

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR D'EL-OUED



Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Science et Technologie

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de télécommunications

Réalisé par :

Lajdel Ali Safa, Berdjouh Salsabil et Bekakra Wafa

Thème

**Etude des modes de propagation dans
les fibres de Bragg 1D et 2D**

Soutenu le 13 juin 2022

Devant le jury composé de :

M. Ali Chems

MCA

Président

M. Abdelkader Hima

MCB

Examineur

M. Abdelkader Medjouri

MCA

Rapporteur

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous remercions Dieu qui nous a permis de mener à bien cet humble travail. Nous adressons notre respect et nos remerciements à ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à élaborer cette étude

et en particulier pour :

- Dr. MEDJOURI Abdelkader, qui n'as pas hésité à nous faire confiance et d'avoir partagé son énorme expérience, nous tenons également à le remercier pour ses conseils et son soutien.
- Nous voudrions également exprimer nos vifs remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de participer au jury.

Nous remercions tous nos professeurs, nos collègues et toutes nos familles.

Résumé

En raison de la différence entre l'indice de réfraction du cœur et de la gaine, la lumière se propage à l'intérieur des fibres sur des distances énormes. Le mécanisme de guidage est bien celui de réflexion totale interne, qui assure un bon confinement de la puissance optiques dans le cœur. Une solution innovante basée sur le guidage par bande interdite photonique a permis le guidage en l'absence de toute interaction avec le matériau transparent. L'objectif principal de projet de fin d'étude est l'analyse et la simulation numérique de la propagation de différents modes dans les fibres de Bragg 1D et 2D. Nous utilisons l'environnement de simulation « Ansys Lumerical » pour déterminer les modes de propagations ainsi que leurs différentes caractéristiques telles que les pertes et la dispersion chromatique.

Mots-clé : fibres optiques. fibres de Bragg 1D et 2D. Les différents types de réseaux de Bragg. méthodes de sa fabrication.

الملخص

بسبب الاختلاف بين قرينة الانكسار للقلب والكسوة، ينتقل الضوء داخل الألياف لمسافات شاسعة. آلية التوجيه هي آلية الانعكاس الداخلي الكلي، والتي تضمن حصرًا جيدًا للطاقة الضوئية في القلب. سمح الحل المبتكر القائم على توجيه فجوة الحزمة الضوئية بالتوجيه في حالة عدم وجود أي تفاعل مع المادة الشفافة. الهدف الرئيسي لمشروع نهاية الدراسة هو التحليل والمحاكاة العددية لانتشار الأنماط المختلفة في ألياف براغ 1D و 2D. نستخدم بيئة المحاكاة "Ansys Lumerical" لتحديد أنماط الانتشار بالإضافة إلى خصائصها المختلفة مثل الضياع و التبدد اللوني .

الكلمات المفتاحية : الألياف البصرية. ألياف براغ أحادية وثنائية الأبعاد. أنواع مختلفة من حواجز شبكية براغ. طرق صنعها.

Sommaire

| | |
|--|----------|
| Remerciements | |
| Résumé | |
| Liste des figures | i |
| Liste des tableaux | iii |
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I : Généralités sur la fibre optique | |
| Introduction | 4 |
| 1. Schéma d'une liaison par fibre optique | 4 |
| 2. Structure de fibre optique | 5 |
| 3. Principe de guidage | 6 |
| 3.1 Approche Géométrique | 6 |
| 3.2 Approche ondulatoire | 7 |
| 3.2.1 Equations de Maxwell | 7 |
| 4. Les différents types de fibres optiques | 9 |
| 4.1 les fibre standard (Les fibres à cœur de silice) | 9 |
| 4.2 Une fibre micro structurée de silice (FMS) | 9 |
| 5. Les effets de propagation dans la fibre optique | 10 |
| 5.1 Effets linéaires | 10 |
| 5.1.1 L'atténuation ou les pertes | 10 |

| | |
|---------------------------------------|----|
| 5.1.2 la dispersion chromatique | 11 |
| 5.2 Effets non-linéaires | 12 |
| 5.2.1 Effet Kerr | 12 |
| 5.2.2 Effet Raman et Brillouin | 13 |
| 6. Technique de fabrication | 14 |
| Conclusion | 15 |

Chapitre II : Généralités sur réseaux de Bragg

| | |
|--|----|
| Introduction | 17 |
| 1.Fundamentals | 17 |
| 2. Les différents types de réseaux de Bragg | 18 |
| 2.1 1D : (réseaux de Bragg type 1) | 18 |
| 2.1.1 Fibre de Bragg coaxiale | 20 |
| 2.1.2 Fibre de Bragg à cœur d'air | 20 |
| 2.2 2D : (réseaux de Bragg type 2) | 20 |
| 2.2.1 Fibre à cœur creux | 21 |
| 2.2.2 Fibre à cœur solides | 21 |
| 2.3 Fibres à réseaux de Bragg fusionnées dans cœur | 22 |
| 3.Description du logiciel simulation (lumerical) | 23 |
| Conclusion | 24 |

Chapitre III: Résultats de simulation et discussion

| | |
|---------------------------------------|----|
| Introduction | 26 |
| 1. Simulation de type 1D | 26 |
| 1.1 Description de la structure | 26 |
| 1.2 Modes de propagation | 27 |
| 1.3 Résultat de simulation | 29 |
| 2. Simulation de type 2D..... | 32 |
| 2.1 Description de la structure | 32 |
| 2.2 Modes de propagation | 33 |

| | |
|----------------------------------|-----------|
| 2.3 Résultat de Simulation | 34 |
| Conclusion | 36 |
| Conclusion générale..... | 37 |
| Bibliographie | 39 |

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1.1 : Schéma de principe d'un système de transmission optique

Figure 1.2 : Structure de fibre optique

Figure 1.4 : Le guidage de la lumière dans une fibre optique

Figure 1.5 : Système de coordonnées cylindriques

Figure 1.6 : Schéma de principe des sections transversales de (a) PCF à cœur solide et (b) PCF à cœur creux.

Figure 1.7 : Dispersion chromatique

Figure 1.8 : Processus de la diffusion Raman.

Chapitre II

Figure 2.1 : schéma de principe de la fibre de Bragg

Figure 2.2 : fibre à bande interdite photonique dotée d'un réflecteur à cristal photonique 2D

Figure 2.3 : Schéma montrant le principe de fonctionnement de FBG

Figure 2.4 : L'environnement Lumerical

Chapitre III

Figure 3.1 : Structure de la fibre de Bragg 1D

Figure 3.2 : Modèles d'une structure unidimensionnelle (1D) de fibres de Bragg .

Figure 3.3 : Courbe d'indice effectif en fonction de la longueur d'onde dans le type 1 en fibre Bragg pour mode 3

Figure 3.4 : Courbe de la perte en fonction de la longueur d'onde dans type 1 en fibre Bragg pour mode 3

Figure 3.5 : Courbe de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde dans le type 1 en fibre Bragg pour mode 3

Figure 3.6 :Le modèle de la structure à cœur d'air avec 3 anneaux de trous de forme annulaire dans le gaine .

Figure 3.7 : Modèles (10 et 11) d'une structure bidimensionnelle (2D) de fibres de Bragg .

Figure 3.8 : Courbe d'indice effectif en fonction de la longueur d'onde dans le type 2 en fibre Bragg pour : a) mode 10 ; b) mode 11

Figure 3.9 : Courbe de perte en fonction de la longueur d'onde dans le type 2 en fibre Bragg

Figure 3.10 : Courbe de dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde dans le type 2 en fibre Bragg pour :a) mode 10 ; b)mode 11

Liste des tableaux

Chapitre III

Tableau 3.1 : Les rayons des anneaux utilisés pour la modélisation.

Tableau 3.2 : Résultat des calculs sur les modes se propageant dans une fibre de Bragg calculé à $\lambda=4,116 \mu\text{m}$

Tableau 3.3 : Résultat des calculs sur les modes se propageant dans une fibre de Bragg calculé à $\lambda=1,06 \mu\text{m}$

Introduction générale

La demande croissante de vitesses de transmission de données plus élevées et d'une meilleure efficacité dans les communications a conduit à l'émergence des fibres optiques. C'est devenu le moyen le meilleur et le plus largement utilisé pour les applications à haut débit. Cependant, les fibres standard contiennent des défauts indésirables tels que la dispersion chromatique et la perte. Afin de pallier ces lacunes, plusieurs solutions ont été proposées, dont les fibres de Bragg.

Les fibres de Bragg sont souvent créées à partir de trous périodiquement placés dans de la silice. Cette périodicité de propagation des ondes conduit à des phénomènes similaires à la propagation des électrons dans un cristal périodique, en particulier l'émergence du phénomène de « photon band gap » (PBG) qui empêche la propagation à certaines longueurs d'onde ou dans certaines directions. Pour en savoir plus sur ces fibres, ce projet de fin de cycle porte sur l'étude et l'analyse via des simulations numériques les modes de propagation dans les fibres de Bragg. Ce mémoire est organisé comme suit : dans le premier chapitre, nous donnons un aperçu sur les fibres optiques, des composants des systèmes de communication optique, des composants et des types de fibres optiques, de l'approche ondulatoire ; des effets linéaires et non linéaires et de la fabrication. Le deuxième chapitre

porte sur la présentation des fibres de Bragg et leurs différents types, en particulier 1D et 2D, en plus d'une explication simple de l'outil de simulation Ansys . Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats de simulation pour les fibres de Bragg 1D et 2D, où nous avons traité d'une description de la structure de la fibre puis des modes de propagation, en arrivant aux résultats : évolution de l'indicateur effectif, perte, et la dispersion chromatique en termes de longueur d'onde. A la fin, nous terminons par une conclusion dans laquelle nous adressons les différents résultats ainsi que d'éventuelles perspectives

.

Chapitre I

Généralités sur les fibres optiques

Introduction :

Ce chapitre vise à présenter les systèmes à base de fibres optiques en général. Nous présenterons dans un premier temps ses éléments constitutifs puis la structure et les différents paramètres de propagation de ces fibres ainsi que les mécanismes de son fonctionnement. Ensuite, nous nous concentrerons sur les propriétés optiques qui caractérisent le mode fondamental, les pertes, la dispersion chromatique et la non-linéarité. Enfin, la méthode de fabrication des fibres optiques.

1. Schéma d'une liaison par fibre optique

Le système de communication par fibre optique est similaire à tout type de système de communication. Un émetteur, canal de transmission et un récepteur.

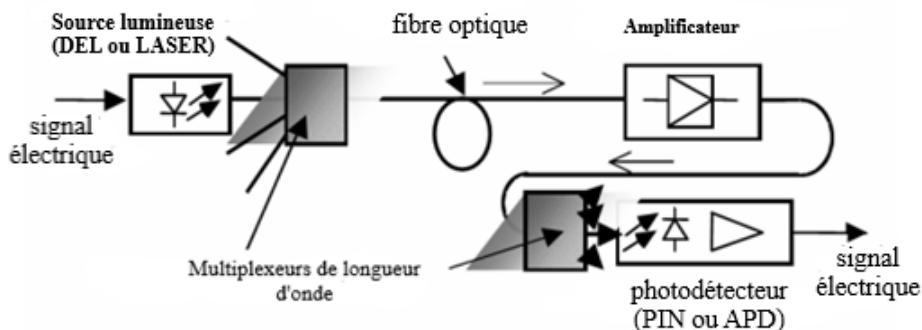


Figure 1.1 : Schéma de principe d'un système de transmission optique [1]

2. Structure de fibre optique

La fibre optique se compose de trois sections principales, comme le montre la figure 1.2 :

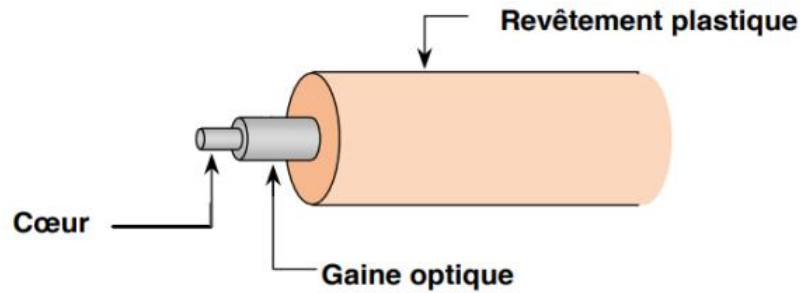


Figure 1.2 : Structure de fibre optique

- **Cœur** : est un milieu dans lequel une quantité d'énergie lumineuse véhiculée au sein de la fibre se propage et est confinée au voisinage du centre dont l'indice de réfraction $n_{\text{cœur}}$.[1]
- **La gaine** : est la partie enveloppant le cœur dont l'indice de réfraction est n_{gaine} ;où $n_{\text{cœur}} > n_{\text{gaine}}$.
- **Le revêtement** : sert à protéger la fibre optique.

3. Principe de guidage :

3.1 Approche géométrique :

Comme défini ci-dessus, les fibres sont constituées d'une partie centrale, le cœur d'indice de réfraction $n_{\text{cœur}}$ ou n_1 , suivi d'une gaine d'indice de réfraction n_{gaine} ou n_2 ; avec $n_1 > n_2$. La lumière à l'intérieur de la fibre subit des réflexions successives, en conséquence on applique la loi de Snell Descartes:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

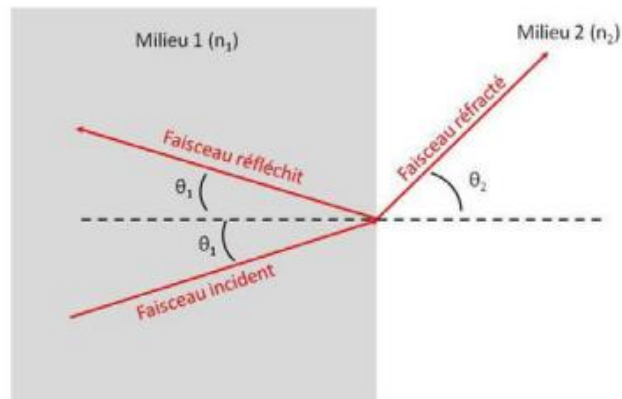


Figure1.3 : Réflexion et réfraction d'un faisceau lumineux à l'interface entre deux milieux d'indices de réfraction [2]

Nous exprimons l'angle total (θ) sous lequel la lumière est réfléchié dans la fibre comme suit :

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad (2)$$

Si $\theta_i > \theta$ → réflexion

Si $\theta_i \leq \theta$ → réfraction

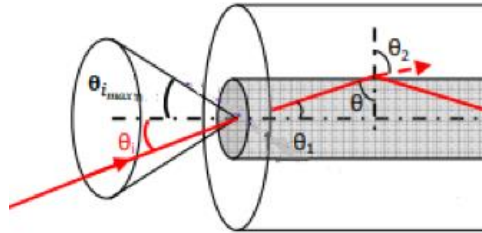


Figure 1.4 : Le guidage de la lumière dans une fibre optique [3]

L'ouverture numérique exprime l'angle d'entrée maximal de la lumière dans la fibre, et nous l'exprimons par :

$$ON = \sin \theta_{i_{max}} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (3)$$

3.2 Approche ondulatoire

3.2.1 Equations de Maxwell

Considérons la lumière comme une onde électromagnétique se propageant dans un milieu sans charges et électriquement neutre ($\rho = 0$ et $J = 0$) nous l'exprimons par les équations de Maxwell comme suit :

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \partial \vec{D} / \partial t \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad (7)$$

Avec : \vec{E} : Champ électrique (V/m) ; \vec{B} : l'induction magnétique (Tesla) ; \vec{D} : l'induction électrique (C/m²) ; \vec{H} : Champ magnétique (A/m) ; \vec{J} : Densité du courant (A/ m²) ; ρ : Densité de charge électrique (C/m³) .

Avec l'induction électrique $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ et l'induction magnétique $\vec{B} = \mu \vec{H}$. ϵ est la permittivité électrique et μ est la perméabilité magnétique.

L'équation d'onde peut être obtenue pour le champ électrique et le champ magnétique :

$$\nabla^2 \Psi = \epsilon \mu \partial^2 \Psi / \partial t^2 \quad (8)$$

Compte tenu de la forme circulaire des fibres, il est évident de choisir des coordonnées cylindriques $(\rho; \theta; z)$. En résolvant l'équation (8) , on s'appuie sur l'effet Laplace, et on obtient :

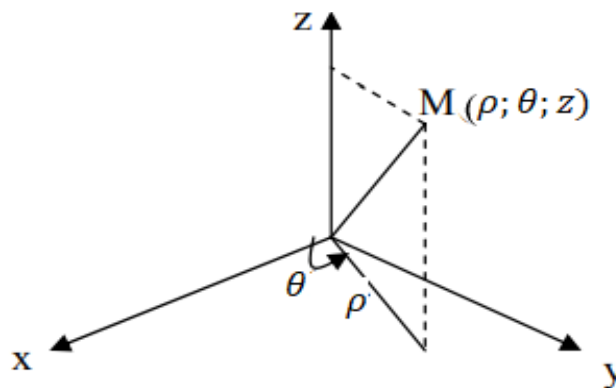


Figure1.5 : Système de coordonnées cylindriques [3]

$$\nabla^2\Psi = \frac{\partial^2\Psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial\Psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2\Psi}{\partial\theta^2} + \frac{\partial\Psi}{\partial z} \quad (9)$$

4. Les différents types de fibres optiques :

4.1 Les fibre standard (Les fibres à cœur de silice):

La structure générale de ce type de fibre est représentée sur la figure II. La lumière s'y propage par la réfraction totale des ondes incidentes à un angle et à une longueur d'onde spécifiques, et on distingue deux types principaux : les fibres monomodes et multimodes.

Les fibres monomodes se caractérisent par un diamètre du cœur du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de travail (typiquement une dizaine de micromètres) tandis que les fibres multimodes possèdent un diamètre de cœur nettement plus important (typiquement plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de micromètres).[4]

4.2 Fibres microstructurées de silice (FMS) :

Les fibres à cristaux photoniques (PCF) aussi appelées fibres microstructurées, sont inspirées par les cristaux photoniques et basées sur l'arrangement périodique d'une structure particulière au sein même de la fibre [5]; et est une fibre percée d' une multitude de vides d'air. [6].

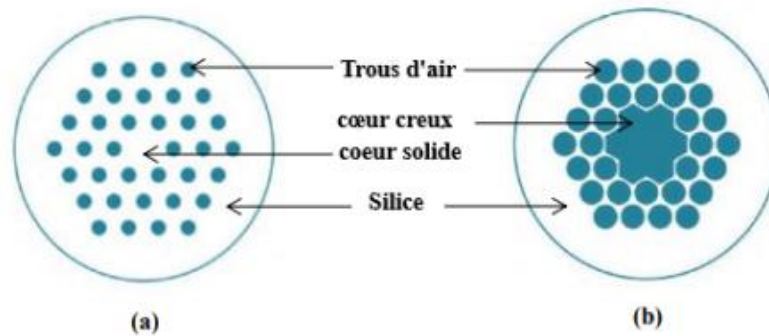


Figure 1.6 : Schéma de principe des sections transversales de (a) PCF à cœur solide et (b) PCF à cœur creux.[7]

5. Les effets de propagation dans les fibres optiques

La lumière lors de sa transmission dans la fibre est soumise à des phénomènes différents et complexes que l'on peut diviser en deux types : les phénomènes linéaires et les phénomènes non linéaires, qui provoquent une distorsion du signal en plus de réduire le débit dans le système de communication optique.

5.1 Effets linéaires

5.1.1 L'atténuation ou les pertes

Le terme perte optique est défini comme la mesure de la différence entre la puissance d'entrée (P_i) et la puissance de sortie (P_o), généralement mesurée en dB/km, dépend de la distance mais aussi de l'absorption, de la diffusion, de la courbure, du confinement et de la perte de corrélation, là ne

devrait pas y avoir d'atténuation du signal optique pour un système de communication optique idéal. Nous définissons l'atténuation comme :

$$\alpha_{dBm} = \frac{10 \log_2 \left(\frac{P_i}{P_o} \right)}{L} \quad \text{ou} \quad \alpha_{dB} = 10 \log_2 \left(\frac{P_i}{P_o} \right) \quad (10)$$

Pour pallier les effets d'atténuation dans les fibres, il est nécessaire d'introduire des répéteurs à intervalles pour amplifier les signaux. Comprend un détecteur de lumière pour convertir un signal lumineux en un signal électrique. Le signal électrique est ensuite amplifié et utilisé pour alimenter une autre source de lumière [8].

5.1.2 La dispersion chromatique

La dispersion chromatique est la cause de l'élargissement temporel des impulsions transmises; elle est causée par la propagation de la lumière à différentes longueurs d'onde et vitesses, comme le montre la figure 1.7.

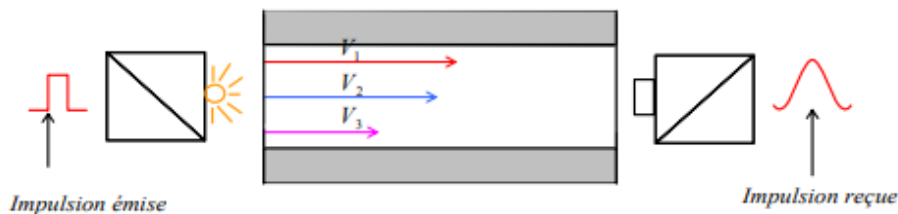


Figure 1.7 : Dispersion chromatique [9]

La dispersion chromatique résulte de deux facteurs :

$$D_{CH} = D_{\text{guide}} + D_{\text{mat}} \quad (11)$$

avec : D_{guide} (dispersion du guide) qui résulte du fait que les ondes se propagent dans un guide d'onde et non dans un milieu infini lui donne une indication efficace de la dépendance en longueur d'onde. [9]

$$D_{\text{guide}} = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{dn_{\text{eff}}}{d\lambda^2} \quad (12)$$

et D_{mat} (dispersion du matériau) : Résulte de la différence entre la longueur d'onde et l'indice du matériau qui compose la fibre (silice), et s'exprime par :

$$D_{\text{mat}} = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{dn_{\text{silice}}}{d\lambda^2} \quad (13)$$

Pour compenser la dispersion chromatique, un réseau de Bragg est utilisé. Le réseau de Bragg à comme un filtre de longueur d'onde, agissant sur toute la gamme spectrale, ralentissant les longueurs d'onde plus rapides. En optimisant continuellement la variance du degré du réseau, le signal de ce septum retrouve sa forme d'origine.[10]

5.2 Effets non-linéaires

5.2.1 Effet Kerr

Ce phénomène indique la dépendance de l'intensité de l'indice de réfraction en fonction de l'intensité de l'onde traversant le matériau [11]; et

comprend l'auto modulation de phase (SPM); modulation de phase croisée (XPM) et mélange à quatre bandes (FWM). L'ajustement de l'indice de réfraction provoqué par l'effet Kerr optique devient :

$$n = n_0 + n_2 \cdot I \quad (14)$$

Où I : l'intensité du champ ; n_2 : l'indice non linéaire du milieu ; n_0 : l'indice linéaire .

5.2.2 Effet Raman et Brillouin :

Les diffusions Raman et Brillouin sont de tels effets inélastiques qui se produisent le plus fréquemment dans les systèmes de communication à fibre optique [12] . Ils sont tous deux liés à l'interaction d'un photon avec un phonon optique (Raman) ou acoustique (Brillouin)[6] . La diffusion Raman est causée par le passage d'électrons de la fréquence ω_p à ω_s (fréquence de photon) .

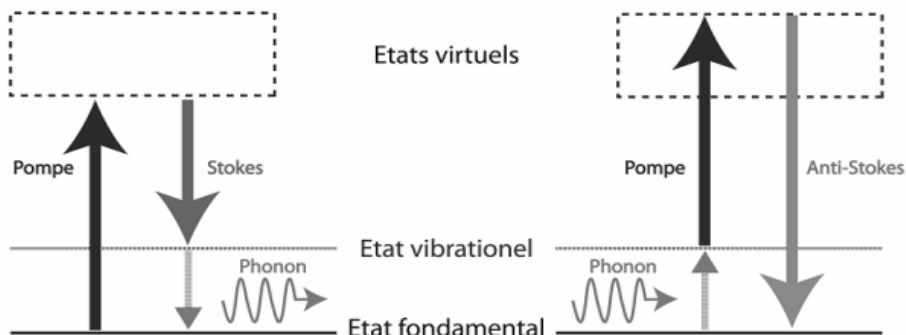


Figure1.8 : Processus de la diffusion Raman.[13](61)

La diffusion Brillouin est de même nature que la diffusion Raman, mais La diffusion Raman implique des phonons dans la bande de fréquence optique avec de grands décalages de fréquence; tandis que la diffusion Brillouin implique des phonons dans la bande de fréquence acoustique avec des décalages de fréquence plus petits [14] .

6. Technique de fabrication

La silice vitreuse (SiO_2) est le composant de base qui entre dans la fabrication des fibres optiques. [10] Nous retrouvons ce composé dans la nature dans différents minéraux tels que le quartz. Le principe de fabrication d'une fibre optique repose sur l'étirage d'une préforme de verre. Grâce à des techniques complexes, on peut ainsi étirer un tube de verre d'un mètre de long sur 10 cm de diamètre jusqu'à en faire une fibre optique de 150 km de long.[15]

Des techniques courantes de fabrication ; Méthode de dépôt chimique en phase vapeur modifiée (MCVD), dépôt externe en phase vapeur (OVD), dépôt axial en phase vapeur (VAD) et PCVD (dépôt chimique en phase plasma en phase vapeur)

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons parlé des fibres optiques en général. Ses composants et sa structure, son principe de fonctionnement et les méthodes de fabrication, en plus des diverses propriétés optiques, des effets linéaires tels que de l'atténuation, et de la dispersion chromatique que nous pouvons réduire en utilisant les fibres de Bragg. Le prochain chapitre nous traiterons les réseaux de diffraction de Bragg

Chapitre II

Généralités sur les réseaux de Bragg

Introduction :

D'une manière générale, la fibre de Bragg est d'une structure cylindrique, avec une distribution d'indice de réfraction périodique le long de la direction radiale [16]. Il a des types et des propriétés et c'est ce qui sera expliqué dans ce chapitre en plus d'une description de l'environnement de simulation pour « MODE Solution » en Lumerical de la société Ansys.

1. Fondements :

Comme on le sait, la propagation des photons lumineux dans les milieux à haut indice (le cœur) des fibres conventionnelles est réalisée par le phénomène de réflexion interne totale, et depuis l'avènement des fibres de Bragg, il est devenu possible de diriger la lumière dans un milieu à faible indice. Les réseaux de Bragg fonctionnent sur le principe de la diffraction. Lorsque la lumière se propage dans la fibre, une onde est générée qui se propage le long de la fibre et atteint la barrière, où elle réfléchit une seule longueur d'onde appelée λ_{Bragg} et s'exprime par :

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (9)$$

La loi de diffraction de Bragg stipule que l'angle d'incidence des rayons sur la surface du cristal (le matériau formant la barrière) est égal à l'angle de réflexion + l'angle d'émission pour cette surface et égal à la

longueur d'onde (λ) multipliée par un nombre entier représentant le nombre de niveaux (n), entraînant des interférences constructives . L'angle de réflexion s'exprime par :

$$\sin \theta_B = \frac{n\lambda}{2d} \quad (\text{Angle de Bragg}) \quad (10)$$

et le vecteur d'onde de Bragg est défini comme :

$$K_B = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (11)$$

le changement d'indice de réfraction requis est de l'ordre de [17] :

$$\Delta n \approx 10^{-4} \quad (12)$$

2. Les différents types de réseaux de Bragg :

La structure des fibres du réseau de Bragg est considérée comme des cristaux optiques, constitués de deux ou plusieurs types de matériaux isolants disposés périodiquement dans l'espace, et peuvent être classés en unidimensionnel (1D), bidimensionnel (2D) selon le vecteur de mouvement. En ce sens, les réseaux de Bragg peuvent être classés en :

2.1 1D : (réseaux de Bragg type 1)

Ce type est caractérisé par un seul vecteur qui est réalisée par empilement périodique de couches minces perpendiculaires à cette

direction [18]. Comme le montre la Figure 2.1 ; en appliquant une couche diélectrique à haute réfraction et une couche diélectrique à basse réfraction. Selon la loi de Bragg, la longueur d'onde centrale λ_c du pic de réflexion de Bragg pour une structure multicouche satisfait la relation [19]:

$$d_1 = \frac{\lambda_c}{4n_1} \tag{19}$$

$$d_2 = \frac{\lambda_c}{4n_2} \tag{20}$$

où d_1 et d_2 sont respectivement l'épaisseur des couches diélectriques élevées et des couches diélectriques faibles. n_1 et n_2 sont l'indice de réfraction des couches diélectriques élevées et des couches diélectriques faibles, respectivement .

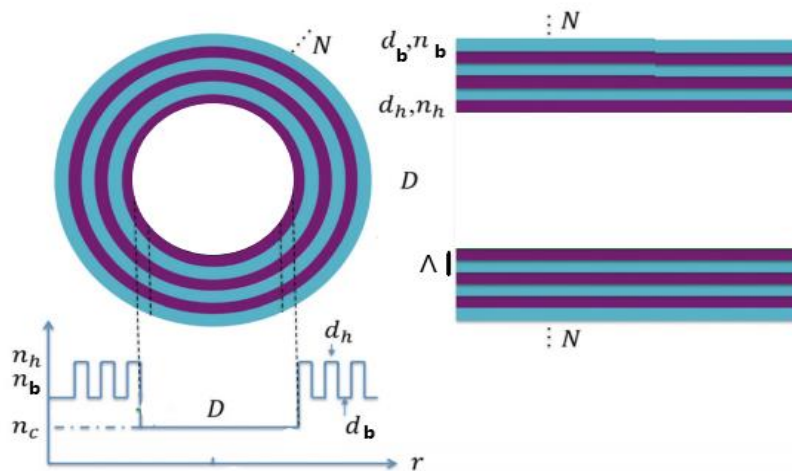


Figure 2.1 :schéma de principe de la fibre de Bragg [20]

La période des couches de Bragg [21]:

$$\Lambda = d1 + d2 \quad (21)$$

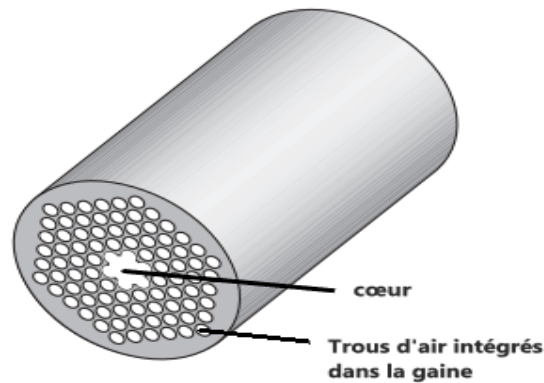
Deux formes de ce type de fibre peuvent être distinguées :

2.1.1 Fibre de Bragg coaxiale: Une variante de la fibre de Bragg originale, qui a un cœur uniforme à faible indice, est la fibre dite coaxiale de Bragg. Les fibres coaxiales de Bragg guident également la lumière à travers la réflexion de Bragg [22].

2.1.2 Fibre de Bragg à cœur d'air : Dans ce type le cœur est fait d'air, on note donc que $(n_2 > n_1 > n_c)$. Comme 1D peut réfléchir la lumière sous tous les angles, il prend en charge TE01 en tant que mode avec le moins de pertes, qui est immunisé contre la PMD et ne se divise pas en modes de polarisation.[17]

2.2 2D : (réseaux de Bragg type 2) :

Considéré comme des réflecteurs à cristaux photoniques bidimensionnels constitués d'un réseau périodique de trous d'air intégrés dans le matériau de gaine de la fibre , Comme le montre la figure 2.2.



**Figure 2.2 : fibre à bande interdite photonique dotée d'un réflecteur à cristal
photonique 2D [23]**

Dans ce type on distingue deux types de fibres :

2.2.1 Fibre à cœur creux :

Ce type permet de contrôler les états de propagation d'une onde électromagnétique incidente dans le plan X-Y par l'effet de la bande interdite photonique due à la distribution périodique de la fonction diélectrique dans la gaine.[19]

2.2.2 Fibre à cœur solide :

Dans ce type, La présence des canaux d'air dans la gaine optique fait que l'indice moyen de la gaine est inférieur à celui du cœur ce qui permet le guidage de la lumière par réflexion totale.[24]

Afin de parvenir à une réflexions totale, il faut parvenir à :

$$\beta_{FSM} < \beta < Kn_{cœur} \tag{22}$$

Avec β : la constante de propagation ; β_{FSM} : la constante de propagation du mode de gaine de la fibre ayant l'ordre le plus faible [24] ; et $Kn_{cœur}$:

La constante de propagation maximale pour le cœur de silice.

2.3 Fibres à réseaux de Bragg fusionnées dans cœur :

Les FBG sont des éléments à réflexion spectrale qui peuvent être créés au cœur d'une fibre optique à l'aide d'une source lumineuse hautement énergétique et d'un masque de phase [25] ; Ce type de fibre de Bragg est une structure microscopique qui peut être gravée sur une âme de fibre standard.

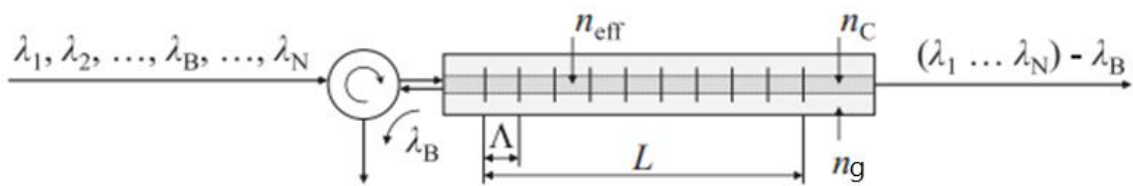


Figure 2.3 : Schéma montrant le principe de fonctionnement de FBG (8)[267]

Si la condition d'accord de phase de Bragg est satisfaite pour deux ondes avec β_0 et β_1 si :

$$|\beta_0 - \beta_1| = 2\pi \Lambda \tag{23}$$

Si une onde avec β_0 se propage à travers le réseau, son énergie est couplée à une onde diffusée se déplaçant dans la direction opposée à la même longueur d'onde si :

$$|\beta_0 - (\beta_0)| = 2\pi \Lambda \quad (24)$$

On distingue deux types de FBG : à courte période ($\Lambda \approx 0,5 \mu\text{m}$) ou à longue période ($\Lambda \approx 100\text{--}1000 \mu\text{m}$).[17]

3. Description du logiciel de simulation (Lumerical):

Lumerical Solutions est un logiciel puissant pour concevoir et analyser les composantes photoniques et les systèmes tels que les circuits photoniques intégrés. Lumerical se compose de quatre parties [27] :

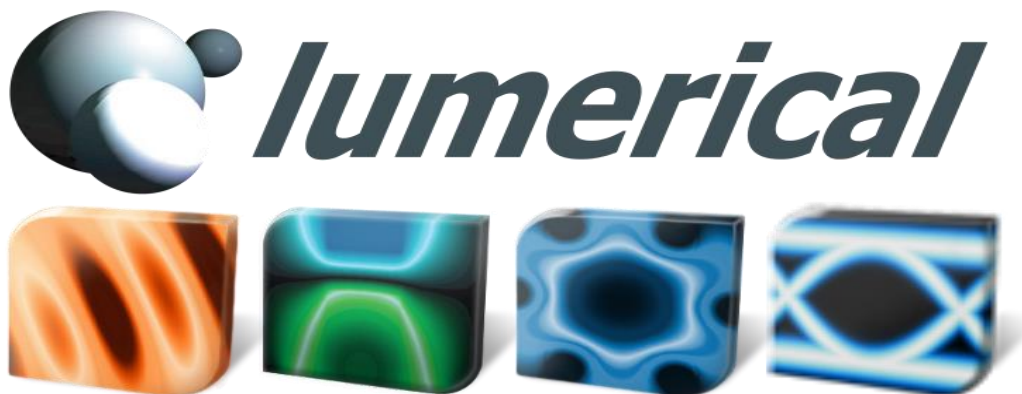


Figure 2.4 : Environnement Lumerical

- ✓ **FDTD** : Une solution logicielle complète pour simuler les composantes 3D. Capable d'analyser l'interaction de la lumière ultraviolette, visible et infrarouge avec des structures complexes.
- ✓ **MODE** : Un espace de conception de guides d'ondes complet pour analyser et optimiser les guides d'ondes planaires intégrés, les composants et les fibres.
- ✓ **INTERCONNECT** : Un espace dédié à la simulation des circuits photoniques et les systèmes de communications optiques.
- ✓ **Device** : simulation de dispositifs à semi-conducteurs TCAD pour la conception, l'analyse et l'optimisation de composants optoélectroniques à semi-conducteurs.

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude générale des réseaux de Bragg et des fibres optiques de Bragg, puis nous avons décrit deux types de matériaux diélectriques qui sont disposés périodiquement dans l'espace (1D et 2D). L'environnement logiciel « Lumerical » qui sera utilisé pour la simulation a été aussi présenté. Le prochain chapitre est consacré aux différents résultats de simulation.

Chapitre III

Résultats de simulation et discussion

Introduction

Après avoir expliqué l'environnement de travail dans le chapitre précédent, nous présenterons dans ce chapitre les résultats de simulation obtenus. L'objectif de ce chapitre est de calculer les différents modes de propagation dans les fibres de Bragg ainsi que les paramètres de propagation à savoir les pertes par confinement et la dispersion chromatique.

1. Simulation de type 1D

1.1 Description de la structure

La figure 3.1 donne la section transversale du guide d'ondes Bragg avec un cœur d'air. Il contient 4 couches périodiques entourant un cœur à faible indice, un indice de réfraction moyen des couches de gaine périodiques $n_1 = 1.4$ d'épaisseur $d_1 = 0.333 \mu\text{m}$, et $n_2 = 1.6$ d'épaisseur $d_2 = 0.667 \mu\text{m}$, en plus de la zone blanche dans le cœur rempli d'air d'indice de réfraction $n = 1$ et rayon $r = 1.4 \mu\text{m}$. Les diamètres de différents anneaux sont donnés dans le tableau 3.1.

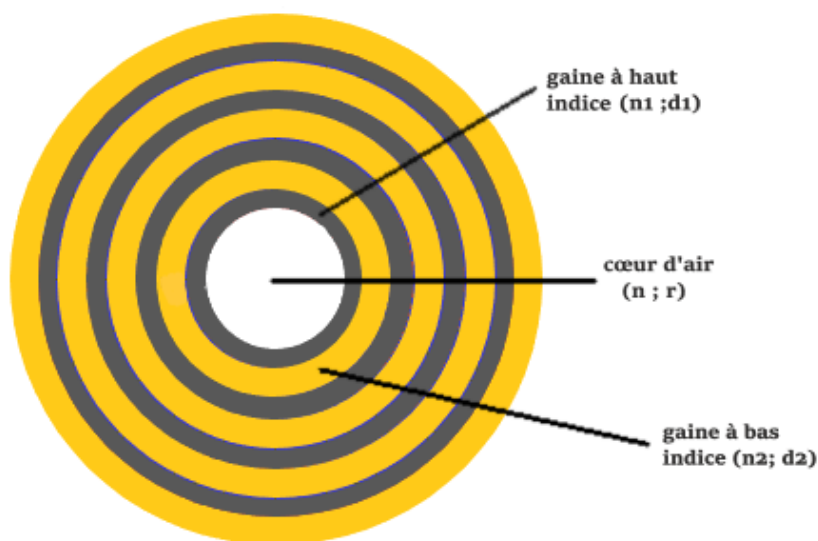


Figure 3.1 : Structure de la fibre de Bragg 1D

| Circule | Rayon extérieur (μm) | Rayon intérieur (μm) |
|---------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 1.733 | 1.4 |
| 2 | 2.4 | 1.733 |
| 3 | 2.733 | 2.4 |
| 4 | 3.4 | 2.733 |
| 5 | 3.733 | 3.4 |
| 6 | 4.4 | 3.733 |
| 7 | 4.733 | 4.4 |
| 8 | 5.4 | 4.733 |

Tableau 3.1 : Les rayons des anneaux utilisés pour la modélisation.

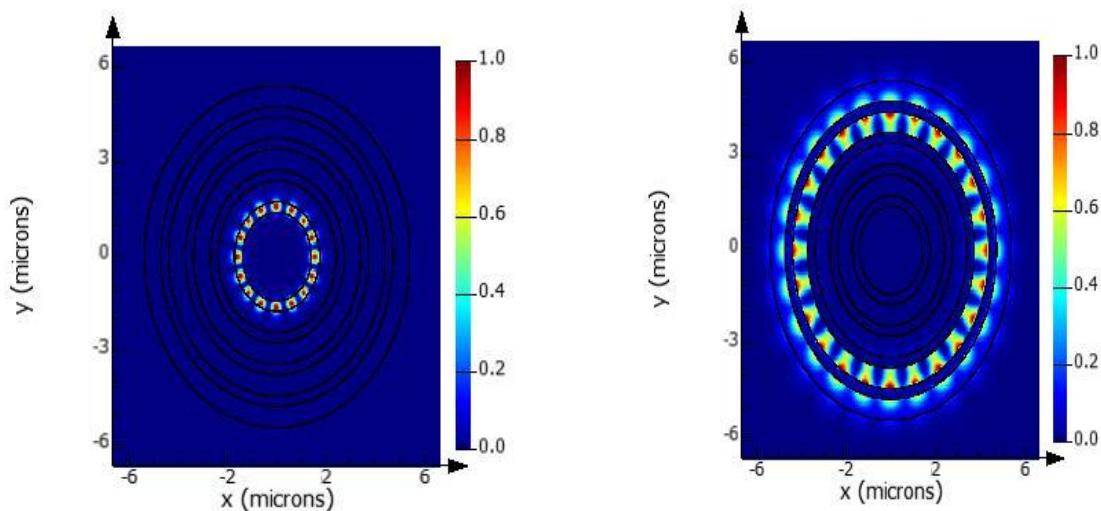
1.2 Modes de propagation :

On peut observer sur la figure ci-dessous que chaque couche a un comportement de diffusion différent, où les dégradés de couleurs représentent de l'intensité de réfraction la plus faible (couleur bleue) à la couleur rouge l'intensité de réfraction la plus élevée. L'indice effectif complexe de chaque

mode ainsi que les pertes par confinement et la fraction de la composante de champ électrique sont donnés par le tableau ci-dessous.

| Mode | indice effectif | | Perte (dB /mm) | TE/TM (%) |
|------|-----------------|-------------------|----------------|-------------|
| | $Re(n_{eff})$ | $Im(n_{eff})$ | | |
| 1 | 0.7740169 | $7.407400e^{-6i}$ | 0.98217 | 6.3/98 |
| 2 | 0.6823507 | $7.449972e^{-5i}$ | 0.98781 | 95.73/13.85 |
| 3 | 0.2203224 | $0.01549412i$ | 205.44 | 3.04/100 |
| 4 | 0.1355975 | $3.664848e^{-6i}$ | 0.048593 | 0.16/99.96 |
| 5 | 0.03662872 | $0.4790198i$ | 6351.4 | 97.97/7.94 |
| 6 | 0.004039562 | $0.6931527i$ | 9190.7 | 90.04/24.8 |

Tableau 3.2 : Résultat des calculs sur les modes se propageant dans une fibre de Bragg à la longueur d'onde $\lambda=4,116 \mu\text{m}$



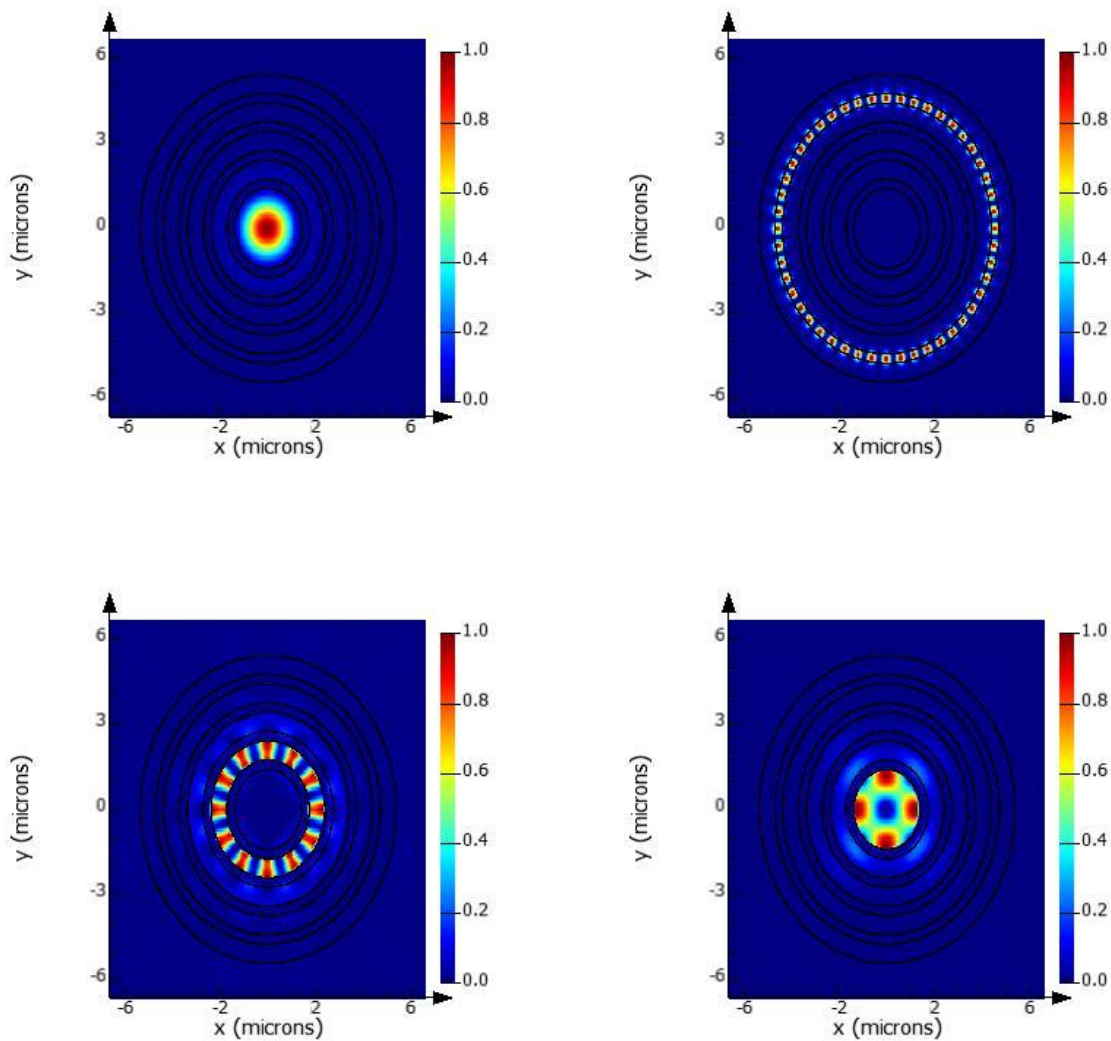


Figure 3.2 : Distribution de champ pour les différents modes de propagation.

1.3 Résultat de simulation :

Afin de connaître les performances et l'efficacité de ce type, nous allons l'étudier en termes d'indice effectif, d'atténuation et de dispersion chromatique en fonction de longueur d'onde ; L'étude portera sur le mode 3.

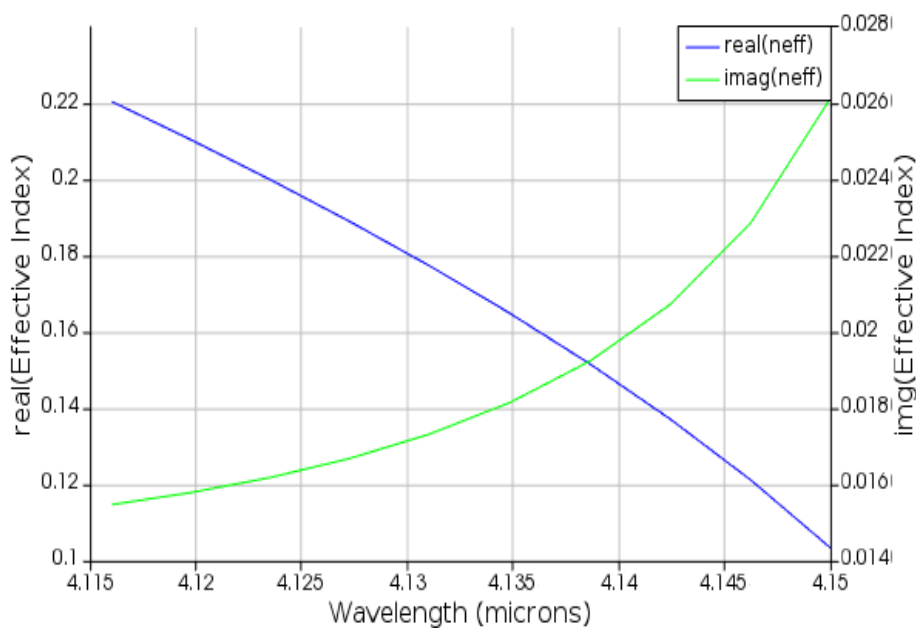


Figure 3.3 : Variation d'indice effectif en fonction de la longueur d'onde d'une fibre

Bragg pour le mode 3

Le Figure 3.3 représente l'évolutions de l'indice effectif en fonction de longueur d'onde pour $\lambda = 4.116 \mu m$, où l'on constate une relation inverse entre eux, plus la longueur d'onde est élevée plus l'indice effectif est faible. La valeur la plus élevée était 0.22 à $\lambda = 4.116 \mu m$ qui représente $Re(n_{eff})$ pour ce mode.

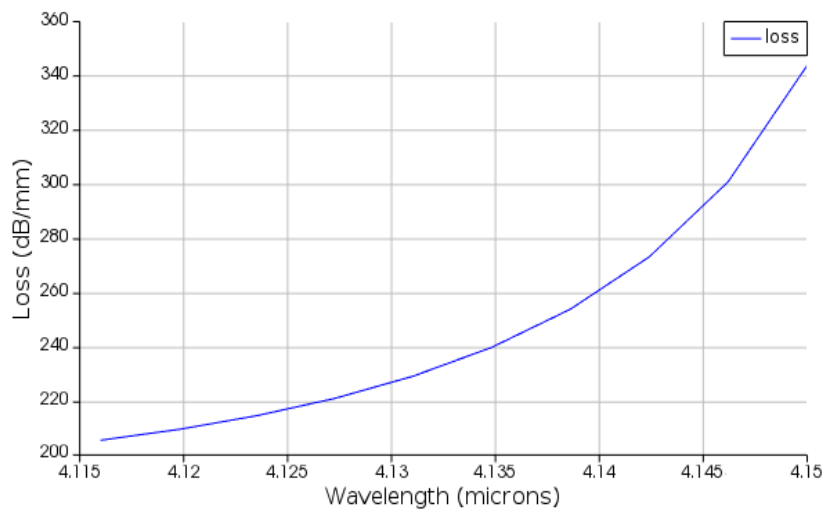


Figure 3.4 : Variation de la perte par confinement en fonction de la longueur d'onde.

Quant à la perte, on remarque sur la figure 3.4 que la perte augmente avec l'augmentation de la longueur d'onde. Plus on s'éloigne du cœur, plus l'atténuation diminue, car la perte de confinement augmente avec l'augmentation de la longueur d'onde car le confinement diminue à des longueurs d'onde plus élevées. La lumière ayant tendance à s'échapper davantage du cœur aux longueurs d'onde plus élevées, le phénomène de confinement sera plus faible ; Ainsi, la perte élève .

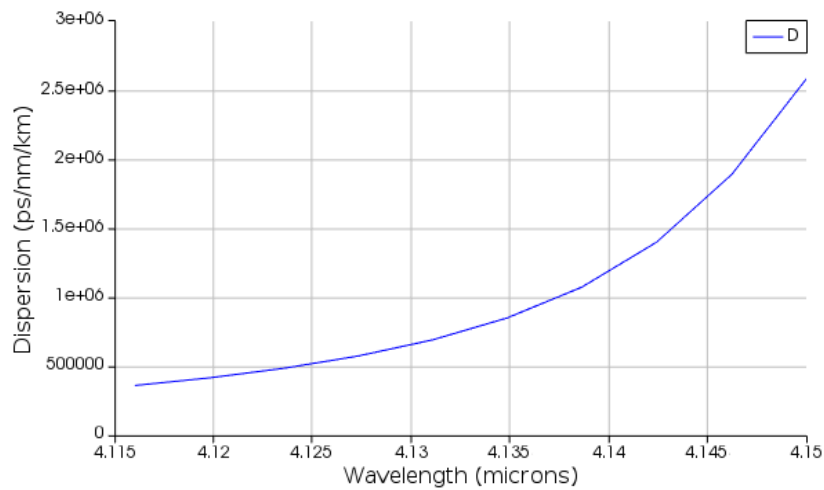


Figure 3.5 : Variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde pour le mode 3

2. Simulation de type 2D

2.1 Description de la structure :

Comme cela est connu en cristal photonique, ce type de fibre de Bragg est constitué d'un cœur entouré d'une gaine constituée de couches contenant des trous d'air. Où, le rayon du noyau d'air est $r_{\text{cœur}} = 10 \mu\text{m}$. Les trous ont une forme annulaire avec une épaisseur uniforme $t_{\text{annulaire}} = 2,3 \mu\text{m}$. L'épaisseur entre couche et couche $t_{\text{ring}} = 0,2 \mu\text{m}$. Ces trous sont séparés par de minces ponts d'une épaisseur de $t_{\text{bridge}} = 45 \text{ nm}$. Le nombre de trous est de 24, 34 et 44 dans la première, deuxième et troisième anneau de trous, respectivement. Dans le calcul, nous avons utilisé la longueur d'onde de $1,06 \mu\text{m}$, tandis que l'indice de réfraction de l'air est de 1.

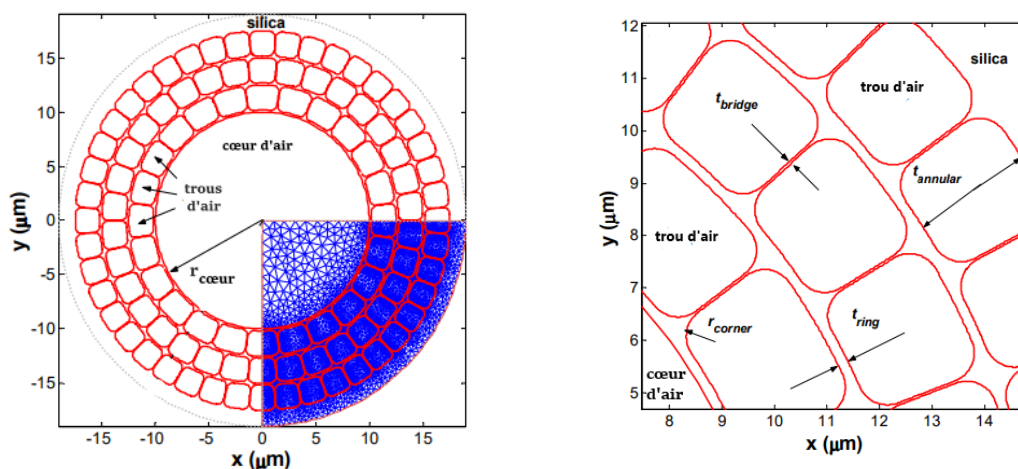


Figure 3.6 :Le modèle de la structure à cœur d'air avec 3 anneaux de trous de forme annulaire dans le gaine [26].

2.2 Modes de propagation :

Comme dans le premier type, on considère les modes 10 et 11 dont les caractéristiques sont données par le tableau suivants :

| Mode | N_{eff} | $P(dB/cm)$ | Indice du groupe | TE Polarisation fraction | Constante de propagation angulaire (1/rad) |
|------|---------------|------------|------------------|--------------------------|--|
| 10 | 0,99791 94 | 0 | 1,00333 9 | 51 | 5915200 |
| 11 | 0,99788 22 | 0 | 1,00579 1 | 49 | 5914980 |

Tableau 3.2 : Résultat des calculs sur les modes se propageant dans la fibre de Bragg calculés pour $\lambda = 1,06 \mu m$

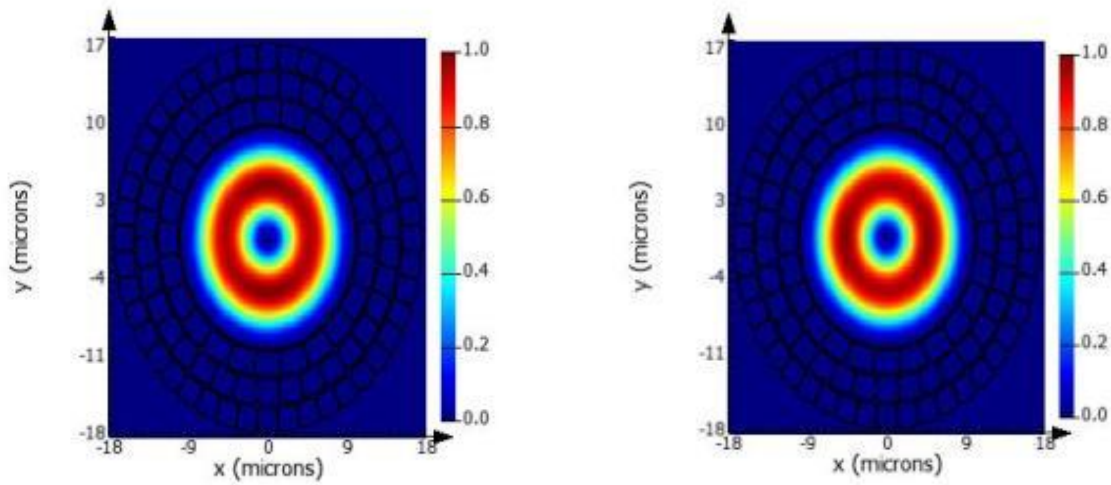


Figure 3.7 : Distribution du champ optique pour les modes 10 et 11.

2.3 Résultat de Simulation

Le figure 3.8 représente les variations de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde, où l'on constate que la valeur imaginaire de l'indice de réfraction est nulle, alors que la valeur réelle atteint sa valeur la plus élevée à $\lambda = 1,06\mu m$ puis ça commence à diminuer .

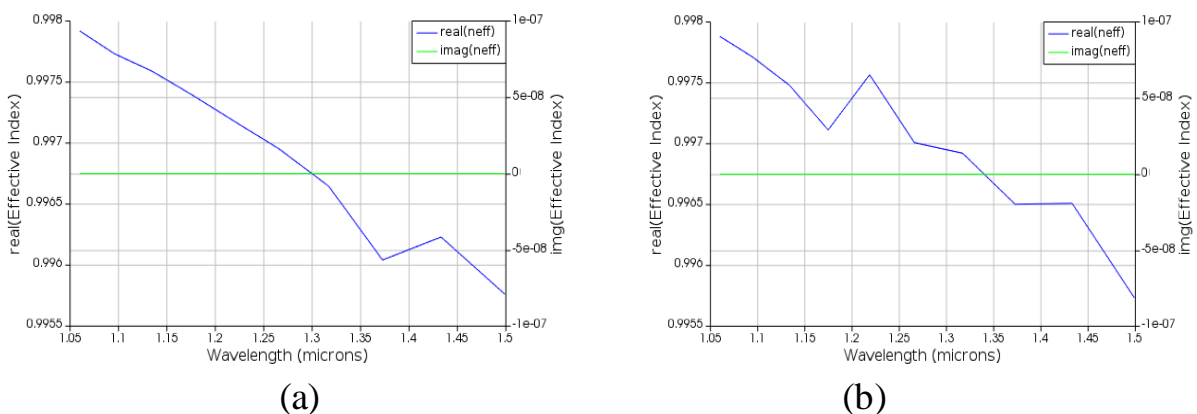


Figure 3.8 : Courbe d'indice effectif en fonction de la longueur d'onde dans la fibre de Bragg pour : a) mode 10 ; b) mode 11

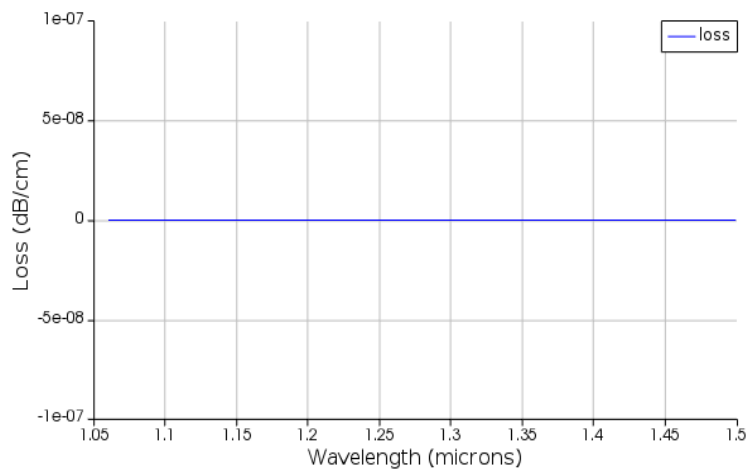


Figure 3.9 : Courbe de perte en fonction de la longueur d'onde dans la fibre de Bragg

On remarque sur la figure 3.9 la perte est inexistante dans ce type, ce qui indique que la fuite de lumière est inexistante. Cela est dû à la structure de ces fibres, où les trous d'air intégrés dans la gaine en font un guide de lumière idéal.

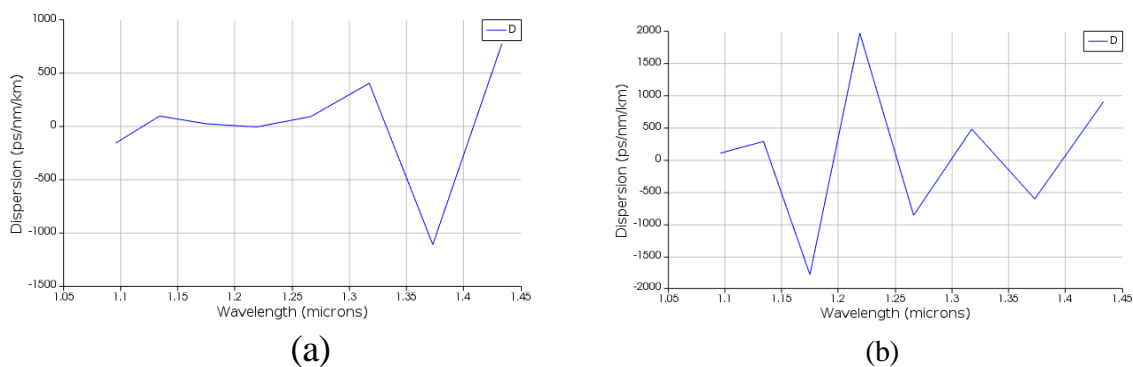


Figure 3.10 : Courbe de dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde dans la fibre de Bragg pour :a) mode 10 ; b)mode 11

Comme on peut le voir sur la figure 3.10, les valeurs de dispersion pour les deux modes sont différentes

Conclusion :

La particularité des fibres de Bragg réside dans la possibilité de diriger la lumière, sachant que l'indice de réfraction du cœur est inférieur à l'indice de la gaine, ce qui en fait un bon choix par rapport aux fibres traditionnelles en terme de réduction de la dispersion chromatique et l'atténuation.

Conclusion générale

Les systèmes de communication optique présentent plusieurs avantages par rapport aux autres systèmes de communication. De ce point de vue, nous avons présenté dans le premier chapitre un aperçu des fibres optiques, où le système optique, comme tout système de communication, est composé de trois éléments principaux : un émetteur qui est (LED) ou (LASER) dont la tâche est de convertir le signal électrique en une fibre optique, et un photorécepteur qui effectue le processus inverse, Quant au canal de transmission, c'est la fibre optique et c'est le cœur de sujet de la recherche. Nous avons abordé sa structure et son principe guide de la lumière, ses types, ses propriétés linéaires et non linéaires, jusqu'aux méthodes de sa fabrication.

Dans le deuxième chapitre, nous avons traité des fibres de Bragg, où la distribution périodique de l'indice de réfraction permet de choisir différentes longueurs d'onde de la lumière. En d'autres termes, la lumière de certaines longueurs d'onde peut ne pas être présente ou transmise mais est réfléchi. Nous avons divisé les fibres de Bragg en 1D et 2D. Comme pour la deuxième section du chapitre, nous avons expliqué l'outil de simulation « MODE solution » pour Ansys Lumerical.

Le troisième chapitre était une présentation des résultats de simulation pour les fibres de Bragg 1D et 2D , où nous fournissons une description détaillée de la structure des fibres utilisées, puis simulons les modes de propagation, afin de représenter l'indice de réfraction effectif, atténuation et dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde.

Bibliographie :

- [1] A. Medjouri, « Cours communications optiques ». Université d'El oued
- [2] B. Merabet, « Technologie WDM en télécoms optiques avancées », n° July, 2016.
- [3] P. Toupin, "Fibres optiques microstructurées en verre de chalcogénure pour la détection d'espèces chimiques et la conversion de longueurs d'onde" Thèse de doctorat, 2014.
- [4] L. Cherbi épouse Bazi, « Propagation et caractérisation des fibres optiques », p. 186, 2007.
- [5] R. Cotillard, R. Cotillard, et D. Bragg, « Stabilisation des propriétés optiques des réseaux de Bragg aux températures extrêmes par régénération et inscription par laser femtoseconde», 2019.
- [6] D. E. S. Instabilités, N. O. N. Linéaires, et E. T. Des, « Instabilités Non - Linéaires Et Des Vagues ».
- [7] M. Gay, « Etude théorique et expérimentale de l'impact de la régénération 2R dans un système de transmission optique haut débit To cite this version : HAL Id : tel-00086500 », 2006.
- [8] R. K. Basak, « Development of Specialty Photonic Crystal Fiber for Plasmonic Applications CSIR - Central Glass and Ceramic Research Institute », 2018.
- [9] B. E. BRILEY, « Introduction To Fiber Optics », *An Introd. to Fiber Opt. Syst. Des.*, p. 1-21, 1990, doi: 10.1016/b978-0-444-70498-6.50006-2.

- [10] B. Brousse, « Université de Limoges », 2004.
- [11] M. E. N. Electronique, « Remerciements ».
- [12] H. El Ouazzani, « Propriétés optiques non linéaires du deuxième et troisième ordre de nouveaux systèmes organiques conjugués de type », 2012.
- [13] A. FAIÇAL, « Etude de la dynamique de propagation non linéaire des solitons optiques modélisés par l'équation de Schrödinger non linéaire », 2010.
- [14] Z. Fang, K. K. Chin, R. Qu, et H. Cai, *Fundamentals of Optical Fiber Sensors Wiley Series in Microwave and Optical Engineering*. 2012.
- [15] M. Fadila, « Optimisation par la simulation système d'une chaîne de transmission numérique par fibre optique haut débit », p. 151, 2010.
- [16] D. Liu et J. Zhang, « Research on the Theory of Optical Transmission for Bragg Fiber With High-Index-Core », *Front. Phys.*, vol. 8, n° November, p. 1-5, 2020, doi: 10.3389/fphy.2020.00381.
- [17] B. Guenther et D. Steel, *Encyclopedia of Modern Optics Second Edition*. 2018.
- [18] Pierre Lecoy, *Télécoms sur fibres optiques*, vol. 53, n° 9. 2019.
- [19] Q. Gong et X. Hu, *Qihuang Gong Xiaoyong Hu*. 2013.
- [20] J. Li, H. Qu, et M. Skorobogatiy, « Squeezed hollow-core photonic Bragg fiber for surface sensing applications », *Opt. Express*, vol. 24, n° 14, p. 15687, 2016, doi: 10.1364/oe.24.015687.
- [21] X. Ao, T.-H. Her, et L. W. Casperson, « Gain guiding in large-core Bragg fibers », *Opt. Express*, vol. 17, n° 25, p. 22666, 2009, doi:

10.1364/oe.17.022666.

- [22] G. Ouyang, Y. Xu, et A. Yariv, « Comparative study of air-core and coaxial Bragg fibers: single-mode transmission and dispersion characteristics », *Opt. Express*, vol. 9, n° 13, p. 733, 2001, doi: 10.1364/oe.9.000733.
- [23] M. Skorobogatiy et J. Yang, *Fundamentals of Photonic Crystal Guiding*. 2008. doi: 10.1017/cbo9780511575228.
- [24] M. Châu et P. Huy, « Thèse pour obtenir le grade de Docteur de 1^{er} Université de Limoges des fibres microstructurées et des réseaux de Bragg », 2006.
- [25] G. Allwood, G. Wild, et S. Hinckley, « Fiber bragg grating sensors for mainstream industrial processes », *Electronics (Switzerland)*, vol. 6, n° 4. 2017. doi: 10.3390/electronics6040092.
- [26] H. P. Uranus et H. J. W. M. Hoekstra, « Modelling of microstructured waveguides using a finite-element-based vectorial mode solver with transparent boundary conditions », vol. 12, n° 12, p. 54-59, 2004.
- [27] Zemax Lumerical Interoperability Webinar Series Part 1,(Auteur Inconnu).