

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunication

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par : MEGHROUDI Halima et YOUCEF TANI Fatima Zohra

Sujet

Etude d'un capteur fibré

Soutenu publiquement, le 14 / 06 / 2023, devant le jury composé de :

M. BABA-AHMED Mohammed Zakarya	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mme. DJELTI Hamida	MCA	Université de Tlemcen	Examinatrice
M. CHIKH-BLED Hicham	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur
Mme. MIREN Ilhem	Doctorante	Université de Ain- Temouchent	Co-Encadreur

Année universitaire : 2022 /2023

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre gratitude à 'Dieu tout-puissant' pour la sagesse, l'inspiration et la bénédiction qu'ALLAH nous a accordé tout au long de ce travail de recherche.

Nous remercions vivement monsieur CHIKH-BLED Hicham et madame MIREN Ilhem d'avoir consacré leurs temps et leurs énergies à discuter de nos idées, à évaluer nos progrès et à nous guider durant ce processus de rédaction. Leur mentorat et leur engagement ont joué un rôle essentiel dans la réussite de notre travail du master.

Nous remercions également les membres du jury monsieur BABA-AHMED Zakarya et madame DJELTI Hamida d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous tenons à souligner l'impact profond des enseignements et conseils des professeurs du département de télécommunication au cours de ce parcours, ils ont été une source d'inspiration et de motivation, qui nous a encouragé à repousser nos limites et à explorer de nouvelles perspectives.

Nos remerciements s'étendent à tous ceux qui ont apporté leur aide de près ou de loin, qu'ils soient mentionnés ici ou non

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes regrettés chers parents, que Dieu le tout puissant les accueillent dans son vaste paradis. A Dieu, nous appartenons et à lui nous retournons.

A tous mes amis Rania, Ikram, Fatima et Zaki.

إلى أبي

أفتخر بك حياً وميتاً وسابقى فخورة وممتنة لله دائماً أنني خلقت ابنة
لأعظم أب، ف أنت نعمة من الله وعادت إليه...

Amel Halima.

A decorative border with intricate floral and scrollwork patterns in black and white, framing the central text.

Dédicace

C'est un moment de plaisir de dédier ce projet de fin
d'étude

A ceux qui ont attendu avec patience le fruit de leur bonne
éducation et pour tous les sacrifices déployés pour m'élever
dignement, mes chers parents, source de vie, d'amour et
d'affection.

Je dédie cet aimable travail particulièrement
A ma famille, la source d'espoir et motivation qui ont été
toujours à mes côtés pour bien me soutenir et pour créer le
climat affectueux et propice.

A mes meilleures amies qui sont ma source de soutien et de
motivation.

Et à tous ceux qui aiment le bon travail et ne reculent pas
devant les obstacles de la vie.

Fatima.

Résumé :

Ce mémoire explore l'utilisation des fibres optiques micro-structurées (PCF) en tant que capteurs de salinité. À l'aide de la méthode de simulation BPM, le mémoire étudie la performance de ces capteurs dans la détection de la salinité. Les résultats de simulation montrent une corrélation linéaire entre les variations d'indice de réfraction et les concentrations de sel, démontrant ainsi la sensibilité des capteurs à des longueurs d'ondes spécifiques. Les capteurs de salinité à base de PCF offrent une précision et une sélectivité supérieures, les rendant idéaux pour des applications telles que l'aquaculture et la surveillance environnementale. Des améliorations futures, comme la miniaturisation et l'optimisation des fibres à cristaux photoniques, promettent de nouvelles perspectives dans le domaine de la détection de salinité.

Mots clés: fibres à cristaux photoniques, capteurs optiques, sensibilité, salinité, méthode BPM, dispersion chromatique.

Abstract:

This work explores the use of photonic crystal fibers (PCF) as salinity sensors. Using the BPM simulation method, this thesis examines the performance of these sensors in detecting salinity. The simulation results show a linear correlation between refractive index changes and salt concentrations, demonstrating the sensitivity of the sensors to specific wavelengths. PCF-based salinity sensors offer superior accuracy and selectivity, making them ideal for applications such as aquaculture and environmental monitoring. Future improvements, such as miniaturization and optimization of photonic crystal fibers, promise new opportunities in the field of salinity detection.

Keywords: photonic crystal fibers, optical sensors, sensitivity, salinity, BPM method, chromatic dispersion.

المخلص:

ان هذا العمل يستطلع استخدام الألياف الضوئية المجهرية كأجهزة استشعار درجة الملوحة. باستخدام طريقة محاكاة، تقوم بدراسة أداء هذه المستشعرات في الكشف عن الملوحة. تظهر نتائج المحاكاة ارتباطا خطيا بين اختلافات معامل الانكسار وتركيزات الملح، مما يدل على حساسية المستشعرات لأطوال موجات محددة. وايضا توفر مستشعرات الملوحة القائمة على الالياف البصرية على دقة وانتقائية فائقتين، مما يجعلها مثالية لتطبيقات مثل تربية الأحياء المائية والمراقبة البيئية. تعد التحسينات المستقبلية، مثل تصغير الألياف البلورية الضوئية وتطويرها، بأفاق جديدة في مجال الكشف عن الملوحة.

كلمات مفتاحية: ألياف بلورية ضوئية، مستشعرات بصرية، حساسية، ملوحة، طريقة BPM، تشتت كروماتيكي

TABLES DES MATIÈRES

Dédicace	I
Remerciement.....	III
Résumé.....	IV
Table des matières.....	V
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	XI
Liste des acronymes.....	XII

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Les fibres optiques micro-structurées

I. Introduction.....	2
II. Fibre optique conventionnelle.....	2
II.1. Généralités	2
II.2. Propriétés	3
II.2.1. Dispersion chromatique.....	3
II.2.2. Dispersion modale.....	4
II.2.3. Dispersion intermodale de polarisation.....	4
II.2.4. Atténuation	5
II.3. Naissance d'une nouvelle catégorie des fibres optiques	5
III. Fibre à cristaux photoniques	6
III.1. Cristaux photoniques	6
III.1.1. Propriétés de base.....	6
III.1.2. Types des Cristaux photoniques.....	7
III.1.2.a. Les cristaux photoniques 1D.....	7
III.1.2.b. Les cristaux photoniques 2D.....	7
III.1.2.c. Les cristaux photoniques 3D.....	8
III.2. Généralités sur les fibres optiques micro-structurées (FOM).....	8
III.3. Structure des fibres optiques micro-structurées.....	9
III.3.1. Type des FOM.....	9
III.3.2. Principe du guidage des FOM.....	11
III.3.2.a. Guidage par réflexion interne totale modifiée (RTIM).....	11
III.3.2.b. Guidage à bande interdite photonique (BIP)	12

III.4. Propriétés des fibres optiques micro-structurées	13
III.4.1. Fréquence normalisée.....	13
III.4.2. Surface effective.....	14
III.4.3. Dispersion chromatique.....	14
III.4.4. La biréfringence	15
III.4.5. Perte de confinement.....	16
III.5. Fabrication des FOM.....	16
III.5.1. Technique d'empilage et d'étirage	17
III.5.2. Processus de fabrication par extrusion.....	18
III.6. Avantages des FOM	19
III.7. Applications des FOM.....	20
IV. Conclusion	22
Bibliographie.....	23

Chapitre II : Les capteurs optiques

I. Introduction.....	25
II. Capteurs classiques	26
II.1. Définition.....	26
II.2. Grandeurs d'influence	27
II.3. Types de grandeur physique	27
II.4. Types des capteurs.....	27
II.4.1. Capteur actif	27
II.4.2. Capteur passif.....	28
II.4.3. Capteur composite.....	28
III. Capteurs à base des fibres optiques	29
III.1. Généralités	29
III.2. Différents type des capteurs optiques.....	30
III.2.1. Les capteurs intrinsèques	30
III.2.2. Les capteurs extrinsèques.....	30
III.3. Architecture des capteurs optiques	31
III.3.1. Le transducteur	31
III.3.2. Émetteur de lumière	31
III.3.3. Récepteur de lumière.....	31
III.3.4. Guide d'onde optique	31
III.4. Caractéristiques des capteurs optiques	31

III.4.1. La sensibilité	32
III.4.2. La résolution.....	32
III.4.3. la sélectivité (spécificité).....	32
III.4.4. la répétabilité	32
III.4.5. l'étalonnage	33
IV. Capteurs à base des fibres à cristaux photoniques	33
IV.1. Généralités	33
IV.2. Historique	34
IV.3. Type des capteurs à PCF	34
IV.3.1. Capteurs physiques.....	34
IV.3.2. Capteurs chimiques	34
IV.3.3. Capteurs biomédicaux	35
IV.4. Paramètres qui influent la détection	35
IV.4.1. Effets du pas sur la détection.....	35
IV.4.2. Effets du diamètre sur la détection	35
IV.4.3. Effets du taux de remplissage d'air.....	36
IV.5. Système de détection par PCF	36
IV.5.1. Détection par l'utilisation des ondes évanescentes	36
IV.5.2. Détection par la bande interdite photonique	37
IV.6. Applications des capteurs à fibres micro-structurées	37
IV.6.1. Capteur de température	37
IV.6.2. Capteur d'indice de réfraction	38
IV.6.3. Capteur pour la détection des gaz	38
IV.6.4. Capteur de pression	38
IV.6.5. Capteur de salinité.....	39
IV.7. Avantages des capteurs à PCF.....	39
V. Conclusion	40
Bibliographie.....	41

Chapitre III : Simulation d'un capteur de salinité

I. Introduction.....	43
II. Méthodes de modélisation des PCFs	43
III. Partie théorique	45
IV. Conception et modélisation des PCFs.....	46
IV.1. Structure PCF	47

IV.2. Paramètres qui influent la structure	48
IV.2.1 Indice de réfraction.....	49
IV.2.2 Dispersion.....	50
IV.3. Influence de la salinité sur la dispersion.....	52
IV.4. Influence de la salinité sur la sensibilité du capteur	53
V. Conclusion :	61
Bibliographie.....	62
Conclusion générale.....	63

LISTE DES FIGURES

Chapitre I: Les fibres optiques micro-structurées

Figure I.1. Structure d'une fibre optique conventionnelle	2
Figure I.2. Différentes pertes dans une fibre optique	5
Figure I.3. Le principe des arrangements pour des cristaux photoniques unidimensionnels (1D)(a), bidimensionnels (2D)(b) et tridimensionnels (3D)(c).....	7
Figure I.4. Section transversale d'une fibre à cristaux photoniques.....	9
Figure I.5. Types des FOM à cœur plein	10
Figure I.6. Type des FOM à cœur creux	11
Figure I.7. Guidage par réflexion interne totale modifiée.....	12
Figure I.8. Guidage par bande interdite photonique	13
Figure I.9. Méthode de fabrication d'une PCF schématisé « empilement et étirage »	17
Figure I.10. Inspection d'une préforme pour une fibre cristalline photonique. L'image a été aimablement fournie par le Centre de recherche en optoélectronique de l'Université de Southampton.....	18

Chapitre II: Les capteurs optiques

Figure II.1. Schéma représentatif d'un capteur	26
Figure II.2. Schéma représentatif d'un capteur actif.....	28
Figure II.3. Schéma représentatif d'un capteur passif	28
Figure II.4. Schéma représentatif d'un capteur composite	29
Figure II.5. Courbe d'étalonnage d'un capteur	33

Chapitre III: Simulation d'un capteur de salinité

Figure III.1. Section transversale de la structure PCF (A).....	48
Figure III.2. Indices effectifs des structures (A), (B), (C)	49
Figure III.3. Variation de l'indice de réfraction en fonction des pourcentages de salinité.....	50
Figure III.4. Tracé de la dispersion de la structure (A).....	50
Figure III.5. Tracé de la dispersion de la structure (B).....	51
Figure III.6. Tracé de la dispersion de la structure (C).....	51
Figure III.7. Tracé de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différents pourcentages de salinité pour la structure (A).....	52
Figure III.8. Tracé de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différents pourcentages de salinité pour la structure (B)	52
Figure III.9. Tracé de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différents pourcentages de salinité pour la structure (C)	53
Figure III.10. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.6 \mu\text{m}$	53
Figure III.11. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.7 \mu\text{m}$	54

Figure III.12. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.8 \mu\text{m}$	54
Figure III.13. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.9 \mu\text{m}$	55
Figure III.14. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.6 \mu\text{m}$	55
Figure III.15. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.7 \mu\text{m}$	56
Figure III.16. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.8 \mu\text{m}$	56
Figure III.17. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.9 \mu\text{m}$	57
Figure III.18. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.6 \mu\text{m}$	57
Figure III.19. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.7 \mu\text{m}$	58
Figure III.20. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.8 \mu\text{m}$	58
Figure III.21. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.9 \mu\text{m}$	59
Figure III.22. Ajustement linéaire du tracé de la dispersion en fonction de la salinité	60

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre III: Simulation d'un capteur de salinité

Tableau III.1. Valeurs numériques des coefficients de l'équation (III.3).....	45
Tableau III.2. Valeurs numériques des paramètres de l'équation (III.3).....	46
Tableau III.3. Paramètres de la structure PCF (A)	47
Tableau III.4. Paramètres de la structure (B).....	48
Tableau III.5. Paramètres de la structure (C).....	49
Tableau III.6. Valeurs des paramètres de calcul.....	60
Tableau III.7. Valeurs numériques des sensibilités pour différentes longueurs d'ondes	60

LISTE DES ACRONYMES

BIP : Bande Interdite Photonique

BPM : Beam Propagation Method (Méthode de Propagation des Faisceaux)

DEL : Diode électroluminescente

DL : Diode laser

EMI : Electromagnetic Interference

FBG : Fiber Bragg Grating

FDTD : Finite Difference Time Domain (Méthode des Différences Finies Temporel)

FEM : Méthode des Eléments Finis

FMAS : Fibres Micro-structurées Air/Silice

FO : Fibre Optique

FOM : Fibre optique micro-structurée

IR : Indice de Réfraction

LPFG : Long-period fiber grating

ON : Ouverture Numérique

PBF : photonic bandgap fiber

PBG : photonic bandgap

PCF : Photonic Crystal Fiber

RFI : Radio-Frequency Interference

RTIM : Réflexion Totale Interne Modifiée

TIR : Total Internal Reflection (Réflexion Totale)

ZDW: Zero Dispersion Wavelength

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Les capteurs à fibre optique sont des dispositifs de mesure largement utilisés dans de nombreux domaines, allant de la surveillance environnementale à l'industrie médicale. Leur capacité à transmettre et à manipuler la lumière de manière précise en fait des outils polyvalents pour la détection et la mesure de diverses grandeurs physiques.

Dans ce mémoire de fin d'étude, nous nous concentrons spécifiquement sur les capteurs à fibre optique basés sur les fibres micro-structurées, également connues sous le nom de fibres à cristaux photoniques. Ces fibres innovantes présentent des caractéristiques optiques uniques grâce à leur structure microscopique complexe, qui comprend des arrangements périodiques de trous ou de cavités dans la gaine.

L'objectif de notre étude était de simuler un capteur à fibre optique basé sur une fibre micro-structurée pour la mesure de la salinité. La salinité est un paramètre essentiel dans de nombreux domaines, tels que l'océanographie, l'aquaculture et le contrôle de la qualité de l'eau. En utilisant la méthode de simulation BPM (Beam Propagation Method), nous avons modélisé le comportement de la lumière à l'intérieur de la fibre micro-structurée et évalué sa sensibilité à la salinité. La simulation nous a permis d'analyser les variations de la lumière en fonction de la salinité de l'échantillon testé. Les résultats obtenus nous ont permis de comprendre le principe de fonctionnement du capteur de salinité à fibre optique et d'optimiser ses performances en termes de sensibilité et de précision.

Ce mémoire est structuré de la manière suivante : dans la première partie, nous présentons un aperçu des fibres micro-structurées et leur importance dans diverses applications. Ensuite, nous abordons plus spécifiquement les capteurs à fibre optique et leurs propriétés uniques. Nous décrivons ensuite la méthodologie de simulation BPM utilisée pour modéliser le capteur de salinité à fibre optique. Les résultats de simulation et leur analyse sont présentés dans la section suivante, suivis d'une discussion sur les performances du capteur. Enfin, nous concluons cette étude en mettant en évidence les avantages et les perspectives d'amélioration du capteur de salinité à fibre optique basé sur une fibre micro-structurée.

Ce travail de recherche contribue à l'avancement des capteurs à fibre optique en explorant une application spécifique dans le domaine de la mesure de la salinité. Les résultats obtenus pourraient servir de base pour le développement de capteurs plus sensibles et plus précis dans ce domaine, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités pour la surveillance et la gestion des ressources aquatiques.

Chapitre I

Les fibres optiques micro-structurées

I. Introduction

Ce chapitre se présente comme une introduction aux fibres micro-structurées. Ces fibres sont divisées en deux catégories basées sur le principe du guidage de la lumière. Celui-ci est guidée par deux différents types de guides (reposant sur des phénomènes physiques différents) quant à la transmission de la lumière. Dans un premier temps, nous avons présenté les exigences qui ont donné naissance à l'idée de concevoir des matériaux à cristaux photoniques et ainsi conduit à la réalisation des PCFs. Nous expliquerons ensuite les phénomènes physiques des deux principes de propagation agissant dans la fibre à cristaux photoniques. Nous mettons évidemment les aspects applicatifs de ces fibres en étudiant leurs fonctionnements monomodes, leurs caractéristiques de perte et de dispersion. Cette première étude tente de mettre en évidence les principaux avantages des différentes classes de fibres à cristaux photoniques (PCF) par rapport aux fibres conventionnelles.

II. Fibre optique conventionnelle

II.1. Généralités

Les fibres optiques sont des guides d'ondes diélectriques cylindriques aussi fins qu'un cheveu humain constitués de matériaux à faible perte tels que la silice fondue. Dans sa forme la plus simple, elle se compose d'un noyau central d'indice de réfraction n_1 et d'une gaine optique d'indice de réfraction n_2 , entourés de couches protectrices pour les protéger contre les dommages environnementaux et mécaniques [1]. La lumière traverse la fibre par réflexion interne totale. Ceci n'est garanti que si deux conditions sont remplies. La première condition est que le cœur et la gaine soient en matériau transparent et que l'indice de réfraction de la gaine soit inférieur à celui du cœur. La deuxième condition est d'envoyer le signal optique dans la fibre avec un angle par rapport à l'axe inférieur à l'ouverture numérique (ON) [2] :

$$ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{I.1})$$

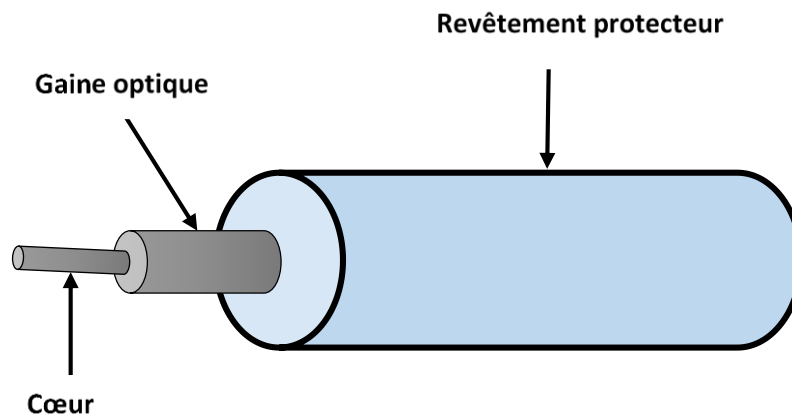


Figure I.1. Structure d'une fibre optique conventionnelle.

II.2. Propriétés

La dispersion se réfère à l'élargissement des impulsions lumineuses qui se produit lorsqu'elles voyagent à travers une fibre optique. Ce phénomène est causé par le fait que la vitesse de la lumière varie en fonction de sa longueur d'onde et de son mode de propagation. Lorsque la lumière parcourt de longues distances, de petites différences de vitesse s'accumulent, ce qui peut entraîner des erreurs de bits dans les transmissions de données.

II.2.1. Dispersion chromatique

La dispersion chromatique est un phénomène qui se produit dans les fibres optiques lorsqu'une impulsion lumineuse est transmise sur de longues distances. En raison de la dépendance de la vitesse de la lumière par rapport à la longueur d'onde et au mode de propagation, des légères différences de vitesse s'accumulent et entraînent l'étalement de l'impulsion lumineuse en largeur spectrale. La dispersion chromatique est généralement exprimée en picoseconde par kilomètre de fibre pour une largeur spectrale donnée en nanomètres. Elle résulte de deux effets : la dispersion propre au matériau de la fibre, et la dispersion liée à la forme du profil d'indice du guide. Pour minimiser ce phénomène, il est possible d'adapter le profil de la fibre [3].

La méthode moderne de quantification de la dispersion chromatique est basée sur une expansion de Taylor du nombre d'onde k (changement de phase spectrale par unité de longueur) en fonction de la fréquence angulaire ω . L'expansion est effectuée autour d'une certaine fréquence centrale ω_0 , par exemple la fréquence angulaire moyenne de certaines impulsions lumineuses [4] :

$$K(\omega)=\beta(\omega) = n(\omega)\frac{\omega}{c}=\beta_0+(\omega-\omega_0) \beta_1+\frac{1}{2}(\omega-\omega_0)^2 \beta_2+\frac{1}{6}(\omega-\omega_0)^3 \beta_3+\frac{1}{24}(\omega-\omega_0)^4 \beta_4 \quad (\text{I.2})$$

Où les termes correspondant aux différents ordres ont la signification suivante :

$\beta_0=n(\omega_0)\frac{\omega_0}{c}$ est la constante de propagation.

Le terme d'ordre 1 contient la vitesse de groupe inverse : [5]

$$\beta_1=\left[\frac{\partial \beta}{\partial \omega}\right]_{\omega=\omega_0} = \frac{1}{v_g} = \frac{1}{c} \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega}\right) \quad (\text{I.3})$$

Le terme du second ordre (quadratique) contient la dispersion du second ordre ou dispersion du délai de la vitesse de groupe [4] :

$$\beta_2=\left[\frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2}\right]_{\omega=\omega_0} = \frac{\omega}{c} \frac{d^2 n}{d\omega^2} = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad (\text{ps}^2/\text{km}) \quad (\text{I.4})$$

β_3 et β_4 sont les coefficients de dispersion d'ordres supérieurs 3 et 4. Si le coefficient β_2 de dispersion d'ordre 2 est très petit, les coefficients d'ordre 3 et 4 ne sont pas négligeables.

Le paramètre de dispersion $D_c(\lambda)$ est exprimé en picosecondes par nanomètres par kilomètres (Ps/nm/km) [5].

$$D_c(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2} - \frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (\text{I.5})$$

II.2.2. Dispersion modale

Ce phénomène se produit uniquement dans les fibres optiques multimodes. Cela est dû au fait que chaque mode de propagation possède une vitesse caractéristique différente à travers la fibre. En d'autres termes, les rayons lumineux qui se propagent dans la fibre à des angles différents se déplacent à des vitesses différentes, ce qui entraîne un étalement des impulsions lumineuses au fil du temps. Plus le nombre de modes de propagation est élevé, plus l'étalement des impulsions est important.

En conséquence, les impulsions lumineuses qui contiennent plusieurs modes se propagent à des vitesses différentes, ce qui provoque leur étalement temporel. Les impulsions lumineuses à bande passante étroite, comme les impulsions laser, sont particulièrement affectées par la dispersion modale car elles contiennent une large gamme de fréquences ou de longueurs d'onde. Pour réduire la dispersion modale, les fibres monomodes sont souvent utilisées car elles n'ont qu'un seul mode de propagation, ce qui élimine la variation des vitesses de propagation.

Cependant, les fibres monomodes sont plus coûteuses et plus difficiles à fabriquer que les fibres multimodes, qui sont souvent utilisées dans les réseaux locaux et les courtes distances de transmission de données.

Des techniques de correction numérique de la dispersion, telles que la dispersion compensée par la fibre, ont également été développées pour minimiser l'impact de la dispersion modale dans les réseaux à fibres optiques multimodes [6].

II.2.3. Dispersion intermodale de polarisation

La dispersion des modes de polarisation (PMD) est un phénomène qui se produit dans les fibres optiques où les différents états de polarisation de la lumière se propagent à des vitesses différentes, ce qui entraîne un élargissement des impulsions et une dégradation de la qualité du signal. Ce phénomène est dû à la combinaison de la biréfringence et les perturbations aléatoires de la structure de la fibre.

La dispersion intermodale de polarisation est généralement plus faible que la dispersion modale et chromatique, mais elle doit être prise en compte lors de la conception des réseaux de fibres optiques à haute capacité et de haute qualité.

Des dispositifs et algorithmes spécialisés peuvent être utilisés pour compenser les effets de la dispersion des modes de polarisation et améliorer la qualité de transmission du signal optique. Il s'agit notamment de contrôleurs de polarisation, de compensateurs et d'égaliseurs adaptatifs qui ajustent les états de polarisation afin de minimiser l'impact de la PMD.

En fin de compte, la compréhension et la gestion de la dispersion intermodale sont essentielles pour assurer une transmission efficace et fiable de l'information dans les réseaux de fibres optiques multimodes [6].

II.2.4. Atténuation

La perte de fibre peut également être appelée atténuation de la fibre optique ou perte d'atténuation, qui mesure la quantité de rayons lumineux perdus entre l'entrée et la sortie. Les facteurs causant la perte des fibres sont divers, tels que l'absorption de matériaux intrinsèques, les courbures, les pertes sur les connecteurs, etc.

Les pertes dans la fibre optique peuvent être classées en pertes intrinsèques et pertes extrinsèques en fonction des caractéristiques intrinsèques de la fibre ou des conditions de fonctionnement. Les pertes intrinsèques des fibres optiques consistent en perte d'absorption, de dispersion et perte de diffusion causées par les défaillances structurales. Les pertes de fibres optiques extrinsèques incluent les pertes d'épissage, pertes de connexion et pertes de courbure [7].

Pour résumer toutes ces pertes et atténuations qui existent au sein d'une fibre optique, voici un schéma récapitulatif :

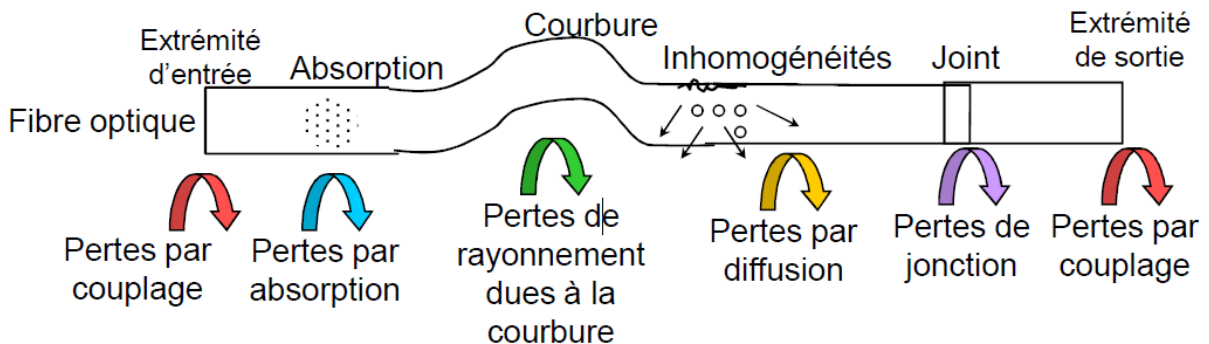


Figure I.2. Différentes pertes dans une fibre optique [3].

II.3. Naissance d'une nouvelle catégorie des fibres optiques

En raison de leur ample portée industrielle et de leur grande diversité d'applications, les fibres optiques ont considérablement évolué au fil du temps, atteignant des performances complexes. Depuis les années 1980, elles sont devenues des composants essentiels dans les réseaux de télécommunication. Par exemple, grâce aux différents choix de profil d'indice de réfraction, de nouvelles possibilités ont été offertes aux fibres, permettant la création de modèles innovants tels que les fibres à double gaine pour les amplificateurs et les lasers dopés aux terres rares, ainsi que les fibres à faible dispersion chromatique et haut débit pour les communications longues distances [8]. Ces avancées ont donné naissance à une nouvelle génération de fibres optiques, basées sur des cristaux photoniques, grâce aux recherches réalisées par le groupe d'optoélectronique de l'université de Bath (Royaume-Uni) en 1996.

III. Fibre à cristaux photoniques

III.1. Cristaux photoniques

III.1.1. Propriétés de base

En fait, les cristaux photoniques artificiels s'inspirent de la nature. Par conséquent, les structures naturelles peuvent avoir les mêmes propriétés que les cristaux photoniques artificiels. En effet, les couleurs vives de certaines espèces par exemple (ailes et élytres d'insectes, écailles de poissons et de reptiles, plumes d'oiseaux, nacre, etc.) sont généralement dues à la présence des structures très complexes et périodiques.

En 1987, les travaux d'Eli Yablonovitch et Sajeev John ont proposé pour la première fois le concept de « cristaux photoniques » dans le but d'inhiber l'émission spontanée de la lumière. Le premier cristal photonique a été fabriqué en 1991 [9] et ils sont nommés des cristaux en raison de leurs périodicités et leurs diélectriques photoniques qui agissent sur la lumière.

Les cristaux photoniques sont des matériaux macroporeux dotés de propriétés intéressantes, notamment optiques. Ils sont des arrangements réguliers de la matière à l'échelle correspondant approximativement à la longueur d'onde de la lumière visible [10], c'est-à-dire de l'ordre de plusieurs centaines de nm.

Ce sont des microstructures périodiques de matériaux diélectriques ou métalliques créées pour la modification de la propagation des ondes électromagnétiques de la même manière que les potentiels électriques périodiques dans les dispositifs semi-conducteurs en affectant le mouvement des électrons par créer des bandes d'énergie autorisées et interdites. Dans cette structure, il n'y a pas de mode de propagation d'onde électromagnétique (EM) dans une certaine plage de fréquences ou de longueurs d'onde, elle est donc considérée comme une bande interdite [11].

Les cristaux photoniques peuvent empêcher le flux d'une certaine gamme de longueurs d'onde dans une direction ou dans toutes les directions et offrent donc la possibilité de guider, de confiner et de piéger la lumière dans une cage [12].

Les cristaux photoniques peuvent être fabriqués en tant que cristaux photoniques unidimensionnels [1D], bidimensionnels [2D] et tridimensionnels [3D] montrés dans La figure (I.3).

Dans un cristal photonique [1D], la périodicité de modulation de l'indice de réfraction se produit dans un seul axe, tandis que les variations de l'indice de réfraction (n) sont uniformes dans les deux autres directions de la structure. De même, dans les cristaux photoniques à deux et trois dimensions, la modulation périodique de l'indice de réfraction se produit dans deux et trois axes respectivement. Les exemples simples de cristaux photoniques [1D], [2D] et [3D] sont respectivement le réseau de Bragg (c'est la forme la plus simple : miroir de Bragg), la fibre à cristal photonique et le pieu des cristaux bidimensionnels [12].

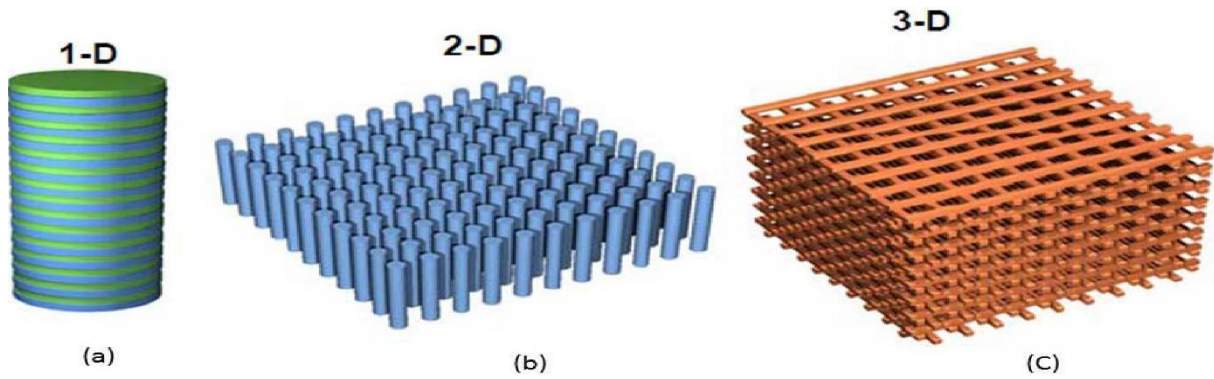


Figure 1.3. Le principe des arrangements pour des cristaux photoniques unidimensionnels (1D)(a), bidimensionnels (2D)(b) et tridimensionnels (3D)(c) [4].

Plusieurs applications sont inspirées de la diversité des propriétés des cristaux photoniques parmi elles : le démultiplexage en longueur d'onde pour la séparation des ondes ultra-courtes, le filtrage, le guidage de la lumière, les coupleurs...etc [9].

Donc l'utilisation des cristaux photoniques serait plus rentable dans la fabrication des composants de systèmes de télécommunication puisque sont plus petits que les composants électriques, et donnent des meilleures performances aux équipements avec des tailles et prix réduits.

Les composants et équipements basés sur les cristaux photoniques seraient également plus résistants et moins délicates aux radiations électromagnétiques [13].

III.1.2. Types des Cristaux photoniques

III.1.2.a. Les cristaux photoniques 1D

Les cristaux photoniques unidimensionnels (1D) sont des matériaux à bandes interdites photoniques qui sont relativement simples à fabriquer. Ils présentent une permittivité diélectrique constante dans deux directions, tandis que dans la troisième direction, cette permittivité varie périodiquement. Ces structures sont composées de deux couches alternées de matériaux homogènes avec des valeurs différentes de permittivité ϵ . Lorsque la lumière les traverse, elle subit une réflexion partielle et une transmission partielle, et les différents déphasages qui en résultent dépendent de la longueur d'onde et provoquent des interférences destructives ou constructives. Les interférences constructives génèrent des ondes réfléchies qui entraînent des réflexions totales [15]. Ces structures sont utilisées depuis longtemps en optique pour fabriquer des miroirs sans perte (miroirs de Bragg) et des filtres [14].

III.1.2.b. Les cristaux photoniques 2D

Un cristal photonique bidimensionnel 2D présente une modulation périodique de la permittivité selon deux directions de l'espace et uniforme dans la troisième direction. Les propriétés optiques de ces structures dépendent largement de la polarisation des ondes électromagnétiques. Plusieurs mécanismes sont adaptés dans la réalisation des cristaux

photoniques 2D, parmi eux : le placement d'une tige diélectrique dans l'air ou dans un autre milieu diélectrique alors qu'il faut un contraste d'indice de réfraction suffisamment grand pour ouvrir une large bande interdite. Aussi un BIP 2D peut également inclure un ensemble de trous percés dans un diélectrique, c'est le principe de fabrication des fibres optiques micro-structurées [14].

'Les réponses optiques de ces structures dépendent de la polarisation et peuvent ne pas posséder une bande interdite complète. On parle d'une bande interdite complète lorsque la structure interdit la propagation pour toutes les directions dans le plan de la périodicité, quelle que soit la polarisation' [14].

III.1.2.c. Les cristaux photoniques 3D

Les cristaux photoniques tridimensionnels (3D) possèdent des constantes diélectriques qui varient périodiquement dans les trois directions de l'espace. Cette périodicité de l'indice optique conduit à l'émergence de bandes interdites, où le comportement des photons dans les cristaux peut être autorisé ou interdit en fonction de la gamme de fréquences utilisée.

Il est évident que les photons ne peuvent pas se propager à travers le cristal dans n'importe quelle direction ou à n'importe quelle énergie. L'idée d'une bande interdite dans les trois directions, créant une interdiction de propagation dans tout l'espace et agissant comme un réflecteur parfait pour toutes les directions d'incidence, a été explorée par Eli Yablanovitch. Son objectif initial était de supprimer l'émission spontanée dans les semi-conducteurs afin d'améliorer leur efficacité. En 1987, il a proposé une structure avec une périodicité spatiale équivalente à la moitié de la longueur d'onde dans les trois dimensions. Grâce à cette structure, il est possible de supprimer complètement l'émission spontanée en introduisant des matériaux actifs dans les cristaux photoniques. De plus, les cristaux photoniques présentent une bande interdite couvrant une plage spectrale plus large que le spectre d'émission des matériaux actifs dans un milieu uniforme [16].

III.2. Généralités sur les fibres optiques micro-structurées (FOM)

Au cours des années 1990, le groupe de recherche dirigé par Philip St. J. Russell a introduit une nouvelle classe de fibres optiques connue sous le nom de fibres à cristaux photoniques, également appelées fibres micro-structurées ou fibres trouées. Depuis lors, ces fibres ont suscité un vif intérêt au sein de la communauté scientifique en raison de leurs caractéristiques optiques exceptionnelles [17]. Elles présentent des propriétés telles qu'une biréfringence élevée, une grande non-linéarité, une résistance à l'usure et à la corrosion, ainsi qu'une perte de confinement très faible par rapport aux autres fibres optiques conventionnelles [18].

Le développement des fibres à cristaux photoniques a ouvert la voie à de nombreuses applications potentielles et leur exploration continue a contribué à une meilleure compréhension de leurs propriétés uniques. Ces fibres offrent de nouvelles possibilités pour la transmission de

signaux optiques et la manipulation de la lumière, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives dans divers domaines de la recherche et de l'industrie.

III.3. Structure des fibres optiques micro-structurées

Les fibres micro-structurées sont construites à partir d'une structure de petits cylindres d'air repartis sur toute sa longueur [19] ; ces fibres sont caractérisées par un arrangement périodique de microstructures qui forment la gaine autour d'un cœur défectueux solide ou creux [12] peut être en silice ou constitué d'air.

La distance entre les centres de deux trous adjacents noté Λ (pas ou pitch) et le diamètre des trous d sont les paramètres qui caractérisent l'arrangement des PCFs et ajustent leurs propriétés optiques. Alors qu'un paramètre d/Λ qui est le rapport de proportion d'air constitué dans la fibre peut être défini ; dont la diminution des pertes est achevée au sein de la gaine. L'arrangement des trous peut constituer une matrice triangulaire, hexagonale ou aléatoire [14].

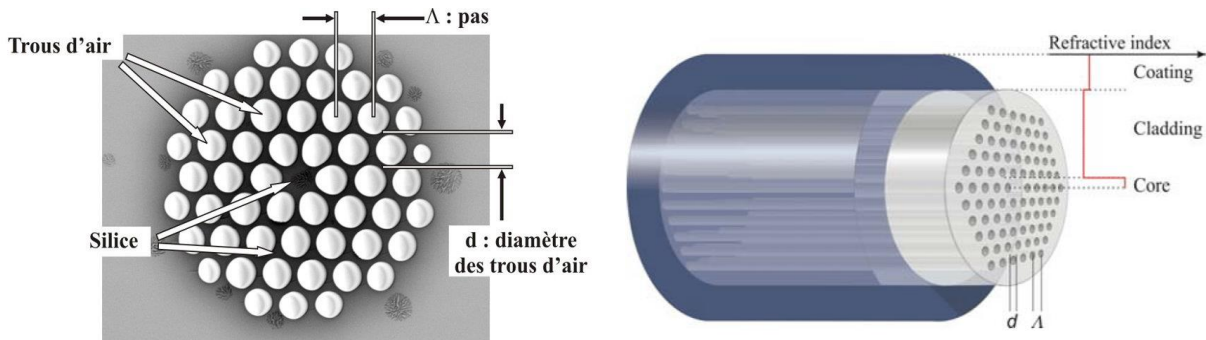


Figure I.4. Section transversale d'une fibre à cristaux photoniques [14].

La région au centre de la fibre appelée cœur permettant le guidage de la lumière selon des mécanismes classifiés en 2 groupes :

- Le premier groupe englobe les fibres micro-structurées dans lesquelles la lumière est guidée par l'effet d'indice moyen.
- Le deuxième groupe rassemble les fibres micro-structurées dont la lumière est confinée par l'effet de la bande interdite photonique.

III.3.1. Types des FOM

Les fibres à cristaux photoniques peuvent être classées en deux catégories :

- Les fibres à guidage dans un milieu d'indice supérieur à celui de la gaine.
- Les fibres à guidage dans un milieu d'indice inférieur à celui de la gaine.

Ces deux catégories sont généralement subdivisées en sous-catégories pour répondre à des besoins spécifiques.

- Pour les fibres guidées dans des milieux à haut indice de réfraction, également appelées fibres micro-structurées à cœurs pleins, différentes sous-catégories existent :
 - Les fibres "monomodes infinies" à grande aire effective, qui permettent une propagation monomode efficace sur une large plage de longueurs d'onde.

- Les fibres "grande ouverture numérique" avec des cœurs de grandes dimensions, qui sont utilisées lorsque des faisceaux lumineux à large angle doivent être couplés ou lorsque la collecte maximale de lumière est requise.
- Les fibres à "forte non-linéarité" avec un très petit noyau, qui supportent une densité de puissance élevée dans leur cœur et sont adaptées à des applications telles que la génération d'harmoniques optiques et l'amplification optique à faible seuil [20].

Ces sous-catégories de fibres à cristaux photoniques offrent des fonctionnalités spécifiques qui répondent aux exigences diverses dans le domaine des fibres micro-structurées.

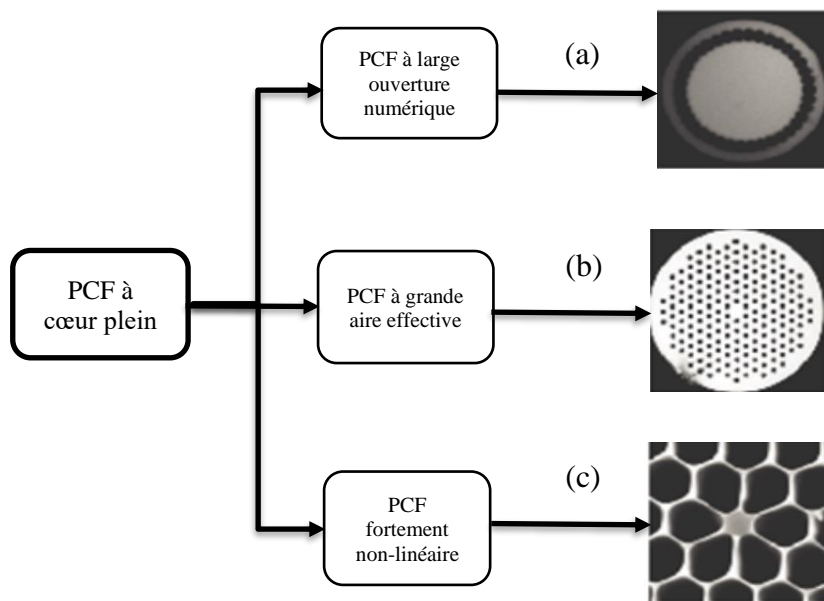


Figure I.5. Types des FOM à cœur plein [20].

(a) fibre à large ouverture numérique $d_{\text{cœur}}=200 \mu\text{m}$.

(b) première fibre à grande aire effective, $d=1 \mu\text{m}$, $\Lambda=11 \mu\text{m}$.

(c) fibre non-linéaire $d=1.5 \mu\text{m}$, $\Lambda= 2 \mu\text{m}$.

- Pour les fibres guidées dans un milieu à faible indice de réfraction (fibres micro-structurées à cœurs creux), on distingue généralement :
 - Les fibres dites "de Bragg" composées de couches concentriques d'indices de réfraction différents
 - Les fibres "creuses" dans lesquelles la lumière est contenu et guidé dans les surfaces [20].

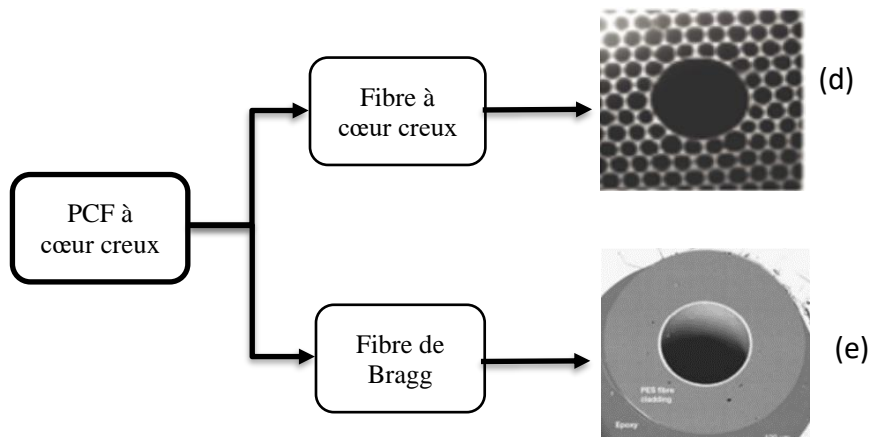


Figure I.6. Type des FOM à cœur creux [20].

(d) fibre à cœur creux $d=9.7 \mu\text{m}$, $d \text{ microstructure}=50 \mu\text{m}$,
 (e) fibre de Bragg $d=350 \mu\text{m}$

III.3.2. Principe du guidage des FOM

Dans une fibre optique conventionnelle, le processus de réflexion interne totale est utilisé pour guider la lumière à travers la fibre, car l'indice de réfraction du cœur est supérieur à celui de la gaine. La lumière est donc confinée à l'intérieur du cœur [12].

Mais dans le cas des fibres à cristaux photoniques à cause de sa géométrie particulière, le guidage peut s'effectuer en deux mécanismes différents :

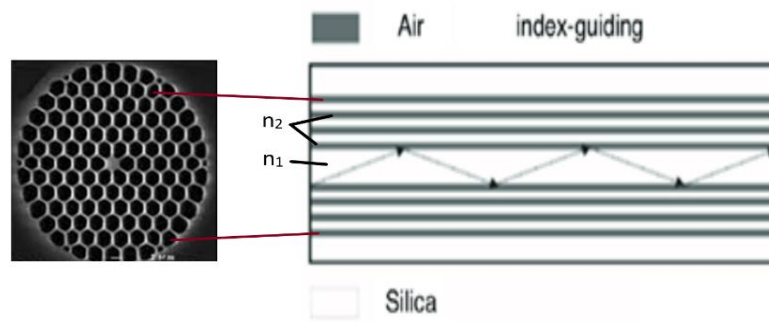
Dans les fibres à cristaux photoniques à cœur plein, où la lumière est confinée dans une région à indice de réfraction plus élevé, la réflexion interne totale modifiée est exploitée, ce qui est similaire au processus de guidage des fibres optiques conventionnelles (RTIM).

Par contre, dans les fibres à cœur creux, lorsque la lumière est confinée dans une région d'indice de réfraction inférieur à celui de la zone environnante, le mécanisme de bande interdite photonique est donc utilisé (BIP).

III.3.2.a. Guidage par réflexion interne totale modifiée

Les fibres à cœurs pleins, également appelées « holey fibers », présentent de nombreuses similitudes avec les fibres à saut d'indice standard utilisées dans les télécommunications. Cependant, elles se distinguent des fibres conventionnelles par le fort contraste d'indice de réfraction transverse [14]. La fibre à cristal photonique (PCF) se compose d'un noyau de silice solide entouré d'une gaine de cristal photonique avec un réseau hexagonale, triangulaire ou aléatoire de trous d'air. Ces fibres guident la lumière à travers une forme de réflexion interne totale (TIR) connue sous le nom de "réflexion interne modifiée".

Dans une PCF à cœur solide, le cœur est constitué de silice pure, tandis que la gaine contient un cristal photonique avec de nombreux pores qui abaissent l'indice de réfraction du cœur [21]. Cet indice de réfraction modifié de la gaine, qui est inférieur à celui du cœur, permet à la lumière de se déplacer en utilisant le phénomène de réflexion interne totale modifiée. Les dimensions des lobes des modes d'ordre supérieur sont plus petites, ils peuvent donc se glisser entre les mailles. Lorsque le rapport d/Λ , c'est-à-dire la fraction de remplissage d'air de la gaine du cristal photonique augmente, les modes successifs d'ordre supérieur seront piégés. Une conception géométrique de la section transversale de la fibre garantit donc que seul le mode fondamental est guidé [12].



Guidage par effet RTIM

n_1 : indice du silice=1.45 n_2 : indice d'air=1

Figure I.7. Guidage par réflexion interne totale modifiée [22].

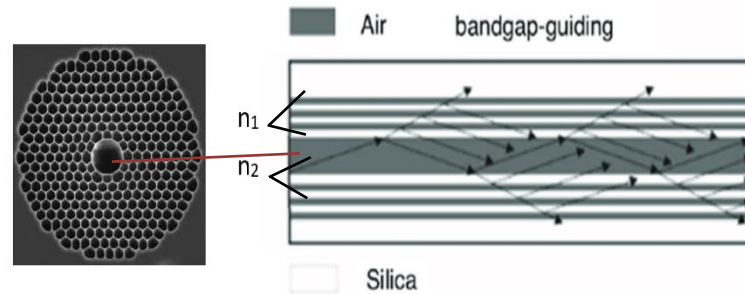
III.3.2.b. Guidage à bande interdite photonique (BIP)

Les fibres à bandes interdites photoniques, également connues sous le nom de "hollow fibers", représentent une avancée majeure en termes de guidage de la lumière. Elles permettent de créer un cœur avec un indice de réfraction plus faible que celui de la gaine. La particularité de ces fibres réside dans la présence de micro-canaux d'air répartis de manière périodique le long de la fibre, entourant un cœur rempli d'air ou d'un gaz compatible avec la silice. Cette structure unique permet de guider efficacement la lumière grâce à l'effet de la bande interdite photonique [12].

Une BIP est une bande spectrale dans laquelle les ondes de longueurs d'onde contenues dans cette bande ne peuvent pas se propager à travers la structure. La résonance latérale au sein de la gaine de la fibre qui maintient la lumière au cœur (la zone centrale de la fibre) et assure son confinement est l'effet recherché dans cette structure. La propagation se produit dans une direction axiale invariante [20].

La taille et la répartition des trous permettent de déterminer la bande de longueur d'onde et les angles d'incidence pour lesquels la lumière est réfléchie, ce qui définit les caractéristiques de la bande interdite photonique. Ainsi, la propagation dans l'air limite les pertes intrinsèques

dues à l'interaction lumière/matière permettant l'injection de très grandes densités de puissance sans phénomènes de claquage du matériau. Ces fibres sont ainsi principalement employées pour la transmission de signaux avec un minimum de distorsion, ou pour des applications nécessitant de fortes puissances guidées [12].



Guidage par effet BIP

n_1 : indice du silice=1.45

n_2 : indice d'air=1

Figure I.8. Guidage par bande interdite photonique [22].

III.4. Propriétés des fibres optiques micro-structurées

III.4.1. Fréquence normalisée

Parmi les propriétés spécifiques aux PCFs, leur capacité à offrir de nombreux degrés de liberté. Ainsi, le bon choix des diamètres des trous et les distances entre eux d'une fibre à cœur haut indice permettent d'obtenir une propagation monomode sur une large gamme de longueurs d'ondes.

Puisque le caractère monomode des PCF se base sur ses deux principales paramètres d et Λ , il faut donc citer la condition de l'apparition du premier mode d'ordre supérieur pour un guide d'onde,

(Le premier mode d'ordre supérieure veut dire la longueur d'onde de coupure λ_c en dessous de laquelle le guide devient multimode)

Pour cela, on définit le paramètre V_{eff} , appelé fréquence normalisée, qui s'écrit [22] :

$$V_{eff} = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{coeur} - n_{gaine}} > 2.405 \quad (I.6)$$

Où : n_{coeur} et n_{gaine} représentent respectivement l'indice de réfraction du cœur et de la gaine et a : représente le rayon du cœur de la fibre.

Dans cette expression, le paramètre V_{eff} est supérieur à 2.405 lorsque la longueur d'onde est inférieure à la longueur d'onde de coupure ($\lambda < \lambda_c$).

Il est clair qu'avec la diminution de la longueur d'onde guidée jusqu'à atteindre la longueur d'onde de coupure λ_c la fibre conventionnelle devient nécessairement multimode delà on constate que la différence d'indice cœur/gaine dépendant de la longueur d'onde.

La fibre perd donc son caractère monomode lorsque la longueur d'onde diminue [22].

La condition d'apparition du premier mode d'ordre supérieur dans le cas des PCFs s'écrit comme suit [23]:

$$V_{eff} = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{coeur} - n_{geff}} > 2.405 \quad (I.7)$$

n_{geff} représente l'indice effectif de la gaine.

Aux courtes longueurs d'onde, la lumière évite les trous d'air et l'indice effectif de gaine augmente. Par contre lorsque la longueur d'onde augmente, le champ électromagnétique guidé par une FMAS s'étend de plus en plus dans la gaine. La lumière pénètre alors plus fortement dans les trous, provoquant ainsi une chute de l'indice effectif de la gaine [23].

III.4.2. Surface effective

Il est nécessaire de vérifier la condition physique suivante pour que le guidage de la lumière s'effectue par des réflexions totales.

La constante de propagation β soit comprise entre kn_{silice} et β_{FMS}

$$\beta_{FMS} < \beta < Kn_{silice} \quad (I.8)$$

Avec Kn_{silice} la constante de propagation maximale possible pour un mode avec un cœur dopé silice.

β_{FMS} est la constante de propagation du mode de gaine de plus faible ordre [20].

En outre un autre terme peut décrire la non linéarité (n_{NL}) dû à la faible dépendance de la constante diélectrique de la silice par rapport à l'intensité de la lumière guidée. La non-linéarité étant proportionnelle à l'intensité lumineuse, elle peut être décrite comme suit [25] :

$$n_{NL} = \frac{n_2 P}{A_{eff}} \quad (I.9)$$

Où n_2 est une propriété matérielle du verre, P est la puissance du signal optique se propageant dans la fibre et A_{eff} est la surface effective. Afin d'obtenir une faible non-linéarité, comme c'est le cas pour les liaisons par fibre optique longue distance et haut débit, la fibre doit avoir une surface effective aussi grande que possible. En revanche, pour obtenir une non-linéarité élevée, par exemple dans les applications de commutation, la surface effective de la fibre doit être aussi petite que possible. Les fibres à cristaux photoniques peuvent être conçues pour atteindre l'une ou l'autre de ces zones effectives [25].

III.4.3. Dispersion chromatique

Les premières études sur la dispersion dans les fibres à cristaux photoniques ont été réalisées à l'aide du modèle de l'indice effectif, mais l'application de ce modèle aux propriétés modales telles que la dispersion a été critiquée car elle ne correspondait pas à l'expérience. Le modèle de l'indice effectif ne prend pas en compte les complexités de la structure de PCF et ne peut donc pas être utilisé pour prédire les valeurs de la constante de propagation ou de la dispersion [24].

Plusieurs techniques numériques sont aussi achevées pour étudier les caractéristiques de dispersion de la fibre trouée par exemple Kim et al ont utilisé la méthode de Galerkin avec des fonctions trigonométriques comme fonctions de base pour l'étude de la dispersion en explorant

l'application de la fibre trouée en tant que fibre compensatrice de dispersion, Shen et al ont conçu des fibres à cristaux photoniques qui présentent une dispersion négative importante allant jusqu'à - 474,5 Ps/nm/km, Ils ont utilisé une combinaison de solveur vectoriel pour les propriétés modales et une approche de mise à l'échelle pour les caractéristiques de dispersion. Aussi Guan et ses collègues ont utilisé une méthode d'éléments de frontière sous forme vectorielle rigoureuse, formulée en termes de champs magnétiques transversaux, pour déterminer les relations de dispersion des modes guidés dans des fibres trouées avec une ou deux couches de trous. Cucinotta et al ont utilisé la méthode des éléments finis vectoriels pour analyser les effets des variations géométriques des trous sur les propriétés de propagation des fibres à trous. Ils ont conclu que de petites perturbations entraînent des variations critiques dans la polarisation des modes, mais modifient très peu les caractéristiques de dispersion [25,26].

La formule de la dispersion résultante est :

$$D_c = - \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2} \quad (I.10)$$

Où c : est la vitesse de la lumière dans le vide et λ la longueur d'onde de fonctionnement.

La somme de la dispersion du guide d'ondes et la dispersion du matériau résulte une dispersion chromatique ou une dispersion totale. Également nommé la pulsation optique ω dû à une réponse d'une interaction d'une onde électromagnétique avec un diélectrique [15,26].

$$D_c \approx D_{mat} + D_{guide} \quad (I.11)$$

La dispersion du matériau est utilisée pour fabriquer la fibre, alors que la dispersion du guide d'onde peut être modifiée en changeant les paramètres du guide d'onde, La dispersion du matériau peut être négligeable lorsque la longueur d'onde devient constante et que la dispersion D_c soit constitué dans la partie réelle de l'indice de réfraction effectif n_{eff} [26].

La longueur d'onde pour laquelle la valeur de la dispersion chromatique est nulle, est appelée longueur d'onde du zéro de dispersion (ZDW : Zero Dispersion Wavelength). Elle correspond au point d'inflexion de la courbe $\lambda = f(n)$.

La zone telle que $\lambda < ZDW$ correspond au régime de dispersion normale et la zone pour laquelle $\lambda > ZDW$ correspond au régime de dispersion anormale.

L'une des propriétés attirantes de ces PCFs est la liberté de conception. Le fait que la géométrie et la disposition des trous d'air dans la section soient sélectionnables alors il permet de prédéfinir le profil de dispersion de la fibre. Ainsi, en étudiant la conception de la fibre (d et Λ), de nouveaux profils de courbe de dispersion peuvent être envisagés en fonction de la structure voulue pour une telle application [22].

III.4.4. La biréfringence

La biréfringence peut se produire dans la plupart des fibres malgré leur structure régulière. Il existe deux sources principales d'anisotropie dans les fibres micro-structurées qui éliminent la dégénérescence des deux modes de polarisation et faire déclencher une biréfringence de phase. La première consiste à briser la symétrie de la fibre, volontairement ou non, et la seconde détermine la présence éventuelle de contraintes anisotropes au sein des matériaux constitutifs de la fibre, qui sont associées au tenseur de réfraction qui en donne les caractéristiques.

La biréfringence résulte de la différence d'indice de réfraction effectif pour deux polarisations orthogonales d'ondes lumineuses. Elle peut être représentée par la relation suivante [22] :

$$B = |\text{Re}(n_{eff}^x - n_{eff}^y)| \quad (\text{I.12})$$

Avec : n_{eff}^x et n_{eff}^y sont respectivement les indices des deux états de polarisation correspondant aux deux directions orthogonales x et y de la fibre.

Re : représente la partie réelle de la différence des indices effectifs.

De nos jours, la qualité de fabrication des PCFs permet de réduire cette biréfringence résiduelle à des valeurs de l'ordre de 10^{-5} .

III.4.5. Perte de confinement

Les fibres à cristaux photoniques offrent des avantages tels que le comportement monomode et la dispersion anormale sur une large gamme de longueurs d'onde. Cependant, leur performance est finalement limitée par l'affaiblissement dû à la courbure.

Dans une fibre optique standard, un rayon de courbure donné entraîne un bord de perte important à une longueur d'onde maximale, où des pertes de courbure massives sont observées. En revanche, les fibres à cristaux photoniques présentent à la fois un bord de perte de courbure à longue longueur d'onde et un bord de perte de courbure à courte longueur d'onde, où des pertes similaires sont observées. Ce bord de perte à courte longueur d'onde est expliqué par le modèle de l'indice effectif : lorsque la longueur d'onde diminue, l'indice effectif de la gaine se rapproche de celui du cœur, facilitant ainsi la fuite de lumière à travers la gaine, en particulier en cas de courbure.

Le bord de perte à courte longueur d'onde est inversement proportionnel à la longueur d'onde et proportionnel au pas de la fibre. Cette relation limite la taille du cœur des fibres à cristaux photoniques. Pour des facteurs de remplissage élevés, il est possible de concevoir une perte de flexion inférieure à celle des fibres optiques conventionnelles entre les arêtes de perte [24].

III.5. Fabrication des FOM

L'un des aspects les plus importants de tout dispositif est son processus de fabrication. Les fibres optiques conventionnelles sont généralement fabriquées en réalisant une préforme de fibre, puis en étirant cette fibre à l'aide d'un four à haute température dans une tour. Différentes techniques de dépôt en phase vapeur, par exemple : le dépôt chimique en phase vapeur modifié, le dépôt axial en phase vapeur et le dépôt de vapeur extérieur, sont utilisées pour la fabrication de fibres circulaires symétriques. Ainsi, le dépôt peut être contrôlé d'une manière très précise seulement dans la direction radiale sans modifications significatives des méthodes.

Dans les PCFs, plusieurs paramètres comme la viscosité, la gravité et la tension de surface sont très importants car ces paramètres dus à une surface beaucoup plus grande dans une

géométrie micro-structurée, et au fait que de nombreuses surfaces sont proches du cœur de la fibre ce qui rend la tension de surface relativement plus importante. Il faut citer aussi que les composants du cœur et de la gaine des fibres optiques conventionnels ayant des valeurs d'indice de réfraction similaires, qui diffèrent typiquement d'environ (1 %), par contre la conception des PCFs nécessite un contraste d'indice de réfraction beaucoup plus élevé, qui diffère peut-être de (50-100 %). Par conséquent, toutes les techniques décrites précédemment ne sont pas directement applicables à la fabrication de préformes pour les fibres optiques micro-structurées, dont la structure est plus complexe [12].

Les PCFs sont produits par un certain nombre de méthodes différentes, qui impliquent généralement de préparer une préforme macroscopique de longueur métrique avec le motif de réseau transversal souhaité et de l'étirer en microfibres tout en préservant la conception de la section transversale prévue. Voici quelques exemples de méthodes de fabrication des PCFs : l'empilage et l'étirage, l'extrusion, le moulage sol-gel, le moulage par injection et le perçage. [21].

Deux méthodes sont les plus utilisées : technique d'empilage et étirage et technique d'extrusion.

III.5.1 Technique d'empilage et d'étirage

La méthode la plus courante est la technique d'empilement et d'étirage « stack and draw », conçue par Knight et al, qui est relativement rapide, propre, peu coûteuse et flexible [21].

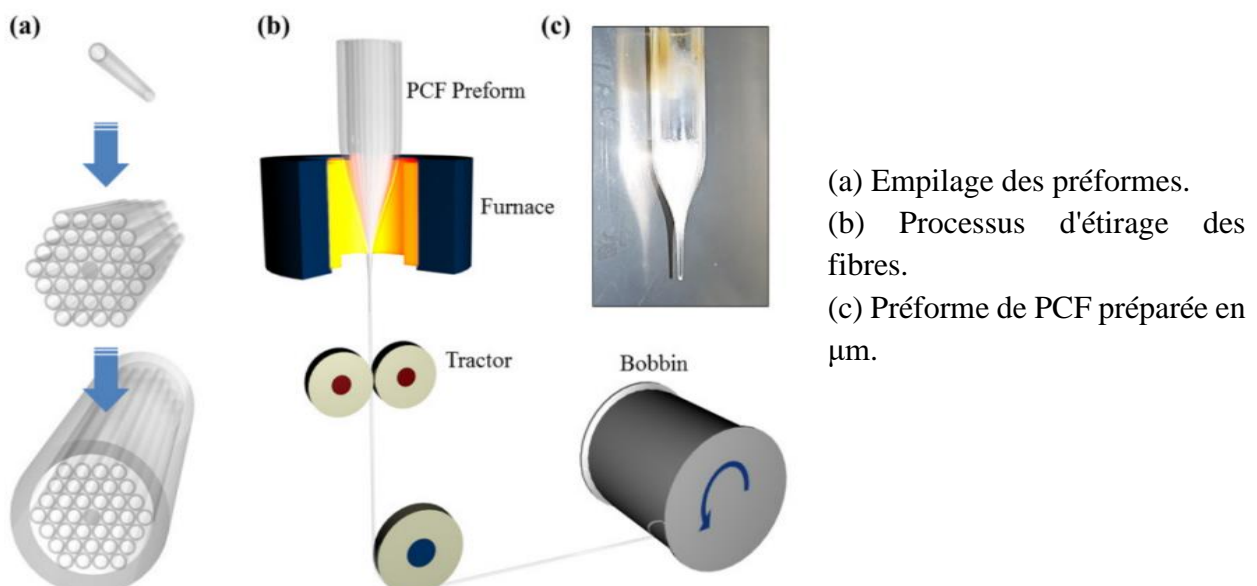


Figure I.9. Méthode de fabrication d'une PCF schématisée « empilement et étirage » [21].

Le processus d'empilement et d'étirage illustré dans la Figure I.9 résume la fabrication des PCFs dont leurs préformes sont réalisées en empilant un certain nombre des tubes et des tiges de silice capillaire pour former la structure air-silice souhaitée. Cette façon permet un haut niveau de flexibilité de conception, puisque le contrôle de la forme et de la taille du noyau, ainsi que du profil d'indice dans toute la région de la gaine est possible.

Après le processus d'empilage, les capillaires et les tiges seront maintenus ensemble par des fils fins et fusionnés au cours d'un processus d'étirage intermédiaire. Au cours duquel les cannes de la préforme seront étirées. Ensuite, la préforme sera étendue vers le bas sur une tour d'étirage de fibres conventionnelle, ce qui allongera considérablement sa longueur, tout en réduisant sa section transversale d'un diamètre de (20 mm à 80-200 μm).

Afin de contrôler soigneusement la taille des trous d'air au cours du processus d'étirage, il est utile d'appliquer à l'intérieur de la préforme une légère surpression par rapport à l'environnement, et de régler correctement la vitesse d'étirage. La température ne doit pas dépasser 19000 $^{\circ}\text{C}$, car la tension superficielle peut entraîner l'effondrement du trou d'air.

Enfin, les PCFs seront recouverts d'une gaine protectrice standard qui permet une manipulation robuste des fibres.

Les variations de la dynamique, la température et la pression sont les paramètres importants qui doivent être contrôlés avec précision pendant la fabrication de la PCF.

La méthode d'empilement exige une manipulation très soignée et un contrôle de dimensions des trous d'air, de leurs positions et de leurs formes dans les fibres qui rend la préforme beaucoup plus complexe que celui des fibres optiques conventionnelles [12].



Figure I.10. Inspection d'une préforme pour une fibre cristalline photonique. L'image a été aimablement fournie par le Centre de recherche en optoélectronique de l'Université de Southampton [17].

III.5.2 Processus de fabrication par extrusion

Des préformes de silice et d'air ont également été extrudées, permettant la formation de structures difficilement réalisables par empilement des capillaires.

Dans le cas de l'extrusion, un matériau est poussé ou tiré à travers un outil appelé filière qui est utilisé pour former des matériaux de la section transversale souhaitée.

Le processus d'extrusion est appliqué aux verres différents de la silice qui ne sont pas aisément disponibles sous forme de tubes.

Dans ce procédé de fabrication, un verre fondu est poussé à travers une matrice contenant un motif de trous conçu de manière appropriée.

L'extrusion permet d'étirer la fibre directement à partir du verre en vrac, à l'aide d'une tour d'étirage, et de produire presque n'importe quelle structure, cristalline ou amorphe. Elle fonctionne pour de nombreux matériaux, y compris les polymères et les verres composés. La préforme structurée de 16 mm de diamètre extérieur et le tube d'enveloppe sont extrudés. La préforme est réduite à l'échelle sur une tour d'étirage de fibres pour obtenir une canne d'environ 1,6 mm de diamètre par le procédé de cannage. La canne est insérée dans le tube d'enveloppe. Cet ensemble est étiré jusqu'à la fibre finale [12].

III.6. Avantages des FOM

- Large plage de transmission

Elles permettent la transmission de la lumière sur une plage de longueurs d'onde plus large que les fibres optiques conventionnelles.

- Flexibilité de la conception

Leur conception est flexible et peut être modifiée pour répondre aux besoins spécifiques des applications, telles que la transmission de données à haut débit, les capteurs, etc.

- Grande aire effective

Les fibres micro-structurées ont une grande aire effective, ce qui signifie qu'elles peuvent supporter un grand nombre de modes de propagation de la lumière, ce qui les rend utiles pour les applications à large bande et les lasers à fibre.

- Forte non-linéarité

Les fibres micro-structurées ont une forte non-linéarité, ce qui les rend utiles pour les applications de traitement de signal optique, tels que la génération de fréquences harmoniques et la conversion de longueur d'onde.

- Faible dispersion

Elles ont une dispersion relativement faible, ce qui permet une transmission de signal à longue distance avec une faible atténuation et une faible distorsion.

- Résistance à la courbure

Les fibres micro-structurées sont plus résistantes à la courbure que les fibres optiques conventionnelles, ce qui permet une installation plus facile et des applications plus flexibles [27].

III.7. Applications des FOM

Après leur première invention pratique en 1996, les PCFs sont rapidement devenus une plate-forme établie pour des applications dans les environnements universitaires et industriels. Leur capacité unique à confiner la lumière d'une manière bien plus polyvalente que les fibres optiques conventionnelles a facilité l'expansion du monde à multiples facettes des PCFs pour couvrir non seulement l'optique non linéaire, mais aussi de nombreux autres domaines disparates tels que l'interférométrie, l'émission des faisceaux, la science des lasers, l'optique quantique, la détection, et bien d'autres encore.

Plus récemment, un grand intérêt a été porté à la conception, la fabrication et à l'application de PCF spécialisés avec d'autres avantages de fibres optiques spéciales dotées de propriétés inaccessibles et exotiques bien que les capacités des fibres standards [28] dont les applications de ces dernières sont limitées dans des domaines plus pointus tel que : la transmission d'information en télécommunication, la diagnostique des problèmes de santé tel que le traitement de certaines maladies en médecine, aussi l'application des fibres optiques dans le concept d'éclairage en muséographie et architecture et aménagement d'espaces d'agrément public et domestiques[15].

Les caractéristiques uniques des fibres à cœur creux comprennent de faibles non-linéarités, une faible perte de lumière et une possibilité de remplir les cœurs d'air avec des gaz et des liquides. C'est pourquoi on envisage de les utiliser dans de nombreuses applications, notamment les capteurs, la transmission d'impulsions à haute puissance et l'utilisation médicale.

De même que les nombreuses applications de fibres à cœurs creux sont à un stade de développement relativement précoce, les applications de fibres à cœur plein sont plus mûres. Ces conceptions présentent également de nouvelles propriétés, telles que la possibilité d'utiliser des fibres à codage unique sans fin, à grande surface modale et hautement non linéaires. Pour les fibres actives à double gaine, la construction de gaines secondaires avec des trous d'air au lieu des polymères conventionnels à faible indice confère à la PCF un avantage important en termes de gestion de la puissance [29].

En outre, les PCFs avec leurs propriétés de fabrication presque parfaite ont également fait le saut dans d'autres domaines jouant un rôle clé dans le développement [28], parmi ces applications commémores :

- Des lasers à fibres

Les PCFs peuvent supporter des puissances optiques élevées sans subir de dommages, ce qui les rend adaptés aux systèmes laser de forte puissance. Ils sont utilisés dans les applications industrielles d'usinage laser, de découpe laser et de traitement des matériaux à cause de leur large bande passante et leur guidage de lumière amélioré.

- Génération de super-continuum

Les PCFs sont largement utilisées pour la génération de super-continuum, où un spectre de lumière intense et à large bande est généré en lançant un laser à bande étroite dans la PCF.

Les sources de super-continuum trouvent des applications dans la spectroscopie, la tomographie par cohérence optique (OCT) et les télécommunications.

- L'optique non linéaire

Les fibres à cristaux photoniques permettent des interactions non linéaires efficaces grâce aux propriétés uniques de leur guide d'ondes. Elles sont utilisées dans des applications telles que la conversion de fréquence, l'amplification paramétrique et l'oscillation paramétrique optique.

- L'optique quantique

Les PCFs sont utilisés dans les expériences d'optique quantique et de traitement quantique de l'information. Elles peuvent être utilisées pour la génération de paires de photons par conversion paramétrique spontanée, la manipulation d'états quantiques et les protocoles de communication quantique [8].

- Des amplificateurs à fortes puissances

Un amplificateur de puissance basé sur des fibres à cristaux photoniques (PCF) est un type d'amplificateur optique qui utilise les propriétés uniques des PCFs pour amplifier les signaux optiques. Dont un amplificateur d'appoint désigne un étage d'amplification qui fournit une puissance d'amplification supplémentaire pour compenser la perte de signal dans un système de transmission optique à longue distance. Globalement, un amplificateur basé sur la PCF offre une meilleure performance d'amplification, une plus grande couverture de la bande passante et des capacités de gestion de la dispersion. Ces caractéristiques le rendent bien adapté aux applications des systèmes de transmission optique longue distance, aux réseaux WDM denses et à d'autres scénarios où l'amplification du signal et la préservation de la qualité sont essentielles [29].

- Tomographie

Les fibres micro-structurées jouent un rôle important dans les techniques d'imagerie biomédicale telles que l'endoscopie, la microscopie confocale et la microscopie multi-photonique. Les propriétés uniques des PCF, telles que leur haute résolution spatiale et leur guidage flexible de la lumière, en font des outils précieux pour la recherche biomédicale et le diagnostic [31].

- Communications optiques

Les PCFs peuvent être conçus pour répondre aux exigences spécifiques des systèmes de communication optique. Ils offrent des avantages tels qu'une faible perte, une grande largeur de bande et une ingénierie de la dispersion, ce qui est bénéfique pour la transmission longue distance, la communication de données à grande vitesse et les systèmes de multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) [8].

- Des outils de détection et métrologie

Par rapport aux capteurs conventionnels, les capteurs à fibres optiques micro-structurées présentent de nombreux avantages et sont donc idéaux pour surveiller les paramètres environnementaux. Parmi ces avantages : légèreté, petite taille, haute sensibilité, immunité aux interférences électromagnétiques, potentiel de multiplexage et capacité de mesure sans contact. Ces avantages leur permettent de mesurer un grand nombre de facteurs et de grandeurs tels que les déplacements, les vibrations, la température, la pression, l'humidité, les ondes acoustiques et les grandeurs biochimiques...en influant les propriétés du guidage du PCF en modifiant les caractéristiques des éléments introduits (modification de l'indice effectif des modes liée à une variation de la température par exemple) [22].

IV. Conclusion

Les fibres à cristaux photoniques présentent des propriétés uniques telles que la taille des trous, la distance entre eux, la caractéristique de coupure et de dispersion ainsi que le guidage sans perte des ondes dans une région centrale à faible indice, ainsi que la présence d'effets non-linéaires, ce qui en fait un outil de choix pour une grande variété d'applications. Dans ce chapitre, nous avons étudié les différentes structures de base des fibres à cristaux photoniques, ainsi que leurs propriétés fondamentales et structurelles en les comparant aux fibres conventionnelles. Nous avons également souligné les avantages de ces fibres, notamment leur capacité à accueillir un gaz, un liquide ou une particule dans les canaux d'air, offrant ainsi un lieu d'interaction optimal entre l'onde propagée et le milieu à analyser. Grâce à ces propriétés, il est possible de concevoir des capteurs optiques très sensibles, qui pourront être explorés davantage à l'avenir. En somme, les fibres à cristaux photoniques représentent une classe de fibres optiques prometteuses pour un large éventail d'applications.

Bibliographie :

- [1] A.Lazar ,C. Tliba, S.Ben Arous, ‘Source large bande destinée aux systèmes de communications optiques multi-longueur d’ondes’, Mémoire de master , Université Echahid Hamma Lakhdar d’El-Oued , 2021.
- [2] Younes ZOUINE, ‘contribution par la simulation système à l’étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant la technique CDMA’, Thèse de Doctorat, Université de LIMOGES, octobre 2005.
- [3] techno-science.net/glossaire-definition/Fibre-optique-page-4.html, consulté le : 09 Février 2023.
- [4] rp-photonics.com/chromatic_dispersion by Dr Rüdiger Paschotta, consulté le : 09 Février 2023.
- [5] OUADAH Mohammed Chamse eddine, ‘Etude des Fibres Microstructurées Compensatrices de Dispersion Chromatique’, Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2017
- [6] [wiki.metropolia.fi/display/Dispersion in Fiber Optics](http://wiki.metropolia.fi/display/Dispersion+in+Fiber+Optics), consulté le : 11 Février 2023.
- [7] community.fs.com/fr/blog/understanding-fiber-loss-what-is-it-and-how-to-calculate-it, consulté le : 13 Février 2023.
- [8] photoniques.com/articles/photon/pdf/2013/03/photon201365p47.pdf, consulté le : 12 Février 2023.
- [9] MALACHE Hadjer , MAHI Amel, ‘Nouvelles Structures Des Démultiplexeurs En Cristaux Photoniques 2D Pour Les systèmes Très Hauts Débits’, mémoire de master, Université de Tlemcen, 2018.
- [10] sciencedirect.com/topics/chemistry/photoniccystal#:~:text=Photonic%20crystals%20are%20periodic%20dielectric,et%20al.%2C%202003, consulté le : 11 Février 2023.
- [11] techno-science.net/definition/3267.html, consulté le : 17 Février 2023.
- [12] researchgate.net/publication/332277935_An_Overview_of_Photonic_Crystal_Fiber_PCF
- [13] physique.unice.fr/sem6/20132014/PagesWeb/PT/Cristaux/Applications.html, consulté le : 17 Février 2023.
- [14] BENAÏSSA Fatima, ‘Etude et Simulation de la Propagation des Ondes Electromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques’, mémoire de magister, Université de Tlemcen, 2012/2013.
- [15] KESSAB Bader Eddin, KAROUI Afif, ‘Etude et analyse des propriétés optiques des fibres optiques microstructurées (circulaire, hexagonal et carré)’, mémoire de master, Université kasdi Merbah – Ouargla , juin 2022.

- [16] Abderrahmane BELKHIR, Lynda DEHBI, 'Étude des cristaux photoniques 3D sur guides ridges de faible largeur en niobate de lithium', mémoire de master, Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, septembre 2015 .
- [17] rp-photonics.com/photonic_crystal_fibers.html, consulté le 18 Février 2023.
- [18] Photonics 2018, 5, 26; doi:10.3390/photonics5030026
- [19] <http://physique.unice.fr/sem6/20132014/PagesWeb/PT/Cristaux/Applications.htm#section6>, consulté le : 25 Février 2023.
- [20] BOUTELLI Khaoula, BENTOUATI Soumia, 'Étude et conception des fibres optiques microstructurée', mémoire de master, Université KASDIMERBAH OUARGLA, juin 2021.
- [21] researchgate.net/publication/244989444_Fabrication_of_photonic_crystal_fibers
- [22] BOUFENAR Rabah, 'Amélioration de la Sensibilité des Capteurs par l'utilisation des Fibres à Cristaux Photoniques', thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf M'sila, juin 2018.
- [23] Ambre PEYRILLOUX, 'Modélisation et caractérisation des fibres microstructurées air/silice pour application aux télécommunications optiques', thèse de doctorat, Université de LIMOGES, juillet 2003.
- [24] Kim,J.I, 'Analysis and applications of microstructure and Holy optical fibers', Virginia Polytechnic Institute and State University, (2003).
- [25] Lizier,J, 'Applications of Holy Fiber Splicing, Spot-size conversion and coupling', School of Electrical and Information Engineering, University of Sydney, Sydney, Australia,(2000).
- [26] ijraset.com/files/serve.php?FID=11455
- [27] researchgate.net/publication/340657463_Advantages_and_Disadvantages_of_Using_New_Types_of_Photonic_Fibers_in_Fiber-Optic_Gyros
- [28] mdpi.com/2073-4352/11/7/739, consulté le : 02 Mars 2023.
- [29] spie.org/news/1371-photonic-crystal-fiber-characteristics-benefit-numerous-applications?SSO=1, consulté : le 05 Mars 2023.
- [30] Russell,P, 'Photonic crystal fibers', science 299(5605) :358-362, 2003.
- [31] clicours.com/la-fibre-a-cristaux-photonique/, consulté le : 08 Mars 2023.

Chapitre II

Les capteurs optiques

I. Introduction

Les capteurs électriques sont depuis des décennies le mécanisme standard de mesure des phénomènes physiques et mécaniques. Malgré leur ubiquité, ces capteurs présentent des limitations inhérentes, telles que la perte de transmission et la sensibilité aux interférences électromagnétiques (bruit), qui rendent leur utilisation difficile, voire impossible, dans de nombreuses applications. La détection par fibre optique représente une excellente solution à ces défis car elle utilise la lumière à la place de l'électricité et des fibres optiques à la place des fils de cuivre.

La technologie des capteurs à fibres optiques, à son tour, a souvent été stimulée par le développement et la production des masses des composants pour soutenir les industries. La baisse des prix des composants et l'amélioration de la qualité ont renforcé la capacité des capteurs à fibre optique à supplanter les capteurs traditionnels pour la rotation, l'accélération, la mesure des champs électriques et magnétiques, la température, la pression, l'acoustique, les vibrations, la position linéaire et angulaire, la déformation, l'humidité, la viscosité, les mesures chimiques et toute une série d'autres applications de capteurs. Dans les premiers temps de la technologie des capteurs à fibres optiques, la plupart des capteurs qui ont connu un succès commercial étaient carrément destinés à des marchés où la technologie des capteurs existants était marginale ou insuffisante. Les avantages inhérents aux capteurs à fibre optique, notamment leur légèreté, leur très petite taille, leur passivité, leur faible puissance et leur résistance aux interférences électromagnétiques ; leur grande sensibilité ; leur largeur de bande ; leur résistance à l'environnement ; et la robustesse environnementale, ont été largement utilisés pour compenser leurs principaux inconvénients majeurs que sont le coût élevé et la méconnaissance de l'utilisateur final.

La PCF présente une géométrie avantageuse par rapport à la fibre optique standard. En général, la PCF a un cœur creux ou un cœur solide autour duquel des trous d'air sont répartis selon différents schémas. La lumière est guidée par la répartition de ces trous d'air. De plus, la propagation de la lumière peut être manipulée en modifiant la distribution des trous d'air ainsi qu'en modifiant l'environnement. Cette nature unique de la PCF attire beaucoup d'attention pour ces applications de détection depuis les deux dernières décennies. Les capteurs basés sur les PCFs sont devenus le centre d'intérêt de nombreux groupes de recherche en raison de leurs précieux avantages et du fait qu'ils peuvent être utilisés dans des applications de mesure. Aussi elles peuvent être utilisées dans un environnement dangereux et bruyant, à haute température et tension, à champ électromagnétique élevé et dans des environnements explosifs, même dans le but d'effectuer un contrôle à distance pour des fins de télédétection.

Dans ce chapitre nous allons présenter brièvement les capteurs électriques, le principe de fonctionnement des capteurs optiques, leurs types et caractéristiques, ainsi leurs évolutions vers des capteurs basés sur les fibres micro-structurées qui donnent plus d'opportunités aux utilisateurs par rapport au capteurs électriques classiques à cause de ses aspects avantageux.

II. Capteurs classiques

II.1. Définition

Un capteur est un dispositif qui permet de transformer une grandeur physique observée, telle que la température, la pression ou l'humidité, en une grandeur physique utilisable, comme l'intensité électrique, la tension ou la charge. Le capteur est un instrument de mesure autonome capable d'afficher ou de stocker des données d'un système sans nécessiter d'autres instruments ou équipements.

On fait souvent la confusion entre un capteur et un transducteur [1,2], le capteur est composé d'un ou de plusieurs transducteurs, qui convertissent une grandeur physique en une autre, et d'un conditionneur, qui transforme le signal de sortie en signal électrique. Les capteurs sont généralement incorporés dans un instrument de mesure qui affiche ou stocke les données.

Cet instrument a pour but d'étudier un événement particulier qui présente une information traduite en signal transporté sur un support physique. Cette information peut être logique (deux états opposés), numérique (valeurs discrètes) ou analogique (valeurs continues) [3,4].

Le capteur est caractérisé par sa fonction : $S = f(m)$. (II.1)

S est la grandeur de sortie ou la réponse du capteur.

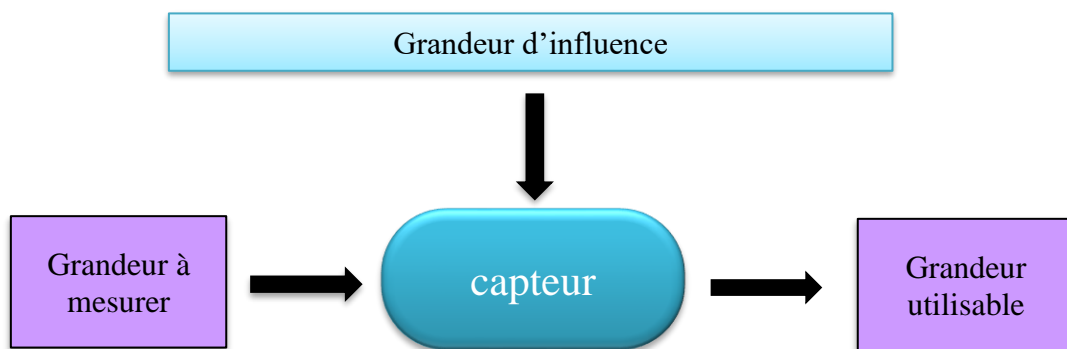


Figure II.1. Schéma représentatif d'un capteur.

II.2. Grandeurs d'influence

Ces grandeurs peuvent perturber le signal à cause de leurs caractères défavorables qui influent les grandeurs de sortie.

Les grandeurs d'influence sont généralement liées à l'environnement du capteur, parmi elles :

- La température (c'est la grandeur d'influence la plus gênante).
- La pression.
- Les chocs mécaniques et ondes acoustiques.
- Le temps d'opération.
- Position et fixation du capteur.
- L'alimentation électrique du capteur.
- L'humidité, le climat environs.
- Les perturbations électromagnétiques.
- Les rayonnements nucléaires.

II.3. Types de grandeur physique

- Mécanique : force, masse, débit...
- Thermique : température, flux thermique...
- Electrique : courant, tension, charge, impédance, diélectrique...
- Magnétique : champs magnétique, perméabilité, moment magnétique...
- Radiatif : lumière visible, infrarouge, micro-onde...
- Chimique : humidité, gaz, pression, hormone... [2].

II.4. Types des capteurs

II.4.1. Capteur actif

Les capteurs actifs sont des dispositifs qui transforment directement le mesurande physique, tel que la température, la pression ou l'humidité, en une grandeur électrique utilisable, telle que l'intensité électrique, la tension ou la charge. Cette transformation se fait sans l'utilisation de composants externes ou d'autres instruments de mesure, ce qui permet une mesure plus directe et plus précise de la grandeur physique.



Figure II.2. Schéma représentatif d'un capteur actif.

II.4.2. Capteur passif

Les capteurs passifs sont des dispositifs qui produisent une variation d'impédance en réponse à une grandeur physique mesurée. Contrairement aux capteurs actifs, les capteurs passifs nécessitent une source d'énergie électrique pour mesurer et traiter le signal électrique. Cette source d'énergie peut être fournie par des équipements externes ou intégrée au capteur lui-même, selon l'application spécifique.

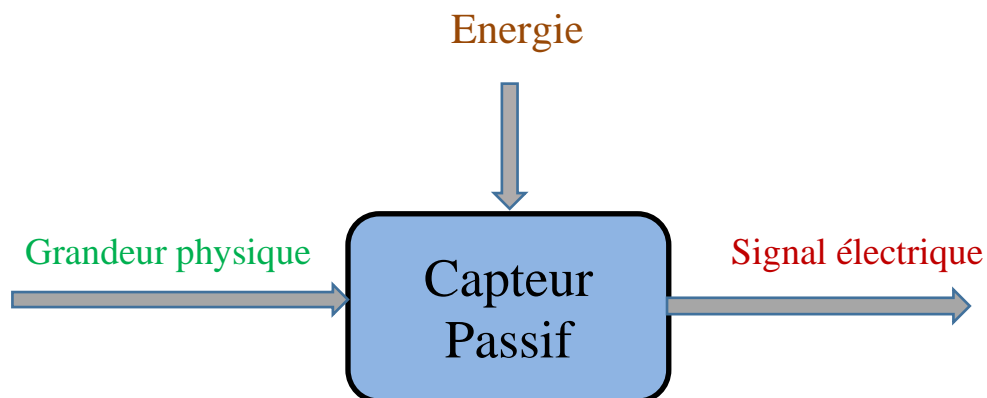


Figure II.3. Schéma représentatif d'un capteur passif.

II.4.3. Capteur composite

Un capteur composite est un dispositif qui combine un corps d'épreuve avec un capteur actif ou passif pour mesurer une grandeur physique spécifique. Le corps d'épreuve est soumis à une grandeur physique, telle que la pression, la température ou l'humidité, et produit une

grandeur physique non électrique appelée mesurande secondaire. Cette grandeur est ensuite traduite en une grandeur électrique par le capteur actif ou passif, qui fournit un signal électrique utilisable pour la mesure et le traitement des données. Les capteurs composites sont largement utilisés dans une variété d'applications, notamment dans les industries de l'aéronautique, de l'automobile et de l'environnement, pour mesurer des grandeurs physiques critiques [5].

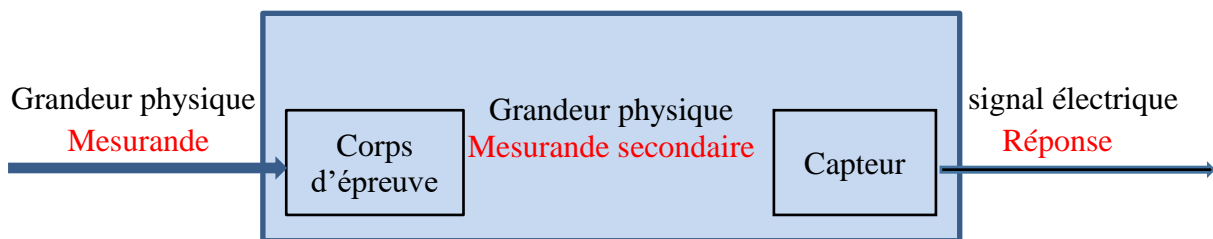


Figure II.4. Schéma représentatif d'un capteur composite.

III. Capteurs à base des fibres optiques

III.1. Généralités

Un capteur à fibre optique est un dispositif dans lequel les informations sont générées dans le chemin optique par la réaction de la lumière à la grandeur à mesurer avant d'être transmises à un récepteur optique via une ou plusieurs fibres optiques [6].

Les capteurs à fibre optique sont des dispositifs diélectriques. Ils ne nécessitent pas de câbles électriques pour fonctionner et sont techniquement idéaux pour travailler dans des milieux hostiles ou des environnements corrosifs pour des applications de télédétection. Les composants de base d'un capteur à fibre optique sont une source optique, un transducteur et un récepteur. Les diodes lasers et/ou les DEL sont souvent utilisés comme source optique dans ces dispositifs de détection. Une fibre optique (monomode ou multimode), des fibres dopées et/ou fibres micro-structurées sont utilisés comme transducteur (cœur du capteur). À la sortie du système de détection, un photodétecteur est utilisé pour détecter la variation du signal optique causée par la perturbation physique du système [7].

Le fonctionnement d'un capteur à fibre optique repose sur l'utilisation de la lumière pour mesurer un paramètre physique. Tout d'abord, un faisceau lumineux est émis par une source lumineuse et envoyé à travers une fibre optique. Ce faisceau lumineux interagit ensuite avec un paramètre externe qui est mesuré au niveau du modulateur, entraînant une modification des

propriétés optiques de la lumière telles que l'intensité, la longueur d'onde, la fréquence, la phase ou l'état de polarisation. En conséquence, le faisceau lumineux est modulé en un signal optique qui est transmis à travers une autre fibre optique vers un dispositif optoélectronique et un modulateur pour obtenir les paramètres de mesure souhaités. La fibre optique joue un rôle clé dans ce processus, à la fois en tant que moyen de transmission du faisceau lumineux et en tant que modulateur optique qui permet de mesurer le paramètre physique.

L'élément optique sensible à la grandeur à mesurer peut-être la fibre elle-même ou bien un élément inséré dans le chemin optique [8].

Dans les systèmes de capteurs à fibre optique les paramètres optiques qui peuvent être modulés sont l'amplitude, la phase, la couleur (signal spectral) et l'état de polarisation. Les méthodes de modulation optique des capteurs sont les suivantes :

- Le changement d'amplitude : est lié à la transmission, à l'absorption, à la réflexion ou à la diffusion du signal optique. Actuellement, les réseaux de Bragg (FBG) et les réseaux de fibres à longue période (LPFG) sont utilisés comme têtes de capteur dans les systèmes de capteurs à fibres optiques. Les paramètres optiques qui peuvent être modulés pour ces capteurs sont la longueur d'onde, la transmission, la réflexion et l'indice de réfraction, qui sont associés à l'environnement de perturbation.
- Le changement de phase : est associé à la variation de la fréquence optique et de la longueur d'onde.
- Le changement de couleur : est proportionnel aux variations d'absorption, de transmission, de réflexion ou de luminescence du signal optique, tandis que la polarisation est liée à la biréfringence de déformation [7].

III.2. Différents type des capteurs optiques

III.2.1. Les capteurs intrinsèques

Ces capteurs utilisent directement une fibre optique comme matériau sensible (tête de capteur) et comme support pour transporter le signal optique contenant des informations sur l'environnement perturbé à mesurer. Ils fonctionnent par modulation directe de la lumière guidée dans la fibre optique. La lumière ne quitte pas la fibre, sauf à l'extrémité de détection (la sortie) du capteur. Dans les capteurs intrinsèques, la variable d'intérêt (perturbation physique) doit modifier les caractéristiques de la fibre optique pour modifier les propriétés de la lumière transportée par la fibre. Ces capteurs peuvent utiliser des configurations interférométriques, des réseaux de Bragg (FBG), des réseaux de fibres optiques à longue période (LPFG), ou des fibres spéciales (fibres dopées) conçues pour être sensibles à des perturbations spécifiques [9].

III.2.2. Les capteurs extrinsèques

Dans un capteur extrinsèque, la fibre optique est simplement utilisée pour guider la lumière vers et depuis l'endroit où se trouve la tête du capteur optique.

La tête de capteur est externe à la fibre optique et est généralement basée sur des composants optiques miniatures, qui sont conçus pour moduler les propriétés de la lumière en réponse aux changements dans l'environnement en ce qui concerne les perturbations physiques d'intérêt. Ainsi, dans cette configuration, une fibre transmet l'énergie optique à la tête du capteur. Cette lumière est ensuite modulée de manière appropriée et est couplée en retour via une seconde fibre, qui la guide vers le détecteur optique. C'est le principe d'un capteur à transmission optique basé sur l'intensité [9].

III.3. Architecture des capteurs optiques

III.3.1. Le transducteur

Le transducteur est l'élément sensible à la grandeur physique à mesurer, modulant le signal émis par la source lumineuse pour déterminer la différence entre la valeur de cette grandeur et la valeur prise par l'une des grandeurs caractéristiques de la lumière [10].

III.3.2. Émetteur de lumière

Il est composé d'une ou plusieurs sources lumineuses, cohérentes ou non, pulsée impulsionnelles ou continues. Les diodes électroluminescentes (DEL), les diodes laser (DL) et les diodes sont les plus couramment utilisées.

III.3.3. Récepteur de lumière

Un récepteur de lumière est un dispositif optoélectronique qui permet de convertir le signal optique en signal électrique. La plupart des récepteurs de lumière sont constitués d'une photodiode, qui convertit la lumière en courant électrique, suivi d'une étape d'amplification électronique pour augmenter le signal, et d'une chaîne de traitement de signal pour extraire l'information utile. En fonction de la configuration du système, il peut être nécessaire d'utiliser plusieurs photodiodes pour capter la lumière sur différentes longueurs d'onde ou à partir de différentes fibres optiques.

III.3.4. Guide d'onde optique

Ce sont des fibres optiques (monomode ou multimode) qui peuvent être standard ou spécialement conçue pour effectuer une mesure dans un contexte particulier. On trouve aussi des démodulateurs, des équipements annexes (coupleurs, polariseur, connecteurs optiques, etc.) [10].

III.4. Caractéristiques des capteurs optiques

Différents paramètres peuvent caractériser un capteur, nous énumérons ci-dessous les plus importants :

III.4.1. La sensibilité

Lors de la conception de tout type de capteurs, la sensibilité est généralement considérée en premier lieu. Elle représente la capacité du capteur à détecter une variation de la grandeur d'entrée et à produire une variation correspondante de la grandeur de sortie. La sensibilité est donc déterminante pour la précision et la résolution de la mesure effectuée par le capteur [11].

$$S = \frac{\Delta s}{\Delta e} \quad (\text{II.2})$$

Δs : la variation de la grandeur de sortie.

Δe : la variation de la grandeur d'entrée.

III.4.2. La résolution

Il s'agit de la plus petite variation du niveau du mesurand que le capteur peut détecter de manière fiable ; comme la limite de détection, la résolution est également liée à la sensibilité. [5] Aussi il existe une relation adverse entre la résolution et la rapidité de la mesure. Alors que pour améliorer la résolution d'un système il est préférable de l'étudier numériquement. En revanche, le système qui présente un temps de mesure plus long a des capacités plus faibles pour la suivie des phénomènes rapides, par exemple la cinétique de réaction des biomolécules. Donc la résolution d'un système dépend généralement de l'ensemble des instruments de mesure qui peuvent générer un bruit comme : les photodétecteurs, la stabilisation thermique du transducteur [3].

III.4.3. La sélectivité (spécificité)

La sélectivité (ou spécificité) est un paramètre important pour les capteurs car elle mesure leur capacité à réagir et à répondre exclusivement au mesurand cible. En d'autres termes, un capteur sélectif ne devrait pas donner de réponse à des paramètres qui pourraient potentiellement affecter sa mesure, autres que la mesurand que l'on souhaite mesurer. Un capteur possédant une sélectivité parfaite ne donnera aucune réponse à ces paramètres perturbateurs. Cela est particulièrement important pour des applications de mesure très précises ou des environnements de mesure complexes où des interférences peuvent affecter la qualité des mesures [5].

III.4.4. La répétabilité

Elle définit la capacité du capteur à reproduire la même réponse lorsqu'il est soumis de manière répétée à la même grandeur de mesurand dans le temps [5].

III.4.5. L'étalonnage

L'étalonnage permet de schématiser la relation directe entre la grandeur d'entrée (la mesurande) et la grandeur électrique de sortie. C'est une courbe en régime permanent qui ne donne pas d'informations sur les caractéristiques transitoires du capteur [3].

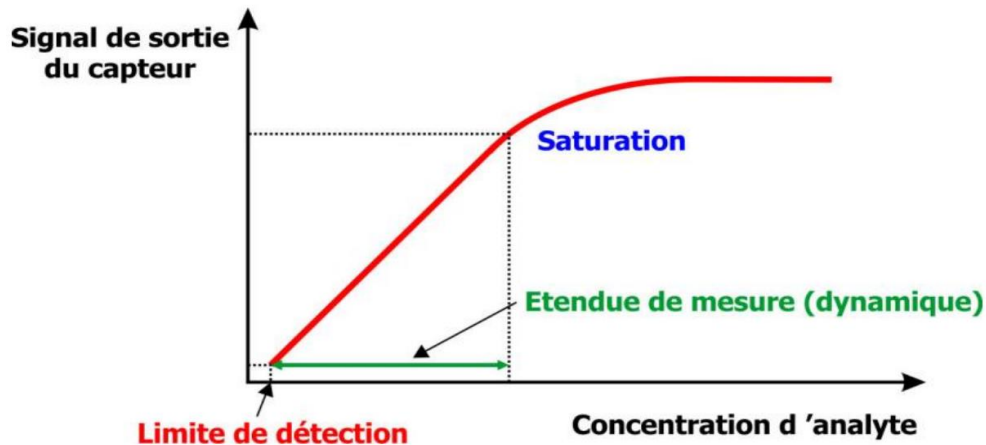


Figure II.5. Courbe d'étalonnage d'un capteur [3].

IV. Capteurs à base des fibres à cristaux photoniques

IV.1. Généralités

Contrairement à la structure classique de la fibre optique conventionnelle constitué d'une gaine et d'un cœur, la fibre à cristaux photoniques (PCF) se compose d'un cœur solide ou creux entourée par plusieurs trous d'air répartis de façon homogène ou hétérogène [12].

Les caractéristiques attrayantes de ces fibres, telles que leur forte non-linéarité, leur haute biréfringence, leur dispersion contrôlable, leur capacité à varier selon l'échantillon étudié, ainsi que la propagation de la lumière dans leurs trous d'air qui peuvent être modifiés en fonction de leur taille et de leur emplacement, ou remplis par des solutions liquides ou gazeuses pour une interaction directe avec l'échantillon, ont suscité de nombreuses applications améliorées dans le domaine de la détection par fibre optique [13].

Au cours des dernières années les capteurs à fibre optique basé sur les PCFs généralement employé pour la détection physique, chimique ou biomédical sont devenu un point de recherche largement consulté à cause de leurs petite taille, sensibilité, robustesse et ses capacités d'être utilisés dans de nombreuses situations défavorables. Les petites dimensions physiques des sondes de détection à base des PCFs les rendent adaptées à la fixation ou à l'insertion dans un système. Ils peuvent être utilisés dans un environnement dangereux et bruyant ou à haute température, haute tension, champ électromagnétique élevé et des environnements explosifs [14].

IV.2. Historique

En raison des progrès technologiques L'apparition des capteurs à base des PCFs a été proposé avec l'amélioration des performances des fibre micro-structurées et l'adaptation de leurs caractéristiques en les rendent flexibles pour tout type de détection.

1997 : Proposition d'un capteur à PCF monomode avec l'application d'un filtrage de mode.

1999 : Capteur à PCF avec un noyau d'air à bande interdite photonique a été introduit avec une structure de guide d'ondes.

2000 : Capteur à PCF à haute biréfringence a été introduit avec différents diamètres de trous d'air et un noyau asymétrique ou deux axes orthogonaux.

2000 : Génération d'un Super continuum dans la PCF en raison de la longueur d'onde à dispersion nulle et de la non-linéarité élevée.

2002 : Introduction de la dispersion Ultra-aplati dans les capteurs à PCF

2003 : Le capteur à fibre de Bragg avec un cœur d'air et de la silice a vu le jour.

2004 : Nouveau capteur PCF à base de chalcogénure à un coefficient d'indice de réfraction extrêmement élevé.

2005 : La PCF à réseau de Kagomé a été développé ce qui contribue à des meilleures détections du gaz [15].

IV.3. Type des capteurs à PCF

IV.3.1. Capteurs physiques

Il est en effet très intéressant d'utiliser des capteurs optiques pour la détection, le contrôle et le suivi à distance de divers paramètres, notamment pour les capteurs physiques qui mesurent des grandeurs telles que le déplacement, la flexion, la charge transversale, la torsion et la température. Ces capteurs sont très utiles pour le contrôle de l'état des structures civiles comme les bâtiments, les tunnels et les barrages, qui nécessitent une surveillance continue afin de prévenir les états anormaux et les accidents et ainsi éviter les pertes humaines et matérielles.

D'autres capteurs physiques, tels que les capteurs de pression et d'indice de réfraction, sont également largement utilisés dans des domaines tels que la médecine, la biochimie, la surveillance et la télédétection. Par exemple, les capteurs de pression sont utilisés pour mesurer la pression artérielle dans le corps humain, tandis que les capteurs d'indice de réfraction sont utilisés pour détecter les variations de la concentration de certains composés dans les liquides et les gaz, ce qui peut être utilisé pour le suivi de processus chimiques ou la surveillance de la qualité de l'eau et de l'air [15,16].

IV.3.2. Capteurs chimiques

Les trous d'air des fibres micro-structurées qui peuvent être rempli par des solutions chimiques sous forme de liquide, gaz ou vapeur dont chaque produit chimique a son propre indice de réfraction [17] ont donné l'opportunité aux PCF d'être utilisé dans la détection des

fuites et la densité des produits chimiques indésirables et toxiques dans le domaine d'industrie ; aussi pour

La médecine ils détectent les composants sanguins et les substances nocives présentes dans le corps et dans le domaine d'alimentation les additifs nocifs sont détectés [15].

IV.3.3. Capteurs biomédicaux

Les capteurs biomédicaux sont largement utilisés dans le domaine médical en raison de leur fiabilité et de leur haute sensibilité. Ils sont utilisés pour la détection du sang, l'hybridation de l'ADN, la détection de maladies, d'anticorps et d'antigènes, la détection d'agents pathogènes, ainsi que pour la détection du glucose, ce qui aide les médecins à suivre et diagnostiquer les maladies [15].

IV.4. Paramètres qui influent la détection

Les paramètres de fabrication de la fibre, tels que le taux de remplissage d'air, les diamètres des trous d'air et les pas entre eux, ont des effets significatifs sur les propriétés de guidage de la fibre et sur les performances des capteurs. Par exemple, une augmentation du taux de remplissage d'air peut entraîner une diminution de la dispersion, tandis qu'une diminution du diamètre des trous d'air peut augmenter la sensibilité du capteur. Les variations de ces paramètres peuvent également modifier la polarisation de la lumière guidée dans la fibre, ce qui peut avoir un impact sur les mesures effectuées avec le capteur.

IV.4.1. Effets du pas sur la détection

Les trous d'air existent dans toute la fibre qui se forment sur le fond de silice et sont organisés selon un modèle géométrique bien défini. En modifiant la distance de trou à trou, plus précisément la distance centre à centre de deux trous d'air adjacents (le pas), la sensibilité des PCF peut être améliorée. Un pas plus faible induit à un espace plus réduit entre les trous d'air congestionnés ce qui conduit à une sensibilité relative plus élevée. Ces trous d'air dirigent le champ évanescent à travers la région centrale.

IV.4.2. Effets du diamètre sur la détection

Les diamètres des trous ont un impact significatif sur la sensibilité relative de la fibre optique à cristal photonique. En modifiant ces diamètres, il est possible d'adapter la sensibilité relative du capteur. Les trous de plus grand diamètre présentent généralement une sensibilité plus élevée.

IV.4.3. Effets du taux de remplissage d'air

Le taux de remplissage de l'air est un autre paramètre de contrôle de la sensibilité relative des capteurs PCF et est le rapport entre les diamètres des trous d'air et leurs pas. En modifiant à la fois le diamètre et le pas dans un certain rapport, il existe un taux de remplissage de l'air limite qu'il est nécessaire de maintenir. La valeur limite du taux de remplissage de l'air est fixée à 0,95.

La sensibilité change considérablement en raison d'une faible variation du taux de remplissage de l'air [17].

Le taux de remplissage d'air peut être défini par l'équation suivante [17] :

$$\text{Taux de remplissage d'air} = \frac{d(\text{le diamètre})}{\Lambda(\text{le pas})} \quad (\text{II.3})$$

IV.5. Système de détection par PCF

Le principe de transduction des capteurs est de détecter avec une meilleure sensibilité des faibles variations des grandeurs détectées [18] pour des temps de détection plus courts, avec une maniabilité plus simple et des coûts de revient plus faibles ; dont Une grande variété de systèmes de détection à base des PCFs a été apparue et rapportée à ce jour parmi lesquelles on cite la détection par l'utilisation de : la bande interdite photonique, le réseau de Bragg, l'interférométrie et l'analyse spectrale [10]. Deux autres méthodes sont les plus fréquemment utilisées :

IV.5.1. Détection par l'utilisation des ondes évanescentes

L'apparition des ondes évanescentes remonte à l'année 1704, lorsque Newton a observé la réflexion totale des ondes lumineuses (couleurs) projetées sur un prisme face à une lentille de même indice [20]. Cette découverte a mis en évidence la possibilité de contrôler les ondes lumineuses en utilisant la réflexion totale, qui produit des ondes évanescentes, et a jeté les bases pour le développement de la détection par ondes évanescentes dans les fibres optiques.

La détection par l'utilisation des ondes évanescentes est un des mécanismes de détection utilisés dans les systèmes de détection à base de PCF. Cette méthode repose sur la maximisation du champ évanescent qui se propage dans la section où se trouve l'échantillon à détecter, en manipulant avec un contrôle élevé les propriétés de dispersion et de guidage d'ondes des fibres micro-structurées et les effets de leurs zones de revêtement intérieur. Les trous d'air dans les PCFs sont ainsi utilisés pour la propagation des ondes évanescentes. Cette technique permet de capter avec une meilleure sensibilité des faibles variations des grandeurs détectées pour des temps plus courts, avec une maniabilité plus simple et des coûts de revient plus faibles [19].

L'aspect physique de l'onde évanescente en optique réside dans la nécessité de garantir la continuité des champs électromagnétiques à l'interface de différents milieux optiques. L'onde évanescente est une onde de surface. Lorsqu'une onde incidente se propage le long de l'interface

dans un guide d'onde optique en suivant sa direction de propagation, l'onde évanescente se propage également dans la même direction et à la même vitesse de phase que l'onde incidente [3].

IV.5.2. Détection par la bande interdite photonique

Les fibres à cristaux photoniques peuvent être guidées selon deux mécanismes différents : un guidage par réflexion interne totale modifiée pour les PCF à cœur plein, ou pour les PCF à cœur creux.

Les PCFs à guidage par bande interdite photonique peuvent servir de capteurs en exploitant l'interaction entre les modes guidés de la lumière dans la fibre et la structure de la bande interdite photonique. Les changements dans l'environnement du PCF, tels que la température, la pression ou la concentration d'analyte, peuvent modifier les caractéristiques de propagation des modes guidés, ce qui entraîne des changements détectables dans la lumière transmise ou réfléchi. En surveillant ces changements, les capteurs à bande interdite photonique basés sur la PCF peuvent être utilisés pour diverses applications de détection [21].

IV.6. Applications des capteurs à fibres micro-structurées

La géométrie distinctive des PCFs, constituée de trous d'air ajustables et remplissable, ainsi que leurs caractéristiques, ont conduit à de nombreuses applications nouvelles et améliorées dans le domaine de la détection optique qui n'auraient jamais pu être envisagées avec des fibres optiques conventionnelles [16]. Dans cette partie, les applications de détection par PCF dans divers domaines seront expliquées.

IV.6.1. Capteur de température

Les capteurs de température à base de PCF ont été rapidement développés dans le but de produire de nouveaux détecteurs avec des caractéristiques améliorées, principalement une sensibilité et une stabilité accrues.

Ils sont utiles pour mesurer les températures dans diverses applications industrielles telles que la production de métaux de base et de verre, les zones de turbines, les lignes de laminage d'acier, les fours de toutes sortes et les installations automatisées, les équipements de soudage qui génèrent souvent des champs électriques importants perturbant les capteurs conventionnels, les industries alimentaires et de boissons ainsi que dans la transformation de la viande, le processus de fermentation et les températures des salles de stockage.

Autres applications où la mesure de la température à l'aide des PCFs est très efficace sont : les opérations de traitement à haute température, les industries chimiques et L'industrie des semi-conducteurs en particulier dans les processus de fusion, de pulvérisation et de croissance. Les industries civiles, l'aérospatiale et la défense utilisent beaucoup ce capteur pour surveiller

et contrôler l'état de leurs structures. Ce type de capteur PCFs est l'un des plus demandés sur le marché commercial en raison de leurs variétés d'applications dans des domaines très différents [16].

IV.6.2. Capteur d'indice de réfraction

L'indice de réfraction est une propriété fondamentale des matériaux dont sa mesure précise est cruciale dans de nombreuses applications. Dans les industries alimentaires par exemple, la surveillance de l'indice de réfraction fait partie du contrôle de la qualité.

Les capteurs d'indice de réfraction à FOM sont intéressants en raison de leur petite taille, leur souplesse de conception, leur immunité aux interférences électromagnétiques, leur compatibilité avec les réseaux et leur aptitude de mesures à distance. Les dispositifs à base des PCFs offrent une grande sensibilité aux variations de l'indice de réfraction du milieu environnant. La mesure de l'indice de réfraction à l'intérieur d'une PCF à noyau solide a été rapportée, où la diffusion cohérente au niveau du réseau de la gaine est utilisée pour caractériser optiquement les matériaux insérés dans la fibre dont la transition de l'eau liquide à la glace solide est caractérisée par la détermination de l'indice de réfraction [16].

IV.6.3. Capteur pour la détection des gaz

Plusieurs autres capteurs de gaz ont été presque tous basés sur la spectroscopie d'absorption à champ évanescent. Un capteur d'hydrogène a été rapporté, basé sur une PCF à cœur plein avec des trous d'air effondrés recouverts de couches minces. Les trous d'effondrement permettent d'accéder au champ évanescent qui pourrait être absorbé par des couches minces perméables au gaz.

Grâce à la mesure du coefficient de diffusion des gaz, l'acétylène et l'air ont été détectés dans une PCF à noyau solide. Des systèmes de détection de gaz tout en fibres ont été mis au point en utilisant une PCF cœur plein comme cellule à gaz, ce qui a permis d'atteindre une concentration minimale détectable [16].

IV.6.4. Capteur de pression

Ceux-ci ont une quantité physique permettant d'observer l'état de l'environnement dans les zones d'application requises industriels dans des conditions climatiques difficiles pour mesurer la pression des fluides du corps humain, la pression de l'eau et la température peuvent également être mesurée.

Les mesures de pression sont nécessaires pour les applications industrielles dans des environnements difficiles tels que les centrales électriques, les exploitations pétrolières et gazières.

Dans certaines applications, les températures élevées, les matériaux corrosifs ou les interférences dues à l'électromagnétisme sont des problèmes que les capteurs de pression peuvent résoudre. Les mesures de la pression hydrostatique sont également effectuées à l'aide de ce capteur [15].

IV.6.5. Capteur de salinité

La salinité est une mesure de la quantité de sels dissous dans l'eau de mer et est généralement exprimée en grammes par Litre (g/L) ou en pourcentage (%). Pour quantifier la concentration en sels, il est nécessaire d'enregistrer les conditions environnementales et de mesurer ses paramètres dans l'eau de mer. Au cours de la décennie précédente, les fibres optiques ont été utilisées pour déterminer le niveau de salinité dans les solutions salines. Plus récemment, un capteur basé sur les PCFs a été développé pour détecter les solutions salines avec une meilleure précision des différents composants d'analyse.

Grâce à cette capacité, les PCFs à indice élevé ont été utilisés pour de nombreuses applications de détection, notamment pour mesurer la qualité de l'eau de mer par Attivissimo et al. Le capteur de salinité à PCF revêtu de polyamide a été utilisé pour évaluer la salinité de l'eau de mer avec une grande précision [22].

Dans le chapitre suivant nous allons présenter une étude basique d'un capteur de salinité à base des PCFs.

IV.7. Avantages des capteurs à PCF

Les capteurs à PCF offrent de nombreux avantages par rapport aux autres techniques de détection. Le plus important est le fait que ces capteurs sont immunisés contre les interférences électromagnétiques et qu'ils sont accessibles par des liaisons en fibre optique sur de très longues distances, avec des dimensions physiques réduites. En outre ces capteurs sont mécaniquement compatibles avec un grand nombre d'environnements opérationnels [23].

Il faut mentionner aussi que les capteurs à base des PCFs :

- Ont des capacités de multiplexage et de télédétection.
- Ne peuvent pas être perturbé par les interférences électromagnétiques (EMI) et les interférences de fréquence radio (RFI).
- Offrent une grande sensibilité et permettent de mesurer des très petites variations.
- Offrent une large plage dynamique et une grande largeur de bande.
- Sont légères et compact.
- Sont tolérant aux températures élevées (c'est-à-dire $>1450^{\circ}\text{C}$) et aux environnements corrosifs.
- Convient à des utilisations dans des environnements soumis à des vibrations extrêmes et à des conditions difficiles.
- Peuvent être utilisés dans des capacités de détection multifonctionnelles pour les mesures mécaniques, électriques, magnétiques, chimiques et biologiques, etc.
- Sont capables de mesurer presque tous les mesurands physiques, par exemple la température, la pression, le débit, le niveau de liquide, le déplacement, la vibration, la

rotation, les champs magnétiques, les champs électriques, l'accélération, la force, le rayonnement, le pH, l'humidité, la déformation, la vitesse, etc [24].

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les récents progrès réalisés dans le domaine des capteurs optiques utilisant la technologie des fibres à cristaux photoniques, qui ont été nouvellement adoptées en raison de leurs structures géométriques uniques, après la découverte de la détection à base de fibres optiques conventionnelles. De nombreux capteurs à fibres à cristaux photoniques (PCF) sont actuellement disponibles dans le monde, et de nombreux autres sont en cours de développement. Les chercheurs et les scientifiques continuent de travailler sur les PCFs car ils sont devenus l'élément sensible de cette génération de capteurs, et ils ouvrent de nouveaux chemins vers des caractéristiques et des catégories de détection chimiques et physiques plus attrayantes adaptées à de nombreux domaines d'application.

Ce chapitre s'est concentré sur les domaines d'application les plus courants en matière de détection, en mettant en avant leurs paramètres cohérents ainsi que les propriétés particulières des capteurs optiques en fonction de leur caractère micro-structuré ou conventionnel.

Bibliographie :

- [1] Yin, S et al, 'Fiber optic sensors', CRC press, 2017.
- [2] SAOUCHA, S. L, 'Cristaux photoniques pour la réalisation de capteur de basse pression', mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila. 2018.
- [3] Chauvin, D, 'Réalisation d'un capteur optofluidique à champ évanescent à base de microrésonateurs polymères pour la détection ultrasensible d'espèces (bio) chimiques à haute toxicité', these de doctorat, Université Paris Saclay (COMUE), 2016.
- [4] C. BOUGRIDJA, 'Influence des différents paramètres sur la réponse spectrale de la FBG : application comme capteur', mémoire de master, Université BADJI MOKHTAR ANNABA, 2021.
- [5] si.blaisepascal.fr/1t-les-capteurs/, consulté le : 20 Mars 2023.
- [6] utmel.com/blog/categories/sensors/what-is-a-fiber-optic-sensor, consulté le : 18 Mars 2023.
- [7] Castrellon-Uribe, J, 'Optical fiber sensors: an overview', IntechOpen London, UK, 2012.
- [8] CHIKH-BLED, H, 'Analyse et exploitation des propriétés microstructurales de composants tout fibre: application aux capteurs', these de doctorat, Université de Tlemcen, 2018.
- [9] Haddouche, I, 'Conception d'un capteur à fibre optique pour le contrôle de la qualité d'eau', these de doctorat, université d'alger, 2018.
- [10] R.Boufnar , 'Amélioration de la Sensibilité des Capteurs par l'utilisation des Fibres à Cristaux Photoniques', Thèse de doctorat , Université Mohamed Boudiaf Msila, 2018.
- [11] Guermat,A, 'Capteur de température a fibre optique a extrémité microstructuree chimiquement', these de doctorat, Université de Setif, 2019.
- [12] frontiersin.org/research-topics/46812/photonic-crystal-fiber-sensors, consulté le : 11 Mars 2023.
- [13] <https://pdf.directindustry.fr/pdf/micro-contrôle-spectra-physics/fibres-cristaux-photoniques/7436-140221.html>, consulté le : 23 Mars 2023.
- [14] De, M, et al. (2019), 'Prospects of photonic crystal fiber as physical sensor: An overview', Sensors 19(3): 464. 2019.
- [15] Islam, M. A, et al. (2021), 'Wheel structured Zeonex-based photonic crystal fiber sensor in THz regime for sensing milk', Applied Physics A 127(5): 311, 2021.
- [16] Pinto, A. M. and M. Lopez-Amo (2012), 'Photonic crystal fibers for sensing applications', Journal of Sensors, 2012.

- [17] Hameed, M. F. O. and S. Obayya (2019), 'Computational photonic sensors', Springer, ISBN 978-3-319-76555-6, 2019.
- [18] Nicolas Gaignebet (2020), 'Réalisation et caractérisation de puces de capteurs à cristaux photoniques: vers un dispositif de biodétection intégré', these de doctorat, INSA de Lyon, 2020.
- [19] Portosi, V., et al. (2019), 'Advances on photonic crystal fiber sensors and applications', *Sensors* **19**(8): 1892, 2019.
- [20] Courjon, D. and C. Bainier (2001), 'Le champ proche optique: Théorie et applications', Springer Science & Business Media, 2001.
- [21] Jin, W., et al. (2010), 'Sensing with hollow-core photonic bandgap fibers', *Measurement Science and Technology* 21(9): 094014, 2010.
- [22] Vigneswaran, D., et al. (2018), 'Salinity sensor using photonic crystal fiber', *Sensors and Actuators A: Physical* 269: 22-28, 2018.
- [23] fiber-optic-solutions.com/applications-and-advances-of-fiber-optic-sensors.html, consulté le : 20 Mars 2023.
- [24] rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-Fiber-Optic-Sensor.html, consulté le : 22 Mars 2023.

Chapitre III

Simulation d'un capteur de salinité

I. Introduction

Dans diverses applications telles que l'exploitation minière et l'énergie thermoélectrique, certains chercheurs utilisent des eaux encore plus salines en augmentant les niveaux de sel dans l'eau de mer. Par conséquent, une mesure fiable et précise de la salinité de l'eau joue un rôle crucial dans les applications industrielles, de recherche et de surveillance environnementale, notamment le contrôle de l'aquaculture, la réduction des risques pour les communautés côtières, la gestion des ressources marines et le processus de dessalement des eaux saumâtres et marines.

Ces dernières années, les capteurs de salinité à fibre optique ont suscité un intérêt particulier de la part des universités et de l'industrie en raison des avancées de la technologie des fibres optiques. Ils offrent une alternative intéressante aux dispositifs conventionnels. Les capteurs à base de fibres optiques sont déjà utilisés dans la pratique, où les informations sur la salinité peuvent être obtenues en mesurant l'indice de réfraction de l'eau de mer. Les capteurs de salinité à fibre optique comprennent actuellement des interféromètres à réseau conventionnels, des résonateurs annulaires à microfibres, des cavités Fabry-Perot à base de fibres, des fibres à polissage latéral et des fibres à cristaux photoniques (PCF). Parmi ces différentes options, les PCFs offrent des capteurs très sensibles, des propriétés optiques intéressantes et une grande flexibilité d'utilisation grâce à leur processus de fabrication simple, ce qui en fait l'un des candidats les plus prometteurs pour remplacer les capteurs électriques [1].

Dans ce chapitre, nous commencerons par décrire les progrès récents des méthodes de modélisation numérique des PCF. Ensuite, à l'aide d'une simulation BeamProp basée sur la méthode BPM, qui permet d'éviter les solutions parasites et de modéliser avec précision les limites courbes des trous d'air dans les PCF, nous étudierons numériquement les caractéristiques fondamentales des PCF telles que l'indice de réfraction et la dispersion chromatique pour différents pourcentages de salinité. L'objectif est de déterminer les paramètres qui influencent la sensibilité du capteur [2].

II. Méthodes de modélisation des PCFs

La difficulté de réalisation des fibres optiques micro-structurée provoque des écarts entre la structure géométrique réelle et la structure périodique idéale. C'est pour ça les simulations numériques jouent un rôle important dans la conception et la modélisation des PCF. Jusqu'à présent, diverses méthodes de modélisation utilisant non seulement un modèle vectoriel complet mais aussi un modèle scalaire approximatif ont été développées, tel que la méthode de propagation des faisceaux (BPM), la méthode du calcul fini, méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) et méthode des éléments finis (FEM).

Un modèle scalaire approximatif est un outil précieux pour faciliter les efforts de fabrication car il est facile à utiliser et fournit de bonnes informations qualitatives. Cependant, pour modéliser les PCF avec précision, il est essentiel d'utiliser un modèle vectoriel complet qui est nécessaire pour prédire des quantités sensibles telles que la dispersion et la biréfringence.

Le choix de l'outil de modélisation peut avoir un impact sur le temps de calcul, les ressources informatiques nécessaires et les limites des méthodes, c'est pourquoi il est important d'explorer l'utilité et les limites de chaque méthode. Parmi les méthodes les plus utilisées [2] :

- **Méthodes des éléments finis (FEM)**

La méthode des éléments finis est le schéma numérique le plus stable, ce qui explique pourquoi elle est largement utilisée dans les domaines numériques [3].

Dans la MEF, au lieu de résoudre directement l'équation des ondes, on établit une fonction correspondante à laquelle on applique une méthode variationnelle. La section transversale de la fibre est divisée en éléments, créant ainsi un modèle discret équivalent pour chaque élément. Ensuite, toutes les contributions des éléments à la section transversale de la fibre sont assemblées, ce qui donne un problème de valeurs propres de la matrice avec des variables nodales comme inconnues. Cela diffère de l'approche de l'expansion de la fonction de base qui utilise les coefficients d'expansion comme inconnues. En conséquence, les matrices dérivées de la MEF et de l'approche de l'expansion de la fonction de base deviennent respectivement clairsemées et denses [2].

- **Méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)**

La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) est largement utilisée pour calculer l'évaluation d'un champ électromagnétique dans des milieux dépressifs. La propagation des ondes à travers la structure PCF est obtenue par intégration directe dans le domaine temporel des équations de Maxwell sous une forme discrète. L'espace et le temps sont discrets dans une grille régulière.

L'évaluation des champs électriques et magnétiques est calculée sur une cellule de Yee. En outre, les conditions aux limites sont ajoutées (absorbantes ou périodiques). Le plus souvent, les conditions aux limites de la couche d'adaptation parfaite uni-axiale (UPML) sont utilisées pour la modélisation de la PCF. La méthode permet d'obtenir les coefficients de transmission et de réflexion, le flux d'énergie des champs de propagation (vecteur de Poynting). Elle permet d'observer la distribution du champ en régime permanent ainsi que la distribution du champ temporaire. La méthode FDTD est universelle, robuste et méthodologiquement simple. Le principal inconvénient de cette méthode est la très grande complexité de l'algorithme en termes de temps et de mémoire. Étant donné que les PCF sont des structures 3D avec une distribution de l'indice de réfraction en 2D, ces méthodes ne permettent de simuler que de courtes parties de la fibre. Cette méthode peut être appliquée avec succès aux modélisations des cônes, les coupleurs et au couplage à double cœur dans les PCF. Les simulations à grand volume peuvent être réalisées avec des clusters d'ordinateurs car la méthode FDTD peut être relativement facile à mettre en œuvre en tant qu'algorithme parallèle [4].

- **Méthode de propagation des faisceaux (BPM)**

La méthode de propagation des faisceaux est essentiellement une méthode de modélisation numérique pour la propagation d'un faisceau optique dans un milieu présentant de faibles variations de l'indice de réfraction (Feit et Fleck 1978 ; Van Roey et al 1981). La

méthode consiste à propager le faisceau d'entrée sur une petite distance à travers un espace homogène et à corriger ensuite les variations d'indice de réfraction observées par le faisceau au cours de l'étape de propagation [5].

De plus, la discrétisation spatiale se fait dans une seule des deux directions, ce qui rend le calcul plus rapide et nécessite moins d'espace de stockage [6].

On peut écrire le champ incident dans la fibre comme un développement en série selon la base des modes propres de la structure [7] :

$$\phi_{in}(x, y) = \sum C_m \phi_m(x, y) \quad (III.1)$$

III. Partie théorique

- L'indice de réfraction :

L'indice de réfraction connu généralement sous le symbole (n) exprime le rapport entre la vitesse de lumière dans le vide et la vitesse de lumière dans un corp transparent [8] :

$$n = \frac{c}{v} \quad (III.2)$$

c : vitesse de la lumière dans le vide.

v : vitesse de la lumière dans un corp transparent.

Afin de simuler avec précision le mode de guidage et analyser les performances du capteur, la dispersion des matériaux a été réalisée à l'aide d'un système d'analyse selon la formule de Sellmeier représentée ci-dessous [1] :

$$n(\lambda, T, S) = a + (b_1 - b_2 T + b_3 T^2) S - c T^2 + \frac{d_1 + d_2 S - d_3 T}{\lambda} - \frac{e}{\lambda^2} + \frac{f}{\lambda^3} \quad (III.3)$$

a	b₁	b₂	b₃	c
1.314	1.779×10^{-4}	1.05×10^{-6}	1.6×10^{-8}	2.02×10^{-6}
d₁	d₂	d₃	e	f
15.868	0.01155	0.00423	4382	1.1455×10^{-6}

Tableau III.1. Valeurs numériques des coefficients de l'équation (III.3).

Dont λ, T et S sont respectivement : la longueur d'onde en nm, la température en °C et le pourcentage de salinité.

λ (nm)	T (°C)	S (%)
1550 nm	27	De 0 à 100

Tableau III.2. Valeurs numériques des paramètres de l'équation (III.3).

Selon l'équation précédente l'indice de réfraction de l'eau de mer varie de 1.3226 à 1.3395 en fonction de la variation du niveau de salinité de 0 à 100 % à la température de 27°C suivant une longueur d'onde égale à 1550 nm.

- **La salinité :**

C'est la quantité du sels secs dissous dans l'eau donnée en pourcentage (%) ou PSU (Practical Salinity Unit) dont 1 PSU présente 1gramme de sel dissous dans 1 litre d'eau (g/L). La salinité des mers et des océans varie pratiquement de 10 à 40 PSU [9].

- **La sensibilité :**

La formule de la sensibilité s'exprime en fonction des paramètres qui l'influent et est le rapport entre la valeur de sortie d'un capteur et sa valeur d'entrée [10].

Dans notre cas la sensibilité est donnée par la formule :

$$S (Ps/nm/km)/PSU = \frac{\Delta D}{\Delta sal} \quad (III.4)$$

ΔD : l'écart de variation des valeurs de dispersion.

Δsal : l'écart de variation des valeurs de salinité.

IV. Conception et modélisation des PCFs

Un nouveau capteur basé sur les PCF est proposé pour quantifier la salinité dont les échantillons à analyser seront injectés à différentes concentrations dans les anneaux troués du PCF où ils agissent comme des noyaux liquides. Tandis que la simulation du phénomène était réalisée à l'aide de la méthode des propagation beamprop [11].

Le moteur de simulation BeamPROP fait partie de la RSoft Component Design Suite et est basé sur des techniques avancées de propagation des faisceaux par différences finies (BPM). Il est entièrement intégré à l'environnement RSoft CAD qui permet à l'utilisateur de définir les propriétés des matériaux et la géométrie structurelle d'un dispositif. Il est idéal pour la conception et la modélisation de dispositifs photoniques et de circuits intégrés photoniques. Pratiquement tous les fichiers d'entrée et de sortie sont au format texte ASCII, ce qui permet à l'utilisateur de mieux contrôler le fonctionnement du programme et d'intégrer des programmes tiers dans la suite. Logiciel n'est pas limité à un seul langage de script mais il,utilise plutôt le langage de script natif du système d'exploitation (Windows,Unix,...) En outre, les utilisateurs familiarisés avec des langages tels que Perl, Python, C ou C++ peuvent créer des scripts

personnalisés dans ces langages. La RSoft Component Design Suite offre le meilleur des deux mondes : elle permet d'effectuer des simulations via l'interface graphique et de réaliser des simulations personnalisées complexes via un script [12].

Alors que le principe de fonctionnement du capteur de salinité repose sur l'interaction entre les trous remplis du liquide et les trous à base de silice. La lumière propagée dans le cœur produit un champ évanescent qui pénètre à travers la région de la gaine jusqu'aux trous. La variation des dispersions a été étudiée à différentes concentrations d'eau de mer injectée dans la PCF. L'indice de réfraction de l'eau de mer étant inférieur à celui de la silice [1].

IV.1. Structure PCF

Pour la simulation, nous avons utilisé une fibre à cristaux photoniques RTIM à base de silice dont l'indice de réfraction est $n_2=1.44$. Cette fibre est constituée d'un arrangement régulier des anneaux d'air de dimensions à l'échelle microscopique disposés parallèlement à l'axe de propagation z dans le plan (xy) . Nous avons injecté de l'eau salée dans le premier et le 3^{ème} anneau d'indice de réfraction $n_3=1.33$.

Le diamètre des trous du 1^{er} anneau (d) égale à $0.6 \mu\text{m}$ et le diamètre des autres trous (D) égale à $1.1 \mu\text{m}$ avec un pas (Λ) de $1.9 \mu\text{m}$.

Après la simulation de plusieurs structures PCFs à différents nombres d'anneaux, nos observations ont révélé que la PCF à 4 anneaux est la plus appropriée pour notre étude en terme de meilleure sensibilité.

En effet, la structure de la fibre est choisie en tenant compte d'une multitude d'objectifs, tels que la faible dispersion, la forte polarisation et la haute sensibilité, etc.

Le nombre des anneaux	4 anneaux
Le diamètre des trous	$D = 1.1 \mu\text{m}$
Le pas entre les trous	$\Lambda = 1.9 \mu\text{m}$
Le diamètre des trous du 1^{er} anneau	$d = 0.6 \mu\text{m}$

Tableau III.3. Paramètres de la structure PCF (A).

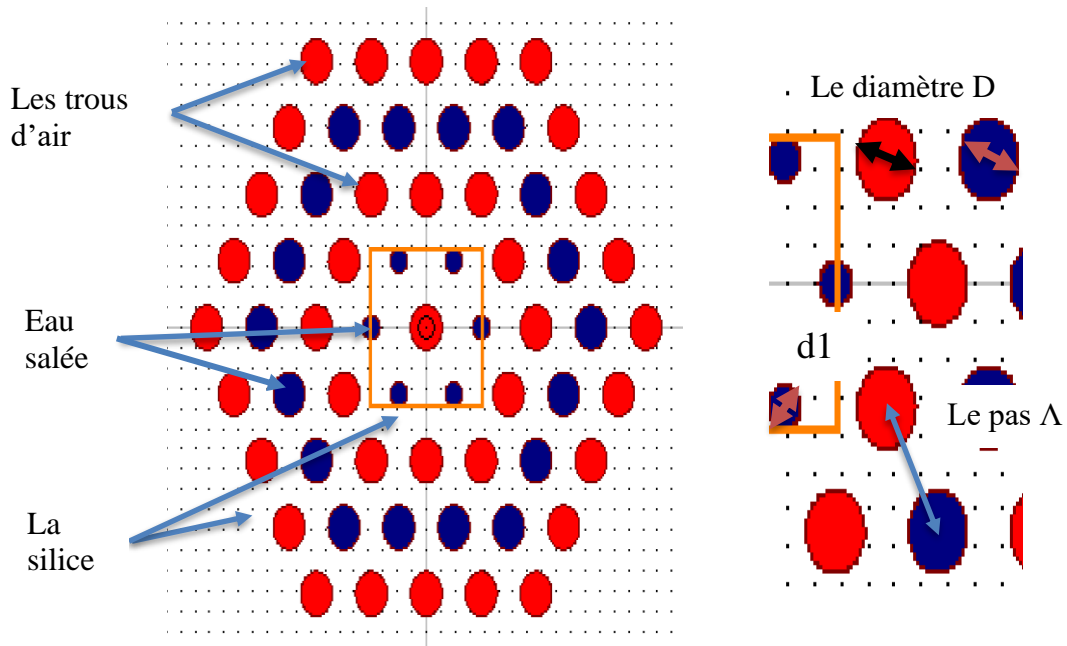


Figure III.1. Section transversale de la structure PCF (A).

IV.2. Paramètres influant la structure

Pour assurer la fiabilité de la structure choisie nous allons d'abord la comparer avec 2 autres structures :

- Structure (B) : remplissage du 1^{er} anneau avec de l'eau salée avec un diamètre d_1 égale à $1.1 \mu\text{m}$.

Le nombre des anneaux	4 anneaux
Le diamètre des trous	$D_1 = 1.1 \mu\text{m}$
Le pas entre les trous	$\Lambda_1 = 1.9 \mu\text{m}$
Le diamètre des trous du 1^{er} anneau	$d_1 = 1.1 \mu\text{m}$

Tableau III.4. Paramètres de la structure (B).

- Structure (C) : remplissage du 1^{er} anneau avec de l'eau salée en variant le diamètre du 1^{er} anneau à $d_2=0.6 \mu\text{m}$

Le nombre des anneaux	4 anneaux
Le diamètre des trous	$D_2 = 1.1 \mu\text{m}$
Le pas entre les trous	$\Lambda_2 = 1.9 \mu\text{m}$
Le diamètre des trous du 1^{er} anneau	$d_2 = 0.6 \mu\text{m}$

Tableau III.5. Paramètres de la structure (C).

IV.2.1 Indice de réfraction

Le profil d'indice d'une PCF est l'outil qui schématise les différents indices de réfractons des composants de la structure PCF simulée.

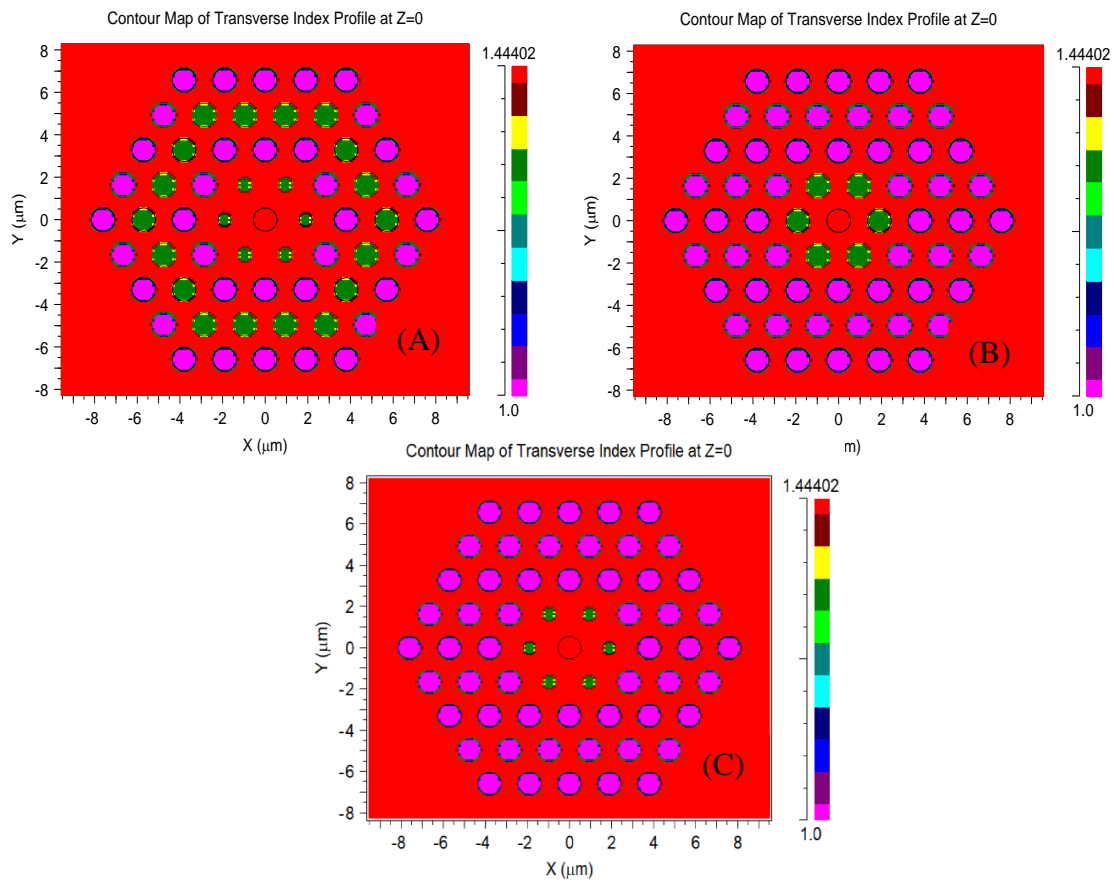


Figure III.2. Indices effectifs des structures (A), (B), (C).

La figure suivante montre la variation de l'indice de réfraction en fonction de la salinité (de 0 à 100%) dont nous observons une corrélation linéaire entre l'indice de réfraction de l'eau salée et les différents pourcentages de sel.

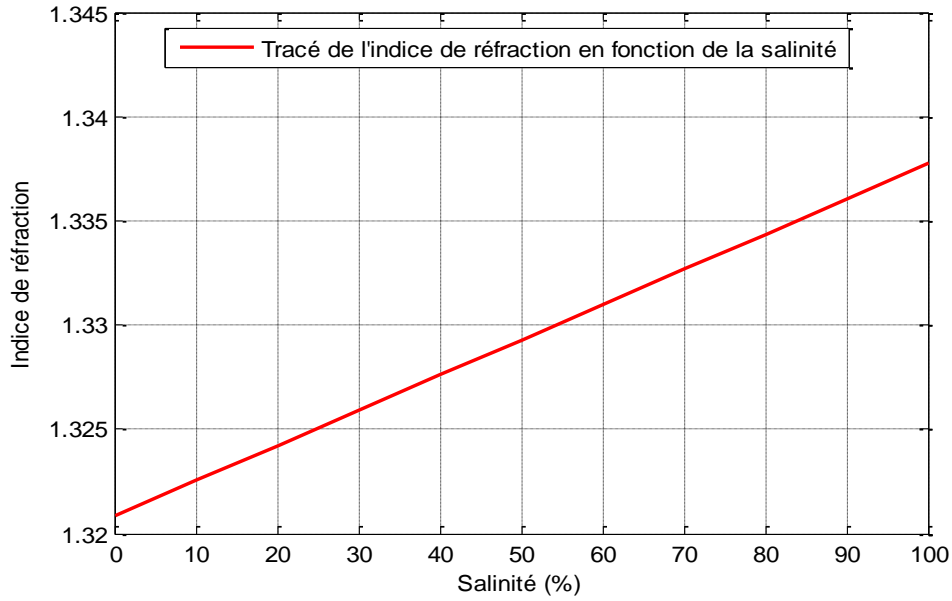


Figure III. 3. Variation de l'indice de réfraction en fonction des pourcentages de salinité .

IV.2.2 Dispersion

La dispersion est inversement proportionnelle à la transmission régulière du signal lumineux. Plus la dispersion tend vers des valeurs négatives, plus la transmission optique à travers une fibre micro-structurée sera meilleur

Les figures suivantes représentent la variation de la dispersion chromatique des différentes structures en fonction des longueurs d'ondes :

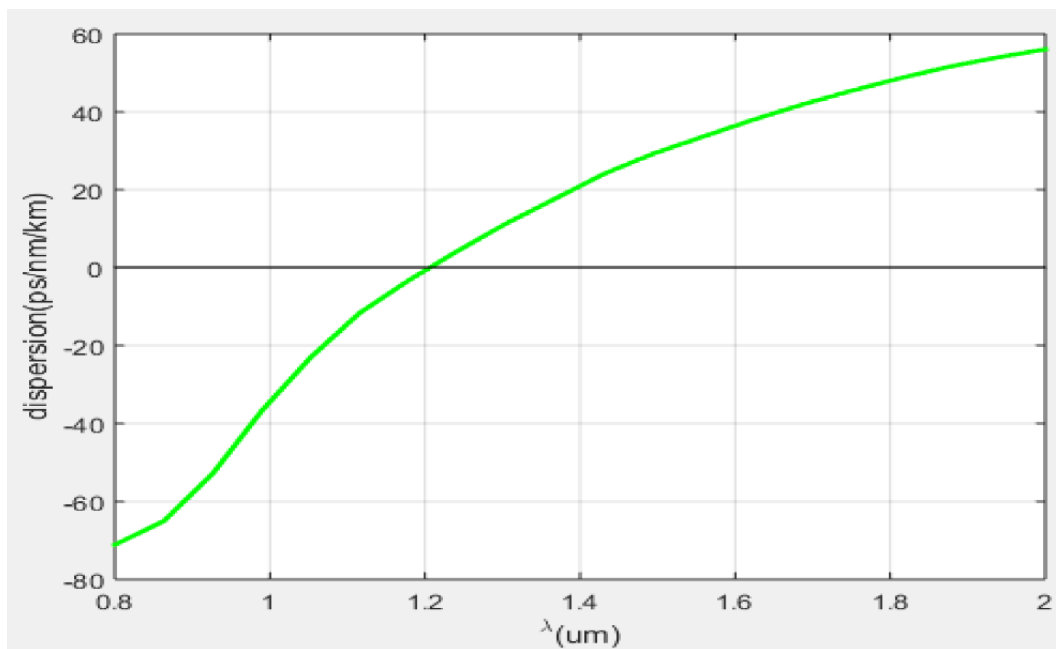


Figure III.4. Tracé de la dispersion de la structure (A).

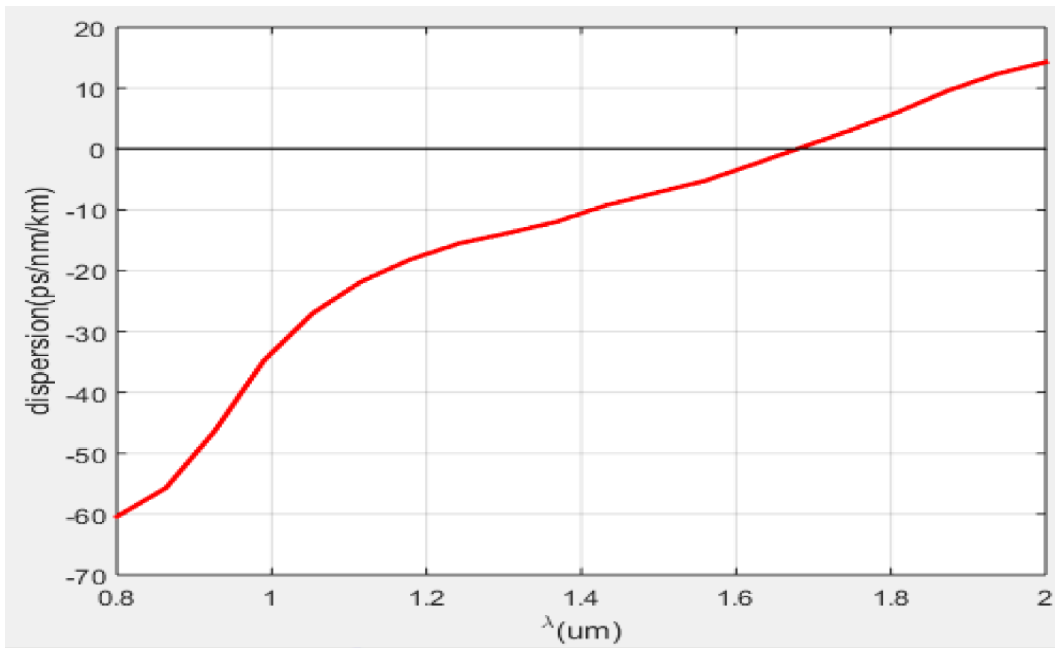


Figure III.5. Tracé de la dispersion de la structure (B).

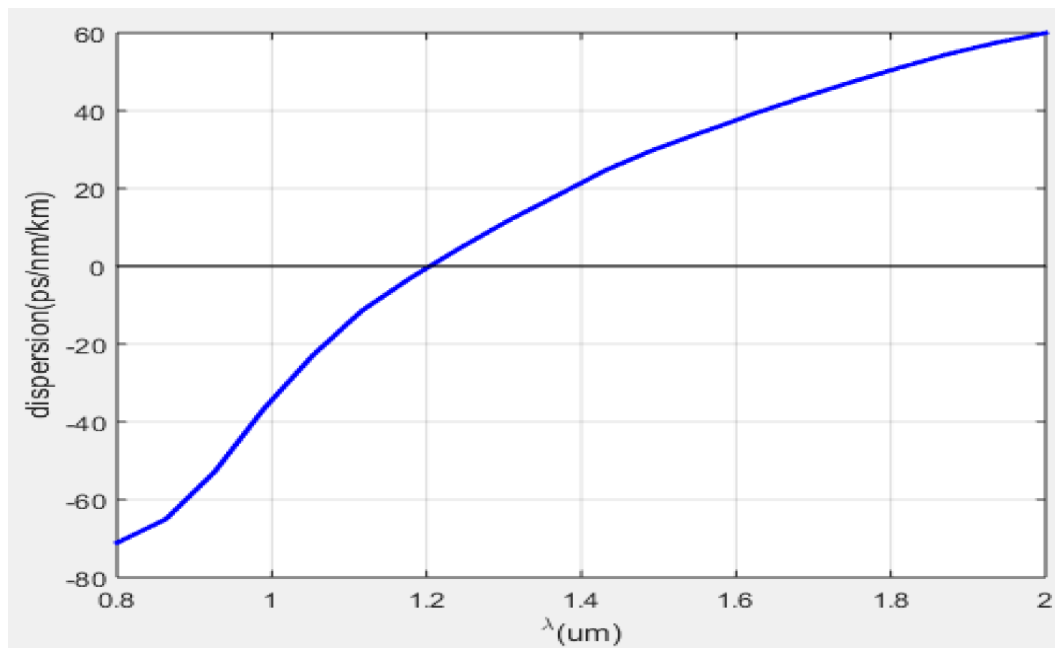


Figure III.6. Tracé de la dispersion de la structure (C).

Dans les structures (A), (B) et (C) les zéros dispersions sont localisés aux longueurs d'onde $\lambda=1.2 \mu\text{m}$, $\lambda=1.65 \mu\text{m}$ et $\lambda=1.2 \mu\text{m}$ dont la dispersion est négative quand les longueurs d'onde sont inférieures à celle-ci et vice versa. La structure (B) présente une meilleure

dispersion par rapport aux autres structures, mais elle n'est pas fiable pour le calcul de sensibilité. C'est pourquoi nous avons opté pour l'utilisation de la structure (A).

IV.3. Influence de la salinité sur la dispersion

Afin d'étudier l'influence du changement des valeurs de salinité sur la dispersion nous avons commencé la simulation en utilisant la méthode BPM par le calcul de la dispersion en fonction des longueurs d'onde en variant les pourcentages de salinité de 0 à 100 %. Cette première étape nous a amené au calcul des valeurs de sensibilités de capteur à base de la PCF infiltrée d'eau salée après avoir passé par le tracé de la dispersion en fonction de la salinité à des longueurs d'onde choisis.

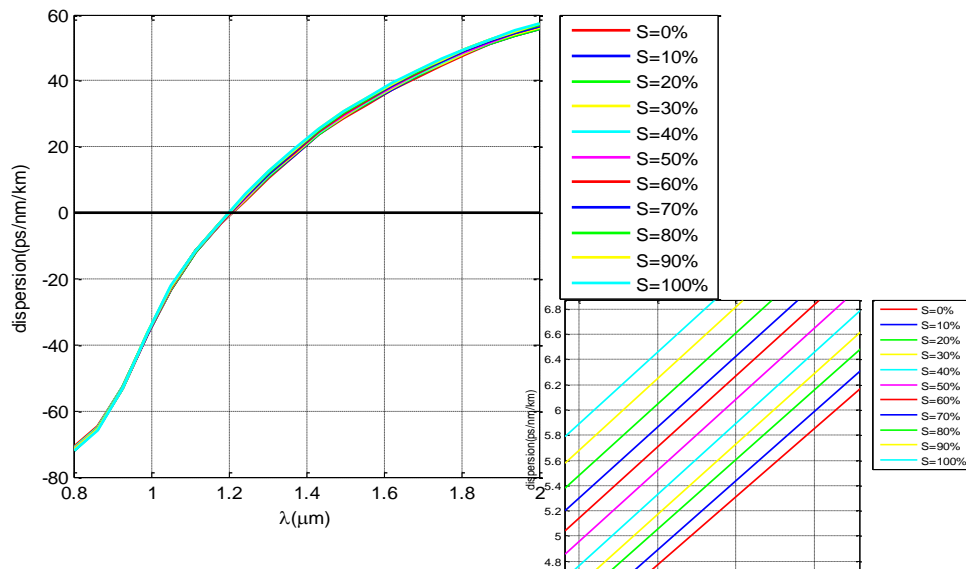


Figure III.7. Tracé de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différents pourcentages de salinité pour la structure (A).

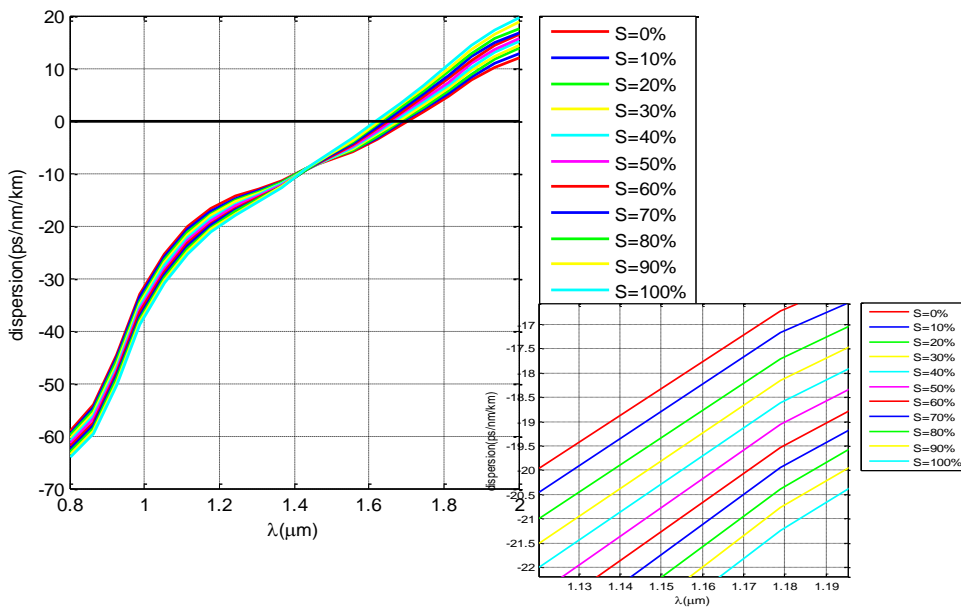


Figure III.8. Tracé de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différents pourcentages de salinité pour la structure (B).

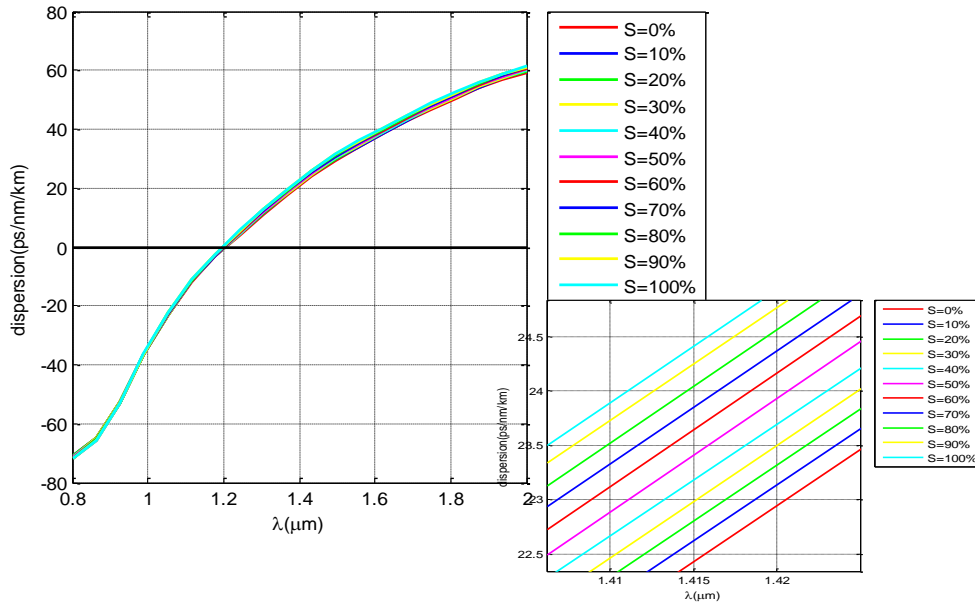


Figure III.9. Tracé de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différents pourcentages de salinité pour la structure (C).

Les figures (III.7), (III.8) et (III.9) montrent la variation de la dispersion des structures PCF en fonction des longueurs d'onde pour les différentes valeurs de salinité. Nous remarquons qu'avec l'augmentation du pourcentage de salinité le tracé de la dispersion tend vers les valeurs positives.

IV.4. Influence de la salinité sur la sensibilité du capteur

Nous avons sélectionné les longueurs d'onde 1.6 μm , 1.7 μm , 1.8 μm et 1.9 μm à cause de leurs résultats de sensibilités optimale puis nous avons tracé les courbes de dispersions à chacune de ces longueurs d'onde pour les trois structures.

Les figures (III.10), (III.11), (III.12) et (III.13) montrent respectivement la variation de la dispersion aux longueurs d'onde suivantes : à 1.6 μm , à 1.7 μm , à 1.8 et 1.9 μm pour la structure (A).

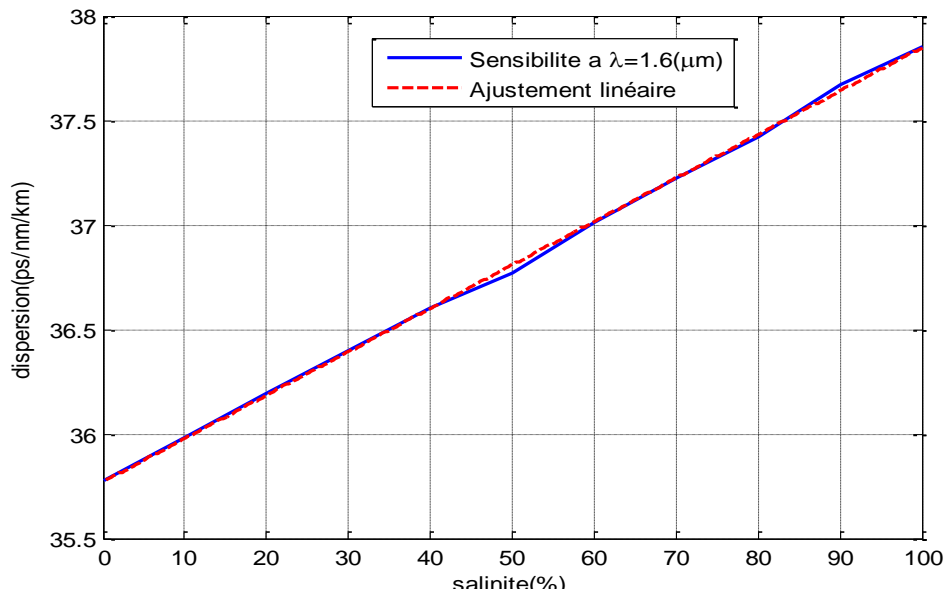


Figure III.10. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.6 \mu\text{m}$.

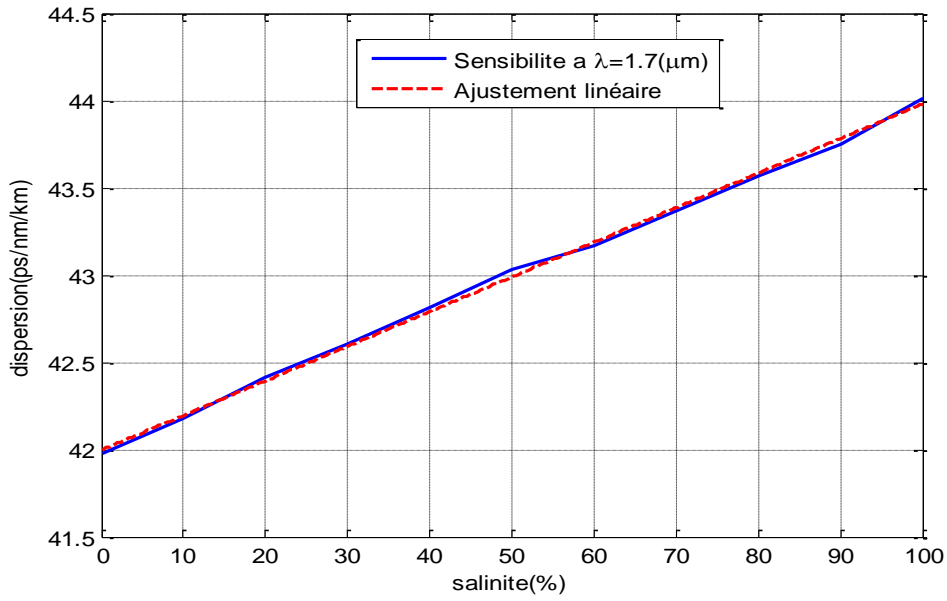


Figure III.11. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.7 \mu\text{m}$.

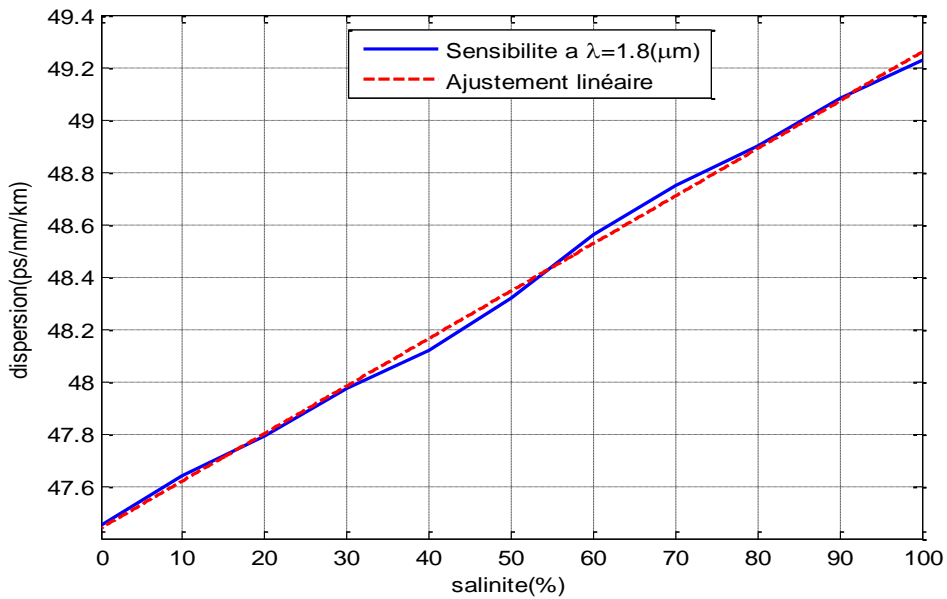


Figure III.12. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.8 \mu\text{m}$.

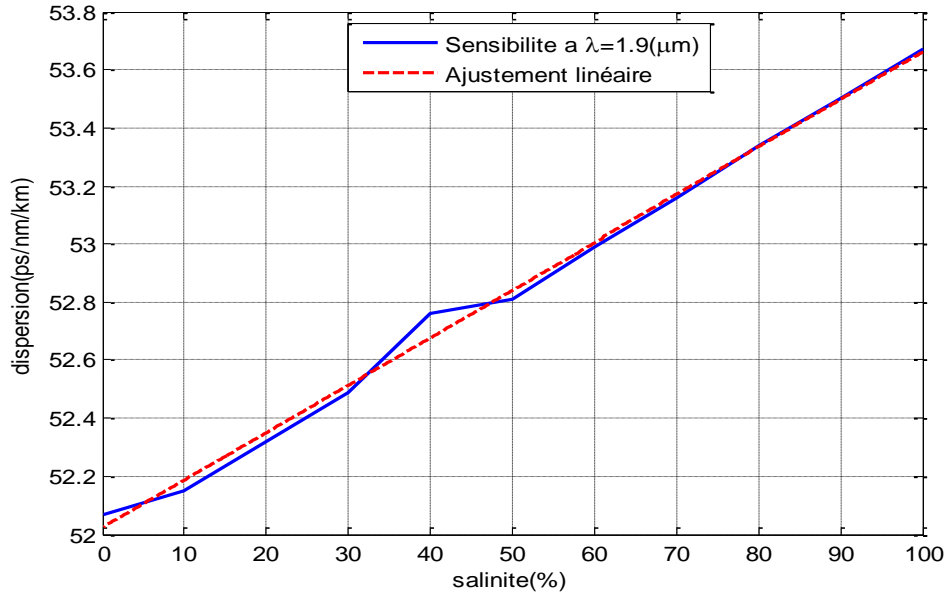


Figure III.13. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.9 \mu\text{m}$.

Les figures (III.14), (III.15), (III.16) et (III.17) montrent respectivement la variation de la dispersion aux longueurs d'onde suivantes : à $1.6 \mu\text{m}$, à $1.7 \mu\text{m}$, à $1.8 \mu\text{m}$ et $1.9 \mu\text{m}$ pour la structure (B)

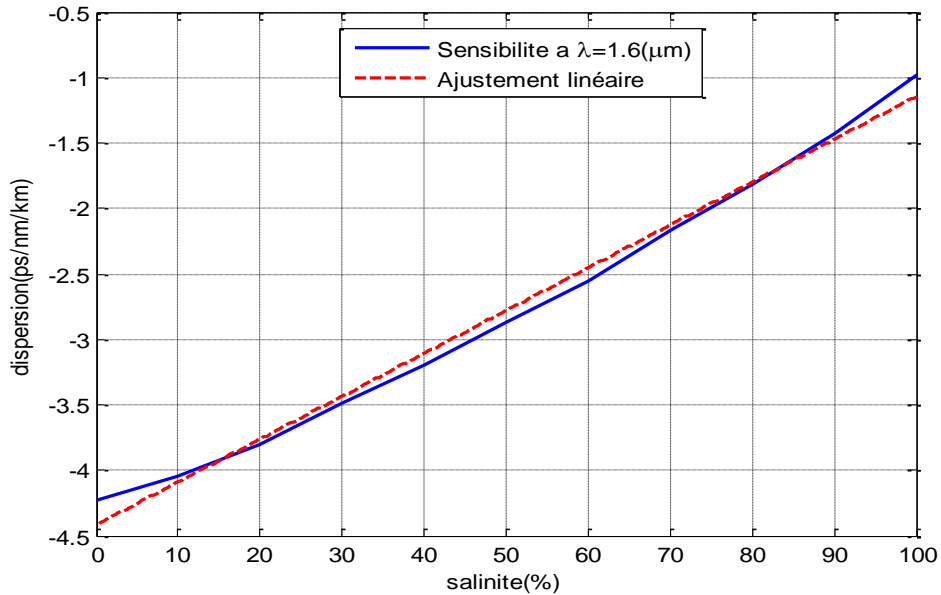


Figure III.14. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.6 \mu\text{m}$.

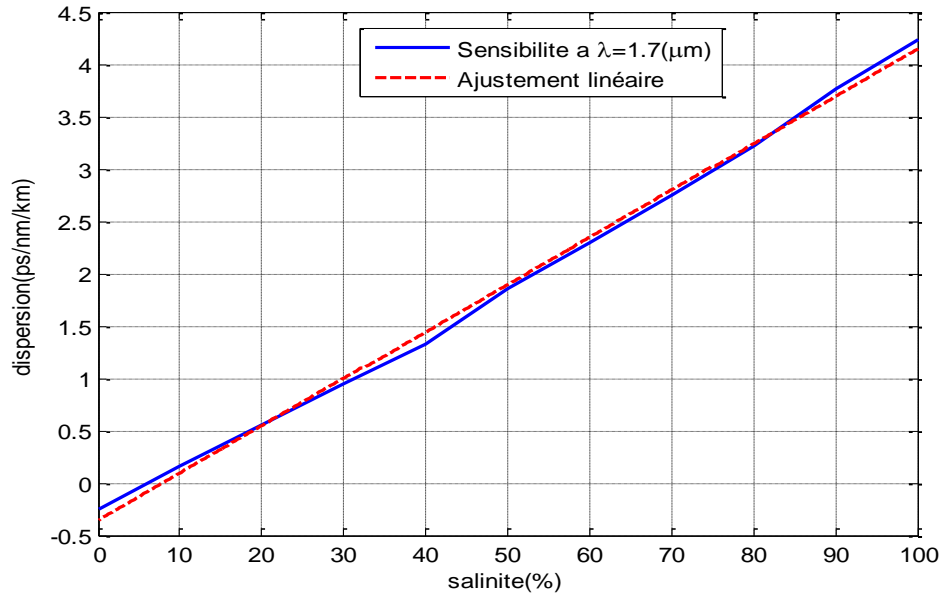


Figure III.15. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.7 \mu\text{m}$.

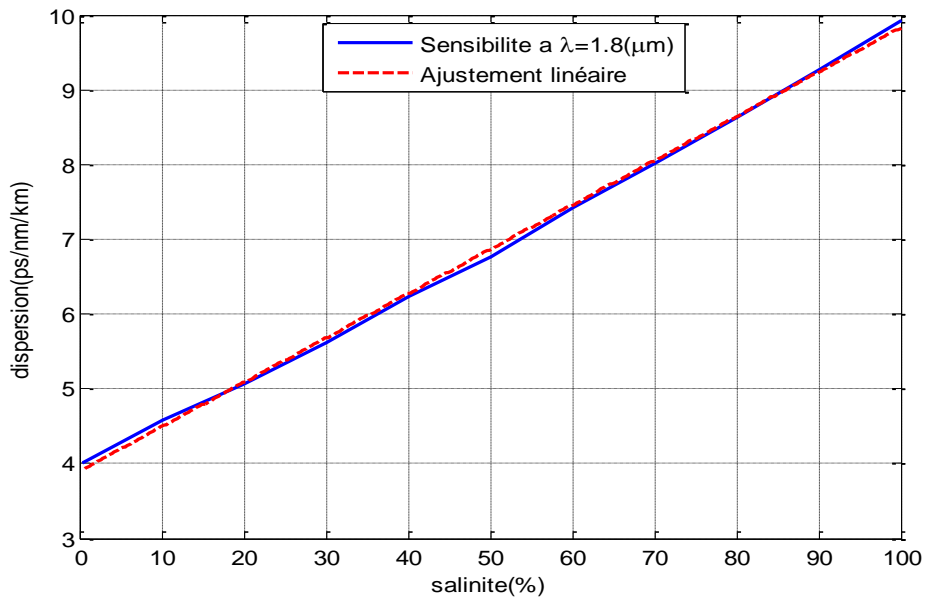


Figure III.16. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.8 \mu\text{m}$.

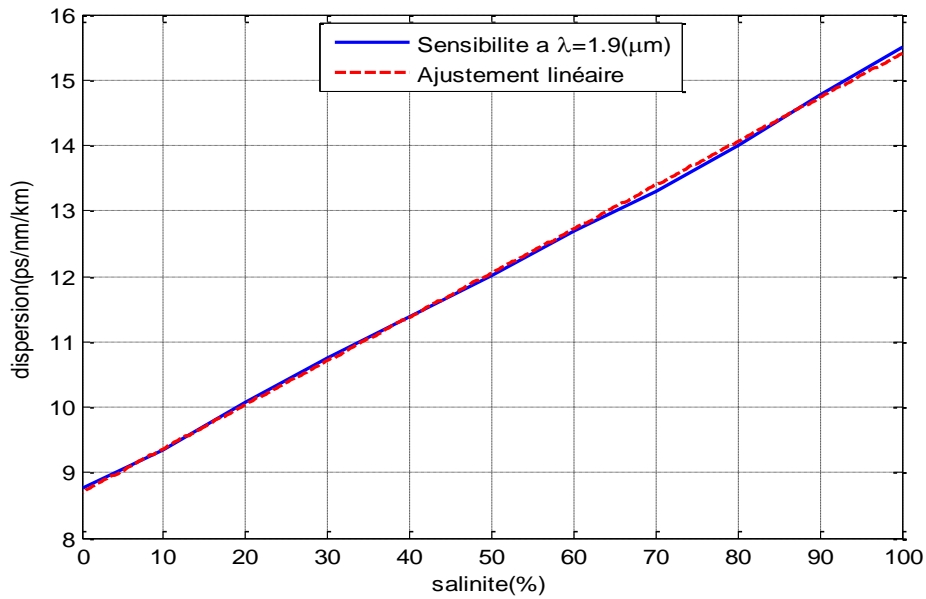


Figure III.17. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.9 \mu\text{m}$.

Les figures (III.18), (III.19), (III.20) et (III.21) montrent respectivement la variation de la dispersion aux longueurs d'onde suivantes : à $1.6 \mu\text{m}$, à $1.7 \mu\text{m}$, à 1.8 et $1.9 \mu\text{m}$ pour la structure (C).

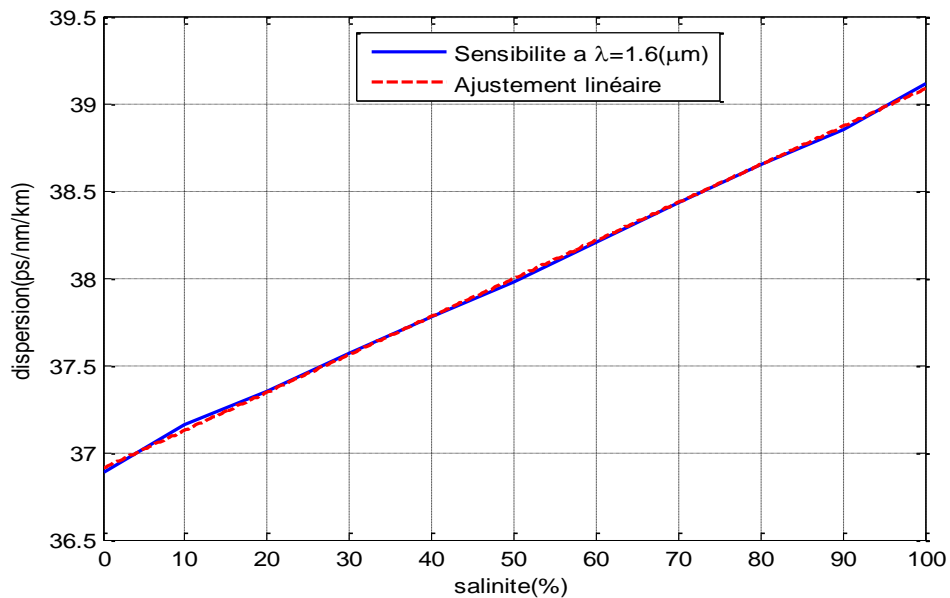


Figure III.18. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.6 \mu\text{m}$.

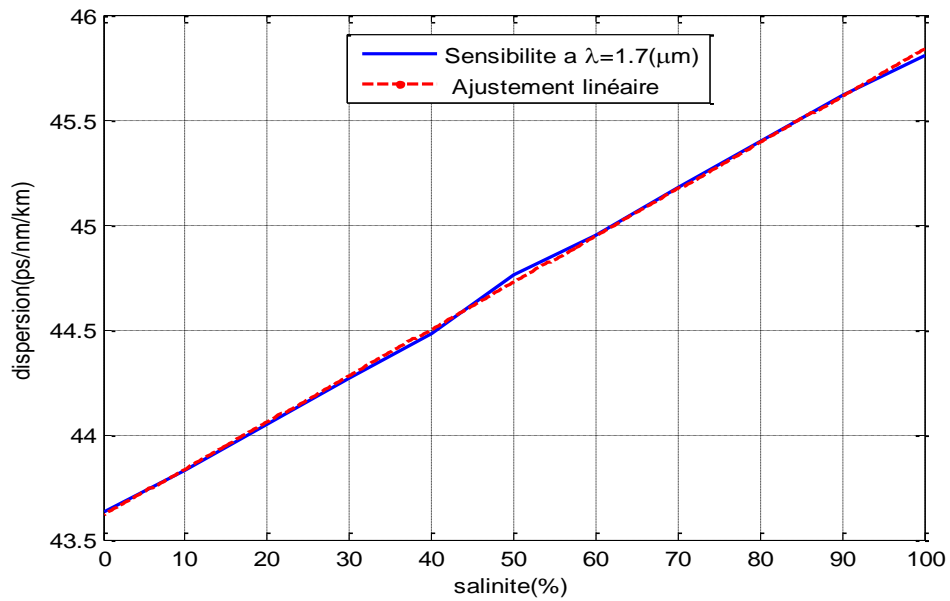


Figure III.19. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.7 \mu\text{m}$.

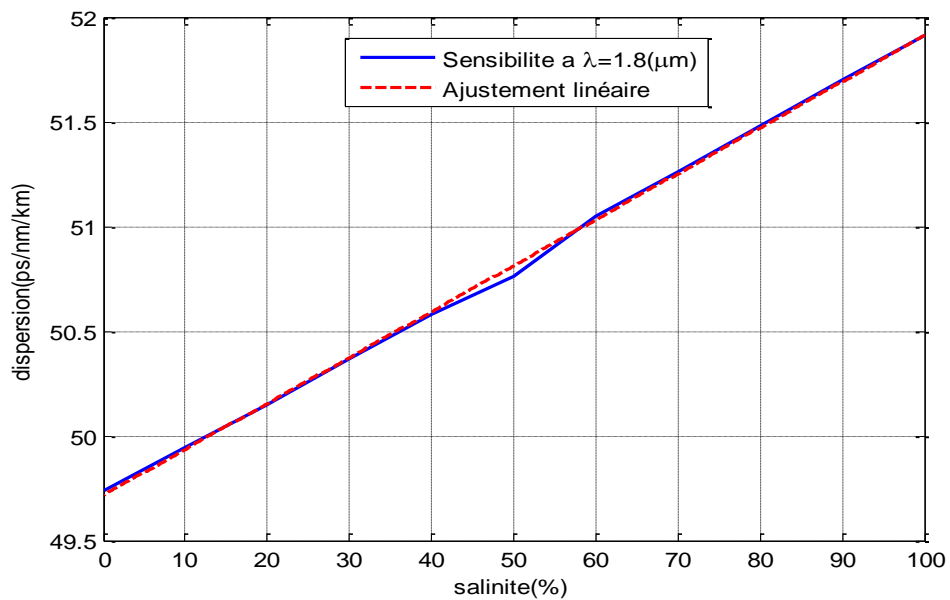


Figure III.20. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.8 \mu\text{m}$.

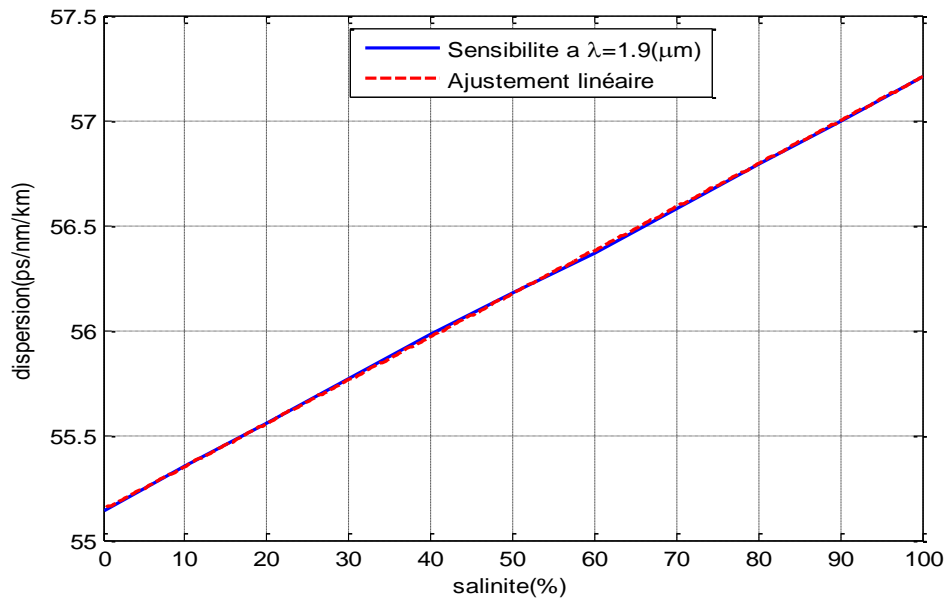


Figure III.21. Tracé de la dispersion en fonction des salinités à $\lambda=1.9 \mu\text{m}$.

Les figures précédentes montrent que la variation de la dispersion est proportionnelle aux pourcentages de salinité. L'augmentation de la salinité entraîne une augmentation des valeurs de dispersion.

Calcul de sensibilité :

L'interpolation polynomiale de Lagrange effectuée à plusieurs longueurs d'onde à l'aide du logiciel Matlab résulte les courbes de variation de dispersion chromatique en fonction des salinités (de la figure III.10 à la figure III.21). Ce qui nous a contribué à calculer la sensibilité de ce capteur aux longueurs d'onde suivantes : ($\lambda=1.6 \mu\text{m}$), ($\lambda=1.7 \mu\text{m}$), ($\lambda=1.8 \mu\text{m}$) et ($\lambda=1.9 \mu\text{m}$) en utilisant la méthode de calcul de la tangente. Cette méthode a été appliquée sur l'ajustement linéaire de la courbe de dispersion en fonction de la salinité.

Nous avons obtenu une valeur de sensibilité égale à 0.020773 (Ps/nm/km) /PSU à une longueur d'onde de $\lambda=1.6 \mu\text{m}$ puis à $\lambda=1.7 \mu\text{m}$ la sensibilité $S = 0.019827$ (Ps/nm/km) /PSU, aussi les mesures effectuées à $\lambda= (1.8 \mu\text{m}, 1.9 \mu\text{m})$ ont mené vers des valeurs de sensibilités de 0.018173 (Ps/nm/km) /PSU et 0.016391 (Ps/nm/km) /PSU respectivement.

- Exemple de calcul :

Le tracé de dispersion en fonction de la salinité se présente sous forme d'une fonction affine son équation :

$$y = P_1x + P_2 \quad (\text{III. 5})$$

Dont P1 est la tangente de cette fonction

D'après les tracés de la structure (A) nous avons obtenus les résultats suivants :

$\lambda_1=1.6\mu\text{m}$	$\lambda_2=1.7\mu\text{m}$	$\lambda_3=1.8\mu\text{m}$	$\lambda_4=1.9\mu\text{m}$
$P_1= 0.020773$	$P_1= 0.019827$	$P_1= 0.018173$	$P_1= 0.016391$
$P_2= 35.77$	$P_2= 41.998$	$P_2= 47.438$	$P_2= 52.022$

Tableau III.6. Valeurs des paramètres de calcul.

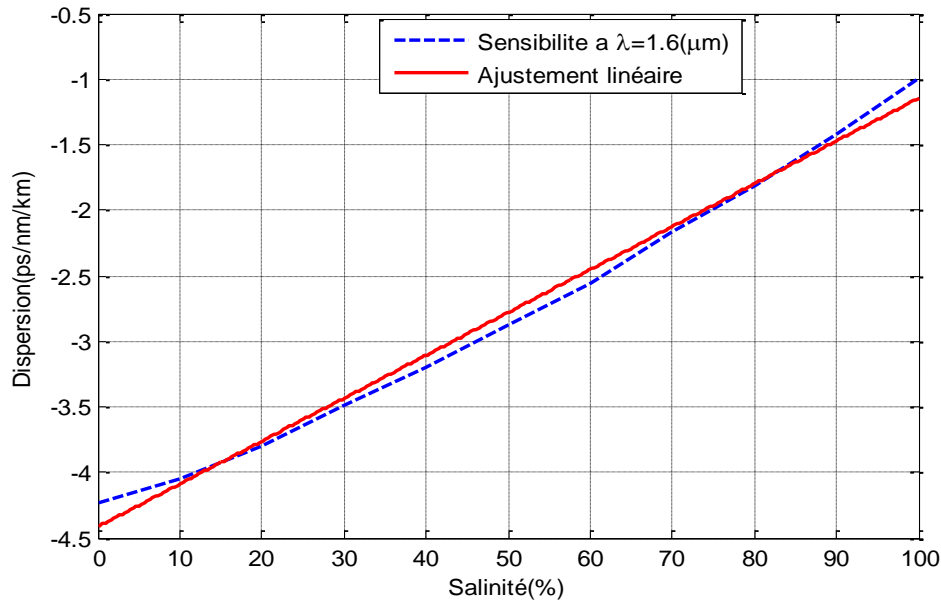


Figure III.22. Ajustement linéaire du tracé de la dispersion en fonction de la salinité.

Nous avons calculé la tangente depuis l'ajustement linéaire du tracé ci-dessus à chaque valeur de longueur d'onde pour chaque structure.

• Comparaison des résultats :

Pour mieux choisir la structure adéquate à l'application d'un capteur de salinité à haute sensibilité nous avons comparé les valeurs de sensibilités des trois structures (A), (B) et (C) aux longueurs d'ondes ($\lambda=1.6 \mu\text{m}$, $\lambda=1.7 \mu\text{m}$, $\lambda=1.8 \mu\text{m}$ et $\lambda=1.9 \mu\text{m}$)

Les résultats de comparaison sont affichés dans le tableau suivant :

Longueur d'onde $\lambda(\mu\text{m})$	Sensibilité S ((Ps/nm/km) /PSU)		
	Structure A	Structure B	Structure C
$\lambda_1=1.6 \mu\text{m}$	0.020773	0.032712	0.021727
$\lambda_2=1.7\mu\text{m}$	0.019827	0.044949	0.022182
$\lambda_3=1.8 \mu\text{m}$	0.018173	0.059153	0.021936
$\lambda_4=1.9 \mu\text{m}$	0.016391	0.067005	0.020591

Tableau III.7. Valeurs numériques des sensibilités pour différentes longueurs d'ondes.

D'après les résultats, il est observé que la structure (A) présente des valeurs de sensibilité meilleures par rapport aux autres structures en raison de ses valeurs minimales.

De plus, il est remarqué que la sensibilité de cette structure est plus faible à une longueur d'onde de $\lambda=1,9 \mu\text{m}$.

Par conséquent, la sensibilité de la structure (A) diminue avec l'augmentation des longueurs d'onde. Ainsi, pour obtenir un capteur de haute sensibilité, la structure (A) est la plus appropriée.

V. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet de la salinité sur la dispersion chromatique du PCF en infiltrant de l'eau dans les trous d'air. Les résultats ont montré que la sensibilité à la salinité était de $0,016391 \text{ (Ps/nm/km) /psu}$ à $\lambda = 1,9 \mu\text{m}$ dont ce capteur présente une meilleure détection à cette longueur d'onde. De plus, nous avons observé que plus la longueur d'onde augmente, plus le capteur devient sensible. Ce travail nous a permis de simuler un modèle de capteur de salinité basé sur des PCF de petite taille, facile à fabriquer, simple à concevoir et offrant une meilleure détection à des longueurs d'onde spécifiques.

Bibliographie :

- [1] K. C. Ramya, Yashar E. Monfared , Member, IEEE, R. Maheswar , and Vigneswaran Dhasarathan, 'Dual-Core Twisted Photonic Crystal Fiber Salinity Sensor: A Numerical Investigation', IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 32, NO. 10, MAY 15, 2020.
- [2] Saitoh, Kunimasa; Koshiha, Masanori, 'Numerical Modeling of Photonic Crystal Fibers', JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 23(11), 3580-3590, 11,2005.
- [3] [sciencedirect.com/topics/materials-science/finite-element-modeling](https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/finite-element-modeling), consulté le : 01 Mai 2023.
- [4] Pooja Agarwal, 'Modeling of Elliptical Air Hole PCF for Lower Dispersion', Advance in Electronic and Electric Engineering, 2013.
- [5] ias.ac.in/public/Volumes/pram/034/04/0347-0358.pdf, consulté le : 28 Avril 2023.
- [6] HAMLAT Fares Kamel, Ahmed BELBACHIR Mouhamed Ryad, 'Modélisation et conception des fibres à cristaux photoniques', Université –Ain Temouchent, mémoire de master, 2020/2021.
- [7] KESSAB Bader Eddin, KAROUI Afif, 'Etude et analyse des propriétés optiques des fibres optiques microstructurées (circulaire, hexagonal et carré)', mémoire de master , Université kasdi Merbah – Ouargla , juin 2022.
- [8] dicoptic.fr/indice-de-refraction, consulté le : 07 Mai 2023.
- [9] kikiwi.fr/uploads/data/Mesures/Conductimetre/conductimetre_v1.2.pdf, consulté le : 07 Mai 2023.
- [10] pv.meyne.free.fr/Capteur/Generalites.pdf, consulté le : 06 Mai 2023.
- [11] D. Vigneswaran, N. Ayyanar, Mohit Sharma, M. Sumathi, M.S. Mani Ranjan, K. Porsezian, 'Salinity Sensor Using Photonic Crystal Fiber', octobre 2017.
- [12] Rsoft, beamprop, user guide.pdf

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

La mesure précise de la salinité de l'eau revêt une importance cruciale dans de nombreux domaines tels que l'aquaculture, la surveillance environnementale, l'industrie pétrolière et gazière, ainsi que la recherche océanographique. Les capteurs de salinité jouent un rôle essentiel dans ces applications en permettant une surveillance et un contrôle efficaces et précis des niveaux de salinité.

Le présent mémoire a entrepris une étude sur les capteurs de salinité à base de fibres microstructurées (PCF), mettant en évidence leur potentiel prometteur dans le domaine de la détection de la salinité. Nous avons décrit les procédures de caractérisation utilisées pour évaluer les performances des capteurs dans des conditions contrôlées, en utilisant différentes géométries et structures de PCF. Les résultats des simulations effectuées ont démontré une corrélation linéaire entre les variations de l'indice de réfraction et les concentrations de sel, confirmant ainsi une sensibilité accrue à des longueurs d'ondes spécifiques. Ainsi, les capteurs de salinité basés sur les fibres à cristaux photoniques représentent une technologie prometteuse pour la détection de la salinité. Leurs performances supérieures en termes de sensibilité, de résolution et de sélectivité, ainsi que leur compacité et leur facilité d'intégration, en font des candidats idéaux pour de nombreuses applications. Leur potentiel reste encore largement à explorer, ouvrant la voie à de nouvelles avancées dans le domaine de la détection de la salinité et offrant de nombreuses perspectives d'avenir.

Certaines de ces perspectives incluent l'amélioration de la sélectivité des capteurs afin de réduire les interférences provenant d'autres paramètres environnementaux et d'obtenir des mesures encore plus précises. De plus, la miniaturisation des capteurs de salinité à base de PCF permettrait leur intégration dans des dispositifs portables, étendant ainsi leur utilisation dans des applications telles que le contrôle de la salinité dans les piscines ou les tests des aquariums domestiques. Enfin, l'amélioration des propriétés des fibres à cristaux photoniques, telles que l'efficacité de guidage de la lumière ou la sensibilité, ouvrira la voie à des capteurs encore plus performants. La poursuite des recherches dans ce domaine pourrait conduire au développement de fibres optimisées spécifiquement pour les capteurs de salinité.

En conclusion, ce mémoire a contribué à une meilleure compréhension des capteurs de salinité à base de PCF et de leur potentiel dans la détection de la salinité. Les connaissances acquises et les résultats obtenus sont une base solide pour la poursuite des recherches et le développement de nouvelles applications dans ce domaine.