

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE : TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE**  
**N° : 2018/INST09/87**



**DOMAINE : SCIENCE ET**  
**TECHNOLOGIE**  
**FILIERE : ELECTRONIQUE**  
**OPTION : INSTRUMENTATION**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par: FERHATI Soumia**

**Intitulé :**

**Etude et simulation des fibres optiques**  
**microstructures (FOM)**

**Soutenu devant le jury composé de :**

Dr. GUERMAT Noubel	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. KEBAILI Farida	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Dr. FODIL Malika	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2017 / 2018**

## **Remerciements**

*je tiens à remercier chaleureusement mon encadreur Dr. Kebaili Farida pour ses encouragements, ses orientations et ses précieux conseils. Merci pour sa grande disponibilité.*

*J'adresse aussi mes vifs remerciements aux membres du jury pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail.*

*Par ailleurs je remercie Dr. Ladjal Mohamed chef du département d'électronique.*

*Je remercie tous les enseignants du département d'électronique.*

*Je voudrais en fin remercier tous ceux qui m'ont accordée leurs aides et leurs encouragements.*

## *Dédicaces*

*A mon cher père et à ma mère*

*A mes frères et sœurs tous en son propre nom*

*Au compagnon du chemin dans la vie : mon mari*

*A toute ma famille et à tous mes amis et collègues*



### Résumé

La fibre optique est un guide de lumière qui constitue aujourd'hui le support privilégié pour le transport d'information à haut débit. Mais, pour répondre aux besoins sans cesse plus importants engendrés par le développement d'Internet en particulier, il s'avère nécessaire d'améliorer toujours les caractéristiques de propagation dans les fibres, surtout celles relatives aux pertes et celles concernant la valeur et la pente de la dispersion chromatique sur toute la bande spectrale utilisée (cas des télécommunications).

Une nouvelle génération de fibres est imaginée dans le but d'obtenir des pertes moindres que les fibres conventionnelles.

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

Dans ce contexte, nous avons réalisées un travail purement théorique basé sur la modélisation et la simulation numérique des différents paramètres de propagations dans les fibres optiques microstructures.

Ce travail nous a permis de mettre en évidence l'effet de chaque paramètre sur la propagation des signaux optiques.

**Mots clés :** Fibre optique microstructure, paramètres géométriques, propagation, pertes.

### Abstract

The optical fiber is a light-guide who is now the preferred medium for transport information at high speed. But, to meet the important growing needs generated, in particular, by the development of the Internet, it is necessary to improve the fiber characteristics, especially those relating the losses and those concerning the value and the slope of the chromatic dispersion throughout the used spectral band (optical telecommunications case). A new génération of fiber is imagined in order to obtain lower losses than conventional fibers.

These fibers known as " Microstructured fiber; photonic crystal fiber (PCF) or interdict photonic fiber band gap ".

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

The effect each parameter on the propagations characteristics has been calculated.

**Keywords:** Micro-structured optical fiber, geometric parameters, propagation losses.

### ملخص

الليف البصري هو موجه موجي للضوء الذي يعتبر وسيلة نقل هامة جدا للمعلومة في عصرنا الحالي. لكن وخصوصا فيما يتعلق بتلبية جميع متطلبات الاتصال خاصة الانترنت يجب تحسين وتطوير الخصائص الضوئية لهذه الألياف وخاصة فيما يتعلق بالضياع والتبديد اللوني على طول الشريط الطيفي المستعمل. لأجل هذا طورت ألياف من نوع جديد من أجل الحصول على أقل قيمة للضياع. تعرف هذه الألياف باسم الليف البصري الميكرو بنيوي أو الليف البصري الفتوني أو الليف البصري ذي الشريط الفتوني المانع. من أجل هذا قمنا بدراسة نظرية لأبرز تأثير الشكل الهندسي الميكرو بنيوي لليف بصري الميكرو بنيوي على الضياع. لقد بينا من خلال هذه الدراسة تأثير مختلف العوامل على مميزات الانتشار عبر الألياف الفوتونية.

## Sommaire

Remerciement.....	i
Dédicace.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iii
ملخص.....	iv
Sommaire.....	v
Liste des abréviations.....	viii
Liste des symboles .....	ix
Liste des figures .....	x
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralité sur les fibres optiques</b>	
I.1.Introduction.....	4
I.2. Historique.....	4
I.3. Fibre optique.....	6
I.4. Principe de fonctionnement d'une fibre optique.....	7
I.5. Types des fibres optiques.....	8
I.5.1. Fibres optiques monomode.....	8
I.5.2. Fibres optiques multimodes.....	9
I.5.2.1 Fibres multimodes à saut d'indice.....	9
I.5.2.2 Fibres multimodes à gradient d'indice.....	10
I.6. Avantage d'une fibre optique.....	10
I.7. Les inconvénients d'une fibre optique .....	11
I.8. Fabrication d'une fibre optique.....	11
I.9. Les applications de la fibre optique.....	12
I.9.1. Les télécommunications.....	12
I.9.2. Les réseaux sous-marins.....	12
I.9.3. L'armée.....	13
I.9.4. Applications diverses.....	13
I.10. Fibres Microstructures Aire/Silice (FMAS).....	14
I.11. Géométrie d'une FMAS.....	14
I.12. Fibres optiques microstructures silice.....	16

<b>I.13. Deux types de guidage.....</b>	<b>17</b>
<b>I.13.1. Guidage par Bande Interdite Photonique (BIP).....</b>	<b>18</b>
<b>I.13.2. Guidage par Réflexion Totale Interne Modifiée (RTIM).....</b>	<b>20</b>
<b>I.14. Fabrication.....</b>	<b>21</b>
<b>I.15. Applications.....</b>	<b>24</b>
<b>I.15.1 Lasers, amplificateurs.....</b>	<b>26</b>
<b>I.15.2. Capteurs.....</b>	<b>27</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>28</b>

**Chapitre II : Modélisation de la fibre optique microstructure**

<b>II.1.Introduction.....</b>	<b>30</b>
<b>II.2. Caractérisation de la fibre optique.....</b>	<b>30</b>
<b>II.2.1. Ouverture numérique.....</b>	<b>30</b>
<b>II.2.1.1. La fréquence normalisée.....</b>	<b>31</b>
<b>II.2.2. Atténuation.....</b>	<b>32</b>
<b>II.2.3. La bande passante.....</b>	<b>33</b>
<b>II.2.4. La dispersion.....</b>	<b>34</b>
<b>II.2.4.1. La dispersion chromatique.....</b>	<b>34</b>
<b>II.3. Propriété et caractéristique FOM.....</b>	<b>35</b>
<b>II.3.1. L'ouverture numérique.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.1. Fréquence normalisée nommée <math>V_{eff}</math>.....</b>	<b>36</b>
<b>II.3.2. Les pertes de la fibre optique microstructure.....</b>	<b>37</b>
<b>II.3.2.1. Pertes par diffusion.....</b>	<b>37</b>
<b>II.3.3.Comportement monomode large bande.....</b>	<b>38</b>
<b>II.3.4. Dispersion chromatique.....</b>	<b>39</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>40</b>

**Chapitre III : Résultats et interprétation**

<b>III.1.Introduction.....</b>	<b>42</b>
<b>III.2. Environnement de CAD.....</b>	<b>42</b>
<b>III.2.1.Le simulateur « bandsolve».....</b>	<b>42</b>
<b>III.2.2. Présentation de Full Wave.....</b>	<b>43</b>
<b>III.3. Signification des icônes de l'interface graphique du logiciel R Soft.....</b>	<b>43</b>
<b>III.4. Les étapes de simulation d'un guide d'onde.....</b>	<b>45</b>
<b>III.4.1. Créer un nouveau circuit.....</b>	<b>45</b>

<b>III.4.2.Générer la structure de réseau.....</b>	<b>47</b>
<b>III.4.3.Régler les paramètres globales.....</b>	<b>48</b>
<b>III.4.4. Définition des variables.....</b>	<b>49</b>
<b>III.4.5. Vérifier la structure.....</b>	<b>50</b>
<b>III.5. Diagramme des bandes.....</b>	<b>50</b>
<b>III.6.Création d'un guide d'onde et calcule la transmission.....</b>	<b>52</b>
<b>III.7.Calcule facteur de qualité Q.....</b>	<b>52</b>
<b>III.8. Les parcelles en fonction de la fréquence.....</b>	<b>53</b>
<b>III.9. Explorer la condition monomode.....</b>	<b>53</b>
<b>III .10.Caractère monomode large bande.....</b>	<b>54</b>
<b>III.11.Dispersion Chromatique.....</b>	<b>55</b>
<b>III.12. Balayage sur le vecteur k pour produire des relations de dispersion.....</b>	<b>56</b>
<b>III.13. Calcul de plusieurs courbes de nombres-V.....</b>	<b>57</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>59</b>
<b>Conclusion général.....</b>	<b>60</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>61</b>

**Liste des abréviations**

**FOM** : Les fibres optiques microstructurées

**PMD** : La dispersion des de polarisation

**FMAS** : Fibres Microstructurées Aire/Silice

**BIP** : Bande Interdite Photonique

**RTIM** : Réflexion Totale Interne Modifiée

**IM** : La direction correspond à la direction des seconds voisin

**TM** : Transverse électrique, la polarisation magnétique

**TE** : Transverse magnétique, la polarisation électrique

**FCP** : Fibres cristaux photoniques

Liste des symboles

$n_g$  : Gaine d'indice

$n_c$  : Cœur d'indice

$SiO_2$  : Oxygéné de silicium

$d$  : Diamètre

$V_{eff}$  : La fréquence normalisée nommée

$\Lambda$  : Longueurs d'onde

ON : Ouverture numérique

V : La fréquence normalisée

$\lambda_c$  : Longueur d'onde de coupure

$a_{max}$  : Rayon maximale

A[**dB**] : l'atténuation en décibel

$P_e$  : Puissance lumineuse à l'entrée

$P_s$  : Puissance lumineuse à la sortie

BP : Bande passante

$t_g$  : Temps de groupe

$k_B$  : Constante de Boltzmann

$T_f$  : Température effective

$B_T$  : Coefficient de compressibilité isotherme

$D_M$  : Dispersion du matériau

$D_G$  : Dispersion du guide

a : La période

n : L'indice de réfraction du matériau

Liste des figures

Chapitre I

<b>Figure (I.1)</b> : Schéma descriptif du guidage de la lumière dans un jet d'eau par Colladon [5].....	5
<b>Figure (I.2)</b> : Représentation schématique d'une fibre optique [12].....	7
<b>Figure (I.3)</b> : la fibre optique monomode.....	8
<b>Figure (I.4)</b> : la fibre multimodes à saut d'indice.....	10
<b>Figure (I.5)</b> : la fibre multimodes à gradient d'indice.....	10
<b>Figure (I.6)</b> : représentation géométrique d'une fibre microstructure.....	14
<b>Figure (I.7)</b> : représente un exemple de fibre microstructures à cœur solide.....	15
<b>Figure (I.8)</b> : représentation qui explique le principe de fabrication d'une fibre microstructure.....	17
<b>Figure (I.9)</b> : Schéma de sections transverses (a) d'une fibre de Bragg, (b) d'une FMAS BIP à arrangement triangulaire et (c) hexagonal.....	19
<b>Figure (I.10)</b> : arrangement de la préforme primaire.....	21
<b>Figure (I.11)</b> : canne micro-structurée, préforme secondaire et FMA.....	23
<b>Figure (I.12)</b> : exemple d'image de la section transversale d'une fibre réalisée à l'IRCOM.....	24
<b>Figure (I.13)</b> : Figure Pertes optiques (gauche) de deux fibres (photos) réalisées à partir de la même préforme mère.....	25
<b>Figure (I.14)</b> : Amplification Raman (a) et génération de super continuum (b).....	26
<b>Chapitre II</b>	
<b>Figure (II.1)</b> : Ouverture numérique d'une fibre optique [25].....	31
<b>Figure (II.2)</b> : Les différents types de pertes.....	33
<b>Figure (II.3)</b> : La dispersion chromatique.....	35
<b>Figure (II.4)</b> : Schéma représentant les différents régimes de propagation possibles pour les fibres optiques microstructures à cœur plein.....	37

Chapitre III

**Figure (III.1)** : Fenêtre principale du programme CAD.....45

**Figure (III.2)** : La fenêtre de démarrage (startup Windows).....46

**Figure (III.3)** : Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit.....47

**Figure (III.4)** : Arrangements de disposition de la rangée XZ.....47

**Figure (III.5)** : Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD.....48

**Figure (III.6)** : Fenêtre des paramètres globale du circuit.....49

**Figure (III.7)** : L'éditeur du Tableau de symboles.....49

**Figure (III.8)** : Profile d'indice de la structure à cristaux photoniques 2D.....50

**Figure (III.9)** : La fenêtre de paramètres de simulation de BandSolve où des paramètres numériques de base de simulation sont entrés.....51

**Figure (III.10)** : Diagramme des bandes pour les modes TE et TM dans la structure FCP.....51

**Figure (III.11)** : création d'un guide d'onde et calcule la transmission.....52

**Figure (III.12)** : Calcule facteur de qualité Q.....52

**Figure (III.13)** : Indice effectif tracé vs fréquence pour un PCF.....53

**Figure (III.14)** : Scan de  $V_{eff}$  en fonction de KZ.....54

**Figure (III.15)** : Evolution de la fréquence normalisée  $V_{eff}$  en fonction de  $\alpha_{eq}/\lambda$  ( $\alpha_{eq} = 0,64\Lambda$ ), pour différentes valeurs de  $d/\Lambda$  et pour  $\Lambda = 2,5$  et  $5 \mu\text{m}$ .....55

**Figure (III.16)** : Dispersions chromatiques pour différentes valeurs de  $d/\Lambda$  obtenue pour une FMAS de pas  $2,3 \mu\text{m}$ .....56

**Figure (III.17)** : Relations de dispersion pour la fibre de cristal photonique.....56

**Figure (III.18)** : Onglet Variables indépendantes pour l'analyse bidimensionnelle.....57

**Figure (III.19)** :  $V_{eff}$  en fonction de la largeur et de la fréquence. La ligne horizontale représente la condition monomode.....58

### Introduction générale

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 inconvénient qu'il y a eu la naissance d'une nouvelle famille de fibre optique appelée fibre microstructure.

Les fibres microstructurées air/silice (FMAS) font partie d'une nouvelle classe de guides d'onde ayant des propriétés optiques impossibles à obtenir avec des guides d'onde classiques (fibre conventionnelle). Ces fibres ont donc tout naturellement suscité un grand intérêt dans les systèmes de télécommunications. Une des particularités de ces fibres réside dans la possibilité d'adapter leurs caractéristiques de propagation à une application visée en ajustant les paramètres opto-géométriques (pas, diamètre de trous, etc.) de leur profil d'indice. Ces fibres sont désormais communément classifiées dans deux groupes.

- Le premier groupe englobe les fibres microstructurées dans lesquelles la lumière est guidée par résonance transverse : les FCP (Cœur à bas indice de réfraction que la gaine).
- Le deuxième groupe qui rassemble les fibres microstructurées fonctionnant sur un principe de propagation différent basé sur la réflexion totale interne (RTI) (Cœur à plein).

Dans ce travail, nous avons réalisée un calcul purement théorique basé sur la modélisation et la simulation numérique des différents paramètres de propagations dans les fibres optiques micro structurées. Dont le but de maîtriser le comportement de ce composant, en simulant un modèle mathématique qui existe dans la littérature, en utilisant le R Soft.

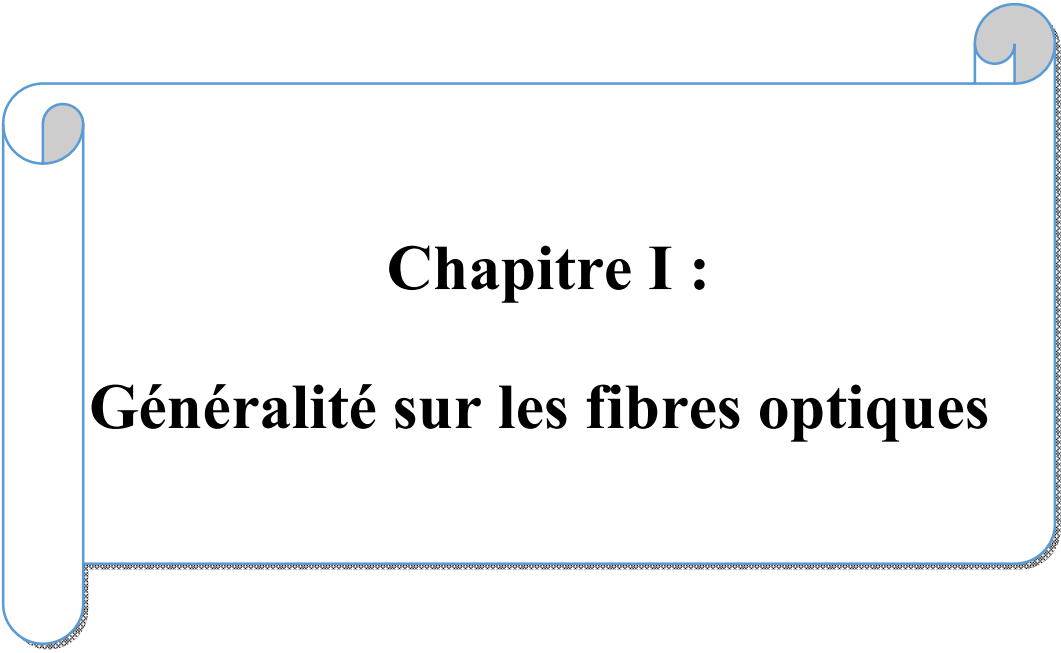
Ce mémoire s'organise en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les fibres optiques comme guide d'onde. Nous donnons un bref aperçu sur les types de fibres optiques et leurs caractéristiques. Nous présentons d'une manière plus détaillé le profil d'indice des fibres à gradient d'indice, technique de fabrication...

Le deuxième chapitre, est consacré à décrire le modèle mathématique utilisé pour notre étude en présentant les équations nécessaires dans le but de prévoir les propriétés de la FMO en fonction de la géométrie de leur profil d'indice.

Dans le troisième chapitre, premièrement, nous allons présenter l'outil de simulation R Soft et son module BandSOLVE. Par la suite, nous donnerons quelques résultats de notre simulation qui donne des tracés qui caractérisent la FMO.

En fin une conclusion générale couronne ce mémoire, et une liste bibliographique pour guider le lecteur intéressé

A decorative graphic of a scroll with a blue outline and grey shading at the corners, containing the chapter title.

# **Chapitre I :**

## **Généralité sur les fibres optiques**

**I.1.Introduction**

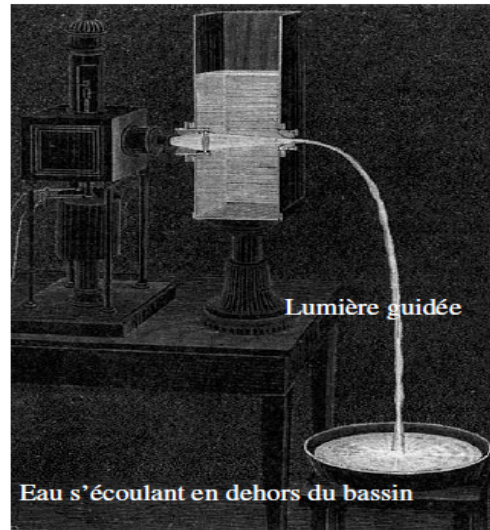
Fibres microstructures, fibres à trous, fibres à cristaux photoniques ou à bandes interdites photoniques... autant d'appellations qui désignent cette jeune branche pourtant vaste de la famille des fibres optiques, qui a vu le jour en 1996 et qui s'est depuis imposée comme une technologie incontournable en photonique. 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 [1]. 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 têtes pour prendre le renne de la transmission optique bien devons les fibres 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 retrouver 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 [2].

Ce chapitre a pour but de représenter généralité sur les fibres optiques classique et microstructures, de représenter paramètres géométriques et domaine d'applications de la fibre optique.

**I.2. Historique**

L'étude de transmission de la lumière est très ancienne, déjà en 1841, le suisse Colladon montrait que la lumière était guidée dans les filets d'un jet d'eau à Genève (Figure 1.1). L'année suivante, en 1842, Jacques Babinet constatait la même chose dans les filets d'eau et des bâtons en verre [3]. En 1880, William Wheeler employait justement des tubes de verre pour éclairer un lieu avec une source lumineuse placée ailleurs : la lumière pouvait être guidée par du verre. En 1888, Roth et Reuss utilisaient des tubes de verre en médecine pour éclairer les cavités et les viscères du corps [4]



**Figure (I.1) :** Schéma descriptif du guidage de la lumière dans un jet d'eau par Colladon [5].

On voit que c'est petit à petit que la fibre optique apparaît. Encore que, jusque là On ne peut pas vraiment parler de fibres en raison de la dimension des « guides » (bâton, tiges). On ne commence à parler de fibres qu'à partir de 1926. C'est en 1927 que Baird et Hansell eurent l'idée de travailler sur les fibres optiques au sens où nous l'entendons aujourd'hui. Ils tentèrent par la suite de mettre au point un dispositif d'images pour télévision à l'aide de fibres, mais, bien que brevetée, cette réalisation n'eut jamais vraiment d'application. C'est à partir de 1930 que l'on commence à travailler sérieusement pour la réalisation de fibres optiques.

La première application fructueuse de la fibre optique apparue seulement en 1950 avec le fibroscope, créé par Van Heel. Grâce à ce dispositif, on pouvait observer avec beaucoup plus d'efficacité (et beaucoup moins de traumatisme) l'intérieur du corps humain et les soudures à l'intérieur des réacteurs d'avions. Malheureusement, la qualité optique de la silice ne permettait pas l'utilisation de ce dispositif sur de grandes longueurs de fibres. Dès la fin des années 1960 naît l'idée de fabrication de fibres optiques de silice pour permettant de transporter la lumière sur de grandes distances, tout en ayant une atténuation la plus faible possible.

En 1968, Kwen Chi Kao réalise des fibres de silice avec des pertes de quelques dB/km [6] dans le proche infrarouge. Peu de temps après en 1970, trois inventeurs (Robert Maurer, Peter Schultz et Donald Keck de la compagnie Corning Glass Works de New-York) réussirent à mettre au point une fibre optique efficace et rentable en termes de transmission d'informations (20 dB/km à  $\sim 1000$  nm) [7]. Leur fibre optique était en mesure de transporter 65 000 fois plus d'informations qu'un simple câble de cuivre. En dehors de la société Corning, plusieurs laboratoires de recherche dont Bells Telephon Laboratories montrèrent que des fibres optiques, en silice dopée ou non, pouvaient être fabriquées avec des longueurs de plusieurs kilomètres et avec des pertes de l'ordre de quelques dB/km [8].

Le premier système de communication téléphonique optique fut installé au centre-ville de Chicago en 1977. En 1979, des pertes de l'ordre de 0,2 dB/km ont été mesurées à la longueur d'onde de  $1,55\mu\text{m}$  [9]. Une telle valeur signifiait qu'il était possible de transporter un signal optique sur une centaine de kilomètres sans utiliser de répéteur.

La liaison optique entre les centraux téléphoniques des Tuileries et Philippe- Auguste, à Paris fut en 1982 la première liaison optique en France [10]. On estime qu'aujourd'hui que plus de 80 % des communications à longues distances sont transportées par plus de 25 millions de kilomètres de câbles à fibres optiques partout dans le monde.

Dans une première phase (entre 1984 et 2000), la fibre optique a surtout été utilisée pour des applications nécessitant de forts débits. Cependant avec la baisse des coûts et les besoins croissants des particuliers pour le haut débit d'information, on envisage depuis 2005 son arrivée même chez les particuliers.

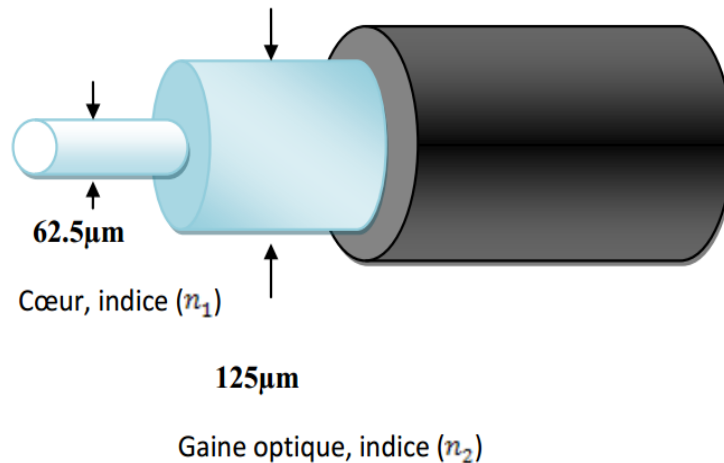
Après ce bref historique, nous allons discuter plus en détail des fibres optiques car elles constituent l'objet de nos travaux. Nous introduirons les différentes grandeurs caractéristiques ainsi que les propriétés optiques des fibres optiques « classiques » dites fibres conventionnelles. Nous introduirons à la suite une nouvelle génération de fibres optiques : les fibres optiques microstructures (FOM), principal objet de notre étude.

### **I.3. Fibre optique**

La fibre optique qui se présente comme un fil fin de verre et en réalité constituée d'un cœur cylindrique en matériau transparent d'indice de réfraction  $n_1$ , entouré d'une gaine concentrique constituée d'un matériau ayant un indice de réfraction  $n_2$  inférieur à  $n_1$ . Le diamètre du cœur varie de  $8\text{-}10\mu\text{m}$  à  $62,5\mu\text{m}$  selon le type de fibre. Celui

de la gaine est de l'ordre de  $125\mu\text{m}$ . Les valeurs typiques d'indices de réfraction pour le cœur  $n_1=1.48$  et pour la gaine  $n_2= 1.46$  [11].

La fibre est protégée extérieurement par un revêtement dit primaire, réalisé en générale par un matériau plastique.



**Figure (I.2) :** Représentation schématique d'une fibre optique [12].

Les fibres utilisées classiquement dans le domaine des télécommunications guident la lumière par réflexion totale interne. Les fibres micro-structurées air-silice (M A S), qui sont aujourd'hui très largement développées, utilisent soit ce principe de guidage dans le cas où le cœur est en silice pure, soit un guidage par bande interdite photonique, et c'est généralement dans le cas de fibre à cœur creux [13].

#### I.4. Principe de fonctionnement d'une fibre optique

Une fibre optique est un conducteur optique transmettant des informations lumineuses, son utilisation prend de l'ampleur de jour en jour, car elle permet des débits de plusieurs Gbits/s sur de très longues distances. Elle est particulièrement adaptée à l'interconnexion des réseaux. En plus de ses capacités de transmission, ses grands avantages sont son immunité aux interférences électromagnétiques et sa plus grande difficulté d'écoute (sécurisation) contrairement aux supports électriques. Ce qui la rend attrayante dans les contextes où la confidentialité est requise [13].

D'un point de vue technologique, une fibre optique est constituée d'un cœur et d'une gaine en silice de quelques  $\mu\text{m}$ , recouverte d'un isolant.

### I.5. Types des fibres optiques

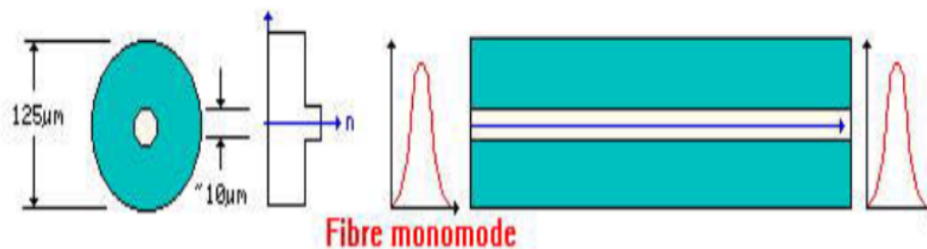
Dans la spécialité des télécommunications, il y a deux types de fibres optiques utilisées :

- les fibres monomodes.
- les fibres multimodes.

La différence entre ces deux types de fibres optiques est la dimension du cœur, où il est de  $10\mu\text{m}$  pour les fibres monomodes et de  $50\mu\text{m}$  pour les fibres multimodes.

#### I.5.1. Fibres optiques monomode

Les fibres monomodes ont un diamètre de cœur (10 microns), faible par rapport au diamètre de la gaine (125 microns) et proche de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière injectée.



**Figure (I.3) :** la fibre optique monomode.

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

Les caractéristiques essentielles d'une fibre optique monomode pour la transmission d'un signal sont [14] :

- l'affaiblissement (dB) par unité de longueur (Km), qui est fonction de la longueur d'onde, soit  $0,36 \text{ dB/Km}$  à  $1300 \text{ nm}$  et  $0,2 \text{ dB/Km}$  à  $1550 \text{ nm}$ .

- La dispersion chromatique, qui conduit à un élargissement d'une impulsion lumineuse du fait de la variation des vitesses de propagation, ce qui est pénalisant dans le cas d'une modulation directe (1 ou 0) du signal optique.
- la dispersion des modes de polarisation (PMD), qui se caractérise par un étalement spectral en ligne
- la longueur d'onde de coupure. Dans les fibres monomode il existe deux groupes.
- les fibres monomode avec profil à gradient d'indice, qui ne sont pas beaucoup utilisées en télécommunications.
- les fibres avec profil à saut d'indice, avec un diamètre du cœur allant de 9 à 10 $\mu\text{m}$  et un diamètre de gaine 125 $\mu\text{m}$ , qui sont plus utilisées dans les télécommunications. Contrairement à la fibre multimodes la propagation dans la fibre monomode s'effectue avec un seul mode dit mode fondamental.

### **I.5.2. Fibres optiques multimodes**

Les fibres multimodes ont un diamètre de cœur important (de 50 à 85 microns). Un rayon lumineux pénétrant dans le cœur de la fibre, à l'une de ses extrémités, se propage longitudinalement jusqu'à l'autre extrémité grâce aux réflexions totales qu'il subit à l'interface entre le verre de cœur et le verre de gaine. Plusieurs modes (chemins optiques) se propagent dans ce type de fibre optique. Selon les différents chemins empruntés par les rayons, ils arrivent avec des temps différents. Ce qui provoque une forte dispersion du signal lumineux, due à la multiplication des modes de propagations (dispersion modale). Parmi les fibres multimodes, on distingue les fibres à saut d'indice (débit limité à 50 Mb/s) et les fibres à gradient d'indice (débit limité à 1 Gb/s).

#### **I.5.2.1 Fibres multimodes à saut d'indice**

Dans ce type de fibre l'indice de réfraction reste constant dans tout le cœur de la fibre, et à l'interface gaine cœur il décroît brusquement en effectuant un saut d'indice dans la gaine.

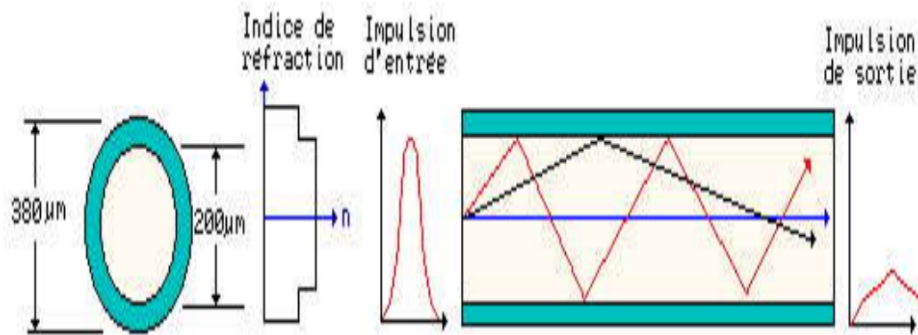


Figure (I.4) : la fibre multimodes à saut d'indice.

### I.5.2.2 Fibres multimodes à gradient d'indice

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

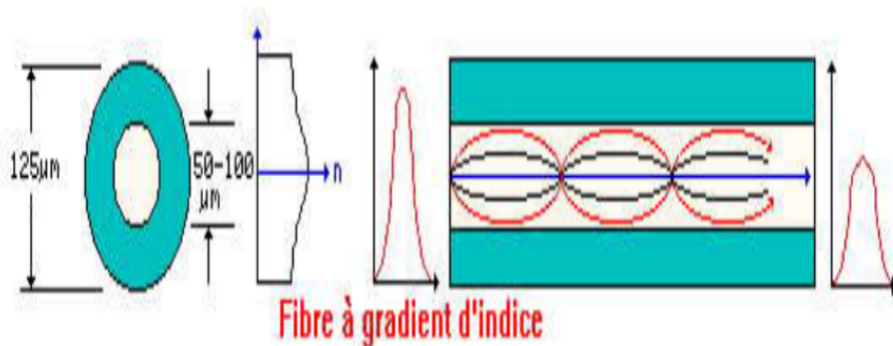


Figure (I.5) : la fibre multimodes à gradient d'indice.

### I.6. Avantage d'une fibre optique

Les avantages que procure la fibre optique peuvent être classés en :

- **Performances de transmission** : Très faible atténuation, très grande bande passante, possibilités de multiplexage(en longueur d'ondes).
- **Avantages de mise en œuvre** : Très petite taille, grande souplesse, faible poids.

- **Sécurité électrique** : Isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive ou sous de forte tension.
- **Sécurité électromagnétique** : Insensible aux parasites et elle n'en crée pas, inviolabilité presque totale.
- **Avantage économique** : Moindre coût, en comparaison avec d'autres supports [15].

### **I.7. Les inconvénients d'une fibre optique**

- Des pertes peuvent être causées par des courbures du câble, des connecteurs mal positionnés ou sales, des inhomogénéités dans le verre de la fibre.
- Difficultés d'adaptation avec les transducteurs optoélectroniques.
- Exigences micromécaniques importantes (connexions, alignement).

### **I.8. Fabrication d'une fibre optique**

La fabrication d'une fibre optique passe par la réalisation d'une préforme cylindrique en barreau de silice. La silice est un composé oxygéné de silicium, de formule  $\text{SiO}_2$ , présent dans un grand nombre de minéraux, tels que le quartz, la calcédoine et l'opale. Le barreau subit ensuite un étirage, en plaçant l'extrémité dans un four porté à une température voisine de  $2000^\circ\text{C}$ . Il est alors transformé en une fibre de plusieurs centaines de kilomètres, à une vitesse de l'ordre du kilomètre par minute. La fibre est ensuite revêtue d'une double couche de résine protectrice avant d'être enroulée sur une bobine ; Son centre, qui constitue le cœur est entouré d'une silice de moindre qualité qui forme la gaine optique. On réalise un écart d'indice entre le cœur et la gaine en incorporant des dopants, tels que [16] :

- Le germanium et le phosphore qui accroissent l'indice dans le cœur.
- Le bore et le fluor qui le font décroître dans la gaine.

Une préforme de verre d'une longueur de 1m et d'un diamètre de 10cm permet d'obtenir par étirement une fibre monomode d'une longueur d'environ 150 Km.

**I.9. Les applications de la fibre optique****I.9.1. Les télécommunications**

De nos jours il faut que les informations se propagent très vite. Pour cela ces dernières sont envoyées par les réseaux qui permettent de mettre en relation un grand nombre de personnes. La communication et l'échange important d'informations sont possibles grâce aux réseaux. De plus en plus, ces réseaux utilisent comme moyen de transmission la fibre optique ; Son utilisation permet la réception et l'émission de données de manière très rapide et avec une plus grande sûreté de transmission. En téléphonie, les câbles coaxiaux sont remplacés peu à peu par des fibres optiques. En effet, la fibre optique est plus économique sur longues distances et le nombre de composants est moins important. La fibre optique a également été retenue dans ce domaine, car sur de longues distances, son affaiblissement faible évite des répéteurs supplémentaires, à la différence du coaxial et des liaisons hertziennes. Le premier réseau urbain en fibre optique date de 1980 à Paris, entre deux centrales téléphoniques. Les premières commandes ont été passées en 1982 et le début des réalisations massives remonte à 1983. L'utilisation des fibres monomodes débute en 1987. Actuellement trois quarts des fibres sont installés en région parisienne entre des centres téléphoniques. Elles fonctionnent sans répéteurs à 34 Mbits/s. Fin 1988, 150000 km de fibres optiques étaient en service et 300000 km étaient commandés.

**I.9.2. Les réseaux sous-marins**

Pour répondre à l'explosion de la demande de réseaux de télécommunication à forte capacité, des milliers de kilomètres de câbles sous-marins à fibres optiques sont posés au fond des mers partout dans le monde. La demande de réseaux large bande (transmission de données à grande vitesse) atteint aujourd'hui, à l'échelle mondiale, une ampleur sans précédent sous l'effet de deux facteurs : d'une part, la croissance inexorable de l'Internet et, d'autre part, la poursuite de déréglementation des marchés des télécoms. Le boom de la demande liée au Web a été particulièrement remarquable. En 1998, pour la première fois, le trafic de données à travers l'Atlantique et le Pacifique a été plus important que le trafic téléphonique. La libéralisation des marchés des télécommunications a suscité l'émergence de plus de 4000 nouveaux opérateurs dans le monde qui ont chacun pour objectif d'offrir à

leurs clients une capacité de transmission peu coûteuse et de qualité. Les réseaux sous-marins offrent les capacités et les débits requis pour transporter le volume de données générées par l'Internet. Certains groupes sont capables d'offrir des solutions intégrées qui associent les réseaux sous-marins aux systèmes terrestres, radio et satellitaires.

### **I.9.3. L'armée**

Son utilisation est également intéressante pour les militaires car elle propose de nombreux avantages comme son faible poids, sa faible taille, et son insensibilité au brouillage et à la détection. Une nouvelle application vient d'être inventée à savoir le missile à fibre optique : Le Polyphème. C'est un missile qui file à plus de 500 km/h, dévidant derrière lui une bobine de fibre optique qui le relie au poste de tir, et qui permet de le guider jusqu'à sa cible via un opérateur agissant grâce à une caméra embarquée. La fibre optique, d'un diamètre de quelques microns, flotte au gré du vent sur plusieurs dizaines de kilomètres. Comme l'explique son "inventeur", Alain Rageot, chef de projet pour la bobine de fibre, "dans les situations de guerres modernes, les dispositifs de brouillage et certaines radiations électromagnétiques empêchent les guidages par télécommunications hertziennes, de plus, celles-ci sont limitées par le relief environnant. D'où l'idée de mettre un fil à la patte du missile pour contrôler son vol jusqu'à l'impact". Sur le marché très pointu des missiles (estimé à 10000 unités), outre les capacités technologiques, le prix est un facteur décisif. Lorsqu'un hélicoptère attaque un objectif au canon ou à la roquette il est vulnérable aux défenses anti-aériennes de l'adversaire. Plutôt que de risquer la vie de l'équipage et l'appareil, il est préférable de tirer un missile depuis un véhicule lanceur qui peut rester à plusieurs dizaines de kilomètres de la menace. Toute la difficulté réside dans la maîtrise du dévidage à grande vitesse avec transmission optique en continu. Il a fallu quelques 400 tests, la plupart en simulation de vol, pour parvenir à une solution satisfaisante.

### **I.9.4. Applications diverses**

La fibre optique est utilisée dans le domaine de la médecine pour filmer des endroits sensibles ou inaccessibles du corps humain, du fait de la réalisation de caméra et de câbles de très petite taille. Avec de la fibre optique on peut calculer la distance d'un objet par rapport à un autre, des vitesses de rotation, des vibrations. Mais tous ces petits systèmes

sont plus précis que les autres systèmes de même utilité mais utilisant d'autre technologie de détection. Pour finir, on peut citer une utilisation qui n'offre aucune utilité à part celle de l'esthétique et de la décoration, ce sont les « fleurs » en fibres optiques dont leurs extrémités brillent de toutes les couleurs.

### I.10. Fibres Microstructures Aire/Silice (FMAS)

Les fibres optiques microstructures, 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 [2]. 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 [17].

### I.11. Géométrie d'une FMAS

Les fibres microstructures 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 :

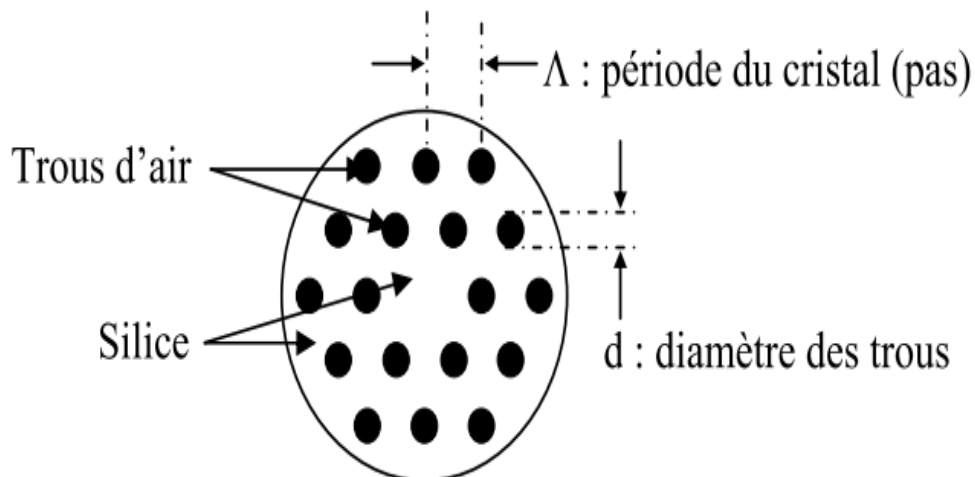
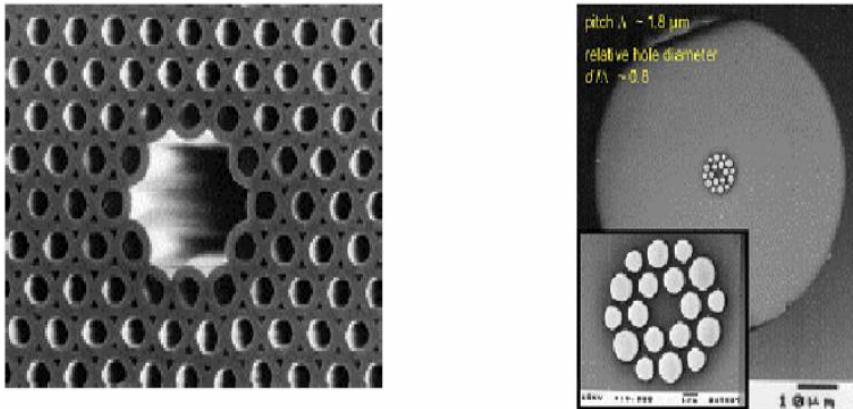


Figure (I.6) : représentation géométrique d'une fibre microstructure.

Les deux paramètres principaux sont l'écartement entre les centres de deux trous adjacents (pas ou pitch)  $\Lambda$  et le diamètre du trou  $d$  qui permettent de définir le rapport  $d/\Lambda$  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 microstructure (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 microstructure 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 [18] [19].

Il existe deux types de fibre microstructures 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 microstructures à cœur solide.

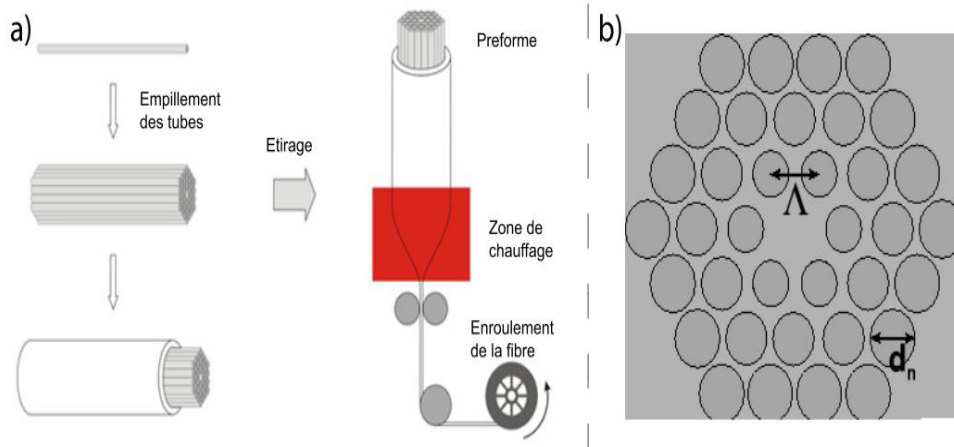
Dans les deux cas, le guidage est lié à la microstructure des fibres plutôt qu'à la différence de composition chimique entre la gaine et le cœur. Les FMAS sont différents des fibres conventionnelles par leur grande flexibilité structurelle et leur fort contraste d'indice.

La présence de trous, ordonnés ou pas diminue l'indice de réfraction effectif de la gaine [20], 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 microstructures 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.

### **I.12. Fibres optiques microstructures 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 réservait pour les fibre optique conventionnel pouvant atteindre plus de 20 $\mu$ m 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 microstructure 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 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  $\Lambda$  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 [18].

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 microstructures 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 [19].

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

### I.13. 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

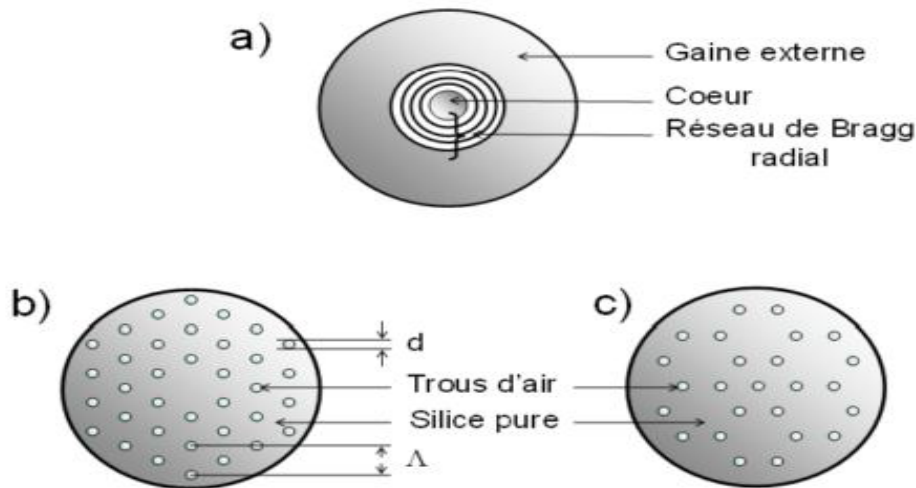
interdite photonique dans la gaine, soit la réflexion totale interne. Ces deux types de fibres sont décrits dans la suite de ce chapitre.

### **I.13.1. Guidage par Bande Interdite Photonique (BIP)**

La "renaissance" des fibres microstructures 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 1.9 (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 1.9(b)) ou hexagonal (encore appelé "nid d'abeilles" (figure 1.9(c)) 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  $\Lambda$ , tandis que le diamètre des trous est noté  $d$ . Dans la suite ces fibres seront appelées FMAS BIP [20].



**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 cœur). Un mode transverse peut donc s'installer dans le cœur et être guidé dans la direction  $z$ . Les longueurs d'onde ( $\lambda$ ) centrales rejetées par le matériau BIP dépendent de la période du cristal et de la proportion d'air ( $\lambda \approx 2\Lambda$ ) [18].

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<sub>2</sub>, 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 1µm), et ils sont espacés d'un pas de 2,3µm 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.

### **I.13.2. 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 :  $kn_c < \beta < kn_g$

Avec  $n_c$  et  $n_g$  désignant respectivement les indices du cœur et de la gaine,  $\beta$  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  $\beta$  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  $\beta$  telle que :

$$\beta_{\text{gaine silicemax}} < \beta < k n_{\text{silice}}$$

$\beta_{\text{gaine silicemax}}$  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 [1]

#### I.14. 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 [21] [22].

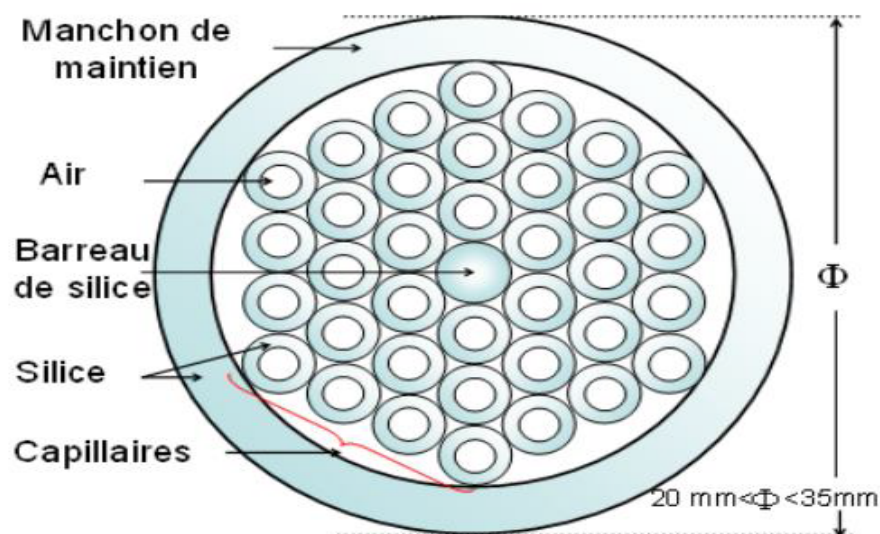
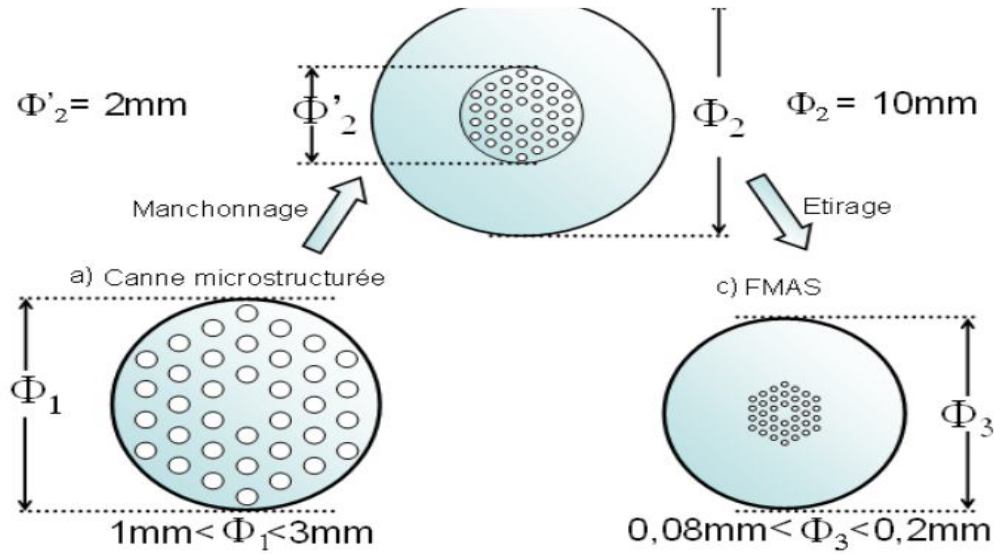


Figure (I.10) : arrangement de la préforme primaire.

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 microstructures aux dimensions extérieures millimétriques (figure 1.11 (a)). Cette première réduction d'échelle homothétique est effectuée 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.

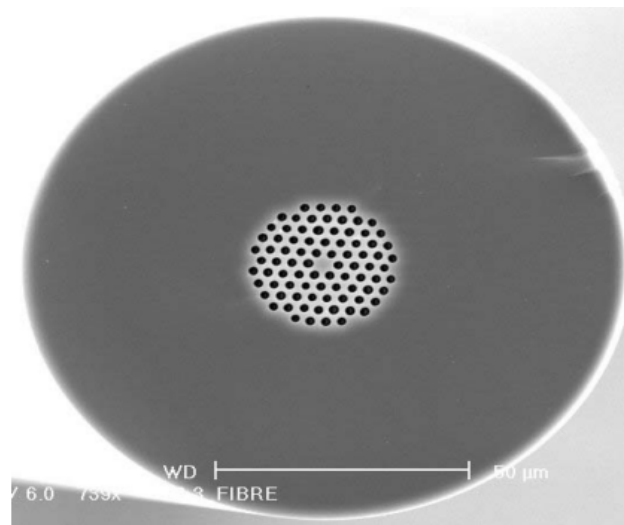


**Figure (I.11) :** canne micro-structurée, préforme secondaire et FMAS.

L'étape suivante consiste à manchonner la canne microstructure dans un tube à bord épais pour constituer la "préforme secondaire" d'environ dix millimètres de diamètre (figure 1.4 (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 1.4 (c)) [18]. 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. 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 remanchonnage de la canne microstructure 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 1.5 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.



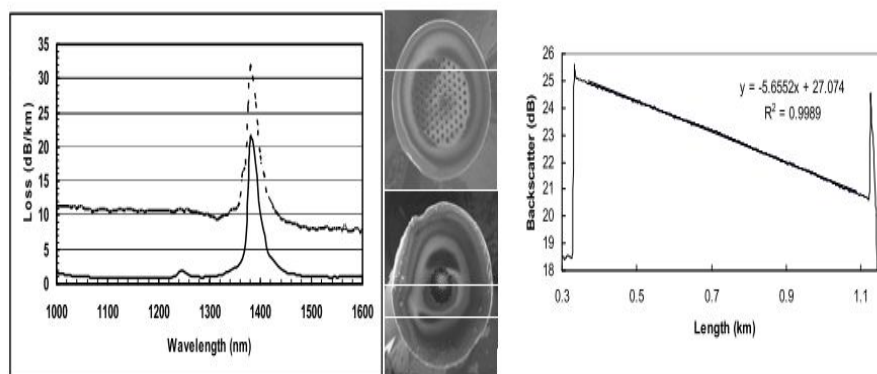
**Figure (I.12) :** exemple d'image de la section transverse d'une fibre réalisée à l'IRCOM.

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

### **I.15. 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 microstructures 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  $9\mu\text{m}$ , avec des pertes minimales de  $0.9\text{ dB/km}$  à  $1550\text{ nm}$  (correspondant aux pertes intrinsèques des matières premières). La courbe en pointillés représente l'atténuation d'une fibre avec un diamètre de cœur de  $2.5\mu\text{m}$ . Les pertes globales sont plus élevées mais les pertes supplémentaires, liées aux OH (pics à  $1383\text{ nm}$ ), sont identiques à la fibre précédente, avec un niveau qui correspond aux spécifications des matières premières (concentration OH de  $0.6\text{ ppm}$ ). Pour atteindre ce résultat, difficile à obtenir avec des fibres microstructures 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  $800\text{m}$  indiquant une bonne homogénéité de fabrication sur de grandes longueurs [22]



**Figure (I.13) :** Figure Pertes optiques (gauche) de deux fibres (photos) réalisées à partir de la même préforme mère.

Trace OTDR (droite) pour  $800\text{m}$  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 microstructures (700 m) avec un coefficient de gain comparable aux fibres classique (figure 1. 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 picOH4 (figure1.14b).

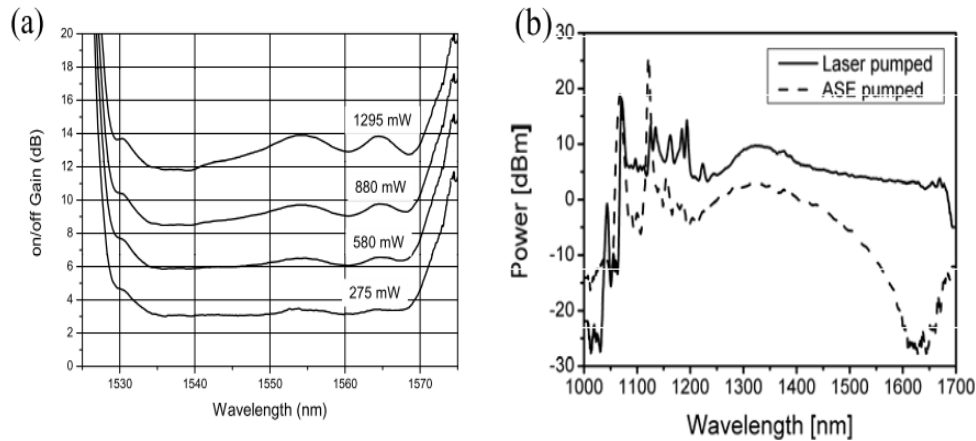


Figure (I.14) : Amplification Raman (a) et génération de super continuum (b).

Dans les fibres, microstructures de faibles aires effective et faibles pertes Au cours de cette communication, nous présenterons d'autres applications des fibres microstructures, notamment des fibres en verre de chalcogénure, dans les domaines des télécommunications et des sources optiques.

### I.15.1 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 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 [23].

### **I.15.2. 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 [23]. 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 [24]. 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 2.33 rads/mm a été mesurée en utilisant cette approche.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques notions sur les fibres optiques, et par la suite les fibres optiques microstructure, nous avons décrits leur structures, fonctionnement, caractéristiques, fabrication.

A decorative scroll frame with a blue border and grey scroll tabs at the corners. The text is centered within the frame.

## **Chapitre II :**

# **Modélisation de la fibre optique microstructure**

## **II.1.Introduction**

Les outils de modélisation de la propagation dans les fibres sont très importants pour déterminer le ou les types de profils qui sont en adéquation avec le type d'application visée.

Non seulement la modélisation de la dispersion est cruciale mais il est également possible de modéliser, en fonction du profil choisi, les pertes de guidage associées au guide d'onde. La modélisation permet également d'étudier le comportement modal de la FOM. La simulation permet au final la détermination des différents paramètres pouvant mener à la génération des effets non linéaires dans une fibre donnée.

De ce fait, les approches classiques de modélisation de la fibre de verre Qui se basent sur la faible atténuation ne sont pas valides pour la FOP car cette condition n'est pas vérifiée. L'un des principaux problèmes lorsqu'on cherche à décrire les Caractéristiques de propagation dans la FOP est le grand nombre de modes capables de s'y propager.

Ce chapitre a pour but de présenter les caractéristiques et les propriétés de propagation originales d'une nouvelle classe de fibres optiques dont la gaine optique est constituée d'un arrangement de trous d'air de dimensions microniques dans une matrice de silice.

## **II.2.Caractérisation de la fibre optique**

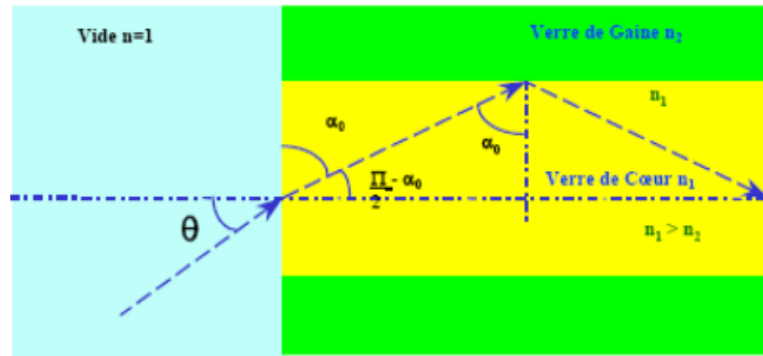
La fibre optique est caractérisée par plusieurs paramètres qui sont déterminés à partir de ses différents types. Les quatre paramètres les plus importants sont [25] :

- ouverture numérique
- Atténuation
- La bande passante
- La dispersion

### **II.2.1.Ouverture numérique**

L'angle limite d'acceptation de la lumière par le guide exprime la faculté de capter la lumière d'une source à sa section frontale. Elle est directement liée

à l'ouverture du cône d'acceptance des rayons lumineux critiques conduisant encore juste à une réflexion total, comme le montre la figure suivante :



**Figure (II.1) :** Ouverture numérique d'une fibre optique [25].

Pour les fibres monomodes il est préférable d'utiliser une source laser car l'ouverture numérique est faible. Mais pour les fibres à gradient d'indice, où il varie le long d'un diamètre, l'ouverture numérique est alors maximale sur l'axe de la fibre et s'annule à la périphérie du cœur [26]. Si l'entrée de la fibre se fait par l'air (n0=1) l'ouverture numérique est donnée par :

$$ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 1 \dots\dots\dots(1)$$

**II.2.1.1. La fréquence normalisée**

V qu'on définit comme suit :

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \dots\dots\dots(2)$$

avec  $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière,  $a$  le diamètre de cœur,  $n_1$  l'indice de cœur et  $n_2$  l'indice de la gaine.

-donne une indication directe du nombre de modes N qu'une fibre multimode peut propager via l'approximation :

$$N = \frac{V^2}{2} \dots\dots\dots(3)$$

A la valeur  $V=2,405$  déterminant le passage du régime monomode au régime multimode, on peut associer la longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$ :

$$\lambda_c = \frac{2\pi a_0 N}{2.405} \dots\dots\dots(4)$$

Pour une longueur d'onde donnée et pour des indices de cœur et de gaine données, la longueur d'onde de coupure permet de calculer le rayon maximal du cœur pour avoir une fibre monomode :

$$a_{max} = \frac{2.405 \cdot \lambda}{2\pi \cdot N} \dots\dots\dots(5)$$

**II.2.2. Atténuation**

L'atténuation du signal dépend de la nature de la fibre essentiellement en fonction de sa nature (monomode ou multimode).

Le choix de la fibre optique utilisée est principalement imposé par la longueur d'onde du signal transmis. Ainsi, pour des signaux de longueur d'onde entre 800nm et 1300nm, on est contraint d'utiliser une fibre multimode, alors que pour des signaux de longueur d'onde de 1280 à 1640 nm, on peut utiliser une fibre monomode .L'atténuation dans une fibre optique est définie comme étant le rapport de la puissance optique transmise dans la fibre et la puissance reçue exprimée en unité logarithmique par unité de longueur [27].

$$A[\text{dB}] = 10 \log \left( \frac{P_e}{P_s} \right) \dots\dots\dots(6)$$

**A[dB]** :L'atténuation en décibel.

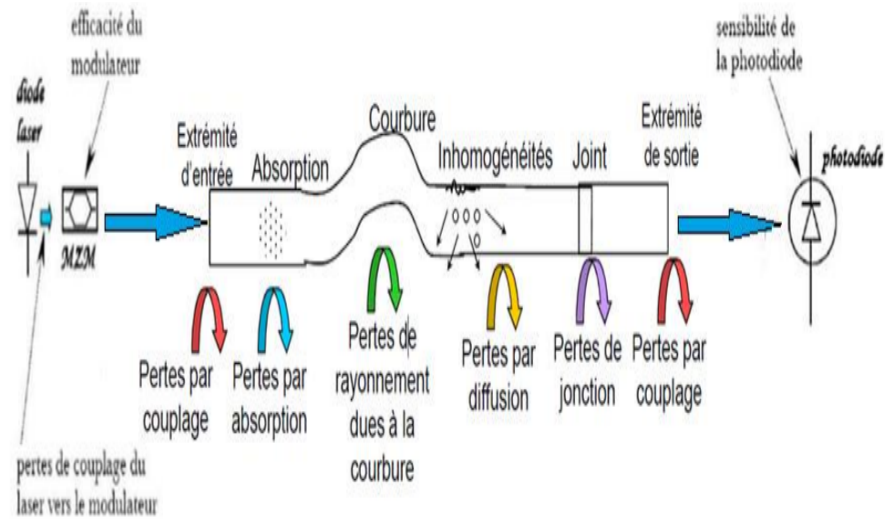
**$P_e$** : La puissance lumineuse à l'entrée.

**$P_s$** : La puissance lumineuse à la sortie

L'atténuation du signal a l'intérieur de la fibre peut être due spécialement

Une perte, ou atténuation se traduit par la perte d'énergie lumineuse dans la fibre. Elle est mesurée en dB/Km. Les longues portées utilisées avec les fibres optiques influent directement sur le signal lumineux, mais ce n'est pas la seule cause d'atténuation qui existe, en effet, l'absorption, la diffusion, les courbures et

les pertes de connectiques sont les principales causes de l'atténuation. La perte du signal est aussi causée par les deux phénomènes : la dispersion chromatique et la dispersion modale. La figure ci-dessous montre les différents types d'atténuation et des pertes



**Figure (II.2) :** Les différents types de pertes

### II.2.3. La bande passante

Elle représente la fréquence maximale de transmission des impulsions. Elle est limitée par la dispersion modale et la dispersion intrinsèque du matériau. La bande passante pour une longueur de la fibre L est :

$$BP = \frac{L}{\Delta t_1 + \Delta t_2} \dots\dots\dots(7)$$

Avec :

$\Delta t_1$ : Le retard temporel entre le rayon le plus incliné ( $\theta = \theta_c$ ) et le rayon parallèle à l'axe ( $\theta=0^\circ$ ). Où :  $\theta_c$  est l'angle critique

$\Delta t_2$ : le retard temporel résultant d'une variation de la longueur d'onde en fonction de l'indice due à la dispersion intrinsèque du matériau.

### Remarques

-Pour une fibre à gradient d'indice, la dispersion modale est minimale pour une distribution quasi parabolique de l'indice.

- Pour une fibre monomode, la bande passante devient théoriquement infinie, puisque la dispersion est nul ainsi que la dispersion du matériau, si on choisi convenablement le matériau et la longueur d'onde de travail [28].

### II.2.4. La dispersion

En optique la vitesse de la lumière dans le vide ne dépend pas de sa longueur d'onde, mais dans certains milieux, elle peut en dépendre c'est le phénomène de dispersion. On trouve deux type très connue de dispersion en fibre optique, il y'a se qu'on appeler la dispersion chromatique et il y'a aussi la dispersion intermodale.

#### II.2.4.1. La dispersion chromatique

En générale c'est la variation de la vitesse des signaux lumineux de longueurs d'onde différentes. Elle est définie comme la dérivée du temps de propagation d'un signal quasi-monochromatique sur une unité de longueur en fonction de la longueur d'onde :

$\frac{dt_g}{d\lambda}$  où  $t_g$  est le temps de groupe, soit l'inverse de la vitesse de groupe, et  $\lambda$  la longueur d'onde. On l'exprime ainsi souvent en Ps/ (nm.km).

La dispersion chromatique résulte de la vitesse de groupe étant fonction de la longueur d'onde dans un mode quelconque donné , différentes composantes spectrales d'une impulsion traversant la fibre à une vitesse différente. Cela dépend des caractéristiques spectrales de la source de lumière. Elle Peut se produire dans toutes les fibres, mais est la dominante dans la fibre monomode. Cette figure explique le phénomène de la dispersion chromatique.

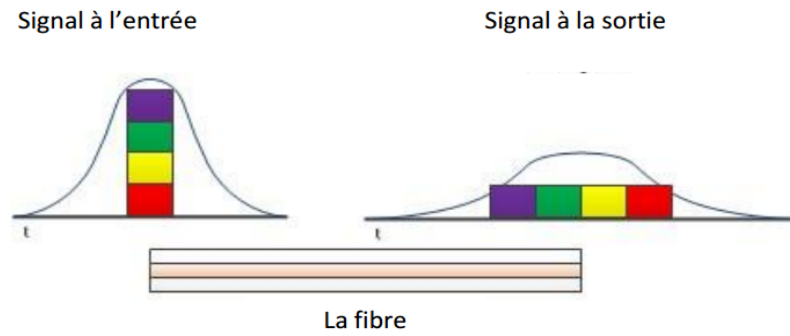


Figure (II.3) : La dispersion chromatique.

### II.3. Propriété et caractéristique FOM

Comme pour un matériau homogène transparent dont l'indice est déduit de la vitesse de propagation d'une onde plane dans ce matériau ( $n = c/v$ ), l'indice équivalent du milieu microstructure est calculé comme l'indice effectif du mode fondamental ( $n_{eff}$  le plus élevé) pouvant se propager dans ce milieu supposé infini. Cet indice est couramment appelé nFSM (« Fundamental Space Filling Mode »). Dès lors, nous pouvons représenter la propagation guidée par les lois traditionnelles de SnellDescartes, en remplaçant l'indice de réfraction de la gaine optique par l'indice n FSM. On peut alors définir une fibre à saut d'indice équivalente à la FOM considérée, ayant comme indice du cœur l'indice du matériau et n FSM comme indice de gaine. Moyennant les remarques précédentes, on peut reprendre les grandeurs introduites au paragraphe fibres conventionnelles décrivant les propriétés de guidage d'une fibre.

#### II.3.1. L'ouverture numérique

Le calcul de l'indice effectif de gaine permet de déduire une « ouverture numérique effective »  $ON_{eff}$  pour les FMAS.

$$ON_{eff} = \sqrt{n_{cœur}^2 - n_{eff}^2} \dots\dots\dots(8)$$

L'ouverture numérique d'une FMAS varie beaucoup plus fortement en fonction de la longueur d'onde que celle d'une fibre classique composée de silice et de silice dopée. Cette forte variation est due à la forte variation de l'indice effectif de gaine en fonction de l'étalement du champ. De plus, contrairement aux fibres standard, l'ouverture numérique

des FMAS augmente avec la longueur d'onde. La compare l'ouverture numérique d'une FMAS à l'ouverture numérique d'une fibre standard dont le cœur est dopé au germanium. Les indices de réfraction du cœur et de la gaine sont calculés grâce à la formule de Sellmeier pour la silice, grâce à la formule de Sellmeier modifiée pour la silice dopée au germanium et grâce à la MEF pour l'indice effectif de la gaine photonique de la FMAS.

**3.1.1. Fréquence normalisée nommée  $V_{eff}$**

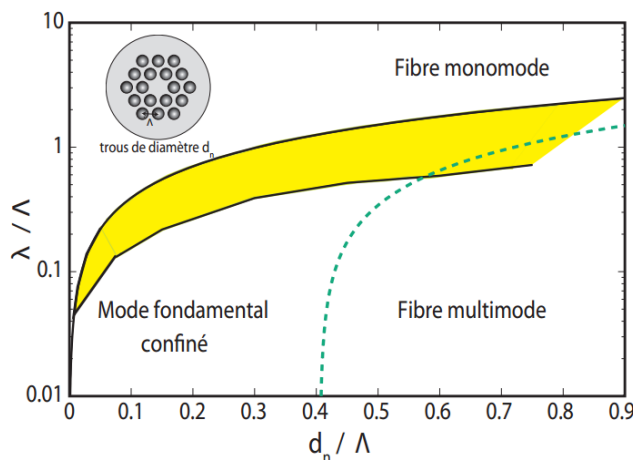
Détermine la valeur dans laquelle la fibre est dans une position monomode [29]

$$V_{eff} = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_{cœur}^2 - n_{eff}^2} \dots\dots\dots(9)$$

où  $n_{eff}$  est une moyenne des indices de réfraction du cœur et de la gaine et  $\Lambda$  l'écart interstitiel. Ainsi le diagramme visible sur la explicite cette notion de contrôle du caractère monomode ou multimodes de la fibre. Suivant la valeur du rapport entre la taille des capillaires et leur espacement, il est possible de se trouver dans une région monomode ou multimode, et ce simplement en choisissant une longueur d'onde de travail,  $\lambda$  adéquate .Ce diagramme est issu d'une loi empirique déterminant la longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  d'une fibre optique microstructure en fonction des paramètres  $d$  et  $\Lambda$  [30]

$$\frac{\lambda_c}{\Lambda} \approx 2.8 \left( \frac{d}{\Lambda} - 0.406 \right)^{0.89} \dots\dots\dots(10)$$

Lorsque  $d/\Lambda$  est inférieur à 0,4, la fibre optique microstructures est monomode indépendamment de la longueur d'onde, les qualifiant de fibre 'infiniment monomode'. Au deçà de cette valeur.



**Figure (II.4) :** Schéma représentant les différents mode de propagation possibles pour les fibres optiques microstructures à cœur plein.

La région colorée correspond à la région monomode contenue de la géométrie de la fibre. La ligne pointillée donne la limite entre le mode fondamental et le second mode.  
 insert: Schéma d'une fibre optique microstructure à cœur plein. 0,4, les fibres microstructures ont un comportement identique à une fibre standard

**II.3.2.Les pertes de la fibre optique microstructure**

Les pertes d'une FMS dépendent non seulement des caractéristiques optiques du matériau mais aussi de la structure de la fibre. Généralement, elles ont pour origine la diffusion.

**II.3.2.1. Pertes par diffusion**

Les autres contributions sont liées à des processus de diffusion de la lumière qui dans les domaines du visible et du proche IR suivent une loi de type Rayleigh en

$\lambda^{-4}$ . Le mécanisme de diffusion est lié à des fluctuations de concentrations des dopants et à des fluctuations de densité.

Les pertes par diffusion proviennent de variations microscopiques de la densité du matériau, de fluctuations de composition et d'inhomogénéité ou de défauts induits durant le processus de fabrication de la fibre. Pour un milieu amorphe à composition simple, les pertes par diffusion liées à des fluctuations de densité sont données par :

$$\alpha_d = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} (n_c^2 - 1) k_B T_f B_T \dots\dots\dots(11)$$

avec:

$k_B$ : Constante de Boltzmann,

$B_T$ : Coefficient de compressibilité isotherme,

$T_f$ : Température effective pour laquelle les fluctuations de densité sont figées dans le milieu vitreux durant la phase de solidification.

$\alpha_d$  est ici exprimé en neper, la conversion en décibels est obtenue en multipliant cette grandeur par 10  $\text{Log}_{10}(e) = 4,343$ .

### II.3.3. Comportement monomode large bande

Lorsque la longueur d'onde augmente, le champ électromagnétique guidé par une FMAS s'étend de plus en plus dans la gaine. La lumière pénètre alors plus fortement dans les trous, provoquant ainsi une chute de l'indice « effectif » de la gaine photonique [31]. A l'inverse, aux courtes longueurs d'onde, la lumière « évite » les trous d'air et l'indice effectif de gaine augmente. Il illustre la variation de la pénétration du champ électromagnétique (ici le champ électrique E) dans les trous en fonction de la longueur d'onde.

L'indice de gaine d'une fibre à saut d'indice classique variant quasiment de la même manière que l'indice du cœur en fonction de la longueur d'onde, l'ouverture numérique est pratiquement constante. Par conséquent V augmente en raison inverse de la longueur d'onde dans une fibre à saut d'indice (équation et la fibre perd son caractère monomode quand la longueur d'onde diminue. Dans une FMAS, l'indice effectif de gaine  $n_{eff}$  gaine représente l'indice de réfraction moyen de la gaine, pondéré par la distribution de l'intensité lumineuse dans la gaine. Comme l'extension du champ dans les trous varie notablement avec la longueur d'onde, cet indice dépend lui-même beaucoup de la longueur d'onde et des paramètres opto-géométriques de la fibre. L'indice de la gaine augmente donc plus significativement que l'indice du cœur lorsque la longueur d'onde diminue, et aux courtes longueurs d'onde l'ouverture numérique d'une FMAS est proportionnelle à la longueur d'onde de travail [32].

V tend alors vers une valeur quasi constante qui peut être inférieure à la valeur seuil d'apparition du deuxième mode si les paramètres de la fibre sont convenablement choisis.

Dans cette situation la fibre microstructure est monomode quelle que soit la longueur d'onde. Ce phénomène est désormais compris et expliqué par plusieurs modèles

([33] - [34]). Expérimentalement, ce comportement monomode très large bande a été observé de 337 nm à 1550 nm, sachant que le manque de source optique du laboratoire d'étude n'a pas permis d'explorer le comportement de la fibre au-delà de cette bande spectrale.

**II.3.4. Dispersion chromatique**

La dispersion chromatique DC d'un mode guidé est approximativement égale à la somme de la dispersion du matériau de la structure guidant DM et de la dispersion liée à la géométrie du guide DG (dispersion du guide).

$$D_C = D_M + D_G \dots\dots\dots (12)$$

## CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle mathématique dont le but de pouvoir tracer les caractéristiques d'une fibre optique microstructure.

Les traces seront présentées dans le chapitre suivant.

A decorative graphic of a scroll with a blue border and grey shading at the corners, containing the chapter title.

# **Chapitre III**

## **Résultats et interprétation**

### **III.1.Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons présenter une description détaillée du logiciel R soft CAD de simulation que nous avons employée dans notre travail pour pouvoir tracer quelque caractéristique de la fibre microstructure savoir :

### **III.2. Environnement de CAD**

Le R soft CAD est un programme de base de R soft Photonique, il permet aux chercheurs et ingénieurs de créer des systèmes pour la conception des différents dispositifs tels que : des guide d'ondes, des cavités résonantes, des filtres, des circuits optiques et d'autres dispositifs photoniques. Il agit en tant que programme de gestion pour les modules passifs de simulation du dispositif de R Soft : BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD et DiffractMOD[35]. Et chaque module est conçu pour une tâche bien définie. Parmi ces modules de simulation, nous présentons le BandSOLVE et FullWAVE.

#### **III.2.1.Le simulateur « bandsolve»**

Le logiciel que nous avons exploité pour modéliser les structures par la méthode des ondes planes s'appelle «BandSolve» développé par R soft. BandSolve est un logiciel de simulation des structures de bande photoniques. Il est basé sur la méthode des ondes planes optimisée pour les structures périodiques, idéal pour produire des diagrammes de bande des structures bandes interdites photoniques classiques tels que 2D et 3D et les guides à cristaux photoniques en utilisant une méthode super cellule type onde plane. A deux dimensions, il est nécessaire de considérer deux directions de propagation différente : TE (avec le champ E perpendiculaire à l'axe des trous) et TM (où E est parallèle à l'axe des trous). Ces deux polarisations sont découplées et donnent lieu à deux diagrammes de bandes indépendants.

Il n'existe pas forcément une bande interdite dans les deux cas. En outre, il peut être appliqué à des structures comme les fibres à cristaux photoniques, qui sont complexes pour les autres techniques de simulation. BandSolve est particulièrement utile pour optimiser les propriétés des structures à cristaux photoniques, qui sont simulés par la méthode FDTD implémentée dans le logiciel FullWave, pour examiner les propriétés dépendant du temps comme les pertes, et pour calculer les distributions de champ dans des structures de dimensions finies. BandSOLVE est destiné pour fonctionner avec les autres modules de

simulation de Rsoft tels que BeamPROP et FullWAVE, il partage le même outil de CAD avec ces modules. En particulier, le BandSOLVE est spécialement utile pour optimiser les propriétés des cristaux photoniques [36].

### III.2.2. Présentation de Full Wave

Les simulations numériques ont été effectuées avec le logiciel Full wave qui est un logiciel de simulation électromagnétique, basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel. La méthode FDTD repose sur la résolution des équations de Maxwell dans un domaine discrétisé spatialement et temporellement. Il permet de suivre l'évolution du champ EM au cours du temps en tout point de la structure. On peut ainsi obtenir les cartographies du champ EM à n'importe quel endroit et n'importe quel moment. La connaissance de l'évolution du champ en fonction du temps permet également d'obtenir des informations sur la réponse spectrale de la structure.

Ce logiciel peut simuler des structures (limitées, infinies ou périodiques), formées par différents matériaux qui peuvent être métalliques ou diélectriques. L'utilisation de Fullwave nécessite de définir les matériaux qui composent la structure à l'aide de la permittivité électrique. Il faut aussi définir l'environnement de la structure et donc les conditions aux limites. Pour cela il faut disposer de conditions absorbantes aux abords du domaine de discrétisation (calcul) qui permet d'éviter les réflexions parasites engendrées aux bords de la fenêtre du calcul FDTD afin de simuler un milieu ouvert [37].

### III.3. Signification des icônes de l'interface graphique du logiciel R Soft



**New Circuit** : Cette option crée un nouveau circuit



**Open Circuit** : Cette option ouvre un circuit existant



**Save Circuit** : Cette option sauvegarde le circuit courant



**Edit Global Settings** : Cette option ouvre la zone de dialogue d'arrangements globale par défaut. Elle est équivalente à la nouvelle zone de dialogue de circuit



**Edit Symbol Table :** Cette option ouvre la table des symboles où l'utilisateur crée de nouvelles variables pour modifier des variables existantes



**Edit Launch Field :** Cette option ouvre la zone de dialogue pour le lancement des paramètres où l'utilisateur peut spécifier le champ initial pour une simulation



**Perform Simulation :** Cette option ouvre la zone de dialogue de paramètres de simulation où l'utilisateur peut spécifier ces paramètres pour effectuer une simulation



**Compute Index Profile :** Cette option ouvre la zone de dialogue de profil d'indice de calcul où l'utilisateur peut calculer un profil d'indice du circuit



**Editer le tableau du guide :** Cette option ouvre le tableau éditeur des guides, il est utilisé pour définir les structures 3D.

### III.4. Les étapes de simulation d'un guide d'onde

La fenêtre de programme de R soft CAD comporte une barre de menus en haut de la fenêtre, une barre des outils qui porte plusieurs icônes et la ligne d'état (voir figure III.1).

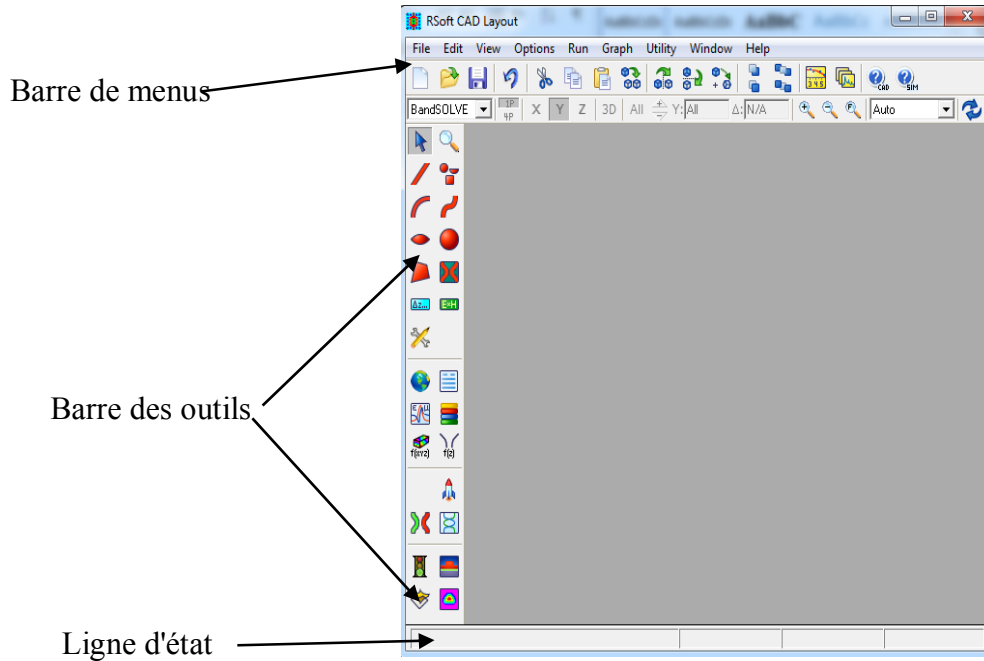

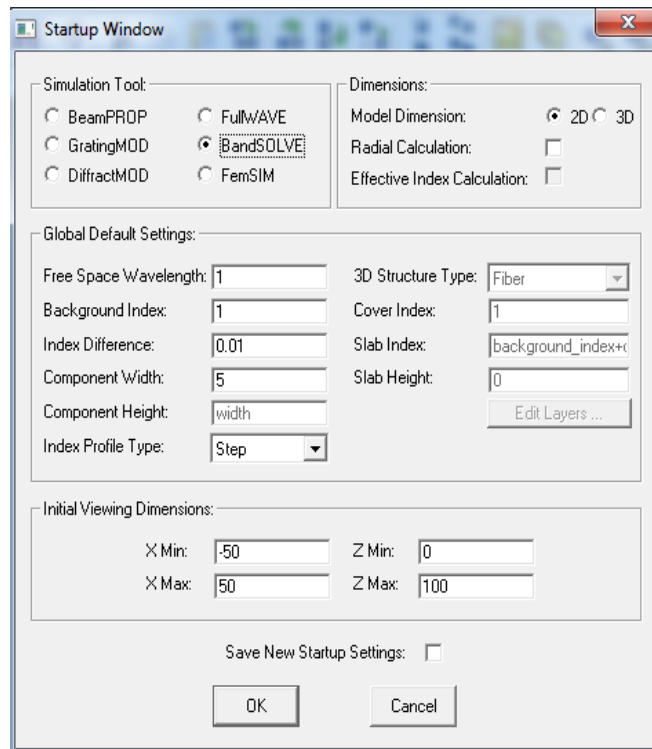


Figure (III.1) : Fenêtre principale du programme CAD.

#### III.4.1. Créer un nouveau circuit

Pour créer un nouveau circuit on va cliquer sur l'icône **New circuit**  dans la barre d'outils supérieur. Alternativement, nous allons choisir **File /New** du menu. Le dialogue de démarrage de la figure (III.2) va apparaître



**Figure (III.2) :** La fenêtre de démarrage (startup Windows) [38].

Il faut remplir la différence d'indice (Index difference), qui est la différence d'indice par défaut entre la couche guidant et l'indice de substrat (Background index), d'autre part, il faut choisir le type de la polarisation (Mode TE ou Mode TM). On peut aussi par cette option choisir le module de simulation parmi les six modules existants dans le logiciel RSoft bandSOLVE, FullWave, BeamPROP/BPM ou GratingMOD. Après l'introduction des informations dans la fenêtre de démarrage on va cliquer sur OK pour obtenir la fenêtre de la figure (III.3).

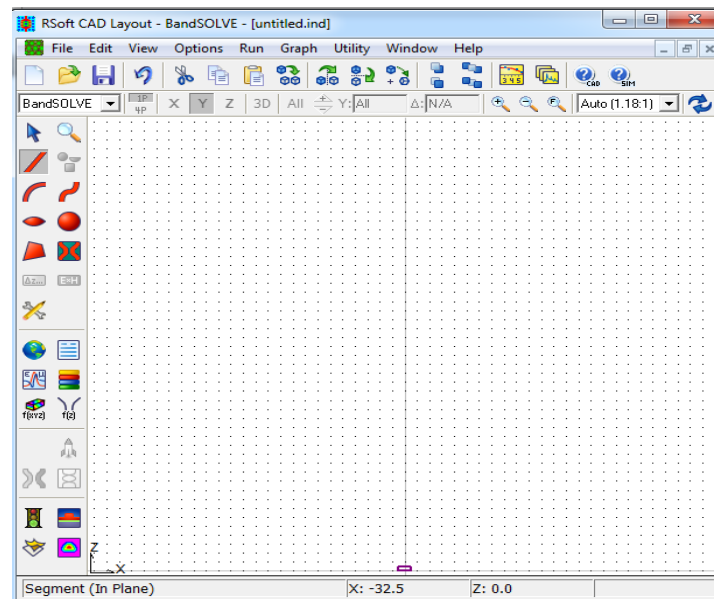


Figure (III.3) : Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit.

### III.4.2. Générer la structure de réseau

Dans cette partie on va montrer comment créer un réseau en cristaux photoniques dans l'interface de CAD. Généralement, il existe plusieurs manières pour créer une structure de réseau dans l'interface de CAD. Cependant, la manière la plus facile est d'employer un des multiples utilités de disposition qui sont incluse avec Full wave afin d'expédier la création de ce réseau en utilisant Array Lay-out XZ (figure III.4).

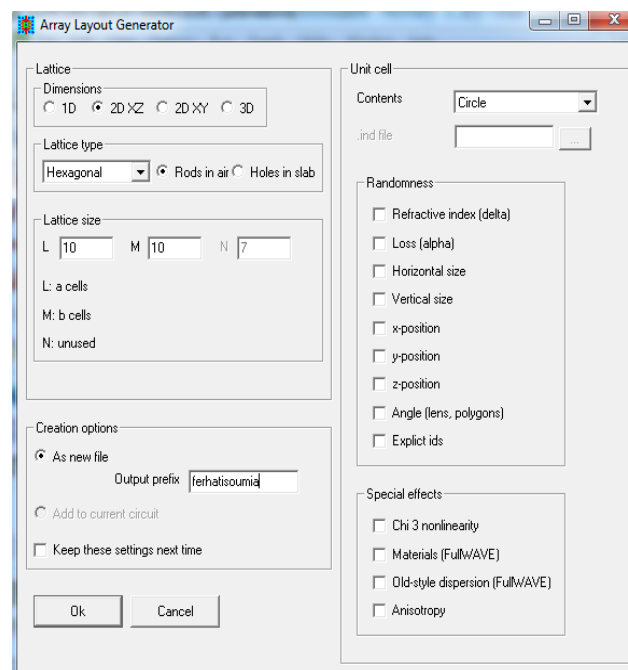


Figure (III.4) : Arrangements de disposition de la rangée XZ [38].

Après l'introduction des différentes données (type de réseau, forme de motif, le nombre de rangés et le nom du circuit) on clique sur le bouton **OK** pour obtenir la structure du cristal photonique qui apparaît sur la figure (III.5).

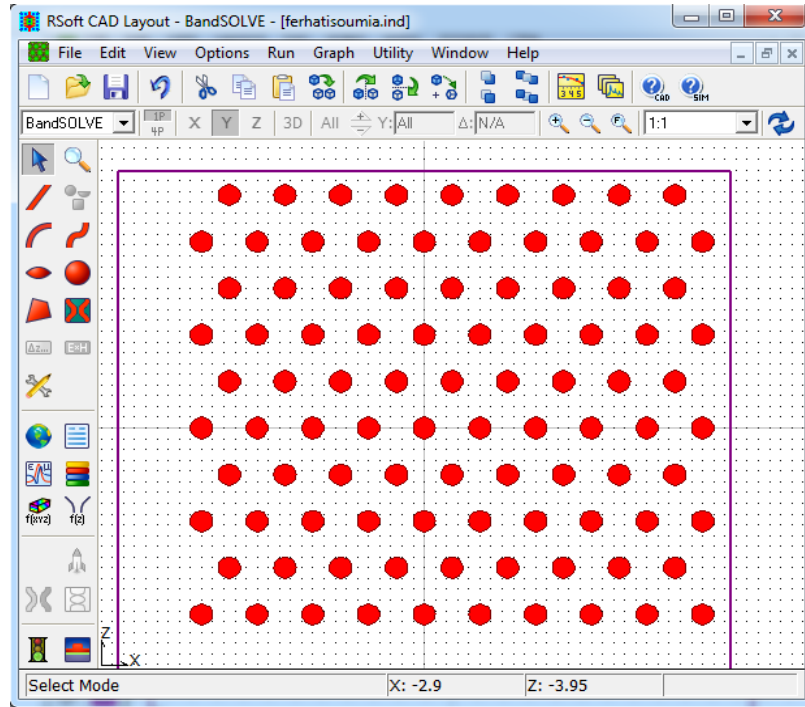



Figure (III.5) : Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD.

### III.4.3. Régler les paramètres globales

Pour définir les propriétés du réseau tels que l'indice de réfraction, la polarisation et pour choisir le module de simulation Full WAVE/ BandSolve parmi les autres modules existents à RSoft on clique sur l'icône  (**Edit global setting**). La fenêtre de dialogue ci-dessous apparaît (Figure III.6).

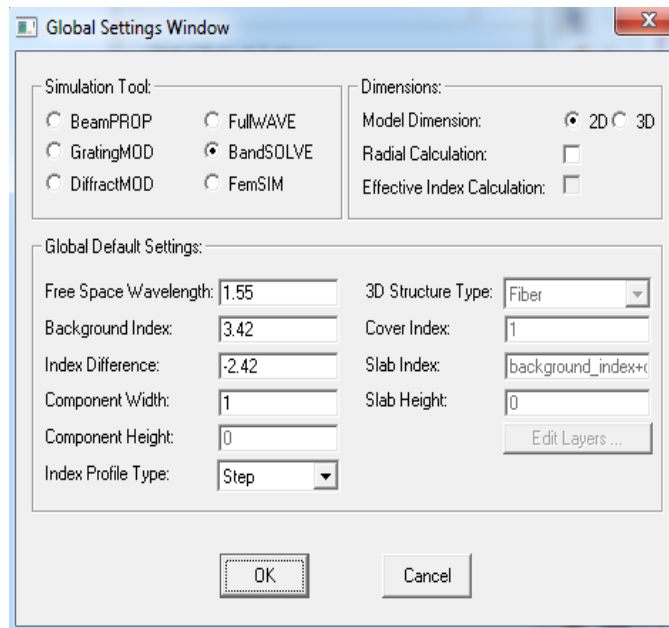



Figure (III.6) : Fenêtre des paramètres globale du circuit [38].

### III.4.4. Définition des variables

Cliquer sur l'icône  (Edit symboles) dans la fenêtre de CAD, le tableau de symbole (Table editor) s'ouvre (Figure III.7). Ce tableau de symboles permet à l'utilisateur de créer ou modifier à la fois et intégrer les variables définies par l'utilisateur, ces variables peuvent être utilisées pour définir pratiquement n'importe quel paramètre de la structure (le rayon, la période, l'indice de réfraction, nombre de rangés).

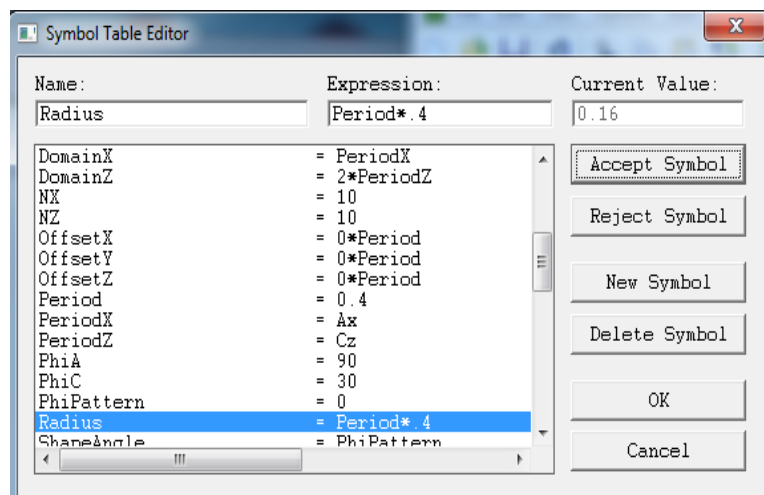


Figure (III.7) : L'éditeur du Tableau de symboles [38].

Ces symboles correspondent aux arrangements faits dans le nouveau circuit (New Circuit) de la boîte de dialogue ci-dessus. Pour définir un nouveau symbole (par exemple Nhole=1), on clique sur new symbole puis en va entrer le nom et la valeur du symbole.

### III.4.5. Vérifier la structure

Pour vérifier notre structure, nous avons simulé le profil de l'indice de réfraction dans le plan XZ.

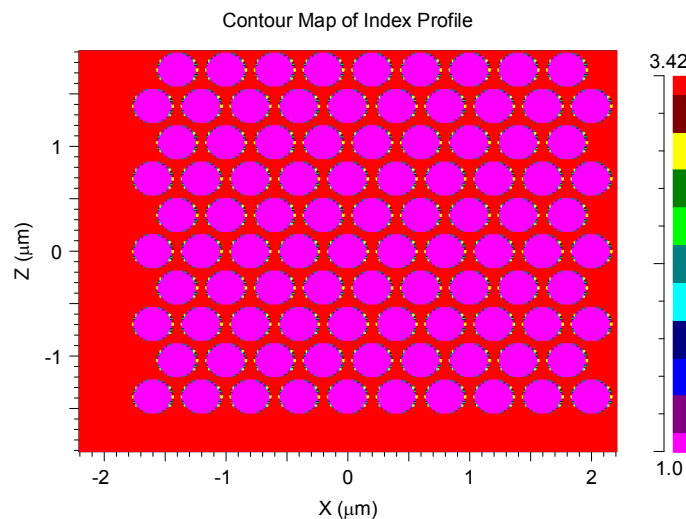
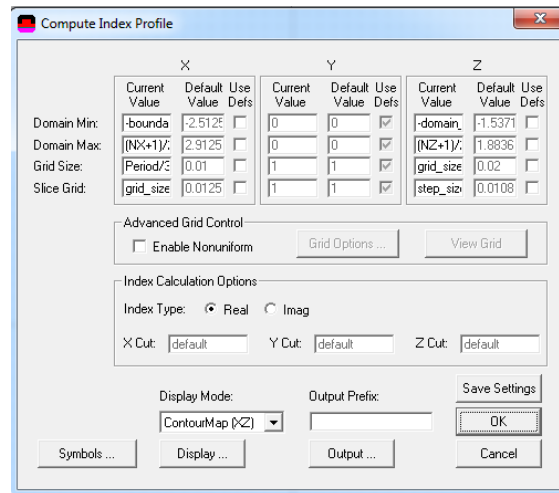


Figure (III.8) : Profile d'indice de la structure à cristaux photoniques 2D.

### III.5. Diagramme des bandes

Comme indiqué dans le premier chapitre, les zones de Brillouin aide à la localisation et l'optimisation des bandes interdites, puis le calcul de la dispersion des

modes de défaut. Seulement il est nécessaire d'analyser un petit nombre de points dans la première zone de Brillouin, la figure (III.10) montre le diagramme des bandes correspondant à la structure de la fibre en cristaux photoniques (FCP) pour les modes TE/TM.

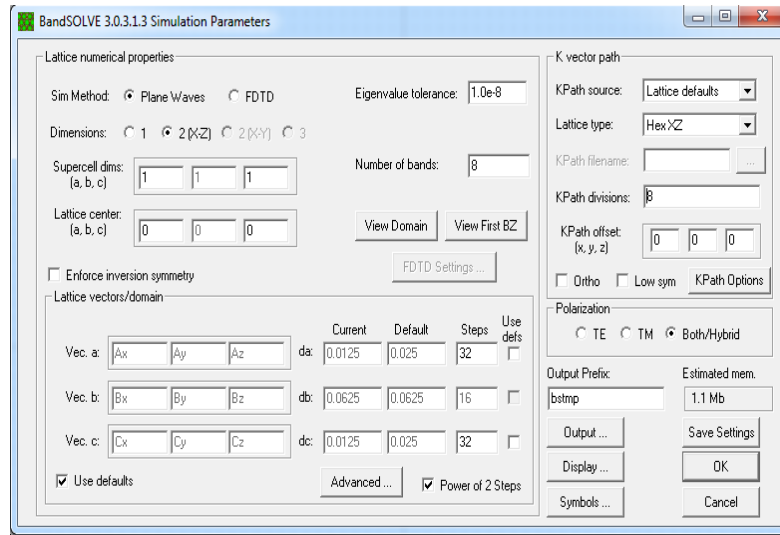


Figure (III.9) : La fenêtre de paramètres de simulation de BandSolve où des paramètres numériques de base de simulation sont entrés.

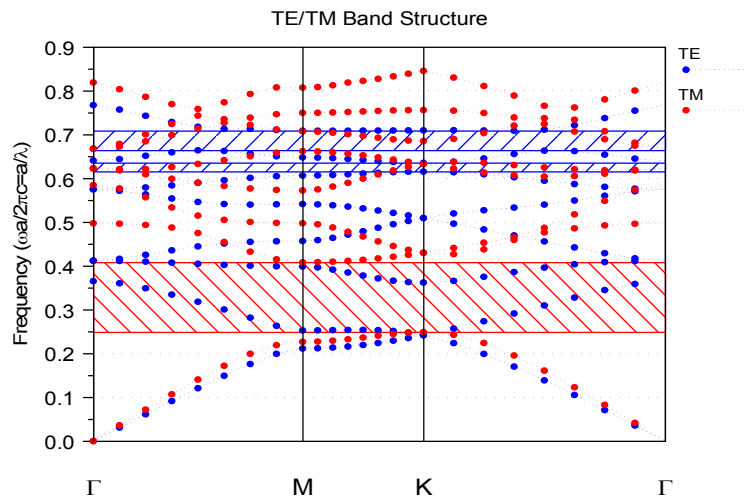


Figure (III.10) : Diagramme des bandes pour les modes TE et TM dans la structure FCP.

On constate que les bandes des modes TE et TM dans le diagramme sont toutes reliés, cela signifie qu'il n'y a aucune bande interdite photoniques qui empêche la propagation des ondes. Cette propriété est due à la faible valeur de l'indice des trous par rapport à l'indice de la couche guidant, donc l'onde se propage dans la zone

d'indice le plus élevé de la bande interdite [39].

**III.6.Création d'un guide d'onde et calcule la transmission**

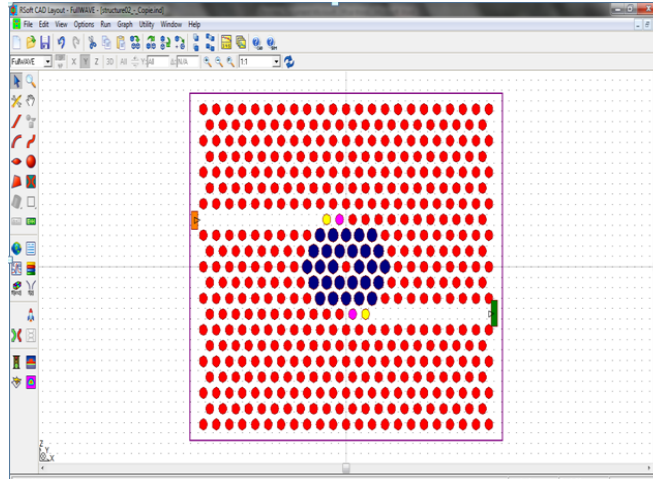


Figure (III.11) : création d'un guide d'onde et calcule la transmission.

À ce stade du compte Transmission, vous installez Launch à l'entrée du cavité Manitur à sortie, puis appuyez sur l'icône.



**III.7.Calcule facteur de qualité Q**

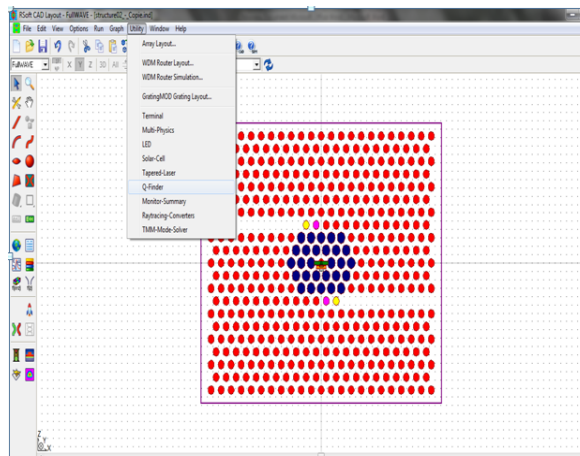


Figure (III.12) : Calcule facteur de qualité Q.

### III.8. Les parcelles en fonction de la fréquence

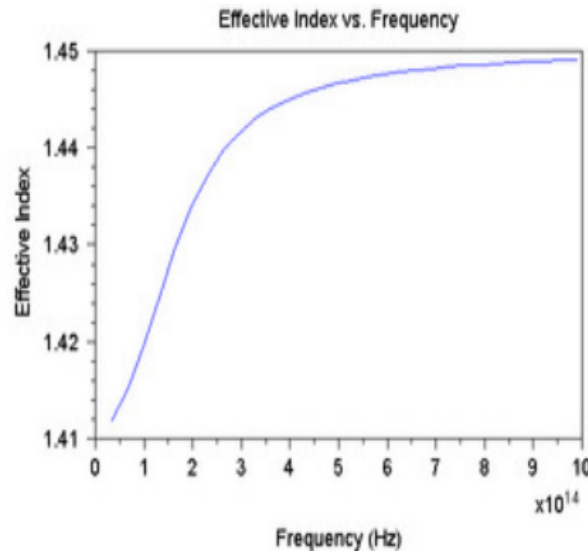


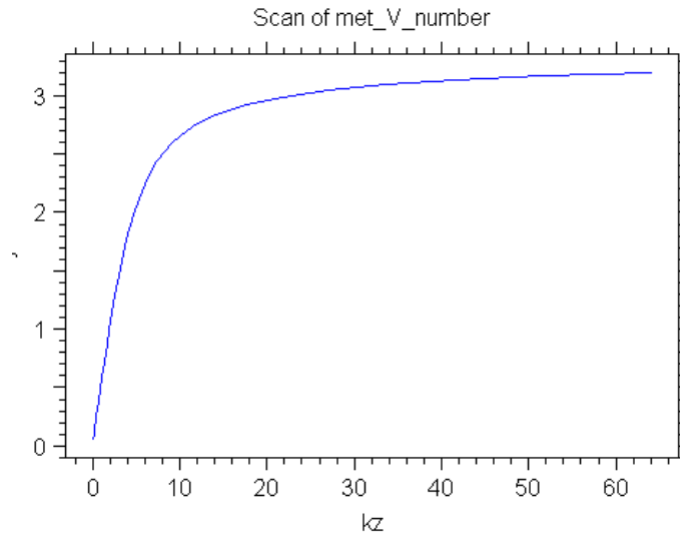
Figure (III.13) : Indice effectif tracé vs fréquence pour un PCF.

Vous pourriez préférer produire un graphique de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde plutôt que de la fréquence. Rappelant que la fréquence normalisée est  $\omega a / 2\pi c$ .

### III.9. Explorer la condition monomode

Dans la fibre que nous avons examinée jusqu'ici, nous n'avons observé qu'un seul mode (deux états de polarisation dégénérés). Dans en fait, c'est une propriété générale de cette classe de PCF, qu'ils supportent seulement un mode sur une très longue longueur d'onde gamme, à condition que les trous d'air ne sont pas trop grands. Cette propriété curieuse se produit parce que la longueur d'onde diminue, Le mode lié échantillonne de moins en moins les régions de l'entrefer et le contraste effectif d'indice des pertes de fibres.

Dans une fibre conventionnelle, le nombre de modes liés est régi par le nombre

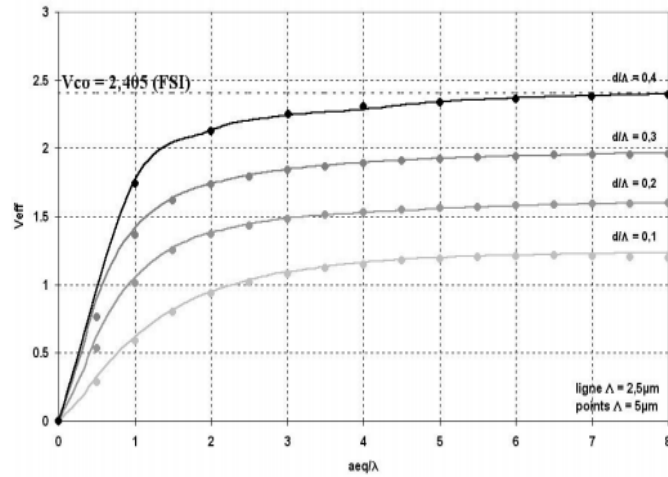


**Figure (III.14) :** Scan de  $V_{eff}$  en fonction de KZ.

Notez que comme mentionné plus tôt,  $V_{eff}$  tombe et se lève monte très lentement. Notez que, comme d'habitude, MOST produit l'intrigue comme fonction de la variable indépendante KZ. Pour produire un graphique en fonction de la fréquence normalisée.

### III .10.Caractère monomode large bande

Le nombre de modes guidés dépend de la valeur de la fréquence spatiale normalisée  $V$  à une longueur d'onde donnée. Lorsque  $V$  est inférieure à 2,405 (fréquence spatiale normalisée de coupure du deuxième mode), seul le mode fondamental peut se propager. Pour ces fibres, la différence d'indice varie de manière insignifiante en fonction la longueur d'onde. Ainsi, lorsque  $\lambda$  décroît,  $V$  augmente et franchit la valeur seuil  $V_{co}$  de 2,405. Le premier mode d'ordre supérieur peut alors être guidé.

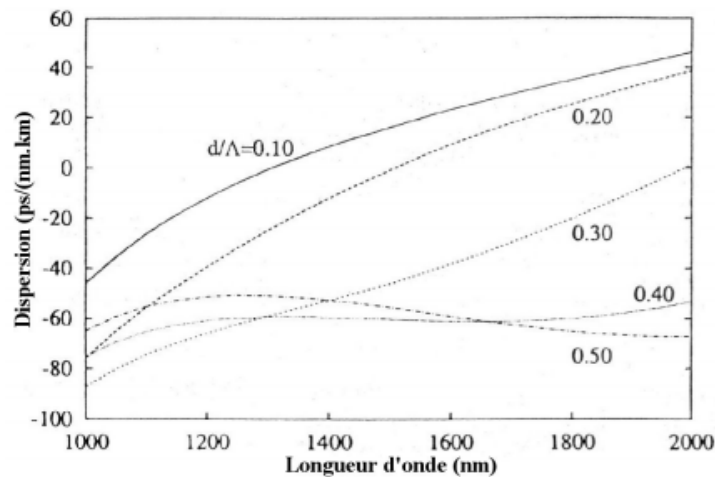


**Figure (III.15) :** Evolution de la fréquence normalisée  $V_{eff}$  en fonction de  $a_{eq}/\lambda$  ( $a_{eq} = 0,64\lambda$ ), pour différentes valeurs de  $d/\Lambda$  et pour  $\Lambda = 2,5$  et  $5 \mu\text{m}$ .

On peut remarquer que l'évolution spectrale de  $V_{eff}$  est uniquement liée à la valeur de  $d/\Lambda$ , indépendamment de la valeur du pas du réseau, la fréquence spatiale normalisée des FMAS reste constamment inférieure à la valeur de coupure  $V_{co}$  des fibres à saut d'indice classiques, et ceci indépendamment de la longueur d'onde. Il est donc possible de définir des fibres microstructurées qui présentent un caractère monomode sur une très large plage spectrale.

### III.11. Dispersion Chromatique

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  $1,27 \mu\text{m}$ . 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.

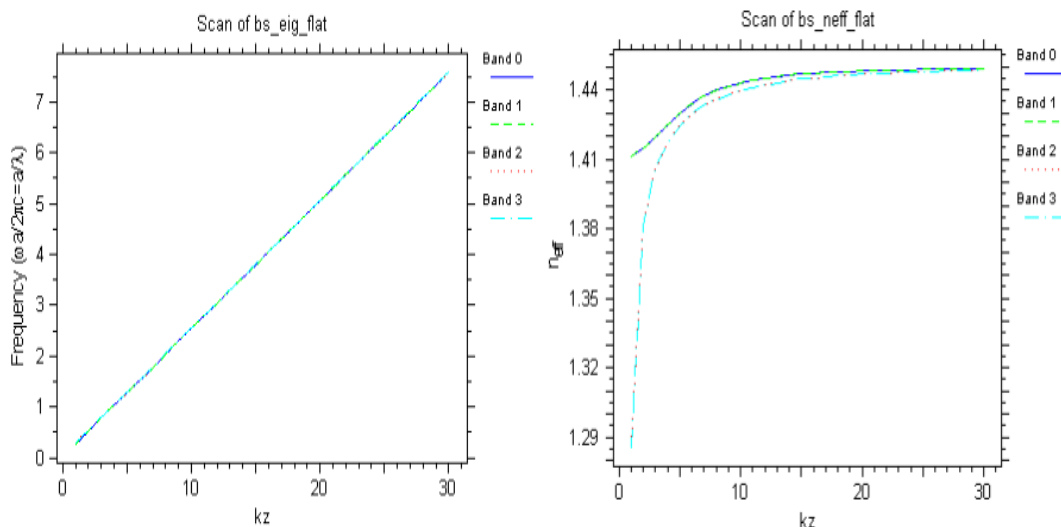


**Figure (III.16) :** Dispersions chromatiques pour différentes valeurs de  $d/\Lambda$  obtenue pour une FMAS de pas  $2,3 \mu\text{m}$ .

La dispersion chromatique d’une FMAS dépend étroitement de la proportion d’air présente dans la gaine optique, valeur liée au rapport  $d/\Lambda$ . En jouant sur les paramètres opto-géométriques 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 à  $1,27\mu\text{m}$ .

### III.12. Balayage sur le vecteur $k$ pour produire des relations de dispersion

Maintenant que nous pouvons calculer des modes pour une valeur donnée de la constante de propagation  $kz$ .

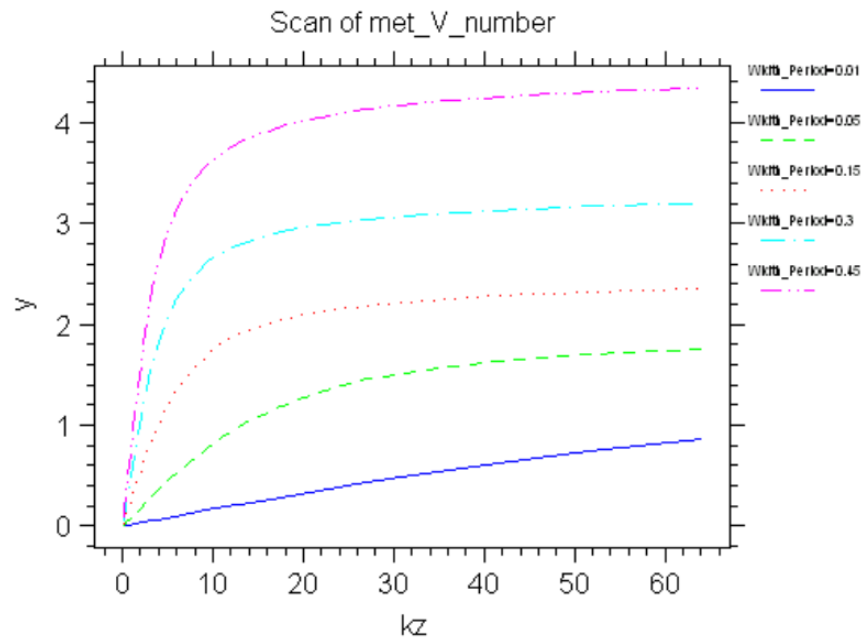


**Figure (III.17) :** Relations de dispersion pour la fibre de cristal photonique.

L'analyse d'une relation de dispersion est un problème archétypal qui peut bénéficier de l'ensemencement.

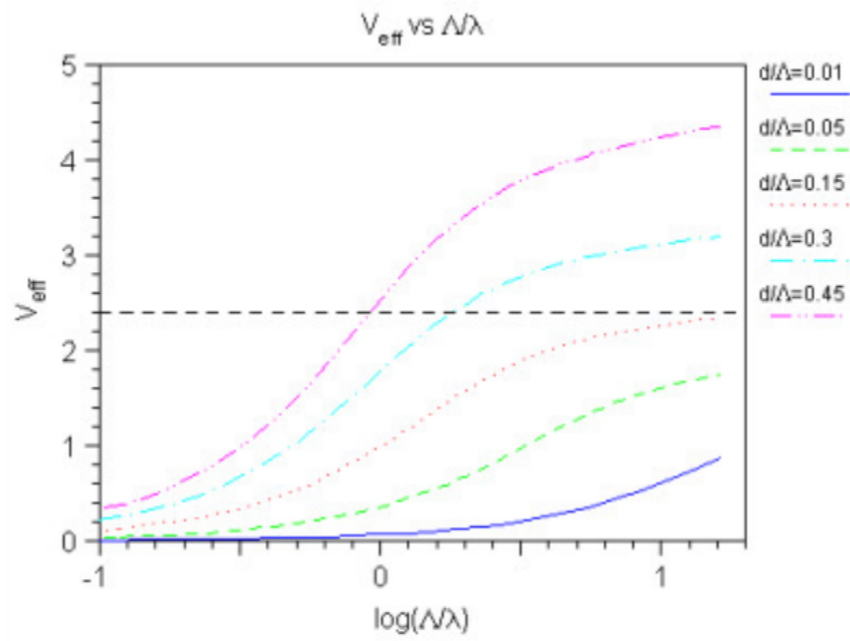
### III.13. Calcul de plusieurs courbes de nombres-V

Puisque les trous de fibre dans cet exemple étaient assez grands ( $d / \Lambda = 0.3$ ), alors que le V-number est seulement s'élevant lentement, il n'est pas nécessairement limité aux hautes fréquences. Nous allons maintenant examiner la dépendance du V-number sur la taille du trou, en analysant la variable Width Period (le rapport entre la taille de la prise et la période) en plus de  $kz$ .



**Figure (III.18) :** Onglet Variables indépendantes pour l'analyse bidimensionnelle.

Lorsque l'analyse est terminée, le graphique `vnumwid_scan_met_V_number.pcs` peut être visualisé dans Data BROWSER comme indiqué dans la Fig (III.18) Il est clair qu'à des tailles de trou plus petites,  $V_{\text{eff}}$  est beaucoup plus petit.



**Figure (III.19)** :  $V_{\text{eff}}$  en fonction de la largeur et de la fréquence. La ligne horizontale représente la condition monomode.

### **Conclusion**

Nous avons présenté dans ce Chapitre logiciel R soft CAD, avec le simulateur bandsolve. Ensuite, nous avons décrit les deux modules de simulation le Bandsolve et le Fullwave que nous avons utilisé au cours du troisième chapitre de ce manuscrit. Par ailleurs, nous avons décrit les étapes de simulation pour le calcul des modes guidés dans un guide d'onde à cristaux photoniques.

## **Conclusion générale**

L'objectif de ce travail est consacré à l'étudier et simulation de les fibres optiques microstructures, à l'aide du logiciel R soft-CAD. Et l'étude de prédire et de caractériser les propriétés de propagation des fibres microstructures à guidage par réflexion totale interne afin d'évaluer leur application dans les systèmes de télécommunications optiques. Les caractéristiques de propagation originales des fibres microstructures à réflexion totale interne sont particulièrement attractives pour de nombreuses applications, en particulier dans les domaines des télécommunications et de l'optique non linéaire. Mais, pour que les fibres microstructures puissent remplir les fonctions attendues, il est indispensable que leurs caractéristiques soient parfaitement en accord avec le cahier des charges prévu. En particulier, les pertes, la dispersion chromatique et le domaine spectral de propagation monomode où multimode sont très sensibles aux paramètres opto-géométriques des fibres. La compréhension des liens existant entre ces caractéristiques et la géométrie des fibres réelles (en tenant compte des imperfections) est indispensable pour faire progresser les techniques de fabrication notamment.

En perspective, nous incitons les PFEs des promotions à venir, à effectuer d'autre types d'optimisation de cette structure comme par exemple optimiser les dispositions et les longueurs des guides d'ondes d'entrée et de sortie, afin de garantir un meilleur couplage entre la source et la cavité, cela d'une part. D'autre part, tenter d'améliorer le rendement de capture de la cavité résonante que nous avons utilisés (amélioré son facteur de qualité et de sa sensibilité).

**Bibliographie**

- [1] F. BAHLOUL, ETUDE DES FIBRES OPTIQUES MICROSTRUCTURES AIR/SILICE ET DE LEURS APPLICATIONS AUX SYSTEMES DE TELECOMMUNICATION, thèse de Doctorat de l'université de Tunis El Manar, années 2006.
- [2] C. FORTIE, GENERATION DE SOURCES OPTIQUES FIBREES TRES HAUTES CADENCES ET CARACTERISATIONS DE FIBRES OPTIQUES MICROSTRUCTURES EN VERRE DE CHALCOGENURES, Thèse de Doctorat de l'université de Bourgogne, années 2011.
- [3] MOHAMMED EL AMRAOUI, FIBRES OPTIQUES MICROSTRUCTURES CHALCOGENURES FORTEMENT NON LINEAIRES A BASE DE AS<sub>2</sub>S<sub>3</sub>: VERS DE NOUVELLES SOURCES SUPERCONTINUUM INFRAROUGES, Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, années 2010.
- [4] BURGAMI REACHERCH (burgami.com).
- [5] J. D. COLLADON LA NATURE MAGAZINE (1884).
- [6] C. K. KAO, G. A. DIELECTRIC, PROC. IEEE, 1151 (1966).
- [7] CORNING.COM.
- [8] R. MAURER, D. BECK, P. SCHULTZ, US PATENT NO. 3711262 (1970).
- [9] K.L. WALKER, AT&T TECHNICAL JOURNAL, 69, 6, 92-100 (1990).
- [10] R. BOUILLIE; J. MOALIC. FIBER AND INTEGRATED OPTICS, 4, 2, 213–223 (1982).
- [11] SIDI ALI MEBAREK.Z TELECOMMUNICATION OPTIQUE 2001. Edition : 2.11.4216 2.1-2.17.
- [12] CAUSSIGNAC. JM 2002 LES FIBRES OPTIQUES «INSTRUMENTATION ET MESURES ». EDITION PARIS 89-90.

- [13] JEAN-MICHEL LOURTIOZ, CRISTAUX PHOTONIQUES ET « GAP » DE PHOTONS – ASPECTS FONDAMENTAUX » TECHNIQUE DE L'INGENIEUR, AF 3 710, 07/2004.
- [14] RIADH SAIDI, ETUDE D'UNE STRUCTURE DE LIAISON PAR FIBRE OPTIQUE : CARACTERISATION DE LA PROPAGATION ET BILAN ENERGETIQUE, Mémoire de magister en Electronique de Laboratoire de Génie Electrique de Biskra, années 2009.
- [15] RINALD-MAREEL D 2005 AMELIORATION DES PROPRIETES OPTIQUES DES FIBRES DE VERRE.
- [16] SLIMI OUIDETTE, MICROLENTILLAGE D'UNE FIBRE OPTIQUE, années 2011.
- [17] LABIDI WALID ABDELJALLIL, ETUDE DES FIBRES MICROSTRUCTURES AIRE/SILICE A RESEAU CIRCULAIRE, années 2014.
- [18] U. PEDRAZZA, DOPED SOL-GEL MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF OPTICAL FIBERS, Thèse de doctorat de l'école Polytechnique Fédérale de Lausanne, années 2006.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] L. LEBONTE TITRE ANALYSE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU MODE FONDAMENTALE DANS LES FIBRES OPTIQUES MICROSTRUCTURES AIR/SILICE, thèse de doctorat de l'université, années 2012.
- [22] 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.

- [23] S. LOU ET AL, BENDING ORIENTATION INSENSITIVE LARGE MODE AREA PHOTONIC CRYSTAL FIBER WITH TRIANGULAR CORE, IEEE PHOTONICS SOCIETY, Volume 5, Number 4, out 2013.
- [24] M. DYBENDAL NIELSEN, LAEGE MODE AREA PHOTONIC CRYSTAL FIBERS, Thèse de doctorat de l'université du Den mark, années 2012.
- [25] FONTOLIER P.G 1984 SYSTEME DE TELECOMMUNICATION, BASE DE TRANSMISSION. Edition Paris 423-437
- [26] JOHN A 1995 FUNDAMENTALS OF OPTICAL FIBERS 2<sup>nd</sup> Edition.
- [27] STANDARDS AND TECHNOLOGY DEPARTMENT. MEASUREMENT OF THE EFFECTIVE AREA OF SINGLE MODE OPTICAL FIBER. Arlington 1998.
- [28] KEISER G 2000 OPTICAL FIBER COMMUNICATION. 3<sup>rd</sup> Edition. MCGRAW-HILL.
- [29] F. BENADIB, J. KNIGHT, AND P. RUSSELL. PARTICLE LEVITATION AND GUIDANCE IN HOLLOW-CORE PHOTONIC CRYSTAL FIBER. OPT. EXPRESS, 10(21):1195–1203, 2002.
- [30] L. B. SHAW, P. A. THIELEN, F. H. KUNG, V. Q. NGUYEN, J. S. SANGHERA, AND I. D. AGGARWAL. IR SUPERCONTINUUM GENERATION IN AS-SE PHOTONIC CRYSTAL FIBER. IN PROC. OPTICAL FIBER COMMUNICATION CONFERENCE, ANAHEIM USA, MARCH 2007, TUC5, March 2007.
- [31] AMBRE PEYRILLOUX, MODELISATION ET CARACTERISATION DES FIBRES MICROSTRUCTURES AIR/SILICE POUR APPLICATION AUX TELECOMMUNICATIONS OPTIQUES, Thèse de doctorat université de limoges, années 2003
- [32] RUSSELL P. ST. J. HOLEY NEW FIBERS. OPTICAL FIBER COMMUNICATION CONFERENCE, OSA TECHNICAL DIGEST SERIES (Optical Society of America, Washington DC, 2001), PAPIER TUL1, ANAHEIM (Californie, Etats Unis), 17-22 mars 2001.
- [33] BIRKS T. A., KNIGHT J. C., RUSSELL P. St. J. ENDLESSLY SINGLE-MODE PHOTONIC CRYSTAL FIBER. OPTICS LETTERS, 1997, vol. 22, n°. 13, pp. 961-963.

- [34] LEPROUX P., BRÉCHET F., DOYA V., ROY P., PAGNOUX D., MARCOU J.  
METHODE DE MODELISATION APPLIQUEES AUX FIBRES A CRISTAL  
PHOTONIQUE. JOURNEES NATIONALE D'OPTIQUE GUIDEE, LIMOGES(France),  
6-8 décembre 1999.
- [35] BMERKHI AHLEM « INFLUENCE DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES SUR  
LA CAVITÉ À CRISTAUX PHOTONIQUES BIDIMENSIONNELS », mémoire de  
magister, Université de Mentouri Constantine, 2008.
- [36] S. G. JOHNSON, S. FAN, P. R. VILLENEUVE, J. D. JOANNOPOULOS, et L. A.  
KOLODZIEJSKI, « GUIDED MODES IN PHOTONIC CRYSTAL SLABS », Phys. Rev.  
B, vol. 60, pp. 5751 -5758, 1999.
- [37] THE PWM « SIMULATIONS WERE CARRIED OUT WITH BANDSOLVE  
COMMERCIAL SOFTWARE BY RSOFT DESIGN GROUP », version 4.3, license  
16847214.2013.
- [38] DAVY GERARD, « ETUDE EN CHAMP PROCHE ET EN CHAMP LOINTAIN  
DE COMPOSANTS PERIODIQUEMENT NANO STRUCTURES : CRISTAUX  
PHOTONIQUES ET TAMIS A PHOTONS », Thèse de doctorat, Université de  
Bourgogne, 09 juillet 2004.
- [39] H. ABRI BADAOU, « ÉTUDE ET CONCEPTION DES MICRO COMPOSANTS A  
BASE DES CRISTAUX PHOTONIQUES BIDIMENSIONNELS », Thèse Doctorat,  
Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2012.