

On appelle profil d'indice la variation de l'indice de réfraction suivant une coupe transversale de la partie optique de la fibre. Les deux types de profil couramment utilisés sont les profils à saut d'indice et à gradient d'indice [3].

Quelques grandeurs :

-La valeur des indices pour une fibre silice : 1,45

-Écart entre les indices [3]:

$$\Delta = \frac{n(\text{cœur}) - n(\text{gaine})}{n(\text{cœur})}$$

Approximativement égal à 1%

Chapitre 1: Généralités sur les fibres optiques

-Dimension du cœur : 5 à 50 μm .

- Dimension de la gaine : 125 à 500 μm .

Le signal lumineux est propagé dans et à proximité du cœur, la gaine optique sert essentiellement à empêcher la lumière de s'échapper, pour des raisons mécaniques, le revêtement sert à protéger la fibre optique

4. Types de fibres optiques

4.1. Fibres monomodes

Une fibre monomode (silice dopée) dont le cœur est proche de la longueur d'onde (cœur $\approx \lambda$) donc la propagation de la lumière est rectiligne, au centre. Les fibres optiques sont des guides d'ondes ou la propagation des signaux lumineux se décrit au moyen de modes de propagation, chaque mode étant une solution spécifique de l'équation d'onde [5][6]

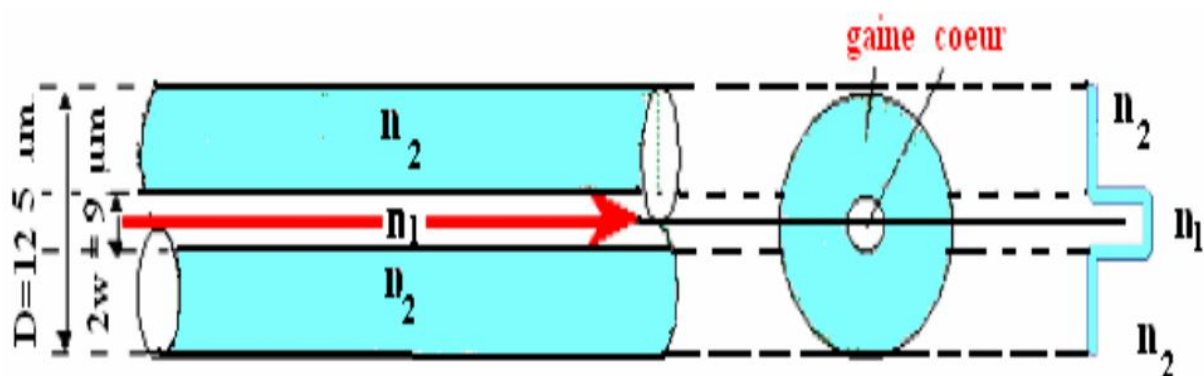


Figure (I-2) : Topologie d'une fibre optique monomode

4.2. Fibre multimode

La fibre multimode a été la première utilisée. Elle est facile à utiliser (gros cœur \sim tolérances élevées) mais a une limitation intrinsèque de bande passante. En plus elle est la plus employée pour les réseaux privés.

Dans cette famille de fibre, nous trouvons deux sous catégories

Chapitre 1: Généralités sur les fibres optiques

4.2.1. Fibres à saut d'indice

C'est le passage abrupte du cœur vers la gaine qui définit les fibres à saut d'indice. Le principe de fonctionnement de la fibre est basé sur la réflexion totale interne. Notant n_f et n_g , les indices du cœur et de la gaine de la fibre respectivement,

$$|\sin(i_1)| \geq \frac{n_g}{n_f}$$

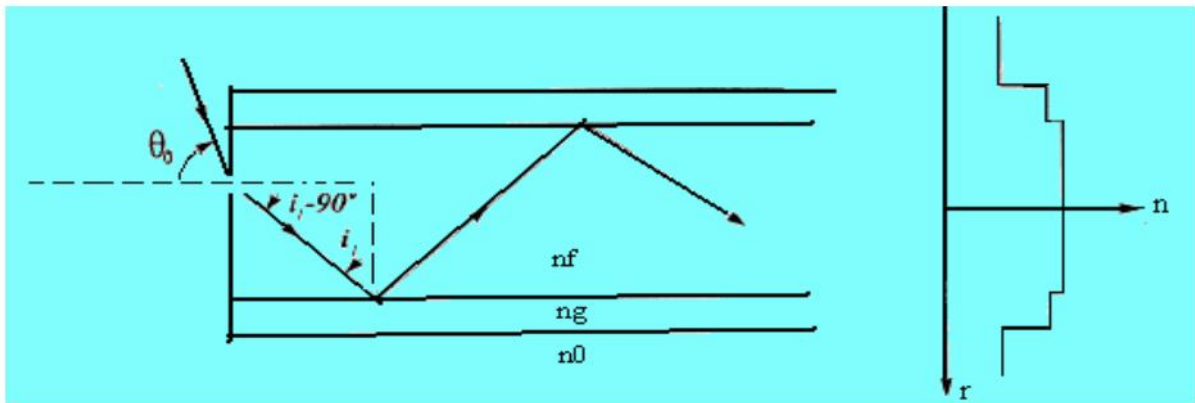


Figure (I-3) : Fibre à saut d'indice

La loi de Snell-Descartes, permet d'établir facilement la restriction suivante, qui s'applique à l'angle d'incidence θ_0 sur le bout de la fibre, pour que la lumière injectée dans celle-ci y reste confinée:

$$|n_0 \sin(\theta_0)| \leq (n_f^2 - n_g^2)^{1/2}$$

n_0 : L'indice du milieu dans lequel baigne la fibre

$\text{MAX}(n_0 \cdot \sin(\theta_0))$: "Ouverture numérique" (O.N.)

Ce qui donne :

$$\text{ON} = (n_f^2 - n_g^2)^{1/2}$$

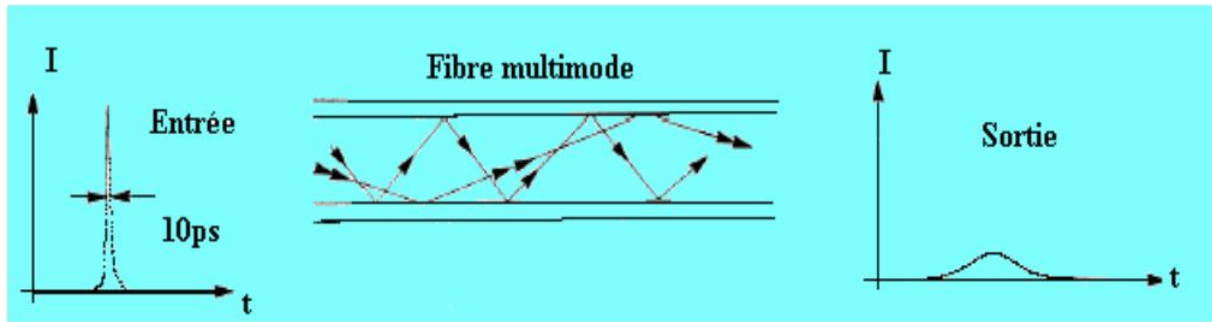


Figure (I-4): Fibre multi mode à saut d'indice.

4.2. 2. Fibres à gradient d'indice

L'indice de réfraction cœur/gaine présente une courbe parabolique avec un maximum au niveau de l'axe. Les rayons lumineux suivent un parcours sinusoïdal. Les diamètres les plus fréquents sont $62.5\mu\text{m}$ et $50\mu\text{m}$. [4]

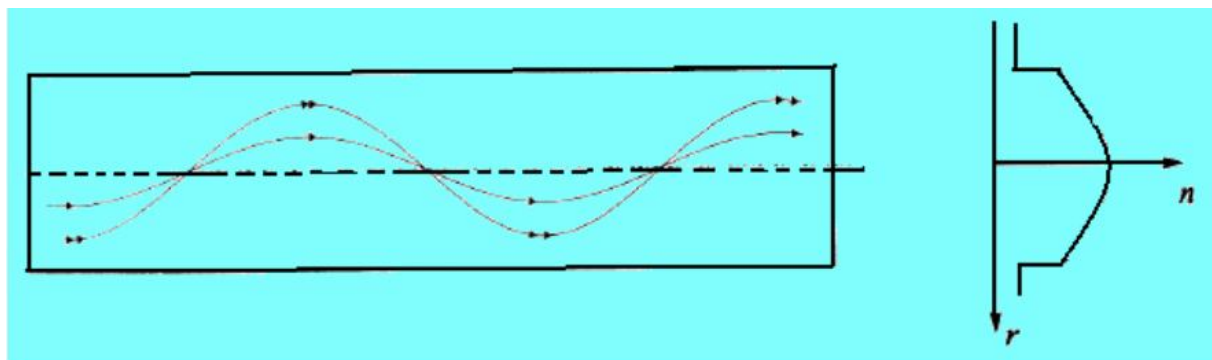


Figure (I-5) : Fibre à gradient d'indice

Car elles ont une capacité de transmission de données beaucoup plus élevée que les fibres à saut d'indice: 100 Mbits/s sur une distance de 100 km, la première génération de systèmes de télécommunications optiques à grande distance était basée sur des fibres à gradient d'indice.

5. Les applications et les avantages de la fibre optique

A la fin des années 90, le secteur des télécommunications a connu une croissance rapide et la capacité de transmission doublait à chaque année, ce qui mène vers un plafonnement des performances des réseaux commerciaux, qui est le résultat d'une tendance à la saturation de la demande. La plupart des technologies nécessaires au déploiement d'une

Chapitre 1: Généralités sur les fibres optiques

infrastructure "tout optique" sont aujourd'hui disponibles : la fibre optique, de plus en plus performante en bande passante, le multiplexage en longueurs d'onde WDM (wavelength division multiplexing), DWDM (dense wavelength division multiplexing), l'insertion/extraction de longueurs d'onde, les amplificateurs large bande, le brassage optique

Dans ces conditions, le panorama de l'information aura complètement changé. La téléphonie, la radio, la télévision et les transferts de données "informatiques" seront assurés par la même connexion, les interpénétrations de ces divers moyens d'informations seront beaucoup plus grands, c'est du moins un scénario tout à fait réaliste.

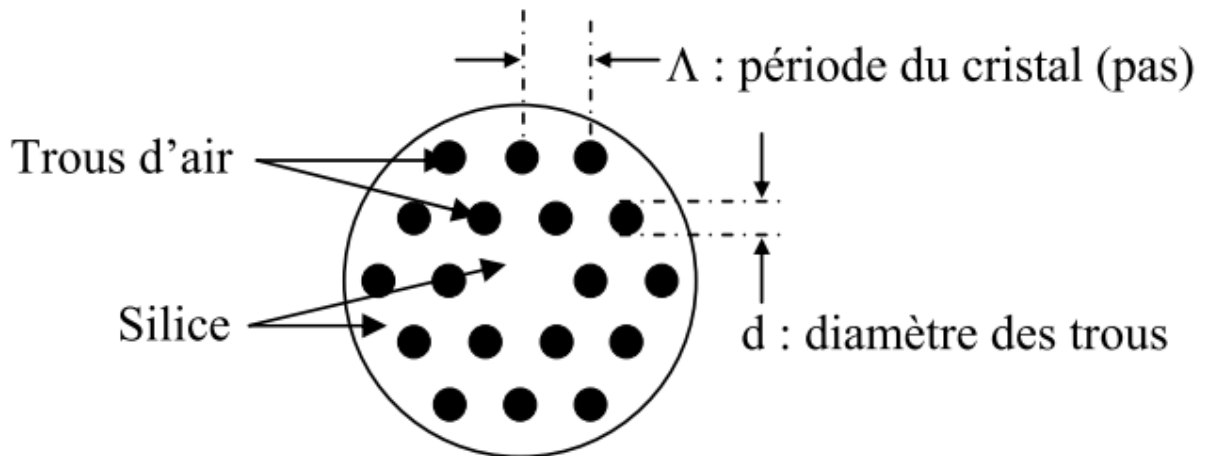
Donc établir un réseau de télécommunications par fibre optique fait appel à de nombreuses compétences comme on a pu le voir , et l'optimiser tant au niveau des performances que du coût demande des évolutions et avancées notables dans des domaines aussi variés que la fabrication, la physique , l'informatique , l'optique ..[7]

6. Fibres Microstructurées Aire/Silice (FMAS)

Les fibres optiques microstructurées, dites fibres de nouvelle génération, procurent des propriétés optiques très attrayantes grâce à l'interaction des champs guidés avec les inclusions (trous ou encore capillaires) présentes dans leur structure. Une très grande liberté dans leur design se répercute au niveau de leurs propriétés physiques[1]. Effectivement, la taille des trous, leur périodicité, leur disposition et leur forme permettent une multitude de combinaisons donnant lieu à des propriétés physiques toutes aussi multiples. Ainsi ces propriétés vont pouvoir donner lieux à un très grand nombre d'applications dans les domaines aussi différents que militaire, médical ou encore en télécommunication.

7. Géométrie d'une FMAS

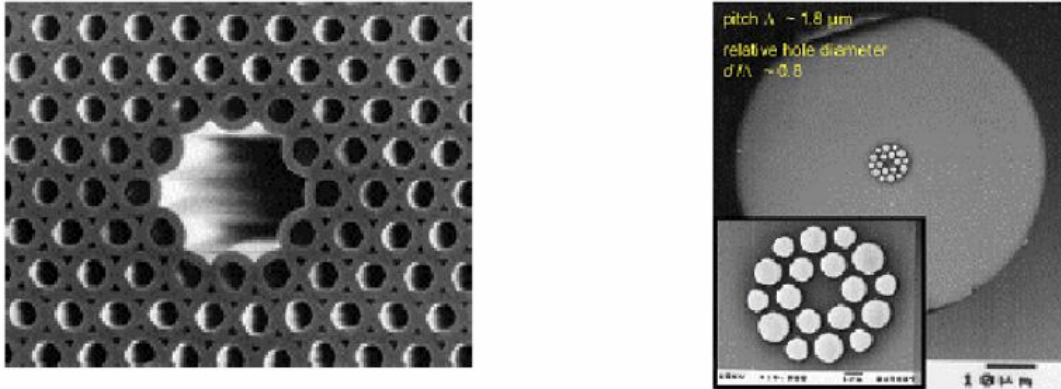
Les fibres microstructurées sont constituées d'un arrangement de trous (généralement d'air) sur la section transverse de la fibre Cette structure est supposée être invariante le long de l'axe de la fibre. Les paramètres qui caractérisent cet arrangement et déterminent leurs propriétés optiques sont définis par la Figure suivante :



Figure(I.6) représentation géométrique d'une fibre microstructure

Les deux paramètres principaux sont l'écartement entre les centres de deux trous adjacents (pas ou pitch) Λ et le diamètre du trou d qui permettent de définir le rapport d/Λ le facteur de remplissage correspondant à la fraction d'air présente dans la fibre. Le nombre de rangées ou de couronnes de trous utilisé pour former la gaine microstructurée (zone de silice contenant les trous) est également un critère important pour réduire les pertes de guidage. La Figure schématise une coupe transverse d'une fibre FMAS où les trous d'air sont arrangés en réseaux triangulaires. La gaine microstructurée contient deux couronnes de trous d'air. En effet, la disposition des trous peut être sous forme triangulaire, circulaire, hexagonale ou aléatoire. La région centrale est considérée comme un cœur optique. Elle est caractérisée par l'absence d'un trou ou plusieurs au centre de la structure[7][8].

Il existe deux types de fibres microstructurées dont les mécanismes de guidage diffèrent suivant la nature du cœur. Les fibres à bande interdite photonique, constituées d'un cœur creux, présentent un mécanisme de guidage par bande interdite photonique. Pour les FMAS, le cœur est solide et le guidage se fait par réflexion totale interne modifiée. Un exemple de ces fibres est présenté par la Figure suivante. Nous nous sommes intéressés le long de ce travail à l'étude de ce dernier type de fibre.



Figure(I.7): représente un exemple de fibre microstructurées à cœur solide

Dans les deux cas, le guidage est lié à la microstructure des fibres plutôt qu'à la différence de composition chimique entre la gaine et le cœur. Les FMAS sont différents des fibres conventionnelles par leur grande flexibilité structurelle et leur fort contraste d'indice. La présence de trous, ordonnés ou pas diminue l'indice de réfraction effectif de la gaine[9],

Confinant plus ou moins fortement la lumière dans le cœur solide. L'indice effectif de la gaine varie très fortement en fonction de la longueur d'onde, ce qui génère des propriétés spectrales uniques. Suivant l'arrangement des trous, il est possible de modifier «à la carte» leurs propriétés de comportement modal, de dispersion chromatique et de non linéarité. Les FMAS ouvrent ainsi la voie à une ingénierie de la dispersion, de la polarisation et de la non linéarité. Le développement de fibres microstructurées en matériaux non silice (plomb silice, tellurite, bismuth oxyde) a été tenté récemment en raison des propriétés non linéaires de ces matériaux. Des fibres ont également été réalisées en polymère.

8. Fibres optiques microstructurées silice

Ce qui a suscité l'intérêt des chercheurs avec cette nouvelle génération de fibres ayant une structure particulière, est leur capacité à pouvoir travailler à des longueurs d'ondes autres que la gamme réservée pour les fibres optiques conventionnelles pouvant atteindre plus de 20 μm suivant les verres utilisés. Les qualifiant ainsi de fibre à cristaux phoniques, donné par Russell en 1996. Tout commença en 1973 avec les travaux théoriques de Kaiser et ses collaborateurs qui suggérèrent l'utilisation d'une fibre micro structurée silice dans le but de modifier les propriétés de guidage de la fibre. La première fibre optique associée à une micro-structure a été réalisée par Russell et ses collaborateurs en 1996 impliquant la mise en place d'une vraie technique de conception marquante pour les études qui vont suivre sur ce type de fibre. Cette

Chapitre 1: Généralités sur les fibres optiques

méthode représentée sur la figure suivant parti. a, se nomme 'Stack and draw'. Celle-ci consiste à l'assemblage de tubes de diamètres identiques d_n , périodiquement séparés d'une valeur Λ comme cela est visible sur la figure suivant parti.b. La modification de ces deux paramètres permet de changer les paramètres de dispersion et de non-linéarité de la fibre.

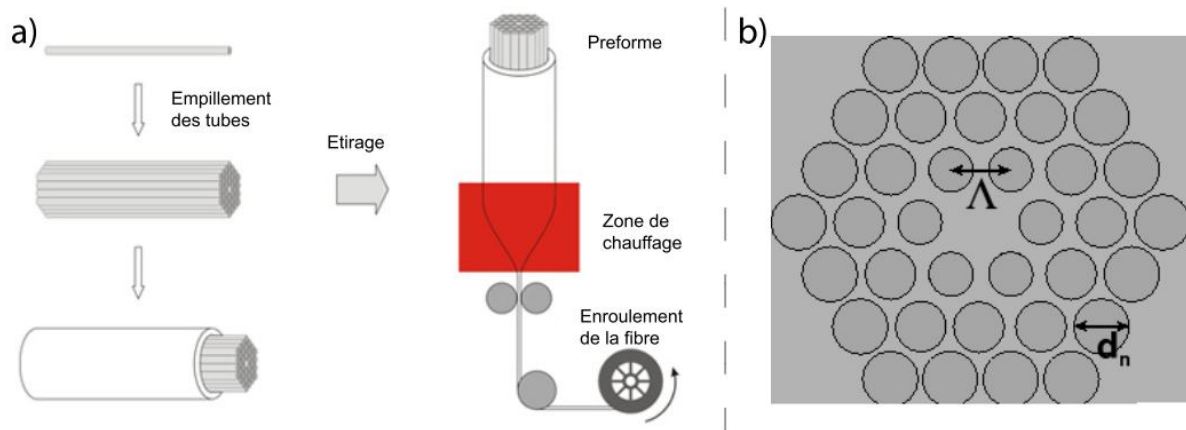


Figure (I.8) représentation qui explique le principe de fabrication d'une fibre microstructure

Cette méthode illustrée dans la figure précédent est composée de différentes étapes. La première est la conception des petits tubes de silice que l'on appelle communément capillaires[7].

Ensuite, dans le but de concevoir une préforme, est généré un empilement de ces capillaires selon la forme souhaitée, triangulaire ou encore hexagonale. L'arrangement des capillaires va engendrer les propriétés de la fibre micro-structurée, soit de la valeur de sa dispersion chromatique, de son zéro de dispersion, de son coefficient non-linéaire ainsi que son indice effectif.

Une fois la préforme conçue, la phase de l'étirement est produite dans le but de concevoir une bobine. Cette méthode est décrite sur le schéma de gauche de la figure précédent. Le processus de réflexion totale est obtenue à l'aide de la valeur de la différence d'indices entre le cœur et la gaine.

Le contrôle des propriétés non-linéaires et dispersive de ces fibres optiques microstructurées silice se fait via la variation de la position, de la taille et du nombre de trous. Comme cela a été présenté pour les fibres standards, une fréquence normalisée nommée V_{eff} détermine la valeur en deçà de laquelle la fibre est monomode [8].

$$V_{eff} = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_{cur}^2 - n_{eff}^2}$$

9. Deux types de guidage

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

9.1. Guidage par Bande Interdite Photonique (BIP)

La "renaissance" des fibres microstructurées remonte à 1995 lorsqu'un groupe de chercheurs britanniques animé par P. St. J. Russel (Université de Bath), se propose d'appliquer, dans le domaine des fibres optiques, la notion de Bande Interdite Photonique (BIP). Ce mécanisme est déjà connu et mis en œuvre pour guider la lumière dans les cristaux photoniques pour l'optique intégrée. Le but est de concevoir une structure dans laquelle le photon joue le même rôle que l'électron dans un semi-conducteur. Une BIP est une bande spectrale telle qu'une onde à une longueur d'onde comprise dans cette bande ne peut pas se propager dans la structure. L'effet recherché est une résonance transverse dans la gaine optique de la fibre qui maintiendrait la lumière dans une zone centrale (le "cœur") et assurerait son confinement. La propagation se ferait alors dans la direction axiale, invariante. Les premières fibres basées sur ce principe possèdent une gaine optique composée d'une succession de couches transparentes d'indices alternativement haut et bas semblables à un réseau de Bragg à une dimension (d'où le nom de "fibres de Bragg" qui leur a été attribué). Cette structure permet la formation d'interférences constructives entre les composantes de l'onde lumineuse réfléchies aux interfaces entre les couches. Ces diverses réflexions empêchent la propagation de la lumière radialement et assurent un confinement au centre du réseau de Bragg radial (figure I.9 (a)). Comme le mécanisme de propagation de la lumière ne s'appuie pas sur la notion habituelle de réflexion totale interne, l'indice de la zone où est confinée la lumière (le "cœur"), peut être plus bas que ceux des couches de la gaine optique qui l'entoure le cœur. Nous verrons par la suite les nombreuses applications liées à cette propriété. Dans le projet de P. St. J. Russel, l'alternance de couches concentriques d'indices haut et bas dans la gaine optique des fibres de Bragg est remplacé par un arrangement triangulaire (figure I.9(b)) ou hexagonal (encore appelé "en nid d'abeilles" (figure I.9(c))

Chapitre 1: Généralités sur les fibres optiques

extrêmement régulier de canaux d'air parallèles à l'axe dans une matrice de silice. Ces structures périodiques sont résonantes transversalement à certaines longueurs d'onde et possèdent donc des bandes interdites photoniques. Dans une fibre optique elles constitueront la gaine confinant la lumière, alors qu'un défaut créé au milieu constituera le cœur. Ce dernier est réalisé en supprimant un microcanal d'air dans une matrice triangulaire, ou au contraire en ajoutant un microcanal supplémentaire dans une matrice hexagonale. Le pas de la structure, qui correspond à la distance séparant les centres de deux trous voisins, est noté Λ , tandis que le diamètre des trous est noté d . Dans la suite ces fibres seront appelées FMAS BIP[9].

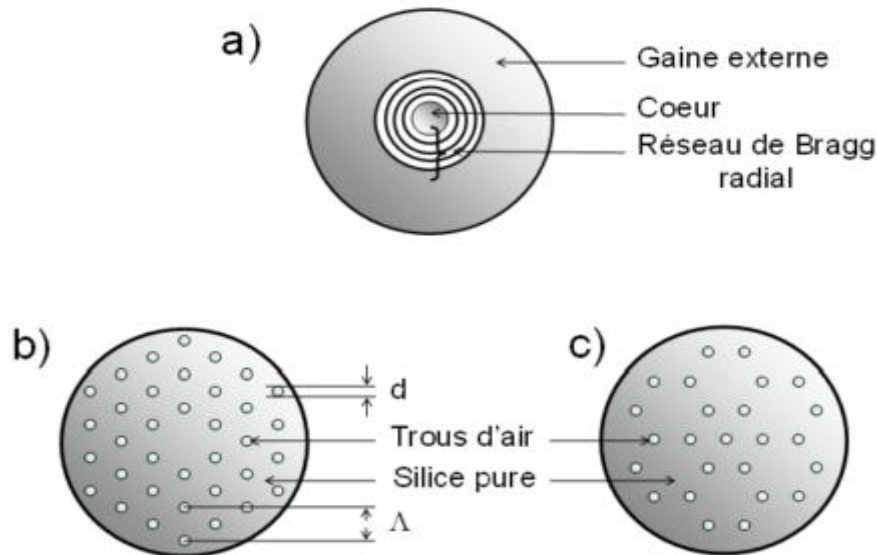


Figure (I.9) Schéma de sections transverses (a) d'une fibre de Bragg, (b) d'une FMAS BIP à arrangement triangulaire et (c) hexagonal

En 1995, il est démontré pour la première fois qu'une FMAS peut présenter de véritables BIP malgré le faible contraste d'indice entre les deux milieux ($\approx 0,45$). Ceci provient du fait que dans les FMAS BIP la propagation ne s'effectue pas perpendiculairement à la direction d'invariance du réseau comme dans les cristaux photoniques, mais parallèlement à celle-ci. Les conditions sur le contraste d'indice entre le milieu hôte et l'air, ainsi que sur la proportion d'air nécessaire sont ainsi relâchées. L'onde lumineuse injectée dans une FMAS BIP est réfléchiée par la gaine microstructure périodique et se retrouve confinée transversalement dans la région où la périodicité est brisée (zone du défaut constituant le

Chapitre 1: Généralités sur les fibres optiques

cœur). Un mode transverse peut donc s'installer dans le cœur et être guidé dans la direction z . Les longueurs d'onde (λ) centrales rejetées par le matériau BIP dépendent de la période du cristal et de la proportion d'air ($\lambda \approx 2\Lambda$) [7].

L'un des attraits majeurs des FMAS BIP est que le guidage peut être effectué dans un cœur d'indice bas : ce cœur peut par exemple être un trou rempli d'air ou d'un autre gaz. Dans un cœur d'air, les pertes de propagation peuvent être faibles à des longueurs d'onde où la silice est peu transparente. En remplaçant l'air par un autre gaz (H_2 , Xe), on peut fortement limiter ou au contraire exacerber les effets non linéaires. L'une des applications du guidage de la lumière dans une telle fibre est le transport de forte puissance sans endommager la structure. En 1997, P. St. J. Russel et son groupe croit fabriquer pour la première fois une FMAS BIP. Pourtant le diamètre des trous est variable, (entre 0,2 et 1 μm), et ils sont espacés d'un pas de 2,3 μm ce qui donne une proportion d'air dans la gaine assez faible. La caractérisation de cette fibre a montré par la suite que le mécanisme de propagation de la lumière ne reposait pas sur l'effet BIP mais sur la réflexion totale interne. Pourtant cette fibre présentait des caractéristiques de propagation tout à fait originales qui ont très rapidement suscitées un immense intérêt. Cela sera explicité dans le prochain paragraphe.

9.2. Guidage par Réflexion Totale Interne Modifiée (RTIM)

Si la périodicité des canaux d'air est localement détruite (omission d'un trou), la région correspondante constitue un cœur en silice d'indice constant et supérieur à celui de la gaine micro-structurée. De cette façon, l'indice de la gaine peut être vu comme un milieu uniforme d'indice effectif équivalent n_{effg} . Cet indice est égal à l'indice effectif du mode fondamental transmis dans un espace illimité identique à cette gaine en se propageant parallèlement à l'axe des canaux d'air. La FMAS peut être approchée par une fibre à saut d'indice équivalente qui guide suivant le principe classique de réflexion totale interne. Pour mieux comprendre comment la lumière peut-être confinée dans le cœur de la fibre micro-structurée, il serait utile de rappeler le principe de guidage à l'intérieur de la fibre standard. Le mécanisme qui permet de piéger la lumière dans le cœur est dû à un indice de réfraction effectif dans la gaine de la fibre plus faible que celui du cœur. Dans une fibre conventionnelle, la réflexion totale interne est assurée par la condition suivante : $kn_c < \beta < kn_g$

Chapitre 1: Généralités sur les fibres optiques

Avec n_c et n_g désignant respectivement les indices du cœur et de la gaine, β et k sont respectivement la constante de propagation et le vecteur d'onde. Autrement dit, l'onde guidée possède une certaine valeur de la constante de propagation β autorisée dans le cœur mais interdite (évanescence) dans la gaine. Dans une FMAS, cette condition est encore valable. Les modes guidés dans le cœur en silice sont les modes ayant une constante de propagation β telle que :

$$\beta_{\text{gaine silicemax}} < \beta < kn_{\text{silice}}$$

β_{gainemax} peut-être définie comme la constante de propagation du mode fondamental existant dans la gaine micro-structurée de dimensions infinies, en l'absence de site de défaut. Par conséquent, il est clair que le guidage dans la FMAS est assuré par le principe de la réflexion totale interne étant donné que l'indice du cœur est plus grand que l'indice effectif de la gaine micro-structurée [2]

10. Fabrication

La première fabrication a été réalisée dans les laboratoires de l'Université de Bath en 1996. La technique employée est celle de l'assemblage-étirage ("Stack and Draw") qui consiste à étirer à haute température un arrangement de capillaires et de barreaux de silice.

La réalisation des FMAS se fait en plusieurs étapes

La première étape consiste à réaliser un arrangement de tubes capillaires à l'intérieur d'un tube de maintien, comme le montre la figure (I.10). Ces capillaires sont sélectionnés en fonction de leurs diamètres intérieur et extérieur. Ils proviennent soit du commerce soit d'étirages effectués au laboratoire à partir de tubes de grande section. Un ou plusieurs capillaires au centre sont remplacés par des barreaux de silice afin de former le cœur. On s'attend à ce que le nombre de trous et leur disposition dans cet arrangement soient conservés dans la fibre étirée. Cependant les conditions d'étirage (température, pressions interne et externe) peuvent modifier la taille et la forme de ces trous[10] [11].

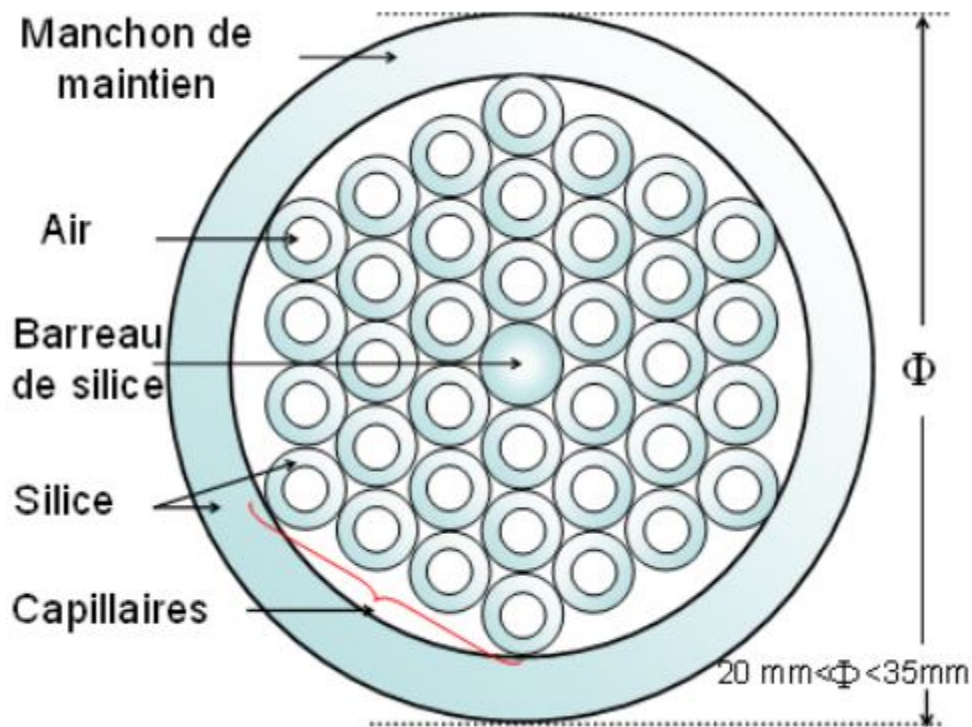


figure (I.10) arrangement de la préforme primaire

Bien que la régularité de l'arrangement ne soit pas indispensable à l'obtention d'un guidage RTI, elle est recherchée pour deux raisons. La première est que dans une distribution aléatoire de trous apparaissent des zones de silice plus larges susceptibles de se comporter comme autant de "cœurs" dans lesquels la lumière peut se coupler. D'autre part, il est hautement improbable qu'une fibre comportant un arrangement de trous quelconque présente des caractéristiques de propagation pouvant répondre à un cahier des charges initialement fixé. Autrement dit, la fibre doit ressembler le plus fidèlement possible aux structures régulières sur lesquelles sont basées les simulations numériques qui permettent, connaissant les caractéristiques de propagation visées, de définir les paramètres géométriques à atteindre. Les trous interstitiels entre les capillaires présents dans l'arrangement initial devront être rebouchés lors de l'étirage. Pour cela, on chauffe une extrémité de cet arrangement afin de rendre solidaires les capillaires mais aussi de les reboucher. On réalise ensuite une opération de verrerie qui consiste à enfermer une extrémité du manchon de maintien dans une ampoule de silice afin de pouvoir contrôler ultérieurement la pression différentielle entre l'intérieur des capillaires et les interstices lors du fibrage. L'ensemble constitue la préforme primaire à partir de laquelle vont être étirées des cannes microstructurées aux dimensions extérieures millimétriques (figure I.11 (a)). Cette première réduction d'échelle homothétique est effectuée

Chapitre 1: Généralités sur les fibres optiques

grâce à une tour de fibrage équipée d'un système d'entraînement par galets et d'un dispositif de coupe de capillaires. Le contrôle des dimensions (diamètre extérieur des cannes, pas et diamètre des trous de la structure interne) repose sur la maîtrise de la rhéologie de la silice pendant l'étirage. Les vitesses de descente de la préforme et de fibrage, la température du four et les différences de pression dans la préforme sont autant de paramètres qui doivent être maîtrisés avec précision pour obtenir une canne micro-structurée de qualité requise.

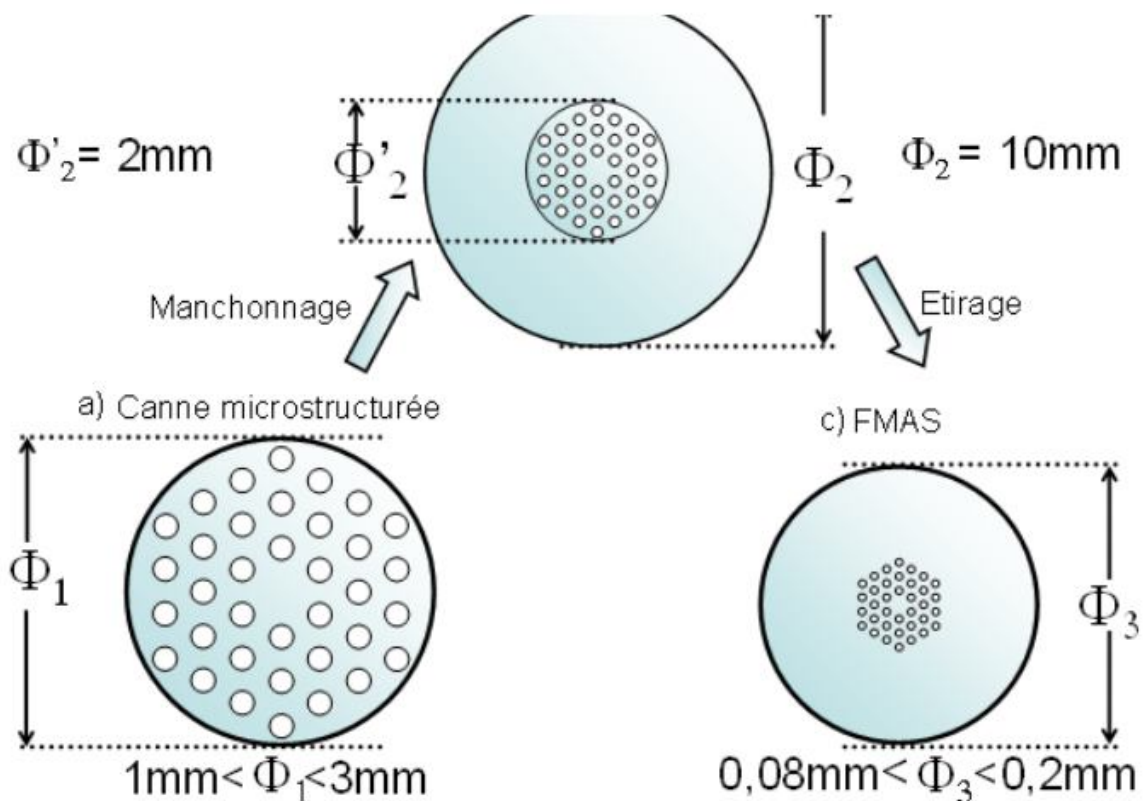


figure (I.11) canne micro-structurée, préforme secondaire et FMAS

L'étape suivante consiste à manchonner la canne microstructurée dans un tube à bord épais pour constituer la "préforme secondaire" d'environ dix millimètres de diamètre (figure I.4 (b)). Finalement celle-ci est étirée sur une seconde tour de fibrage qui dispose d'un tambour d'enroulement et d'un système d'enduction qui permet de protéger la fibre par une gaine polymère. La fibre obtenue mesure typiquement $125\ \mu\text{m}$ de diamètre extérieur (figure I.4 (c)) [7].

Ce fibrage en deux étapes est indispensable pour obtenir un rapport d'échelle important entre les motifs de la préforme primaire et ceux de la fibre.

Chapitre 1: Généralités sur les fibres optiques

Aux longueurs d'onde de transparence de la silice, la taille des trous dans la gaine doit être de l'ordre du micron, voire submicronique, pour obtenir les caractéristiques de propagation voulues. Cela signifie que le rapport d'échelle entre les trous des capillaires de la préforme primaire et ceux de la fibre doit être très grand (supérieur à 1000). C'est pourquoi le fibrage en deux étapes avec remançonnage de la canne microstructurée intermédiaire est une opération indispensable.

Au cours de la seconde étape de fibrage, la température apparaît comme un paramètre très critique, qui doit être parfaitement maîtrisé. En effet, à température trop basse, la trop forte viscosité de la silice peut conduire à la rupture de la fibre. A mesure que la température augmente, la viscosité de la silice diminue et la pression des canaux d'air augmente, ce qui a une forte influence sur la dimension des trous dans la fibre finale. Au-delà d'une certaine température on constate même qu'une partie ou la totalité des trous peut disparaître, conséquence d'une trop faible viscosité de la silice. Comme la température, les vitesses de descente de la préforme dans le four et la vitesse d'enroulement de la fibre sont aussi des paramètres dont dépendent les caractéristiques géométriques de la fibre étirée. La figure I.5 représente la section transverse d'une des fibres étudiées dans cette thèse. Ses paramètres géométriques sont $d=2 \mu\text{m}$ et $\Lambda =3,25 \mu\text{m}$. Le diamètre extérieur de la fibre est de $125 \mu\text{m}$. Elle comporte 4 couronnes de trous dans la gaine.

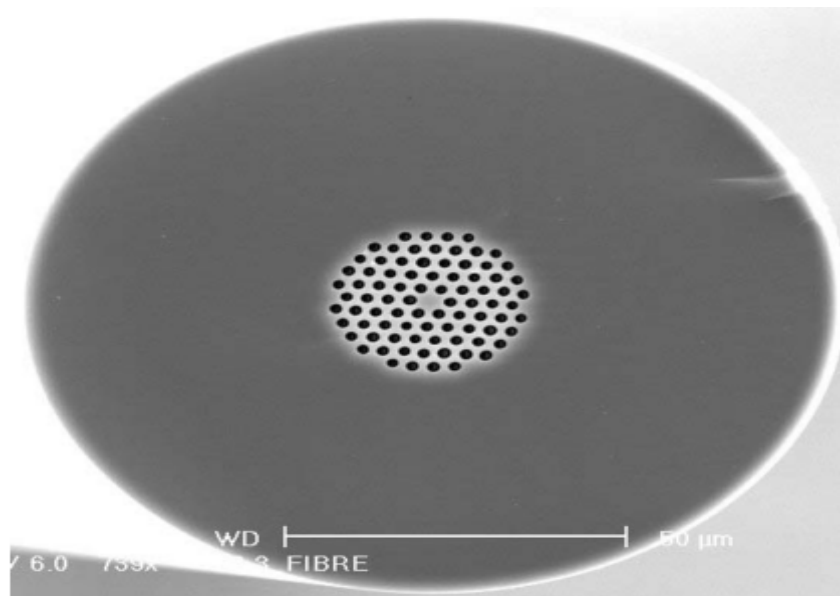


figure (I.12) exemple d'image de la section transverse d'une fibre réalisée à l'IRCOM

La réalisation des FMAS demande donc la maîtrise de paramètres physiques (température, pression) qui sont interdépendants. On verra par la suite du manuscrit comment

Chapitre 1: Généralités sur les fibres optiques

on met en relation les conditions de fabrication avec les résultats des caractérisations obtenus. Le processus de fabrication décrit dans ce paragraphe s'applique aussi bien aux FMAS BIP qu'aux FMAS RTI.

Le prochain paragraphe est dédié à la description des caractéristiques de propagation spécifiques des FMAS RTI

11. Applications

Grâce à la maturité de leurs technologies de fabrication, les FMAS sont déjà entrées dans le domaine des applications industrielles. Ces applications sont nombreuses et s'étendent au delà du domaine strict des télécommunications optiques. Les fibres monomodes à gaine micro-structurées peuvent être conçues avec un cœur de dimensions beaucoup plus importantes que les fibres conventionnelles. Des fibres, dont la taille de cœur est plus de cinquante fois plus grande que la longueur d'onde d'application, sont à l'inverse, facilement réalisables en exploitant les structures photoniques. Il existe un intérêt immédiat pour de telles fibres pour la transmission de fortes puissances optiques (télécommunications, lasers de puissance pour la découpe ou le marquage), ou pour les lasers ou amplificateurs à fibres dopées.

La réduction des pertes dans les fibres microstructurées est un enjeu majeur pour de nombreuses applications. La figure ci-dessous représente les pertes optiques de 2 fibres réalisées à partir de la même préforme mère. La courbe en trait plein représente l'atténuation d'une fibre avec un diamètre de cœur de 9 μm , avec des pertes minimales de 0.9 dB/km à 1550 nm (correspondant aux pertes intrinsèques des matières premières). La courbe en pointillés représente l'atténuation d'une fibre avec un diamètre de cœur de 2.5 μm . Les pertes globales sont plus élevées mais les pertes supplémentaires, liées aux OH (pics à 1383 nm), sont identiques à la fibre précédente, avec un niveau qui correspond aux spécifications des matières premières (concentration OH de 0.6 ppm). Pour atteindre ce résultat, difficile à obtenir avec des fibres microstructurées de faible aire 2 effective, des étapes de polissage chimique et un contrôle parfait de l'atmosphère pendant toutes les étapes de fabrication sont nécessaires. La trace OTDR de la deuxième fibre est parfaitement linéaire sur 800m indiquant une bonne homogénéité de fabrication sur de grandes longueurs[11].

Chapitre 1: Généralités sur les fibres optiques

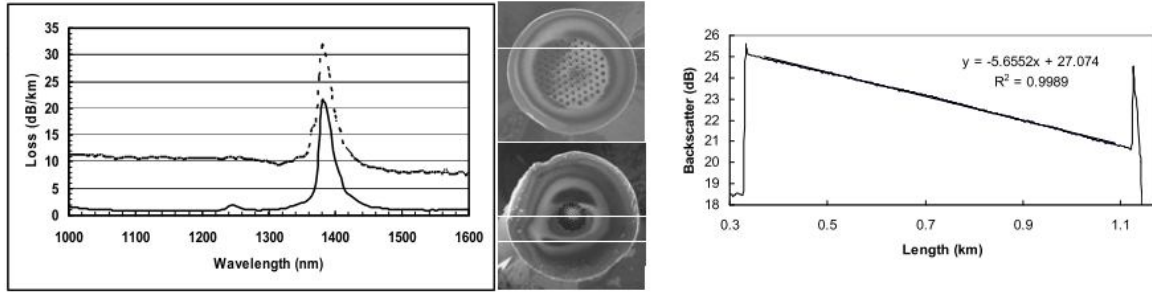


figure (I.13) Figure Pertes optiques (gauche) de deux fibres (photos) réalisées à partir de la même préforme mère. Trace OTDR (droite) pour 800m de la fibre de faible aire effective

Les faibles pertes de ces fibres, associées à leur faible aire effective, permettent l'exaltation des effets non-linéaires. L'amplification Raman a été démontrée dans une longueur modeste de 3 fibres microstructurées (700 m) avec un coefficient de gain comparable aux fibres classique (figure I. 14 a). La génération d'un super continuum de 3.2 W dans 300 m de fibre avec une pompe optique continue de forte puissance a été observée sans trou spectral associé au pic OH^4 (figure I. 14 b).

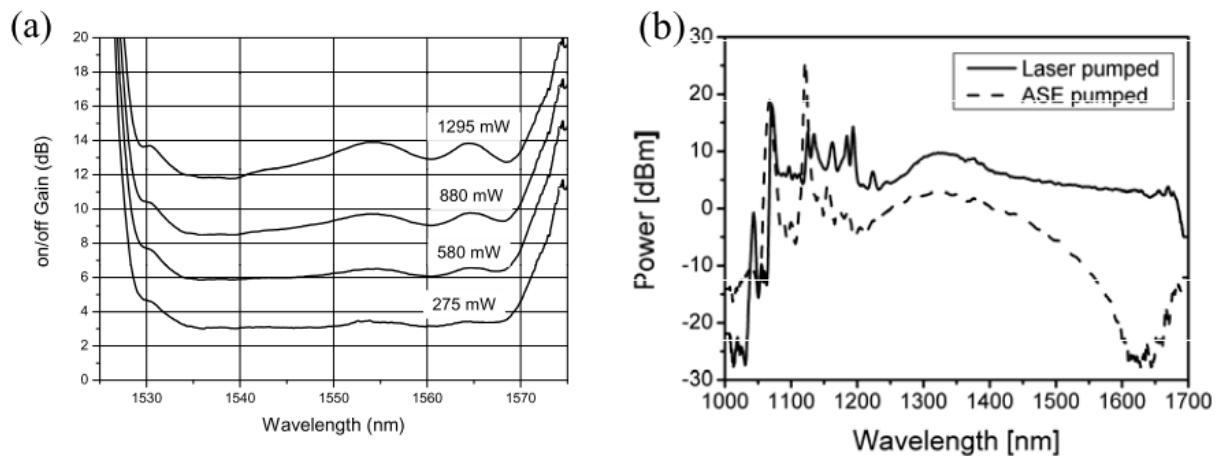


figure (I.14) Amplification Raman (a) et génération de super continuum (b) dans les fibres microstructurées de faibles aires effective et faibles pertes

Au cours de cette communication, nous présenterons d'autres applications des fibres microstructurées, notamment des fibres en verre de chalcogénure, dans les domaines des télécommunications et des sources optiques.

11.1 Lasers, amplificateurs

L'emploi de fibres dopées à grande ouverture numérique est particulièrement intéressant pour les lasers ou les amplificateurs. Nous rendons compte d'une conception des

Chapitre 1: Généralités sur les fibres optiques

FMAS ayant une grande aire effective pour des applications de type lasers à fibres. Incorporer des dopant avec une concentration suffisante reste un challenge. Les techniques double cœur sont privilégiées pour cette étude. En fait, des FMAS à double cœurs sont conçues et fabriquées avec une gaine interne à forte ouverture numérique et permettant une grande amélioration du rendement de l'injection de pompe. Une puissance de 120W a été obtenue à l'aide d'une FMAS de longueur 48cm et une efficacité de 74%. Ceci correspond à une puissance extraite la plus élevée pour les FMAS qui vaut 250W/m. Des amplificateurs à base de FMAS à grande aire effective ou à double cœurs exotiques sont développés[12].

11.2. Capteurs

La capacité des FMAS à être sensibles à de nombreux paramètres (température, pression, contraintes, rayonnements nucléaires...) les a rendues attractives pour la conception et la réalisation de capteurs. Ces applications ont découlé naturellement des recherches effectuées dans le domaine des télécommunications où la principale préoccupation consistait à rendre le signal véhiculé par la fibre totalement insensible aux perturbations imposées par les paramètres environnementaux[12]. La détection de gaz basé sur la mesure de l'absorption spectroscopique a été réalisée en utilisant les FMAS. Ayant une petite aire effective et une grande fraction d'air, une fraction significative de la puissance de la lumière sera donc située dans la gaine micro-structurée. Par conséquent la détection de gaz à l'intérieur des trous est possible par l'onde évanescente[13].

Ces FMAS peuvent être adaptées pour surveiller la déformation d'une structure dans trois dimensions. Ceci est fait en employant les FMAS simples avec les cœurs monomodes multiples dans lesquels il n'y a pas de couplage significatif entre les cœurs. Quand la fibre à plusieurs cœurs est déformée, la contrainte différentielle induite entre les cœurs a comme conséquence une différence de phase entre les faisceaux de lumière propagés dans chaque cœur. Toute courbure de la fibre est alors détectée en analysant les franges issues par le champ lointain. Une courbure de sensibilité de 2.33rads/mm a été mesurée en utilisant cette approche

12. Conclusion :

La fibre optique microstructure représente l'avenir de la transmission à hauts débits elle représente une structure solide et robuste contre tout les problèmes liés à la distance ou aux matériaux, courbure, même la dispersion chromatique elle offre un gain plus élevé que les fibres conventionnelles. Cependant malgré le développement des applications des fibres optiques microstructurées, ce développement reste tributaire, les deux paramètres essentiels, sa bande passante et l'affaiblissement du signal (atténuation) lors de la propagation.

Chapitre 2: les propriétés des fibre microstructure

Chapitre 2: Les propriétés des fibres microstructurées

1. Introduction

En 1996, le groupe d'Optoélectronique de l'Université de Bath publiait la première fabrication d'un nouveau type de fibre optique basé sur la réalisation d'un agencement périodique de trous d'air au tour d'un cœur de silice. Ces nouveaux composants optiques, baptisés Fibres à Cristal Photonique (PCF : Photonic Crystal Fibers) en référence à la modulation périodique à l'échelle de la longueur d'onde de leur indice de réfraction [15], faisaient apparaître des propriétés de propagation singulières, inaccessibles aux fibres conventionnelles. Ainsi, le hasard a permis que la première réalisation présente une géométrie des structures adaptées à l'obtention d'une propagation monomode sur un domaine spectral s'étendant de 1200 à 1800 nm (regardez le chapitre 3). La propagation monomode se caractérise par un faisceau quasi-gaussien, ce qui facilite grandement son utilisation [14]. Le principe de confinement de la lumière dans le cœur de silice restait, quant à lui, très similaire à celui des fibres conventionnelles, à savoir un mécanisme de réflexion totale interne entre un cœur de haut indice et une gaine micro-structurée d'indice moyen compris entre celui du verre et de l'air, ceci explique rapidement ce que nous voulons expliquer dans notre chapitre et aussi les caractères précis de FCP.

2. Généralités sur les cristaux photoniques

La notion de "cristaux photoniques" a été proposée pour la première fois en 1987. Le premier cristal photonique a été réalisé en 1991. Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans une, deux ou trois dimensions. Ce milieu périodique produit sur la lumière qui se propage dans le cristal photonique un effet analogue à celui du potentiel périodique sur les électrons dans un cristal. De même qu'il existe pour des électrons des bandes d'énergie permises et des bandes interdites, il existe des bandes photoniques d'états permises et des bandes photoniques interdites. Une bande photonique correspond à un mode qui se propage dans le cristal photonique [3][6]. Une bande interdite photonique correspond à un intervalle d'énergie où la propagation de la lumière est interdite dans certaines directions du cristal photonique. Les cristaux photoniques offrent la possibilité de contrôler la propagation de la lumière et ceci, sur la dimension de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde

Chapitre 2: Les propriétés des fibres microstructurées

dans le matériau. C'est notamment cette propriété qui les rend intéressants pour de nombreuses applications [9].

3. Définition des cristaux Photoniques

La première structure périodique à connaître est le matériau à bande interdite photonique (B.I.P.) que l'on appelle plutôt en hyperfréquences « matériau à bande interdite électromagnétique ». D'une manière générale, on les nomme familièrement « cristaux photoniques » car sa structure se rapproche de la structure cristalline et qu'ils agissent sur les photons. L'intérêt des chercheurs pour le thème des cristaux photoniques est important, surtout depuis la fin des années 90, car ces matériaux périodiques artificiels ont été promis à révolutionner le domaine des télécommunications. En effet, depuis des années, la recherche scientifique pense pouvoir contrôler la propagation de la lumière grâce à ces matériaux afin de remplacer la communication classique à courant électrique. Ceci entraînerait un gain énorme en termes de rapidité de la communication [9].

4. Caractère indéfiniment monomode

Une propriété importante des FMAS est qu'elles peuvent être monomodes sur un large domaine spectral, voire quel que soit la longueur d'onde. Lorsque la longueur d'onde devient plus courte, il se trouve que l'indice effectif du matériau va se rapprocher de celui de la silice pleine. En effet, plus la longueur d'onde est courte plus le champ électromagnétique va pouvoir s'étendre dans la silice autrement dit plus l'onde va pouvoir s'infiltrer facilement entre les trous et « voir » un matériau proche de la silice pleine. Comme l'indice effectif du matériau de gaine se rapproche d'autant plus de celui du cœur de silice que la longueur d'onde est courte, la fibre reste finalement monomode pour toute longueur d'onde [11]. La diminution de l'écart entre les deux indices permet de s'opposer à la décroissance de la longueur d'onde, garantissant une transmission monomodale à large bande. Une analyse numérique a mis en évidence que la fréquence normalisée effective V_{eff} varie proportionnellement en fonction du rapport d/Λ .

$$V_{eff} = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_{eff}^2}$$

Chapitre 2: Les propriétés des fibres microstructurées

Ainsi, il suffit de réaliser des trous de faible diamètre ou un pitch Λ suffisamment grand pour maintenir V_{eff} en dessous de 2.405 (fréquence de coupure du mode fondamental pour les fibres standard) et assurer un guidage selon un seul mode [7]. La valeur seuil de V_{eff} dépend du choix du rayon du cœur que certains auteurs ont défini comme étant égal à la période Λ du cristal photonique. Dans ce cas, la fréquence de coupure a été évaluée à environ 4.1 pour des fibres microstructurées ayant un rapport d/Λ inférieur à 0.4. D'autres ont préféré conserver la valeur de 2.405 pour la fréquence de coupure du second mode en déterminant un nouveau rayon de cœur équivalent. Ce rayon de cœur équivalent est évalué à 0.64Λ si d/Λ est inférieur à 0.4. Au-dessus de cette valeur de d/Λ , la FMAS devient multimode. Nous avons opté, dans nos simulations pour un rayon du cœur $a=0.64\Lambda$. Nous avons utilisé la méthode de Galerkin, qui sera détaillée dans le prochain chapitre, pour simuler le caractère modal des FMAS en fonction de leurs paramètres optogéométriques. Nous avons pu obtenir le domaine monomode d'une telle FMAS comme illustré dans la Figure(II.1) Nous distinguons trois régions : comportement indéfiniment monomode, monomode et multimode[13]. Pour $d/\Lambda \leq 0.4$, la FMAS est indéfiniment monomode quelque soit le rapport λ/Λ . Dès que $d/\Lambda > 0.4$, la fibre subit les mêmes conditions de monomodicité qu'une fibre conventionnelle, à savoir la dépendance en longueur d'onde. Il existe alors un écartement Λ maximum à ne pas dépasser pour rester monomode à une longueur d'onde donnée

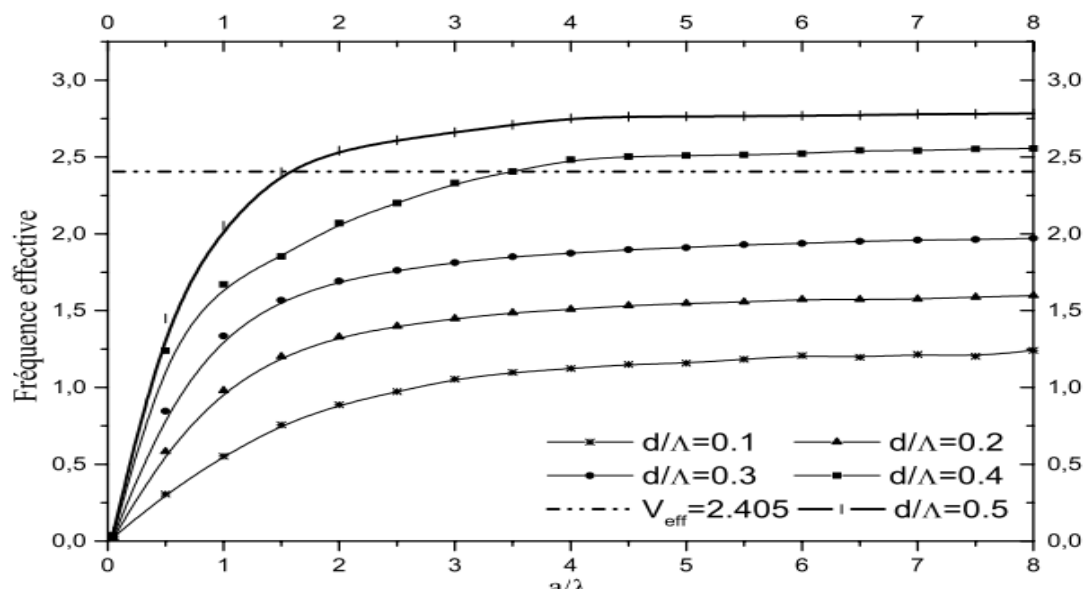


Figure (II.1): Comportement modal des FMAS en fonction de a/λ pour différents d/Λ

Chapitre 2: Les propriétés des fibres microstructurées

Nous avons examiné la répartition modale dans une FMAS caractérisée par $d=1.8\mu\text{m}$ et $\Lambda=2.4\mu\text{m}$ et nous avons montré qu'elle est monomode à 1550nm et bimode à 980nm comme illustré dans la Figure suivante

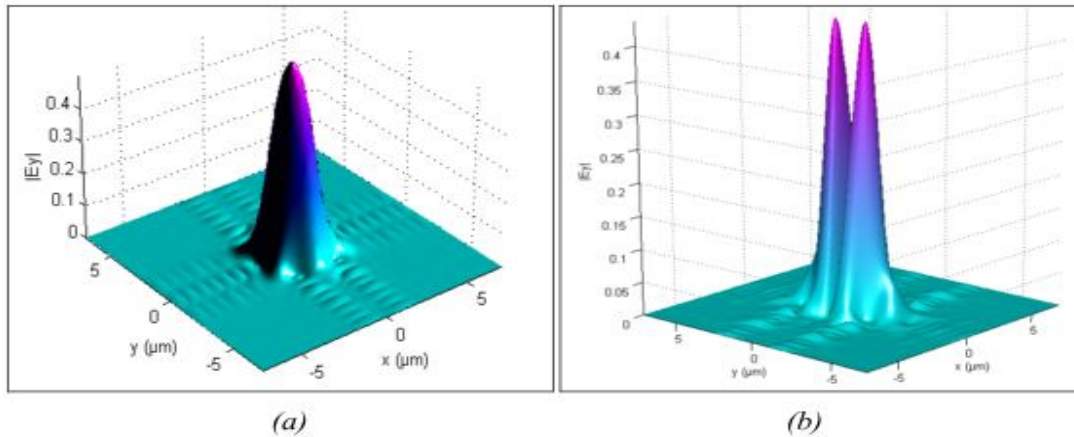


figure (II.2) : (a) Distribution du mode fondamental pour une FMAS ($d=1.8\mu\text{m}$; $\Lambda=2.4\mu\text{m}$) pour $\lambda=1550\text{nm}$ (b) Distribution modale pour la même FMAS pour $\lambda=980\text{nm}$

5. Dispersion chromatique

Lorsqu'une impulsion se propage en régime linéaire dans une fibre optique, elle subit un phénomène de dispersion qui se traduit par un étalement temporel de celle-ci. Dans une fibre optique, la dispersion chromatique D_c est principalement la somme de deux contributions : la dispersion du guide D_G et la dispersion du matériau D_M [15].

$$D_c = D_M + D_G$$

La dispersion du matériau se traduit par le fait que la silice, qui compose majoritairement la fibre, possède un indice optique qui varie en fonction de la longueur d'onde. Cette dépendance de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde induit une modification de la vitesse de groupe propre au milieu et doit être incluse dans les lois de propagation de la lumière dans le guide [13].

Concernant la dispersion du guide, étant donné que le fait que les ondes se propagent dans un guide et non dans un milieu illimité entraîne une dépendance de la constante de propagation en fonction de la longueur d'onde. Cette influence du guidage correspond à une

Chapitre 2: Les propriétés des fibres microstructurées

nouvelle contribution à l'évolution spectrale des temps de groupe. La dispersion chromatique est généralement obtenue par la relation :

$$D_c = - \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} \quad (1)$$

Où n_{eff} est l'indice effectif du mode guidé et c est la vitesse de la lumière dans le vide. La dérivée seconde de l'indice effectif est obtenue grâce à une dérivation numérique. A une longueur d'onde donnée λ_0 [3], la dérivée seconde de $n_{\text{eff}}(\lambda)$ est calculée à partir de la valeur de $n_{\text{eff}}(\lambda_0)$ et de quatre autres valeurs de l'indice effectif situées de part et d'autre de $n_{\text{eff}}(\lambda_0)$ et régulièrement espacées d'un intervalle spectral $\Delta\lambda$. Nous avons fixé dans nos calculs de discrétisation en longueur d'onde $\Delta\lambda$ à 25nm. L'expression de la dérivation numérique à $\lambda = \lambda_0$ est la suivante :

$$\left. \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} \right|_{\lambda=\lambda_0} \approx \frac{1}{24(\Delta\lambda)^2} (-2n_{\text{eff}}(\lambda_0 + 2\Delta\lambda) + 32n_{\text{eff}}(\lambda_0 + \Delta\lambda) - 60n_{\text{eff}}(\lambda_0) + 32n_{\text{eff}}(\lambda_0 - \Delta\lambda) - 2n_{\text{eff}}(\lambda_0 - 2\Delta\lambda))$$

Dans une fibre optique monomode conventionnelle, la dispersion du guide est toujours négative. Comme la dispersion du matériau est elle-même négative pour $\lambda < 1.27\mu\text{m}$ et positive pour $\lambda > 1.27\mu\text{m}$, la dispersion chromatique ne peut être annulée en dessous de $1.27\mu\text{m}$ [8][9]. La dispersion chromatique dans une fibre réalisée par les techniques classiques peut être ajustée en concevant un profil d'indice plus ou moins complexe, ce qui influe sur la dispersion du guide. Cependant, la différence d'indice entre le cœur et la gaine est faible, ce qui limite fortement les possibilités d'ajustement. L'expression (1) permet également de calculer la dispersion chromatique dans les FMAS. Les études concernant l'évolution de la dispersion chromatique menées sur ces fibres ont mis en évidence des propriétés originales pour cette grandeur. 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 les paramètres optogéométriques de la fibre, il est possible de modifier l'allure de la courbe de dispersion, et par exemple d'annuler la dispersion chromatique pour des longueurs d'onde inférieures ou supérieures à $1.27\mu\text{m}$. C'est pourquoi, nous pouvons dire que la FMAS a pu contourner ces limites grâce à la flexibilité du choix de ses paramètres géométriques [12]. En effet, la grande dépendance qui existe entre la

Chapitre 2: Les propriétés des fibres microstructurées

longueur d'onde et l'indice effectif a conféré à la fibre une large dispersion négative, non plus pour une longueur d'onde donnée mais sur une large gamme de longueur d'onde. Ainsi, il suffit d'ajuster judicieusement les deux paramètres géométriques de la fibre (d, Λ) pour contrôler la dispersion. La dispersion de guide dans les FMAS peut être positive, contrairement à celle d'autres types de fibres optiques, ce qui permet d'annuler la dispersion chromatique à n'importe quelle longueur d'onde. Nous avons présenté dans la Figure suivante, l'évolution en longueur d'onde de la dispersion chromatique pour quatre profils différents à petit et grand cœur ($\Lambda = 2.3\mu\text{m}$ et $4\mu\text{m}$) à petite et grande proportion d'air ($d/\Lambda = 0.27$ et 0.44). Nous remarquons qu'il existe trois types de FMAS particulières : les FMAS à faible dispersion chromatique aplatie, les FMAS à décalage du zéro de dispersion, les FMAS à faible dispersion chromatique négative. Nous montrons l'existence d'une dispersion chromatique négative ultraplate pour toute longueur d'onde pour une fibre ayant un rapport $d/\Lambda=0.27$ et $\Lambda = 2.3\mu\text{m}$. L'amplitude de la variation de la dispersion chromatique dans ce cas est inférieure à 1% sur une bande spectrale allant de 1200nm jusqu'au 1550nm. Une des grandes nouveautés apportées par les FMAS est la possibilité d'annuler la dispersion chromatique à des longueurs d'onde inférieures à $1.28\mu\text{m}$. Cette propriété permet d'obtenir par exemple les conditions nécessaires au mélange à quatre ondes dans les fibres aux courtes longueurs d'onde. En choisissant un $d/\Lambda=0.44$ et $\Lambda=2.3\mu\text{m}$, le zéro de dispersion se situe autour de $1\mu\text{m}$. En gardant le même rapport d/Λ et en changeant Λ à $4\mu\text{m}$ le zéro de dispersion s'approche de $1.2\mu\text{m}$. Avec une forte dispersion négative, les FMAS peuvent être insérées dans les modules de compensation de dispersion des systèmes de transmissions [14].

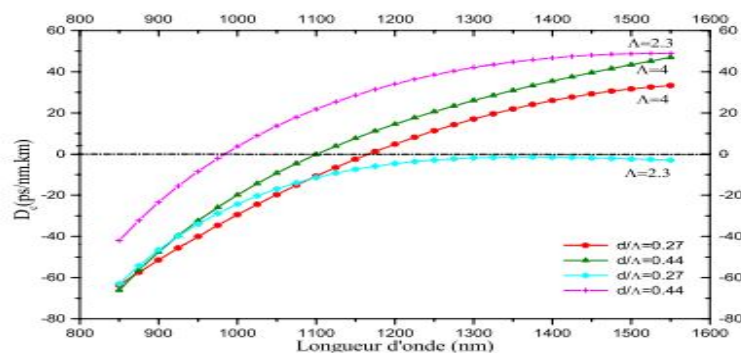


figure (II.3): Variation de la dispersion chromatique en fonction des paramètres optogéométriques de la FMAS

Chapitre 2: Les propriétés des fibres microstructurées

6. Aire effective

Les effets non linéaires sont d'un grand intérêt dans une large gamme d'applications, à savoir la régénération optique, la conversion en longueur d'onde, le démultiplexage optique et l'amplification Raman. L'aire effective du mode est ajustable grâce à la géométrie. En faisant simplement varier les dimensions des motifs, les fibres peuvent présenter des largeurs de mode s'échelonnant sur 3 ordres de magnitude [1]. Les fibres à petite aire modale peuvent être utilisées comme base de composants à effet non linéaire, tandis que les fibres à large mode permettent le transport de faisceau à forte puissance. Des aires effectives de modes variant de 1 à 1000 μm^2 peuvent être atteintes. Pour les fibres conventionnelles, l'aire effective de mode s'échelonne entre 10 et 200 μm^2 . L'aire effective est déduite de la répartition transverse du module du champ électrique $E(x,y)$

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\vec{E}(x,y)|^2 dx dy \right)^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\vec{E}(x,y)|^4 dx dy}$$

Des FMAS à large aire modale parti a de la figure suivante peuvent être réalisées en jouant sur les paramètres de la microstructure : un fort Λ ($\Lambda > 5\mu\text{m}$) et/ou un rapport d/Λ faible ($d/\Lambda < 0.3$)

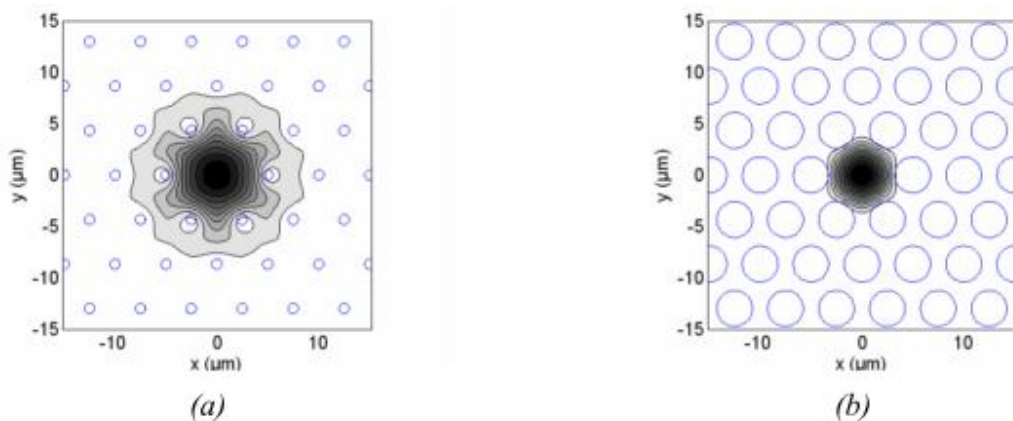


Figure (II.4) : (a) FMAS à large aire modale ($\Lambda=5\mu\text{m}$; $d/\Lambda=0.2$). (b) FMAS à petite aire modale ($\Lambda=5\mu\text{m}$; $d/\Lambda=0.7$).

Chapitre 2: Les propriétés des fibres microstructurées

Nous avons calculé l'aire effective du mode fondamental en fonction de la longueur d'onde pour différents paramètres géométriques de la FMAS. Comme prévu, le mode devient plus confiné pour des dimensions croissantes des diamètres des trous d'air. En général, l'aire effective du mode fondamental est proportionnelle à Λ^2 avec un facteur qui dépend préalablement du rapport d/Λ . En fait, une relation reliant l'aire effective et les paramètres géométriques de la FMAS a été établie [12]

$$A_{eff} \propto \left(\frac{\Lambda}{d}\right) \Lambda^2$$

Nous avons à travers les simulations représentées à la figure (II.5) voulu établir une « carte » globale de l'aire effective en fonction des paramètres géométriques des FMAS. Celle-ci peut être employée pour la détermination des paramètres géométriques optimaux de la FMAS à partir d'une valeur particulière de l'aire effective. Par exemple, pour la fibre SMF28 ayant une aire effective $\sim 86\mu\text{m}^2$ pour $\lambda=1550\text{nm}$, nous préconisons une FMAS équivalente ayant les paramètres suivants $\Lambda \sim 6\mu\text{m}$ et $d/\Lambda \sim 0.25$.

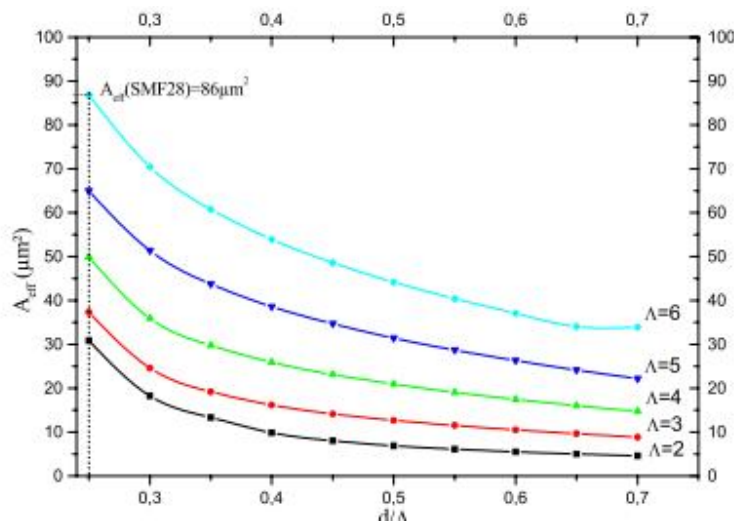


Figure (II.5): Aire effective en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de d/Λ

L'aire effective du mode fondamental peut nous renseigner sur l'ampleur des effets non linéaires au cours de la propagation dans cette fibre. Le coefficient de non linéarité γ est inversement proportionnel à l'aire effective A_{eff} du mode guidé. Il est défini par la relation suivante

Chapitre 2: Les propriétés des fibres microstructurées

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}}$$

Où n_2 est l'indice de réfraction non linéaire du matériau ($n_2 \approx 2.5 \cdot 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$ pour la silice). Dans le cas des fibres conventionnelles, il est nécessaire de réaliser des fibres à faible diamètre de cœur. La non linéarité effective d'une fibre de silice standard est de $\gamma \approx 1 \text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ à 1550nm et peut être multipliée par 20 en utilisant des fibres de silice conventionnelles à petits cœurs. Les fibres à trous présentent des ouvertures numériques beaucoup plus fortes que les fibres conventionnelles. De plus, la lumière est fortement confinée dans le cœur, surtout si la taille des trous est importante. Une fibre à trous possédant un d/Λ élevé va présenter une aire effective de mode faible et donc une forte non linéarité. Dans le cas des fibres à trous à petit cœur, la non linéarité effective est de l'ordre de $\gamma \approx 60 \text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ à 1550nm

7. Perte par courbure

Les FCP sont en théorie très sensibles aux courbures. En effet, la courbure modifie localement le profil d'indice vu par le mode guidé. Le profil d'indice d'une fibre rectiligne, équivalente à une fibre de profil $n(x, y)$ que l'on a courbée avec un rayon de courbure constant R_C , est

$$n_{\text{équivalent}}(x, y) = (1 + x/R_C) n(x, y)$$

La périodicité de la structure est donc localement modifiée. Étant donné que le guidage par effet BIP nécessite le respect de la périodicité de la structure guidante, les courbures peuvent entraîner des pertes massives pour des rayons de courbure relativement grands [6][16].

8. Pertes de confinement

La gaine optique microstructurée a une extension radiale limitée au delà de laquelle se trouve une zone de silice d'indice moyen plus élevé. Si le confinement du champ dans le cœur est insuffisant, une fraction de l'onde évanescente peut déborder au-delà de la gaine optique, ce qui est à l'origine des pertes par confinement[16].

Chapitre 2: Les propriétés des fibres microstructurées

Celles-ci sont d'autant plus élevées que le champ s'étale plus dans la structure. L'extension du champ doit donc être limitée afin de les maintenir en dessous d'un seuil acceptable. Or le champ est d'autant mieux confiné que la proportion d'air dans la gaine est plus importante et/ou que le nombre de couronnes est plus élevé. A une longueur d'onde donnée, les pertes diminuent lorsqu'on augmente Λ tout en maintenant $d/$ constant, comme le montre la figure I.9 (a). Pour une fibre ayant un pas de $1,4 \mu\text{m}$ et un diamètre de trous de $1,26 \mu\text{m}$ ($d/\Lambda=0,9$) (figure I.9 (b)), les pertes sont égales à 104 dB/m à 1550 nm lorsque la fibre ne comporte qu'une seule couronne de trous (soit 6 trous d'air) alors qu'elles ne valent plus que $4 \cdot 10^{-3} \text{ dB/m}$ pour quatre couronnes de trous (60 trous d'air) [11]

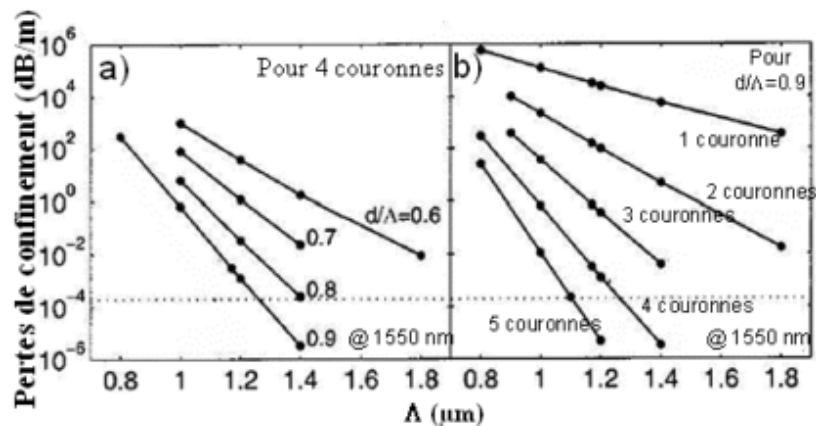


Figure (II.6): pertes de confinement de FMAS RTI à 1550 nm en fonction de d , (a)) et du nombre de couronnes de trous (b))

Pour un mode excité donné, les pertes de confinement renseignent sur la capacité de la fibre à guider ce mode efficacement ou pas : plus elles sont élevées, plus l'atténuation du mode est forte au cours de sa propagation. Autrement dit, du point de vue pratique, on peut considérer qu'un mode excité a disparu au bout d'une longueur de propagation d'autant plus courte que les pertes de confinement sont plus fortes. Le caractère monomode ou multimode du faisceau émergent dépend donc, dans certains cas, de la longueur de la fibre considérée. Ce paragraphe nous conduit naturellement à nous interroger sur la détermination de la limite du domaine spectral de propagation monomode [16].

Chapitre 2: Les propriétés des fibres microstructurées

9. Conclusion

Dans notre chapitre nous sortons avec une conclusion celle ou nous pouvant dire que les fibre utilisé comme un supporte de propagation pour la lumière et devenu un élément clé des télécommunications d'aujourd'hui

En effet , pour accroitre les performance des réseaux optiques, il est nécessaire de contrôler la dispersion chromatique des fibre de ligne optique pour tout longueurs d'onde mise en jeu mais aussi de limiter l'influence des effets non linéaires néfastes a la transmission d'information par l'augmentation de l'aire effective , pour ce faire, on a chercher a ajuster les fibre et de sella a été conçues de nouvelle fibre portons le nom des fibres a cristaux photonique (microstructure).

Chapitre 3: Simulation d'une FCP à réseaux circulaire

Chapitre 3: Simulation d'une FCP à réseaux circulaires

1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier les caractéristiques d'une fibre optique microstructurée à réseau circulaire à l'aide d'un logiciel spécialisé pour tous les types des fibres microstructurées. Ces derniers nous permettront de visualiser d'une façon précise le croisement de la dispersion chromatique ou au contraire le décroisement de l'indice. Pour pouvoir illustrer et représenter ses résultats et pouvoir accéder à une base de comparaison, nous avons utilisé un combiné de deux techniques: la méthode des différences finies dans le domaine temporelle (FDTD) et le maillage parfait des couches (PML).

2. Structure

La figure (III.1) illustre la section transversale d'une fibre optique microstructure a réseau circulaire et ses différents paramètres opto-géométriques. Comme nous pouvons le constater dans notre structure, le rayon des trous d'air est un paramètre qui nous permet de contrôler la concentration de l'air comme on peut le voir dans notre simulation. Il a même une influence sur les paramètres optique surtout pour les pertes par courbure. Nous remarquons aussi que l'omission d'un trou d'air nous a permit de construire le cœur de la fibre et même le remplacer par un cœur en silicone (figure III.10). Celui-ci va permettre la propagation de la lumière dans la fibre.

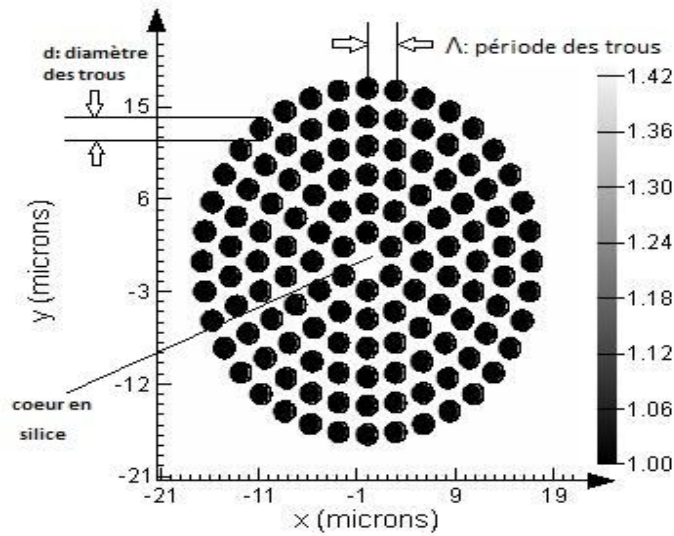


Figure (III.1): Représentation d'une fibre optique microstructure à réseau circulaire avec un cœur en silice

3. Résultats de simulations

En utilisant la méthode FDTD pour résoudre l'équation de la propagation de la lumière, on obtient comme résultats les indices effectifs correspondant au mode fondamental et ceux pour différentes valeurs du facteur de remplissage. La figure (III.2) décrit la variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde.

Chapitre 3: Simulation d'une FCP à réseaux circulaires

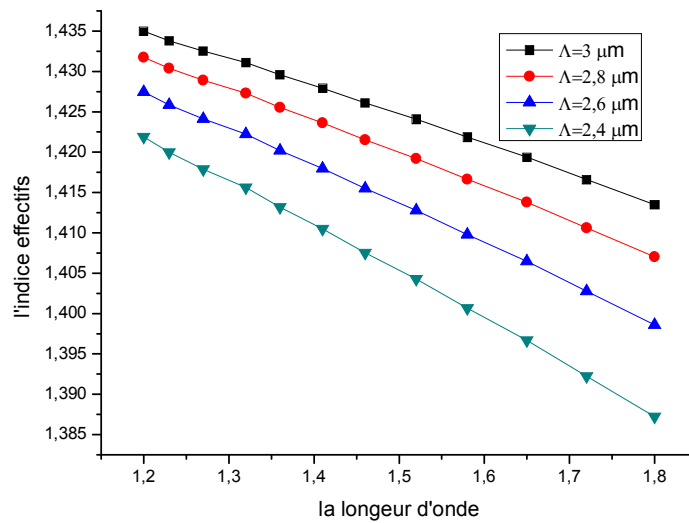


Figure (III.2) : La variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs Λ .

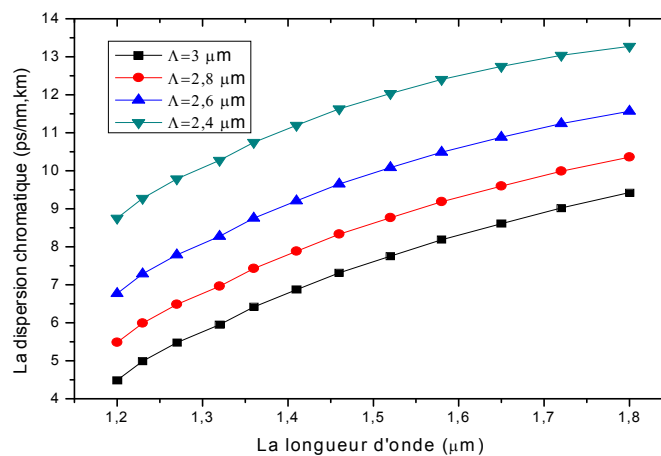


Figure (III.3) : La variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de Λ

On a aussi calculé la dispersion chromatique. Sa variation avec la longueur d'onde est donnée par la figure (III.3) et ce pour différentes valeurs du facteur de remplissage. Nous remarquons que la dispersion chromatique est proportionnelle à la longueur d'onde, ce qui veut dire que plus la longueur d'onde est grande plus la dispersion est importante. On observe aussi que la

Chapitre 3: Simulation d'une FCP à réseaux circulaires

dispersion chromatique diminue lorsque le facteur de remplissage augmente ce qui donne comme choix le point de dispersion zéro. Cette dernière caractéristique est aussi importante car on a toujours tendance d'avoir une dispersion nulle afin d'avoir un maximum de débit de transmission.

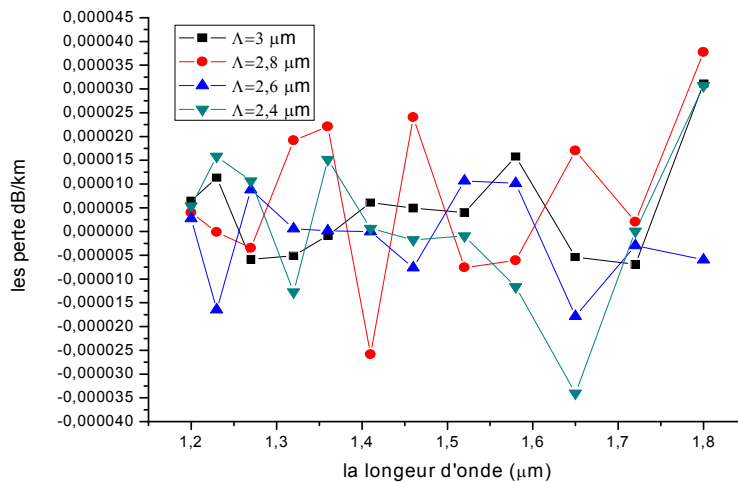


Figure (III.4) : La variation des pertes en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de Λ .

Afin de s'assurer que le champ optique se propage avec un minimum de perte, on a calculé les pertes par confinement à partir de la partie imaginaire de l'indice effectif de mode. La figure (III.4) présente la variation du coefficient de pertes en fonction de la longueur d'onde. On remarque très bien que la lumière se propage avec une très faible perte (de l'ordre de 10^{-5} dB/km).

Chapitre 3: Simulation d'une FCP à réseaux circulaires

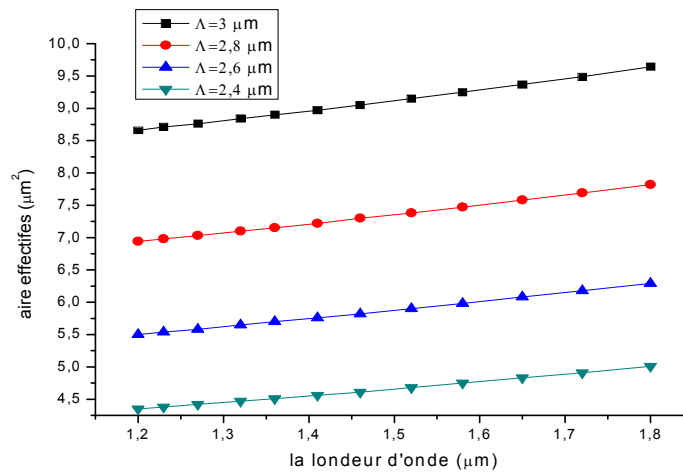


Figure (III.5): La variation de l'air effectif en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeur Λ

Finalement, on a calculé l'air effectif du mode, son évolution est donnée par la figure (III.5). L'air effectif est un paramètre essentiel pour des nombreuses applications comme le WDM, FTTH...etc. À partir de la figure, on remarque que l'air effectif augmente avec la longueur d'onde et aussi avec le pas de réseau.

4. Effet de la courbure

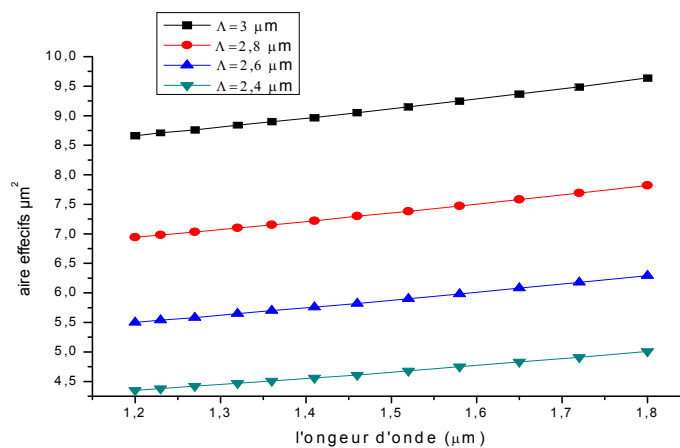
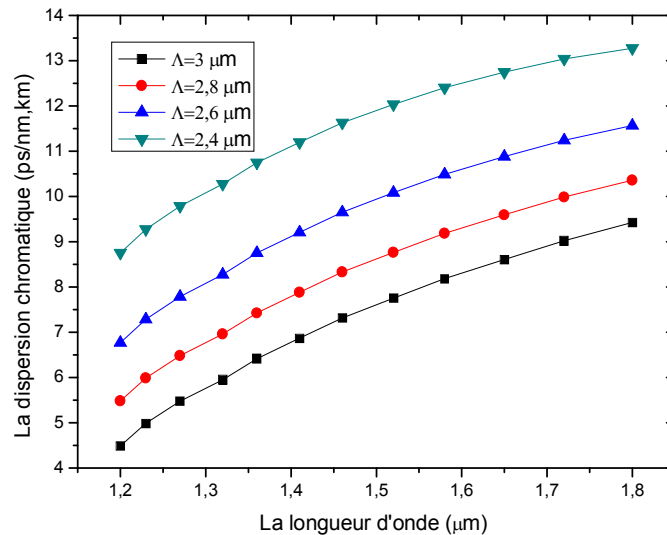


Figure (III.6): La variation de l'air effectif en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeur Λ avec une courbure de 50 cm

Chapitre 3: Simulation d'une FCP à réseaux circulaires

La courbure est un paramètre essentiel à ne pas négliger, alors nous avons rajouté une courbure de 50 cm qui influe sur notre flux lumineux, on remarque que les deux courbes de l'air effectif sans courbure (figure III.5), et l'air effectif avec courbure de 50 cm (figure III.6) sont en tout point



Figure(III.7): La variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs Λ avec une courbure de 50 cm

Nous avons voulu comprendre si la courbure influe sur la dispersion chromatique, alors on a calculé la dispersion chromatique. Et tracé sa variation en fonction de la longueur d'onde les résultats sont donnés par la figure (III.7) et ceux pour différentes valeurs du facteur de remplissage. Nous remarquons que la dispersion chromatique est proportionnelle à la longueur d'onde, ce qui veut dire que plus la longueur d'onde est grande plus la dispersion est importante. On observe aussi que la dispersion chromatique diminue lorsque le facteur de remplissage augmente (comme nous pouvons le constater pour les différentes valeurs de facteur de remplissage pour la longueur 1,2) c'est ceux qui nous donnent le choix du point de dispersion zéro. Cette dernière caractéristique est aussi importante car on a toujours tendance à vouloir une dispersion nulle afin d'avoir un maximum de débit de transmission.

Chapitre 3: Simulation d'une FCP à réseaux circulaires

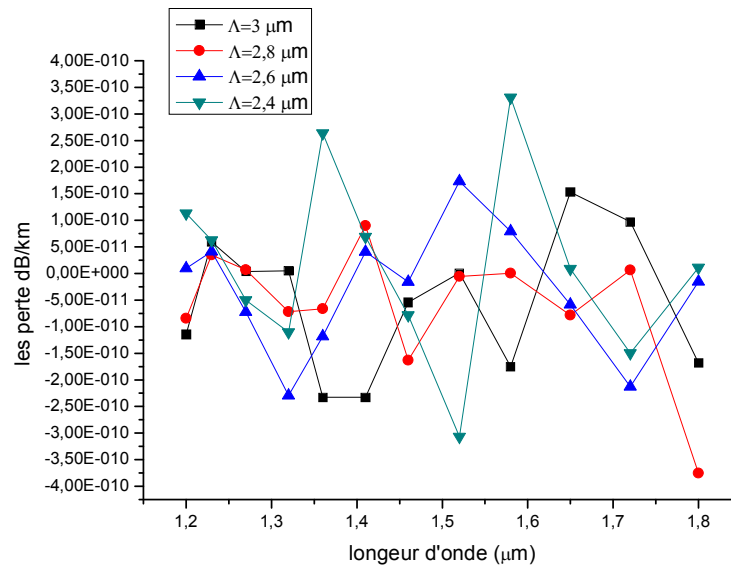


Figure (III.8): la variation des pertes en fonction de la longueur d'onde pour différente valeur Λ avec une courbure de 50 cm

On peut dire pour les deux courbe de perte soit avec ou sans courbure qu'elles sont différentes. Ce que il reviens a dire que la différence provient de l'influence de la courbure sur les perte .Nous savons d'après notre cours que les pertes sont constitué de plusieurs facteurs parmi eux les perte par courbure, nous pouvons constaté la différence dans cette courbe (nous allons cité quelque exemple de la courbe de la figure III.8 et la figure III. 4) regardé les longueur d'onde 1.2μm et 1.8 μm

Chapitre 3: Simulation d'une FCP à réseaux circulaires

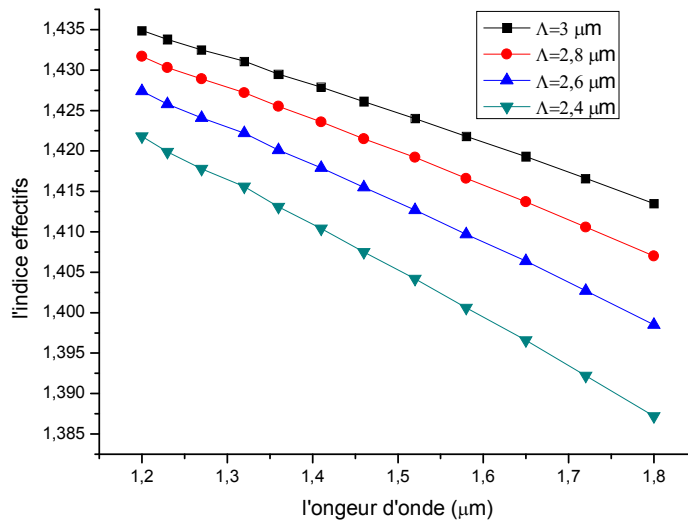


Figure (III.9): La variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs Λ avec une courbure de 50 cm

De la même manière que pour l'indice effectif de la première partie. On a utilisé le même procédé soit, la méthode FDTD pour résoudre l'équation de la propagation de la lumière, on a obtenu comme résultats les indices effectifs correspondants au mode fondamental et ceux pour différentes valeurs du facteur de remplissage. On a calculé l'indice effectifs nous avons obtenu des résultats très faible pour les facteurs de remplissage les plus bas comme on peut le voir dans notre la figure (III.9) pour le facteur 2.4 μm presque 1.4, la figure (III.9) décrit la variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde.

5. simulation sur une fibre microstructure air/silice pour différente valeur de diamètre du cœur en silicone

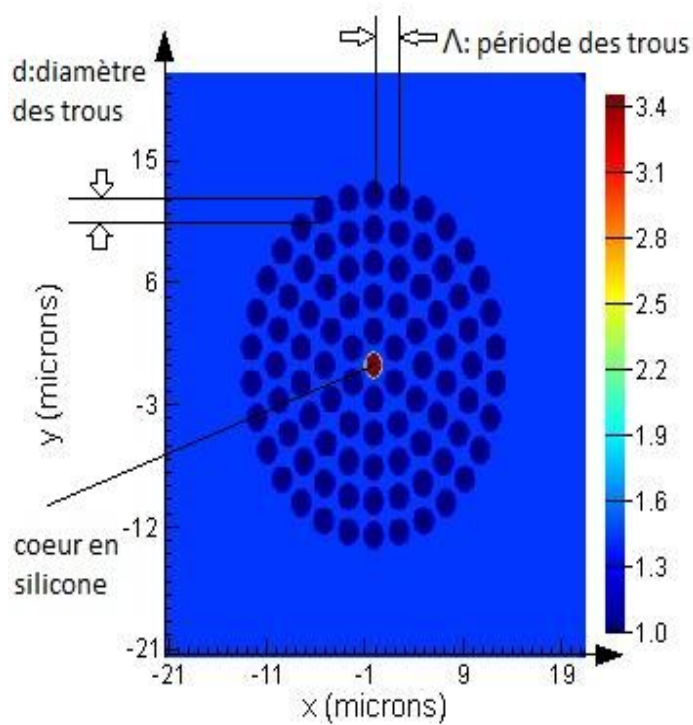


Figure (III.10): Schéma qui représente une fibre microstructure avec un cœur en silicone

La figure (III.10) représente une structure de fibre avec un cœur de silicone pour notre 3^{ème} simulation nous avons change le cœur de la fibre avec un matériau avec un indice plus élevé (silicone) pour amélioré la propagation des ondes lumineuses dans le cœur avec des paramètres optogéomerique $d=1 \mu\text{m}$ et $\Lambda = 2.5 \mu\text{m}$.

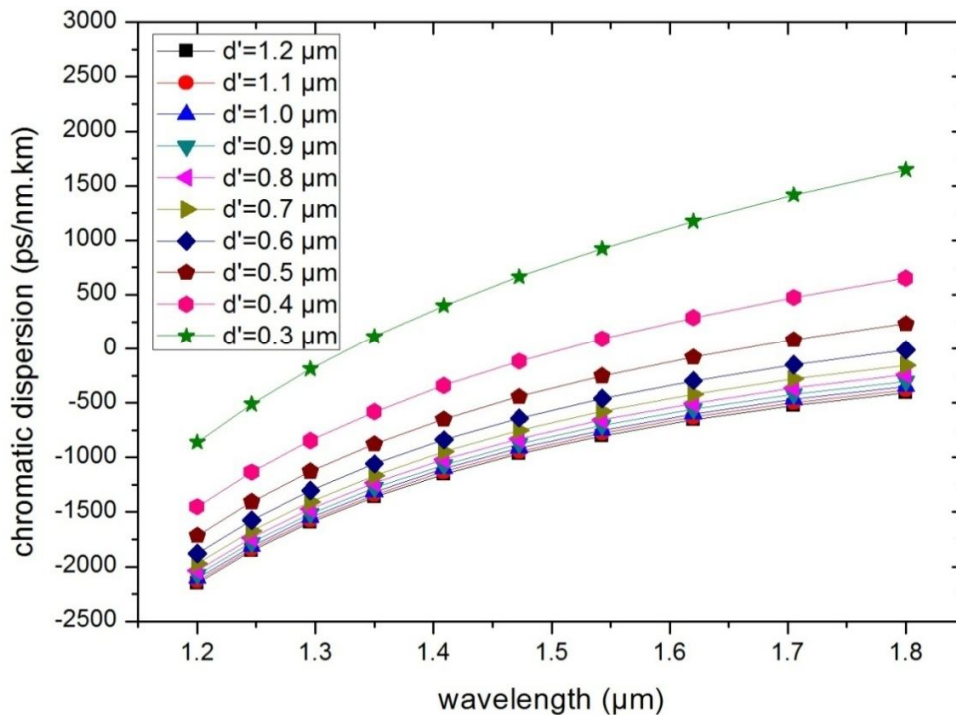


Figure (III.11): Courbe qui représente la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de diamètre du cœur

On remarque, pour la fibre avec un cœur en silice, on retrouve dans la courbe de la dispersion chromatique une variation croissante soit une variation proportionnelle à la longueur d'onde, qui montre que les fibres avec un cœur large présentent une grande dispersion négative pour les petites longueurs d'onde tandis que presque nulle pour les grandes longueurs d'onde. Donc on peut dire que selon nos données on peut utiliser notre fibre comme exemple si on a une liaison avec une onde à 1.55 μm et une dispersion nulle on utilise une fibre à un cœur 0.3 μm

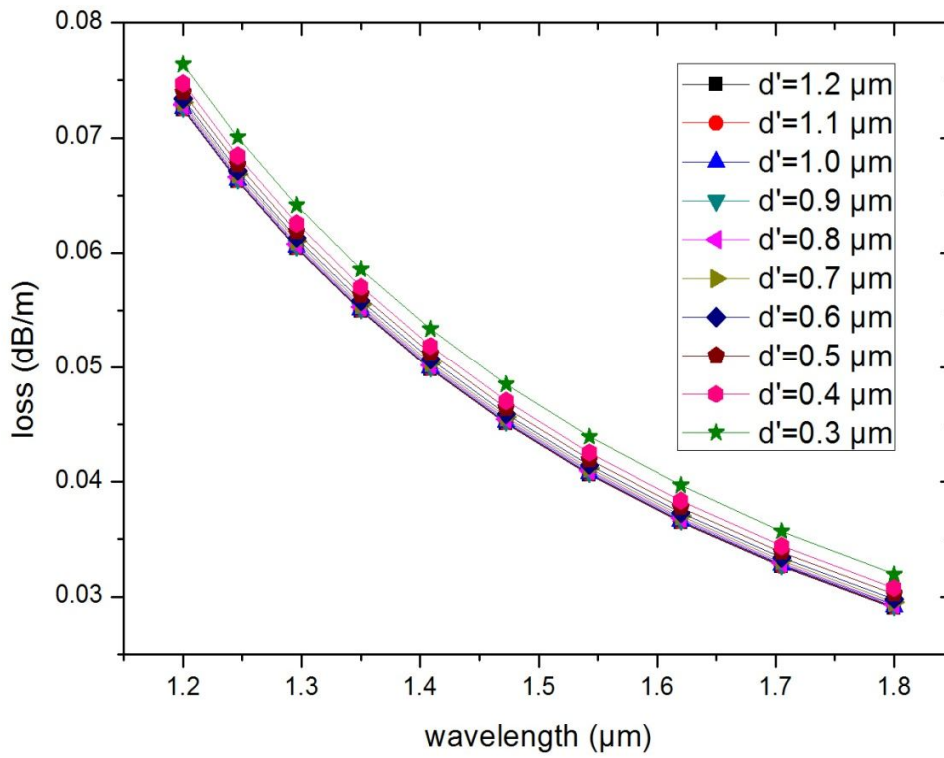


Figure (III.12): Courbe qui représente des pertes en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de diamètre du cœur

On remarque une courbe décroissante pour les pertes ce qui nous donne une meilleure transmission sans perte que les cœurs larges et une grande longueur d'onde comme nous pouvons le constater dans la fin de la figure, exacte pour les longueurs d'onde voisines de 1.8 μm, mais cependant si on remarque les résultats des pertes pour les deux fibres, celle avec un cœur en silice et celle avec un cœur en silicone. On peut dire que les pertes pour ces dernières sont très importantes car elles sont de l'ordre de 10^{-2} dB/m tandis que pour la fibre avec un cœur en silice elles sont de l'ordre de 10^{-5} dB/km, ce qui représente un handicap considérable.

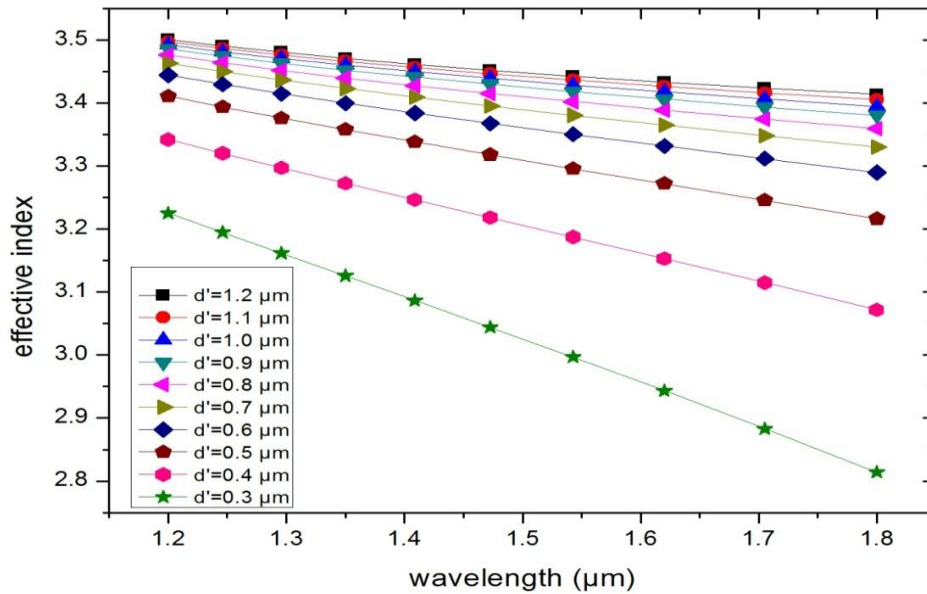


Figure (III.13): Courbe qui représente l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de diamètre du cœur

On remarque que la courbe de la figure (III.13) est divisée en deux parties. La première est légèrement décroissante avec une faible variation de 0.01, et la deuxième partie est fortement décroissante. Comme nous pouvons le constater pour les grandes structures du cœur (comme pour le rayon du cœur $0.3 \mu\text{m}$), il est aussi pour les faibles longueurs d'onde qu'on remarque une grande décroissance.

Chapitre 3: Simulation d'une FCP à réseaux circulaires

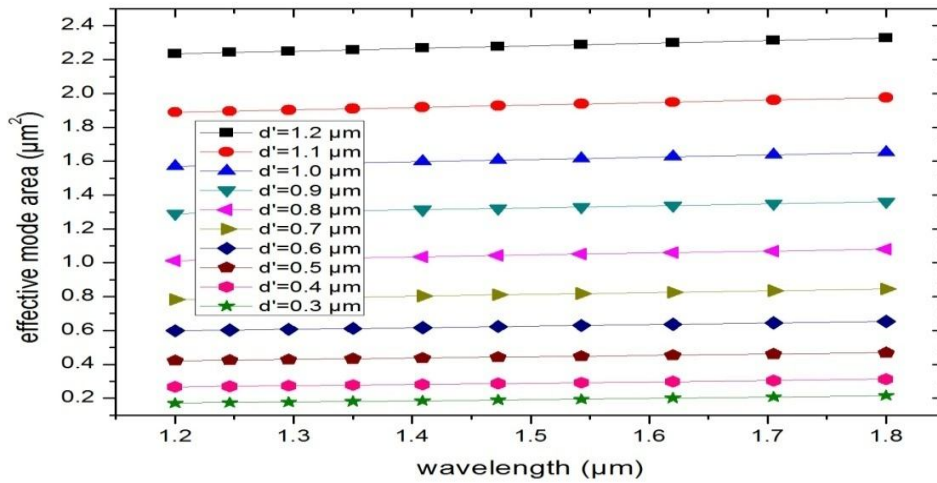


Figure (III.14): Courbe qui représente l'aire effective en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de diamètre du cœur

On remarque une croissance sur le plan de l'aire effective ainsi que pour les cœurs larges sans les paramètres qui ont un air effectifs plus grands. On obtiens l'aire effective grâce. Nous savons que pour le domaine de la télécommunication, l'aire effective est très important grâce à lui on peut déterminer les longueurs d'onde adéquate qui nous donne selon le chapitre 2 l'aire le plus élevée et le plus bénéfique à la transmission de données (télécommunication). c'est aussi le paramètre qui va nous permettre de transmettre plus de puissance sans endommager notre fibre. On peut le comparé à la une surface du choc plus la surfasse et petite plus la concentration de la force et les dégâts causé sont grands.

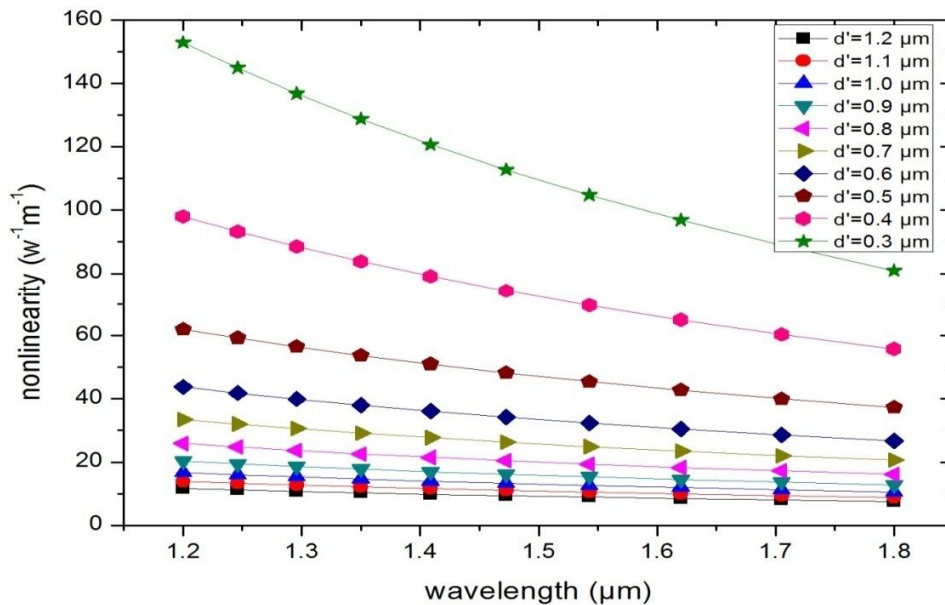


Figure (III.15): Courbe qui représente la non linéarité en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de diamètre du cœur

La figure précédente représente une courbe de la non linéarité obtenu grâce a cette équation ($\gamma = \frac{2\pi n}{\lambda A_{eff}} * 10^3 W^{-1} Km^{-1}$ [17]) qui nous donne presque un résultat inverse que l'indice effectifs .Comme nous pouvons le constater a partir des deux courbes .Les figure III.15 et figure III.13 sont inverse comme la région des cœurs avec un rayon de 0.7μm jusqu'a 1.2 μm ont un indice de non linéarité très faible de même avec le décroisement des la courbe on remarque un changement très faible par rapport au longueur d'onde faible les grande longueur d'onde ainsi que les paramètre des cœur faible comme 0.3μm. On remarque un changement important pour une longueur d'onde 1.2 qui et égale a 150 $w^{-1} m^{-1}$ et a 1.8 μm on constate une linéarité de 90 $w^{-1} m^{-1}$

Conclusion

Dans notre chapitre 3, nous avons simulé la transmission de la lumière dans une fibre microstructure ce qui a ramené a étudié les paramètres de cette fibre. Si on superpose les figure de 2 a 5 on peut remarqué le regroupement de toutes les courbes Dans un seul et même endroit, soit la longueur d'onde avoisine des 1.58 μm cette longueur d'onde. Cette dernier et appelé le

Chapitre 3: Simulation d'une FCP à réseaux circulaires

fréquence de fonnement c'est la longueur d'onde ou tout les paramètres sont optimisé sans sacrifié un paramètre au dépend d'un l'autre.

Tandis que la 2eme partite qui consiste a introduire une courbure a notre fibre et voir son influence sur les paramètres, mais contrairement a ce que je pensé la courbure a influé seulement sur les pertes vus que les pertes par courbure sont une parti des pertes dans la fibre tandis que les autres paramètres sont identique.

La 3eme parti de notre simulation consiste a remplacé le cœur en silice par un cœur en silicone Soit un cœur avec un grands indice de réfraction que le précédent (nous savons que la lumière suit les matériaux avec un grands indice c'est pour cela que nous avons choisi le silicone) notre travail a montré une très grande habilité pour les transmissions télécom grâce au très fortes air effectifs pour les cœurs étroits.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion

L'étude faite dans ce mémoire a pour objectif de prédire et de caractériser les propriétés de propagation dans les fibres microstructurées air/silice (FMAS) à guidage par réflexion totale interne afin d'évaluer leurs applications dans des systèmes de télécommunications optiques.

Dans le 1^{er} chapitre nous avons présenté les fibres conventionnelles et expliqué leur principe de fonctionnement. Comme nous avons vu, les fibres optiques classiques présentent un très grand nombre d'inconvénient. On peut dire que ça pose un problème comme nous savons, les pertes sont constituées de plusieurs facteurs comme celles par courbure, les pertes de la ligne et les pertes par soudure.

Ensuite, dans le 2^{ème} chapitre, nous avons expliqué rapidement les deux principes de base pour comprendre c'est quoi une fibre optique microstructurées. Ces deux principes sont la fibre optique et les cristaux photoniques. Le premier est la fibre et son fonctionnement et le 2^{ème} est le matériau utilisé dans les fibres microstructurée aussi appelée les fibres a cristaux photoniques qui nous ramène au cœur de notre projet.

Dans ce même chapitre, nous avons étudié les caractéristiques des fibres FMAS et expliquer tout leur principe dans le deuxième chapitre. Nous avons présenté la dispersion chromatique, les pertes, ... pour comprendre cette nouvelle fibre qui nous donne un avantage considérable par rapport aux fibres classiques (conventionnelles).

Dans le troisième chapitre nous avons étudié la propagation de la lumière dans une fibre microstructurée pour différente valeur du facteurs de remplissage, alors que nous avons déduit l'influence des trous et leur emplacement sur la propagation du flux lumineux dans la fibre. C'est la première partie de notre simulation, en suite nous avons voulu connaître l'influence d'une courbure sur cette fibre avec une idée préjugé n'est au moins vrais: c'est que la courbure influe principalement sur les pertes.

Le point le plus impressionnant dans cette fibre c'est celle de l'imagination et la limite des paramètres alors nous avons changé le cœur de silice en un cœur en silicium et son rayon pour voir l'influence de ce changement sur le transport de la lumière. Nous avons obtenu des résultats spectaculaires. Selon le diamètre, on peut utiliser notre fibre pour une dispersion nulle, on utilise

Conclusion générale

un diamètre et une longueur d'onde exacte (ex: un rayon de $0.3 \mu\text{m}$ et une longueur d'onde de $1.3 \mu\text{m}$).

Les performances que présente cette fibre peuvent être utiles dans plusieurs domaines comme les télécommunications, principalement grâce à l'avantage des pertes réduites et la puissance transmise qui peut contenir cette fibre.

Bibliographie

- [1] C. Fortier, Génération de sources optiques fibrées très hautes cadences et caractérisations de fibres optiques microstructures en verre de Chalcogénure, Thèse de Doctorat de l'université de Bourgogne, années 2011
- [2] F. Bahloul, Etude des fibres optiques microstructures air/silice et de leurs applications aux systèmes de télécommunications, thèse de Doctorat de l'université de Tunis El Manar, années 2006
- [3] A. Peyrilloux, Modélisation et caractérisation des fibres microstructurées air/silice pour application aux télécommunications optiques, thèse de Doctorat de l'université de Limoges, années 2003
- [4] B. Fatima, Etude et Simulation de la Propagation des Ondes Electromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques, Thèse de magister de l'université de Tlemcen, années 2013
- [5] E. Kerrinckx, les microstructurations dans les fibres optiques, Thèse de doctorat à l'université de Lille, années 2005
- [6] G. Mehdi, optimisation des performance d'une fibre optique dopée a l'erbium, thèse de magister de l'université de Constantine, années 2009
- [7] U. Pedrazza, doped sol-gel materials for the production of optical fibers, Thèse de doctorat de l'école Polytechnique Fédérale de Lausanne, années 2006
- [8] G. Prabhakar et al, Large-effective-area dispersion-compensating fiber design based on dual-core microstructure, Applied Optics, date de publication le 1 juillet 2013
- [9] X. Wang et al, Bend-resistant large-mode-area photonic crystal fiber with a triangular-core, Applied Optics, date de publication le 20 juin 2013
- [10] L. Lebonté titre Analyse théorique et expérimentale des principales caractéristiques du mode fondamental dans les fibres optiques microstructurées air/silice, thèse de doctorat de l'université, années 2012
- [11] K.Saitoh and M. Koshiba, chromatic dispersion controle in photonic crystal fibres: application to ultra-flattened dispersion, Optics Express, date de publication le 14 Avril 2013

- [12] S. Lou et al, Bending Orientation Insensitive Large Mode Area Photonic Crystal Fiber With Triangular Core, IEEE photonics society, Volume 5, Number 4, aout 2013
- [13] M. Dybendal Nielsen, Large Mode Area Photonic Crystal Fibers, Thèse de doctorat de l'université du Denmark, années 2012
- [14] R. Antoine, Nouveaux matériaux vitreux dopés par des ions ou des nanoparticules métalliques et destinés à la réalisation de fibres optiques, thèse de doctorat de l'université de Lille, années 2013
- [15] L. Bigot, université de Lille, Fibres à cristal photonique: 10ans d'existence et un vaste champ d'applications, années 2006
- [16] A. Islam et S. Alam Bend-insensitive single-mode photonic crystal fiber with ultralarge effective area for dual applications, SPIE Digital Library, date de publication le 08 janvier 2013
- [17] S.S. Mishra et al, Study of non-linear properties of hollowcore photonic crystal fiber, optik, années 2013

Résume

Nous avons étudié tout au long de notre projet la fibre microstructurée ainsi que toutes ses caractéristiques. Nous avons pu déterminer tout les avantages et inconvénients de cette nouvelle famille de fibre. Nous savons maintenant que notre fibre peut être adaptée au transport de données surtout en télécommunication, avec une combinaison des trois variables nécessaires (le rayon, la distance des trous adjacent et la longueur d'onde). On peut obtenir une fibre capable de supporter de très forte puissance sans s'endommager et atteindre des performances inestimable. On peut adapter le paramètre qu'on a cité auparavant pour inverser l'influence d'autres paramètres comme une dispersion positive et une autre négative, ce qui revient à dire que la fibre microstructurée représente le futur en terme de transmission optique.

Abstract

We studied throughout our project the microstructured fiber and all its characteristic. We could determine all the pros and cons of this new family of fiber. We now know that our fiber may be suitable for transporting data especially in telecommunications, with a combination of the three necessary variables (radius, distance from adjacent holes, and the wavelength). We can now obtain a fiber capable to support a high power without being damaged and it will achieve valuable results. You can adapt the parameter which is cited before to reverse the influence of other parameters such as a positive dispersion and another negative. Back to say that the microstructured fiber is the future in terms of optical transmission.

ملخص

في دراستنا هذه تطرقنا إلى الألياف الضوئية صغيرة البنية microstructurée وجميع خصائصها، و تمكنا من تحديد ايجابيات و سلبيات هذه العائلة الجديدة من الألياف، هذه الألياف يمكن أن تستعمل في مجال الاتصالات، هذا تحت تأثير ثلاث متغيرات (القطر، المسافة بين ثقبين متجاورين، طول الموجة) ، نستطيع إيجاد ألياف تستطيع مقاومة طاقات قوية بدون حصول تلف و الحصول على مردود كبير، يمكن التحكم بالمتغيرات السابقة للحصول على خصائص مرادة، كالتشتت الايجابي و الآخر السلبي، بمعنى أن هذه الألياف تشكل مستقبل الاتصالات السلوكية و اللاسلوكية.