

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** : Télécommunication Optique

**Par** : MORSLAOUI Mohammed Aymen et ZAIR Sid Ahmed Ayoub

### Sujet

**Analyse des performances des capteurs fibrés**

Soutenu, le 11 / 06 / 2024, devant le jury composé de :

|                       |            |                      |              |
|-----------------------|------------|----------------------|--------------|
| Mme. BENMOSTEFA Naima | MCA        | Univ. Tlemcen        | Présidente   |
| Mr. FETHALLAH Karim   | Professeur | Univ. Tlemcen        | Examineur    |
| Mr. CHIKH-BLED Hicham | MCA        | Univ. Tlemcen        | Encadrant    |
| Mme. MIREDE Ilhem     | Doctorante | Univ. Ain-Temouchent | Co-encadrant |

Année universitaire 2023/2024

# Remerciements

Tout d'abord, nous voulons exprimer notre gratitude envers Allah, le tout-puissant, pour avoir béni notre existence de la santé, de la volonté, du courage et de la patience, ce qui nous a permis de poursuivre ce travail de recherche avec détermination.

Nous remercions vivement monsieur CHIKH-BLED Hicham et madame MIREL Ilhem, Nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements pour la qualité de l'encadrement et du soutien que vous m'avez apporté tout au long du projet de fin d'étude. Votre expertise, votre patience et votre disponibilité ont été inestimables pour la réussite de ce travail de master. Votre guidance a été essentielle pour le développement de mes compétences et pour la mise en œuvre de mon projet. Votre feedback constructif et vos conseils précieux m'ont permis de progresser et de m'approcher de mes objectifs.

Nous remercions également les membres du jury monsieur et madame d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous sommes reconnaissants pour l'importante influence que les enseignements et conseils des enseignants du département de télécommunication ont eu sur notre parcours. Leur présence et leur expertise ont été un facteur clé de notre motivation et de notre confiance en nous, ce qui nous a permis de franchir les étapes et d'explorer de nouveaux horizons.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à notre réussite, qu'ils aient été présents ou non à chaque étape de notre parcours.



# Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents, qui m'ont toujours soutenu avec amour et bienveillance tout au long de mon parcours. Leur confiance et leurs encouragements ont été essentiels à l'aboutissement de ce projet.

Je remercie chaleureusement ma sœur RAHIL pour son écoute attentive, ses précieux conseils et sa présence réconfortante dans les moments les plus difficiles.

Je ne saurais oublier ma chère amie HACHEMI Meriem et mes amis FIDOUH Souhila, DRA Rihab, Zair sidou, AID Imed, MOSTEGHANEMI Reda et les autres, qui ont su m'épauler et m'apporter leur soutien moral tout au long de cette aventure.

À vous tous, merci du fond du cœur.

AYMEN ZIZOU



# Dédicace

Je dédie ce travail à mes chers parents, qui m'ont toujours soutenu et encouragé tout au long de mes études. Je les remercie pour leur amour inconditionnel et leur confiance en moi.

Je remercie également mes frères MAHMOUD, MARWEN, LINA et ma chère sœur MERIEM Allah yerhamha, pour leurs conseils et leur présence à mes côtés.

Mes sincères remerciements vont également à mes amis proches ma chère amie LYNDA et mes camarade ZIZOU, ILYES, NADIR, IMAD, MOHAMMED et les autres qui ont su m'épauler et m'apporter leur soutien moral durant cette expérience.

Merci à tous

SIDOU



## Résumé :

---

Ce travail vise à démontrer le potentiel des fibres optiques microstructurées (FOM) dans la fabrication de capteurs optiques avancés. Les FOM offrent des propriétés uniques qui les rendent particulièrement adaptées à cette application. Leur structure microstructurée permet un contrôle précis de la propagation de la lumière, améliorant ainsi la sensibilité. En utilisant la méthode BPM nous avons modélisé et optimisé un capteur d'hémoglobine. Des améliorations futures, comme la miniaturisation et l'optimisation des fibres à cristaux photoniques, promettent de nouvelles perspectives dans ce domaine.

**Mots clés :** capteurs optiques d'hémoglobine- fibres à cristaux photoniques- sensibilité- méthode BPM- dispersion chromatique.

## الملخص:

---

تم إعداد هذا العمل لإظهار إمكانات الألياف البصرية ذات البنية الدقيقة في تصنيع أجهزة استشعار بصرية متطورة. توفر هذه الألياف خصائص فريدة تجعلها مناسبة بشكل خاص، حيث تسمح ببنيتها الدقيقة بالتحكم الدقيق في انتشار الضوء، مما يحسن من الحساسية والانتقائية. إحدى الأمثلة البارزة هي جهاز استشعار الهيموجلوبين، حيث تمكن هذه الألياف من تصميم أجهزة متكاملة وحساسة لرصد الهيموجلوبين في الوقت الفعلي. باستخدام برنامج المحاكاة البصرية RSOF، تم نمذجة وتحسين خصائص الألياف ذات البنية الدقيقة لتطوير جهاز استشعار للهيموجلوبين عالي الأداء. تم بعد ذلك تصنيع وإختبار هذا الجهاز بنجاح، مما أظهر مزايا الألياف ذات البنية الدقيقة لهذا النوع من التطبيقات. فضلاً عن ذلك، تفتح هذه الألياف الطريق أمام العديد من أنواع أجهزة الاستشعار المبتكرة في مجالات متنوعة. إن مرونة تصميمها وأدائها المتفوق يجعلها عناصر أساسية للجيل القادم من أنظمة القياس والكشف

## Abstract:

---

This work aims to demonstrate the potential of microstructured optical fibers (MOFs) in the fabrication of advanced optical sensors. MOFs offer unique properties that make them particularly well-suited for this application. Their microstructured design allows for precise control of light propagation, thereby enhancing sensitivity. Using the BPM method, we have modeled and optimized a hemoglobin sensor. Future improvements, such as miniaturization and optimization of photonic crystal fibers, promise new perspectives in this field.

**Keywords:** hemoglobin optical sensors- photonic crystal fibers- sensitivity- BPM method- chromatic dispersion.

# TABLES DES MATIÈRES

|                            |      |
|----------------------------|------|
| Remerciement.....          | I    |
| Dédicace.....              | II   |
| Résumé.....                | IV   |
| Table des matières.....    | V    |
| Liste des figures.....     | X    |
| Liste des tableaux.....    | XIII |
| Liste des acronymes.....   | XVI  |
| Introduction Générale..... | XVI  |

## Chapitre I : Les fibres optiques micro structurées

---

|         |  |   |
|---------|--|---|
| 1       | Introduction.....                          | 1 |
| 2       | la fibre optique .....                     | 1 |
| 2.1     | Généralités .....                          | 1 |
| 2.2     | Caractérisation de la fibre optique .....  | 2 |
| 2.2.1   | Ouverture numérique.....                   | 2 |
| 2.2.1.1 | La fréquence normalisée .....              | 2 |
| 2.2.2   | Atténuation.....                           | 3 |
| 2.2.3   | La bande passante .....                    | 4 |
| 2.2.4   | La dispersion .....                        | 4 |
| 2.2.4.1 | La dispersion chromatique.....             | 5 |
| 2.2.4.2 | La dispersion modale .....                 | 5 |
| 2.2.4.3 | La dispersion intermodale.....             | 5 |
| 2.2.4.4 | La dispersion matériau.....                | 6 |
| 2.2.4.5 | La dispersion du guidage .....             | 6 |
| 3       | Les types de la fibre optique.....         | 6 |
| 3.1     | Fibre Monomode et Multimode .....          | 6 |
| 3.2     | Fibre micro-structurées .....              | 7 |
| 4       | Fibre à cristaux photoniques .....         | 7 |
| 4.1     | Introduction.....                          | 7 |
| 4.2     | Cristaux photoniques.....                  | 8 |
| 4.2.1   | Définition .....                           | 8 |
| 4.2.2   | Différent types de cristaux .....          | 8 |
| 4.2.2.1 | Cristaux photoniques unidimensionnels..... | 8 |



|           |  |    |
|-----------|--|----|
| 4.2.2.2   | Cristaux photoniques 2D.....                                     | 8  |
| 4.2.2.2.1 | Types de cristaux photoniques 2D .....                           | 9  |
| 4.2.2.2.2 | Propriétés des cristaux photoniques 2D .....                     | 9  |
| 4.2.2.3   | Cristaux photoniques 3D.....                                     | 10 |
| 4.2.2.3.1 | Propriétés des cristaux photoniques 3D .....                     | 10 |
| 4.2.3     | Principe de guidage dans un cristal photonique .....             | 11 |
| 4.2.4     | Type des défauts en cristaux photoniques.....                    | 11 |
| 4.2.4.1   | Défauts ponctuels .....  | 11 |
| 4.2.4.2   | Défauts étendus.....   | 12 |
| 4.2.4.2.1 | Dimensions des motifs élémentaires .....                         | 12 |
| 4.2.4.2.2 | Valeur de la permittivité relative des motifs élémentaires ..... | 12 |
| 4.2.4.2.3 | Défaut par vacuité .....   | 13 |
| 4.2.5     | Bande Interdite Photonique .....                                 | 13 |
| 4.2.5.1   | Caractéristiques : .....   | 13 |
| 4.2.5.2   | Effet de la bande interdite photonique .....                     | 14 |
| 4.2.5.2.1 | Cavités dans les cristaux photoniques .....                      | 14 |
| 4.2.5.2.2 | Guides d'onde dans les cristaux photoniques.....                 | 15 |
| 5         | Fibres micro-structurées.....                                    | 16 |
| 5.1       | Introduction.....  | 16 |
| 5.2       | Fibres en régime de réflexion totale inter modifiée (RTIM) ..... | 16 |
| 5.3       | Fibres à bandes interdites photoniques.....                      | 18 |
| 5.4       | Propriétés des fibres optiques micro-structurées.....            | 19 |
| 5.4.1     | L'ouverture numérique .....                                      | 19 |
| 5.4.2     | Fréquence normalisée nommée .....                                | 20 |
| 5.4.3     | Les pertes de la fibre optique microstructure .....              | 20 |
| 5.4.3.1   | Pertes par diffusion.....  | 21 |
| 5.4.3.2   | La dispersion chromatique.....                                   | 21 |
| 5.4.3.3   | Pertes de confinement.....                                       | 22 |
| 5.5       | Techniques de fabrication.....                                   | 22 |
| 5.6       | Les différents types du FOMS : .....                             | 23 |
| 6         | Conclusion.....  | 24 |
| 7         | Bibliography.....  | 25 |

# Chapitre II : Les Capteurs optique

---

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1       | Introduction.....   | 29 |
| 2       | Généralités sur capteur .....                                   | 30 |
| 2.1     | Définition.....   | 30 |
| 2.2     | Classification des capteurs.....                                | 31 |
| 2.2.1   | Apport énergétique .....  | 31 |
| 2.2.1.1 | Capteurs passifs .....  | 31 |
| 2.2.1.2 | Capteurs actifs .....   | 31 |
| 2.2.2   | Type de sortie .....  | 32 |
| 2.2.3   | Structure d'un capteur.....                                     | 33 |
| 2.2.4   | Rôle du capteur.....  | 33 |
| 2.2.5   | Caractéristiques d'un capteur .....                             | 33 |
| 2.2.5.1 | Étalonnage .....  | 33 |
| 2.2.5.2 | Linéarité.....  | 34 |
| 2.2.5.3 | Sensibilité (s).....  | 34 |
| 2.2.5.4 | Temps de réponse ou rapidité.....                               | 34 |
| 2.2.5.5 | Résolution .....  | 34 |
| 3       | Capteurs optiques .....   | 34 |
| 3.1     | Introduction.....   | 34 |
| 3.2     | Différents types de capteurs optiques .....                     | 35 |
| 3.2.1   | Capteurs à photorésistance .....                                | 35 |
| 3.2.2   | Capteurs photodiodes .....                                      | 35 |
| 3.2.3   | Capteurs phototransistors .....                                 | 36 |
| 3.2.4   | Photodétecteurs à semi-conducteurs .....                        | 36 |
| 3.2.5   | Capteurs à photomultiplicateurs.....                            | 36 |
| 3.3     | Caractéristiques des capteurs à fibres optiques .....           | 36 |
| 4       | Capteurs à base de fibres à cristaux photoniques .....          | 37 |
| 4.1     | Système de détection par PCF .....                              | 38 |
| 4.1.1   | Détection par utilisation d'ondes évanescentes .....            | 38 |
| 4.1.2   | Détection par utilisation de la biréfringence.....              | 38 |
| 4.1.3   | Détection par utilisation de la bande interdite photonique..... | 39 |
| 4.1.4   | Détection par utilisation des réseaux de Bragg.....             | 39 |
| 4.1.4.1 | Réseaux de Bragg à pas courts.....                              | 39 |
| 4.1.4.2 | Réseaux de Bragg à pas longs .....                              | 40 |



|         |  |    |
|---------|--|----|
| 4.1.5   | Détection par utilisation de l'interférométrie .....                 | 41 |
| 4.1.6   | Détection par utilisation de l'analyse spectrale .....               | 41 |
| 4.1.6.1 | Diffusion Brillouin .....  | 42 |
| 4.1.6.2 | Diffusion Raman.....   | 42 |
| 4.1.7   | Détection par utilisation des plasmons de surface .....              | 43 |
| 4.2     | Les Effets qui influent la détection .....                           | 43 |
| 4.2.1   | L'effet de la distance entre les trous d'aire sur la détection ..... | 44 |
| 4.2.2   | Effets du diamètre sur la détection .....                            | 44 |
| 4.2.3   | Effets du taux de remplissage d'air .....                            | 44 |
| 5       | Capteur d'hémoglobine.....   | 44 |
| 5.1     | Principe de fonctionnement .....                                     | 45 |
| 5.2     | Les propriétés Physiques des Cellules.....                           | 46 |
| 5.3     | Modèle d'indice de l'hémoglobine efficace de diverses cellules.....  | 46 |
| 6       | Les différentes applications d'un capteur optique.....               | 47 |
| 7       | Conclusion.....  | 48 |
| 8       | Bibliographie .....  | 49 |

## Chapitre III : Simulation d'un capteur d'hémoglobine

---

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1       | Introduction.....  | 54 |
| 2       | Présentation de l'outils de simulation et les méthodes de simulations numériques ..... | 54 |
| 2.1     | Définition du Simulateur RSoftCAD.....   | 55 |
| 2.2     | Modules de simulation associés .....   | 55 |
| 2.2.1   | Band SOLVE.....  | 55 |
| 2.2.1.1 | Méthode des ondes planes (PWE) .....   | 55 |
| 2.2.2   | Fullwave.....  | 56 |
| 2.2.2.1 | Méthode des différences finies dans le domaine temporel FDTD.....                      | 56 |
| 2.2.2.2 | Avantages et inconvénients de ces deux méthodes.....                                   | 56 |
| 2.2.3   | BeamPROP .....   | 57 |
| 2.2.3.1 | La méthode BPM (Beam Propagation Méthode) .....  | 57 |
| 3       | Partie théorique .....   | 58 |
| 3.1     | Introduction.....  | 58 |
| 3.2     | L'indice de réfraction .....   | 58 |
| 3.3     | La sensibilité .....   | 60 |
| 4       | Conception et modélisation des PCFs.....   | 60 |
| 4.1     | Structure PCF.....   | 61 |

|         |  |       |
|---------|--|-------|
| 4.1.1   | Structure A.....   | 61    |
| 4.1.2   | Structure B.....   | 62    |
| 4.1.3   | Structure C.....   | 62    |
| 4.2     | Les simulations .....  | 62    |
| 4.3     | Indice de réfraction.....  | 63    |
| 4.4     | Dispersion.....  | 64    |
| 4.5     | Influence de la concentration d'hémoglobine sur la dispersion .....            | 64    |
| 4.5.1   | Le premier cas (Simulation X) .....  | 64    |
| 4.5.2   | le deuxième cas (Simulation Y) .....   | 66    |
| 4.6     | Influence de la concentration d'hémoglobine sur la sensibilité du capteur..... | 67    |
| 4.6.1   | Le premier cas (Simulation X) .....  | 68    |
| 4.6.1.1 | Structure (A) .....  | 68    |
| 4.6.1.2 | Structure (B) .....  | 69    |
| 4.6.1.3 | Structure (C).....   | 70    |
| 4.6.2   | Le deuxième cas (expérience Y) .....   | 72    |
| 4.6.2.1 | Structure (A) .....  | 72    |
| 4.6.2.2 | Structure (B) .....  | 73    |
| 4.6.2.3 | Structure (C).....   | 74    |
| 4.6.3   | Les résultats de calcul .....  | 76    |
| 4.6.3.1 | Comparaison des résultats.....   | 76    |
| 5       | Conclusion.....  | 78    |
| 6       | Bibliographie .....  | 79    |
|         | Conclusion générale.....   | XVIII |

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I : Les fibres optiques micro-structurées

---

|  |    |
|--|----|
| Figure I. 1: Structure de la fibre .....   | 1  |
| Figure I. 2:Ouverture numérique d'une fibre optique [1].....   | 2  |
| Figure I. 3:Différentes pertes dans une fibre optique [3] .....  | 4  |
| Figure I. 4: La dispersion chromatique.....  | 5  |
| Figure I. 5: Cristaux photoniques unidimensionnel 1D [7].....  | 8  |
| Figure I. 6:Structure à BIP - 2D [8] . .....   | 9  |
| Figure I. 7:Cristaux photoniques à trois dimensions 3D.(a) structure tridimensionnel<br>Yablonivite.(b)structure tridimensionnelle (um).(c) structure tridimensionnel tas de bois [9]..... | 10 |
| Figure I. 8:Guidage de la lumière dans la taille de l'écriture [10].....   | 11 |
| Figure I. 9:Défaut ponctuels (a), Défaut lacunaire (b) et (c) Défauts de substitutions [11].....   | 11 |
| Figure I. 10: défaut de dimension du motif élémentaire [12].....   | 12 |
| Figure I. 11: Défaut de distance entre motifs élémentaires [12]. .....   | 12 |
| Figure I. 12: Défaut sur la permittivité relative [12].....  | 13 |
| Figure I. 13: Défaut par vacuité (c'est le défaut le plus utilisé) [12].....   | 13 |
| Figure I. 14: Cavité résonante dans un cristal photonique 2D [14].....   | 15 |
| Figure I. 15: Guides d'ondes à cristal photonique (simulé par le logiciel Rsoft® CAD) [16] : a) Rectiligne<br>..... b) Courbures à 90°<br>.....  | 15 |
| Figure I. 16: les zones de transmission autorisées et interdites. Dans les milieux contenant de petites<br>inclusions.....   | 16 |
| Figure I. 17: architecture de fibre micro-structurée .....   | 17 |
| Figure I. 18:Schéma descriptif de la propagation par réflexion totale interne modifiée dans une PCF à<br>cœur plein [20].....  | 18 |
| Figure I. 19:Propagation des rayons lumineux dans une fibre à BIP [20].....  | 19 |
| Figure I. 20: Schéma représentant les différents modes de propagation possibles pour les fibres<br>optiques microstructures à cœur plein [22]. .....                                       | 20 |
| Figure I. 21:Illustration de la technique de l'assemblage-étirage Pour la fabrication des PCFs [17].....   | 22 |
| Figure I. 22:les étapes de fabrication des FOMS par la méthode de l'assemblage-étirage [18].....   | 23 |
| Figure I. 23:Différents types de fibres micro-structurées [23]. .....  | 23 |

## Chapitre II : Les Capteurs optique

---

|   |    |
|---|----|
| Figure II. 1 : Principe d'un capteur [1].....   | 31 |
| Figure II. 2 : schéma représentatif d'un capteur passif .....                             | 31 |
| Figure II. 3 : schéma représentatif d'un capteur actif .....                              | 32 |
| Figure II. 4: Structure d'un capteur [3] .....  | 33 |
| Figure II. 5 : Courbe d'étalonnage d'un capteur.....                                      | 34 |
| Figure II. 6 : Quelques applications des capteurs optiques.....                           | 35 |
| Figure II. 7 : Schéma représentatif des fibres à réseaux de Bragg à pas courts [15] ..... | 40 |
| Figure II. 8 : structure de fonctionnement.....   | 45 |
| Figure II. 9 : Indice de réfraction cellulaire pour la biologie cellulaire .....          | 46 |



## Chapitre III : Simulation d'un capteur d'hémoglobine

---

|   |    |
|---|----|
| Figure III. 1 : Section transversale de la structure PCF .....  | 62 |
| Figure III. 2 : Indices effectifs des structures proposées sans eau. (a) Structure A. (b) Structure B. (c) Structure C. ....  | 63 |
| Figure III. 3: Indices effectifs des structures proposées avec eau. (a) Structure A. (b) Structure B. (c) Structure C .....   | 63 |
| Figure III. 4: Graphique montrant la variation de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différentes concentrations d'hémoglobine pour la structure (A).....  | 64 |
| Figure III. 5 : Graphique montrant la variation de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différentes concentrations d'hémoglobine pour la structure (B)..... | 65 |
| Figure III. 6: Graphique montrant la variation de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différentes concentrations d'hémoglobine pour la structure (C).....  | 65 |
| Figure III. 7: Graphique montrant la variation de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différentes concentrations d'hémoglobine pour la structure (A).....  | 66 |
| Figure III. 8: Graphique montrant la variation de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différentes concentrations d'hémoglobine pour la structure (B).....  | 66 |
| Figure III. 9: Graphique montrant la variation de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différentes concentrations d'hémoglobine pour la structure (C).....  | 67 |
| Figure III. 10 : Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.5 \mu\text{m}$ .....                      | 68 |
| Figure III. 11 : Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.6 \mu\text{m}$ .....                      | 68 |
| Figure III. 12 : Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.7 \mu\text{m}$ .....                      | 68 |
| Figure III. 13: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.8 \mu\text{m}$ .....                       | 69 |
| Figure III. 14: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.5 \mu\text{m}$ .....                       | 69 |
| Figure III. 15: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.6 \mu\text{m}$ .....                       | 69 |
| Figure III. 16: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.7 \mu\text{m}$ .....                       | 70 |
| Figure III. 17: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.8 \mu\text{m}$ .....                       | 70 |
| Figure III. 18: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.5 \mu\text{m}$ .....                       | 70 |
| Figure III. 19: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.6 \mu\text{m}$ .....                       | 71 |
| Figure III. 20: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.7 \mu\text{m}$ .....                       | 71 |
| Figure III. 21: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.8 \mu\text{m}$ .....                       | 71 |
| Figure III. 22: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.5 \mu\text{m}$ .....                       | 72 |

|   |    |
|---|----|
| Figure III. 23: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.6 \mu\text{m}$ ..... | 72 |
| Figure III. 24: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.7 \mu\text{m}$ ..... | 72 |
| Figure III. 25: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.8 \mu\text{m}$ ..... | 73 |
| Figure III. 26: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.5 \mu\text{m}$ ..... | 73 |
| Figure III. 27: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.6 \mu\text{m}$ ..... | 73 |
| Figure III. 28: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.7 \mu\text{m}$ ..... | 74 |
| Figure III. 29: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.8 \mu\text{m}$ ..... | 74 |
| Figure III. 30: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.5 \mu\text{m}$ ..... | 74 |
| Figure III. 31: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.6 \mu\text{m}$ ..... | 75 |
| Figure III. 32: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.7 \mu\text{m}$ ..... | 75 |
| Figure III. 33: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à $\lambda=1.8 \mu\text{m}$ ..... | 75 |

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre I : Les fibres optiques micro-structurées

---

|   |   |
|---|---|
| Tableau I. 1 : tableau comparatif entre la caractéristique des fibres monomode et multimode ..... | 7 |
|---|---|

## Chapitre III : Simulation d'un capteur d'hémoglobine

---

|   |    |
|---|----|
| Tableau III. 1: Comparatif des méthodes de calcul par ondes planes et par FDTD [7]. .....                       | 57 |
| Tableau III. 2 : Valeurs numériques des coefficients de l'équation [9]. .....                                   | 59 |
| Tableau III. 3 : Paramètres de la structure A .....   | 61 |
| Tableau III. 4: Paramètres opto-géométriques de la structure B .....  | 62 |
| Tableau III. 5 : Paramètres opto-géométriques de la structure C .....   | 62 |
| Tableau III. 6: Valeurs numériques des sensibilités pour différentes longueurs d'ondes. ....                    | 76 |
| Tableau III. 7: Optimisation de la longueur d'onde pour minimiser la sensibilité des structures A, B et C ..... | 77 |

## LISTE DES ACRONYMES

**PCFs** : fibres à cristaux photoniques

**BIP** : bande interdite photonic

**RTIM** : Fibres en régime de réflexion totale inter modifiée

**FMAS** : fibre micro\_structuré air/silice

**FOMS**: fibre optique micro\_structuré

**RTD**: Resistance Temperature Detector

**FBG**: Fiber Bragg Grating

**LPG**: Long Period Grating

**OTDR**: Optical Time-Domain Reflectometer

**SPR**: Surface Plasmon Resonance

**LED**: Light-Emitting Diode

**FNIRS**: Functional Near-Infrared Spectroscopy

**PWE** : méthode d'onde plan

**HGB** : hémoglobine

**BPM** : Beam Propagation method

**FDTD** : méthode des differences finies dans le domaine temporel

# Introduction Générale



## Introduction Générale

Les capteurs optiques sont couramment utilisés dans divers secteurs, allant de l'environnement à la médecine, en raison de leur capacité à transmettre et manipuler la lumière avec précision. Cette étude se concentre sur les capteurs à fibre optique utilisant des fibres microstructurées, également appelées fibres à cristaux photoniques. Les propriétés optiques de ces fibres innovantes sont uniques en raison de leur structure complexe, qui comprend des dispositions régulières de trous ou de cavités dans la gaine.

L'objectif de cette étude était de créer une simulation d'un capteur à fibre optique microstructurée spécialement conçu pour mesurer le taux d'hémoglobine, une protéine essentielle au transport de l'oxygène dans le sang. En utilisant la méthode de simulation BPM (Beam Propagation Method), nous avons modélisé la propagation de la lumière dans la fibre microstructurée afin d'évaluer sa sensibilité aux variations du taux d'hémoglobine. Grâce à cette simulation, nous avons pu comprendre le fonctionnement du capteur et améliorer ses performances en termes de sensibilité et de précision.

Ce mémoire offre une perspective globale sur les fibres microstructurées et leurs applications, ainsi qu'une analyse approfondie des capteurs à fibre optique et de leurs caractéristiques spécifiques. Nous présentons la méthode de simulation BPM et examinons les résultats de la simulation du capteur d'hémoglobine. En résumé, cette étude contribue à l'évolution des capteurs à fibre optique en examinant une application médicale particulière, ouvrant ainsi des opportunités pour le développement de capteurs plus performants pour le suivi de la santé et le diagnostic médical.

# Chapitre I

Les fibres optique micro-structurées

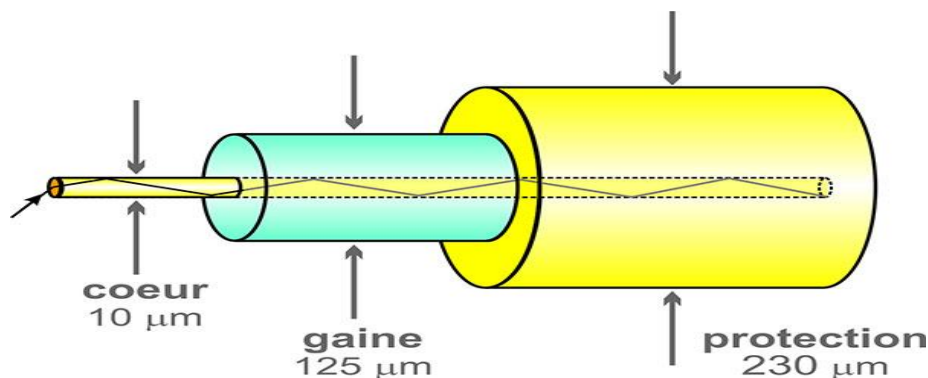
## 1 Introduction

Ce chapitre constitue une introduction aux fibres micro-structurées. Ces fibres sont regroupées en deux catégories en fonction du principe de guidage de la lumière. Ce guidage repose sur deux types de guides différents, chacun basé sur des phénomènes physiques distincts pour la transmission de la lumière. Tout d'abord, nous avons exposé les exigences qui ont conduit à l'idée de concevoir des matériaux à cristaux photoniques, ce qui a abouti à la création des fibres à cristaux photoniques (PCFs). Ensuite, nous expliquerons les phénomènes physiques des deux principes de propagation présents dans les PCFs. Nous examinerons également les aspects pratiques de ces fibres en étudiant leur fonctionnement monomode, ainsi que leurs caractéristiques de perte et de dispersion. Cette première étude vise à mettre en évidence les principaux avantages des différentes classes de PCFs par rapport aux fibres conventionnelles.

## 2 la fibre optique

### 2.1 Généralités

Les fibres optiques sont des câbles utilisés pour la transmission de données à grande vitesse à travers la lumière. Elles jouent un rôle essentiel dans les réseaux de communication modernes, offrant des débits élevés et une bande passante importante. Les fibres optiques sont constituées d'un cœur en verre entouré d'une gaine protectrice. La lumière est guidée à travers le cœur de la fibre par réflexion totale interne, ce qui permet une transmission efficace sur de longues distances.



*Figure I. 1: Structure de la fibre*

La fibre optique est un dispositif qui exploite les propriétés réfractives de la lumière pour guider les ondes lumineuses, ce qui permet de confiner la lumière à l'intérieur. Cette lumière est réfléchi à plusieurs reprises à l'interface entre les deux matériaux, grâce à un phénomène appelé réflexion totale interne. Pour assurer une protection, l'ensemble est généralement enveloppé d'une gaine plastique

## 2.2 Caractérisation de la fibre optique

La fibre optique est caractérisée par plusieurs paramètres qui sont déterminés à partir de ses différents types. Les quatre paramètres les plus importants sont [1] :

- Ouverture numérique
- Atténuation
- La bande passante
- La dispersion

### 2.2.1 Ouverture numérique

L'ouverture numérique d'une fibre optique est un paramètre crucial qui détermine sa capacité à collecter et à transmettre efficacement la lumière. Elle représente l'angle maximal sous lequel la fibre peut accepter la lumière incidente. Une ouverture numérique plus élevée permet une collecte de lumière plus efficace, ce qui se traduit par une meilleure transmission des signaux optiques. En optimisant l'ouverture numérique, les fibres optiques peuvent offrir des performances supérieures en termes de débit, de distance de transmission et de qualité du signal. Il s'agit donc d'un facteur clé dans la conception et l'optimisation des systèmes de communication optique.

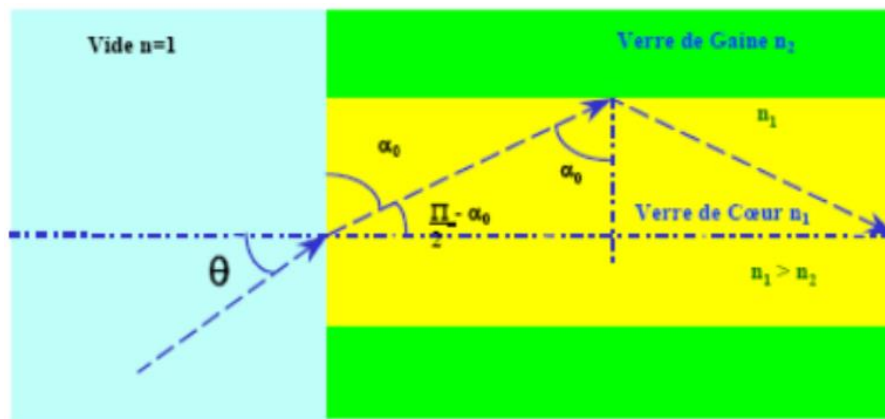


Figure I. 2: Ouverture numérique d'une fibre optique [1].

L'ouverture numérique :

$$ON = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad I. 1$$

$n_c$  l'indice de cœur et  $n_g$  l'indice de la gaine.

#### 2.2.1.1 La fréquence normalisée

V qu'on définit comme suit :

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad I. 2$$

Avec  $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière,  $a$  le diamètre de cœur,

- nombre de modes  $N$  :

$$N = \frac{V^2}{2} \quad I. 3$$

La valeur  $V=2,405$  marque la transition du régime monomode au régime multimode, et elle est associée à une longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$ .

$$\lambda_c = \frac{2\pi a_0 N}{2,405} \quad I. 4$$

Pour une longueur d'onde spécifique et des indices de cœur et de gaine donnés, la longueur d'onde de coupure permet de déterminer le rayon maximal du cœur nécessaire pour obtenir une fibre monomode.

$$a_{max} = \frac{2,405 \cdot \lambda}{2\pi \cdot N} \quad I. 5$$

### 2.2.2 Atténuation

L'atténuation de la fibre optique est un phénomène inévitable dans la transmission de signaux optiques sur de longues distances. Elle se réfère à la diminution de l'intensité lumineuse le long de la fibre. L'atténuation est principalement causée par des pertes d'énergie dues à l'absorption, la diffusion et la dispersion de la lumière. Des techniques telles que l'utilisation de fibres à faible atténuation, des amplificateurs optiques et des répéteurs sont employées pour compenser cette perte d'énergie et maintenir la qualité du signal tout au long de la transmission optique. L'atténuation d'une fibre optique est déterminée en comparant la puissance optique transmise à travers la fibre avec la puissance reçue, et est exprimée en unités logarithmiques par unité de longueur. [2]

$$A[dB] = 10 \log \left( \frac{p_e}{p_s} \right) \quad I. 6$$

$A[dB]$  : L'atténuation en décibel.

$p_e$  : La puissance lumineuse à l'entrée

$p_s$  : La puissance lumineuse à la sortie

Une perte ou atténuation se produit lorsque de l'énergie lumineuse est perdue dans la fibre optique. Cette perte est mesurée en décibels par kilomètre (dB/km). Les longues distances de transmission utilisées avec les fibres optiques ont un impact direct sur le signal lumineux, mais il existe également d'autres causes d'atténuation telles que l'absorption, la diffusion, les

courbures et les pertes de connectivité. La perte de signal est également due à deux phénomènes : la dispersion chromatique et la dispersion modale. La figure I.3 illustre les différents types d'atténuation et de pertes.

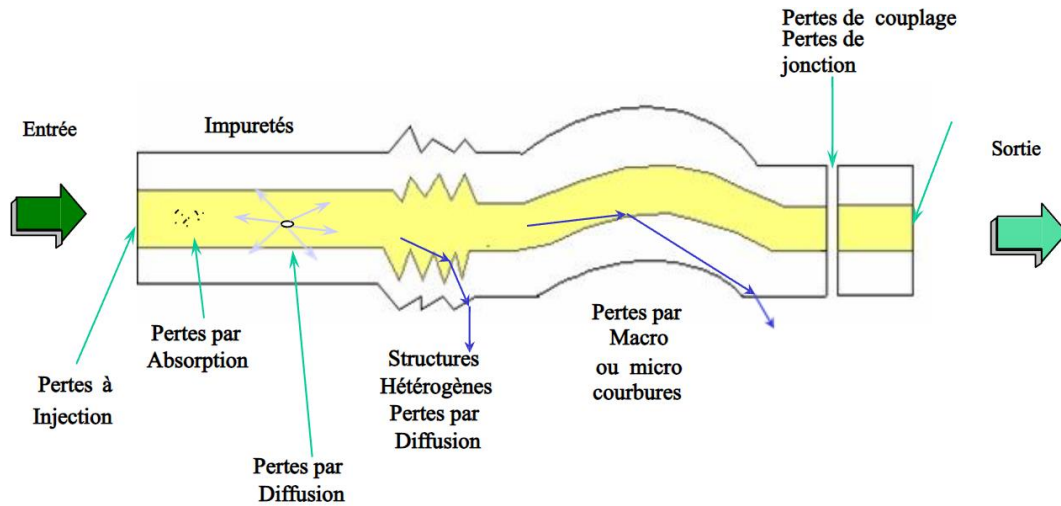


Figure I. 3: Différentes pertes dans une fibre optique [3] .

### 2.2.3 La bande passante

Elle correspond à la fréquence maximale à laquelle les impulsions peuvent être transmises. Cette fréquence est restreinte par la dispersion modale et la dispersion intrinsèque du matériau. La bande passante pour une longueur donnée de la fibre  $L$  est :

$$BP = \frac{L}{\Delta t_1 + \Delta t_2} \quad I. 7$$

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

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

### 2.2.4 La dispersion

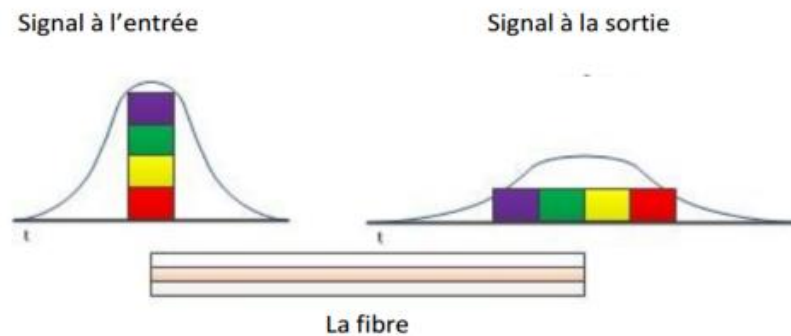
La propagation d'un signal au sein d'une fibre optique s'accompagne d'un phénomène de dispersion, par lequel le signal s'étale progressivement au fil de sa progression dans la fibre. Ce processus de dispersion comporte généralement trois composantes principales : la dispersion modale, la dispersion chromatique et la dispersion du mode de polarisation. Ces différents types de dispersion contribuent à l'élargissement du signal initial lors de sa transmission à travers le câble à fibres optiques [4].

### 2.2.4.1 La dispersion chromatique

La dispersion chromatique se produit lorsque la vitesse de propagation d'un signal varie en fonction de la longueur d'onde dans un mode donné. Cela entraîne un étalement temporel du signal lié à sa largeur spectrale, ce qui signifie que différentes longueurs d'onde ne se propagent pas à la même vitesse. On définit la dispersion chromatique comme étant la variation du temps de propagation d'un signal quasi-monochromatique par unité de longueur en fonction de la longueur d'onde : elle est exprimée en Ps/(nm.km).

$$\frac{dtg}{d\lambda} \quad I. 8$$

tg: est le temps de groupe, soit l'inverse de la vitesse de groupe. Et  $\lambda$ : La longueur d'onde.



**Figure I. 4:** La dispersion chromatique.

### 2.2.4.2 La dispersion modale

La dispersion modale représente le principal moyen de dispersion dans les fibres multimodes. Les rayons lumineux empruntent des trajets différents et chaque rayon se déplace à sa propre vitesse en fonction de sa longueur d'onde.

### 2.2.4.3 La dispersion intermodale

La dispersion dans une fibre optique est causée par les caractéristiques de dispersion du matériau ainsi que par la structure du guide d'onde. Lorsqu'il s'agit d'un mode spécifique, le signal s'élargit en raison du changement de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde. Ce phénomène est significatif dans les fibres monomodes, mais peut être négligé dans les fibres multimodes.

#### 2.2.4.4 La dispersion matériau

La dispersion qui accompagne le matériau se produit même lorsqu'il s'agit d'une fibre monomode, où la longueur d'onde de propagation est centrée autour d'une valeur spécifique avec une légère variation. Cette variation dépend de la largeur spectrale de la source utilisée pour injecter la lumière dans la fibre. Comme l'indice de réfraction de la fibre dépend de chaque composante du spectre, chaque mode se propage à une vitesse différente, ce qui entraîne un élargissement temporel et une déformation de l'impulsion. L'expression mathématique de la dispersion du matériau peut être décrite par la relation suivante :

$$D_{mat} = \frac{\lambda d^2 n}{c d\lambda^2} \quad I. 9$$

#### 2.2.4.5 La dispersion du guidage

Cette expression découle de la résolution des équations d'onde, qui révèlent que la constante de propagation dépend de la longueur d'onde, même si la dispersion du matériau n'est pas prise en considération.

### 3 Les types de la fibre optique

#### 3.1 Fibre Monomode et Multimode

Il existe différents types de fibres optiques, adaptés à des besoins spécifiques. L'un de ces types est la fibre monomode, qui présente un cœur très fin, généralement inférieur à 10 micromètres de diamètre. Cette fibre permet la transmission d'un seul mode de lumière, ce qui réduit les pertes et les distorsions du signal. Elle est principalement utilisée dans les réseaux à longue distance, tels que les liaisons intercontinentales et les réseaux de télécommunications à haut débit.

Une autre variante est la fibre multimode, qui possède un cœur plus large, généralement de l'ordre de 50 à 100 micromètres de diamètre. Cette fibre permet la transmission de plusieurs modes de lumière simultanément. Bien que les fibres multimodes offrent une bande passante plus élevée, elles sont sujettes à des phénomènes de dispersion modale, ce qui limite leur utilisation sur de longues distances. Elles sont couramment utilisées dans les réseaux locaux et les applications à courte distance, tels que les réseaux informatiques d'entreprise.



| <i>Caractéristiques</i>                  | <i>Fibre monomode</i>  | <i>Fibre multimode</i>  |
|--|--|---|
| <i>Diamètre du cœur</i>                  | 8 à 10   | 50 à 62.5   |
| <i>Rayonnement</i>                       | Un seul mode de rayonnement se propage                             | Plusieurs modes de rayonnement se propagent   |
| <i>Dispersion</i>                        | Faible dispersion  | Dispersion modal élevée   |
| <i>Distance de transmission maximale</i> | Plusieurs kilomètres   | Jusqu'à quelques centaines de mètres  |
| <i>Connecteurs couramment utilisés</i>   | SC LC, FC, etc.  | ST, SC, LC etc.   |
| <i>Cout</i>                              | Plus élevé   | Moins cher  |
| <i>Applications courantes</i>            | Réseau (WAN). Télécommunications fibres optiques à grande capacité | Réseaux locaux (LAN), système de câblage à courte distance, fibre optique à faible cout |

**Tableau I. 1** : tableau comparatif entre la caractéristique des fibres monomode et multimode

### 3.2 Fibre micro-structurées

En plus de ces types de fibres plus traditionnels, il existe également des fibres optiques micro-structurées, également connues sous le nom de fibres à cristaux photoniques ou fibres à cristaux liquides. Ces fibres sont conçues avec des structures périodiques dans leur géométrie interne, ce qui leur confère des propriétés optiques uniques. Les fibres micro-structurées offrent des caractéristiques avancées telles que la gestion de la polarisation de la lumière, la dispersion chromatique ajustable et le confinement de la lumière dans des guides d'ondes à très faible dimension. Ces fibres sont utilisées dans des domaines tels que les télécommunications, la spectroscopie, les capteurs optiques et les lasers à fibre.

## 4 Fibre à cristaux photoniques

### 4.1 Introduction

Les récents progrès dans les matériaux ont mis en évidence une vision prometteuse pour la conception des dispositifs de propagation de la lumière grâce au contrôle des propriétés électromagnétiques. De nouvelles percées dans les nanotechnologies permettent désormais la production des matériaux artificiels avec une structure périodique qui a ouvert des possibilités technologiques et scientifiques sans précédent, surtout dans le domaine optique [5].

## 4.2 Cristaux photoniques

### 4.2.1 Définition

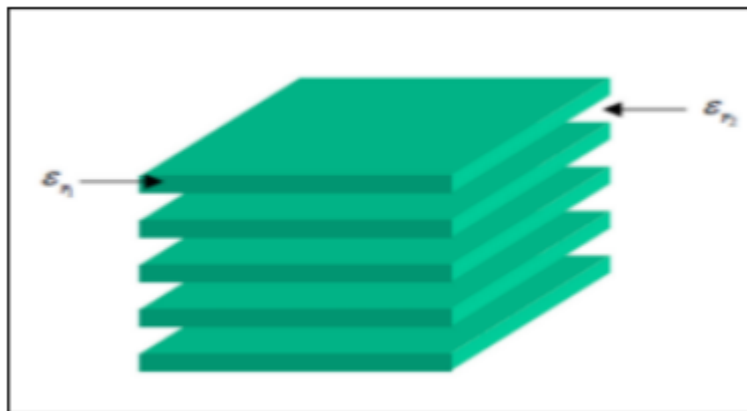
Dans les cristaux photoniques, la structure présente une variation périodique de l'indice optique selon une ou plusieurs directions de l'espace. Ce changement périodique de l'indice crée des bandes de fréquences spécifiques dans lesquelles la lumière ne peut pas se propager. Ce phénomène de propagation des ondes électromagnétiques dans ces milieux est analogue à la propagation des électrons dans un cristal atomique, ce qui a conduit à nommer ces bandes de fréquences interdites comme des "bandes photoniques interdites" [6].

Cependant, il y a trois catégories principales : unidimensionnelle, bidimensionnelle et tridimensionnelle. Ces catégories indiquent le nombre de directions dans lesquelles la constante diélectrique présente une périodicité.

### 4.2.2 Différent types de cristaux

#### 4.2.2.1 Cristaux photoniques unidimensionnels

Les cristaux photoniques unidimensionnels (1D) sont des structures périodiques simples appelées Miroirs de Bragg. Ils sont composés d'une alternance de couches planes de diélectrique d'épaisseur ( $\lambda/4$ ), où  $\lambda$  représente la longueur d'onde guidée dans le matériau.

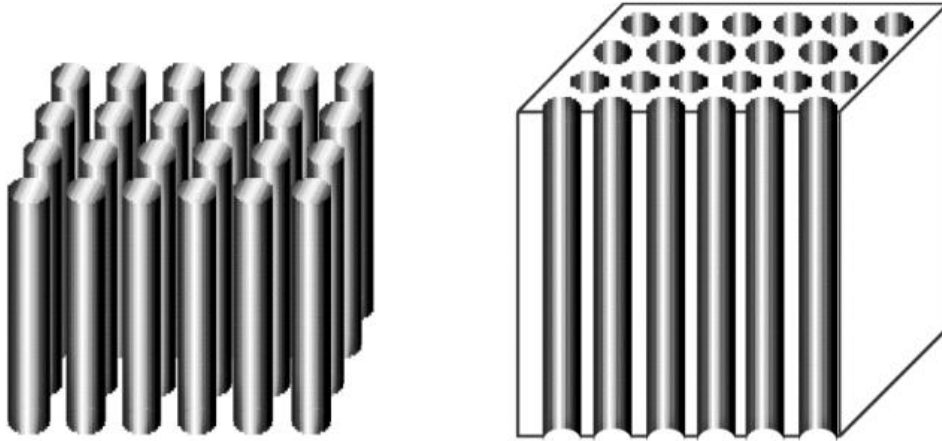


*Figure I. 5: Cristaux photoniques unidimensionnel 1D [7].*

#### 4.2.2.2 Cristaux photoniques 2D

Ces cristaux photoniques 2D peuvent être obtenus par différentes techniques, comme l'insertion de tiges diélectriques dans l'air ou un autre matériau, ou la création d'un réseau de trous percés dans un matériau diélectrique. Les cristaux photoniques 2D sont composés de couches de matériaux périodiquement organisées, qui créent un bande-gap photonique, c'est-à-dire un domaine de fréquences où la lumière ne peut pas se propager à travers le matériel.

Les cristaux photoniques 2D fonctionnent comme un filtre optique, où la lumière est divisée en deux composantes : une composante qui est autorisée à se propager à travers le cristal et une composante qui est bloquée. Le bande-gap photonique est créé par l'interaction entre la lumière et la structure périodique du cristal.



*Figure I. 6: Structure à BIP - 2D [8] .*

#### 4.2.2.2.1 Types de cristaux photoniques 2D

Il existe différents types de cristaux photoniques 2D, qui peuvent être classés en deux catégories principales :

- Cristaux photoniques 2D avec une structure périodique : ces cristaux ont une structure périodique, où les couches de matériaux sont organisées en un motif répétitif.
- Cristaux photoniques 2D avec une structure non périodique : ces cristaux n'ont pas de structure périodique, mais ont une structure non régulière qui crée un bande-gap photonique.

#### 4.2.2.2.2 Propriétés des cristaux photoniques 2D

Les cristaux photoniques 2D ont plusieurs propriétés intéressantes, notamment :

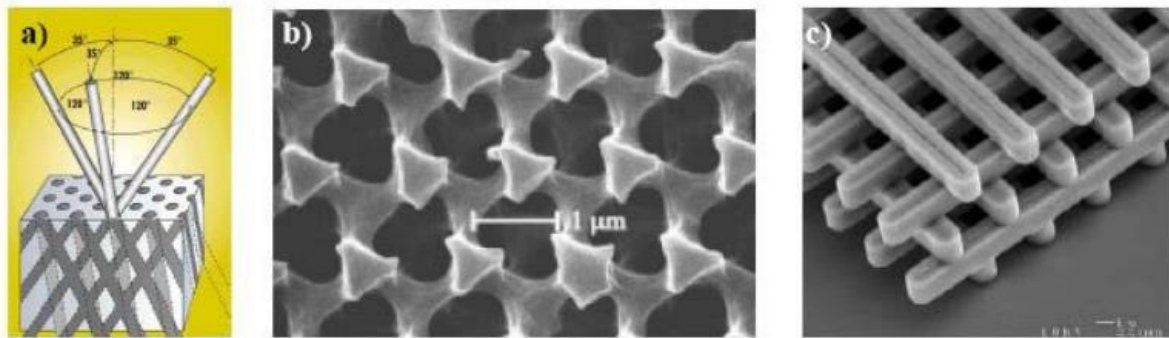
- Bande-gap photonique : les cristaux photoniques 2D créent un bande-gap photonique, ce qui permet la manipulation sélective de la lumière.
- Réflexion et transmission : les cristaux photoniques 2D peuvent refléter ou transmettre la lumière, ce qui permet de contrôler le flux de lumière.
- Polarisation : les cristaux photoniques 2D peuvent affecter la polarisation de la lumière, ce qui permet de contrôler l'orientation du champ électrique.

### 4.2.2.3 Cristaux photoniques 3D

Dans le cas des cristaux photoniques 3D, la structure est conçue pour avoir un arrangement périodique de blocs de construction tridimensionnels, tels que des trous d'air ou des barres, qui sont arrangés en un motif répétitif.

La structure unique des cristaux photoniques 3D permet la création d'un bande-gap photonique, ce qui est un domaine de fréquences où la lumière ne peut pas se propager à travers le matériel. Ce bande-gap peut être conçu pour se produire à des longueurs d'onde spécifiques, ce qui permet la manipulation sélective de la lumière.

Le bande-gap photonique est créé par l'interaction entre la lumière et l'arrangement périodique des blocs de construction. Les ondes lumineuses interagissent avec la structure, ce qui leur fait courber ou les réfléchir, ce qui conduit à la création du bande-gap.



**Figure I. 7:** Cristaux photoniques à trois dimensions 3D. (a) structure tridimensionnel Yablonicite. (b) structure tridimensionnelle ( $\mu\text{m}$ ). (c) structure tridimensionnel tas de bois [9].

#### 4.2.2.3.1 Propriétés des cristaux photoniques 3D

Certaines des propriétés clés des cristaux photoniques 3D incluent :

- Émission directionnelle : Le cristal peut émettre de la lumière dans une direction spécifique, ce qui est utile pour les applications telles que les technologies lasers.
- Sélectivité par longueur d'onde : Le cristal peut être conçu pour manipuler sélectivement la lumière à des longueurs d'onde spécifiques, ce qui est utile pour les applications telles que les systèmes de communication optique.
- Confinement de la lumière : Le cristal peut confiner la lumière à l'intérieur de sa structure, ce qui est utile pour les applications telles que les guide-rails et les résonateurs optiques.
- Indice de réfraction négatif : Le cristal peut exposer un indice de réfraction négatif, ce qui permet la création de dispositifs optiques novateurs tels que les lentilles parfaites et les dispositifs d'écran.

### 4.2.3 Principe de guidage dans un cristal photonique

En introduisant un défaut linéaire dans le cristal photonique, tel que l'omission d'une ou plusieurs rangées de trous, il est possible de diriger la lumière dans une direction spécifique. Si un photon a une énergie à l'intérieur de la bande interdite, il sera confiné dans le guide. Les défauts linéaires peuvent être utilisés pour créer divers composants. Pour augmenter le taux de transmission à travers ces périphériques, la taille ou la forme des trous aux coins et aux jonctions pourraient être modifiées pour réduire le couplage entre les modes de guidage et les modes rayonnés de courbure.

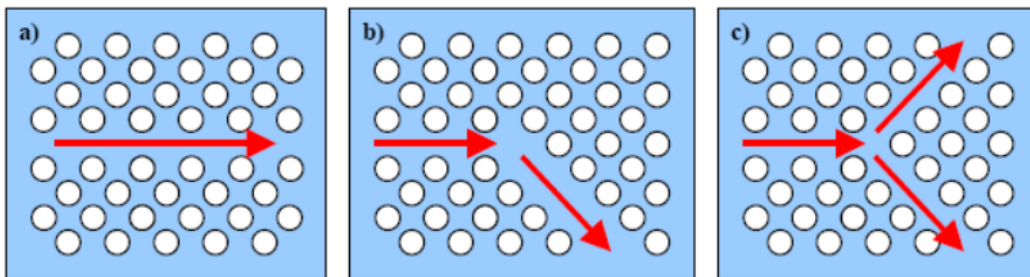


Figure I. 8: Guidage de la lumière dans la taille de l'écriture [10].

### 4.2.4 Type des défauts en cristaux photoniques

#### 4.2.4.1 Défauts ponctuels

Il existe de nombreuses façons de créer des défauts ponctuels dans les cristaux photoniques. Ceux-ci comprennent l'un des motifs de cristal qui est extrait ou dont un ou plusieurs motifs sont ajoutés ou modifiés. Dans tous les cas de cette figure, cela conduit à la création d'une cavité optique, dans la bande interdite du cristal, placez l'énergie du mode de résonance de la cavité.

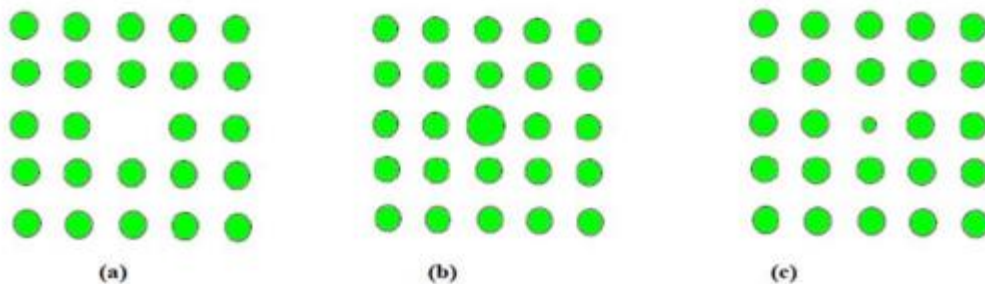


Figure I. 9: Défaut ponctuels (a), Défaut lacunaire (b) et (c) Défauts de substitutions [11].

4.2.4.2 Défauts étendus

4.2.4.2.1 Dimensions des motifs élémentaires

Pour perturber la régularité d'une structure BIP, il est possible d'ajuster la taille du motif de base constituant le cristal photonique.

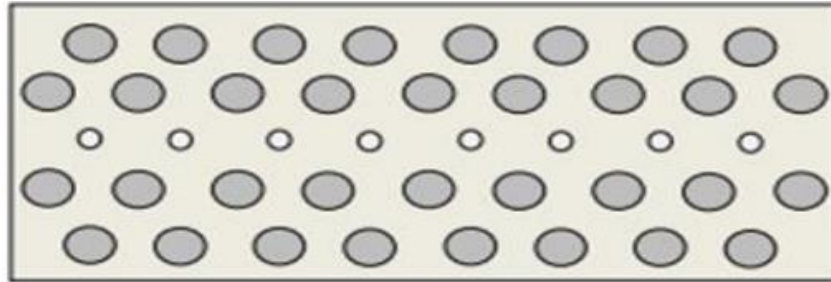


Figure I. 10: défaut de dimension du motif élémentaire [12].

La figure I.10 présente les dimensions réduites des motifs élémentaires de la troisième rangée. Il est également possible d'ajuster simplement l'espacement entre les motifs élémentaires des réseaux cristallins. Dans la figure I.11, les intervalles entre la deuxième et la troisième rangée, ainsi qu'entre la troisième et la quatrième rangée, sont augmentés pour créer le défaut.

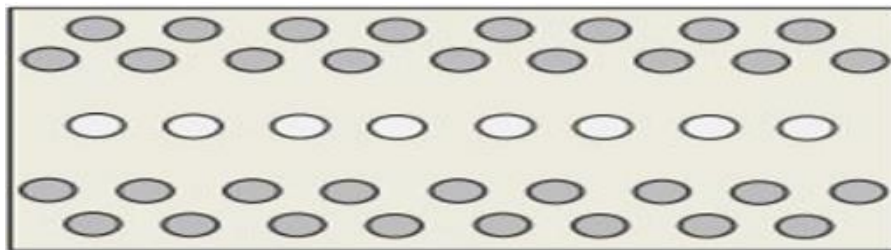
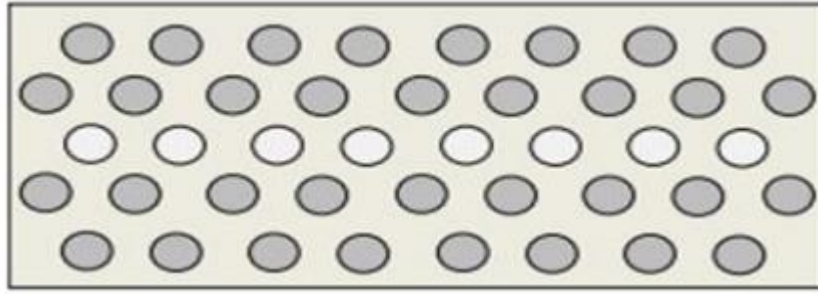


Figure I. 11: Défaut de distance entre motifs élémentaires [12].

4.2.4.2.2 Valeur de la permittivité relative des motifs élémentaires

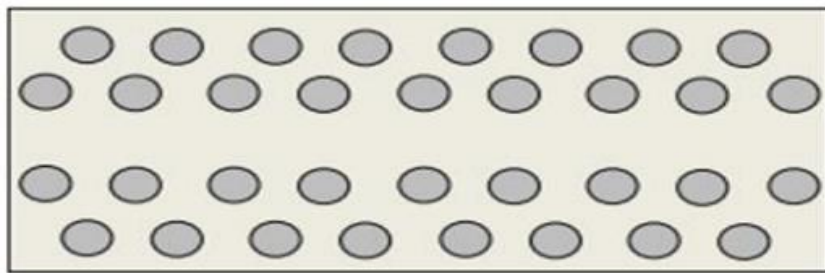
Il est donc possible de changer la composition du matériau de manière locale en faisant varier la valeur de la permittivité relative. Par exemple, tel qu'illustre la figure où la permittivité des anneaux situés dans la rangée centrale des motifs élémentaires a été changée.



*Figure I. 12: Défaut sur la permittivité relative [12].*

#### 4.2.4.2.3 Défaut par vacuité

En ce qui concerne le défaut par vacuité, il signifie que les motifs élémentaires ont été éliminés et ont été remplacés par la permittivité du substrat. La figure en est un bon exemple. Comme indiqué, les éléments figuratifs sur la ligne centrale ont été éliminés.



*Figure I. 13: Défaut par vacuité (c'est le défaut le plus utilisé) [12].*

#### 4.2.5 Bande Interdite Photonique

La bande interdite photonique est une zone d'énergie où la lumière ne peut pas se propager à travers un cristal photonique. Cette zone est créée par les réseaux périodiques de cavités ou de barreaux du cristal, qui interfèrent avec la lumière incidente. La BIP est due à la superposition de deux phénomènes :

- La lumière incidente est diffusée par les réseaux périodiques du cristal, créant une onde stationnaire.
- L'onde stationnaire créée par la diffraction interfère avec les ondes réfléchies par les interfaces du cristal, créant une zone d'énergie où la lumière ne peut pas se propager.

##### 4.2.5.1 Caractéristiques :

Les caractéristiques de la BIP dépendent de la structure du cristal photonique et de la fréquence de la lumière incidente. Voici quelques-unes des caractéristiques importantes :

- Largeur : la largeur de la BIP dépend de la densité de cavités ou de barreaux dans le cristal.
- Position : la position de la BIP dépend de la fréquence de la lumière incidente et de la structure du cristal.
- Profondeur : la profondeur de la BIP dépend de la longueur d'onde de la lumière incidente et de la densité des cavités ou des barreaux.

En résumé, la bande interdite photonique est un concept fondamental dans la physique des cristaux photoniques, qui permet une manipulation sélective et contrôlée de la lumière.

#### 4.2.5.2 Effet de la bande interdite photonique

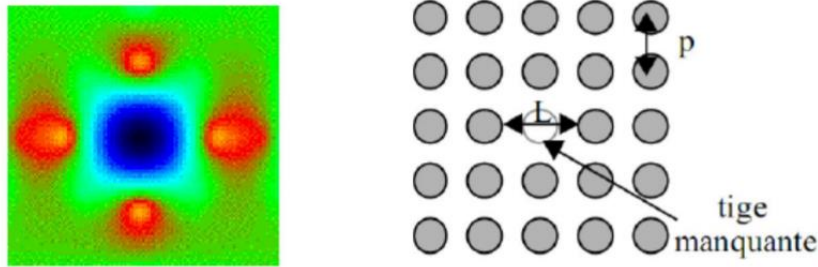
Une caractéristique importante des cristaux photoniques est la capacité d'un cristal photonique de produire une bande interdite qui réduit l'émission spontanée peut bloquer la propagation et la transmission de rayonnement électromagnétique [14].

Cette bande interdite pour les photons signifie que la lumière dans une plage de longueurs d'onde proche de la périodicité de la structure ne permet pas la propagation dans le système et sera réfléchi, quel que soit l'angle d'incidence. Ce phénomène est à la base de la bande interdite photonique BIP. Ainsi, un cristal photonique est un matériau optique comportant une périodicité spatiale de l'indice de réfraction, ce qui génère une bande interdite pour la lumière. Ce phénomène, connu sous le nom de Band Gap Photonique (gap), est la base du concept de cristal photonique et l'auteur de diverses applications, y compris les cavités résonnantes, les guides d'ondes et les fibres à cristaux photoniques (PCFs).

##### 4.2.5.2.1 Cavités dans les cristaux photoniques

L'ajout d'un défaut unique à la structure périodique initialement parfaite produit une cavité entourée de miroirs dans le cristal photonique, ce qui entraîne l'apparition d'un mode à une fréquence spécifique ou d'un groupe de modes à plusieurs fréquences spécifiques. En effet, ce défaut se comporte comme une cavité entourée de miroirs, empêchant ainsi les ondes à cette fréquence de se propager dans le cristal photonique idéal. Les cavités présentes dans les cristaux photoniques se caractérisent par leur qualité exceptionnelle, leur compacité et leur capacité à supporter uniquement un faible nombre de modes.



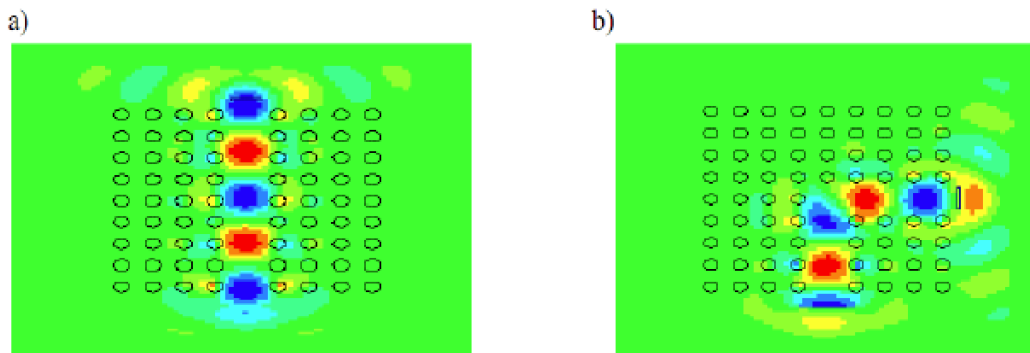


**Figure I. 14:** Cavity résonante dans un cristal photonique 2D [14].

En conséquence, différentes applications sont employées dans divers secteurs tels que les systèmes laser, les systèmes de communication optique, les résonateurs, les antennes et les composants de circuits intégrés entièrement optiques.

#### 4.2.5.2.2 Guides d'onde dans les cristaux photoniques

Deux types de guides d'ondes électromagnétiques ont été développés pour diriger les ondes le long d'une ligne : les guides d'onde métalliques et les guides d'onde diélectrique. Les premiers sont adaptés aux micro-ondes, tandis que les seconds peuvent être perturbés par des pertes importantes lors d'un virage serré. Cependant, en utilisant une ligne de défauts dans un cristal photonique, il est possible de canaliser la lumière haute fréquence et d'obtenir des transmissions faibles, même en virage. Cette technologie offre des perspectives pour la communication optique et permet d'intégrer des composants optiques très compact. Elle permet également des applications telles que le filtrage en longueur d'onde, le couplage sélectif, le multiplexage, l'interférométrie, etc [15].

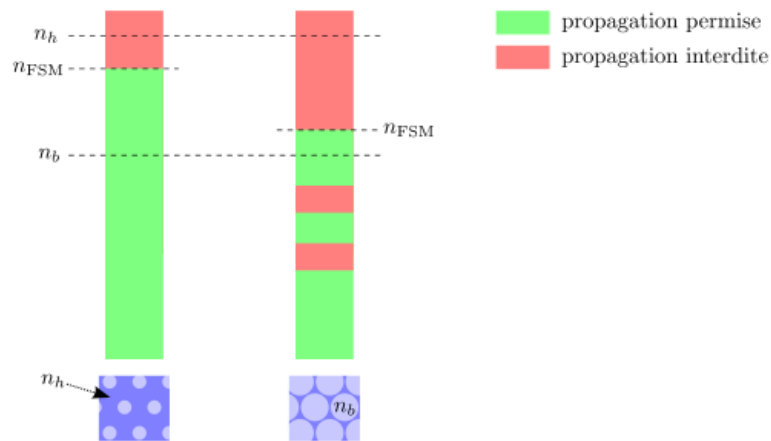


**Figure I. 15:** Guides d'ondes à cristal photonique (simulé par le logiciel Rsoft® CAD) [16] :  
 a) Rectiligne  
 b) Courbures à 90°

## 5 Fibres micro-structurées

### 5.1 Introduction

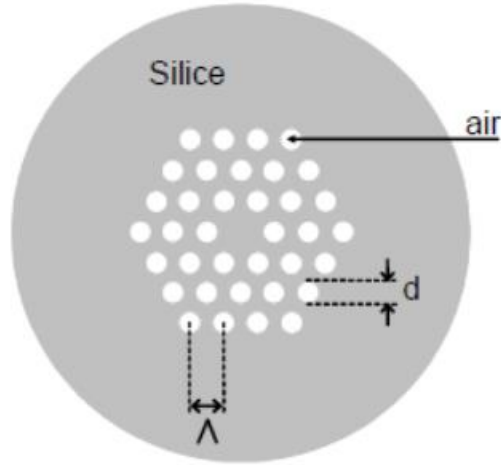
On va présenter une variété de fibres micro-structurées conçues pour répondre à des besoins spécifiques. Les représentations de ces structures périodiques sont basées sur un réseau infiniment répété, composé de régions à haute densité ( $n_h$ ) et à faible densité ( $n_b$ ). Les défauts introduits dans ce réseau peuvent être classés en plusieurs catégories. Le texte explore également deux mécanismes distincts de guidage qui émergent de cette structure périodique. Il est important de noter que l'indice le plus élevé dans la structure périodique sans défaut correspond à un mode qui remplit l'espace de manière uniforme, appelé "mode fondamental de remplissage d'espace (fundamental space-filling mode)".



*Figure I. 16: les zones de transmission autorisées et interdites. Dans les milieux contenant de petites inclusions*

### 5.2 Fibres en régime de réflexion totale inter modifiée (RTIM)

Cette classe de fibres micro-structurées est celle où l'indice du cœur est supérieur à l'indice moyen de la gaine. Une de ces fibres qui entre dans cette catégorie. La fibre illustrée à la figure en est un exemple. Ce type de fibre a un indice élevé. Il s'agit de caractéristiques du matériau de base comme la silice, d'un faible nombre d'inclusions dans la structure comme l'air, et du diamètre des inclusions  $d$  ainsi que du pas de structure  $\Lambda$ . Ici, un maillage hexagonal est utilisé, qui est une conception simple qui peut être obtenue en empilant des capillaires et des barres de même diamètre en utilisant la méthode « [17] [18] ».



**Figure I. 17:** architecture de fibre micro-structurée

Pour décrire les zones de propagation de la lumière dans cette structure, vous pouvez consulter la figure I.18 [19]. Lorsque vous utilisez une structure avec un défaut de silice comme fibre optique, la lumière sera guidée si son indice effectif se situe entre l'indice de la gaine et l'indice de la silice. Les fibres de ce type sont utilisées pour produire des effets non linéaires, comme le supercontinuum, qui peut fonctionner sur de larges plages spectrales.

Il existe également un type spécifique de fibre avec un matériau à indice élevé et un rapport  $d/\Lambda$  élevé, permettant une adaptation de phase pour de grands écarts spectraux. Les bandes interdites photoniques sont observées dans ces structures, mais elles peuvent guider efficacement la lumière uniquement lorsque l'indice du noyau est inférieur à celui des trous d'air. Le mécanisme de guidage basé sur les bandes interdites photoniques est similaire à celui des fibres BIP dans les corps solides.

C'est le concept appliqué dans les fibres optiques traditionnelles. Pour une fibre conventionnelle, la condition à observer pour la propagation par réflexion totale interne est :

$$n_g k < \beta < n_c k \text{ soit } n_g < \beta/k < n_c \quad I. 10$$

Avec :

$n_c$  : l'indice de réfraction du cœur

$n_g$  : l'indice de réfraction de la gaine.

$\beta$  : la constante de propagation

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$  : le nombre d'onde et  $\lambda$  la longueur d'onde.

$\beta/k$  : l'indice effectif du mode de propagation ( $n_{\text{eff}}$ ).

Avec

$$\beta_{FSM} < \beta < n_c k$$

I. 11

La constante de propagation du mode fondamental dans la gaine micro-structurée infinie et sans cœur est définie par  $\beta_{FSM}$ .

De la même manière qu'avec une fibre standard, la détermination de  $\beta_{FSM}$  permet de définir l'indice effectif du mode fondamental de la gaine micro-structurée  $n_{FSM}$ .

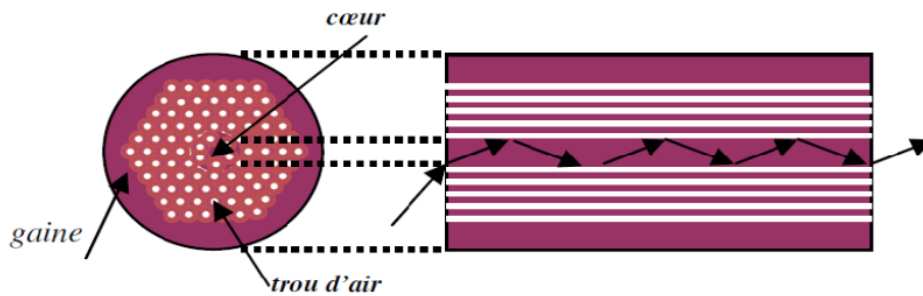
$$\beta_{FSM} = kn_{FSM} \quad I. 12$$

Contrairement au mode de propagation dans les fibres classiques où l'indice de gaine ( $n_g$ ) est constant, c'est  $n_{FSM}$  qui détermine l'indice de gaine pour une PCF. De manière similaire, la propagation par réflexion totale interne modifiée nécessite :

$$n_{FSM} < n_{eff} < n_c \quad I. 13$$

$n_{FSM}$  équivaut donc à la valeur maximale que peut prendre l'indice de réfraction de la gaine de la PCF.

Ce qui est nouveau ici est que  $n_{FSM}$  dépend de la longueur d'onde optique. Tout le travail consiste donc à modéliser les fibres à cristaux photoniques en relation avec le calcul des valeurs  $n_{FSM}$  et  $n_{eff}$ , en fonction de la structure transverse de la fibre et de la longueur d'onde optique. Ce terme est souvent calculé à l'aide de techniques de résolution numérique ou d'expressions empiriques déduites de simulations numériques.

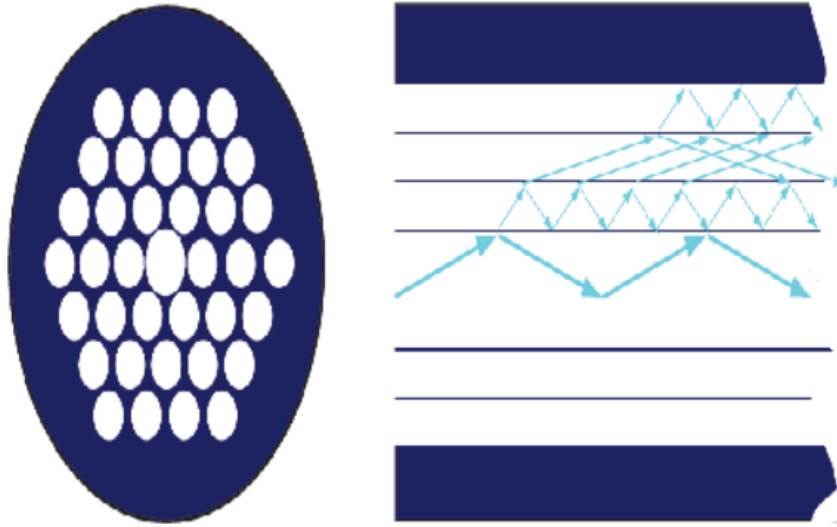


**Figure I. 18:** Schéma descriptif de la propagation par réflexion totale interne modifiée dans une PCF à cœur plein [20].

### 5.3 Fibres à bandes interdites photoniques

Un schéma simple de la propagation de la lumière à travers une PCF est montré dans la figure. Dans ce cas, la lumière est guidée par la BIP et le mode de défaut créé et localisé à l'intérieur de la BIP. L'environnement périodiquement perforé agit comme un miroir de Bragg. La principale caractéristique de cette conception de fibre est la capacité du défaut de guider la

lumière dans un cœur d'indice de réfraction faible tel que l'air ou le vide. Cependant, un tel guide ne fonctionnera que dans une gamme de longueurs d'onde limitée.



*Figure I. 19: Propagation des rayons lumineux dans une fibre à BIP [20].*

Les PCFs utilisant la propagation par BIP offrent une large gamme d'applications par rapport aux autres types de fibres. Parmi les nombreux avantages, on peut noter :

- La capacité de transmettre des puissances élevées (jusqu'à 95% de l'intensité lumineuse peut être concentrée dans le cœur creux)
- Une faible interaction entre la lumière et la silice, réduisant ainsi les dommages potentiels et limitant les pertes par diffusion Rayleigh car il n'y a plus de silice dans le cœur.
- La possibilité de remplir le cœur avec un liquide pour augmenter les interactions non linéaires

Malgré ces avantages, la zone de transmission de la fibre est réduite en raison de l'apparition des modes de surface

## 5.4 Propriétés des fibres optiques micro-structurées

### 5.4.1 L'ouverture numérique

Les fibres optiques micro-structurées présentent une ouverture numérique caractérisée par une variabilité significative en fonction de la longueur d'onde, due à l'indice effectif de gaine et à la dispersion du champ. L'indice effectif de gaine  $y$  est utilisé pour calculer l'ouverture numérique effective ( $ON_{eff}$ ) des FMAS.

$$ON_{eff} = \sqrt{n_{coeur}^2 - n_{eff}^2} \quad I. 14$$

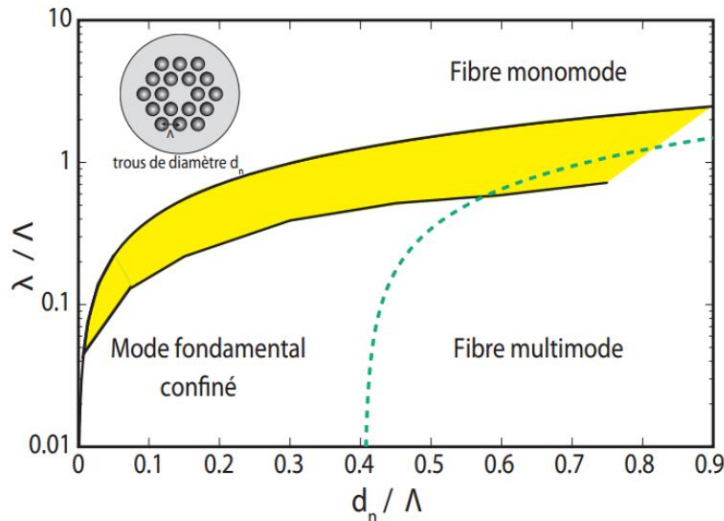
### 5.4.2 Fréquence normalisée nommée

Détermine la valeur dans laquelle la fibre est dans une position monomode [21].

$$V_{eff} = \frac{2[\Lambda]}{\lambda} \sqrt{n_{coeur}^2 - n_{eff}^2} \quad I. 15$$

Dans cette expression,  $N_{eff}$  est la moyenne des indices de réfraction du cœur et de la gaine,  $\Lambda$  est l'écart interstitiel. Le graphique indiqué illustre de manière très élémentaire le contrôle du caractère monomode ou multimode de la fibre. En fonctionnant à une longueur d'onde appropriée,  $\lambda$ , simplement en faisant passer le rapport entre les taux de couvertes des capillaires, on peut faire en sorte que ceux-ci encombrant la zone monomode ou multimode. Ce graphique est basé sur une loi empirique qui indique la longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  d'une fibre optique micro-structurée en fonction des paramètres  $d$  et  $\Lambda$  [22].

$$\frac{\lambda_c}{\Lambda} = 2,8 \left( \frac{d}{\Lambda} - 0,406 \right)^{0,89} \quad I. 16$$



**Figure I. 20:** Schéma représentant les différents modes de propagation possibles pour les fibres optiques microstructures à cœur plein [22].

Lorsque le rapport  $d/\Lambda$  est inférieur à 0,4, la fibre optique micro-structurée est monomode.

### 5.4.3 Les pertes de la fibre optique microstructure

Les pertes d'une fibre à mode monomode (FMS) sont influencées par les propriétés optiques du matériau ainsi que par la structure de la fibre. En général, ces pertes sont principalement dues à la diffusion.

### 5.4.3.1 Pertes par diffusion

Les processus de diffusion de la lumière dans les fibres optiques sont influencés par la loi de Rayleigh modifiée en  $\lambda^{-4}$  dans les domaines du visible et du proche infrarouge. Les pertes en diffusion sont causées par des fluctuations de la concentration des dopants, de la densité du verre et des inhomogénéités du matériau, et peuvent être exprimées par :

$$\alpha_d = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} (n_c^2 - 1) k_B T_f B_T \quad I. 17$$

$k_B$  : Constante de Boltzmann. Et  $B_T$  : Coefficient de compressibilité isotherme.

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

$\alpha_d$  : est ici exprimé en Néper, la conversion en décibels est obtenue en multipliant cette grandeur par  $10\log_{10}(e) = 4,343$ .

### 5.4.3.2 La dispersion chromatique

La capacité de transmission de tout système de communication optique est limitée par la dispersion chromatique. L'expression de celle-ci est un élargissement dans le temps, forçant l'opérateur à augmenter le retard entre deux impulsions. La dispersion chromatique est un indice effectif pour une bande spectrale entière, c'est-à-dire exprimée par la relation suivante :

$$D_c = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2} \quad I. 18$$

$D_c$  : La dispersion chromatique.

$n_{eff}$  : est l'indice effectif du mode guidé.

$c$  : La vitesse de la lumière dans le vide.

$\lambda$  : Longueur d'onde.

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

$$D_c = D_M + D_G \quad I. 19$$

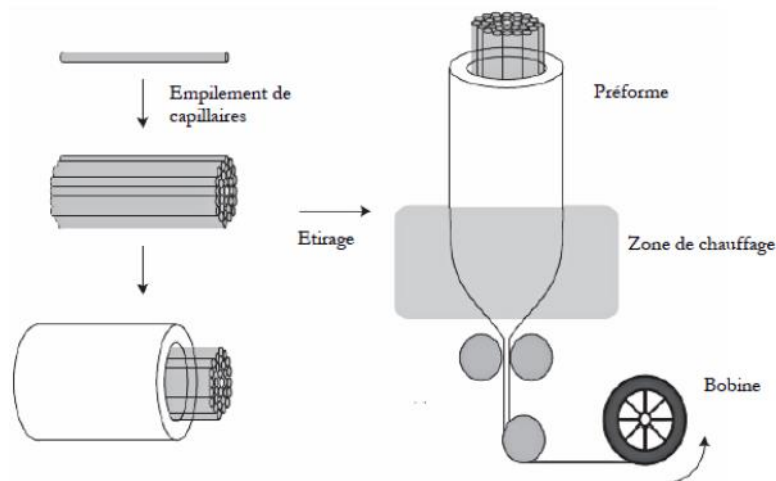
### 5.4.3.3 Pertes de confinement

Nous avons alors défini la constante d'atténuation  $\alpha$  du champ d'un mode en Néper/m. Les pertes de la propagation, qui s'expriment en tant que puissance, sont égales au double de la constante d'atténuation. Les pertes en dB/m sont égales à :

$$Pertes \left( \frac{dB}{m} \right) = \frac{20}{\ln(10)} \alpha \quad I. 20$$

## 5.5 Techniques de fabrication

La méthode d'assemblage-étirage est la plus couramment utilisée pour fabriquer les FOM en silice. Elle consiste à créer une préforme qui a la même géométrie que la fibre souhaitée en empilant des capillaires et/ou des barreaux circulaires de taille millimétrique.

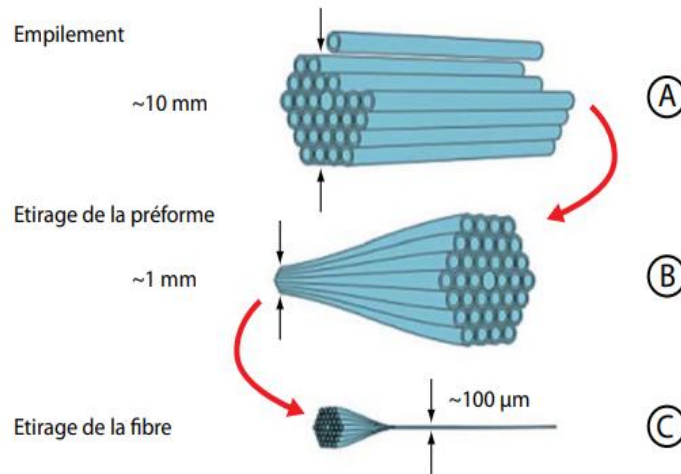


**Figure I. 21:** Illustration de la technique de l'assemblage-étirage Pour la fabrication des PCFs [17].

Les étapes de fabrication sont les suivantes :

- Préparation de la préforme : empilage des capillaires et/ou des barreaux circulaires de taille millimétrique.
- Fusion et étirage : chauffage de la préforme à des températures élevées pour fusionner les matériaux, puis étirage mécanique pour former une fibre optique continue et mince.
- Contrôle de la microstructure : disposition des capillaires et des barreaux dans la préforme détermine la structure interne de la fibre optique.
- Revêtement : dépôt d'une couche protectrice pour assurer une protection mécanique et une isolation électrique.
- Traitement supplémentaire : traitements tels que le recuit, le gainage ou le dépôt de revêtements spéciaux pour des applications spécifiques.



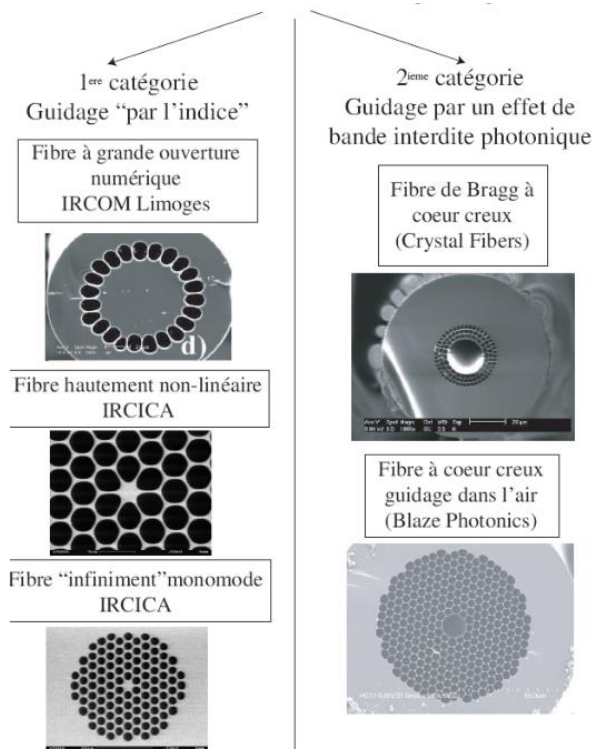


**Figure I. 22:** les étapes de fabrication des FOMS par la méthode de l'assemblage-étirage [18].

En utilisant cette méthode, il est possible de fabriquer des fibres optiques avec des caractéristiques spécifiques telles que l'atténuation, la dispersion, la biréfringence, etc., ce qui les rend adaptées à une large gamme d'applications en télécommunications, en optique et en photonique[18].

### 5.6 Les différents types du FOMS :

Les fibres micro-structurées peuvent être divisées en deux catégories :



**Figure I. 23:** Différents types de fibres micro-structurées [23].

Celles guidées dans un milieu d'indice fort (fibres à cœur plein) et celles guidées dans un milieu d'indice faible (fibres à cœur creux).

Dans les fibres à guidage dans un milieu d'indice fort, on trouve :

- Fibres "infiniment monomodes" avec un cœur large et un mode fortement étalé
- Fibres "à grandes ouvertures numériques"
- Fibres "fortement non-linéaires" avec un cœur petit et une capacité à supporter une grande densité de puissance

Dans les fibres à guidage dans un milieu d'indice faible, on distingue :

- Fibres "de Bragg" composées de couches concentriques d'indices différents
- Fibres "à cœur creux" où la lumière est guidée dans l'air

## **6 Conclusion**

Les fibres micro-structurées est que ces fibres offrent des avantages uniques en termes de guidage de la lumière et de performances optiques. Elles sont divisées en deux catégories principales : les fibres à guidage dans un milieu d'indice supérieur à celui de la gaine et les fibres à guidage dans un milieu d'indice inférieur à celui de la gaine. Ces fibres peuvent être fabriquées à l'aide de différentes techniques, telles que l'assemblage-étirage, permettant un contrôle précis de la microstructure. Les fibres micro-structurées offrent des caractéristiques avancées telles que la gestion de la polarisation de la lumière, la dispersion chromatique ajustable et le confinement de la lumière dans des guides d'ondes à très faible dimension. Elles sont utilisées dans divers domaines tels que les télécommunications, la spectroscopie, les capteurs optiques et les lasers à fibre.

## 7 Bibliography

- [1] F.P.G, Système de télécommunication, base de transmission, Paris: 423-437, 1984.
- [2] S.A.T. department, “ Measurement of the effective area of single mode optical fiber”, Arlington, 1998..
- [3] <https://slideplayer.fr/slide/18093945/>. [Accès le 15/ 02/ 2024].
- [4] <https://community.fs.com/fr/article/types-of-optical-fiber-dispersion-and-compensation-strategies.html>. [Accès le 15 02 2024].
- [5] C. Fortier, “*Génération de sources optiques fibrées très hautes cadences et caractérisations de fibres optiques microstructurées en verre de Chalcogénure*”, thèse de doctorat, l'université de Bourgogne , janvier 2011.
- [6] W. A. bdeljallil, “Etude des fibres microstructurées Aire/silice à réseau circulaire”, 24 juin 2014.
- [7] <http://physique.unice.fr/sem6/2013-2014/PagesWeb/PT/Cristaux/Caracteristiques.htm>. [Accès le 10/ 03/ 2024].
- [8] S. Massaoudi, “Etude théorique et expérimentale des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels en micro-onde : application à l’ultraréfraction”, Thèse de Doctorat, Université Paris XI, 2005.
- [9] D. Neel, “Etude en champ proche optique de guides à cristaux photoniques sur SOI”, Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [10] T. J. G. K. M. L. E. Yablonivitch, “Photonic band structure: The face centred cubic case employing nonspherical Atoms”, *Phy. Rev. Lett.*, vol. 67, pp. 2295-2298, 1991..
- [11] A. L. LABIDI, “Etude des fibres microstructurées Aire/silice à réseaucirculaire”, universitaire d’eloued, 2014.
- [12] *c. k. kao, g. a. dielectric, proc. ieee, 1151, (1966).*
- [13] A. Boudissa, “Conception des filtres optiques à base de cristaux photoniques pour application dans les routeurs optiques dans les réseaux de télécommunication optiques”, thèse de doctorat, Université Mentouri – Constantine, 2013.
- [14] C. M. Soukoulis, “Photonic Band Gap Materials”, Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [15] F. Lacour, “Propagation de la lumière dans les nanostructures et cristaux photoniques planaires associés aux guides d’onde : fabrication et caractérisation”, thèse de Doctorat, Univ. de Franche-Comté, 2005..
- [16] F. Benaissa, “*Etude et Simulation de la Propagation des ondes électromagnétiques dans les guides à cristaux photoniques-application aux fibres optiques*”, *Mémoire de magister*, Univ. Abou-Baker Belkaid -Tlemcen, 2013.

- [17] R. Cherif, “*Étude des Effets Non-Linéaires dans les Fibres à Cristaux Photoniques*”, thèse de Doctorat, École Supérieure des Communications de Tunis, 2009.
- [18] <http://photoniques.com>. [Accès le 20/ 03/ 2024].
- [19] <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-11-22-2854>. [Accès le 19/ 03/ 2024].
- [20] M. E. Amraoui, “Fibres optiques microstructurées chalcogénures fortement non linéaires à base AS<sub>2</sub>S<sub>3</sub> : vers de nouvelles sources supercontinuum infrarouges”, thèse de Doctorat, Univ. De Bourgogne, 2010.
- [21] F. Benadib, J. Knight, P. Russell, “Particle levitation and guidance in hollow-core photonic crystal fiber” ,*OPT. EXPRESS*, 10(21):1195–1203, 2002.
- [22] P. A. T. F. H. K. V. Q. N. J. S. S. A. I. D. L. B. Shaw, “Ir supercontinuum generation in As-Se photonic crystal fiber. In Proc. Optical Fiber Communication Conference, ANAHEIM USA, March 2007.
- [23] G. Agrawal, “Applications of nonlinear fiber Optics”, Academic Press, San Diego, CA, 2001.

# Chapitre 2

Les Capteurs optiques

## 1 Introduction

Depuis des décennies, les capteurs électriques ont été régulièrement utilisés pour mesurer des phénomènes physiques et mécaniques. Bien que les capteurs soient populaires, la transmission de signaux par câble a des inconvénients qui peuvent entraîner un temps de transmission ou une électromagnétique interférences, ce qui peut restreindre la zone d'application des capteurs et peut devenir une défaveur dans de nombreux cas. C'est pourquoi les capteurs de fibres optiques représentent une solution plus stable. Cette méthode remplace l'alimentation électrique par lumière et les fils de cuivre par des fils optiques.

De plus, l'industrie était propice à la fabrication de capteurs à fibre optique suite à l'expansion de la technologie et à la production en série de divers composants pour une variété d'industries. Les baisses des coûts des composants et l'amélioration de la qualité ont renforcé l'adoption des capteurs à fibre optique dans de nombreux domaines qui ont longtemps utilisé des capteurs traditionnels. Il s'agit entre autres de la rotation, l'accélération, la détection et la mesure de 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 des applications de capteurs de tout type. Au début du développement des technologies de capteurs à fibres optiques, la plupart des capteurs ont été conçus et commercialisés pour des marchés où les technologies de capteurs précédemment disponibles étaient très inefficaces. Par conséquent, à leurs débuts, les avantages des capteurs à fibres optiques les plus couramment utilisés – tels que leur légèreté, leur faible encombrement, leur passivité, leur faible puissance, leur immunité électromagnétique, leur haute sensibilité, leur largeur de bande, leur résistance à l'environnement et leur capacité à tolérer – ont balancés les inconvénients les plus caractéristiques tels que le coût et la complexité pour les utilisateurs finaux.

La fibre cristaux photoniques présente une géométrie plus avantageuse que la fibre optique standard. En règle générale, la PCF comporte un cœur creux ou solide entouré de trous d'air disposés selon divers schémas dans ses environs., guidant la lumière à travers leur distribution. De plus, la propagation de la lumière peut être radicalement modifiée en ajustant la distribution des trous d'air et en changeant l'environnement. Cette caractéristique unique de la PCF a attiré beaucoup d'attention pour les applications de détection au cours des deux dernières décennies. Les capteurs basés sur les PCFs sont devenus un sujet de premier plan pour de nombreux

groupes de recherche en raison de leurs avantages économiques significatifs et de leur utilisation potentielle dans différentes applications de mesure.

Ce chapitre aborde les capteurs électriques et optiques, en expliquant leur fonctionnement, leurs types et caractéristiques. Il met également en lumière l'évolution vers des capteurs basés sur les fibres micro-structurées, offrant aux utilisateurs davantage d'opportunités par rapport aux capteurs électriques traditionnels en raison de leurs avantages distinctifs.

## **2 Généralités sur capteur**

### **2.1 Définition**

Un capteur est un dispositif qui transforme une grandeur physique observée en une grandeur physique utilisable. Il est utilisé pour recueillir diverses informations sur le terrain, telles que les tensions électriques, les vibrations, les températures, les pressions, les sons, la consommation de lubrifiants ou d'électricité, et plus encore. Le capteur conventionnel se contente de collecter les informations qui sont ensuite interprétées par un être humain. En revanche, un capteur dit "intelligent" intègre des éléments de traitement numérique des données, lui conférant ainsi des capacités d'interprétation autonomes.

Les capteurs intelligents se composent de trois éléments principaux : un ou plusieurs capteurs "classiques", un microprocesseur et une interface de communication. Ils sont capables, par exemple, de détecter des signaux faibles indiquant un problème technique, d'effectuer des autodiagnostics ou encore de prendre des mesures en fonction de règles prédéfinies.

Les capteurs intelligents sont également de plus en plus polyvalents. Par exemple, ils peuvent être utilisés pour le contrôle de conformité, les mesures sans contact, l'identification et le tri, ainsi que la lecture et la vérification de marquages. Enfin, une caractéristique spécifique des capteurs intelligents est leur capacité à être configurés à distance grâce à des capacités de communication bidirectionnelle.



Figure II. 1 : Principe d'un capteur [1].

## 2.2 Classification des capteurs

Les capteurs ont plusieurs modes de classification :

### 2.2.1 Apport énergétique

#### 2.2.1.1 Capteurs passifs

En revanche, les capteurs passifs fonctionnent sans nécessiter de source d'alimentation externe. Ils détectent les changements dans les variables physiques et génèrent un signal de sortie de manière passive, sans avoir besoin d'une puissance supplémentaire. Quelques exemples courants de capteurs passifs comprennent les capteurs de température à résistance (RTD), les capteurs de lumière (photodiodes) et les capteurs de pression (cellules de pesée).

Un avantage des capteurs passifs est leur simplicité et leur coût réduit, car ils ne requièrent pas de composants supplémentaires pour leur fonctionnement. Cependant, leur signal de sortie est généralement plus faible et plus sensible aux interférences, ce qui peut affecter leur précision dans certaines applications [2].



Figure II. 2 : schéma représentatif d'un capteur passif

#### 2.2.1.2 Capteurs actifs

Les capteurs actifs sont des capteurs qui nécessitent une source d'alimentation externe pour leur fonctionnement. Ils produisent un signal électrique ou électromagnétique en réponse



au stimulus qu'ils détectent. Quelques exemples courants de capteurs actifs incluent les capteurs de proximité, les capteurs de température à thermocouple et les capteurs à ultrasons.

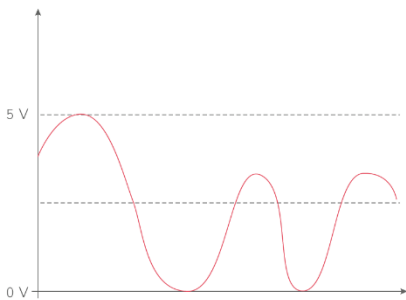
L'un des principaux avantages des capteurs actifs réside dans le fait que leur signal de sortie est plus puissant et plus stable que celui des capteurs passifs. Cela les rend particulièrement adaptés aux applications nécessitant une précision et une fiabilité accrues. De plus, les capteurs actifs ont généralement une portée et des capacités de détection plus étendues [2].



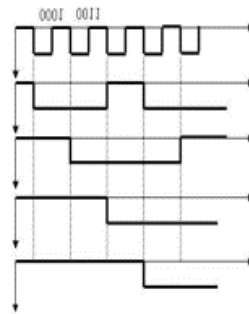
Figure II. 3 : schéma représentatif d'un capteur actif

### 2.2.2 Type de sortie

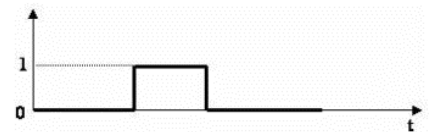
Les capteurs peuvent aussi faire l'objet d'une classification par type de sortie :



Les capteurs analogiques

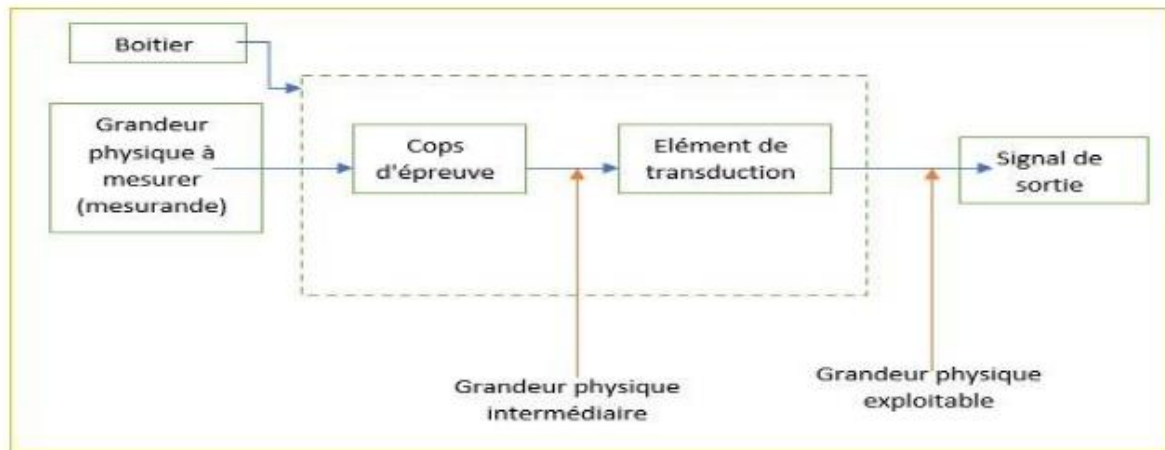


Les capteurs numériques



Les capteurs TOR

### 2.2.3 Structure d'un capteur



*Figure II. 4: Structure d'un capteur [3]*

### 2.2.4 Rôle du capteur

Parmi les diverses données provenant de notre environnement, on identifie les grandeurs physiques liées à des événements climatiques, géométriques, lumineux ou temporels. Les capteurs ont pour mission de rendre ces différentes grandeurs exploitables en vue de leur traitement ultérieur [4].

- Mesure de présence : indique la présence d'un " objet" à proximité immédiate.
- Mesure de position, de déplacement ou de niveau : indique la position courante d'un objet animé d'un mouvement de rotation ou translation.
- Mesure de vitesse : indique la vitesse linéaire ou angulaire d'un "objet".
- Mesure d'accélération, de vibration ou de chocs.
- Mesure de débit, de force, de pressions.
- Mesure de température, d'humidité.

### 2.2.5 Caractéristiques d'un capteur

Certains paramètres sont communs à tous les capteurs. Ils caractérisent les contraintes de mise en œuvre et permettent le choix d'un capteur [5]:

#### 2.2.5.1 Étalonnage

L'étalonnage du capteur englobe toutes les actions visant à représenter, de manière graphique ou algébrique, la corrélation entre les valeurs mesurées et les grandeurs électriques de sortie.

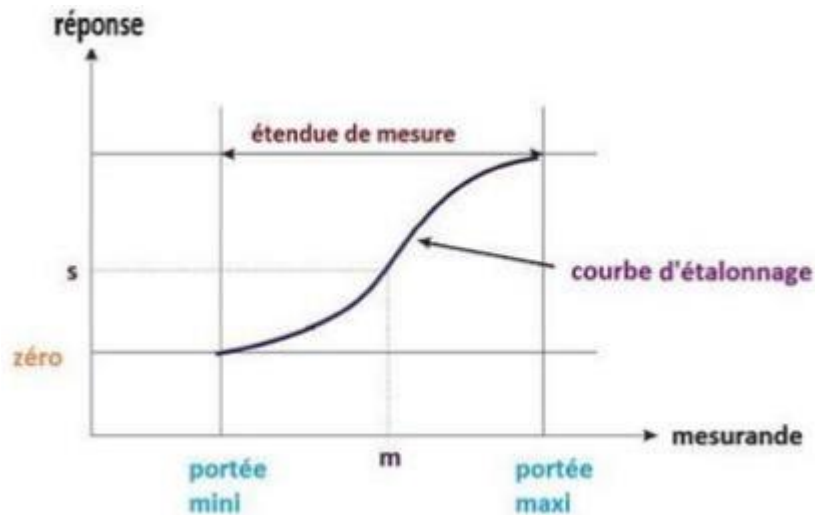


Figure II. 5 : Courbe d'étalonnage d'un capteur

### 2.2.5.2 Linéarité

Cette notion évalue la similitude entre la caractéristique authentique d'un capteur et une droite hypothétique qui représenterait au mieux la relation réelle entre le signal de sortie et la grandeur mesurée sur toute l'étendue de mesure [6].

### 2.2.5.3 Sensibilité (s)

Ce paramètre représente la sensibilité du capteur à détecter la plus infime variation de la grandeur à mesurer. Il correspond au rapport entre la variation  $\Delta V$  du signal électrique de sortie et une variation spécifique  $\Delta \Psi$  de la grandeur physique d'entrée [5].

$$S = \Delta V / \Delta \Psi \quad \text{II. 1}$$

### 2.2.5.4 Temps de réponse ou rapidité

Il s'agit du délai de réponse d'un capteur entre la variation de la grandeur physique qu'il mesure et le moment où l'information est intégrée par la partie de commande [5].

### 2.2.5.5 Résolution (Précision)

La précision d'un capteur se réfère à sa capacité à fournir des mesures qui se rapprochent de la valeur réelle de la grandeur mesurée [6].

## 3 Capteurs optiques

### 3.1 Introduction

Au cours des dernières années, le développement des capteurs électriques a conduit à la création de dispositifs hautement performants utilisés dans divers domaines en raison des exigences en matière de miniaturisation, de rapidité de traitement de l'information, de réduction des pertes et de lutte contre la pollution. Les capteurs optiques sont des appareils conçus pour

détecter l'intensité lumineuse et convertir celle-ci en une mesure quantifiable. Ils permettent de détecter la chaleur, la couleur et la présence de certains gaz ou de certains produits chimiques. Les capteurs optiques basés sur des fibres optiques, des plasmons de surface, des guides d'ondes planaires et des cristaux photoniques sont préférés pour leur forte sensibilité et leur capacité d'analyse non destructive.

### 3.2 Différents types de capteurs optiques

L'utilisation de composants optiques a conduit à la protection contre les perturbations électromagnétiques à basse fréquence et à la réduction des pertes optiques par propagation. Cela a permis de simplifier la révélation du comportement des dispositifs optiques à des perturbations environnementales, ce qui a favorisé la création de capteurs optiques de haute performance et de haute qualité. En outre, avec une quelconque capacité d'interaction physique externe à caractériser par mesure, il existe des types divers de capteurs optiques : température, pression, position ou biologique.

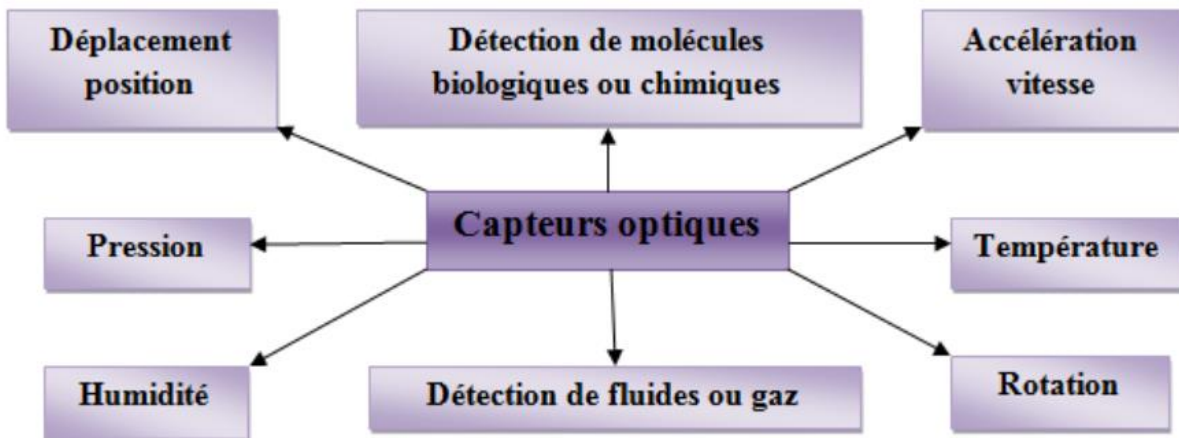


Figure II. 6 : Quelques applications des capteurs optiques.

#### 3.2.1 Capteurs à photorésistance

Les capteurs à photorésistance, également appelés cellules photoconductrices, sont des dispositifs dont la résistance électrique varie en fonction de l'intensité lumineuse incidente. Leur principe de fonctionnement repose sur la modulation de la conductivité électrique d'un matériau semi-conducteur en réponse à la lumière [7].

#### 3.2.2 Capteurs photodiodes

Les photodiodes sont des composants optoélectroniques qui génèrent un courant électrique proportionnel à l'intensité lumineuse qu'elles reçoivent. Elles offrent une réponse rapide et

précise à la lumière, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications nécessitant une détection rapide du signal lumineux [7].

### **3.2.3 Capteurs phototransistors**

Les phototransistors sont des dispositifs qui amplifient le courant électrique créé par la lumière incidente. Grâce à cette amplification, ils permettent d'obtenir une sensibilité accrue à la lumière, les rendant appropriés pour les applications requérant une grande réactivité aux variations lumineuses [7].

### **3.2.4 Photodétecteurs à semi-conducteurs**

Les photodétecteurs à semi-conducteurs exploitent les propriétés de matériaux semi-conducteurs pour détecter la lumière sur une large gamme de longueurs d'onde, allant de l'infrarouge à l'ultraviolet. Leur fonctionnement repose sur la conversion du rayonnement lumineux en un signal électrique exploitable [7].

### **3.2.5 Capteurs à photomultiplicateurs**

Les photomultiplicateurs sont des dispositifs optoélectroniques utilisant un tube à vide pour amplifier de manière considérable les signaux lumineux de faible intensité. Ils sont particulièrement adaptés aux applications nécessitant une sensibilité extrêmement élevée à la lumière, telles que la détection de rayonnements faibles [7].

## **3.3 Caractéristiques des capteurs à fibres optiques**

Les fibres optiques sont largement utilisées comme capteurs dans de nombreux domaines, en raison de leurs avantages uniques. Elles permettent de mesurer des paramètres tels que la déformation, la pression, l'acidité, la température et les concentrations de composants chimiques, sans utiliser d'électricité. Cela les rend particulièrement adaptées aux environnements sensibles aux perturbations électromagnétiques, comme ceux rencontrés en aéronautique, en génie civil ou en biologie. De plus, les fibres optiques sont mécaniquement robustes et offrent une détection in situ avec de faibles pertes de signal, même sur de longues distances. Ces caractéristiques en font des outils de choix pour le contrôle non destructif des structures, notamment pour les grands ouvrages d'art comme les ponts, à un coût et un entretien relativement faible [8].

- La détection à distance des polluants dans les environnements dangereux.
- De plus, des capteurs multiples peuvent être multiplexés pour des surveillances simultanées sur différents points.

- Transmettez plusieurs longueurs d'onde dans un seul fil pour surveiller plusieurs substances.
- La durabilité des capteurs sans pièce mobile.
- Étant donné que la silice et la lumière sont inertes, les capteurs sont plus sûrs que les capteurs électriques dans les environnements explosifs.
- Une petite taille qui les rend faciles à incorporer dans les composites.
- Flexibilité géométrique pour un accès facile aux zones complexes.
- Résidences en environnements infréquentables haute température, explosifs, radioactifs, haute pression, etc.
- Large bande passante.

#### **4 Capteurs à base de fibres à cristaux photoniques**

Les fibres à cristal photonique (PCF) qui ont été introduites dans les années 90 ont conduit à une myriade d'applications de biophotonique aux télécommunications et installations laser aux capteurs. Des avantages uniques découlent de la géométrie prête à l'emploi de ces fibres à canaux d'air conçues pour qu'ils courent parallèlement à l'axe du guide. Aujourd'hui, ces performances spécifiques ont été utilisées au maximum par les domaines des télécommunications et de l'instrumentation. En éliminant le remplissage au maximum des trous et en les utilisant dans la gaine et / ou le noyau, les PCF sont en mesure de faire varier la taille et la position des trous pour régler la transmission spectrale, le mode, la capacité non linéaire, la dispersion, le facteur de remplissage pneumatique et la biréfringence sur mesure, offrant des performances inégalées en comparaison avec celles des fibres optiques classiques. Au cours des deux dernières décennies, les capteurs basés sur les PCFs ont été largement étudiés pour la détection de divers agents nucléaires, biologiques et chimiques, et principalement pour les environnements civil et militaire. De nos jours, ces capteurs deviennent un domaine de développement actif en raison de l'augmentation du nombre d'applications où ils sont excellents. Les applications vont de la santé à la défense, la sécurisation, la sectorisation automobile, aérienne et la protection et le contrôle de qualité entre autres domaines. L'avancement dans l'étude et la connaissance des phénomènes physiques et des méthodes de fabrication photonique a considérablement amélioré la détection en PCF. Ils offrent aujourd'hui de meilleures sensibilités et limites de détection, des temps de détection réduits, une simplicité d'opération et des coûts réduits de mesure.

## 4.1 Système de détection par PCF

### 4.1.1 Détection par utilisation d'ondes évanescentes

Jusqu'en, la première découverte d'ondes évanescentes s'est produite, lorsque I. Newton a trouvé que l'onde réfléchie d'un faisceau lumineux atténuée avec un prisme attaché à une lentille convergente. En effet, il a observé un champ évanescent en tant que champ électromagnétique qui est éteint parallèlement à une interface et qui diminue sa grandeur mal à la distance d'un facteur exponentiel. De même, les PCF contiennent aussi des ondes évanescentes durant le guidage de la lumière en tant que champ évanescent le long d'une interface dérivée par réflexion totale interne à l'interface du cœur de la gaine. L'interaction des ondes avec la matière étant introduite dans les trous d'airs de la gaine à une distance de transmission est appelée fibres optiques évanescente [9].

Ces capteurs sont très utiles pour la détection et la mesure de la concentration de réactifs chimiques dans l'industrie et pour la détection de biomolécules telles que l'ADN ou les protéines. Ils sont de plus très utilisés pour l'analyse des spectres d'absorption des liquides et gaz. En réalité, cela permet des mesures en continu dans des environnements confinés et perturbés [10].

### 4.1.2 Détection par utilisation de la biréfringence

Le maintien de l'état de polarisation des ondes optiques est alors un problème central pour les communications optiques cohérentes et la détection à fibres optiques. En effet, s'il est envisageable de concevoir un capteur basé sur la modulation de la polarisation, il faudra que la fibre employée soit un milieu physique capable de transmettre cette propriété sur une longue distance. A priori, une fibre de verre possède les propriétés de symétrie nécessaires mais en pratique, des petites perturbations responsables de la micro-polarisation s'ajoutent et après quelques dizaines de centimètres, la micro-polarisation aura une direction aléatoire. C'est pourquoi des fibres optiques fortement biréfringentes avec deux axes orthogonaux principaux, appelés axes à vitesse différente, sont généralement utilisées [11]. Plusieurs méthodes, notamment la modification de la symétrie géométrique des trous d'air dans le revêtement de la fibre, sont utilisées pour la création d'une biréfringence lors de la fabrication de PCFs. Les fibres PCFs fortement biréfringentes sont aujourd'hui utilisées de manière étendue dans le développement de capteurs optiques pour une large gamme de domaines, y compris la détection de la température, de la pression et de la déformation, et bien d'autres applications [12].

### 4.1.3 Détection par utilisation de la bande interdite photonique

En ce qui concerne les fibres à cristal photonique, on distingue généralement deux types de PCF : fibres à cœur creux et fibres à cœur plein. Les deux types peuvent guider la lumière par des mécanismes très différents, à savoir la réflexion totale interne modifiée et le phénomène de bande interdite photonique. Pour les PCFs de cœur plein, lorsqu'un liquide de même indice de réfraction que le cœur remplit les trous d'air du cœur, le concept du mode de guidage change de réflexion totale modifiée en guidage d'anneau par le BIP [13]. Il est également crucial de noter que la découverte de l'effet de l'interdiction des photons dans les bandes interdites pour les PCFs a ouvert de nouvelles perspectives pour la recherche en capteur, y compris la détection de gaz, la mesure de la température et l'indice de réfraction, la détection des molécules dans les composantes chimiques et biologiques [14].

### 4.1.4 Détection par utilisation des réseaux de Bragg

Les fibres optiques à cristaux photoniques (PCF) peuvent être équipées de réseaux de Bragg, qui sont des dispositifs optiques innovants. Ils sont constitués d'une modulation périodique de l'indice de réfraction du cœur de la fibre, le long de l'axe de propagation. Cette structure particulière peut être obtenue par différentes méthodes, comme l'irradiation laser, les décharges électriques ou les ondes acoustiques [8].

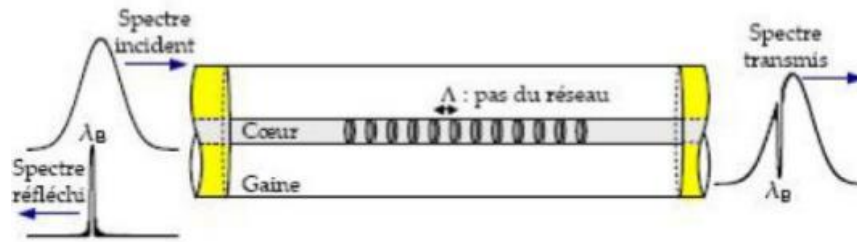
On distingue deux catégories de ces fibres à réseaux de Bragg, selon la longueur de leur période et leur mode de couplage avec la lumière :

- Les fibres à réseaux de Bragg à pas courts (FBG), dont la période est inférieure au micromètre [8].
- Les fibres à réseaux de Bragg à pas longs (LPG), avec une période de l'ordre de plusieurs centaines de microns [8].

#### 4.1.4.1 Réseaux de Bragg à pas courts

De manière simplificatrice, les FBG, en agissant comme un miroir, facilitent le couplage de la lumière entre le mode de propagation et le mode contra-propagatif : une plage de fréquences, appelée longueur d'ondes de Bragg, où un couplage maximal entre les modes peut être atteint grâce à un accord de phase, alors que pour toutes les autres longueurs d'onde, fréquences ou nombre d'onde, elles restent transparentes (en dehors de la bande interdite). Ces longueurs d'ondes, étant hors phase, vont interférer de manière destructive et seront transmises.





**Figure II. 7 :** Schéma représentatif des fibres à réseaux de Bragg à pas courts [15]

Un réseau de Bragg est formé par un premier réseau de type (dans lequel l'onde est incidente) et un second constituant la source du spectre qui est interférométrique. Des perturbations telles que la déformation, la pression et la variation de température du réseau de Bragg conduisent à des propriétés de réflexion, qui sont fonctions respectivement de l'indice de réfraction et du pas du réseau, ajustées en fonction de l'amplitude et de la fréquence des excitations et un décalage dans la longueur d'onde de Bragg,  $\lambda_B$ , défini comme suit :

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda_G \quad \text{II. 2}$$

Avec :

$n_{eff}$  : l'indice effectif du mode guidé.

$\Lambda_G$  : le pas du réseau.

Plusieurs avantages des FBGs ont suscité beaucoup d'intérêt dans de nombreux secteurs d'application. Leur évolution rapide se concentre, depuis plus de deux décennies, sur le développement et l'application tel que le contrôle non destructif, le ventilateur composite structure, affiche et, plus récemment, les applications biomédicales et les applications industrielles nucléaires, notamment. En fait, ces capteurs sont instructifs, et leur principe de mesure est basé sur certaines spécificités de la lumière sensible aux paramètres environnementaux, tels que la température, les déformations ou la pression. En outre, ils sont très peu intrusifs et ne sont pas affectés par les perturbations électromagnétiques grâce à leur fabrication à base de silice [16].

#### 4.1.4.2 Réseaux de Bragg à pas longs

Les réseaux de Bragg à longueurs d'onde ont une période beaucoup plus grande que les réseaux de Bragg à fibres optiques et sont généralement de 100  $\mu\text{m}$  à 1 mm. En raison de cela, il y a des couplages entre le mode incident (avec une longueur d'onde déterminée par la

condition de Bragg), les modes de gaine co-propagatifs et des longueurs d'onde appropriées, appelés les longueurs d'onde de résonance, où la phase de l'onde est accordée. Chaque pic de transmission correspond à une longueur d'onde de résonance. Il est déterminé par l'expression

$$\lambda_{1-} = (n_{co}^{eff} - n_{cl,m}^{eff}) \cdot \Lambda_G \quad II. 3$$

$n_{co}^{eff}$  : l'indice effectif du mode fondamental.

$n_{cl,m}^{eff}$  : l'indice effectif du  $m^{ième}$  mode de la gaine.

$\Lambda_G$  : le pas du réseau.

En résumé, en incorporant les réseaux de Bragg à pas long dans le cœur d'une PCF, en ajoutant des liquides ou des polymères dans les canaux de la fibre, de nouveaux dispositifs intéressants ont été créés en mélangeant les fibres à cristaux photoniques et les réseaux de Bragg. Ce genre de fibre présente de nombreux atouts qui en font un candidat sérieux pour les applications de détection chimique et biologique, ainsi que pour les mesures de température, de pression, de déformation, etc [8].

#### 4.1.5 Détection par utilisation de l'interférométrie

Ce système de détection exploite les interférences entre les ondes lumineuses. L'interférométrie optique utilise essentiellement la variation de la phase de l'onde simplement que passe par la mesure d'une grandeur physique. Une PCF est intégrée à différents dispositifs interférométriques tels que le Sagnac, Mach-Zehnder, Fabry-Perot, et Michelson. Ces dispositifs comparent la phase d'une onde lumineuse soumise à l'influence de la grandeur physique à mesurer avec celle d'une onde lumineuse de référence. Ces multiples avantages ont ouverts de nouvelles opportunités de recherche ainsi que d'exploration dans les différents domaines des capteurs, particulièrement pour la mesure de déformation, pression, température, etc [17] [18].

#### 4.1.6 Détection par utilisation de l'analyse spectrale

La diffusion de la lumière est l'émission de la lumière dans diverses directions par des centres de distribution. Pourtant, dans un environnement homogène comme une fibre optique, la lumière ne se propage que dans la direction de propagation du faisceau concerné. On distingue la diffusion Raman, la diffusion Rayleigh et la diffusion Brillouin en fonction du type de centres diffuseurs. On peut donc observer des raies décalées dans l'analyse spectrale de la lumière provenant d'un milieu diffusant par rapport à celles de la pompe optique. Il est possible

que ce décalage soit négatif ou positif, ce qui correspond aux raies Stokes et anti-Stokes respectivement [8].

#### 4.1.6.1 Diffusion Brillouin

On observe la diffusion Brillouin lorsque la lumière interagit avec les ondes acoustiques qui se déplacent le long de la fibre. Cela entraîne une modification de la fréquence des spectres diffusés à deux niveaux, à savoir les spectres stokes et les spectres anti-stokes. Grâce à sa grande sensibilité à l'environnement, il est devenu un outil très précieux dans le domaine de la recherche sur les capteurs distribués. En utilisant la méthode OTDR, on a pu évaluer la température et les déformations le long de la fibre [8].

La diffusion Brillouin présente les caractéristiques principales qui conduiront à l'élaboration de capteurs distribués de température et de déformation. Bien que l'écart entre les sections de la fibre entre ses images n'excédât pas 100 m par km à cette époque, c'était déjà un exploit technique surprenant.

Aujourd'hui, les dispositifs de mesure distribuée à diffusion Brillouin permettent d'obtenir une résolution spatiale inférieure au mètre sur des distances de plusieurs km. Les fibres à cristaux photoniques sont un domaine d'interaction particulièrement captivant en raison de leurs caractéristiques optiques et acoustiques distinctes par rapport aux fibres classiques. En réalité, les micro-canaux d'air périodiques en silice permettent de protéger les modes acoustiques et optiques en même temps, ce qui permet d'obtenir des graphiques de température et/ou de déformation tout au long du trajet optique, ce qui facilite la signature des diverses contraintes thermiques et d'étirage sur les fibres. Les mesures distribuées par les PCFs contribueront donc à renforcer l'instrumentation traditionnelle [8].

#### 4.1.6.2 Diffusion Raman

La diffusion Raman se produit lorsqu'un phénomène illuminant complètement monochromatique se répandra à la lumière des molécules de la matière, qui émettront et absorberont des phonons optiques de fréquences correspondant à la vibration de la matière dictionnaire à THz des parts plus grandes de son Déplacement de l'onde rétrodiffusée avec brochet. Plus tard, l'onde peut être déplacée à moins d'énergie (onde stokes) ou plus d'énergie. Encore une fois, l'énergie que le détenteur d'onde reçoit ou perd est déterminée par l'élan de vibration récupéré ou donné par [19]. Lors du processus crysélitométrique, l'analyse chimique de l'échantillon se place par le déplacement de fréquence des ondes électroniques initialement sélectionné grâce à l'échantillon à être testée [20].

La diffusion Raman et la diffusion Brillouin sont largement différentes correctement pour les décalages en fréquence : des dizaines de THz pour le Raman, et des dizaines de GHz pour le Brillouin. Bien que le signal soit extrêmement faible, en stimulant la technique de diffusion Raman exaltée de surface, il est actuellement possible de capter avec précision même à des concentrations aussi faibles. La méthodologie offre une spécificité moléculaire et une sensibilité élevée, et il est également possible de détecter personnalisable au niveau moléculaire avec une méthodologie non invasive jusqu'à une seule manière d'être. L'objectif désigné est l'intégration de PCF SERS offre des capteurs très efficaces et populaires pour diverses applications de détection dans le domaine culturel, médical et environnemental [21].

#### 4.1.7 Détection par utilisation des plasmons de surface

De manière phénoménologique, le phénomène de plasmons de surface implique l'oscillation d'électrons libres à l'interface entre un métal et un diélectrique. Ce mode peut être excité par l'onde optique incidente en réflexion totale sur l'interface opposée. En effet, l'onde évanescente associée à la réflexion totale sur la surface de l'autre côté peut exciter un mode plasmon sous certaines conditions et [22]. Les plasmons de surface correspondent à des ondes se propageant parallèlement à l'interface. Toutefois, leurs amplitudes de champ électrique diminuent exponentiellement en s'éloignant de l'interface perpendiculairement. Ce type d'onde pouvant être confiné à l'interface prend alors le nom d'onde de surface. Elles sont souvent désignées sous l'acronyme SPR pour Surface Plasmon Résonance. Leur avantage tient dans leur sensibilité aux variations des paramètres optiques des milieux diélectriques en contact avec le métal [23].

La technologie des capteurs SPR qui sont largement utilisés dans le domaine biomédical permet une mesure des interactions moléculaires en temps réel et sans l'ajout de marqueurs à une grande précision. Les capteurs optiques SPR sont reconnus comme sensibles bien qu'ils soient complexes et chers. Les capteurs SPR basés sur les fibres à cristaux photoniques combinent les avantages des PCFs et la sensibilité des SPR. La capacité de fabrication simplifiée, économique, à distance et continue de mesure font de ces dispositifs certains des plus importants acteurs des recherches de capteur pour la détection de molécules chimiques et biologiques, le diagnostic médical, le contrôle aliments et sécurité environnementaux [24].

#### 4.2 Les Effets qui influent la détection

Les caractéristiques de production de la fibre, telles que le pourcentage d'air contenu, les dimensions des orifices d'air et leur espacement, exercent des influences significatives sur les

propriétés de guidage de la fibre ainsi que sur les performances des capteurs. Par exemple, une augmentation du pourcentage d'air peut réduire la dispersion, tandis qu'une diminution du diamètre des orifices d'air peut accroître la sensibilité du capteur. Les variations de ces paramètres peuvent également altérer la polarisation de la lumière guidée dans la fibre, avec des répercussions sur les mesures réalisées à l'aide du capteur

#### 4.2.1 L'effet de la distance entre les trous d'air sur la détection

Les fibres optiques comportent des cavités d'air qui se forment à l'intérieur de la structure en silice et sont disposées selon un schéma géométrique précis. En modifiant la distance entre chaque cavité, plus précisément la distance entre les centres de deux cavités d'air adjacentes (appelée "pas"), il est possible d'améliorer la sensibilité des fibres à cristal photonique (PCF). Un pas plus réduit implique un espacement plus étroit entre les cavités d'air, ce qui se traduit par une sensibilité relative accrue. Ces cavités d'air guident le champ évanescent à travers la région centrale de la fibre.

#### 4.2.2 Effets du diamètre sur la détection

La diminution du diamètre des trous d'air dans les fibres à cristal photonique a un impact direct sur la sensibilité des capteurs. En réduisant ces diamètres, la sensibilité des capteurs sera elle-même diminuée. Cette modification des dimensions des trous d'air influencera donc la capacité des capteurs à détecter avec précision les variations des grandeurs physiques mesurées.

#### 4.2.3 Effets du taux de remplissage d'air

Le pourcentage d'air contenu dans la fibre, déterminé par le rapport entre les diamètres des trous d'air et leur espacement, est un autre paramètre qui contrôle la sensibilité relative des capteurs à fibre à cristal photonique (PCF). En ajustant de manière appropriée à la fois le diamètre et l'espacement, il existe une limite de pourcentage d'air qu'il est nécessaire de respecter, fixée à 0,95. De légères variations de ce pourcentage ont un impact significatif sur la sensibilité des capteurs. Le pourcentage d'air peut être défini par l'équation suivante :

$$\text{Taux de remplissage d'air} = \frac{d(\text{le diamètre})}{\Lambda(\text{le pas})} \quad \text{II. 4}$$

## 5 Capteur d'hémoglobine

L'hémoglobine est une protéine essentielle présente dans les globules rouges, responsable du transport de l'oxygène dans l'organisme. Son dosage revêt une importance cruciale pour le diagnostic et le suivi de diverses pathologies, telles que l'anémie, la polyglobulie ou les troubles de l'oxygénation sanguine. Cependant, les méthodes classiques de

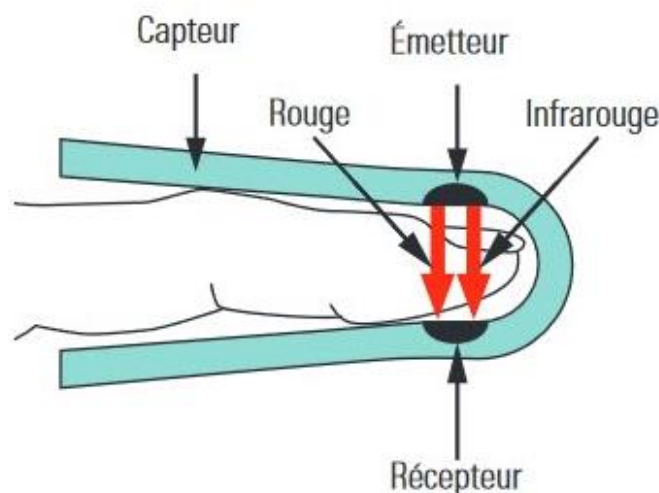
mesure, basées sur des analyses sanguines invasives, présentent des inconvénients en termes de confort pour le patient et de fréquence de mesure [25].

Les capteurs à fibres optiques émergent comme une alternative particulièrement prometteuse pour une évaluation non-invasive et continue de la concentration en hémoglobine. Ces dispositifs exploitent les propriétés d'absorption optique caractéristiques de cette molécule, qui présente des signatures spectrales distinctes selon son état d'oxygénation [25].

En émettant de la lumière à des longueurs d'onde spécifiques et en mesurant l'absorption différentielle par les différentes formes d'hémoglobine présentes dans le sang, ces capteurs optiques permettent de déterminer avec précision la concentration totale en hémoglobine ainsi que les proportions relatives d'oxyhémoglobine et de désoxyhémoglobine. De nombreuses études ont démontré la fiabilité et la justesse de cette approche, avec des erreurs de mesure typiquement inférieures à 1 g/dL par rapport aux méthodes invasives de référence [25].

### 5.1 Principe de fonctionnement

- Le capteur à transmission de la lumière comporte deux composants principaux : un émetteur optique (typiquement une LED) et un récepteur optique (photodiode ou photodétecteur).
- L'émetteur émet de la lumière qui traverse les tissus (par exemple le doigt ou l'oreille) et est captée par le récepteur optique.
- L'hémoglobine dans le sang absorbe une partie de la lumière traversant les tissus. Cette absorption dépend de l'oxygénation de l'hémoglobine.
- Le récepteur mesure l'intensité de la lumière transmise, qui varie en fonction de la concentration et de l'oxygénation de l'hémoglobine

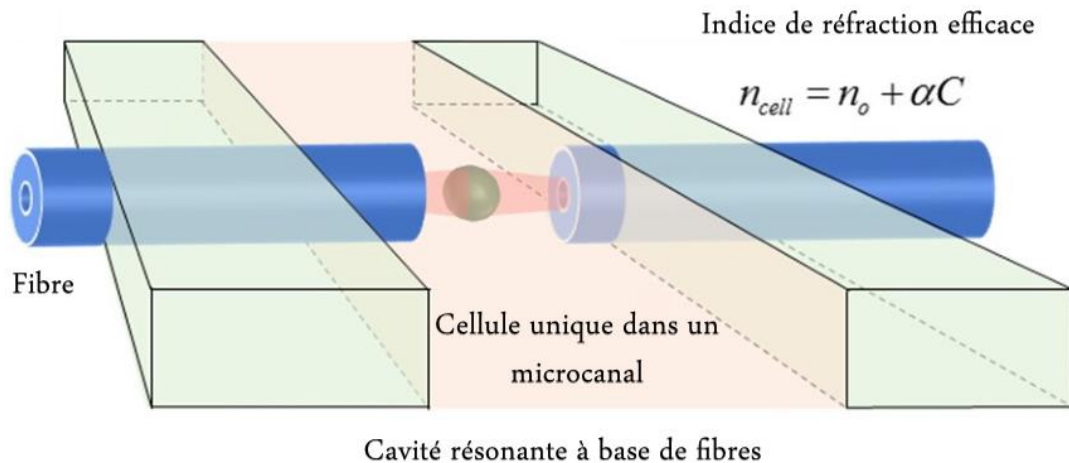


*Figure II. 8 : structure de fonctionnement*

## 5.2 Les propriétés Physiques des Cellules

La biophysique cellulaire utilise des modèles et des théories physiques pour étudier les cellules, en se concentrant sur les propriétés mécaniques, électriques et optiques. Les paramètres mécaniques comme l'élasticité, la force adhésive et la vitesse sont analysés pour comprendre la réponse des cellules aux forces et à la migration par déformation. Les paramètres électriques tels que la conductivité, l'impédance et la force électromotrice sont importants pour l'étude des réseaux neuronaux, comme la propagation des synapses électriques. De même, les paramètres optiques comme l'absorption, la diffusion, la réflexion, déterminent la propagation de la lumière dans une cellule, et sont fortement corrélés avec la masse intracellulaire et la concentration.

Une des propriétés biophysiques les plus importantes est l'indice de réfraction d'une cellule unique, qui est étudié et mesuré depuis les années 1950. Il peut être utilisé pour déterminer ou corrélater avec d'autres paramètres biophysiques des cellules (comme la masse sèche, la masse humide, la concentration en protéines, l'élasticité, la conductivité, etc.) et étudier certaines activités métaboliques des cellules (comme la division cellulaire, l'infection, etc.).



*Figure II. 9 : Indice de réfraction cellulaire pour la biologie cellulaire*

## 5.3 Modèle d'indice de l'hémoglobine efficace de diverses cellules

Le coefficient de réfraction cellulaire est un paramètre biophysique clé, largement étudié. Il est corrélé avec d'autres propriétés biophysiques de la cellule, y compris les propriétés mécaniques, électriques et optiques, et représente non seulement la masse intracellulaire et la concentration d'une cellule, mais fournit également des informations importantes pour divers modèles biologiques.

L'indice de réfraction de l'hémoglobine efficace de diverses cellules a été largement démontré et grâce à de nombreuses avancées en méthodologie et systèmes de mesure, nous

sommes désormais en mesure de mesurer les indices de réfraction de divers composants de la cellule tels que le cytoplasme et le noyau.

En 1953, R. Barer a proposé un modèle plus détaillé de l'indice de réfraction basé sur une cellule unique [26]. Étant donné qu'une cellule est principalement composée de cytoplasme et que les protéines occupent la plus grande partie des solides cellulaires dans le cytoplasme, une cellule unique est traitée comme un contenant rempli d'une solution protéique (Figure II.9). L'indice de réfraction de l'hémoglobine efficace de diverses cellules est défini comme :

$$n_{cell} = n_0 + \alpha C \quad \text{II. 5}$$

Où  $n_0$  est l'indice de réfraction de l'eau ou d'une solution saline diluée,  $\alpha$  est l'incrément de réfraction spécifique et  $C$  est la concentration d'hémoglobine en gramme par décilitre (g/dL)

## **6 Les différentes applications d'un capteur optique**

Mesure de paramètres physiologiques :

- Oxymétrie de pouls pour mesurer la saturation en oxygène du sang
- Mesure non-invasive de l'hémoglobine et de ses différentes formes
- Surveillance de la fréquence cardiaque et de la perfusion sanguine
- Suivi de la respiration et détection d'apnées

Imagerie médicale :

- Tomographie par cohérence optique (OCT) pour imager les tissus en 3D
- Imagerie fonctionnelle cérébrale par spectroscopie proche infrarouge (fNIRS)
- Imagerie de fluorescence pour le diagnostic et le suivi de pathologies

Détection et analyse de substances :

- Mesure de la glycémie par spectroscopie infrarouge
  - Détection de molécules spécifiques par capteurs biochimiques
  - Analyse de la composition de gaz ou de liquides

Applications industrielles et de sécurité :

- Systèmes de comptage et de positionnement par détecteurs optiques
- Capteurs de présence, de mouvement et de niveau par barrages lumineux
- Contrôle qualité et inspection par caméras et systèmes d'imagerie

Télécommunications et optoélectronique :

- Transmission de données par fibre optique



- Capteurs pour la surveillance des réseaux de télécommunication
- Convertisseurs optoélectroniques dans les circuits électroniques

## 7 **Conclusion**

Les capteurs électriques ont été largement utilisés pour mesurer divers phénomènes physiques et mécaniques depuis des décennies. Cependant, la transmission de signaux par câble présente des inconvénients tels que des interférences électromagnétiques et des limitations d'application. Les capteurs à fibres optiques offrent une solution plus stable en remplaçant l'alimentation électrique par la lumière et les fils de cuivre par des fils optiques. Ces capteurs sont devenus populaires dans de nombreux domaines en raison de leur légèreté, de leur faible encombrement, de leur immunité électromagnétique et de leur haute sensibilité. Les fibres optiques à cristaux photoniques offrent des avantages uniques en permettant une détection précise de divers paramètres sans utiliser d'électricité, ce qui les rend adaptés à des environnements sensibles aux interférences électromagnétiques. Ces capteurs sont largement utilisés dans des applications telles que la détection de gaz, la mesure de température, de pression, de déformation, et bien d'autres. Les capteurs à fibres optiques à cristaux photoniques sont devenus un domaine de recherche actif en raison de leurs performances améliorées et de leur utilisation potentielle dans divers domaines tels que la santé, la défense, l'automobile, l'aérospatiale, et la qualité.

## 8 Bibliographie

- [1] <https://ent2d.ac-bordeaux.fr/disciplines/sti-college/wp-content/uploads/sites/63/2019/05/MSOST-1-6-C2-D-Principe-de-fonctionnement-d%E2%80%99un-capteur.pdf>, [Accès le 28 04 2024].
- [2] [https://polaridad.es/fr/capteurs-actifs-et-passifs/?expand\\_article=1](https://polaridad.es/fr/capteurs-actifs-et-passifs/?expand_article=1). [Accès le 28 04 2024].
- [3] I. A. Abir and. H, "Etude et conception des capteurs à base de cristaux photoniques pour la détection de la temperature", OUARGLA, 2022.
- [4] W. F and . F. B, "Étude et conception d'un capteur de température à base des cristaux photoniques", Promotion 2022..
- [5] "T. p. p. 8. "GENERALITES SUR LES CAPTEURS".
- [6] [https://elearning.enporan.dz/moodle/pluginfile.php/12437/mod\\_resource/content/0/Les%20Capteurs.pdf](https://elearning.enporan.dz/moodle/pluginfile.php/12437/mod_resource/content/0/Les%20Capteurs.pdf). [Accès le 29 05 2024].
- [7] [https://fr.wikiversity.org/wiki/Capteur/Capteurs\\_optiques](https://fr.wikiversity.org/wiki/Capteur/Capteurs_optiques). [Accès le 20 04 2024].
- [8] <https://dspace.univ-msila.dz/>. [Accès le 15 04 2024].
- [9] C. B. D. Courjon, "Le champ proche optique théorie et applications", Ed. Springer 2001..
- [10] J. K. J. Park, "Photonic crystal Fiber with ring-core hollow-defect for evanescent wave chemical sensing", 35th European Conference on Optical Communication, ECOC '09, 2009..
- [11] G. K. Z. W. T. T. S. L. J. Y. L. C. S. Z. X. Y. D. Y. Yue, "Highly birefringent elliptical-hole photonic crystal fiber with squeezed hexagonal lattice", Opt. Lett., vol.32, pp. 469-471, 2007..
- [12] A. M. R. P. M. B. M. L.-A. S. Rota-Rodrigo, "An in-reflection strain sensing head based on a Hi-Bi photonic crystal fiber," Sensors, vol. 13 (7), pp. 8095-8102, 2013..
- [13] H. F. X. H. L. H. W. Jin, "Sensing with hollow-core photonic bandgap fibers", Meas. Sci.Technol., vol. 21, Article ID 094014, 2010.
- [14] M. Skorobogatiy, "Microstructured and photonic bandgap fibers for applications in the resonant bio- and chemical sensors", Journal of Sensors, vol. 2009 Article ID 524237, 2009..
- [15] A. Lagrost, "Génération de peignes de longueurs d'ondes à haut débit pour les télécommunications optiques", thèse de Doctorat, Univ. de Rennes 1,2010..
- [16] A. A. A.-D. A. C. A. C. E. D. F. S. S. R. M. I. Alzubaidi, "Biosensor based on microstructured optical fiber Bragg grating for DNA detection", article ID: 14399811 Conference on Photonics Technologies, Fotonica AEIT Italian, Naples, Italy 2014..
- [17] J. S. H. C. L. H. C. L. L. J. M. Hsu, "Fiber-optic Michelson interferometer with high sensitivity based on a liquid-filled photonic crystal fiber", Opt. Commun., vol. 331, pp. 348-352 ,2014..

- [18] M. I. Z. M. K. & a. S. H. Aref, "Pressure and temperature characterization of two interferometric configurations based on suspended-core fibers", *Opt. Commun.*, vol. 285 (3), pp.269-273, 2012.
- [19] A. M. E. I. A. H. A. A. Khetani, "Hollow core photonic crystal fiber for monitoring leukemia cells using surface enhanced Raman scattering (SERS)", *Proc. of SPIE*, vol. 10025, *Advanced Sensor Systems and Applications VII*; 100251H, 2016..
- [20] M. S. J. G. A. L. G. C. H. Marks, "Surface enhanced Raman spectroscopy (SERS) for in vitro diagnostic testing at the point of care", *Nanophotonics De Gruyter*, vol. 6(4), pp. 681-701, 2017.
- [21] R. K. D. Y. J. P. T. F. S. Hanf, "Fiber-enhanced Raman multigas spectroscopy: A versatile tool for environmental gas sensing and breath analysis", *Anal. Chem.*, vol. 86(11), pp.5278-5285, 2014..
- [22] Z. Q. D. J. L. Y. Zhao, "Photonic crystal fiber based surface plasmon resonance chemical sensors", *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 202, pp. 557-567, 2014..
- [23] J. F. Masson, "Surface Plasmon Resonance Clinical Biosensors for Medical Diagnostics", *ACS Sens.*, vol. 2(1), pp. 16-30, 2017.
- [24] R. A. A. K. Y. F. R. A. A. A. Rifat, "Photonic crystal fiber based plasmonic sensors", *Sens. Actuators B-Chem*, vol. 243, pp. 311-325, 2017..
- [25] <https://www.mediprostore.com/c/23-fonctionnement-oxymetre>. [Accès le 18 05 2024].
- [26] R. Barer, « the Optical Society of America» *Journal of the Optical Society of America*, Vols. %1 sur %2545-556, n° %11957, p. 47, *Journal of the Optical Society of America*.

# Chapitre 3

Simulation d'un capteur d'hémoglobine

## **1 Introduction**

L'optimisation des dispositifs exploitant ou contrôlant les PCFs nécessite le développement d'outils appropriés de simulation numérique. Grâce à l'augmentation des capacités de calcul (comme le nombre et la vitesse des processeurs, l'efficacité des cartes graphiques, etc.) mises à disposition des utilisateurs, la conception des PCFs par les méthodes de simulation numérique est de plus en plus avancée. La modélisation des PCFs est réalisée à l'aide d'outils de CAO (conception assistée par ordinateur) et repose sur la résolution numérique des équations de Maxwell par des méthodes comme les moments (ADS, CST) ou les éléments finis (COMSOL, HFSS) [1][2]. Ces méthodes permettent de décrire le comportement du champ électromagnétique dans des structures guidées, en étant capables de modéliser des structures présentant des géométries complexes. Elles offrent également la possibilité de tester de manière interactive et simple des hypothèses visant à améliorer les paramètres optiques.

Dans ce chapitre, nous entamerons par une description des avancées récentes dans les méthodes de modélisation numérique des fibres à cristal photonique (PCF). Ensuite, à l'aide d'une simulation BeamProp qui repose sur la méthode BPM, nous serons en mesure d'éviter les solutions parasites et de modéliser avec précision les contours incurvés des trous d'air présents dans les PCF. Cette approche nous permettra ensuite d'étudier les caractéristiques fondamentales des PCF, comme l'indice de réfraction et la dispersion chromatique, en prenant en compte différents niveaux d'hémoglobine. Notre objectif final est de déterminer la conception d'un capteur Hémoglobine avec une haute sensibilité.

## **2 Présentation de l'outils de simulation et les méthodes de simulations numériques**

Dans le domaine des télécommunications et du guidage de la lumière, de nombreux logiciels de simulation ont été exploités par les chercheurs, notamment MATLAB et RSoft CAD. Dans cette section, nous allons présenter le logiciel de simulation utilisé dans notre étude, à savoir BeamPROP de Rsoft. Cet outil nous permettra de modéliser et d'analyser les structures basées sur un cristal photonique.

## 2.1 Définition du Simulateur RSoftCAD

RSoft CAD est le logiciel principal de la suite RSoft Photonique et sert de programme de contrôle pour les modules de simulation de dispositifs passifs tels que Beam PROP, Full WAVE, Band SOLVE, GratingMOD et DiffractMOD de RSoft. Il est utilisé pour définir les paramètres essentiels requis par ces modules de simulation : les propriétés des matériaux et la géométrie de la structure d'un dispositif photonique. En général, un utilisateur commence par concevoir une structure dans l'interface CAO, puis utilise un ou plusieurs modules de simulation pour modéliser différents aspects des performances du dispositif [3].

## 2.2 Modules de simulation associés

### 2.2.1 Band SOLVE

Le module SOLVE de la bande est un outil de simulation spécialement conçu pour la création et l'analyse des structures à bandes interdites photoniques. Grâce à la méthode des ondes planes (PWE), ce module permet le calcul précis des bandes interdites des structures périodiques. Son utilité est particulièrement remarquable lorsqu'il s'agit d'optimiser les propriétés des cristaux photoniques en matière de structure des bandes. Ainsi, cette simulation prépare l'étude ultérieure de la propagation de la lumière au sein des matériaux BIP au moyen de Full WAVE [3].

#### 2.2.1.1 Méthode des ondes planes (PWE)

La méthode des ondes planes est grandement privilégiée pour calculer les diagrammes de dispersion dans les cristaux photoniques. Comme son nom l'indique, elle se base sur la décomposition en ondes planes du champ électrique ou magnétique. Cette approche constitue une méthode de résolution dans le domaine fréquentiel des équations de Maxwell, utilisée principalement pour analyser les propriétés dispersives des matériaux à bandes interdites photoniques. Elle permet de déterminer des caractéristiques telles que la fréquence, la polarisation, la symétrie et la distribution du champ pour les modes d'une structure photonique. La technique PWE consiste à résoudre l'équation d'onde linéaire dans le domaine fréquentiel en développant le champ électromagnétique à l'aide d'ondes planes. Cette méthode s'avère très efficace pour calculer les diagrammes de bandes des cristaux photoniques parfaitement périodiques. Dans notre étude, nous appliquons la méthode PWE afin d'analyser la bande interdite de la structure photonique [4].

## 2.2.2 Fullwave

Les simulations numériques ont été effectuées à l'aide de FullWAVE, un logiciel de simulation électromagnétique fondé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel. Cette méthode, appelée FDTD, implique la résolution discrétisée dans l'espace et dans le temps des équations de Maxwell. Elle permet le suivi de l'évolution du champ électromagnétique à travers le temps en tous points de la structure, offrant ainsi la possibilité d'obtenir des cartographies du champ EM à tout moment et en tout lieu. En comprenant cette évolution du champ en fonction du temps, il est également possible d'obtenir des informations sur la réponse spectrale de la structure [5].

FullWAVE peut effectuer la simulation de différentes structures (telles que limitées, infinies ou périodiques) composées de matériaux variés tels que des métaux ou des diélectriques. L'utilisation de FullWAVE nécessite de définir les matériaux constituant la structure en utilisant la permittivité électrique, ainsi que de spécifier l'environnement dans lequel la structure se trouve et les conditions aux limites. Afin d'éviter les réflexions indésirables aux bords de la fenêtre de calcul FDTD et pour simuler un milieu ouvert, il est crucial d'utiliser des conditions absorbantes aux limites du domaine de discrétisation.

### 2.2.2.1 Méthode des différences finies dans le domaine temporel FDTD

La méthode FDTD, développée par Kane S. Yee en 1966, est une approche de calcul réalisée dans le domaine temporel qui permet d'étudier la propagation des ondes dans des matériaux structurés tels que les cristaux photoniques. Cette méthode offre à l'utilisateur une compréhension plus intuitive des processus de propagation et fournit également de nombreuses informations sur la propagation des ondes au sein de la structure [6].

### 2.2.2.2 Avantages et inconvénients de ces deux méthodes

Chacune de ces méthodes présente ses propres caractéristiques, avantages et inconvénients. Un tableau comparatif des principaux domaines d'application est disponible dans le tableau III.1. La méthode des ondes planes est préférée à la méthode FDTD pour calculer les diagrammes de dispersion, car elle permet un calcul plus direct des modes propres de la structure. En revanche, l'analyse temporelle des modes est effectuée exclusivement par la méthode FDTD, notamment dans le cas des guides à cristaux photoniques où l'utilisation de

conditions périodiques et absorbantes permet de calculer des paramètres dynamiques comme les pertes d'énergie, tout en modélisant une structure de taille minimale [7].

|   | <i>Ondes planes</i> | <i>FDTD</i>                                       |
|---|---------------------|---|
| <i>Analyse</i>  | Fréquentielle       | Temporelle  |
| <i>Diagramme de dispersion</i>                          | Possible            | Possible (si les modes ne sont pas trop à pertes) |
| <i>Profil spatial du champ</i>                          | Possible            | Possible  |
| <i>Visualisation de l'évolution temporelle du champ</i> | Impossible          | Possible  |
| <i>Temps de décroissance / facteur de qualité</i>       | Impossible          | Possible  |
| <i>Spectre de transmission / réflexion</i>              | Impossible          | Possible  |
| <i>Type de structure</i>                                | Infinie             | Finie ou Périodique infinie                       |

**Tableau III. 1:** Comparatif des méthodes de calcul par ondes planes et par FDTD [7].

### 2.2.3 BeamPROP

Le module de propagation incorporé dans RSoft Photonics CAD SUITE représente un outil novateur qui permet de simuler la propagation optique dans les guides d'ondes en deux et trois dimensions. Il est basé sur la méthode BPM (Beam Propagation Method) [5].

#### 2.2.3.1 La méthode BPM (Beam Propagation Méthode)

La BPM est utilisée pour analyser les structures non uniformes dans une direction de propagation, qu'elles soient monomodes ou multimodes. Cette technique est basée sur la décomposition de la propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu homogène sur une distance  $\delta z$ , ainsi que sur une correction de phase due au milieu initial. La propagation de l'onde est plus facile à réaliser dans le domaine fréquentiel en utilisant la base des modes propres de propagation dans le milieu homogène, tandis que la correction de phase est plus simple dans le domaine spatial. Dans cette étude, nous utilisons la méthode BPM pour examiner la propagation monomode ou multimode dans la structure photonique [7].



### **3 Partie théorique**

#### **3.1 Introduction**

La mesure de la concentration d'hémoglobine (HGB) dans le sang est un paramètre essentiel pour le diagnostic et le suivi des maladies cardiovasculaires, les anémies, les érythromélagie, etc. Dans ce contexte, les capteurs de HGB ont pris une importance croissante en raison de leur utilité dans les applications médicales, telles que le suivi de la santé des patients, la surveillance médicale et l'automatisation des analyses de laboratoire.

Dans cette simulation, nous avons choisi de simuler la sensibilité d'un capteur d'hémoglobine en raison de sa pertinence dans l'automatisation des analyses de laboratoire. Les capteurs de HGB ont déjà été développés et utilisés dans diverses applications médicales, tels que les systèmes de surveillance médicale, les appareils de diagnostic portables et les systèmes de soins infirmiers. Cependant, la sensibilité de ces capteurs peut varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que la qualité du matériel, l'efficacité du processus de détection et la présence d'interférences.

En simulant la sensibilité d'un capteur d'hémoglobine, nous pouvons évaluer les performances du capteur en fonction des paramètres de la simulation, tels que la concentration d'hémoglobine, la structure PCF. Cela nous permettra également de comprendre les limites et les défis liés à l'utilisation de ces capteurs dans des applications médicales spécifiques.

Dans cette simulation, nous allons utiliser RSOFTE pour simuler la sensibilité d'un capteur d'hémoglobine. Nous allons également examiner comment les paramètres de simulation affectent la précision et la sensibilité du capteur. Les résultats de cette simulation nous aideront à comprendre les avantages et les limitations de l'utilisation de ces capteurs dans l'automatisation des analyses de laboratoire et à identifier les domaines nécessitant une amélioration.

En résumé, notre simulation vise à évaluer les performances d'un capteur d'hémoglobine en fonction des paramètres de la simulation.

#### **3.2 L'indice de réfraction**

L'indice de réfraction, habituellement symbolisé par  $(n)$ , représente le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans un corps transparent [8].

$$n = \frac{c}{v}$$

III. 1

c : vitesse de la lumière dans le vide. Et v : vitesse de la lumière dans un corp transparent.

Afin de réaliser une simulation précise du mode de guidage et d'analyser les performances du capteur, nous avons étudié la dispersion des matériaux à l'aide d'un système d'analyse basé sur la formule mentionnée ci-dessous. Lors de la 9e Conférence internationale sur les propriétés de la vapeur qui s'est déroulée à Munich en 1979, une équation a été présentée pour l'indice de réfraction de l'eau liquide, en prenant en compte la longueur d'onde, la température et la pression [9].

$$n(\lambda, T, p) = \sqrt{\frac{a_1}{\lambda^2 - \lambda_a^2} + a_2 + a_3\lambda^2 + a_4\lambda^4 + a_5\lambda^6} \quad \text{III. 2}$$

$$+ (b_1 + b_2\lambda^2 + b_3\lambda^4)(T - T_b) + (b_4 + b_5\lambda^2 + b_6\lambda^4)(T - T_b)^2$$

$$+ (b_4 + b_5\lambda^2 + b_6\lambda^4)(T - T_b)^2 + (b_7 + b_8\lambda^2 + b_9\lambda^4)(T - T_b)^3$$

$$+ [c_1 + c_2\lambda^2 + (c_3 + c_4\lambda^2)T](p - p_b) + (c_5 + c_6\lambda^2)(p - p_b)^2$$

Avec la plage de validité de

$0,182 \mu\text{m} < \lambda < 2,770 \mu\text{m}$  et  $-10^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C}$  et  $1 \text{ bar} < p < 1200 \text{ bar}$  [9].

|                                    |                                    |                                    |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| $\lambda_a^2 = 0.018085$           | $b_1 = -8.454\ 823 \times 10^{-5}$ | $c_1 = 8.419\ 632 \times 10^{-6}$  |
| $a_1 = 5.743534 \times 10^{-3}$    | $b_2 = -2.787\ 742 \times 10^{-5}$ | $c_2 = 1.941\ 681 \times 10^{-5}$  |
| $a_2 = 1.769\ 238$                 | $b_3 = 2.608\ 176 \times 10^{-6}$  | $c_3 = -7.762\ 524 \times 10^{-8}$ |
| $a_3 = -2.797\ 222 \times 10^{-2}$ | $b_4 = -2.050\ 671 \times 10^{-6}$ | $c_4 = 4.371\ 257 \times 10^{-8}$  |
| $a_4 = 8.715348 \times 10^{-3}$    | $b_5 = 1.019\ 989 \times 10^{-6}$  | $c_5 = 7.089\ 664 \times 10^{-9}$  |
| $a_5 = -1.413\ 942 \times 10^{-3}$ | $b_6 = -2.611\ 919 \times 10^{-6}$ | $c_6 = -2.240\ 384 \times 10^{-8}$ |
|                                    | $b_7 = 8.194989 \times 10^{-9}$    |                                    |
|                                    | $b_8 = -8.107\ 707 \times 10^{-9}$ |                                    |
|                                    | $b_9 = 4.877\ 274 \times 10^{-8}$  |                                    |

**Tableau III. 2 :** Valeurs numériques des coefficients de l'équation [9].

Les coefficients de l'équation ont été obtenus à l'aide de la méthode des moindres carrés et leurs valeurs numériques sont répertoriées dans le tableau. Une température de référence de  $T_b = 20^\circ\text{C}$  a été sélectionnée, correspondant à une température de  $T_b = 19,993^\circ\text{C}$  selon l'Échelle Internationale de Température Pratique de 1968. De même, une pression de référence de  $p_b = 1$

atm = 1,013 25 bar a été utilisée, car la plupart des mesures ont été réalisées dans ces conditions [9].

En effet, ce document vise à utiliser une méthode numérique afin d'étudier la dispersion chromatique de la PCF proposée. Pour mesurer et modéliser l'indice de réfraction effectif (neff) des trous d'air creux insérés dans la silice, qui est le matériau de base choisi, nous pouvons utiliser l'équation de Sellmeier. Cela est indiqué par [10] :

$$n^2 - 1 = \frac{0.6961663.\lambda^2}{\lambda^2 + (0.0684043)^2} + \frac{0.4079426.\lambda^2}{\lambda^2 - (0.1162414)^2} + \frac{0.8974794.\lambda^2}{\lambda^2 - (9.896161)^2} \quad \text{III. 3}$$

Dans cette équation,  $\lambda$  représente la longueur d'onde de fonctionnement. Cette équation permettra de calculer le profil de dispersion de la structure.

### 3.3 La sensibilité

La sensibilité est déterminée par les paramètres qui l'affectent et correspond au rapport entre la valeur de sortie d'un capteur et sa valeur d'entrée [11].

$$s( Ps/nm/km ) = \left| \frac{\Delta D}{\Delta C} \right| \quad \text{III. 4}$$

$\Delta D$  : l'écart de variation des valeurs de dispersion.

$\Delta C$  : l'écart de variation des valeurs de Concentration hémoglobine

## 4 Conception et modélisation des PCFs

le moteur de simulation BeamPROP, intégré à la suite de conception de composants RSoft, utilise des méthodes avancées de propagation des faisceaux par différences finies (BPM) pour la modélisation et la conception de dispositifs photoniques. Il permet à l'utilisateur de définir les caractéristiques des matériaux et la structure géométrique, avec des fichiers en format texte ASCII pour un contrôle précis. Le logiciel est compatible avec divers langages de script, offrant la possibilité de créer des scripts personnalisés en Perl, Python, C ou C++. La suite RSoft Component Design offre la possibilité de réaliser des simulations à travers une interface graphique et des simulations personnalisées complexes via un script [12].

Le capteur d'hémoglobine utilise l'interaction entre les trous remplis d'eau, d'air pour générer un champ évanescent. Des études ont examiné les variations de dispersion avec différentes concentrations d'eau et d'air dans la PCF, où l'indice de réfraction de l'eau diffère de celui de la silice

#### 4.1 Structure PCF

Pour la simulation, nous avons utilisé une fibre optique en cristal photonique RTIM constituée de silice avec un indice de réfraction de  $n=1.44$ . Cette fibre est caractérisée par la présence régulière d'anneaux d'air de taille microscopique alignés parallèlement à l'axe de propagation  $z$  dans le plan  $(xy)$ . Dans notre expérience, nous avons introduit de l'eau dans le deuxième anneau avec un indice de réfraction de  $n_3=1.33$ .

##### 4.1.1 Structure A

En étudiant les propriétés de plusieurs structures de PCF (photonic crystal fiber) avec différents nombres d'anneaux, nous avons constaté que la structure à 4 anneaux présente une meilleure sensibilité dans notre étude. La sélection de la structure de la fibre prend en compte une variété d'objectifs, tels que la minimisation de la dispersion, pour répondre aux besoins spécifiques de notre recherche.

|                        |                                |
|------------------------|--------------------------------|
| Le nombre des anneaux  | 4 anneaux                      |
| Le diamètre des trous  | $D_1=0.6 \mu\text{m}$          |
| Le pas entre les trous | $\Lambda_1 = 1.45 \mu\text{m}$ |

*Tableau III. 3 : Paramètres de la structure A*

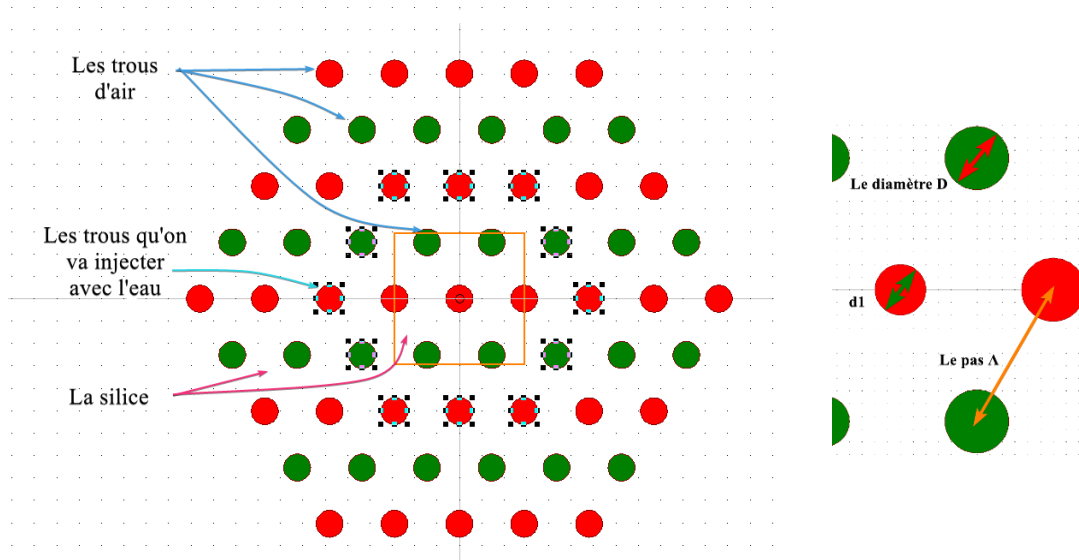


Figure III. 1 : Section transversale de la structure PCF

#### 4.1.2 Structure B

|                        |                               |
|------------------------|-------------------------------|
| Le nombre des anneaux  | 4 anneaux                     |
| Le diamètre des trous  | $D_2=0.5 \mu\text{m}$         |
| Le pas entre les trous | $\Lambda_2 = 1.2 \mu\text{m}$ |

Tableau III. 4: Paramètres de la structure B

#### 4.1.3 Structure C

|                                    |                               |
|------------------------------------|-------------------------------|
| Le nombre des anneaux              | 4 anneaux                     |
| Le diamètre des trous              | $D_2=0.5 \mu\text{m}$         |
| Le pas entre les trous             | $\Lambda_2 = 1.2 \mu\text{m}$ |
| Le diamètre des trous du 2e anneau | $d1=0.4$                      |

Tableau III. 5 : Paramètres de la structure C

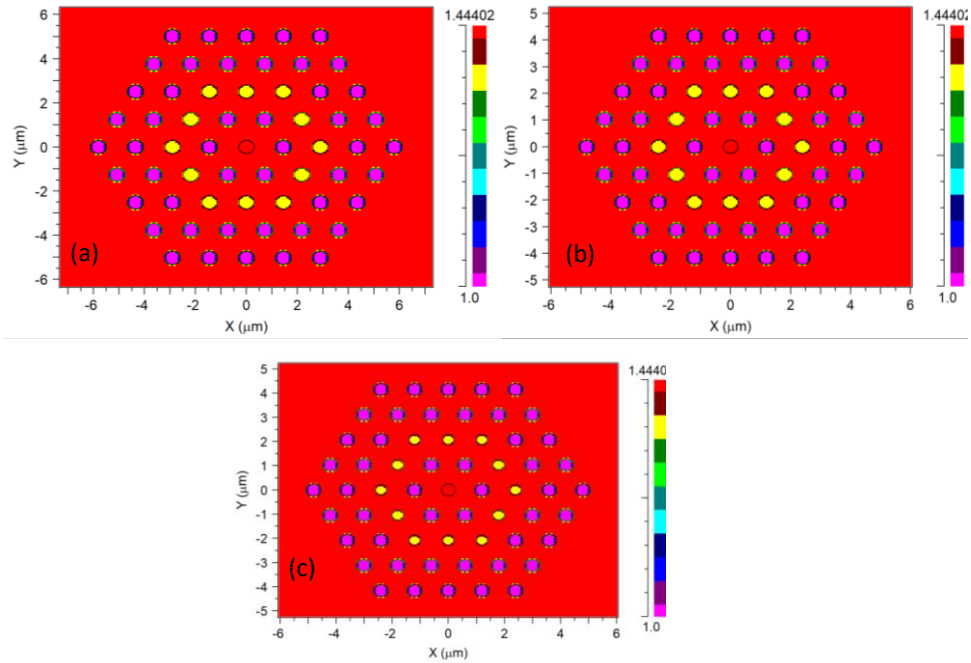
### 4.2 Les simulations

Voici une expression possible pour comparer les trois structures de fibre à cristaux photoniques :

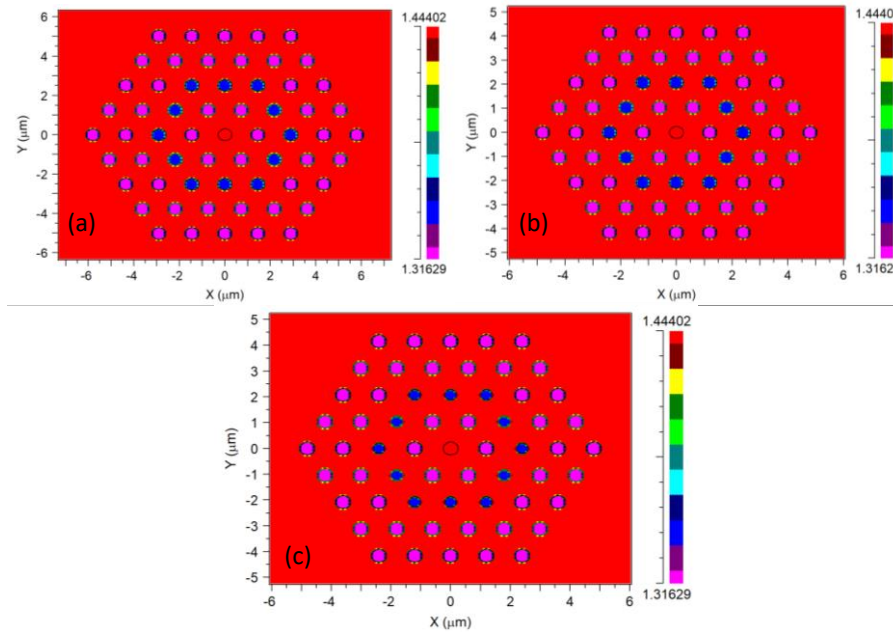
- Les structures A et B et C montrent des propriétés distinctes en raison de la différence de remplissage du 2e anneau.
- La simulation X : les trous sans l'eau (Trous d'air).
- La simulation Y : les trous du deuxième anneau remplis avec l'eau.

### 4.3 Indice de réfraction

Le profil d'indice d'une PCF est l'outil qui schématise les différents indices de réfractifs des composants de la structure PCF simulée. La figure III.3 présente le profil d'indice des structures proposés avec des trous d'air et la figure III.4 présente le profil d'indice des structures quand les trous sont remplis avec l'eau.



**Figure III. 2 :** Indices réfractifs des structures proposées sans eau. (a) Structure A. (b) Structure B. (c) Structure C.



**Figure III. 3 :** Indices réfractifs des structures proposées avec eau. (a) Structure A. (b) Structure B. (c) Structure C.

#### 4.4 Dispersion

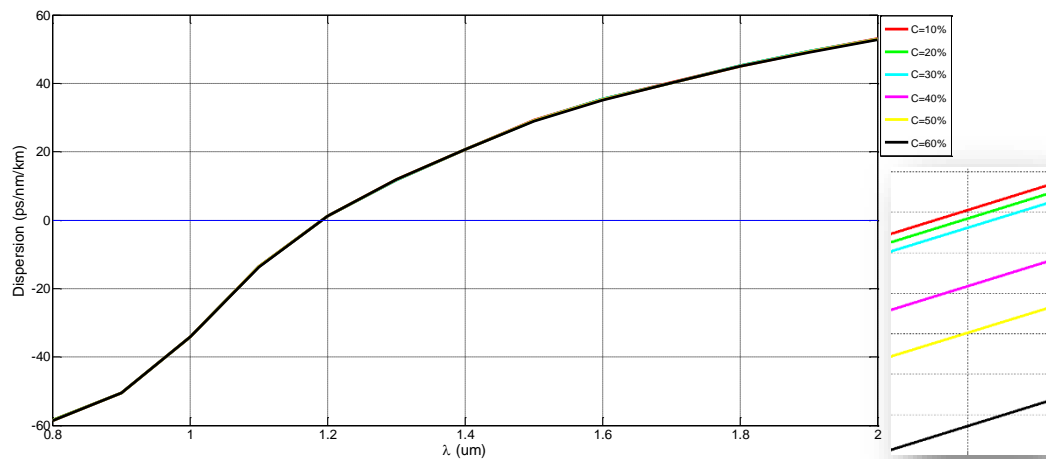
La dispersion du signal lumineux est en relation inverse avec la transmission régulière. Plus la dispersion est faible, plus la transmission optique dans une fibre micro-structurée est élevée et de meilleure qualité

#### 4.5 Influence de la concentration d'hémoglobine sur la dispersion

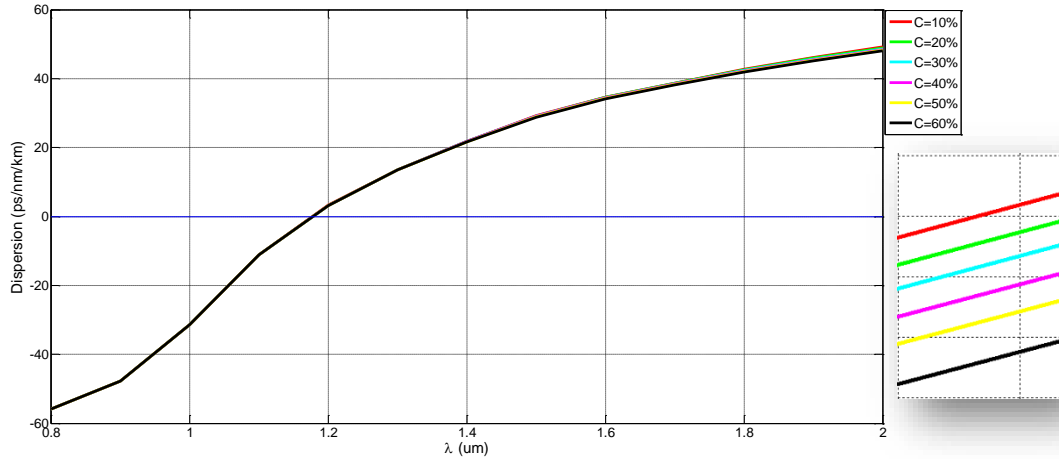
Afin d'examiner l'impact du changement de la concentration d'hémoglobine sur la dispersion, nous avons commencé à simuler en utilisant la méthode BPM (Beam Propagation Method) en calculant la dispersion en fonction des longueurs d'onde en variant les pourcentages de concentration d'hémoglobine de 0 à 60%. Dans un premier temps, nous allons simuler numériquement la dispersion du PCF (Photonic Crystal Fiber) avec et sans eau. Nous étudierons les différences et les effets de l'infiltration d'eau sur le PCF.

Avec longueur d'onde en espace libre : incrément fixe, faible =  $0,8 \mu\text{m}$ , élevé =  $2 \mu\text{m}$ ,  $\delta = 0,1 \mu\text{m}$ , pas = 13.

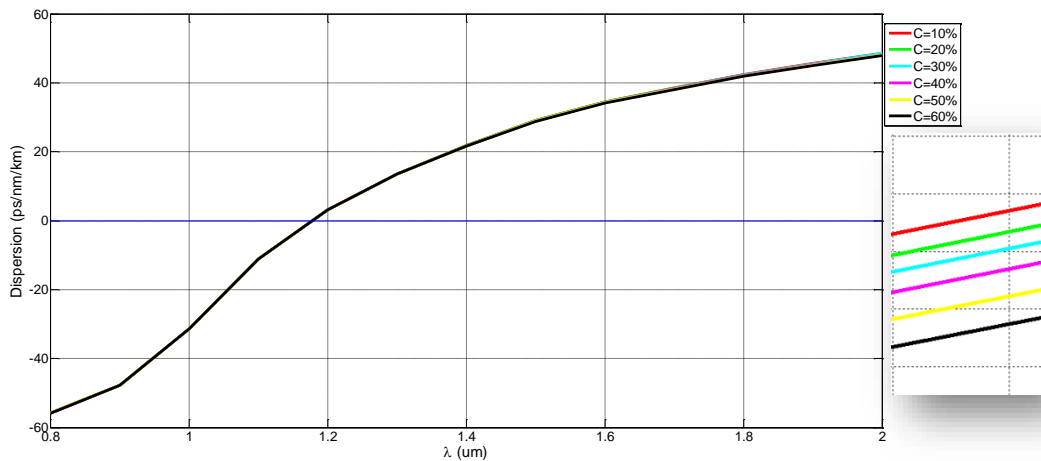
##### 4.5.1 Le premier cas (Simulation X)



**Figure III. 4:** Graphique montrant la variation de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différentes concentrations d'hémoglobine pour la structure (A).



**Figure III. 5 :** Graphique montrant la variation de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différentes concentrations d'hémoglobine pour la structure (B).



**Figure III. 6:** Graphique montrant la variation de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différentes concentrations d'hémoglobine pour la structure (C).

Les figures III.5 et III.6 et III.7 illustrent la variation de la dispersion des structures de PCF en fonction des longueurs d'onde pour les différentes concentrations d'hémoglobine. Nous remarquons que la dispersion tend à s'orienter vers les valeurs positives avec l'accroissement de la concentration d'hémoglobine.



4.5.2 le deuxième cas (Simulation Y)

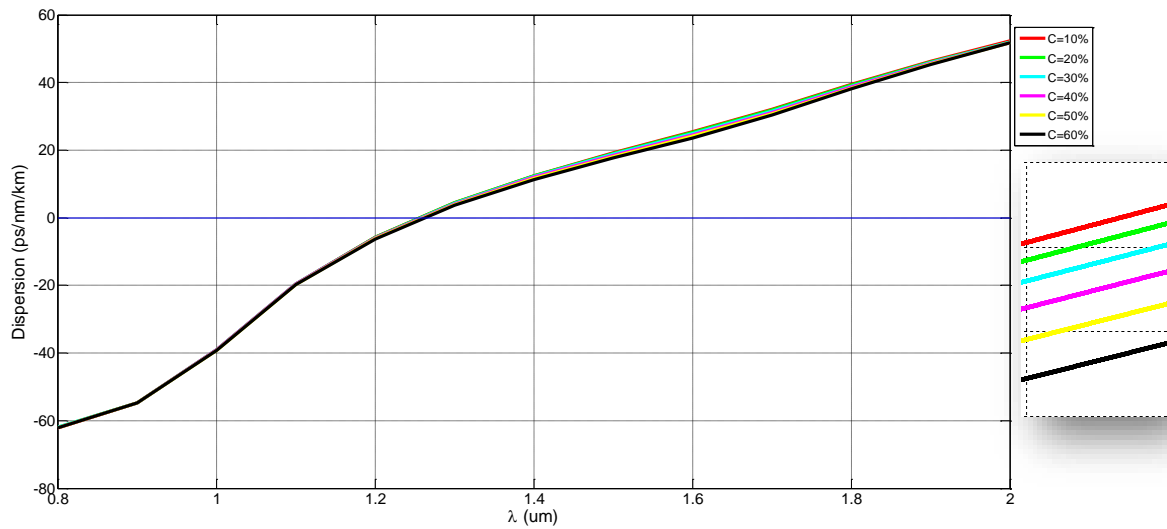


Figure III. 7: Graphique montrant la variation de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différentes concentrations d'hémoglobine pour la structure (A).

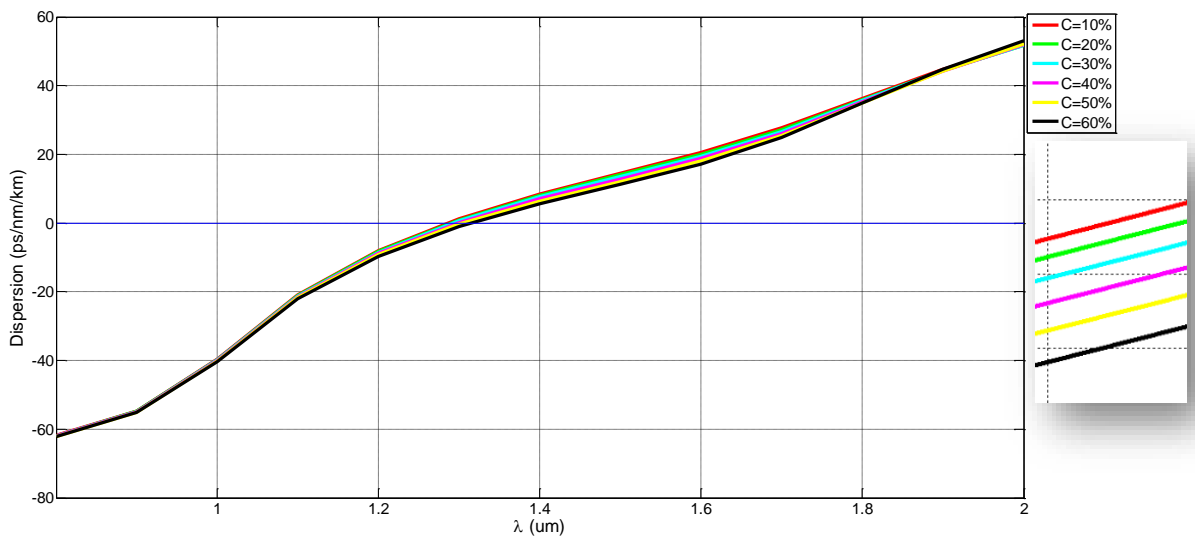
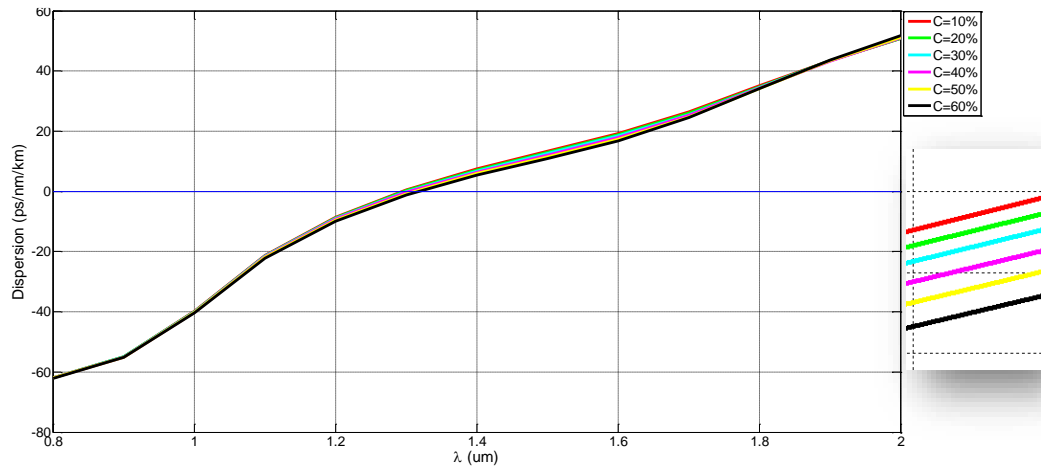


Figure III. 8: Graphique montrant la variation de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différentes concentrations d'hémoglobine pour la structure (B).



**Figure III. 9:** Graphique montrant la variation de la dispersion en fonction des longueurs d'onde à différentes concentrations d'hémoglobine pour la structure (C).

#### 4.6 Influence de la concentration d'hémoglobine sur la sensibilité du capteur

La sensibilité varie en fonction du changement de longueur d'onde. Nous avons choisi les longueurs d'onde :  $1.5\mu\text{m}$ ,  $1.6\mu\text{m}$ ,  $1.7\mu\text{m}$  et  $1.8\mu\text{m}$  en raison de leurs performances de sensibilité optimale, puis nous avons tracé les courbes de dispersion pour chaque concentration d'hémoglobine et pour les trois structures proposées.

### 4.6.1 Le premier cas (Simulation X)

#### 4.6.1.1 Structure (A)

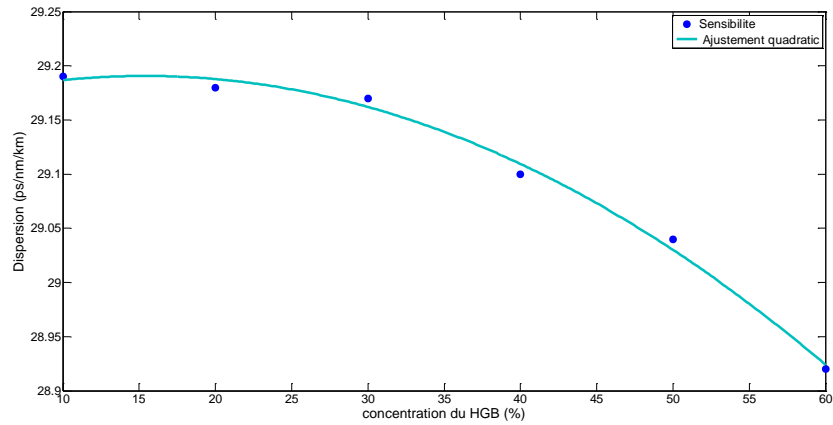


Figure III. 10 : Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.5 \mu\text{m}$

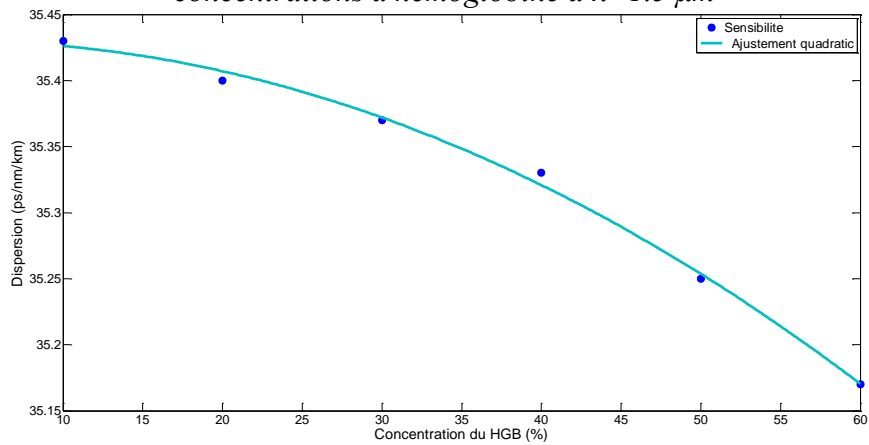


Figure III. 11 : Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.5 \mu\text{m}$

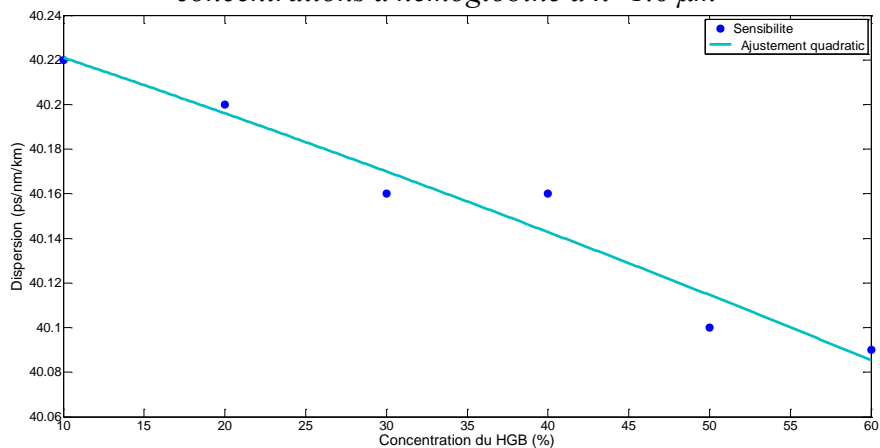


Figure III. 12 : Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.7 \mu\text{m}$

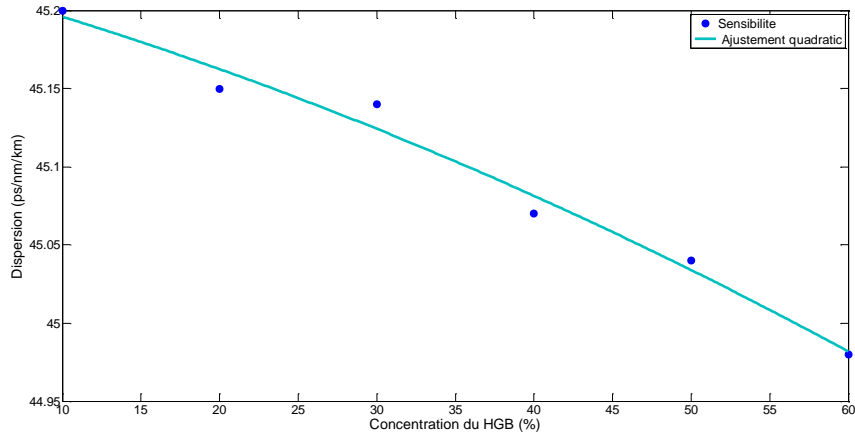


Figure III. 13: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.8 \mu\text{m}$

#### 4.6.1.2 Structure (B)

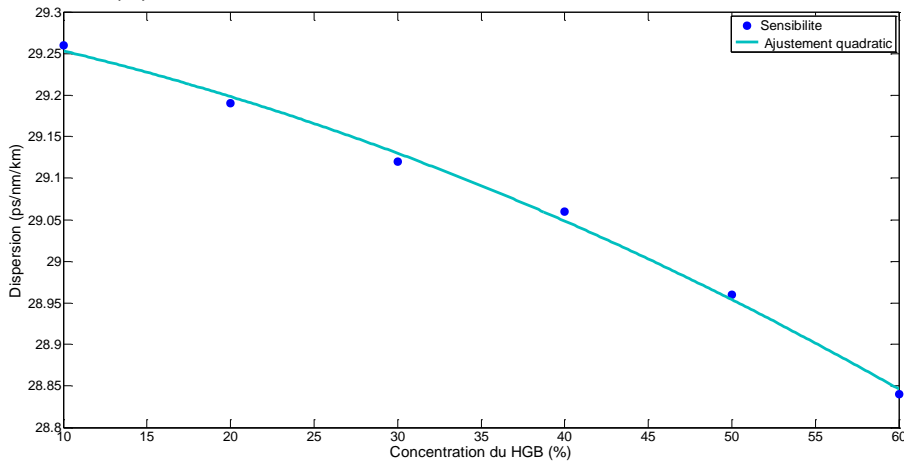


Figure III. 14: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.5 \mu\text{m}$

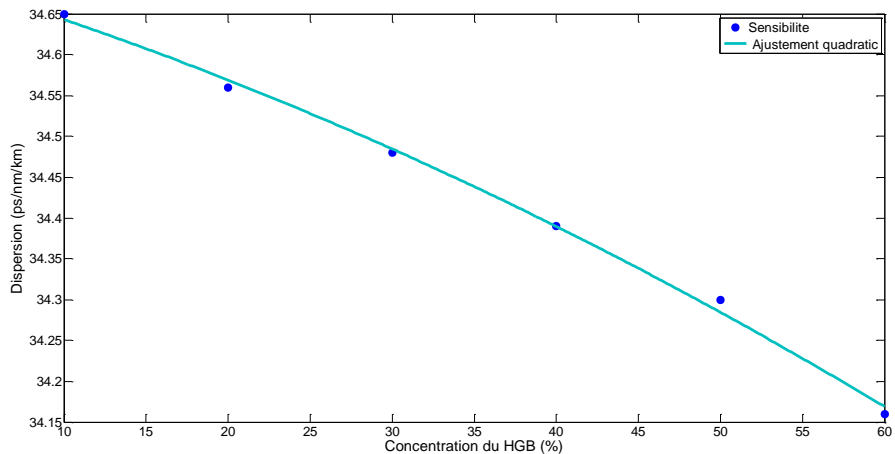


Figure III. 15: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.6 \mu\text{m}$

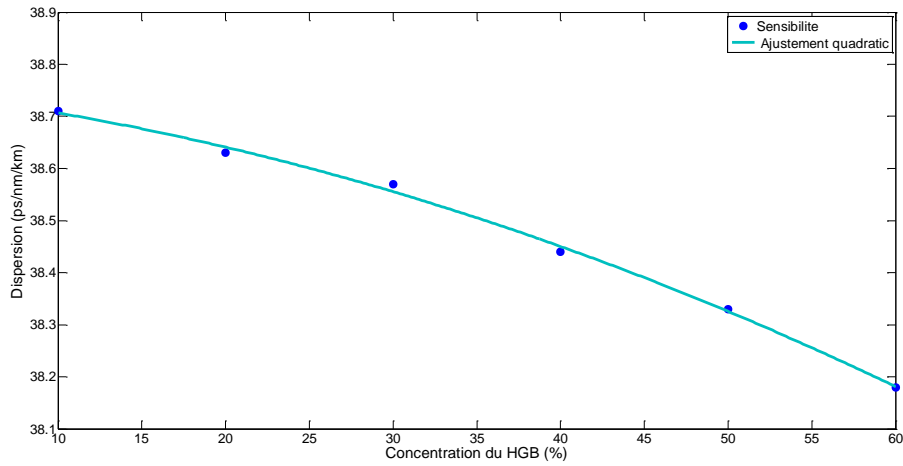


Figure III. 16: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.7 \mu\text{m}$

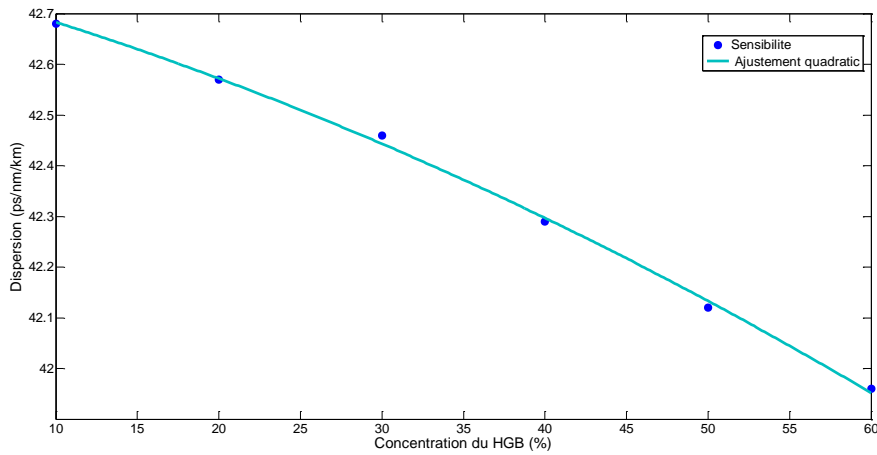


Figure III. 17: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.8 \mu\text{m}$

#### 4.6.1.3 Structure (C)

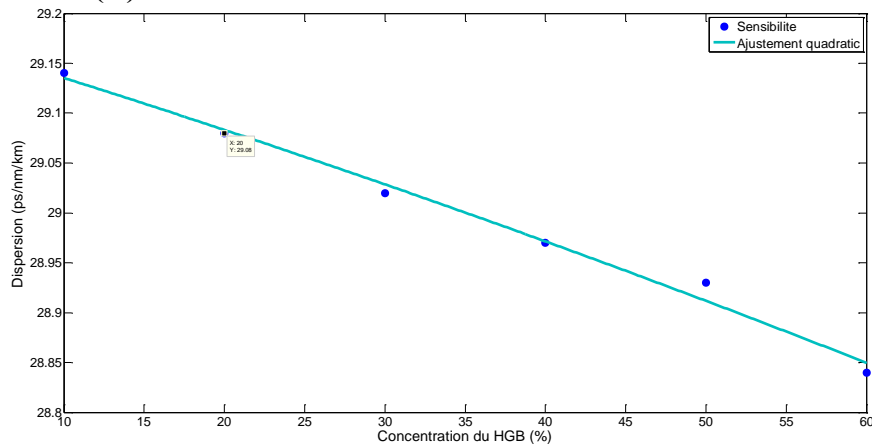
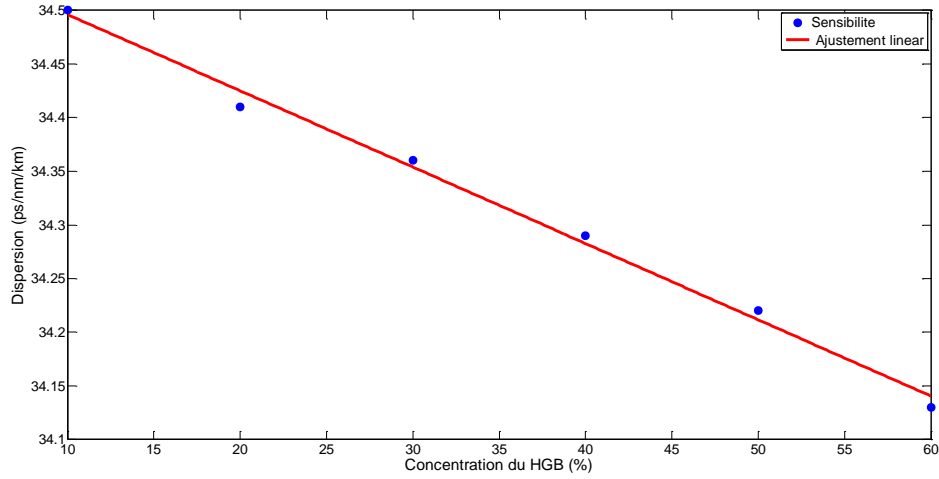
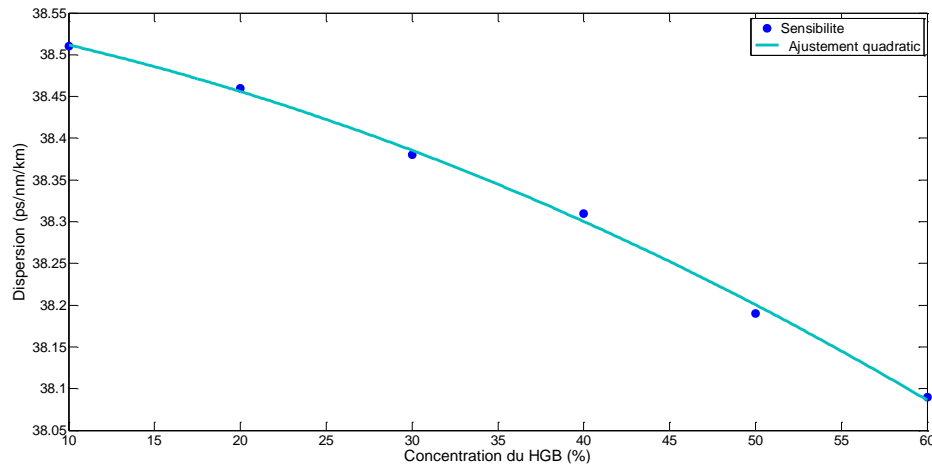


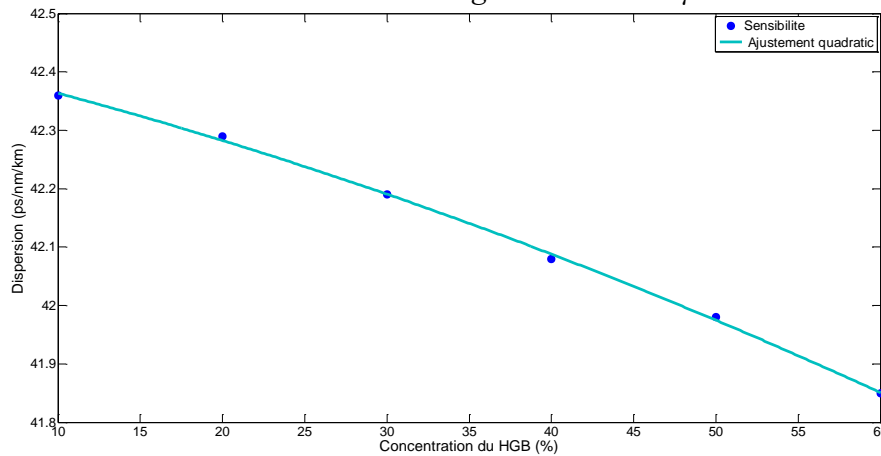
Figure III. 18: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.5 \mu\text{m}$



**Figure III. 19:** Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.6 \mu\text{m}$



**Figure III. 20:** Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.7 \mu\text{m}$



**Figure III. 21:** Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.8 \mu\text{m}$

## 4.6.2 Le deuxième cas (expérience Y)

### 4.6.2.1 Structure (A)

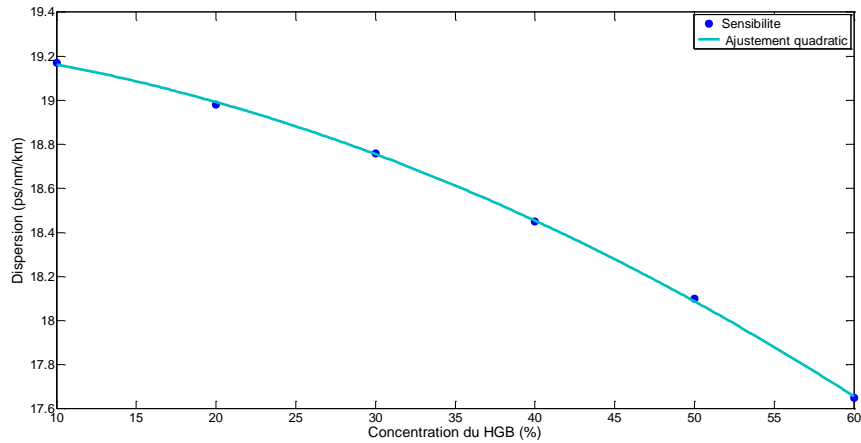


Figure III. 22: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.5 \mu\text{m}$

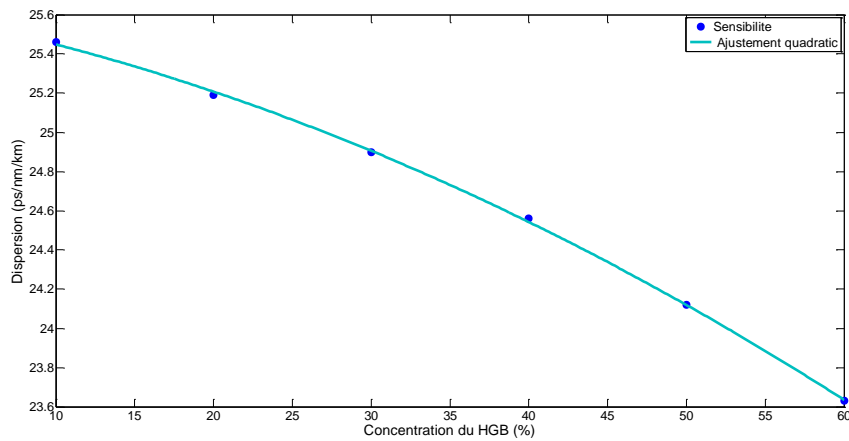


Figure III. 23: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.6 \mu\text{m}$

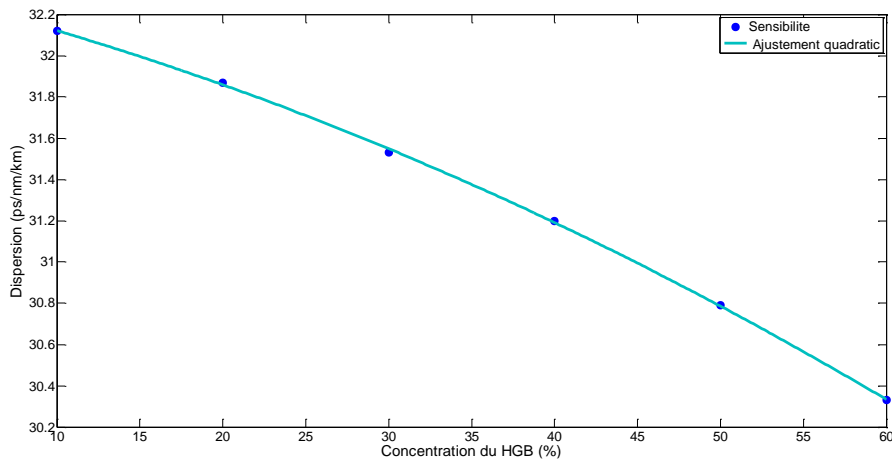


Figure III. 24: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.7 \mu\text{m}$

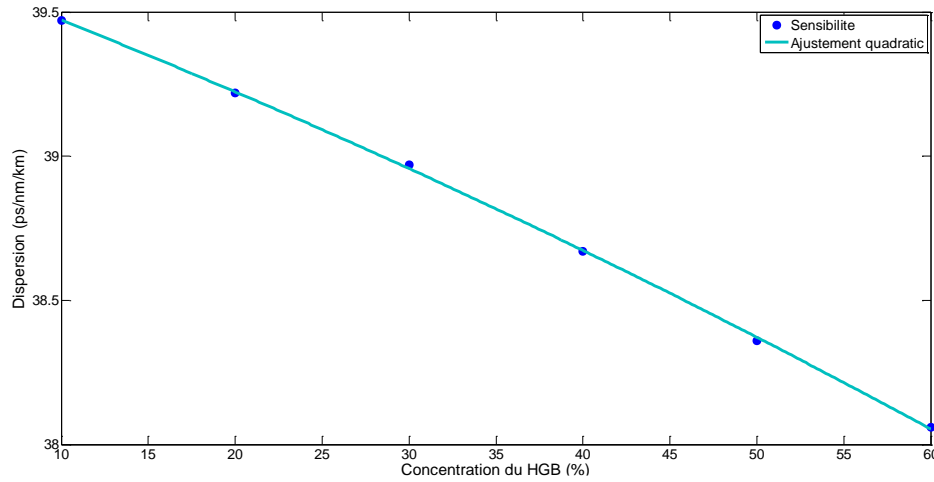


Figure III. 25: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.8 \mu\text{m}$

#### 4.6.2.2 Structure (B)

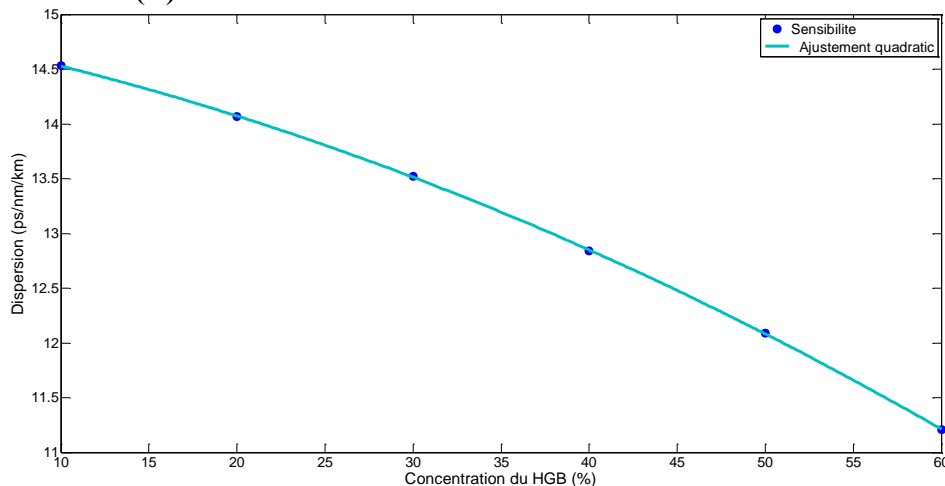


Figure III. 26: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.5 \mu\text{m}$

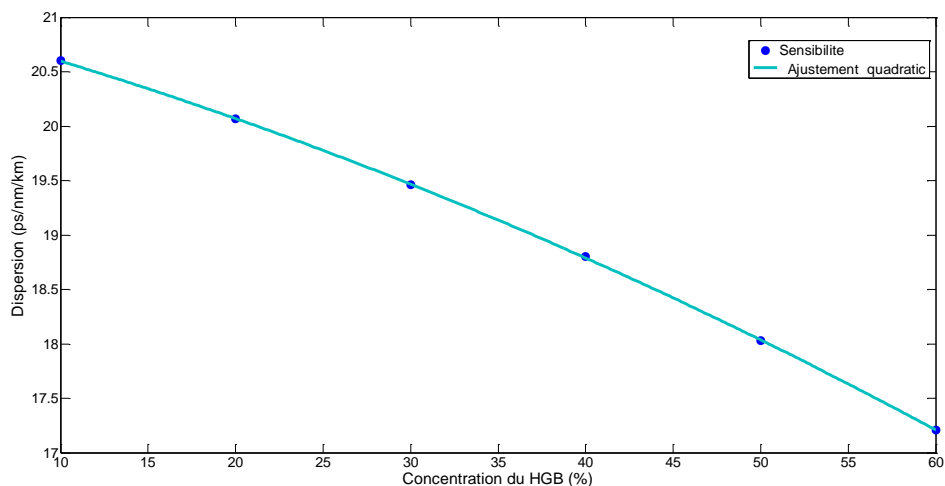


Figure III. 27: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.6 \mu\text{m}$



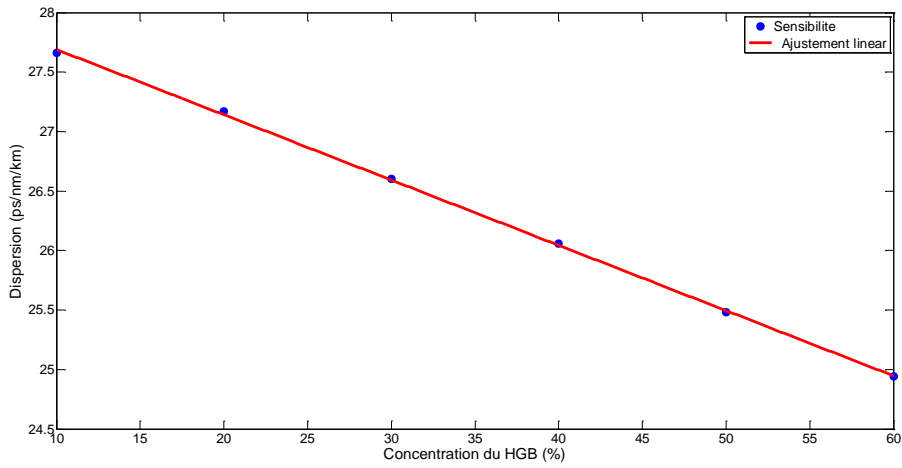


Figure III. 28: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.7 \mu\text{m}$

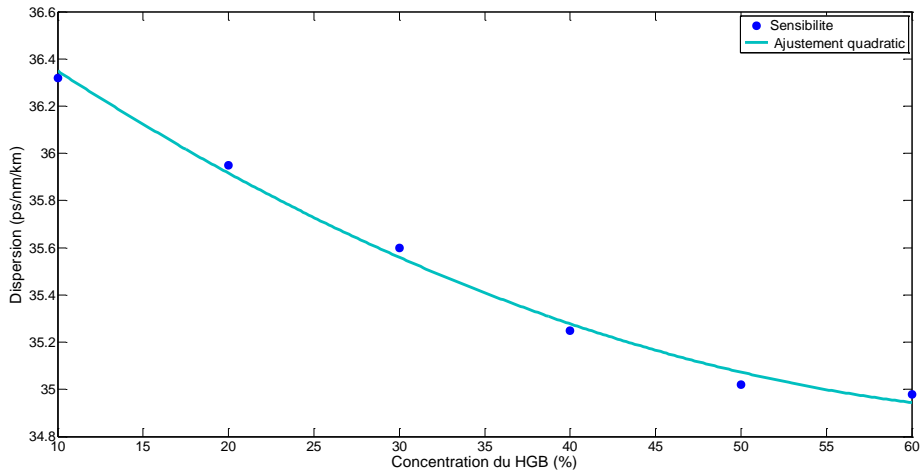


Figure III. 29: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.8 \mu\text{m}$

#### 4.6.2.3 Structure (C)

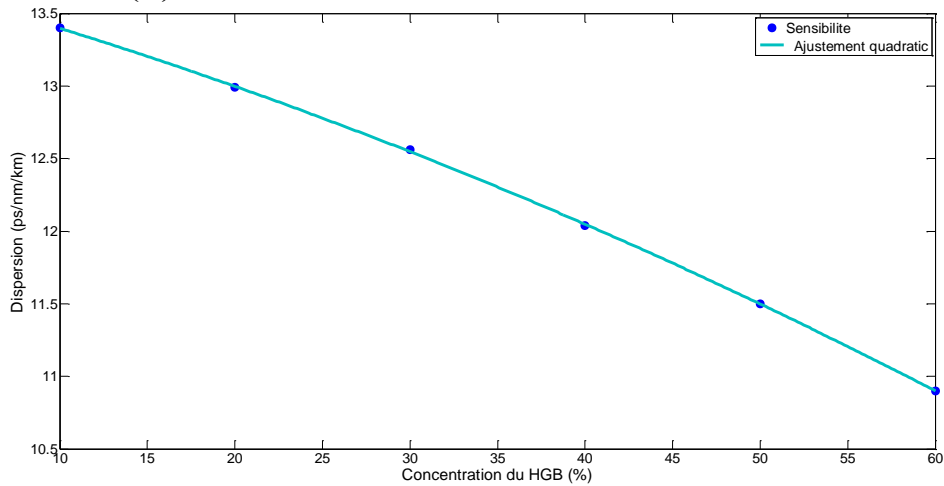
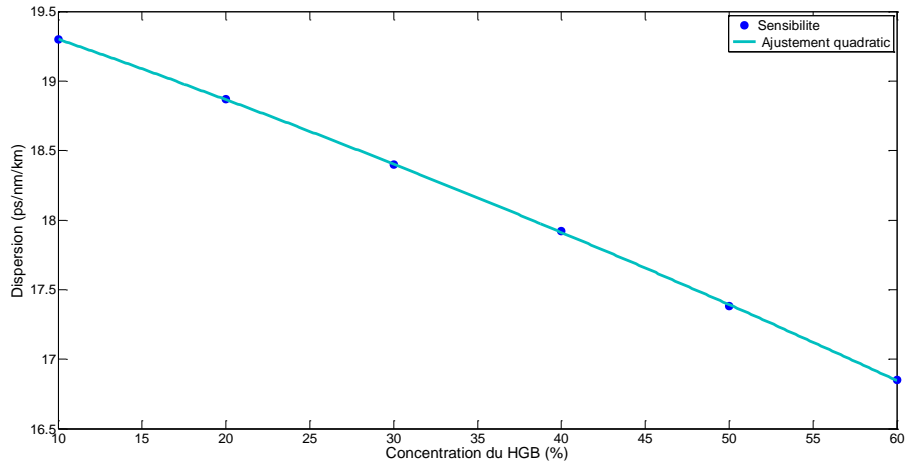
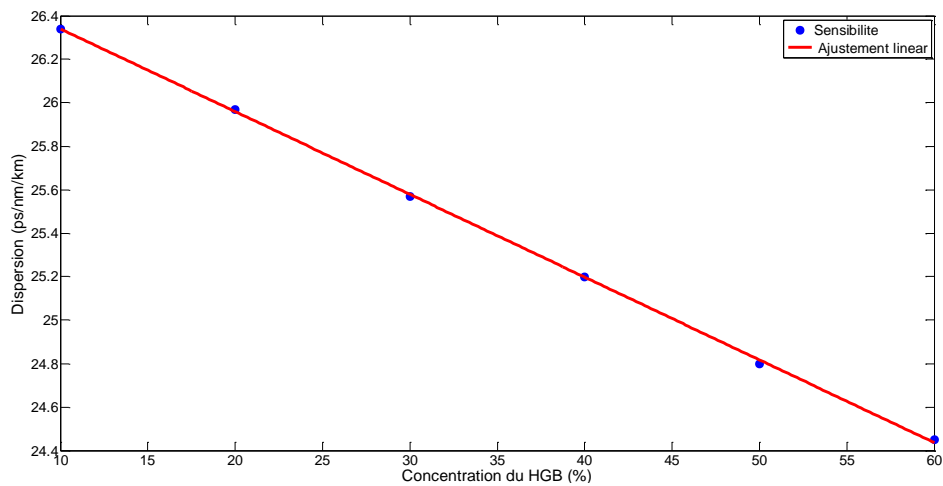


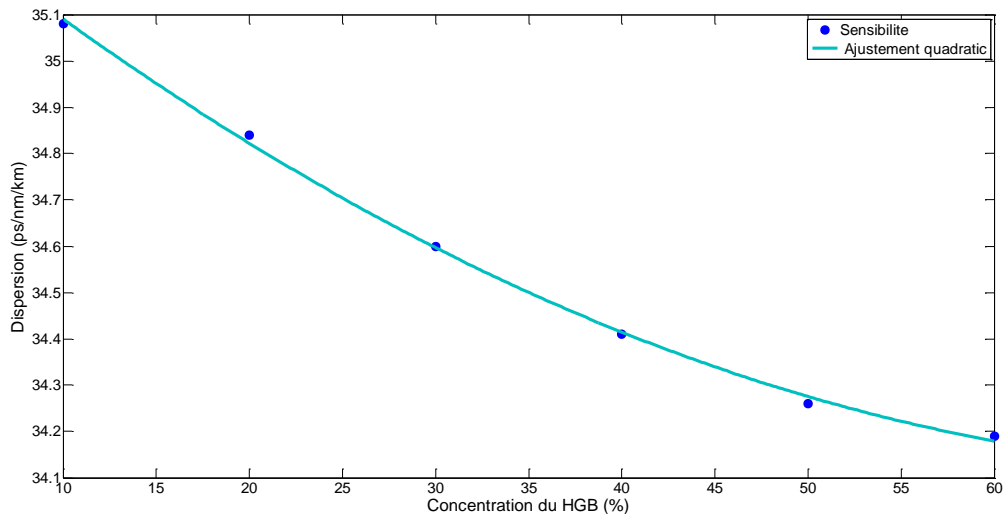
Figure III. 30: Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.5 \mu\text{m}$



**Figure III. 31:** Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.6 \mu\text{m}$



**Figure III. 32:** Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.7 \mu\text{m}$



**Figure III. 33:** Graphique illustrant la variation de la dispersion en fonction des concentrations d'hémoglobine à  $\lambda=1.8 \mu\text{m}$

Nous avons étudié la dispersion en fonction de la concentration d'hémoglobine en traçant un schéma de dispersion, où nous avons représenté les points de sensibilité. Pour

calculer la sensibilité avec une précision accrue, nous avons appliqué un ajustement quadratique ou une régression de lumière à ces données. L'ajustement a permis de déterminer la relation entre la concentration d'hémoglobine et la sensibilité, ce qui a permis de générer une équation pour estimer la sensibilité en fonction de la concentration d'hémoglobine.

#### 4.6.3 Les résultats de calcul

Le tracé de dispersion en fonction de la concentration d'hémoglobine se présente sous forme d'une fonction affine son équation dans le cas quadratique :

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad \text{III. 5}$$

Et dans le cas linéaire

$$y = ax + b \quad \text{III. 6}$$

Donc la sensibilité = a

D'après les tracés des deux structures nous avons obtenus les résultats suivants :

| $\lambda(\mu m)$        |              | Sensibilité $S$ (Ps/nm/km) |             |             |
|-------------------------|--------------|----------------------------|-------------|-------------|
|                         |              | Structure A                | Structure B | Structure C |
| $\lambda_1 = 1.5 \mu m$ | Simulation X | 0.001                      | 0.007       | 0.006       |
|                         | Simulation Y | 0.019                      | 0.046       | 0.041       |
| $\lambda_2 = 1.6 \mu m$ | Simulation X | 0.003                      | 0.009       | 0.007       |
|                         | Simulation Y | 0.027                      | 0.053       | 0.043       |
| $\lambda_3 = 1.7 \mu m$ | Simulation X | 0.002                      | 0.008       | 0.005       |
|                         | Simulation Y | 0.025                      | 0.054       | 0.038       |
| $\lambda_4 = 1.8 \mu m$ | Simulation X | 0.005                      | 0.011       | 0.007       |
|                         | Simulation Y | 0.025                      | 0.037       | 0.024       |

**Tableau III. 6:** Valeurs numériques des sensibilités pour différentes longueurs d'ondes.

##### 4.6.3.1 Comparaison des résultats

- Méthodologie

Les structures A, B et C ont été caractérisées expérimentalement pour différentes longueurs d'onde incidentes ( $\lambda_1 = 1.5 \mu m$ ,  $\lambda_2 = 1.6 \mu m$ ,  $\lambda_3 = 1.7 \mu m$ ,  $\lambda_4 = 1.8 \mu m$ ), avec et sans la présence d'eau. La sensibilité  $S$  (exprimée en Ps/nm/km) a été mesurée pour chaque configuration

- Résultats

Dans les simulations X, les structures A et B présentent des valeurs minimales de sensibilité S associées à la longueur d'onde  $\lambda_1 = 1.5 \mu\text{m}$ . En particulier, la structure A atteint une valeur de sensibilité S de 0.001 Ps/nm/km, tandis que la structure B atteint 0.007 Ps/nm/km.

En revanche, pour la structure C, la longueur d'onde  $\lambda_3 = 1.7 \mu\text{m}$  montre une valeur de sensibilité S de 0.005 Ps/nm/km dans la simulation X.

Il est important de noter que les résultats changent lorsque l'eau est introduite dans la simulation. Pour la structure A, la longueur d'onde  $\lambda_1 = 1.5 \mu\text{m}$  maintient une valeur de sensibilité S, tandis que pour les structures B et C, il s'agit respectivement des longueurs d'onde  $\lambda_4 = 1.8 \mu\text{m}$ .

| $\lambda(\mu\text{m})$ | <i>Sélectionner la meilleure longueur d'onde pour minimiser la sensibilité</i> |                             |                             |
|------------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|
|                        | Structure A  | Structure B                 | Structure C                 |
| <i>Simulation X</i>    | $\lambda_1=1.5 \mu\text{m}$  | $\lambda_1=1.5 \mu\text{m}$ | $\lambda_3=1.7 \mu\text{m}$ |
| <i>Simulation Y</i>    | $\lambda_1=1.5 \mu\text{m}$  | $\lambda_4=1.8 \mu\text{m}$ | $\lambda_4=1.8 \mu\text{m}$ |

**Tableau III. 7:** Optimisation de la longueur d'onde pour minimiser la sensibilité des structures A, B et C

- En résumé

Cette étude met en avant la longueur d'onde  $\lambda_1 = 1.5 \mu\text{m}$  comme la plus prometteuse en termes de sensibilité S, en particulier pour les structures A et B. Les résultats attendus permettront d'optimiser la conception et l'utilisation de ces capteurs optiques dans des applications spécifiques.

La structure A se révèle être la plus performante, dépassant les structures B et C pour toutes les longueurs d'onde testées, avec ou sans présence d'eau. En particulier, elle présente la valeur minimale de sensibilité pour toutes les longueurs d'onde testées, ce qui signifie qu'elle est plus réactive aux changements dans les longueurs d'onde.

Les analyses montrent que la sensibilité du capteur est généralement minimale en l'absence d'eau par rapport à la présence d'eau. De plus, la sensibilité varie en fonction de la longueur d'onde, avec des valeurs distinctes pour chaque structure du capteur.

En résumé, la sensibilité du capteur est sensible au changement de longueur d'onde, mais avec une stabilité élevée. Cela rend ce capteur idéal pour la détection d'hémoglobine.

## 5 Conclusion

Lorsque le capteur est plus sensible, cela signifie qu'il est capable de détecter de plus petites variations ou changements dans les conditions environnementales ou les stimuli. Cela peut influencer positivement son efficacité en permettant une détection plus précise et fiable des signaux ou des données mesurées. Cette étude a permis d'analyser la sensibilité d'un capteur optique conçu pour détecter les variations d'hémoglobine (Hb) dans les tissus biologiques. L'hémoglobine étant un marqueur important de l'activité cérébrale et de l'oxygénation sanguine, ce type de capteur trouve de nombreuses applications en neurosciences, médecine et physiologie. Les résultats ont montré que la longueur d'onde  $\lambda_1 = 1.5 \mu\text{m}$  présente généralement la meilleure sensibilité pour les structures A et B du capteur.

Plus spécifiquement, ces résultats indiquent que la longueur d'onde  $\lambda_1 = 1.5 \mu\text{m}$  serait la plus adaptée pour détecter les variations d'hémoglobine avec ce type de capteur optique, en particulier pour les structures A et C. la structure B pourrait être plus efficace pour détecter des variations dans la concentration d'hémoglobine à différentes longueurs d'onde par rapport aux autres structures. Cela permettrait d'optimiser la conception et l'utilisation de ces capteurs pour des applications de spectroscopie proche infrarouge fonctionnelle (fNIRS), d'imagerie cérébrale et de mesure de l'oxygénation sanguine.

Le capteur d'hémoglobine est un dispositif utilisé pour détecter la présence d'hémoglobine dans un échantillon biologique. Il est couramment utilisé en médecine pour diagnostiquer des conditions telles que l'anémie, les maladies du sang et d'autres troubles médicaux liés à l'hémoglobine. La sensibilité d'un capteur d'hémoglobine est importante car elle détermine sa capacité à détecter de faibles concentrations d'hémoglobine dans un échantillon. Plus la sensibilité du capteur est élevée, plus il est capable de détecter des niveaux d'hémoglobine plus faibles avec précision. Ce type de capteur peut être utilisé dans divers domaines, notamment en médecine pour le diagnostic des maladies du sang, en biologie pour des études sur l'hémoglobine.

## 6 Bibliographie

- [1] L. a. Provino, Les fibres optiques microstructurées Photoniques ,65:47-50, 2013, pp. 47-50.
- [2] K. Saitoh et M. Koshiba, «'Numerical Modeling of Photonic Crystal Fibers',» *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. 11, n° %13580-3590, p. 23(11), 2005.
- [3] A. B. merkhi, *optimisation du confinement de la lumière dans des cavités a cristaux photoniques*, UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE DEPARTEMENT : these de Doctorat en-sciences en Électronique., 2012.
- [4] K. O. Halassa, Étude et Simulation de la Propagation des Ondes Électromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques, universite kasdi merbah ouargla,, 24/06/2018..
- [5] “. g. R. D. G. 2. E. B. O. N. 1. RSoft CAD 5.1.9.
- [6] M. B. S. Saoucha, *Cristaux photoniques pour la réalisation de capteur de basse pression*, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF M’SILA, 2017/2018.
- [7] J.P.Berenger, *Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves*, vol. vol.127, J.Comput.Phys,vol.127, p.363-379, 1996.
- [8] <http://dicoptic.fr/indice-de-refraction>. [Accès le 17 05 2024].
- [9] I. T. J. S. a. U. G. J. Phys. Chem. Ref. Data, «Refractive Index of Water and Its Dependence on Wavelength, Temperature, and Density,» *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol. 14 , n° %1933 , 1985.
- [10] E. K. T. G. H. A. S. H. G. K. R. a. J. V. O. Akowuah, «Numerical analysis of a photonic crystal fiber for biosensing applications,» *Journal of Quantum Electronics*, vol. 48, n° %111, 1403–1410, 2012.
- [11] <http://pv.meyne.free.fr/Capteur/Generalites.pdf>. [Accès le 18 05 2024].
- [12] b. u. g. Rsoft.

# Conclusion Générale

## **Conclusion Générale**

Ce travail de recherche a permis de concevoir et d'évaluer un capteur optique innovant basé sur une fibre micro-structurée, dédié à la mesure non-invasive du taux d'hémoglobine. Les résultats obtenus à travers les simulations numériques démontrent le potentiel de cette approche technologique pour des applications médicales nécessitant un suivi précis des paramètres sanguins.

L'utilisation de la fibre micro-structurée a permis d'exploiter ses propriétés optiques uniques afin d'optimiser la sensibilité et la précision du capteur. La méthode de simulation par propagation de faisceau (BPM) s'est avérée un outil puissant pour prédire le comportement de la lumière au sein de la fibre et évaluer les performances du capteur.

Les tests réalisés ont mis en évidence la capacité du capteur à détecter avec précision les variations du taux d'hémoglobine dans les échantillons testés. Cette performance ouvre la voie à de nombreuses applications cliniques telles que le suivi de la santé, le diagnostic précoce de certaines pathologies et le contrôle du traitement.

Par rapport aux méthodes de mesure conventionnelles, ce capteur à fibre optique présente des avantages significatifs en termes de compacité, de facilité d'utilisation et de faible coût. De plus, sa nature non-invasive en fait un outil particulièrement adapté pour un suivi continu et à long terme de l'état de santé des patients.

Les prochaines étapes de ce projet incluront l'optimisation de la conception de la fibre micro-structurée, l'intégration de fonctionnalités avancées et la validation expérimentale approfondie. Des travaux futurs viseront également à étendre cette technologie à la mesure d'autres paramètres sanguins importants, contribuant ainsi à l'amélioration des soins de santé.

En résumé, cette étude a démontré l'immense potentiel des capteurs à fibre optique à base de fibres micro-structurées pour des applications médicales de pointe. Les résultats obtenus ouvrent la voie à de nouvelles innovations dans le domaine de la surveillance et du diagnostic de la santé, offrant des perspectives encourageantes pour l'amélioration de la prise en charge des patients.