

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
المركز الجامعي لعين تموشنت  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
Filière : Génie électrique  
Spécialité : Génie des télécommunications  
Thème

*Analyse des propriétés du mode fondamental dans les fibres  
microstructurées air-silice*

**Présenté Par :**

- 1) Mazouzi hayet
- 2) Abadla Ikram

**Devant les jurys composés de :**

MERADI.. Abdel hafid	M.A.A	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
DEBBAL Mohamed	M.A.B	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
BOUTKHIL Malika	M.A.A	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur

*Année universitaire 2015/2016*



*« A mes chères  
parents et à tous ceux qui  
contribué A la réalisation de  
cette investigation ».*



## Remerciements

---

### Remerciements

Louanges à Dieu le tout puissant qui nous a aidé à terminer cette œuvre terrestre qui nous souhaitons sera bénéfique à tous les humains.

Nous tenons tout d'abord à remercier particulièrement notre encadreur monsieur « Debbal .Mohammed » qui nous a guidé et conseillé depuis le début de notre recherche jusqu'à sa mise en pages...ainsi que l'encouragement qu'il nous a prodigué tout au long de notre travail.

Nous remercions également monsieur « MERADI ABD EL HAFID » d'avoir accepté de présider le jury ainsi qu'à madame « BOUTKHIL.MALIKA » d'avoir accepté d'examiner ce travail et faire parti de ce jury.

Nous tenons aussi à remercier tous nos professeurs qui ont fait beaucoup d'efforts durant toute l'année afin de nous transmettre les connaissances nécessaires qui nous ont permis de faire ce travail dans les règles scientifiques requises...qu'ils soient toutes et tous remercies vivement .

## **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 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 microstructurées, fibre à cristal photonique où fibre à bande interdite photonique".

Dans ce contexte, nous avons réalisé un travail purement théorique basé sur la modélisation et la simulation analytique des différents paramètres de propagation dans les fibres optiques microstructurées. Ce travail nous a permis de mettre en évidence l'effet de chaque paramètre sur la propagation des signaux optiques.

## **Abstract**

The optical fiber is a light guide which is now the preferred medium for carrying high speed information. But to meet ever more important engendered by the development of the Internet in particular, it is necessary to always improve the propagation characteristics of the fibers, especially those related to losses and losses on the value and slope of the chromatic dispersion over the entire spectral used (case of telecommunications).

A new generation of fiber is devised in order to obtain lower losses than conventional fibers. These fibers known under the name of "microstructured fibers, photonic crystal fiber which fiber photonic bandgap.

In this context, we conducted a theoretical work based on modeling and simulation of various analytical propagation parameters in microstructured optical fibers. This work has allowed us to highlight the effect of each parameter on the propagation of optical sig

## Table des matières

Remercîments.....	ii
Résumé.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	x
Acronymes.....	xi
INTRODUCTION GENERALE : .....	1
<b>CHAPITRE I : FIBRE OPTIQUE CLASSIQUE .....</b>	<b>2</b>
I.1.INTRODUCTION : .....	3
I.2.DEFINITION : .....	3
I.3.LES TYPES DE FIBRE OPTIQUE : .....	4
<i>I.3.1.Fibre multimode : .....</i>	<i>4</i>
<i>I.3.2.Fibre monomode : .....</i>	<i>4</i>
I.4. PRINCIPE DE GUIDAGE : .....	5
I.5. LES PROPRIETES D'UNE FIBRE OPTIQUE : .....	6
<i>I.5.1. Les pertes : .....</i>	<i>6</i>
<i>I.5.2. L'atténuation : .....</i>	<i>7</i>
<i>I.5.3. Dispersion dans les fibres optiques : .....</i>	<i>7</i>
I.6. FABRICATION D'UNE FIBRE OPTIQUE : .....	10
<i>La préforme en silice : .....</i>	<i>10</i>
I.7.APPLICATION DES FIBRES OPTIQUES : .....	11
<i>I.7.1. Les télécommunications : .....</i>	<i>11</i>
<i>I.7.2. La médecine : .....</i>	<i>11</i>
<i>I.7.3. Les capteurs : .....</i>	<i>11</i>
<i>I.7.4. L'éclairage : .....</i>	<i>12</i>
I.8. CONCLUSION : .....	12
I.9. REFERENCE : .....	13
<b>CHAPITRE II: PCF (FMAS).....</b>	<b>14</b>
II.1. INTRODUCTION : .....	15
II.2. DEFINITION : .....	15
II.3. LES FIBRES OPTIQUES UNIDIMENSIONNELLES (1D) : .....	16
II.4. LES FIBRES OPTIQUES BIDIMENSIONNELLES (2D) : .....	16
II.5. LES FIBRES OPTIQUES TRIDIMENSIONNELLES (3D) : .....	17
II.6.LES TYPES : .....	18
<i>II.6.1. FMAS RTIM : .....</i>	<i>18</i>
<i>II.6.2. FMAS BIP : .....</i>	<i>18</i>
II.7. PRINCIPE DE GUIDAGE : .....	19
<i>II.7.1. Le guidage par effet BIP : .....</i>	<i>19</i>
<i>II.7.2. Le guidage par la réflexion totale interne modifiée : .....</i>	<i>20</i>
II.8. PROPRIETES : .....	20
<i>II.8.1. L'indice effectif : .....</i>	<i>20</i>
<i>II.8.2. La dispersion chromatique : .....</i>	<i>21</i>
<i>II.8.3. Les pertes de confinement : .....</i>	<i>22</i>
<i>II.8.4. Infiniment monomode : .....</i>	<i>22</i>
<i>II.8.5. La fréquence normalisée : .....</i>	<i>23</i>
<i>II.9. L'expression du paramètre W : .....</i>	<i>25</i>
II.10. FABRICATION D'UNE FIBRE OPTIQUE : .....	26
II.11. APPLICATION : .....	27
II.12. CONCLUSION : .....	28
II.13. RÉFÉRENCE:.....	29

<b>CHAPITRE III : ANALYSE DES PROPRIETES DU MODE FONDAMENTAL .....</b>	<b>32</b>
III.1. INTRODUCTION : .....	33
III.2. ANALYSE DES PROPRIETES DU PARAMETRE V : .....	33
III.2. 1. <i>V en fonction de <math>\lambda/\Lambda</math> :</i> .....	33
III.2. 2. <i>V en fonction de <math>\lambda</math> :</i> .....	34
III.2. 3. <i>V en fonction de <math>\Lambda</math> :</i> .....	36
III.2. 4. <i>V en fonction de <math>\lambda</math> :</i> .....	38
III.3.: <i>Analyse des propriétés du paramètre <math>N_{fsm}</math>:</i> .....	39
III.3. 1. <i><math>N_{fsm}</math> en fonction de <math>\lambda/\Lambda</math> :</i> .....	40
III.3. 2. <i><math>N_{fsm}</math> en fonction de <math>\lambda</math> :</i> .....	40
III.3. 3. <i><math>N_{fsm}</math> en fonction de <math>\Lambda</math> :</i> .....	41
III.4. ANALYSE DES PROPRIETES DU PARAMETRE W: .....	43
III.4.1. <i>W en fonction de <math>\lambda/\Lambda</math> :</i> .....	44
III.4.2. <i>W en fonction de <math>\lambda</math> :</i> .....	45
III.4.3. <i>W en fonction de <math>\Lambda</math> :</i> .....	46
III.4.3. <i>W en fonction de <math>\lambda</math> :</i> .....	48
III.5. ANALYSE DES PROPRIETES DU PARAMETRE $N_{EFF}$ : .....	49
III.5. 1. <i><math>N_{eff}</math> en fonction de <math>\lambda/\Lambda</math> :</i> .....	49
III.5. 2. <i><math>N_{eff}</math> en fonction de <math>\lambda</math> :</i> .....	50
III.5. 3. <i><math>N_{eff}</math> en fonction de <math>\Lambda</math> :</i> .....	51
III.5. 4. <i><math>N_{eff}</math> en fonction <math>\Lambda</math> :</i> .....	53
CONCLUSION GENERALE : .....	55



## Liste de figure

Figure I.1 : une fibre optique classique.....	3
Figure I.2 : fibre multimode à saut d'indice .....	4
Figure 1.3 : fibre à saut d'indice monomode.....	4
Figure. 4 : principe de propagation dans une fibre optique.....	5
Figure I. 5 : différentes pertes dans une fibre optique.....	6
Figure I. 6 : Dispersion chromatique dans une fibre optique .....	9
Figure II.1: Cristaux photoniques à une, deux et trois dimensions.....	15
Figure II.2: représentation schématique d'un miroir de Bragg.....	16
Figure II.3: a) Réseau carré, b) Réseau triangulaire. ....	17
Figure II.4: a) Schéma de fabrication de la Yablonovite,.....	17
b) Image MEB d'une structure Yablonovite en PMMA.....	17
c) Image MEB d'une structure tas de bois en silicium.....	17
Figure II.5: schéma descriptif d'une FMAS RTIM à arrangement triangulaire .....	18
Figure II.6: Schéma de sections transverses (a) d'une fibre de Bragg ,.....	19
(b) d'une FMAS BIP à arrangement triangulaire et (c) hexagonal .....	19
Figure II.7 Fabrication des FMAS.....	27
Figure III.1 : V en fonction de $\lambda\Lambda$ .....	34
Figure III.2 V en fonction de $\lambda$ pour les différentes valeurs du $\Lambda$ .....	35
Figure III.3 : V en fonction de $\Lambda$ .....	37
Figure III.4 : V en fonction de $\Lambda$ .....	39
Figure III.5 : N <sub>fsm</sub> en fonction de $\lambda\Lambda$ .....	40
Figure III.6 : N <sub>fsm</sub> en fonction de $\lambda$ .....	41
Figure III.7 : N <sub>fsm</sub> en fonction de $\Lambda$ .....	43
Figure III.8 : N <sub>fsm</sub> en fonction de $\Lambda$ .....	44
Figure III.9 : W en fonction de $\lambda\Lambda$ .....	46
Figure III.10 : W en fonction de $\lambda$ .....	48
Figure III.11 : W en fonction de $\Lambda$ .....	49
Figure III.12 : W en fonction de $\Lambda$ .....	50
Figure III.13 : N <sub>eff</sub> en fonction de $\lambda/\Lambda$ .....	51
Figure III.14 : N <sub>eff</sub> en fonction de $\lambda$ .....	53
Figure III.15 : N <sub>eff</sub> en fonction de $\Lambda$ .....	54

**Liste des tableaux :**

Table1 : les coefficients dans l'équation (II.12) .....25  
Table2 : les coefficients dans l'équation (II.14) .....26

# Liste des acronymes

## Liste des Acronymes :

$n_1$  : l'indice du cœur

$n_2$  : l'indice de la gaine

$\theta_1$  : l'angle d'incidence

$\theta_2$  : l'angle de réfraction

$P_O$  : la puissance d'entrée

$P_L$  : la puissance de sortie

$\beta$ : La constante de propagation

$N_i$  : l'indice de groupe

$V_{eff}$  : la fréquence normalisée effective

$V$  : la fréquence normalisée

$d$ : le diamètre des trous d'air

$\Lambda$  : l'espacement entre le centre des trous d'air, et l'indice de réfraction de la silice

$\lambda$  : la longueur d'onde

$n_{co}$  : l'indice du cœur

$a_{eff}$  : le rayon de cœur efficace

$n_{eff}$  : l'indice effectif

$W$  : la constante de propagation transversale normalisée

$N_{sm}$  : l'indice de la gaine

## **Introduction générale :**

Les fibres optiques forment l'épine dorsale des réseaux de télécommunications actuels, elles transmettent les données sur de longues distances avec un débit très élevé et une large bande passante. Dans le domaine des télécommunications optiques, le matériau privilégié est la silice très pure car elle présente des pertes optiques très faibles. Quand l'atténuation n'est pas le principal critère de sélection, on peut également mettre en œuvre des fibres en matière plastique. Un câble de fibres optiques contient en général plusieurs fibres, chaque fibre conduisant un signal soit dans un seul sens (mode simplex), soit dans les 2 sens (mode duplex); dans ce dernier cas, 2 longueurs d'onde (ou plus) sont utilisées (au moins une par sens). Mais au milieu des années 90, une nouvelle génération de fibres est imaginée dans le but d'obtenir un guidage par bande interdite photonique. Le cœur de ces fibres est en silice pure, et la gaine optique est constituée d'un arrangement régulier de microcanaux d'air dans une matrice de silice. Ces fibres aujourd'hui connues sous le nom de "fibres microstructurées air-silice" (FMAS), guident en fait la lumière, le plus souvent, par réflexion totale interne, comme les fibres classiques. Cependant, il a été rapidement démontré qu'elles pouvaient fonctionner en régime monomode sur une bande spectrale beaucoup plus large que les fibres usuelles et qu'elles pouvaient présenter des caractéristiques de dispersion tout à fait originales. C'est pour cette raison qu'elles ont très rapidement suscité un fort intérêt dans la communauté scientifique internationale.

Le chapitre I intitulé généralité sur les fibres optiques classique et leurs caractéristiques, nous y dériverons le principe de guidage dans ces fibres, et leurs propriétés.

Le chapitre II traite des fibres optiques microstructurée. Nous avons présenté les différents types de ces fibres, leur principe de guidage qui est basé sur la réflexion totale interne modifiée (RTIM) ou La bande interdite photonique (BIP). Nous y dériverons les propriétés dans les FMAS.

Le chapitre III nous avons traité l'analyse des propriétés du paramètre  $V$ ,  $N_{\text{fsm}}$ ,  $W$ ,  $N_{\text{eff}}$  en fonction des paramètres géométriques de base - le diamètre du trou d'air et l'espacement entre les trous d'air.



# **Chapitre I**

## **Fibre optique classique**

## I.1.Introduction :

La fibre optique est un guide de lumière qui constitue aujourd'hui le support privilégié pour le transport d'information 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.

Le chapitre I, à caractère bibliographique, présentera d'abord de manière générale les caractéristiques de propagation de la lumière dans les fibres classiques.

## I.2.Définition :

Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui constitue de trois éléments concentriques (cœur, gaine et la couche de protection) et elle a la propriété d'être un conducteur de la lumière et sert dans la transmission de données et de lumière.

Moins poétiquement, c'est un guide d'ondes électromagnétiques dans la gamme des longueurs d'ondes lumineuses, en générale de  $0.6 \mu\text{m}$  à  $2 \mu\text{m}$ , bien que certaines applications se dessinent vers  $10 \mu\text{m}$ , ce milieu est composé au minimum de deux matériaux d'indices différents l'un formant la gaine (indice  $n_2$ ) et l'autre le cœur (indice  $n_1$ ) [1].

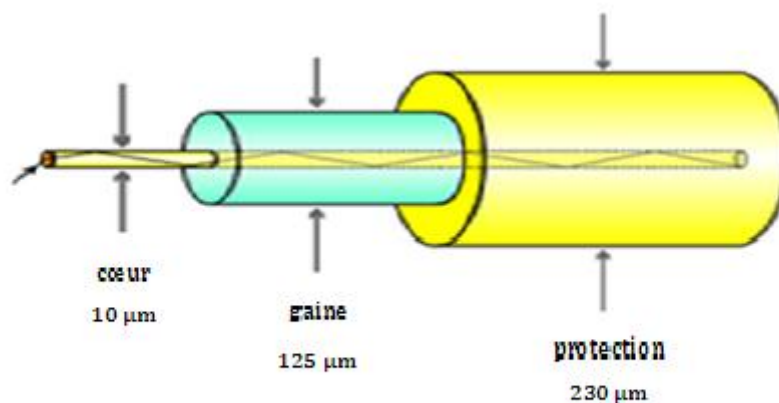


Figure I.1 : une fibre optique classique

### I.3. Les types de fibre optique :

#### I.3.1. Fibre multimode :

Les fibres multimodes (dites MMF, pour Multi Mode Fiber), c'est la première invention dans les fibres optiques, elles sont caractérisées par le transfert des rayons lumineux dans plusieurs trajets donc arrivent au bout de la ligne à des instants différents, elles sont utilisées uniquement pour des bas débits ou de courtes distances [2].

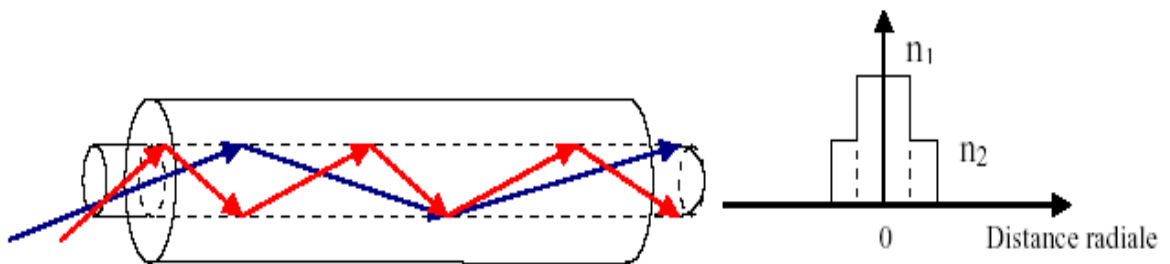


Figure I.2 : fibre multimode à saut d'indice [3]

#### I.3.2. Fibre monomode :

Les fibres monomodes (dites SMF, pour Single Mode Fiber), c'est une technologie mieux développée que les fibres multimodes car elle a la propriété de transporter les rayons lumineux dans un seul chemin (sens) donc elle n'a pas de dispersion intermodale. Et le signal est très peu déformé c'est pour cet avantage elles sont utilisées généralement pour les hauts débits ou de longues distances [2].

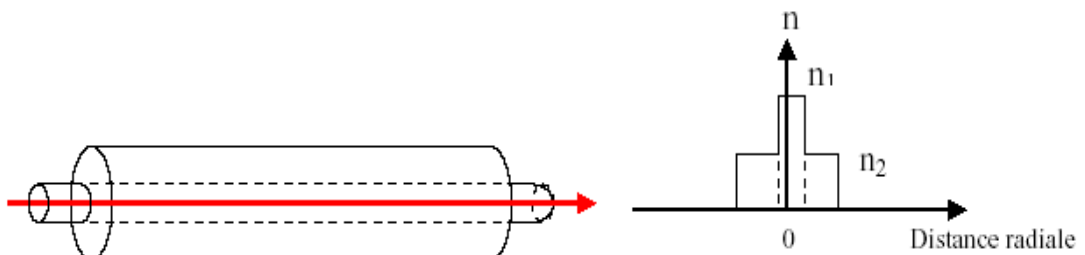




Figure I.3 : fibre à saut d'indice monomode. [3]

#### I.4. Principe de guidage :

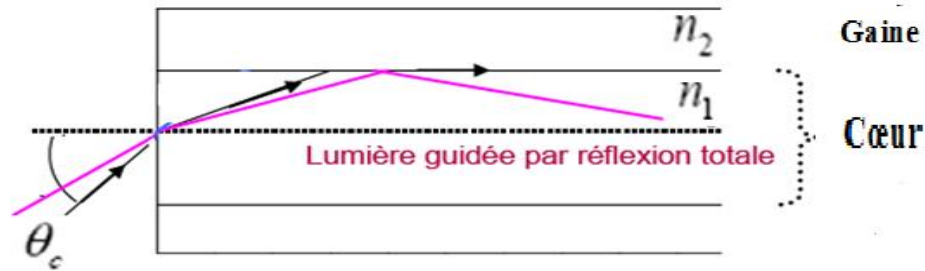


Figure I.4 : principe de propagation dans une fibre optique.

On rappelle la loi de Snell-Descartes pour la réfraction :

$$n_1 * \sin(\theta_1) = n_2 * \sin(\theta_2) \quad \text{I.1}$$

Où  $n_1$  et  $n_2$  sont les indices respectifs des milieux 1 et 2 et  $\theta_1$  et  $\theta_2$  les angles formés avec la normale par respectivement le rayon incident et le rayon réfracté.

On en déduit l'expression :

$$\sin(\theta_2) = \frac{n_1}{n_2} * \sin(\theta_1) \quad \text{I.2}$$

Cette équation possède une solution en  $\theta_2$  si et seulement si le membre de droite est compris entre -1 et +1. On peut donc constater que pour  $n_1 < n_2$ , cette équation possède toujours une solution en  $\theta_2$ , c'est-à-dire que pour  $n_1 < n_2$ , il existe toujours un rayon réfracté et il n'y a jamais réflexion totale.

Dans le cas  $n_1 > n_2$ , l'expression  $\frac{n_1}{n_2} * \sin(\theta_1)$  peut prendre des valeurs en dehors de l'intervalle [-1,1] : il n'y a alors pas de rayon réfracté et la réflexion est totale.

La valeur de  $\theta_2$  limite est la valeur pour laquelle  $\frac{n_1}{n_2} * \sin(\theta_1) = 1$  I.3

et de cette équation on déduit alors l'angle d'incidence  $\theta_1$  limite correspondant :

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) . \quad \text{I.4}$$

## I.5. Les propriétés d'une fibre optique :

### I.5.1. Les pertes :

La lumière dans une fibre optique se propage dans le verre. Ce verre n'a pas une transparence totale (sinon on serait dans le vide), cela implique que pour une distance donnée de propagation, la quantité de lumière en sortie de fibre optique sera plus faible qu'en entrée. On appelle cela la perte. Elle est mesurée en dB/km.

Il existe plusieurs types des pertes telles :

Absorption : Perturbation du photon de lumière par un électron d'un atome d'impureté.

Diffusion : Variation locale de l'indice de réfraction du cœur de la fibre  
Changements de densité ou de composition dans la matière.

Courbures : Torsion dans la fibre ne respecte pas le principe de réflexion totale interne.

Dispersion chromatique : Variation de la vitesse des signaux lumineux de longueurs d'onde différentes.

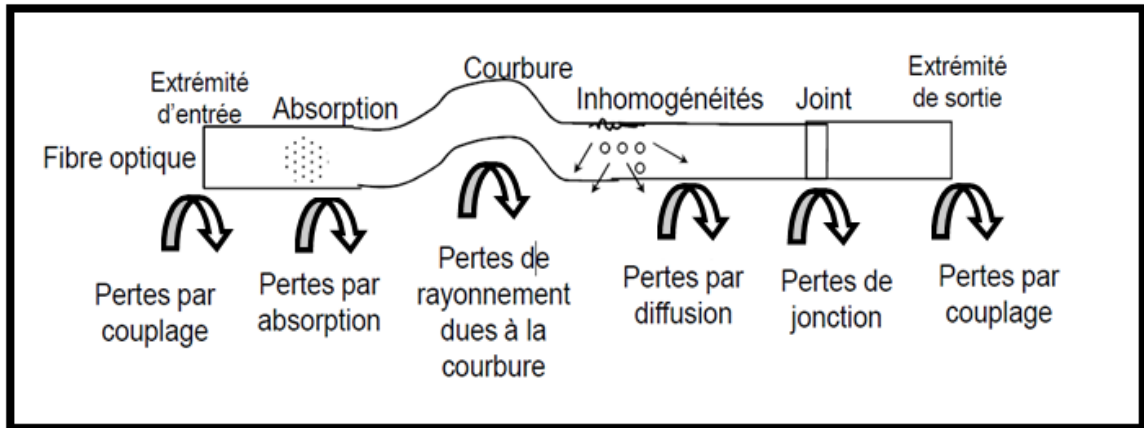


Figure I. 5 : différentes pertes dans une fibre optique. [3]

### I.5.2. L'atténuation :

L'atténuation caractérise l'affaiblissement du signal au cours de la propagation. Cette atténuation s'exprime par une valeur en dB/km (décibel par kilomètre).

Soient  $P_O$  et  $P_L$  les puissances à l'entrée et à la sortie d'une fibre de longueur  $L$ . L'atténuation linéaire se traduit alors par une décroissance exponentielle de la puissance en fonction de la longueur de fibre (Loi de Beer-Lambert) :  $P_L = P_O e^{-\alpha L}$  où  $\alpha$  est le coefficient d'atténuation linéaire. On utilise souvent le coefficient  $\alpha_{dB}$  exprimé en dB/km et relié à  $\alpha$  par  $\alpha_{dB} = 4,343\alpha$ .

Le principal atout des fibres optiques est une atténuation extrêmement faible. L'atténuation va varier suivant la longueur d'onde. La diffusion Rayleigh limite ainsi les performances dans le domaine des courtes longueurs d'onde (domaine du visible et du proche ultraviolet). Un pic d'absorption, dû à la présence de radicaux -OH dans la silice, pourra également être observé autour de 1 385 nm [4].

Cette atténuation dépend de la longueur d'onde, c'est-à-dire de la couleur (fréquence) de la lumière. En conséquence la longueur d'onde de la lumière utilisée pour transmettre un signal dans une fibre optique n'est pas choisie au hasard, elle correspond à un minimum d'atténuation.

### I.5.3. Dispersion dans les fibres optiques :

La dispersion dans les fibres est la combinaison de trois types de dispersion :

- La dispersion intramodale.
- La dispersion intermodale.
- La dispersion chromatique.

De façon générale, la dispersion est un élargissement et une déformation de l'impulsion lumineuse transportée par la fibre, ce qui diminue la bande passante.

### I.5.3.1. Dispersion intramodale :

Cette dispersion est due aux propriétés dispersives du matériau et à la structure du guide d'onde. Pour un mode donné, la variation de l'indice avec la longueur d'onde impose un élargissement du signal qui peut être important dans les fibres monomodes mais négligeables dans les fibres multimodes.

### I.5.3.2. Dispersion intermodale :

Une des causes de l'élargissement de l'impulsion est la dispersion intermodale. L'énergie lumineuse injectée à l'entrée de la fibre est répartie entre différents modes.

Les différents modes se propagent dans le cœur avec la vitesse :

$$v_m = \frac{c}{n_1} \sin \theta_m \quad \text{I.5}$$

avec  $v_m$  est la composante suivant l'axe de propagation de la vitesse

Le mode le plus lent :  $\theta = \theta_m$  alors

$$v_{min} = \frac{c}{n_1} \sin \theta_{lim} \quad \text{I.6}$$

Le mode le plus rapide  $\theta = \frac{\pi}{2}$ : alors

$$v_{max} = \frac{c}{n_1} \quad \text{I.7}$$

Après un trajet d'une distance  $L$ , le décalage entre les deux modes pour une fibre à saut d'indice sera :

$$\Delta\tau = \frac{L}{c} \frac{n_1 (n_1 - n_2)}{n_2} \quad \text{I.8}$$

### I.5.3.3. Dispersion chromatique :

La dispersion chromatique exprimée en ps / (nm·km), caractérise l'étalement du signal lié à sa largeur spectrale (deux longueurs d'ondes différentes ne se propagent pas exactement à la même vitesse). Cette dispersion dépend de la longueur d'onde considérée et résulte de la somme de deux effets: la dispersion propre au matériau, et la dispersion du guide, liée à la forme du profil d'indice. Il est donc possible de la minimiser en adaptant le profil.

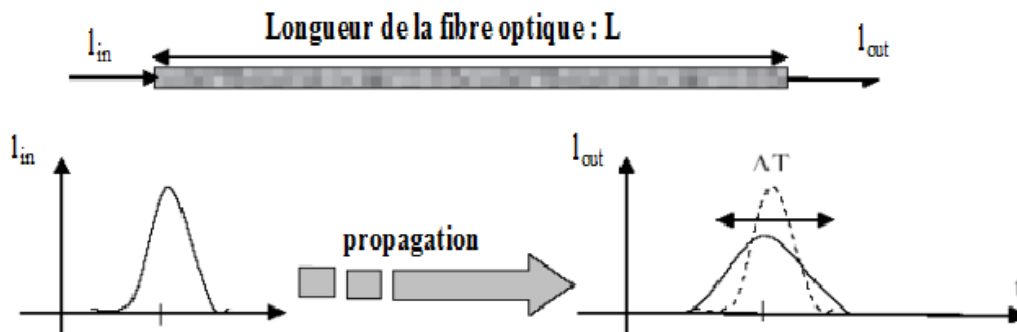


Figure I. 6 : Dispersion chromatique dans une fibre optique [3].

La dispersion propre au matériau est due à la variation de l'indice de réfraction avec la longueur d'onde.

Une impulsion de rayonnement est un paquet d'ondes dont la vitesse de groupe est donnée par:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \quad \text{I.9}$$

Puisque :  $\omega = 2\pi\nu$  et  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  Cette vitesse s'écrit :

$$V_g = \frac{dv}{d\left(\frac{1}{\lambda}\right)} = -\lambda^2 \frac{dv}{d\lambda} \quad \text{I.10}$$

Compte tenu de la relation  $v = \frac{c}{n\lambda}$ ,  $v_g$  s'écrit :

$$V_g = -c\lambda^2 \left( \frac{1}{n\lambda^2} - \frac{1}{n^2\lambda} \frac{dn}{d\lambda} \right) = \frac{c}{n} \left( 1 - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad \text{I.11}$$

Si la largeur spectrale du rayonnement est  $\Delta\lambda$ , l'étalement de la vitesse de groupe est :

$$\Delta v = \left( \frac{dv_g}{d\lambda} \right) \Delta\lambda \quad \text{I.12}$$

soit :

$$\Delta v_g = \frac{c\lambda}{n^2} \left( \frac{d^2n}{d\lambda^2} - \frac{2}{n} \left( \frac{dn}{d\lambda} \right)^2 \right) \Delta\lambda \quad \text{I.13}$$

Il en résulte que l'étalement dans le temps d'une impulsion brève, après un trajet d'une distance L dans le matériau est donné par [5]:

$$\Delta\tau = \left| \frac{L\Delta v_g}{v_g^2} \right| = \left| \frac{L\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2} \Delta\lambda \right| \quad \text{I.14}$$

## I.6. Fabrication d'une fibre optique :

### La préforme en silice :

Une préforme est un cylindre en verre qui peut mesurer un mètre de longueur et quelques centimètres de largeur. Elle servira à fabriquer le cœur de la fibre ainsi que la gaine optique. Pour augmenter l'indice de réfraction de la préforme, on insère des produits chimiques dopants puis on restreint la préforme en la chauffant pour refermer le barreau de silice.

Une fois la préforme fabriquée, elle passe au contrôle qualité et est placée dans un four pour passer à la phase d'étirage de la fibre.

### **L'étirage de la fibre à partir de la préforme.**

La tour d'étirage dans laquelle va être placée la silice fonctionne à des températures entre 1900 et 2200°C. La machine va tirer la préforme pour obtenir des fibres de verres très fines qui seront enroulées sur une bobine. Pendant l'étirage, le verre sera soumis à un test de diamètre. Ensuite, les fibres seront enrobées par d'un revêtement de protection, se verront attribuer un numéro d'identification unique et seront regroupées pour pouvoir finalement être emballées dans des gaines isolantes.

Une fois la fabrication terminée, il faudra tester leur débit, la résistance à la traction, la température de fonctionnement, l'indice de réfraction, la géométrie de fibre, l'atténuation, la dispersion chromatique et autres indicateurs de fonctionnement. Par ailleurs, la fibre va aussi être testée pour connaître sa capacité de conductivité si elle est utilisée dans des applications sous-marines [6].

## **I.7. Application des fibres optiques :**

### **I.7.1. Les télécommunications :**

En télécommunications, la fibre optique est utilisée pour la transmission d'information, que soit des conversations téléphoniques, des images ou des données.

### **I.7.2. La médecine :**

La première utilisation d'envergure de la fibre optique fut en médecine pour diagnostiquer des problèmes de santé que pour traiter certaines maladies.

Pour le diagnostic, un câble de fibres optiques transporte de la lumière à l'intérieur du corps. Cette lumière est réfléchiée par les organes internes et est captée par un autre câble de fibres optiques qui achemine cette lumière vers un système d'imagerie vidéo.

Pour un traitement, la fibre optique sert à transporter la lumière intense d'un laser à l'intérieur du corps humain donc elle facilite le travail des professionnels de la santé ainsi que la vie de leurs patients.

### **I.7.3. Les capteurs :**

Les fibres optiques peuvent être utilisées dans le domaine des capteurs.

Le gyromètre à fibre optique est un instrument utilisé par les navires, les sous-marins, les avions ou les satellites pour donner la vitesse angulaire.

Les tapers sont des fibres effilées qui peuvent également servir de capteur.

Un réseau de Bragg inscrit dans une fibre optique peut donner des informations de contrainte ou de température [7].

### **I.7.4. L'éclairage :**

Dans le domaine de l'éclairage, les fibres optiques sont aussi très utilisées, en muséographie, architecture, et aménagement d'espaces d'agrément public et domestique.

Enfin, dans le balisage, la décoration, la signalétique d'orientation ou encore en signalisation routière, les fibres optiques sont des outils couramment utilisés.

### **I.8. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les fibres optiques classiques et leur principe de guidage. Nous avons basé sur ces propriétés qui sont également exploitées dans le domaine des capteurs, dans l'imagerie et dans l'éclairage.

### **I.9. Référence :**

- [1] Encyclopédie des sciences industrielles Quillet, Nouvelle encyclopédie de mécanique, D'électricité et d'électronique, Publiée avec le concours du Centre National des Lettres, Dépôt légal : Novembre 1983.



- [2] Compte rendu des débats, Conseil de l'Europe. Assemblée parlementaire. Council of Europe, 1994 parlementaire. Council of Europe, 1994 .
- [3] D. Berkane, D. Benatia" Etude de la propagation optique dans une structure de fibre optique en présence de microdéformations périodiques", Université de Batna –Algérie.
- [4] Étude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique, Julien Maury, Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Limoges, 2003.
- [5] Encyclopédie des sciences industrielles Quillet, Nouvelle encyclopédie de mécanique, D'électricité et d'électronique, Publiée avec le concours du Centre National des Lettres, Dépôt légal : Novembre 1983.
- [6] Le dossier du Ministère de l'Industrie France : "Étude générique sur les technologies optoélectroniques : La fibre optique, une technologie de pointe"; <http://www.telecom.gouv.fr/>.
- [7] Passive fiber-optic components made by the fused biconical taper process, sur le site [/cat.inist.fr](http://cat.inist.fr).

**Chapitre II**

**Les fibres microstructurées  
air-silice**

**(FMAS)**

## **II.1. Introduction :**

Deux types distincts de guidage (faisant appel à des phénomènes physiques différents) peuvent s'opérer dans les fibres microstructurées. Ce chapitre introductif a pour but de présenter les deux classes de fibres microstructurées air/silice (FMAS) existantes.

Dans un premier temps, nous rappellerons quels sont les besoins qui ont fait naître l'idée de concevoir des matériaux microstructurés, appelés cristaux photoniques, et comment celle-ci a conduit à la réalisation de fibres microstructurées.

## **II.2. Définition :**

Les fibres optiques micro structurées air -silice (FMAS) ou les fibres à cristaux photoniques (PCF), apparues dans le milieu des années 1990. Ce type de fibre permet le guidage de la lumière dans un matériau unique grâce à leur structuration périodique. Après plus d'une décennie de recherche, ces nouvelles fibre optiques ont démontré un potentiel d'application extrêmement vaste et ce, dans des domaines très variés allant de la défense aux applications biophotonique, sous la forme de capteur optiques ou de laser [1].

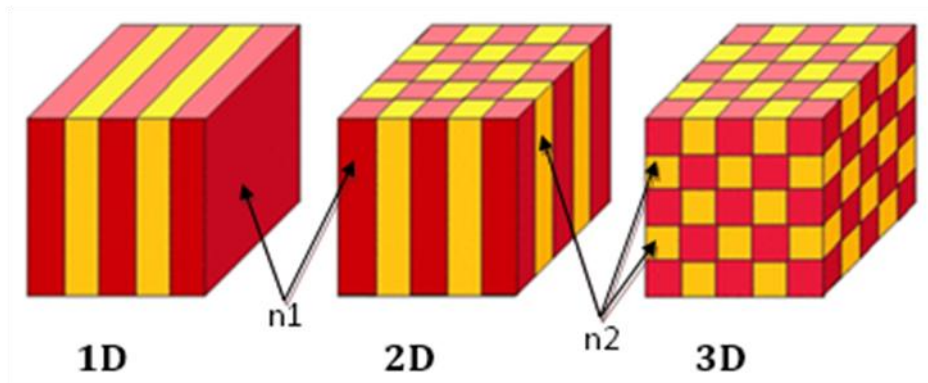


Figure II.1: Cristaux photoniques à une, deux et trois dimensions. [2]

### II.3. Les fibres optiques unidimensionnelles (1d) :

Pour aborder l'étude des cristaux photoniques, nous étudions le cas simple d'un milieu dont le constant diélectrique est périodique suivant une seule dimension. Ce milieu peut être constitué d'une alternance de couches de diélectriques de permittivités différentes "1" et "2". Cette structure porte le nom de miroir de Bragg. Elle est souvent utilisée pour réaliser les Miroirs de cavités lasers (VECSELS [3] par exemple). Ce paragraphe illustre l'apparition de bandes interdites photoniques dans les cristaux photoniques avec l'exemple du miroir de Bragg.

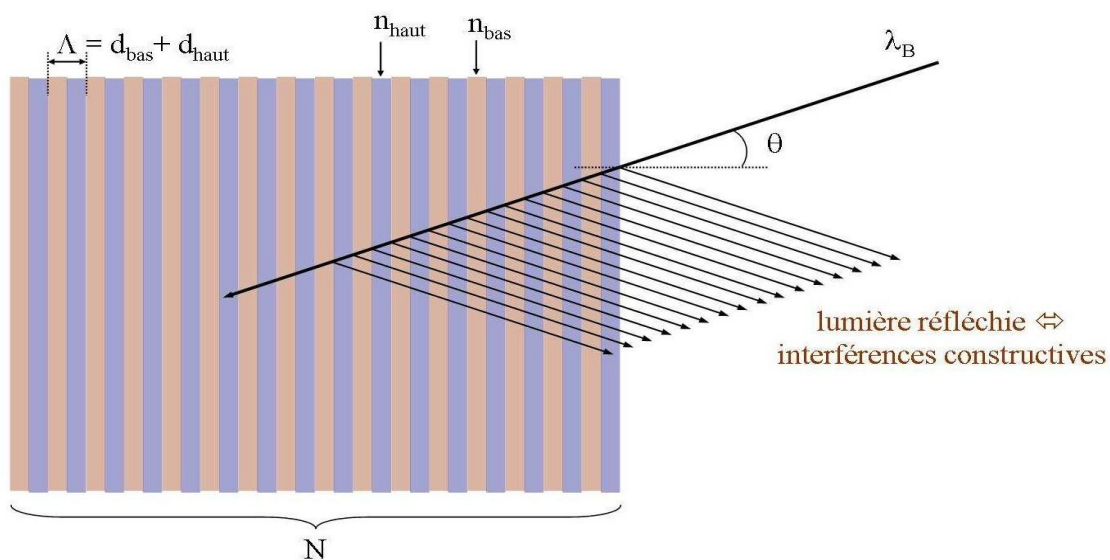


Figure II.2: représentation schématique d'un miroir de Bragg [4].

#### II.4. Les fibres optiques bidimensionnelles (2d) :

A deux dimensions, les cristaux photoniques sont composés d'un réseau périodique de piliers de diélectrique dans l'air ou de trous d'air percés dans un diélectrique. Les deux réseaux les plus courants pour l'organisation des piliers (ou des trous) sont le réseau carré et le réseau triangulaire. La Figure I-4 présente ces deux réseaux avec leurs zones de Brillouin respectives.

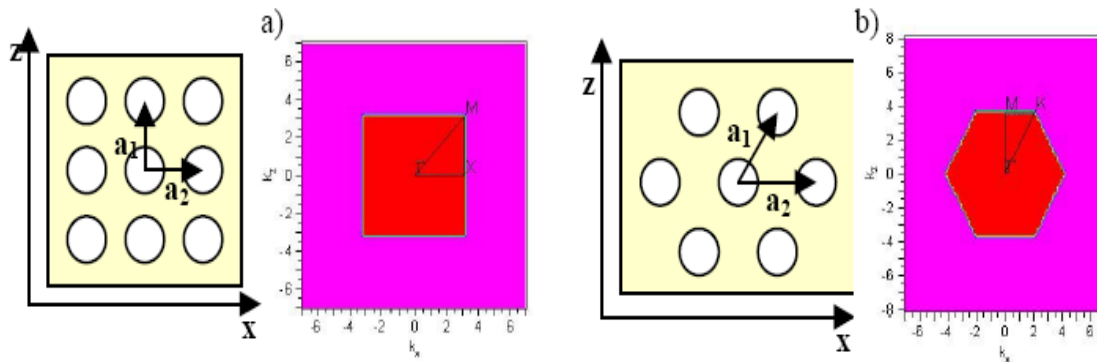


Figure II.3: a) Réseau carré, b) Réseau triangulaire [2].

#### II.5. Les fibres optiques tridimensionnelles (3d) :

Seuls les cristaux photoniques 3D permettent d'obtenir une bande interdite omnidirectionnelle [5]. Le premier cristal photonique 3D, appelé yablonovite, fut fabriqué en 1991 par E. Yablonovitch. Il existe aussi des cristaux photoniques 3D naturels. Par exemple, les ailes d'une certaine race de papillons, les Lycaenidae, contiennent un réseau de trous périodiques qui réfléchissent totalement la lumière bleue, quel que soit l'angle d'incidence [6].

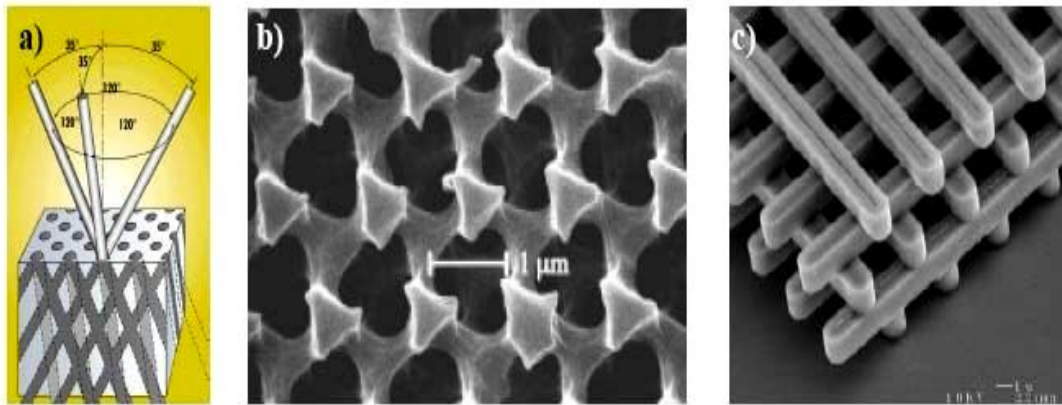


Figure II.4: a) Schéma de fabrication de la Yablonovite,

b) Image MEB d'une structure Yablonovite en PMMA.[ 7]

c) Image MEB d'une structure tas de bois en silicium [8].

## II.6.Les types :

Le terme FMAS regroupe deux catégories de fibres :

La réflexion totale interne modifiée (RTIM)

La bande interdite photonique (BIP)

### II.6.1. Les fibres RTIM :

le phénomène de réflexion totale survient lorsqu'un rayon arrive sur la surface de séparation de deux milieux d'indices optiques différents avec un angle d'incidence supérieur à une valeur critique : il n'y a alors plus de rayon réfracté transmis et seul subsiste un rayon réfléchi.

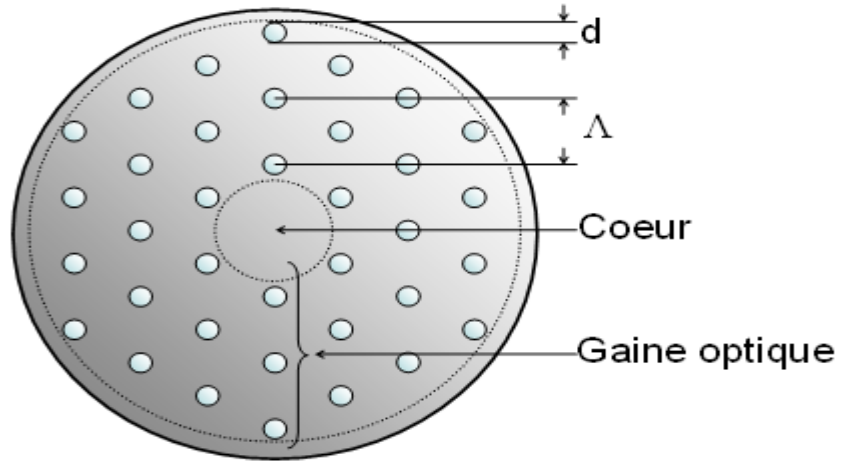


Figure II.5: schéma descriptif d'une FMAS RTIM à arrangement triangulaire [9].

**II.6.2. Les fibres BIP :**

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.

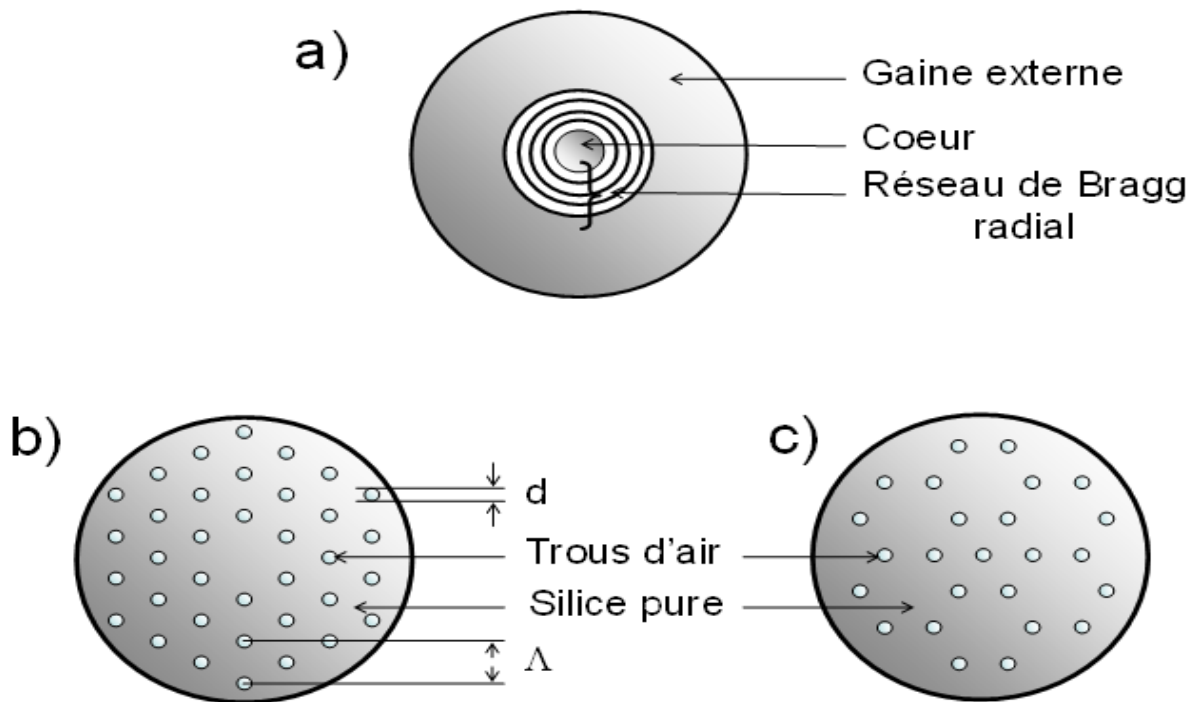


Figure II.6: Schéma de sections transverses (a) d'une fibre de Bragg ,  
(b) d'une FMAS BIP à arrangement triangulaire et (c) hexagonal [9].

## **II.7. Principe de guidage :**

Le terme générique de fibre microstructurées 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 dans le cœur.

### **II.7.1. Le guidage par effet BIP :**

Ce principe de guidage exploite le phénomène de bandes interdites photoniques dans un cristal photonique.

Le guidage par effet BIP est opérant quel que soit l'indice du cœur de la FCP. Cette propriété distingue les FCP des guides d'onde usuels pour lesquels l'indice de réfraction du cœur doit être supérieur à l'indice de la gaine optique. Si l'indice du cœur est inférieur aux indices des matériaux constituant la gaine photonique, la FCP peut être monomode. Au contraire s'il est supérieur, un autre principe de propagation entre en jeu, assez comparable au guidage par réflexion totale interne. La FCP est alors multimode aux longueurs d'onde correspondant aux bandes interdites de la gaine photonique car il existe au moins deux modes dus à chacun des deux types de propagation [10] [11].

### **II.7.2. Le guidage par la réflexion totale interne modifiée :**

La lumière n'est pas guidée par résonance transverse en particulier parce que la proportion d'air dans le cristal photonique n'est pas suffisante pour obtenir une bande interdite photonique à ces longueurs d'onde. Pourtant la lumière est guidée dans le cœur en silice pure de cette fibre dans le visible et le proche infrarouge [12].

Pourtant la lumière est guidée dans le cœur en silice pure de cette fibre dans le visible et le proche infrarouge. La propagation de la lumière est rendue possible par le fait que, la gaine photonique étant composée de trous d'air dans de la silice, son indice de réfraction moyen est inférieur à celui du cœur constitué de silice pure. Ce principe de propagation est donc basé sur



un guidage par l'indice comme dans une fibre standard mais confère au mode guidé des propriétés nouvelles. Pour cette raison, il est souvent appelé la réflexion totale interne modifiée.

## II.8. Propriétés :

### II.8.1. L'indice effectif :

Pour que le guidage de la lumière s'effectue par réflexions totales, la condition physique à vérifier est que la constante de propagation  $\beta$  .soit comprise entre  $k_{n\text{silice}}$  et  $B_{FMS}$ .

$$B_{FMS} < \beta < k_{n\text{Silice}}$$

Avec  $k_{n\text{silice}}$  est la constante de propagation maximale possible pour un mode dans la région du cœur composé de silice et  $B_{FMS}$  la constante de propagation du mode de gaine de la fibre ayant l'ordre le plus faible. Ce mode correspond au mode fondamental qui se propagerait dans un milieu hétérogène (composé de silice et de canaux) identique à la gaine d'extension infinie.

L'indice équivalent de la gaine dans une fibre microstructurées s'écrit [13] [14] :

$$n_{fms} = \frac{B_{FMS}}{K} \quad \text{II.1}$$

### II.8.2. La dispersion chromatique :

La dispersion chromatique  $D_C$  d'un mode guidé est approximativement égale à la somme de la dispersion du matériau de la structure guidante  $D_M$  et de la dispersion liée à la géométrie du guide  $D_G$  (dispersion du guide).

$$D_C = D_M + D_G \quad \text{II.2}$$

$$D_M = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 N_{\text{cœur}}}{d\lambda^2} \quad \text{II.3}$$

L'indice de groupe  $N_i$  du matériau constituant la région  $i$  s'exprime en fonction de l'indice de réfraction  $n_i$  de la région  $i$  :

$$N_i = n_i - \lambda \frac{dn_i}{d\lambda} \quad \text{II.4}$$

Compte tenu du changement du sens de la courbure de  $N_i = f(\lambda)$  autour de  $1,27 \mu\text{m}$ , la dispersion de la silice est négative pour des longueurs d'onde inférieures à  $1,27 \mu\text{m}$  et positive au-delà de cette valeur.

La dispersion du guide est proportionnelle au paramètre de dispersion  $V \frac{d^2(Vb)}{dV^2}$ . Il a été démontré que ce paramètre dépend de la variation de la taille du mode en fonction de la longueur d'onde quel que soit le profil d'indice de la fibre considérée.

$$V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} = 2a^2 \left[ \frac{1}{v} \iint \left( \frac{dE_r}{dr} \right)^2 dS - \iint \left( \frac{dE_{r^2}}{dr} \right)^2 dS \right] \quad \text{II.5}$$

Le phénomène de dispersion chromatique est lié à la dépendance de l'indice de réfraction linéaire du milieu  $n$  à la longueur d'onde.

La dispersion chromatique dans la fibre microstructurée dépend de celle de la différence d'indice cœur gaine qui augmente lorsque la longueur d'onde augmente. Autrement dit, à la différence des fibres optiques usuelles, l'ouverture numérique des fibres microstructurées est une fonction de la longueur d'onde [15].

### II.8.3. Les pertes de confinement :

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

Celles-ci sont d'autant plus élevées que le champ s'étale plus dans la structure. L'extension du champ doit donc être limitée afin de les maintenir en dessous d'un seuil acceptable. Or le champ est d'autant mieux confiné que la proportion d'air dans la gaine est plus importante et/ou que le nombre de couronnes est plus élevé [16] [17].

### II.8.4. Infiniment monomode :

Parmi les propriétés spécifiques aux fibres optiques microstructurées, la plus utile est peut-être celle de guider un unique mode présentant une répartition d'intensité quasi-gaussienne sur tout le domaine de transparence de la silice (de 300 à 2000 nm environ). Celle-ci découle de la forte dépendance de l'indice effectif de la gaine microstructurées, à la fois à la dimension des trous d'air et à la longueur d'onde, car la dimension des trous et la longueur d'onde optique sont du même ordre de grandeur. Aux courtes longueurs d'onde, le champ modal est beaucoup plus confiné dans le cœur. la différence d'indice effectif entre le cœur et la gaine est ainsi réduite. Alors que, pour les grandes longueurs d'onde, le champ modal s'étend à travers les trous, diminuant l'indice effectif de la gaine. La conséquence directe de la diminution de l'indice effectif de la gaine pour les grandes longueurs d'onde est que la fréquence de coupure du second mode peut être repoussée à l'infini, ce qui rend la fibre unimodale pour toutes les longueurs d'onde optiques même lorsque le rayon de champ du mode guidé est grand (diamètre de l'ordre de  $40 \lambda$ ). Ceci n'est possible que lorsque la proportion d'air dans la fibre reste faible ( $d/\Lambda \leq 0.4$ ) ; les FOM avec une grande proportion d'air sont multimodes pour les courtes longueurs d'onde, comme les fibres conventionnelles [1].

Nous pouvons présenter le caractère indéfiniment monomode à partir de la fréquence normalisée  $V_{\text{eff}}$  :

$$V_{\text{eff}} = \frac{2\pi a_{\text{eq}}}{\lambda} \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{fms}}^2} \quad \text{II.6}$$

### II.8.5. La fréquence normalisée :

Nous considérons un PCF avec un réseau triangulaire de trous, où  $d$  est le diamètre des trous d'air,  $\Lambda$  est l'espacement entre le centre des trous d'air, et l'indice de réfraction de la silice est de 1,45. Dans le centre de la fibre, on crée un défaut sur le trou central en changeant leur indice de réfraction par l'indice de silice, servant de cœur de la fibre. Récemment, nous avons affirmé que les PCFs triangulaires peuvent être bien paramétrés en termes du paramètre  $V$  [18], qui est donnée par :

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a_{\text{eff}} \sqrt{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{FSM}}^2} = \sqrt{U^2 + W^2} \quad \text{II.7}$$

Avec

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

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

où  $\lambda$  est la longueur d'onde de fonctionnement,  $n_{co}$  est l'indice de base,  $n_{fsm}$  est l'indice de la gaine, définie l'indice effectif du mode dit de remplissage d'espace fondamental dans le trou d'air triangulaire [19],  $n_{eff}$  est l'indice effectif du mode guidé fondamental et  $a_{eff}$  est le rayon de cœur efficace, qui ici est supposé être de  $\Lambda/3$ . Les paramètres  $U$  et  $W$  sont appelés, respectivement, les constantes de phase et d'atténuation transversaux normalisés. Ont proposés la relation empirique pour  $V_{eff}$  de l'équation. (II.10)[20]:

$$V_{eff} = \frac{2\pi}{\lambda} \Lambda \sqrt{n_{eff}^2 - n_{FSM}^2} \quad \text{II.10}$$

Cette définition est intrinsèquement différente de la définition des paramètres de  $V$  d'origine en fibres à saut d'indice (SIF) théorie et correspond au paramètre  $W$ . Il semble donc difficile d'appliquer la conception principe de SIFs carrément à PCFs. Donc, nous adoptons la définition du paramètre  $V$  de l'équation. (II.7). Même si nous pouvons estimer les propriétés fondamentales du PCF à l'aide du paramètre  $V$  dans l'équation. (II.7), un facteur limitant pour l'utilisation de l'équation. (II.7) est celle d'une méthode numérique est requise pour l'obtention de l'indice de la gaine effective précise  $n_{fsm}$ .

$$v = \left( \frac{\lambda}{\Lambda}, \frac{d}{\Lambda} \right) = A_1 + \frac{A_2}{1 + A_3 \exp(A_4 \lambda / \Lambda)} \quad \text{II.11}$$

l'ajustement des paramètres  $A_i$  ( $i = 1$  à  $4$ ) dépendent seulement de  $d / \Lambda$ . Les données sont bien décrites par l'expression suivante :

$$A_i = a_{i0} + a_{i1} \left(\frac{d}{\lambda}\right)^{b_{i1}} + a_{i2} \left(\frac{d}{\lambda}\right)^{b_{i2}} + a_{i3} \left(\frac{d}{\lambda}\right)^{b_{i3}} \quad \text{II.12}$$

Les coefficients  $a_{i0}$  à  $A_{i3}$  et  $B_{i1}$  à  $b_{i3}$  sont donnés dans le tableau 1. [21]

	i=1	i=2	i=3	i=4
$a_{i0}$	0.54808	0.71041	0.16904	-1.52736
$a_{i1}$	5.00401	9.73491	1.85765	1.06745
$a_{i2}$	-10.43248	47.41496	18.96849	1.93229
$a_{i3}$	8.22992	-437.50962	-42.4318	3.89
$b_{i1}$	5	1.8	1.7	-0.84
$b_{i2}$	7	7.32	10	1.02
$b_{i3}$	9	22.8	14	13.4

Table1 : les coefficients dans l'équation (II.12)

## II.9. L'expression du paramètre W :

Dans la section précédente, nous avons fourni la relation empirique pour le paramètre V de PCFs . En utilisant l'équation (II.10) on peut facilement obtenir l'indice de la gaine efficace  $n_{\text{fsm}}$  , cependant , nous avons besoin habituellement calculs numériques lourds pour obtenir les valeurs précises de  $n_{\text{eff}}$ . [20] :

$$W\left(\frac{\lambda}{\lambda}, \frac{d}{\lambda}\right) = B_1 + \frac{B_2}{1 + B_3 \exp(B_4 \lambda / \lambda)} \quad \text{II.13}$$

l'ajustement des paramètres  $B_i$  ( $i = 1$  à  $4$ ) dépendent  $d / \Lambda$  seulement. Les données sont bien décrites par l'expression suivante :

$$B_i = c_{i0} + c_{i1} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{d_{i1}} + c_{i2} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{d_{i2}} + c_{i3} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{d_{i3}} \quad \text{II.14}$$

Les coefficients  $c_{i0}$  à  $c_{i3}$  et  $d_{i1}$  à  $d_{i3}$  sont donnés dans le tableau 2. L'expression de l'équation (II.13) donne des valeurs de  $W$  [22] :

	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
$c_{i0}$	-0.0973	0.53193	0.24876	5.29801
$c_{i1}$	-16.70566	6.70858	2.72423	0.05142
$c_{i2}$	67.13845	52.04855	13.28649	-5.18302
$c_{i3}$	-50.25518	-540.66947	-36.80372	2.7641
$d_{i1}$	7	1.49	3.85	-2
$d_{i2}$	9	6.58	10	0.41
$d_{i3}$	10	24.8	15	6

Table2 : les coefficients dans l'équation (II.14)

## II.10. Fabrication d'une fibre optique :

La première étape de la fabrication consiste à réaliser un empilement de tubes capillaires sélectionnés en fonction de leurs diamètres intérieur et extérieur, autour d'un barreau de silice

formant le cœur de la structure à réaliser (dans le cas des coupleurs on a deux barreaux de silice à la place d'un seul). L'ensemble est contenu dans un tube de maintien.

La seconde étape est d'effectuer l'étirage de la préforme macroscopique afin d'obtenir la structure microscopique souhaitée à un coefficient homothétique près (figure II.7).

L'étirage s'effectue par un four à induction, où l'on doit placer la préforme dans le sens vertical pour profiter de la pesanteur.

Cependant les conditions d'étirage (température, pressions interne et externe) peuvent modifier la taille et la forme des trous constitutifs de la fibre. Pour cette raison on a intérêt à fabriquer ce type de fibre dans des chambres bien conditionnées. En effet, une température qui n'est pas assez importante (de l'ordre de 2000 °C) peut causer la rupture de la fibre [23].

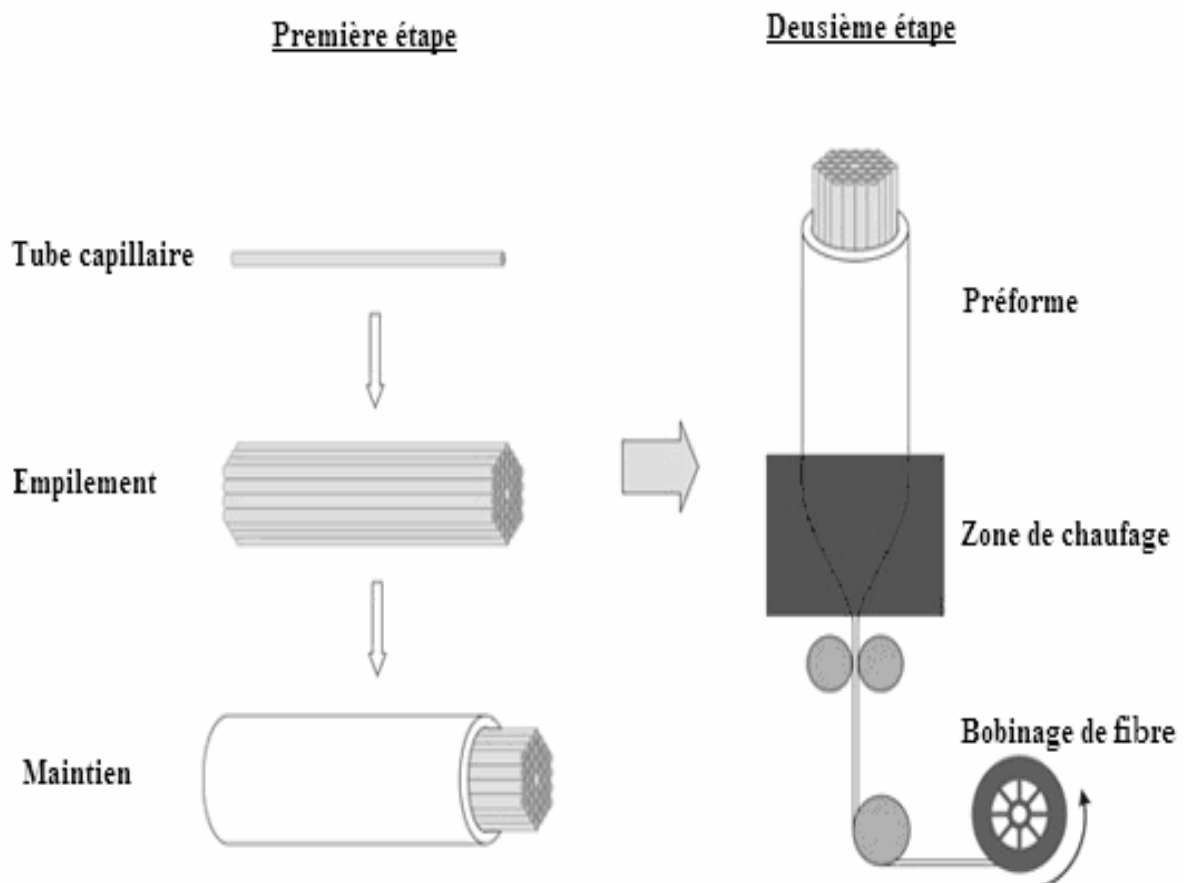


Figure II.7 Fabrication des FMAS

## II.11. Application :

Tout d'abord, la fabrication d'amplificateurs optiques et de sources laser est un domaine très important pour lequel les propriétés modales et dispersives uniques des fibres microstructurées peuvent être mises à contribution.

Une des premières applications pour lesquelles les fibres microstructurées se sont particulièrement démarquées au cours des dernières années est la génération de Super continuum (SC), c'est-à-dire la génération de lumière cohérente ayant un spectre très large par l'entremise d'effets non-linéaires. En combinant la très petite surface de mode des fibres microstructurées hautement non linéaire avec la possibilité de décaler le zéro de dispersion de ces fibres aux longueurs d'onde d'émission de lasers à impulsions brèves modernes.

Parmi les autres applications ayant été proposées pour les fibres microstructurées, notons particulièrement la possibilité de pôler les fibres microstructurées afin d'augmenter substantiellement la susceptibilité de deuxième ordre et de permettre ainsi la génération de seconde harmonique dans une fibre optique. La présence de trous dans les fibres microstructurées les rend aussi particulièrement intéressantes pour les applications reliées aux capteurs à onde évanescente. En effet, l'injection de gaz dans les trous constituant la gaine de la fibre peut modifier ses propriétés de guidage et ainsi mener au développement de senseurs spécifiques à la détection de gaz. De plus, la possibilité de fabriquer des fibres microstructurées hautement biréfringentes sans avoir recours à l'induction de contraintes thermiques comme c'est le cas pour les fibres à préservation de polarisation conventionnelles [24].

(Panda ou Bow-tie) permet la réalisation de fibres hautement biréfringentes insensibles aux variations de température. Ce résultat est potentiellement très intéressant pour les applications nécessitant l'utilisation de capteurs dans des environnements soumis à de grandes variations de température

## II.12. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons décrit deux types de guidage pouvant opérer dans les FMAS, l'un basé sur l'effet BIP dans la gaine et l'autre sur la RTIM. Ces deux guidages conduisent à distinguer deux classes de FMAS : les "FMAS BIP" et les "FMAS RTIM".

Nous avons étudié les différentes propriétés des fibres microstructurées.



# **Chapitre III**

## **Analyse des propriétés du mode fondamental**

### III.1. Introduction :

Fibres à cristaux photoniques (PCF), également appelées fibres trouées ou des fibres optiques microstructurées, ont fait l'objet d'une étude intensive car ils offrent une souplesse de conception dans le contrôle des propriétés modal.

Le but de ce travail est de fournir les relations empiriques pour le paramètre  $V$  et  $W$  ainsi les indices effectives et de la gaine optique des PCFs en fonction des paramètres géométriques de base - le diamètre du trou d'air et le pas entre ces trous. Nous pouvons facilement évaluer les propriétés fondamentales de PCFs sans la nécessité de calculs numériques ou des méthodes numérique compliqué.

### III.2. Analyse des propriétés du paramètre $V$ :

La fréquence effective normalisée  $V$  est un paramètre qui contribue à caractériser les conditions de guidage dans les fibres cristaux photoniques.

Récemment, nous avons affirmé que les PCFs triangulaires peuvent être bien paramétrées en termes du comportement monomode et multimode par le paramètre  $V$ , qui est donnée par :

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a_{eff} \sqrt{n_{co}^2 - n_{FSM}^2}$$

III.1

$$v = \left( \frac{\lambda}{\Lambda}, \frac{d}{\Lambda} \right) = A_1 + \frac{A_2}{1 + A_3 \exp(A_4 \lambda / \Lambda)} \quad \text{III.2}$$

### III.2. 1. V en fonction de $\lambda / \Lambda$ :

La figure (III.1) montre les valeurs calculées par V en fonction de  $\lambda / \Lambda$  pour  $d / \Lambda$  allant de 0,20 à 0,80 avec un pas de 0,1.

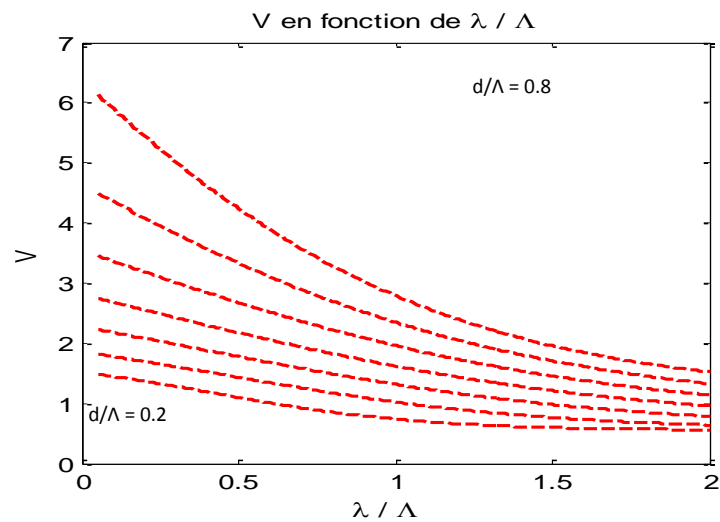


Figure III.1 : V en fonction de  $\lambda / \Lambda$

Dans la figure(III.1) ; V en fonction de  $\lambda / \Lambda$  :

Pour  $d / \Lambda = 0.2$  le graphe est totalement monomode quelque soit la longueur d'onde.

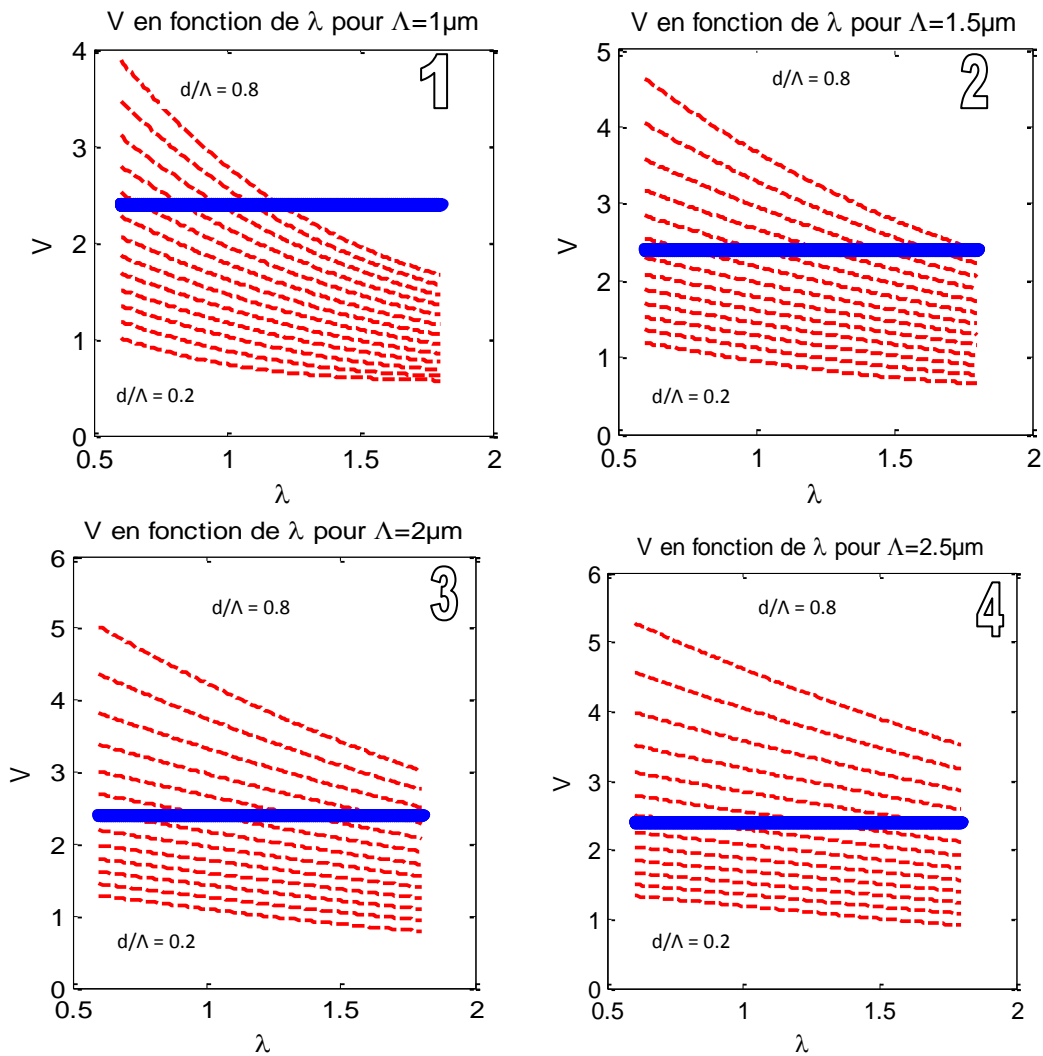
On a remarqué que pour  $d / \Lambda = 0.3$  et  $d / \Lambda = 0.4$ , la fibre est totalement monomode quel que soit la longueur d'onde.

Par contre lorsque  $d / \Lambda = 0.7$  le graphe est multimode pour la longueur d'onde inférieure à  $1 \mu\text{m}$ .

Pour  $d / \Lambda = 0.8$  le graphe est multimode pour la longueur d'onde inférieure à  $1.4 \mu\text{m}$ .

**III.2. 2. V en fonction de  $\lambda$  :**

La figure (III.2) montre les valeurs calculées par V en fonction de  $\lambda$  pour  $d / \Lambda$  allant de 0,20 à 0,80 avec un pas de 0,05 et on a varié le  $\Lambda$  de  $1\mu\text{m}$  à  $4\mu\text{m}$  dans avec un pas de  $0.5\mu\text{m}$ .



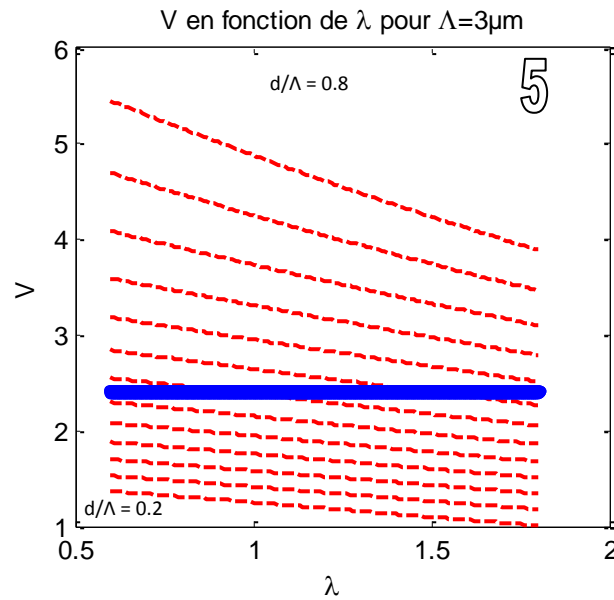


Figure III.2 :V en fonction de  $\lambda$  pour les différentes valeurs du  $\Lambda$

Dans la figure (III.2) nous avons V en fonction de  $\lambda$ .

Pour  $\Lambda = 1$  :  $V = 2.405$  le graphe est totalement monomode pour  $d/\Lambda = 0.55$ .

Pour  $\Lambda = 1.5$  : dans cette figure pour  $d/\Lambda = 0.55$ , nous avons un changement car on a augmenté le pitch alors on remarque que le graphe est séparé en 2 parties, partie monomode si la longueur d'onde est supérieure à  $0.8\mu\text{m}$  et la partie multimode si la longueur d'onde est inférieure à  $0.8\mu\text{m}$ .

Pour  $\Lambda = 2$  : dans cette figure toujours avec  $d/\Lambda = 0.55$ , on remarque que notre PCF est monomode si la longueur d'onde est supérieure à  $1.3\mu\text{m}$  et multimode si la longueur d'onde est inférieure à  $1.3\mu\text{m}$ .

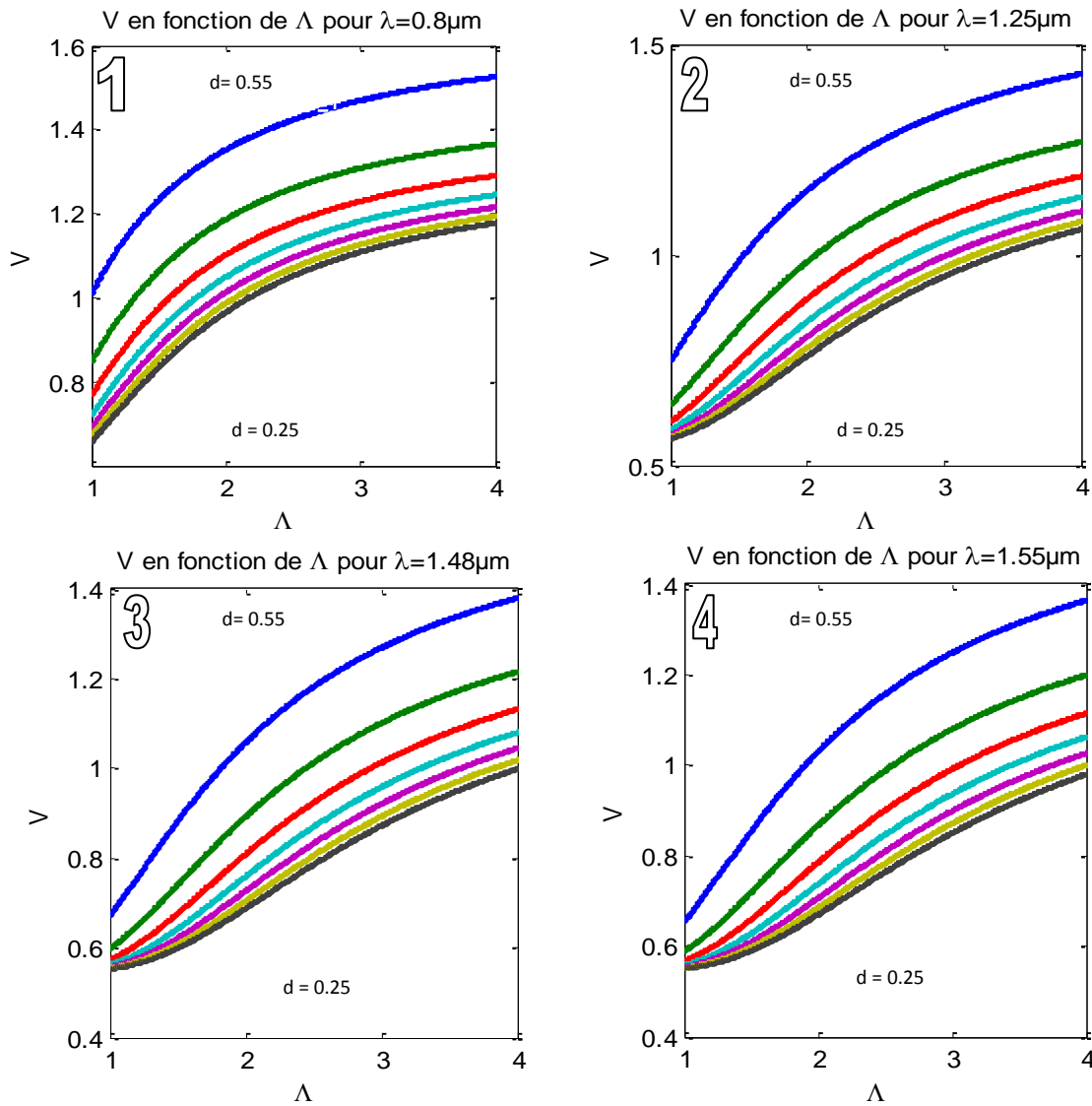
Pour  $\Lambda = 2.5$  : dans cette figure, si la longueur d'onde est supérieure à  $1.4\mu\text{m}$  alors notre fibre est monomode, et la partie multimode si la longueur d'onde est inférieure à  $1.4\mu\text{m}$ .

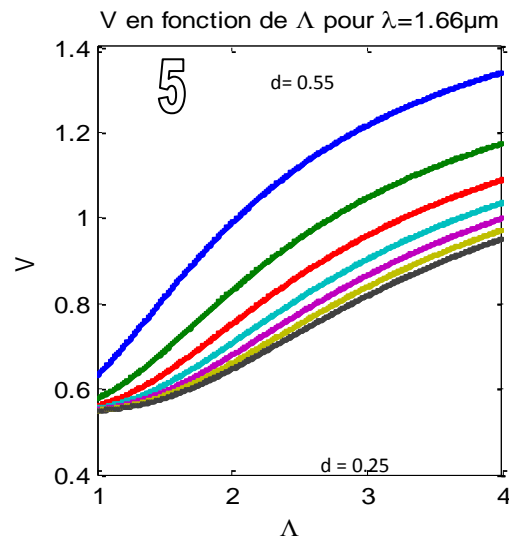
Pour  $\Lambda = 3$  : dans cette figure notre fibre totalement multimode sur la totalité des trois fenêtres de transmission optique.

On conclure que les paramètres géométriques ont un influence sur les caractéristiques de la fibre PCF.

**III.2. 3. V en fonction de  $\Lambda$  :**

La figure (III.3) montre les valeurs calculées par V en fonction de  $\Lambda$  pour d allant de 0,25 à 0,55 avec un pas de 0,05 et on a varié le  $\lambda$  avec les valeurs 0.8 ; 1.25 ; 1.48 ; 1.55 et 1.66:



Figure III.3 : V en fonction de  $\Lambda$ 

La figure (III.3) donne la variation de V en fonction le pitch ( $\Lambda$ ) pour d allant de 0.25 à 0.55 avec un pas de 0.05.

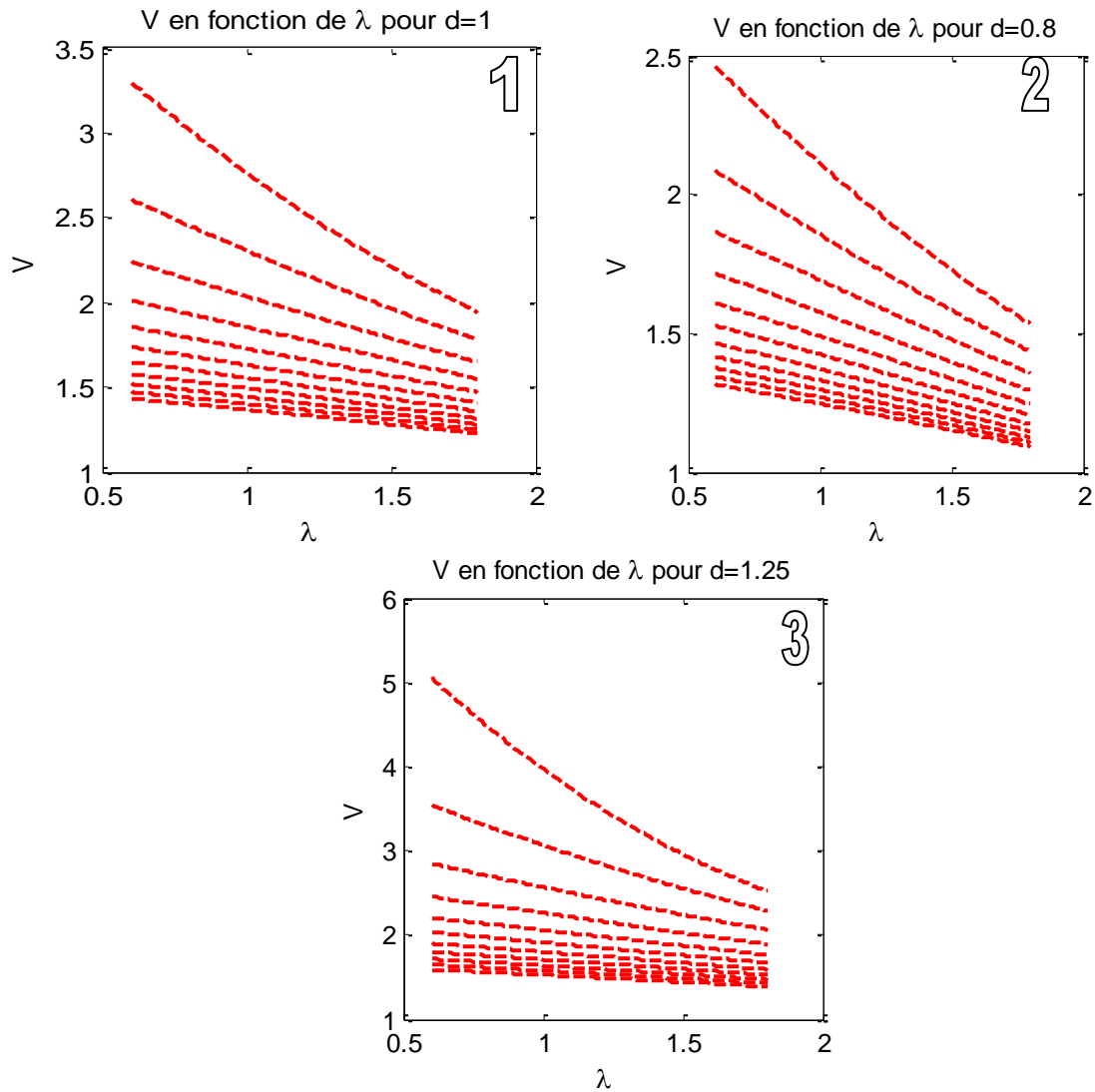
Dans la première figure pour  $\lambda = 0.8\mu\text{m}$ , quand le  $d=0.55$  la fréquence normalisé ( $V$ ) =1.55.

Dans la deuxième figure pour  $\lambda = 1.25\mu\text{m}$  quand le  $d = 0.55$  la fréquence normalisé( $V$ )=1.45.

On a remarqué que chaque fois on change la valeur de la longueur d'onde ( $\lambda$ ) la fréquence normalisé V se varie.

#### III.2. 4. V en fonction de $\lambda$ :

La figure (III.4) montre les valeurs calculées par V en fonction de  $\lambda$  pour les différentes valeurs du pitch ( $\Lambda$ ), chaque fois en fixe le diamètre des trous d'air.

Figure III.4 : V en fonction de  $\lambda$ 

Dans la première figure pour un diamètre fixe à  $0.8\mu\text{m}$ , on a un comportement totalement monomode quelque soit la longueur d'onde.

En augmentant le diamètre à  $1\mu\text{m}$ , on remarque cette fois qu'il y a un comportement multimode pour les grands valeurs de l'espacement entre les trous d'air.

Par exemple avec un pitch  $\Lambda = 5$  on remarque qu'il y a deux comportements de la fibre PCF, un partie multimode pour la 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> fenêtre, et une partie monomode pour la 3<sup>ème</sup> fenêtre.

Si on augmente le diamètre des trous d'air à  $1.25\mu\text{m}$ , on obtient plus de fibre multimode par rapport à les autres figures.



### III.3. Analyse des propriétés de l'indice $N_{fsm}$ :

Comme la gaine des PCF est hétérogène, car elle est composée de deux milieux, la silice et l'air.  $N_{fsm}$  est l'indice équivalent de la gaine.

Une fois la longueur d'onde  $\lambda$  fixée et les paramètres géométriques  $\Lambda$  et  $d$  connus, la combinaison des équations du paramètre  $V$  permet de nous calculer l'indice équivalent de la gaine  $N_{FSM}$  sans l'utilisation des méthodes et des simulations numériques.

#### III.3.1. $N_{fsm}$ en fonction de $\lambda/\Lambda$ :

La figure (III.5) montre l'indice équivalent de la gaine  $n_{FSM}$  en fonction de la longueur relative  $\lambda/\Lambda$  pour  $d/\Lambda$  variant de 0.20 à 0.80 avec un pas de 0.1 avec  $a_{eff}=\Lambda$ .

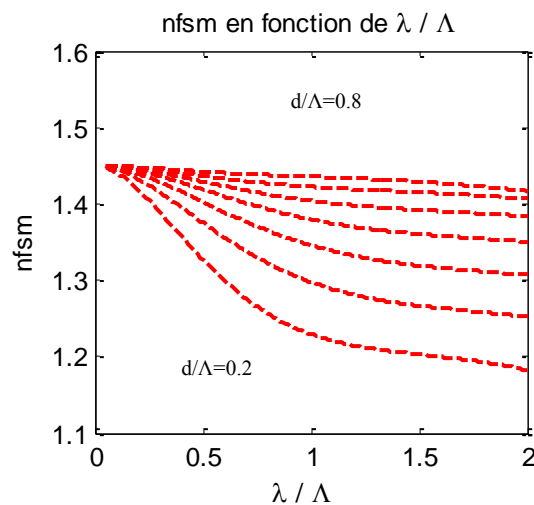


Figure III.5 :  $N_{fsm}$  en fonction de  $\lambda/\Lambda$

Pour un rapport de  $d/\Lambda=0.2$ , l'indice de la gaine équivalente est plus proche à l'indice de l'air, par contre quand le  $d/\Lambda=0.8$  l'indice est plus proche de la silice. En remarque qu'il y a un lien direct entre les paramètres géométrique et l'indice de la gaine optique, c'est-à-dire on peut changer les valeurs de la gaine optique équivalente suivant l'application souhaité.

#### III.3.2. $N_{fsm}$ en fonction de $\lambda$ :

La figure (III.6) montre les valeurs calculées par  $N_{fsm}$  en fonction de  $\lambda$  pour  $d/\Lambda$  allant 0,20 à 0,80 avec un pas de 0,05 et on a varié le  $\Lambda$  de 1 à 4

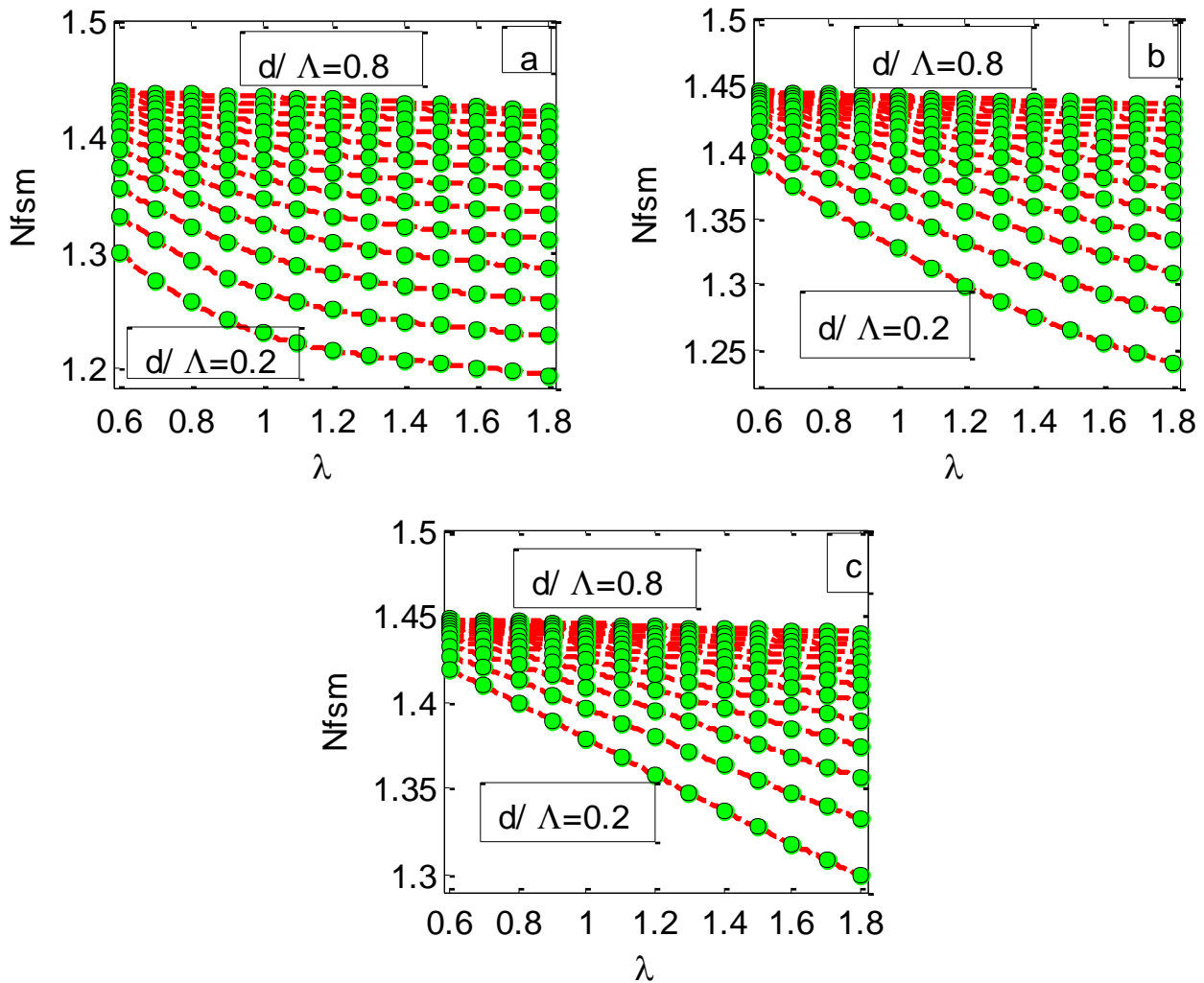


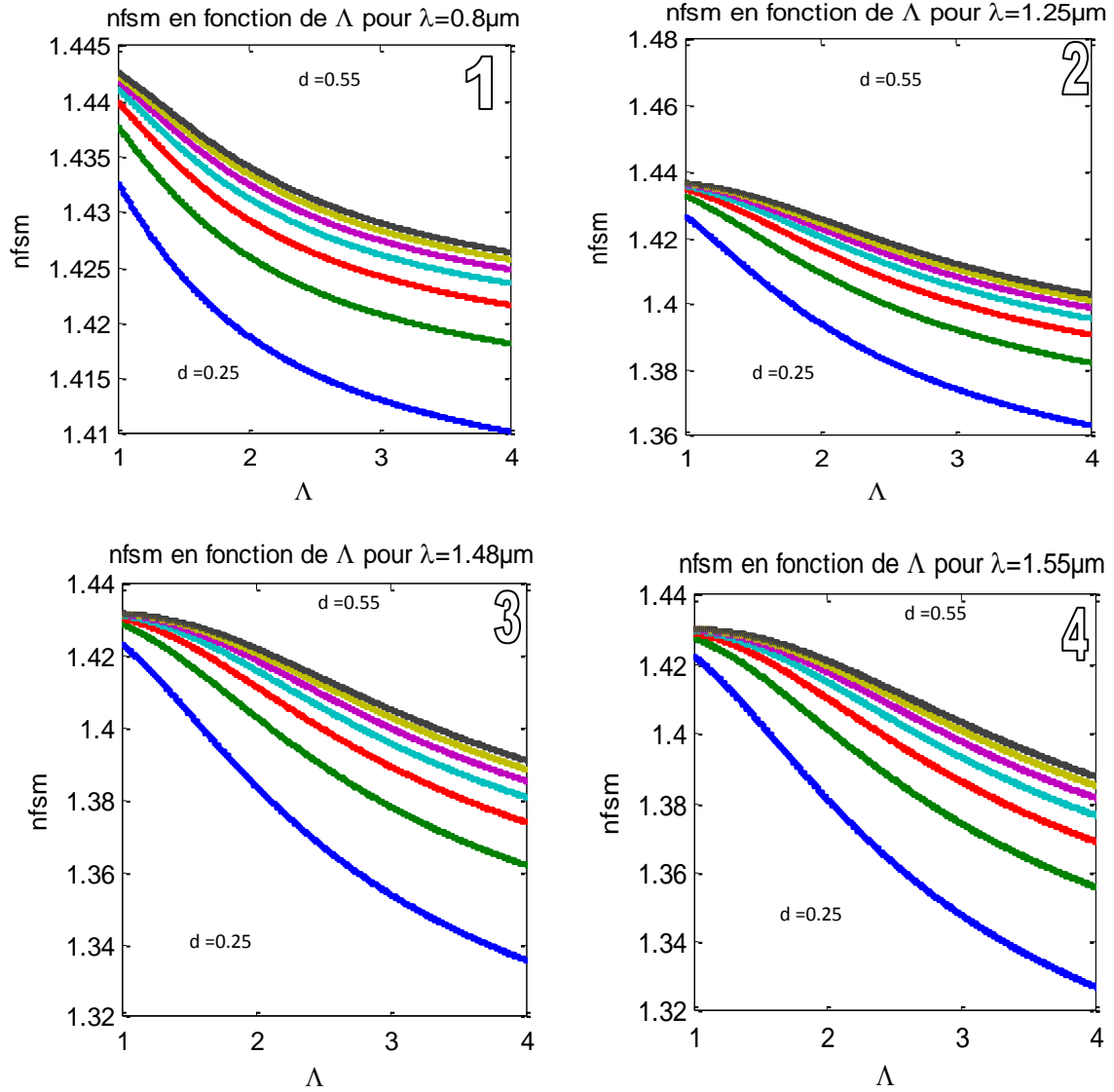
Figure III.6 :  $N_{fsm}$  en fonction de  $\lambda$

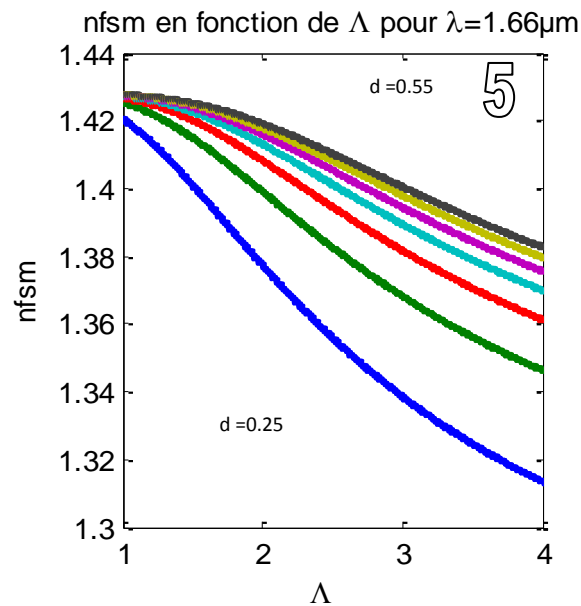
Sur la figure (III.6) ; Nous remarquons en premier lieu la divergence entre les résultats des trois graphes quand le paramètre  $\Lambda$  diminue. La variation de l'indice équivalent de la gaine

$N_{fsm}$  est plus rapide pour les grandes valeurs des  $d/\Lambda$ .

### III.3.3. $N_{fsm}$ en fonction de $\Lambda$ :

La figure (III.7) montre les valeurs calculées par  $N_{\text{fsm}}$  en fonction le  $\Lambda$  pour  $d$  allant de 0,25 à 0,55 avec un pas de 0,05 pour les différentes valeurs de la longueur d'onde  $\lambda$ .



Figure III.7 :  $N_{fsm}$  en fonction de  $\Lambda$ 

La figure( III.7) donne la variation de  $N_{fsm}$  en fonction de  $\Lambda$  pour  $d/\Lambda$  s'étendant de 0.2 à 0.8 pour un pas de 0.05. En variant chaque fois la longueur d'onde  $\lambda$ .

En tout premier lieu, il est à noter que l'indice équivalent de la gaine  $N_{fsm}$  varie très fortement : de 0.8 (Figure III -7- 8) à 1,66 (Figure III -7- 5) pour ces fibres considérées.

En second lieu, on remarque que l'indice équivalent de la gaine augmente d'une manière linéaire lorsque le rapport  $d/\Lambda$  augmente ( $d/\Lambda=0.8 \Rightarrow N_{fsm}=1.45$ )

#### III.4. Analyse des propriétés du paramètre W :

Le paramètre W c'est la constante de propagation transversale normalisée ne dépend que de la longueur d'onde et les paramètres de la structure, ils seraient très utile pour conception simple de PCFs.

Dans la section précédente, nous avons fourni la relation empirique pour le paramètre V de PCFs. Il serait plus pratique d'avoir une relation empirique pour le paramètre W du PCF. ont

rapporté la relation empirique pour le paramètre  $W$ , cependant, nous ne pouvons pas obtenir la valeur de  $n_{eff}$  du paramètre  $W$  seulement. Afin d'obtenir  $n_{eff}$ , nous avons besoin des relations empiriques pour à la fois le  $V$  (III.2) et les paramètres  $W$ .

$$W = \frac{2\pi}{\lambda} a_{eff} \sqrt{n_{eff}^2 - n_{fsm}^2} \quad \text{III.3}$$

$$W = B_1 + \frac{B_2}{1 + B_3 \exp(B_4 \lambda / \Lambda)} \quad \text{III.4}$$

#### III.4.1. $W$ en fonction de $\lambda / \Lambda$ :

La figure (III.8) montre les valeurs calculées par  $W$  en fonction de  $\lambda / \Lambda$  pour  $d / \Lambda$  allant 0,20 à 0,80 avec un pas de 0,1 :

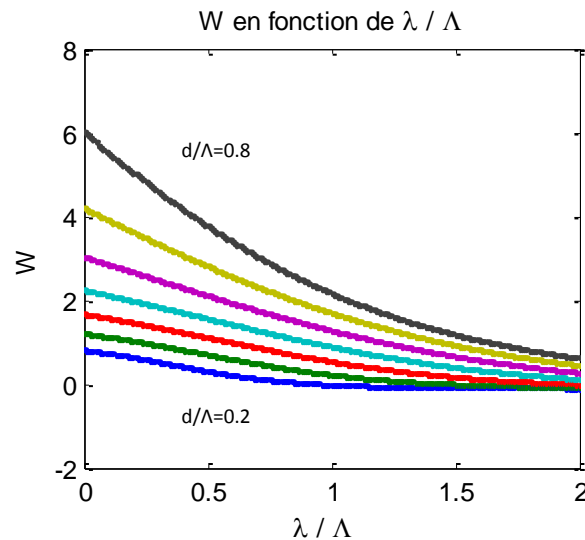


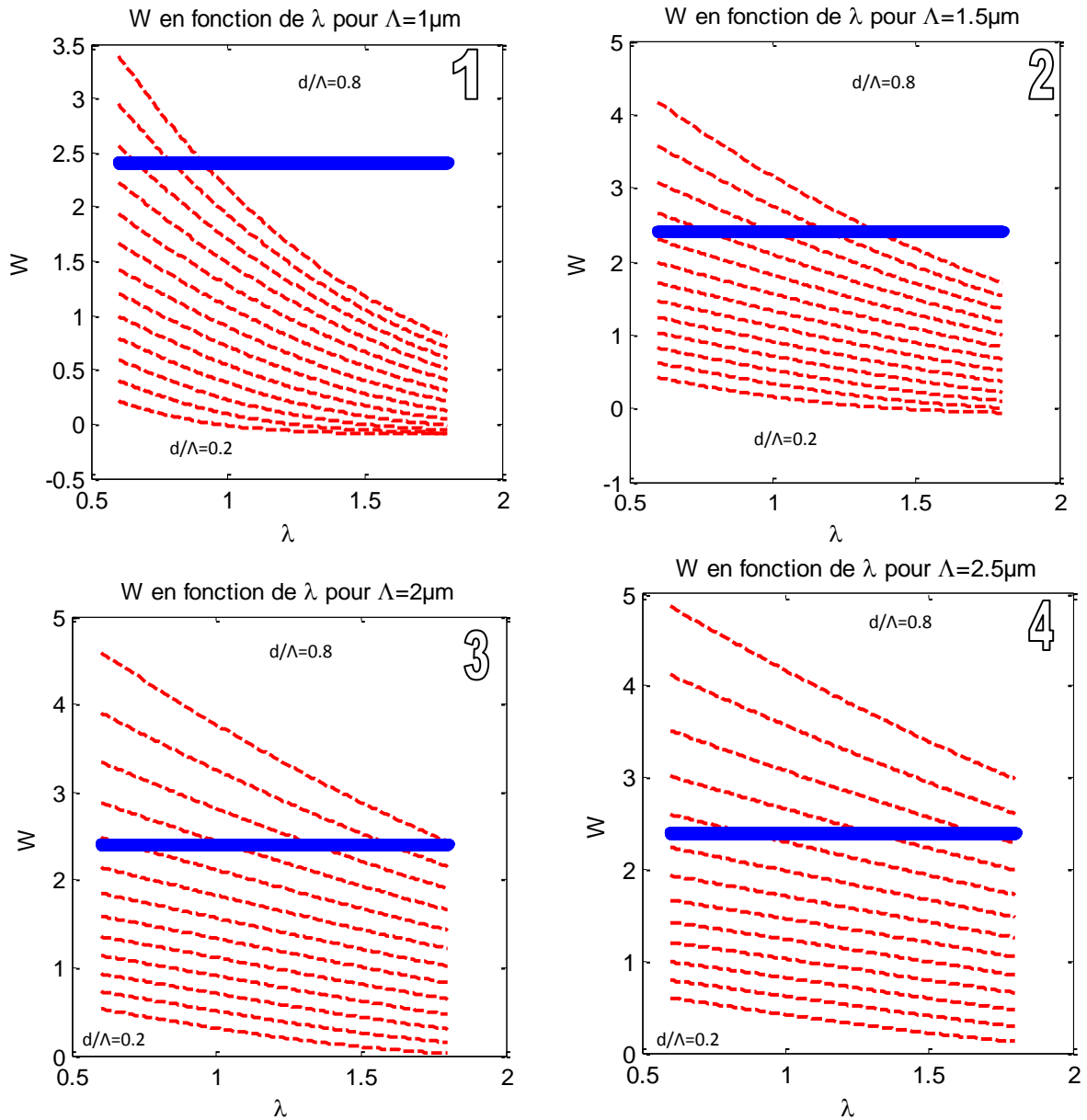
Figure III.8 :  $W$  en fonction de  $\lambda / \Lambda$

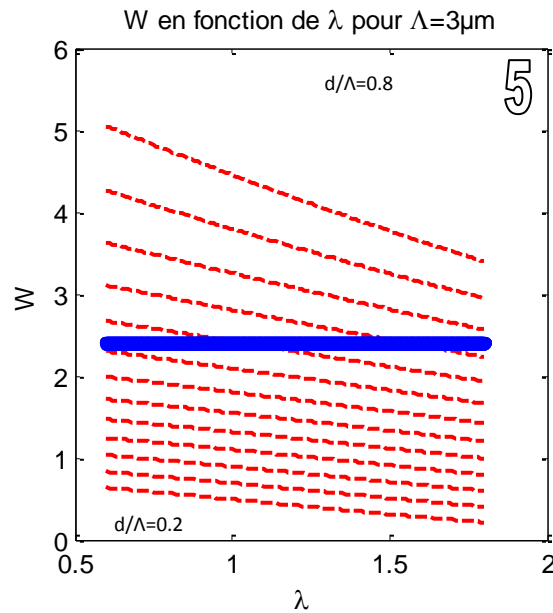
D'après les résultats obtenus dans cette figure, nous remarquons que la variation des valeurs de  $\lambda / \Lambda$  en variant  $d / \Lambda$ , on obtient une très grande variation dans le paramètre  $W$ , par exemple dans la figure III.8 pour  $d / \Lambda = 0,2$  on a des valeurs de ce paramètre  $W \approx 0$ , et pour  $d / \Lambda = 0,8$  le paramètre  $W$  autour de 0,5.

On peut noter que chaque fois on change la valeur des paramètres ( $d$  et  $\lambda$ ) la constante de propagation transversale normalisée  $W$  se varie.

### III.4.2. $W$ en fonction de $\lambda$ :

La figure (III.9) montre les valeurs calculées par  $W$  en fonction de  $\lambda$  pour  $d/\Lambda$  allant de 0,20 à 0,80 avec un pas de 0,05 et on a varié le  $\Lambda$  de 1 à 4



Figure III.9 : W en fonction de  $\lambda$ 

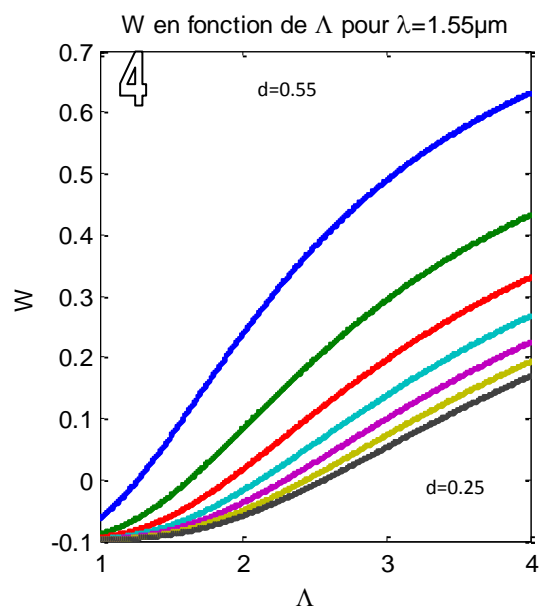
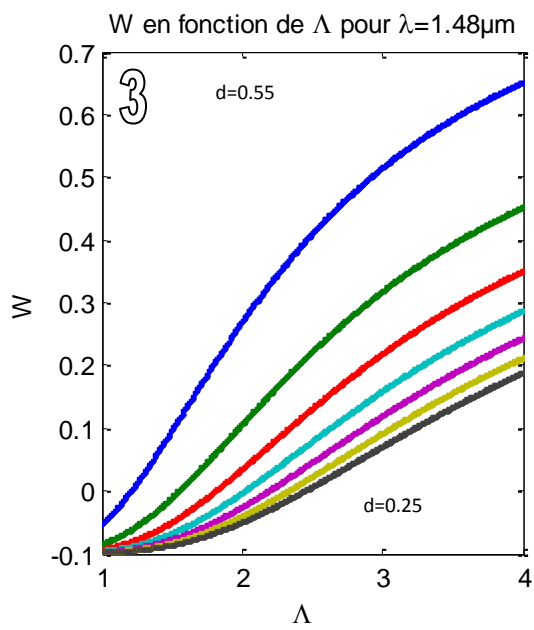
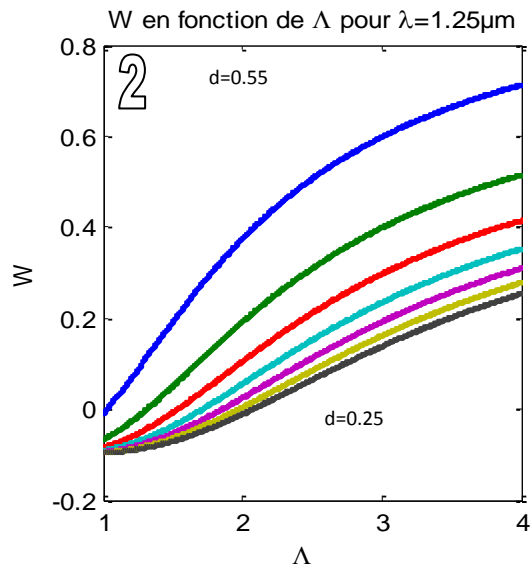
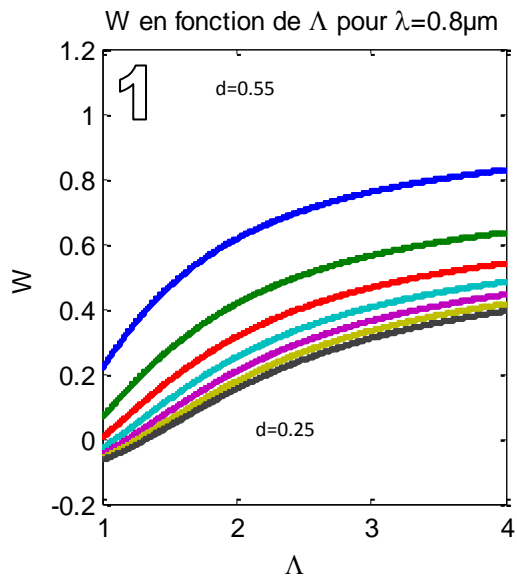
La figure (III.9) donne la variation de W en fonction de  $\lambda$  pour  $d/\Lambda$  s'étendant de 0.2 à 0.8 avec un pas de 0.05. En variant chaque fois le  $\Lambda$ .

Ces variations du paramètre W sont due à la variation de  $d/\Lambda$  et dépend de  $\Lambda$ , par exemple pour  $\Lambda=1$  avec  $\lambda$  fixe à 0.8, et  $d/\Lambda = 0.8$ , on a un paramètre W autour de 2.7, l'augmentation du  $\Lambda$  ( $\Lambda=2$  et  $\Lambda=3$ ) pour la même longueur d'onde, nous donne des variations de ce paramètre autour de 5

### III.4.3. W en fonction de $\Lambda$ :

La figure (III.11) montre les valeurs calculées par W en fonction de  $\Lambda$  pour d allant de 0,25 à 0,55 dans un pas de 0,05 et on a varié le  $\lambda$  avec les valeurs 0.8 ; 1.25 ; 1.48 ; 1.55 ; 1.66.

Chaque fois on change la valeur des paramètres (d et  $\lambda$ ) la constante de propagation transversale normalisée W se varie.





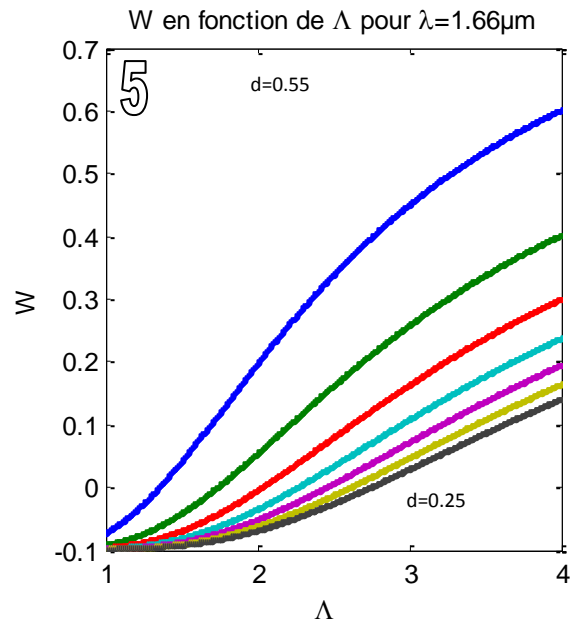
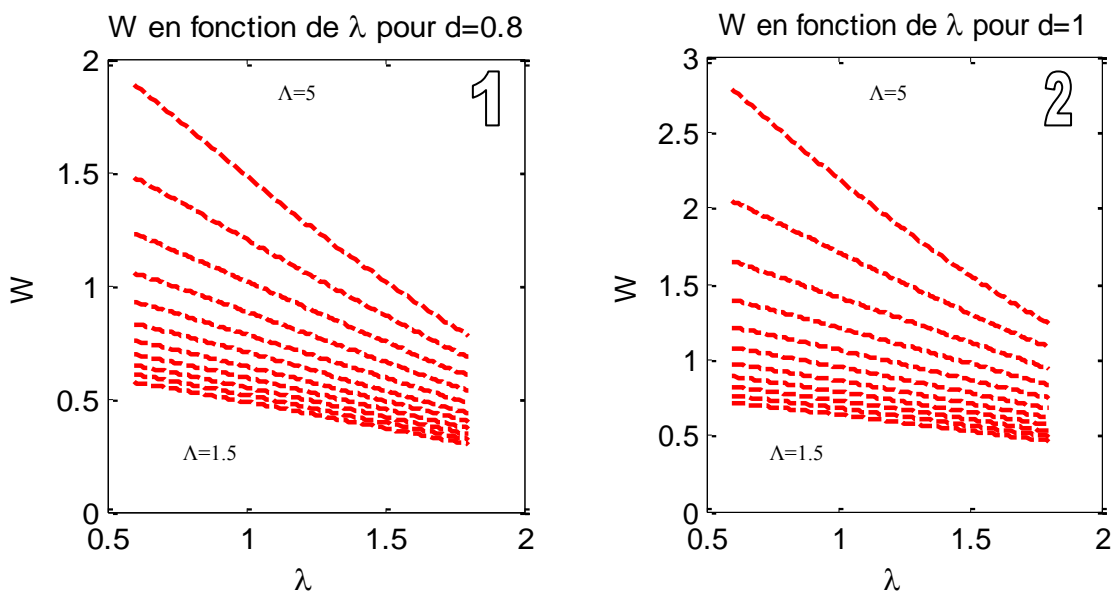
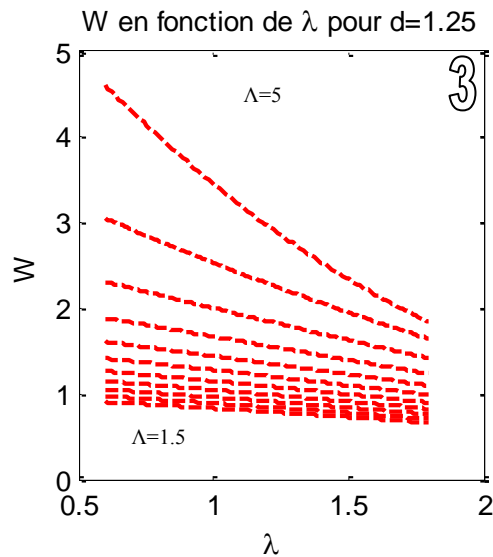


Figure III.10 : W en fonction de  $\Lambda$

**III.4.4. W en fonction de  $\lambda$ :**

La figure (III.11) montre les valeurs calculées par W en fonction de  $\lambda$  pour  $\lambda / \Lambda$  :



Figure III.11 :  $W$  en fonction de  $\lambda$ 

### III.5. Analyse des propriétés de l'indice effective $N_{\text{eff}}$ :

Utilisation du paramètre  $V$  dans l'équation. (III.2) et le paramètre  $W$  dans l'équation. (III.4), nous donne les valeurs de l'indice effectif du mode fondamentale  $N_{\text{eff}}$  sans la nécessité de calculs numériques.

#### III.5. 1. $N_{\text{eff}}$ en fonction de $\lambda/\Lambda$ :

La figure (III.12) donne la variation de l'indice effectif  $N_{\text{eff}}$  en fonction de la longueur relative  $\lambda/\Lambda$  pour  $d/\Lambda$  variant de 0.20 à 0.80 avec un pas de 0.05 et  $\alpha = \Lambda$ .

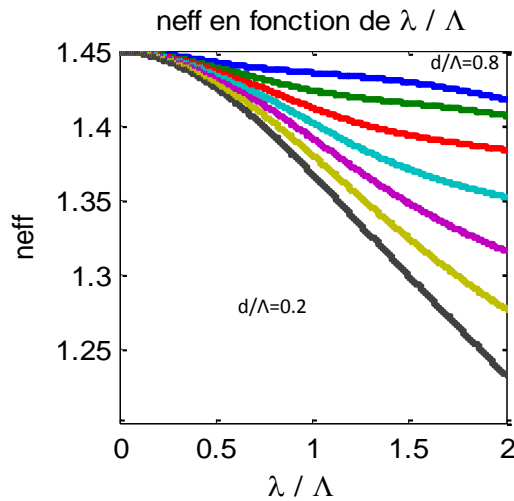


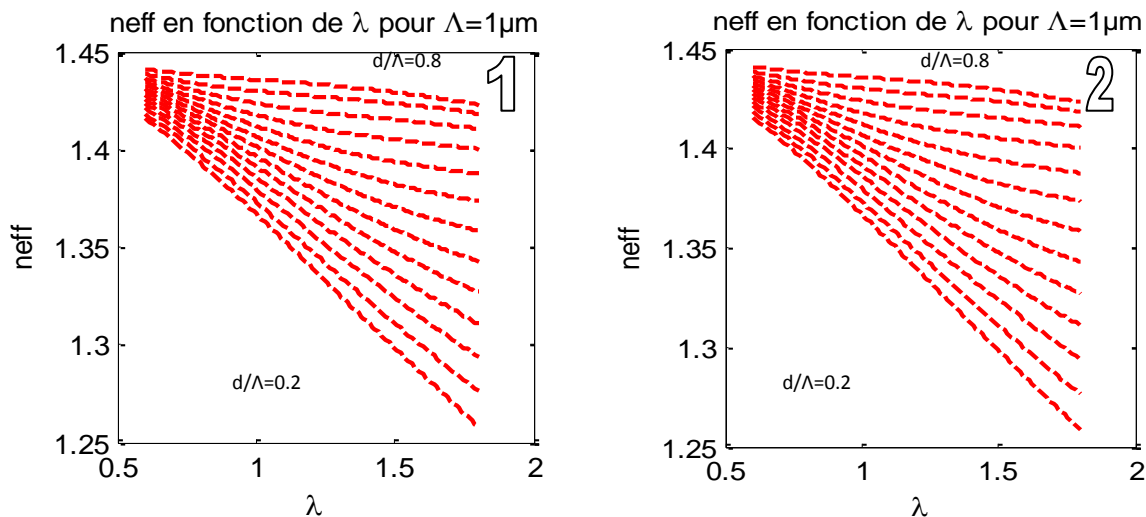
Figure III.12 :  $N_{eff}$  en fonction de  $\lambda/\Lambda$

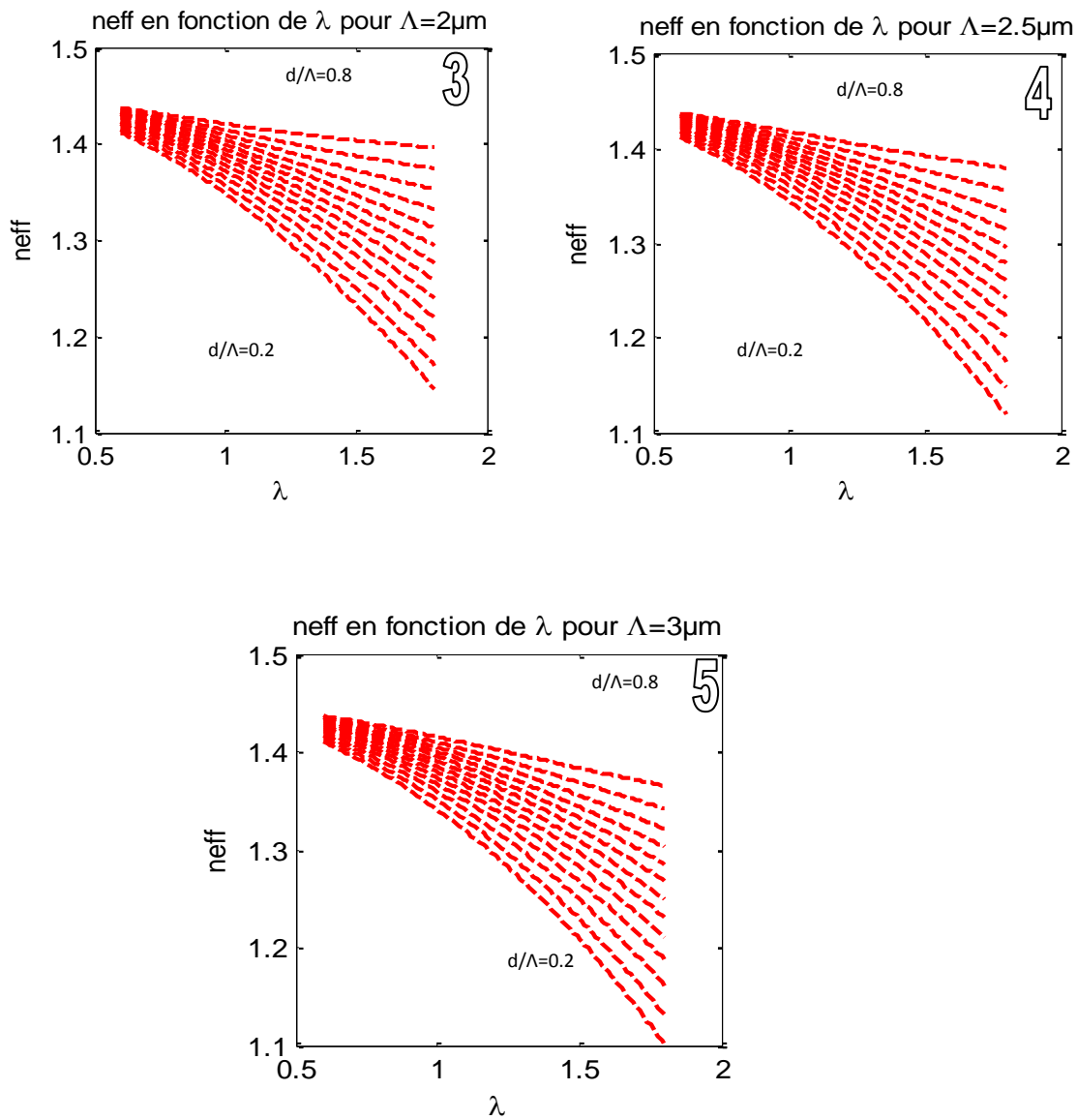
Les variations de l'indice effectif sont conformes à ce que l'on pouvait attendre.

Lorsque la proportion d'air présent dans la fibre diminue (c'est à dire lorsque longueur relative  $\lambda/\Lambda$  augmente et/ou lorsque  $d/\Lambda$  diminue), l'indice effectif du mode fondamental tend vers la valeur de l'indice de réfraction de la silice.

### III.5. 2. $N_{eff}$ en fonction de $\lambda$ :

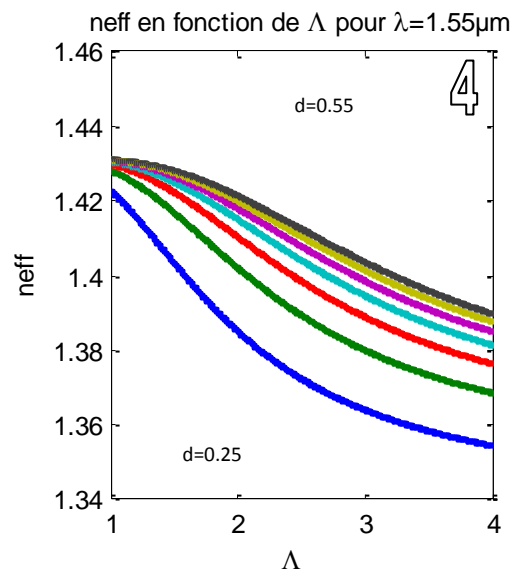
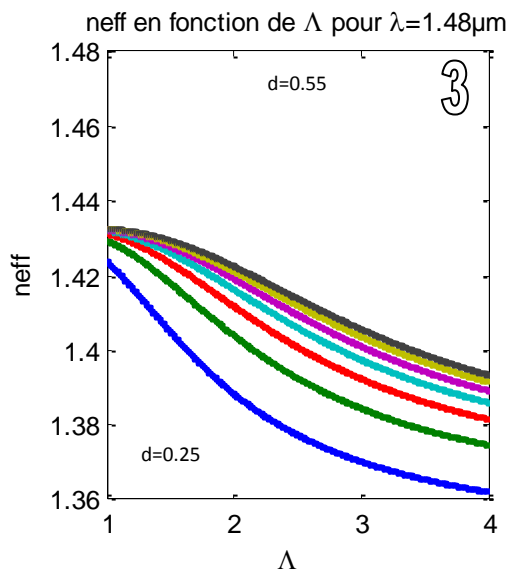
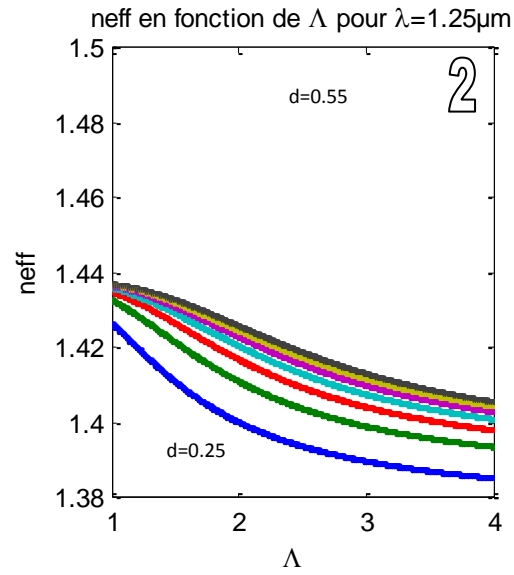
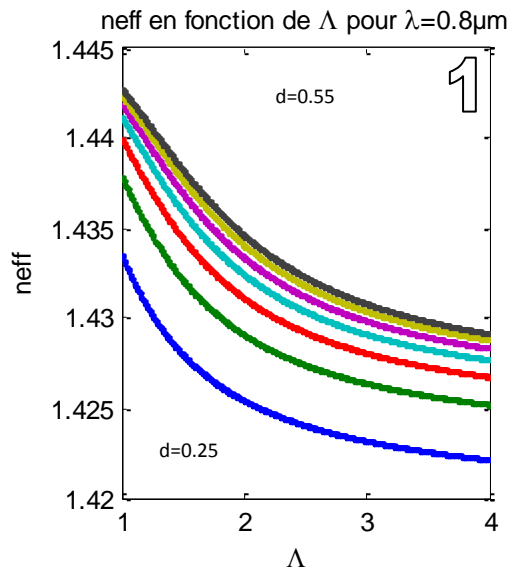
La figure (III.13) montre les valeurs calculées par  $N_{eff}$  en fonction de  $\lambda$  pour  $d / \Lambda$  allant 0,20 à 0,80 dans les étapes de 0,05 et on a varié le  $\Lambda$  de 1 à 4 dans les étapes de 0.5 :



Figure III.13 :  $N_{\text{eff}}$  en fonction de  $\lambda$ 

### III.5. 3. $N_{\text{eff}}$ en fonction de $\Lambda$ :

La figure (III.14) montre les valeurs calculées par  $N_{\text{eff}}$  en fonction de  $\Lambda$  pour  $d$  allant 0,25 à 0,55 dans les étapes de 0,05 et on a varié le  $\lambda$  avec les valeurs 0.8 ; 1.25 ; 1.48 ; 1.55 ; 1.66 :



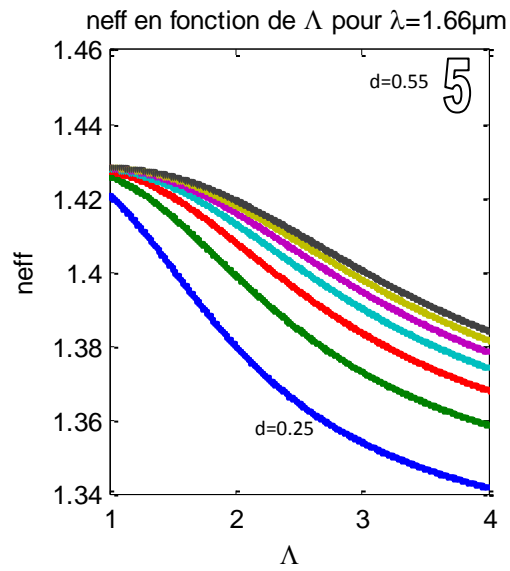
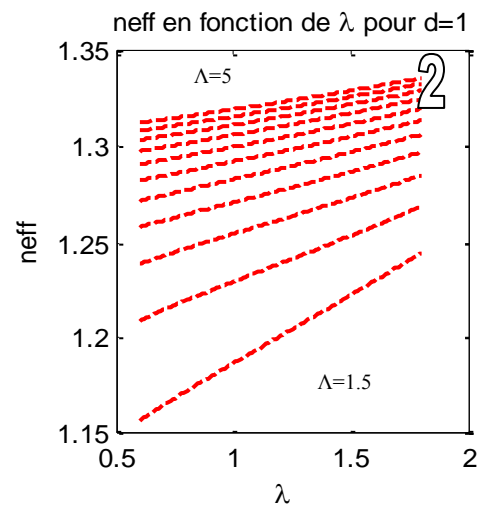
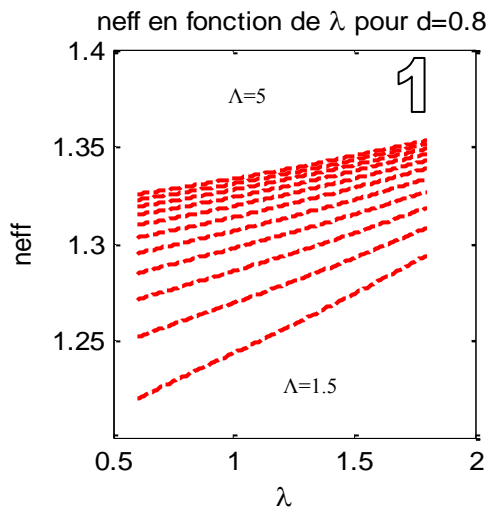
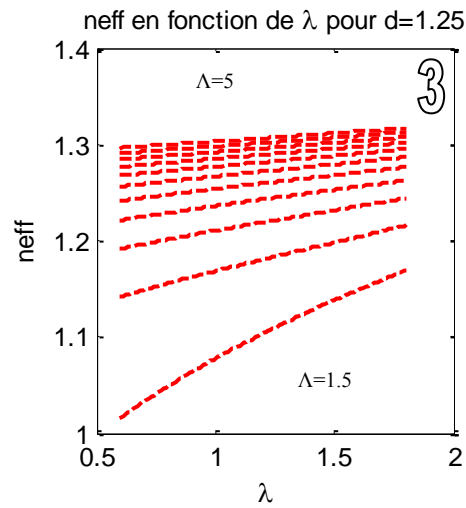


Figure III.14 :  $N_{\text{eff}}$  en fonction de  $\Lambda$

**III.5. 4.  $N_{\text{eff}}$  en fonction  $\Lambda$  :**

La figure( III.15) montre les valeurs calculées par  $N_{\text{eff}}$  en fonction de  $\lambda$  pour  $\lambda / \Lambda$  :



Figure III.15:  $N_{eff}$  en fonction de  $\lambda$ 

### Conclusion :

Les fibres à cristaux photoniques combinent des propriétés des cristaux photoniques et des fibres classiques. Le domaine de la recherche sur les fibres à cristaux photoniques est encore très jeune. Nous pouvons attendre à de nombreux nouveaux développements, et à plusieurs méthodes efficaces pour la conception et l'optimisation.

## **Conclusion générale :**

Ce travail de recherche porte sur l'étude, la modélisation et la caractérisation des effets de paramètres géométriques dans les fibres optiques de nouvelle génération communément dénommées "Fibres à Cristaux Photoniques (PCF)". Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés dans nos travaux à l'analyse des propriétés du mode fondamental dans les fibres microstructurées air-silice à profils réels en utilisant la méthode analytique. Nous avons étudié les propriétés de la fréquence effective normalisée  $V$ , la constante de propagation transversale normalisée  $W$ , l'indice de la gaine  $N_{\text{fsm}}$ , l'indice effectif  $N_{\text{eff}}$  en fonction de paramètres géométriques ( $\lambda$ ,  $\Lambda$  et  $d$ ).

Comme un début, nous avons fait des petites recherches sur les fibres optiques conventionnelles et nous avons présenté les types de ces fibres, leur principe de guidage et les différentes propriétés (les pertes, l'atténuation et la dispersion, ...).

Ensuite, le chapitre II a pour objectif de prédire et de caractériser les propriétés de propagation des fibres microstructurées. Nous avons étudié les différents types de ces fibres (unidimensionnels, bidimensionnels, tridimensionnels), leur principe de guidage et les différentes propriétés (l'indice effectif, la dispersion chromatique, les pertes de confinement, infiniment monomode, la fréquence normalisée et l'expression du paramètre  $W$ ).

En fin, nous avons réalisé un travail basé sur la modélisation et la simulation analytique des différents paramètres de propagations dans les fibres optiques microstructurées.

Nous avons analysé les influences de paramètres géométriques ( $\lambda$ ,  $\Lambda$ ,  $d$ ) sur les paramètres  $V$ ,  $W$ ,  $N_{\text{fsm}}$ ,  $N_{\text{eff}}$ .



