REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Électronique

Spécialité : Instrumentation

Les cristaux photoniques bidimensionnels avec microcavité pour les capteurs biochimiques ultracompacts

Présentés par :

OULD CHERCHALI Aya

SIMOHAMED Nouha

Proposés et Dirigés par :

Dr. BENSALAH Hocine

Promotion 2025

Remerciements

Louange à Dieu, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la santé, la patience et la persévérance pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à ***Monsieur BENSALAH HOCINE****, mon encadrant, pour son accompagnement constant, sa rigueur scientifique et ses conseils précieux tout au long de cette recherche. Sa disponibilité, son écoute attentive et sa bienveillance ont été d'un soutien inestimable dans la réalisation de ce mémoire.*

Je remercie vivement ***les membres du jury*** *pour avoir accepté d'évaluer ce travail, ainsi que pour l'intérêt qu'ils lui ont porté. Leurs remarques pertinentes et constructives seront pour moi une source d'enrichissement et d'amélioration continue.*

J'adresse également mes plus vifs remerciements aux ***invités*** *présents lors de la soutenance, dont la présence m'a particulièrement honorée. Leur participation témoigne de l'importance accordée à ce travail et me touche profondément.*

Enfin, je n'oublie pas toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, m'ont soutenue et encouragée tout au long de mon parcours universitaire.

Dédicace

Je dédie ce travail : ***à moi.***

À mon paradis, ma lumière éternelle : Ma mère, ma chère disparue*.*

Même loin de moi, tu restes au centre de ma vie.

Ce succès est à toi. Repose en paix.

Tu me manques chaque jour.

À ma force, ma lune, mon inspiration : Mon père Rachid.

Papa, Tu as été ma première source d'inspiration.

Grâce à toi, j'ai appris à ne jamais abandonner et à toujours croire en mes rêves.

Ce succès est le résultat de tout l'amour et les sacrifices que tu m'as offerts.

À mon homme de ma vie Abdou, Mon amour, mon partenaire.

Pour ton amour, ton soutien inconditionnel et ta présence à mes côtés dans chaque étape de ce parcours.

Ce succès, je le partage avec toi, car tu es une part essentielle de mon chemin.

À ma précieuse amie et binôme ***Nouha****, merci pour ta confiance, ta bonne humeur et ton engagement sans faille.*

À ma chère mère ***Malika****, ma chère tante* ***Hadjira****, mes sœurs* ***Abla*** *et* ***Feriel****, mon petit frère* ***Fateh****, ma belle-mère* ***Karima,*** *ainsi qu'à ma grand-mère bien-aimée.*

À mes amis, pour votre amitié fidèle et sincère.

A tous ceux que j'aime.

Aya

Dédicace

*À ma chère mère **Zoulikha**, source infinie de tendresse, de courage et de prières. Ton soutien inconditionnel a toujours été ma lumière dans les moments difficiles.*

*À la mémoire de mon père **Noureddine**, paix à ton âme. Ton souvenir me donne la force d'avancer chaque jour. Tu es toujours dans mon cœur.*

*À mes sœurs, **Safia** et **Rofaida**, pour leur affection, leurs encouragements et leur présence constante dans ma vie.*

*À mon frère **Ismail**, pour ses mots simples mais toujours réconfortants.*

*À ma meilleure amie **Aya**, ma confidente, ma sœur de cœur, merci pour ta présence, ton écoute et ton soutien sans faille.*

À tous mes amis, anciens et nouveaux, merci d'avoir été là, chacun à votre manière, pour vos encouragements, vos sourires et vos moments partagés

*Bien sur je dédie ce mémoire **à moi- même**.*

Nouha

الملخص

التجاويف المجهرية في البلورات الضوئية هي هياكل دقيقة قادرة على التحكم في الضوء بدقة عالية بفضل خصائصها البصرية الفريدة. يدرس هذا البحث دمجها مع دليل موجي لتطوير أجهزة استشعار حيوية بصرية مخصصة للكشف عن الجلوكوز والخلايا السرطانية. عند تفاعلها مع عينات بيولوجية، تؤدي هذه الهياكل إلى تغييرات قابلة للقياس في الخصائص البصرية مثل معامل الانكسار أو شدة الضوء المنقول. تُمكّن هذه التغيرات من الكشف السريع والحساس وغير الجراحي عن المؤشرات الحيوية المرتبطة بالجلوكوز أو بعض الأمراض السرطانية. يُعد هذا النهج، الذي يجمع بين الفوتونيك وتقنيات النانو، واعدًا لتطوير أدوات تشخيص مبتكرة ومتكيفة مع البيئات الطبية الحساسة

الكلمات المفتاحية : البلورات الضوئية، جهاز استشعار حيوي، الجلوكوز، الخلايا السرطانية، دليل موجي.

Abstract

Photonic crystal microcavities are microscopic structures capable of manipulating light with high precision due to their unique optical properties. This thesis investigates their integration with a waveguide to develop optical biosensors for the detection of glucose and cancer cells. When interacting with biological samples, these structures induce measurable changes in optical properties, such as refractive index or transmitted light intensity. These variations enable fast, sensitive, and non-invasive detection of biomarkers associated with glucose levels or cancerous conditions. This approach, at the intersection of photonics and nanotechnology, presents a promising pathway for the development of innovative diagnostic devices suitable for advanced medical settings.

Keywords: Photonic Crystals, Biosensor, Glucose, Cancer cells, Waveguide.

Résumé

Les microcavités à cristaux photoniques sont des structures microscopiques capables de manipuler la lumière avec une grande précision grâce à leurs propriétés optiques uniques. Ce mémoire étudie leur intégration avec un guide d'onde pour développer des biocapteurs optiques destinés à la détection du glucose et des cellules cancéreuses. En interaction avec des échantillons biologiques, ces structures induisent des variations mesurables des propriétés optiques, comme l'indice de réfraction ou l'intensité de la lumière transmise. Ces variations permettent une détection rapide, sensible et non invasive des biomarqueurs liés au glucose ou à certaines pathologies cancéreuses. Cette approche, à la croisée de la photonique et de la nanotechnologie, représente une piste prometteuse pour le développement de dispositifs de diagnostic innovants, adaptés notamment aux environnements médicaux exigeants.

Mots clés : Cristaux Photoniques, Biocapteur, Glucose, Cellules cancéreuses, Guide d'onde.

Liste des acronymes et abréviations

CP : Cristaux photonique.

BIP : Bande interdite photonique.

SOI : Silicium sur isolant.

TE : Transverse électrique.

TM : Transverse magnétique.

RIU : Unité d'indice de réfraction.

SERS : Diffusion Raman amplifiée en surface.

SPR : Résonance plasmonique de surface.

RI : Indice de réfraction.

Q : Facteur de qualité.

PWE : Plane Wave Expansion, (méthode de décomposition en ondes planes).

S : Sensibilité.

λ : Longueur d'onde.

FDTD: Méthode des différences finies dans le domaine temporel.

Sommaire

Remerciements.....I
Dédicaces..... II
Résumé..... III
Liste des acronymes et abréviations..... IV
Sommaire..... V
Liste des figures..... V
Liste des tableaux..... …..V
Introduction générale:.....1

CHAPITRE I : Aperçu des cristaux photoniques

I.1. Introduction :.....4
I.2. Les cristaux photoniques :.....4
I.2.1. Génése et développement de premiers cristaux photoniques :.....4
I.2.2. Définition d'un cristal photonique :.....6
I.3. Divers types de cristaux photoniques :.....6
I.3.1. Structures photoniques unidimensionnelles (1D):.....6
I.3.2. Structures photoniques bidimensionnelles (2D) :.....7
I.3.2.1. Types de structures 2D :.....8
I.3.3. Cristaux photoniques tridimensionnels (3D) :.....9
I.4. Propriétés physiques et géométriques des CP :.....10
I.4.1. Contraste d'indication :.....10
I.4.2. Facteur d'empilement :.....10
I.4.3. La période :.....10
I.5. Principe des bandes photoniques :.....11
I.5.1. La première zone de Brillouin :.....11
I.5.2. Bande interdite photonique - Méthode d'expansion des ondes planes :.....12
I.5.3 Diagrammes de bandes :.....12
I.6. Couplage de la lumière avec les modes d'un cristal photonique :.....13
I.7. Les imperfections dans les cristaux photoniques 2D :.....15
I.7.1. Défauts ponctuels :.....15
I.7.2. Défauts étendus :.....15
I.8. Cavités à structure des CP :.....16
I.8.1.1. Cavité hexagonale :.....16
I.8.1.2. Cavité linéique :.....17
I.8.1.3. Cavité Carrée :.....18
I.8.1.4. Cavité triangulaire :.....18
I.9. Guides d'ondes dans les cristaux photoniques:.....19
I.10. Composants semi-conducteurs à cristal photonique 2D :.....20
I.11. Usage des cristaux photoniques:.....21
I.12. Conclusion :.....21

CHAPITRE II : Les bases des capteurs

II.1. Introduction : 23
II.2. Principes généraux des capteurs : 23
II.2.1. Définition d'un capteur: 24
II.2.2. Classification des capteurs : 24
II.2.3. Chaine de mesure : 24
II.2.4. Grandeur d'influence : 25
II.2.5. Utilité du capteur : 25
II.2.6. Types des capteurs : 26
II.2.6.1. Capteurs actifs : 26
II.2.6.2. Capteurs passifs : 26
II.2.6.3. Les biocapteurs : 27
II.2.7. Caractéristiques des capteurs : 28
II.2.7.1. La sensibilité : 28
II.2.7.2. L'étalonnage : 28
II.2.7.3. La rapidité : 28
II.2.7.4. La fidélité : 29
II.2.7.5. La précision : 29
II.2.7.6. La linéarité: 29
II.3. Capteur optique : 29
II.3.1. Biocapteur optique : 30
II.3.2. Capteurs à fibre optique : 30
II.3.3.Capteurs à cristaux photoniques : 31
II.4. État de l'art des biocapteurs à cristaux photoniques : 32
II.5. Capteur l'indice de réfraction(RI) à base de CPs : 34
II.5.1. Capteurs RI à base des guides ondes à CP : 35
II.5.2. Capteurs RI à base de microcavités résonantes à CP : 35
II.5.3. Capteur RI utilisant des réseaux de Bragg à base de cristaux photoniques : 36
II.6. Conclusion : 37

CHAPITRE III : Simulations : méthodes, outils, résultats et analyses

III.1. Introduction : 39
III.2. Méthodes de simulations : 39
III.2.1. La méthode des ondes planes (PWE) : 39
III.2.2. La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) : 40
III.3. présentation de Rsoft CAD : 40
III.3.1. Le simulateur « BandSOLVE » : 41
III.3.2. Le simulateur «FullWAVE» : 42
III.3.3. Présentation des autres applications : 43
III.4. Présentation de la structure de base : 44

III.4.1. Paramètres de la structure étudiée : 45
III.4.2. Diagramme de bande interdite photonique : 45
III.5. Guide d'onde sans cavité : 46
III.6 Guide d'onde avec cavité hexagonale irrégulière : 48
III.6.1. Description de la première structure étudiée (biocapteur 1) : 49
III.6.2. Etude de la transmission et de la sensibilité : 49
III.6.3. Etude de la résonance de la cavité en fonction d'indices de réfraction : 51
III.7. Guide d'onde avec une cavité hexagonale irrégulière en configuration anneau et trous : 52
III.7.1. Description de la deuxième structure étudiée (Biocapteur 2): 53
III.7.2. Etude de la transmission et de la sensibilité : 53
III.7.3.Influence d'un rayon de trou ($r1$) sur la sensibilité du Biocapteur : 56
III.8. Exemple d'application : 57
III.8.1. Biocapteur de glucose: 59
III.8.2. Biocapteur des cellules cancéreuses : 59
III.9. Comparaison du biocapteur RI proposé avec différents designs à bases CPs : 60
III.10. Conclusion : 61
Conclusion générale : 63
Bibliographie 65

Liste des figures

CHAPITRE I : Aperçu des cristaux photoniques

Figure I.1:Schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un milieu diélectrique périodique fini. 7
Figure I.2:structures bidimensionnelles:(a) connectée n1< n2 (b) déconnectée n1>n2 9
Figure I.3:La première structure BIP 3D. 10
Figure I.4:Période d'un cristal photonique unidimensionnel. 11
Figure I.5:Représentation de zone de Brillouin irréductible : (a) réseau triangulaire, (b) réseau carré, (c) réseau hexagonal. 12
Figure I.6: Diagramme de bande d'énergie en mode guidé par cristal photonique sur membrane (Calcul 3D) Réseau triangulaire de pores et facteur de remplissage 50%. Les modes pairs (courbe bleue) présentent différentes bandes interdites avec des différences de mode Nombres impairs (courbe noire). La zone bleue représente le cône de lumière 13
Figure I.7:Schémas de cristaux photoniques 1D et 2D membranaires. 14
Figure I.8:Diagramme de dispersion schématique d'un cristal photonique représenté dans la première zone de Brillouin (période du CP notée a) et pour k//>0. 14
Figure I.9:Défauts ponctuels : a) Modification de la permittivité d'une tige (il vaut mieux faire la tige centrale en rouge) b) Absence de la tige centrale 15
Figure I.10:Propagation du champ dans un guide virage. 16
Figure I.11:Illustration d'une cavité au sein d'un cristal photonique hexagonal comportant des trous d'air. Cette cavité présente un mode monopolaire, ce qui signifie qu'il n'est pas dégénéré . 17
Figure I.12:Exemples de cavités de types Ln : (a) cavité L3, (b) cavité L5, (c) cavité L7. 18
Figure I.13:Illustration d'une cavité carrée au sein d'un cristal photonique à réseau carré. 18
Figure I.14:Cavités résonnantes au sein de cristaux photoniques à réseau triangulaire. a) Cavité L1. b) Cavité L3 19

Figure I.15:Onde mono-rangée réalisé dans un cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant. 20

CHAPITRE II : Les bases des capteurs

FigureII.1 :Présentation d'un capteur..... 24
Figure II.2:Établissement d'une chaîne de mesure traditionnelle..... 25
Figure II.3:Courbe d'étalonnage d'un capteur. 28
Figure II.4:Opticalbiosensor. 30
FigureII.5:Schéma de (a) PCF à noyau plein, (b) PCF à noyau creux et (c) SMF conventionnel 31
Figure II.6:(a) Photographie par microscopie électronique à balayage d'un dispositif typique (biocapteur à base de cavité à CP). b) Réponses du capteur 33
Figure II.7:a) Image MEB de la cavité à base de CP avec vue agrandie des deux sections pertinentes de la fente. b) Spectre de transmission du mode cavité avec Q = 50 000..... 33
Figure II.8:a) Détection de surface et (b) détection homogène. Les molécules sondes (bleues) sont déposées à la surface des trous et les molécules cibles (rouges) sont capturées par des récepteurs formant une couche à la surface du capteur 34
Figure II.9:Schéma du capteur à guide d'ondes à cristal photonique (PCW) sur SOI2. 35
Figure II.10:(a) Vue au microscope électronique à balayage d'une microcavité à cristal photonique intégrée avec deux guides d'ondes ruban (b) Spectres de transmission normalisés de la microcavité montrée en (a) avec cinq différents indices de réfraction (variant de n=1.446 à n = 1.454)..... 36

CHAPITRE III : Simulations : méthodes, outils, résultats et analyses

Figure III.1:Interface graphique du logiciel Rsoft. 41
Figure III.2:La fenêtre de simulation BandSOLVE 42
Figure III.3:La fenêtre des paramètres de simulation FullWave où les paramètres de base de simulations numériques sont entrés..... 43
Figure III.4:Structure du cristal photonique formé par un réseau Hexagonal 17×17 44
Figure III.5:: Distribution de l'indice de réfraction d'un cristal photonique hexagonal. 44
Figure III.6:(a) Diagramme de dispersion du CP-2D dans la membrane Si (un réseau hexagonal de trous d'air, a=0.55 µm, R=0.209 µm, f=38%.) calculé par la PWE. (b) la présentation du spectre de transmission calculé par la FDTD-2D..... 46
Figure III.7:Structure 2D avec un défaut de ligne (guide d'onde). 47
Figure III.8:(a) Spectre de transmission guide droit référence W1 en mode TM. (b) Distribution spatiale du champ à la suite d'une simulation de type FDTD et une excitation de type CW du guide droit référence W1, pour une polarisation TM à λ=1.55µm. 48
Figure III.9:Structure d'un couplage cavité/guide (1ere structure)..... 49
Figure III.10:(a) Spectre de transmission de la structure couplage cavité/guide pour n=1. La distribution du champ magnétique dans la cavité dans le plan x-z à λmode(1)=1.9227µm (b), λmode(2)=1.7337µm (c) et λmode(3)=1.5094µm (d). 50
Figure III.11:(a) Le spectre de transmission de la structure pour différents indices de réfraction n à R=209nm et a= 550 nm. (b) la longueur d'onde de résonance en fonction de l'indice de réfraction n du matériau à détecter. 51
Figure III.12:Structure d'un couplage cavité/guide : (a) avec un anneau dans la cavité centrale, (b) avec un trou dans la cavité centrale (R=209 nm, r=160 nm, r1=140 nm et a= 550 nm). 52
Figure III.13:(a) Spectre de transmission de la structure couplage cavité/guide (sans un anneau dans la cavité centrale, avec un anneau dans la cavité centrale, avec un trou dans la cavité centrale pour n=1. La distribution du champ magnétique dans la structure avec un trou dans la cavité centrale dans le plan x-z à λmode(2) =1.775µm **(b),** λmode(1) =1.670µm **(c)** 54
Figure III.14:Le spectre de transmission de la structure avec un trou dans la cavité centrale pour différents indices de réfraction n à R=209 nm, r1=140 nm et a= 550 nm..... 55
Figure III.15:Le spectre de transmission de la structure avec un trou dans la cavité centrale en fonction de r1 pour n=1..... 56

Figure III.16:La sensibilité en fonction du rayon r1. 57
Figure III.17:Spectres de transmission correspondant à la variation de la longueur d'onde de résonance en fonction des différents cas de concentrations en glucose..... 58
Figure III.18;Spectres de transmission correspondant à la variation de la longueur d'onde de résonance en fonction des différents types de cellules cancéreuses 60

Liste des tableaux :

CHAPITRE II : Les bases des capteurs

Tableau II.1:Capteurs actifs : principes physiques de base..... 26
Tableau II.2:Capteurs passifs : principes physiques et matériaux 27

CHAPITRE III : Simulations : méthodes, outils, résultats et analyses

Tableau III.1:la sensibilité (S) de la première structure en mode 1, mode 2 et mode 3 en fonction de l'indice de réfraction (RI). 52
Tableau III.2: la sensibilité (S) de la structure avec un trou dans la cavité centrale en mode 1 et mode 2 en fonction de l'indice de réfraction (RI). 55
Tableau III.3:la sensibilité (S) de la deuxième structure en mode 1 et mode 2 en fonction du rayon intérieur de l'anneau (r1). 57
Tableau III.4: Certains types de cancer et leur Ri [76,77]. 59
Tableau III.5:Sensibilité du biocapteur optimisé pour différents type de cellule 60
Tableau III.6:Comparaison du biocapteur RI proposé avec différents designs à bases CPs..... 61

Introduction générale

Introduction générale:

Au cours des dernières années, les progrès technologiques ont conduit à la création de dispositifs optiques de plus en plus efficaces, satisfaisant les exigences croissantes de l'industrie dans plusieurs secteurs, en particulier la photonique. Parmi les stratégies novatrices, les cristaux photoniques (PhCs) se distinguent comme une option prometteuse en raison de leur aptitude à contrôler la lumière à des échelles nanométriques.

Les cristaux photoniques constituent des structures périodiques dont l'indice de réfraction varie en fonction d'une, deux ou trois dimensions. Cette périodicité crée des bandes photoniques d'états autorisés et des bandes interdites photoniques (BIP), similaires aux bandes d'énergie observées dans les cristaux électroniques. Une BIP bloque la propagation de la lumière dans certaines directions au sein du cristal, permettant ainsi un contrôle précis des propriétés optiques, ce qui ouvre la voie à diverses applications telles que les filtres, les capteurs, les multiplexeurs, les microcavités et les guides d'ondes.

La conception de structures utilisant des cristaux photoniques, en particulier en silicium et en technologie SOI (Silicon On Insulator), favorise leur incorporation dans des circuits optiques intégrés à faible coût. Les cristaux photoniques bidimensionnels (CP-2D) présentent un intérêt particulier pour ces applications en raison de leur adéquation avec les méthodes de fabrication de la microélectronique.

Un domaine de recherche particulièrement dynamique porte sur l'application des cristaux photoniques en tant que capteurs optiques. Grâce à leur miniaturisation avancée, leur sensibilité spectrale remarquable et leur intégrabilité dans des systèmes MEMS, les capteurs fondés sur des cristaux photoniques bidimensionnels sont en mesure de détecter des variations minimes de l'indice de réfraction. Cela ouvre la voie à la conception de capteurs efficaces pour une multitude d'applications, telles que la détection du glucose, le diagnostic du paludisme et la détection précoce du cancer. Dans ce cadre, ce mémoire se concentre sur l'étude, la conception et la simulation de capteurs optiques reposant sur des cristaux photoniques 2D, en mettant l'accent sur des structures intégrant des microcavités couplées à des guides d'ondes. L'objectif est de créer des dispositifs capables de détecter

des bio marqueurs avec une sensibilité accrue, en optimisant la bande interdite photonique et le facteur de qualité.

Ce document est organisé en trois sections :

- La première section traite des bases des cristaux photoniques, incluant leurs définitions, catégories, propriétés essentielles, ainsi que les notions relatives aux bandes interdites photoniques.

- La deuxième section se concentre sur les capteurs optiques, en expliquant leurs mécanismes de fonctionnement, leur typologie, et en mettant l'accent sur les biocapteurs utilisant des cristaux photoniques, notamment ceux qui reposent sur l'indice de réfraction.

- La troisième section est dédiée aux techniques de modélisation numérique, telles que la méthode des ondes planes (PWE) et la méthode des différences finies dans le temps (FDTD), ainsi qu'aux outils logiciels employés pour la simulation (comme RSoft). Nous y présentons les conceptions élaborées et examinons les performances des structures proposées, dans le but d'améliorer la sensibilité et la sélectivité du capteur. Ce mémoire a pour objectif de démontrer l'efficacité des cristaux photoniques en tant que support de détection optique de haute performance, en explorant leur potentiel pour des applications dans les domaines biomédical et environnemental.

CHAPITRE I :

Aperçu des cristaux photoniques

I.1. Introduction :

Les dernières décennies ont vu d'énormes progrès en nanotechnologie, permettant la fabrication de structures périodiques précises connues sous le nom de cristaux photoniques; Ce sont des matériaux artificiels avec un indice de réfraction qui change périodiquement à une échelle approchant la longueur d'onde de la lumière. Cette structure périodique donne lieu à des bandes de fréquences dans lesquelles la propagation des photons est empêchée, connues sous le nom de bandes photoniques interdites (PBG - Photonic Band Gaps). Ce phénomène est similaire à l'effet du potentiel périodique sur le mouvement des électrons dans les cristaux solides.

Les cristaux photoniques sont un élément essentiel dans le domaine du photonique moderne, car ils permettent un contrôle précis de la direction et du confinement de la lumière, ouvrant ainsi de larges horizons pour le développement de dispositifs optiques compacts tels que les guides d'ondes, les résonateurs et les filtres spectraux. Ces structures varient selon les dimensions dans lesquelles se produit le changement cyclique (unidimensionnel, bimodal ou tridimensionnel), et chaque type a des caractéristiques et des applications spécifiques.

Ce chapitre vise à fournir les fondements théoriques pour comprendre le travail des cristaux photoniques, en passant en revue des concepts de base tels que bandes interdites, structures de bande, diffusion, en plus des différents types de cristaux photoniques, notamment ceux bidimensionnels(2D).

Les principes régissant l'orientation de la lumière à l'intérieur de ces structures, ainsi que les différents types de guides de lumière et de cavités pouvant être réalisés à l'aide de ceux-ci, seront également abordés, ainsi qu'un aperçu de leurs méthodes de fabrication et de caractérisation.

I.2. Les cristaux photoniques :

I.2.1. Génése et développement de premiers cristaux photoniques :

Plus de vingt ans se sont écoulés depuis que l'analogie entre la physique à l'état solide et l'optique; a conduit au concept des cristaux photoniques (PC) (Yablonovitch, 1987) [23], [1].

Les progrès rapides de la théorie et des applications des PC ont été stimulés dans une large mesure par leurs propriétés uniques qui permettent d'augmenter le potentiel du contrôle de la lumière. Les dalles de PC ont été principalement étudiées dans le cas d'interfaces virtuelles linéaires et d'un treillis non curviligne. Une riche variété de phénomènes physiques fascinants a été démontrée pour ces structures, qui comprennent l'Ultra Prisme, l'imagerie des sous-longueurs d'onde, la focalisation, la collimation et la réfraction négative avec ou sans comportement gaucher (Inoue&Ohtaka, 2004; Luo, 2002) [24], [25]. Elles apparaissent toutes en utilisant uniquement des métaux et diélectriques isotropes linéaires conventionnels en raison de la dispersion spécifique des ondes de Floquet-Bloch dans les PC, ce qui n'est pas possible pour les pièces solides des mêmes matériaux. La rupture de la périodicité dans les PC entraîne l'apparition de modes défectueux, qui se manifestent dans les régimes de transmission et de guide d'ondes (Joannopoulos, 1995) [26], [1].

D'autre part, les ordinateurs personnels avec des interfaces virtuelles curvilignes mais un treillis linéaire ont été étudiés dans le contexte d'applications telles que les lentilles plan-concaves (Gralak, 2000; Vodo, 2005)[27], [28], les miroirs (Saado, 2005)[29] et les diviseurs (Wu, 2005)[30]. On connaît aussi des PC ayant à la fois des interfaces curvilignes et un réseau, par exemple les PC coaxiaux (Schleuer&Yariv, 2004)[31] et les résonateurs atoll (Nojima,2007)[32] .De nouveaux régimes d'opération peuvent être obtenus grâce à la fusion des effets de dispersion et de diffraction, par exemple dans les PC bidimensionnels. Au milieu des années 2000, les PC avec les interfaces ondulées ont été proposés pour rediriger les ondes réfléchies vers les directions latérales (Collardey, 2005)[33] , obtenir un ordre inhabituel des longueurs d'onde de coupure pour des ordres de diffraction plus élevés (Serebryannikov, 2006)[34], et réaliser un nouveau mécanisme de réfraction négative dû aux faisceaux réfractés umklapp (Lu, 2007)[35][1].

Plus tard, les PC avec des interfaces ondulées ont été appelés réseaux de cristaux photoniques (PCGs) (Serebryannikov, 2009)[36]. Une forte asymétrie de transmission a été démontrée dans les GPC diélectriques bidimensionnels théoriquement (Serebryannikov, 2009)[37] et dans l'expérience des micro-ondes (Cakmak, 2010)[38] . Récemment, un effet similaire a été étudié dans les cristaux photoniques bidimensionnels (Li, 2011)[39], [1].

Les structures avec une interface ondulée et un guide d'ondes en mode défaut, qui est perpendiculaire à l'interface, ont été utilisées pour obtenir la poutre, qui est liée à l'excitation des ondes de surface due à ondulations (Caglayan, 2008; Smigaj, 2007) [40], [41], [1].

Une structure excitée par un guide d'ondes en mode défaut situé le long des interfaces virtuelles du PC non ondulé correspondant a été proposée (Le Thomas, 2007) [42], où les ondulations fournissent un couplage d'un mode défaut autrement découplé à une onde sortant dans l'air [1].

I.2.2. Définition d'un cristal photonique :

Les cristaux photoniques sont des structures artificielles qui sont également des matériaux isolants ou diélectriques pour les métaux, avec un ajustement périodique de leur indice de réfraction le long de la longueur d'onde. Cette périodicité empêche les photons de se propager dans une certaine gamme spectrale connue sous le nom de bande interdite photonique(BIP) [2].

I.3. Divers types de cristaux photoniques :

I.3.1. Structures photoniques unidimensionnelles (1D) :

Les structures photoniques unidimensionnelles, planaires ou en courbes ; sont fréquentes dans la nature. Les insectes, en particulier, ont fréquemment développé ce type de structure dans le but de la coloration, dans le cadre de stratégies de signalisation ou de camouflage. La raison peut être que le processus de fabrication de la partie extérieure d'une cuticule par les cellules épidermiques, couche par couche, est compatible avec la formation de telles structures, même si nous ne pouvons prétendre pour l'instant que ces mécanismes ont été compris dans tous les détails [1].

De nombreux cas différents de cristaux photoniques unidimensionnels ont été observés dans les animaux, peut-être parce que c'est la façon la plus directe de produire une couleur métallique et/ou iridescente et, ainsi, d'améliorer des fonctions spécifiques intra ou interspécifiques. Nous examinerons essentiellement deux cas de conceptions physiques : le film monocouche et les miroirs de Bragg [1].

Le multicouche est le type de structure irisée le plus courant chez les coléoptères et il est également très fréquent chez les papillons (Kinoshita et al, 2008; Noyes et al, 2007; Parker et al, 1998) [44], [45], [46]. Dans plusieurs des cas, ces multicouches sont composées de couches alternées de chitine et d'air partiellement remplies d'un composé chitineux. Cela

produit une bicouche haute/basse. Les interférences constructives entre la lumière réfléchie par différentes couches produisent une ou plusieurs couleurs. La longueur d'onde réfléchie dominante peut être déterminée par les épaisseurs des couches et indice de réfraction moyen .Les longueurs d'onde qui ne sont pas réfléchies sont transmises et le spectre de transmission est le complément exact de la réflexion si le système est considéré comme non absorbant. La couleur résultant d'un multicouche varie également en fonction de l'angle d'observation. À mesure que l'angle de réflexion augmente (en partant de la normale), la couleur se déplace vers des longueurs d'onde plus basses (décalage bleu).

Les réflecteurs peuvent être épicuticulaires (comme chez les cicindèles ou certains chrysomélidés) (Ku rachi, 2002) [47], tandis que d'autres sont endocuticulaires (Hinton, 1973)[48][1].

L'irisation des plumes d'oiseaux provient parfois d'une structure unidimensionnelle. Elles sont situées dans les barbules, comme chez le jardinier satiné Ptilonorhynchus violaceus minor, qui présente une irisation violette à noire provenant d'une seule couche de kératine sur une couche de mélanine (Doucet, 2006)[49]. Chez l'étourneau sansonnet Sturnus vulgaris, plusieurs couches de kératine et de mélanine donnent une irisation vert bleu (Cuthill et al, 1999, Doucet et al, 2006) [49], [50].

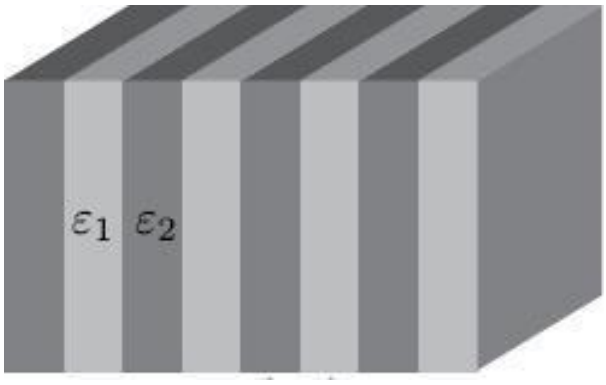


Figure I.1: *Schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un milieu diélectrique périodique fini.*

I.3.2. Structures photoniques bidimensionnelles (2D) :

Dans les structures photoniques bidimensionnelles, on n'observe qu'une invariance transrationnelle totale dans une dimension, les deux autres dimensions sont structurées par des inhomogénéités d'indice de réfraction. Nous inclurons les grilles dans cette catégorie, en plus

des cristaux photoniques fibreux, tous deux étant rencontrés dans la nature et capables de sélectionner la réflectance bleue [1].

En fait, les cristaux photoniques fibreux peuvent être considérés comme une combinaison d'une grille et d'un multicouche. Du point de vue de la symétrie, on peut considérer un cristal photonique 2D comme totalement invariant dans les directions « fibres » et périodique dans deux directions perpendiculaires aux fibres. Définissant la surface parallèle aux fibres, ces deux directions sont adéquatement définies comme le plan de surface et la direction de la normale. La périodicité parallèle à la surface produit une diffraction similaire à celle produite par un réseau, tandis que la périodicité le long de la normale, en profondeur sous la surface, produit une sélection de couleurs avec un miroir de Bragg. Étant une combinaison des deux, un cristal photonique 2D a tendance à être plus flexible qu'une grille ou un miroir de Bragg pour produire une couleur comme le bleu. Comme expliqué ci-dessous, une grille à courte période cessera de diffracter car son inhomogénéité latérale associée est inférieure à la plus courte longueur d'onde visible. Pour cette longueur d'onde et plus, la grille agira comme un matériau moyen homogène qui ne peut générer qu'une réflexion spéculaire. Cependant, avec un cristal photonique 2D, la périodicité « normale » peut encore être présente pour produire une sélection de couleurs. Si, à l'autre extrême, la périodicité normale est limitée par de faibles contrastes d'indice de réfraction ou une épaisseur de film serrée, le miroir de Bragg ne sera pas efficace, mais la grille latérale peut prendre le dessus et parvient tout de même à produire du bleu. De plus, des mécanismes intermédiaires – moins facilement décrits – impliquant simultanément une diffraction et une sélection de couleur d'interférence, ajoutent de nouveaux canaux pour produire du bleu [1].

I.3.2.1. Types de structures 2D :

Les cristaux photoniques bidimensionnels se composent d'une chaîne diffuse de trous d'air percés à cause d'un mobilier diélectrique (grandeur connectée), et d'un cliché de soutènements diélectriques à cause de l'air (grandeur déconnectée). Il existe un époussetage hommes de structures quotidiennes diélectriques.

Les structures dites « connectées » (cf. section I.2.a sur les lanières), dans lesquelles les motifs élémentaires possèdent une propriété comparable à celle d'un liquide diélectrique; sont caractérisée par un indice de réfraction plus faible ($n_1 < n_2$).

Les structures dites « déconnectées » (lanièreI.2.b) sont caractérisées par des motifs premiers vases un diplôme n_1 vaporeux à celui-là de l'afflux inter-motifs, matricule n_2. Elles sont composées de tiges diélectriques ou métalliques alignées de façon diffuse à cause de l'air ou à cause de la mousse [3].

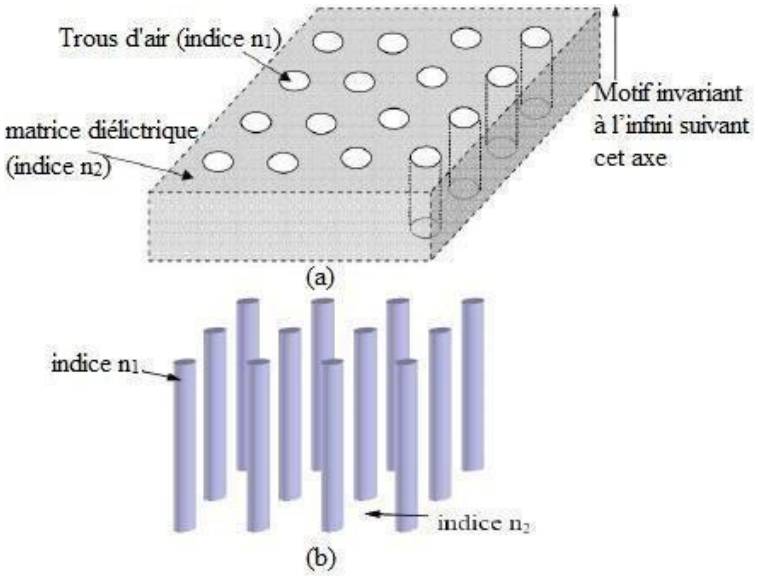


Figure I.2 : *structures bidimensionnelles:(a) connectée $n_1 < n_2$ (b) déconnectée $n_1 > n_2$*

I.3.3. Cristaux photoniques tridimensionnels (3D) :

On trouve également des cristaux photoniques tridimensionnels dans la nature, en particulier chez les papillons, les coléoptères et les longhorns. Compte tenu de la très grande diversité des organismes vivants et de la fréquence des couleurs structurelles, on peut spéculer que d'autres familles d'insectes vont bientôt révéler une évolution similaire. Les cristaux photoniques tridimensionnels sont périodiques dans les trois dimensions de l'espace. Éclairée par la lumière blanche dans une direction bien définie, une structure idéale produit plusieurs faisceaux colorés, chacun correspondant à une pile de plans réticulaires avec son espacement approprié. Un bon exemple de l'effet visuel produit par un cristal photonique idéal est fourni par le « diamant » brésilien, qui affiche une couleur verte lorsqu'il est vu à distance, mais sous un microscope optique, montre des échelles individuelles avec une variété de très saturés (pures) couleurs. La plupart des autres coléoptères et longhorns montrent moins d'iridescentes, et c'est généralement expliqué en termes de désordre d'orientation : les cristaux photoniques tridimensionnels naturels apparaissent le plus souvent sous la forme de poly cristaux photoniques, avec des domaines bien définis apportant un ordre à courte portée et un désordre d'orientation à longue portée [1].

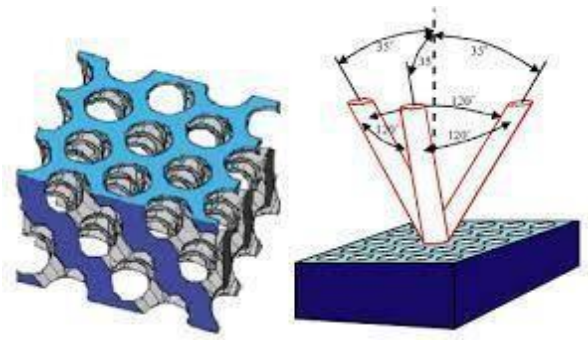


Figure I.3 : *La première structure BIP 3D.*

I.4. Propriétés physiques et géométriques des CP :

I.4.1. Contraste d'indication :

On définit ce paramètre comme le rapport entre les indices de réfraction de la brique et de la matrice. Il donne un aperçu général du pouvoir de diffusion des deux matériaux constitutifs du PC [4].

I.4.2. Facteur d'empilement :

Il peut être comparé à la largeur du potentiel périodique. S'il est pris pour le matériau de haut indice par exemple, il est définit comme le rapport entre le volume occupé par ce matériau dans la cellule élémentaire du cristal et le volume de la cellule de cette dernière [5].

$$\boldsymbol{F = \pi \left(\frac{r}{a}\right)^2} \text{..... ……..... (I.1)}$$

I.4.3. La période :

Dans un cristal photonique bidimensionnel, la période (a) est représentée e par :

$$a = a_1 + a_2 \text{..... (I.2)}$$

a_1 rebrousse-poil est la pointure de la multitude de permittivités ε_1

a_2 est la pointure de la multitude de permittivités ε_2.

Il faut transcrire que l'abrégé de polyèdre et la permittivité sont reliés par la relation :

$$\boldsymbol{N = \sqrt{\varepsilon}} \text{…..... (I.3)}$$

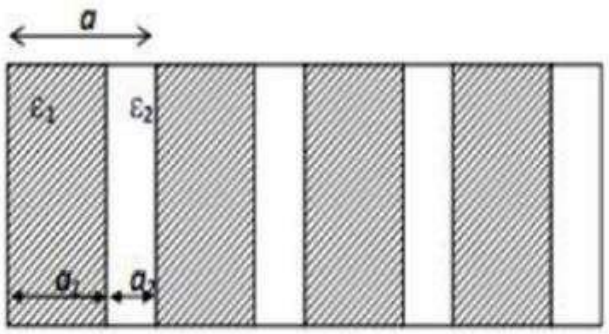


Figure I.4 *: Période d'un cristal photonique unidimensionnel.*

I.5. Principe des bandes photoniques :

I.5.1. La première zone de Brillouin :

La première zone de Brillouin est la cellule élémentaire de l'espace réciproque où les points sont plus proches de l'origine que tous les autres nœuds du réseau périodique [14]. Si on utilise un matériau isotrope dans le plan on peut encore réduire cette zone aux parties encadrées en bleu sur la figure I.5. Ces zones réduites sont appelées zones de Brillouin irréductibles. Sur les figures on a noté les points critiques, points de haute symétrie représentant un intérêt particulier, par leur position stratégique aux sommets des zones de Brillouin irréductibles. Ces travaux ont été établis en travaillant sur la physique du solide, mais ils peuvent faire référence à tout système périodique dans lequel se propage une onde, comme par exemple dans le domaine des cristaux photoniques. Nous présentons sur la figure I.5., la zone de Brillouin irréductible de plusieurs types de réseaux : réseau carré, réseau triangulaire et réseau hexagonal. La zone de Brillouin irréductible correspond à un triangle dont les sommets sont les points de haute symétrie de l'espace réciproqueΓ, M et K. L'étude de la propagation peut se limiter aux vecteurs k compris dans cette zone, le reste de la première zone de Brillouin étant identique par symétrie. Pour définir la structure de bande du cristal photonique correspondant à ce réseau, on représentera la variation de fréquence des différents modes propres en fonction du module du vecteur d'onde le long des directions de haute symétrieΓM, ΓK et KM [43].

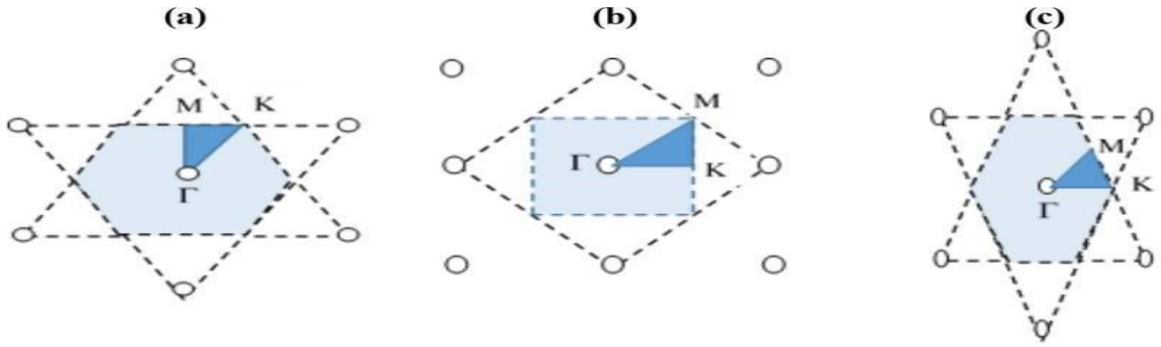


Figure I.5*: Représentation de zone de Brillouin irréductible : (a) réseau triangulaire, (b) réseau carré, (c) réseau hexagonal.*

I.5.2. Bande interdite photonique - Méthode d'expansion des ondes planes :

Les cristaux photoniques ont un écart de bande photonique, qui est l'écart entre la ligne d'air et la ligne diélectrique dans la relation de dispersion du PhC. Les cristaux photoniques interdisent la propagation de la gamme de fréquences dans l'écart de bande, et permettent la propagation d'autres fréquences avec une faible perte. Le diagramme de bande photonique donne des informations sur les caractéristiques de dispersion w (k) pour le mode Eigen du PhC [1].

La méthode de l'expansion des ondes planaires (PWE) peut être utilisée pour calculer la structure de la bande en utilisant une formulation propre des équations de Maxwell, et ainsi résoudre les fréquences propres pour chacune des directions de propagation des vecteurs d'ondes (Igor A. Sukhoivanov & Igor V. Guryev, 2009)[51]. Les équations de Helmholtz pour la polarisation TE et TM peuvent être dérivées des équations fondamentales de Maxwell.

I.5.3 Diagrammes de bandes :

N'importe quel cristal photonique est caractérisé par son diagramme de bande. Pour calculer les diagrammes de bandes, il faut considérer pour chaque cristal toutes les directions de propagation possibles. Comme en physique du solide [6], on montre que pour certaines symétries du cristal, on peut limiter l'étude aux vecteurs d'ondes k situés à l'intérieur d'une zone restreinte appelée zone de Brillouin irréductible. Le vecteur k varie le long des directions de hautes symétries de cette zone qui fait partie du réseau réciproque. Le Diagramme de bandes des modes guidés du cristal photonique sur membrane (calcul 3D) est effectué pour un

réseau triangulaire de trous d'air et un facteur de remplissage de 50% (figure I.6). L'épaisseur du guide d'onde est un paramètre crucial pour appréhender les caractéristiques de dispersion d'une structure donnée. La prise en compte de l'épaisseur nécessite en toute rigueur un vrai calcul 3D [7]. Nous présentons le résultat d'un calcul onde plane 3D en configuration guide d'onde

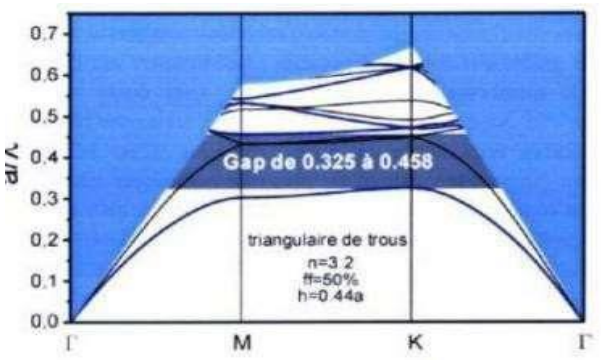


Figure I.6 : *Diagramme de bande d'énergie en mode guidé par cristal photonique sur membrane (Calcul 3D) Réseau triangulaire de pores et facteur de remplissage 50%. Les modes pairs (courbe bleue) présentent différentes bandes interdites avec des différences de mode Nombres impairs (courbe noire). La zone bleue représente le cône de lumière [8].*

I.6. Couplage de la lumière avec les modes d'un cristal photonique :

Nous devons d'abord définir le terme « cristal photonique » avant d'examiner le diagramme de bande d'un cristal photonique. Il s'agit en général des milieux diélectriques structurés dont la permittivité est modulée périodiquement selon une, deux ou trois directions. En pratique, la plupart des structures à CP sont réalisées au sein d'une couche mince d'indice de réfraction élevé et ayant une épaisseur de l'ordre de la longueur d'onde. Il est donc préférable d'employer le terme de « cristal photonique membranaire », qui correspond à un CP intégré au sein d'un guide d'onde plan, ce qui permet un confinement réfractif de la lumière dans l'épaisseur de la couche. Le contrôle latéral de la lumière est assuré par un effet diffractif dans une ou deux directions de l'espace, selon le type de structuration considéré (voir figure I. 7) [9].

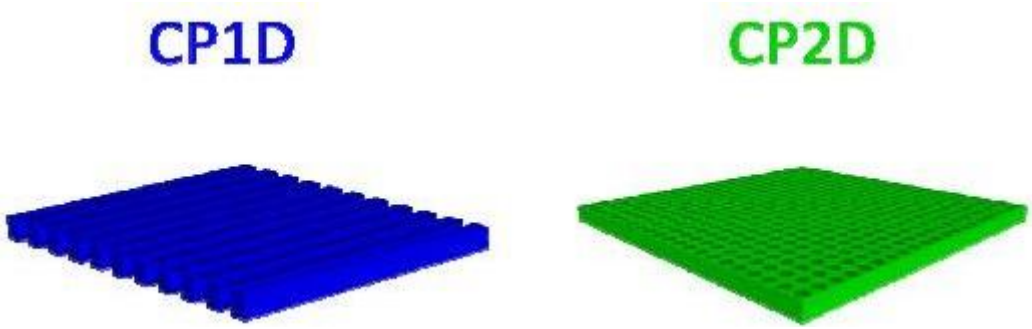


Figure I.7 : *Schémas de cristaux photoniques 1D et 2D membranaires.*

Le diagramme de bande d'un cristal photonique est illustré dans la figure I. 8 pour la première zone Brillouin

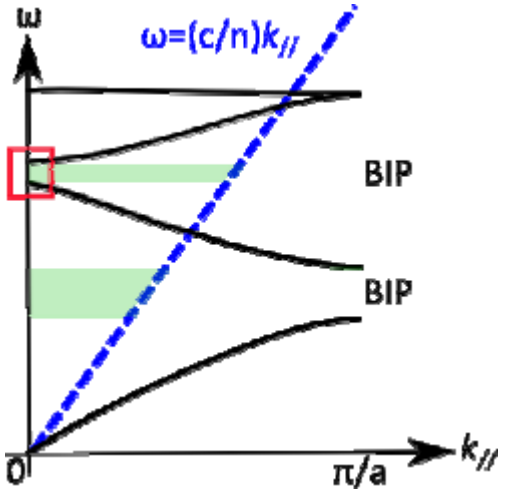


Figure I.8 : *Diagramme de dispersion schématique d'un cristal photonique représenté dans la première zone de Brillouin (période du CP notée a) et pour k//>0.*

Comparativement au cas précédent, on note donc la discrétisation des états accessibles. On remarque de plus la présence de bandes interdites photoniques ou « BIP » aux limites de la première zone de Brillouin. Elles sont d'autant plus larges que la modulation de la permittivité est importante. Aucun mode ne peut exister avec une fréquence située dans ces bandes interdites. Les autres modes peuvent quant à eux interagir ou non avec les ondes de l'espace libre suivant leur valeur de **k//** et leur symétrie. Comme vu précédemment, une condition nécessaire pour coupler la lumière incidente avec les modes du CP est qu'ils soient situés au-dessus de la ligne de lumière. Ainsi, par exemple, considérons les modes encadrés en rouge sur la Figure I.8 qui correspondent à une incidence quasi-normale (**k// ≈0**). On voit que ces

modes sont disposés en bandes de part et d'autre de la BIP avec une courbure relativement faible. Ce qui signifie que la vitesse du groupe de photons, définie par **VG=dw/dk//**, tend vers 0 : on parle de « modes de Bloch lents ». En couplant une onde incidente avec ces modes, il est alors possible de diminuer la vitesse de groupe des photons dans le cristal photonique membranaire absorbant, et donc d'optimiser leur temps de vie pour améliorer l'absorption. Cette stratégie adoptée par l'INL sera développée plus en détail dans la suite de ce manuscrit [9].

I.7. Les imperfections dans les cristaux photoniques 2D :

I.7.1. Les défauts ponctuels :

Les défauts ponctuels sont créés en modifiant les propriétés de la cellule de la grille. Les cristaux photoniques constitués de cylindres diélectriques permettent de modifier la constante diélectrique du cylindre. Le cylindre peut être enlevé, ce qui crée une lacune dans le cristal. Cela correspond à une micro-cavité à l'intérieur du cristal photonique. Pour les cristaux photoniques constitués de trous dans un matériau diélectrique; ces trous peuvent être modifiés géométriquement [10].

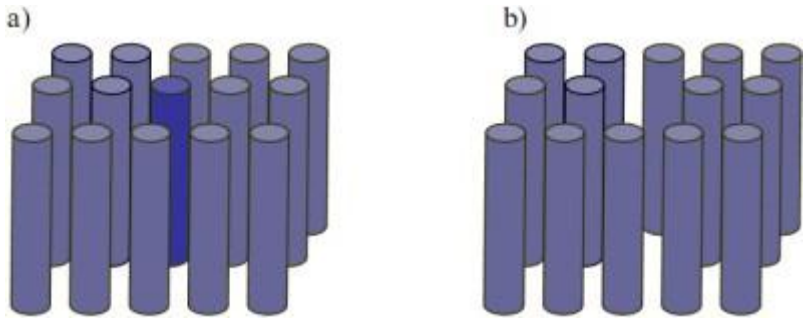


***Figure I.9** : Défauts ponctuels : a) Modification de la permittivité d'une tige (il vaut mieux faire la tige centrale en rouge) b) Absence de la tige centrale [10].*

I.7.2. Défauts étendus :

Par l'introduction d'un défaut linéaire (omission d'une ou plusieurs rangées de motifs élémentaires), il est possible de guider la lumière selon une direction choisie. La lumière va se propager le long de ce guide avec une fréquence appartenant à la bande interdite photonique du cristal. Un guide formé par une rangée de trous manquants dans la direction ΓK sera

appelé un guide W1. Le guide W3, formé par trois rangées manquantes est visible sur la même figure. Les modes électromagnétiques associés aux guides d'onde sont des modes confinés dans le guide et qui peuvent se propager le long de ce guide et avec des parois parfaitement réflectives. De cette façon on peut dévier le chemin de la lumière [11].

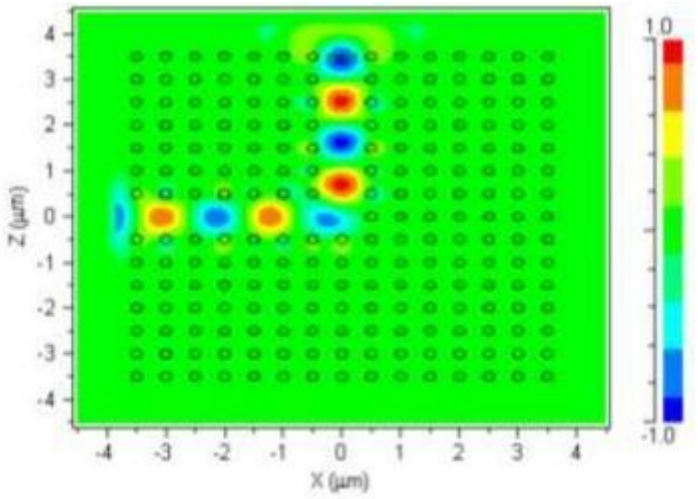


***Figure I.10**: Propagation du champ dans un guide virage.*

I.8. Cavités à structure des CP :

I.8.1. Les différents modèles de cavités :

Les cavités Lx sont formées en supprimant x trous adjacents et colinéaires dans un réseau triangulaire, formant ainsi une région d'« espacement ». De plus, certains trous à proximité immédiate des trous sont modifiés pour augmenter le Q de la cavité. Les cavités L3 et L1 sont présentées ici, car elles constituent la majeure partie des dispositifs fabriqués pour cette thèse.

I.8.1.1. Cavité hexagonale :

Des cavités hexagonales sont créées en omettant la gravure des trous dans le cristal photonique selon une configuration hexagonale. Ce cristal photonique est conçu de manière à ce que la bande d'émission du silicium se situe dans la bande interdite TE. Ces cavités sont généralement désignées sous le nom de «cavité Hx», où x représente le nombre de trous omis par côté de l'hexagone. Les échantillons analysés comportent plusieurs cavités intégrées dans le même cristal photonique. Cependant, notre dispositif expérimental permet d'explorer une seule cavité à la fois [12].

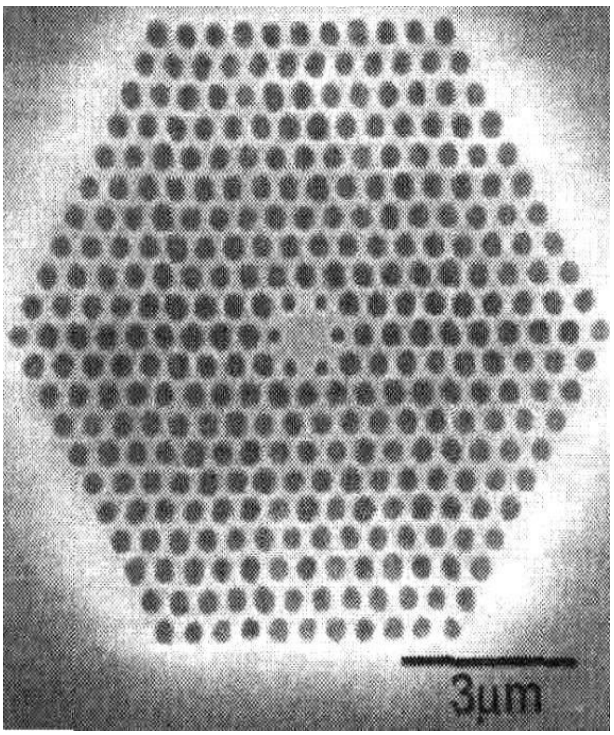


Figure I.11 : *Illustration d'une cavité au sein d'un cristal photonique hexagonal comportant des trous d'air. Cette cavité présente un mode monopolaire, ce qui signifie qu'il n'est pas dégénéré.*

I.8.1.2. Cavité linéique :

Les cavités de type Ln présentent une caractéristique linéique, se manifestant par l'absence de n trous alignés sur une même rangée dans la direction ΓK. La figure suivante (Figure I.12) présente des exemples de cavités de type Ln dans des cristaux photoniques 2D.

Dans les cavités de type L3, on trouve des motifs dont les facteurs de qualité sont limités à quelques milliers. Cependant, des progrès significatifs ont été réalisés dans ce domaine, notamment grâce aux travaux d'Akabane et al [13].

Plus particulièrement, en modifiant de manière appropriée les cavités linéaires, on peut obtenir des facteurs de qualité neuf fois supérieurs à ceux des cavités linéaires simples (45 000 contre 5 000) [14].

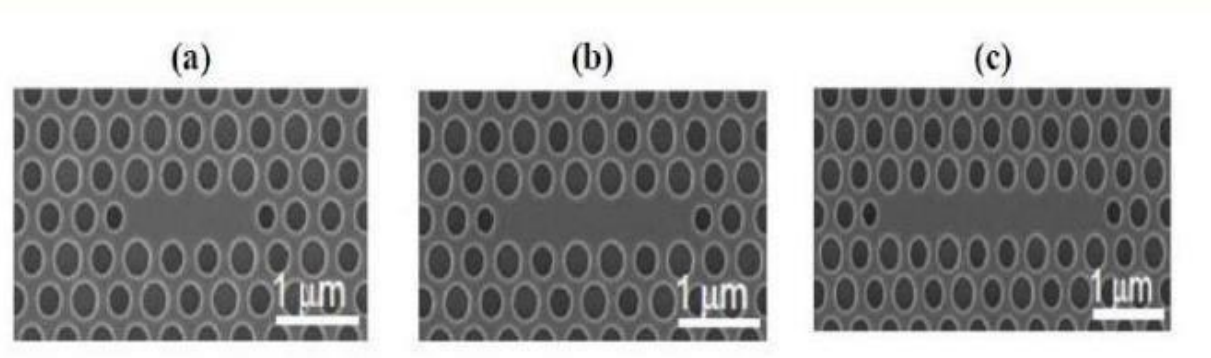


Figure I.12 : *Exemples de cavités de types Ln :* ***(a)*** *cavité L3,* ***(b)*** *cavité L5,* ***(c)*** *cavité L7.*

I.8.1.3. Cavité Carrée :

Dans un réseau carré à deux dimensions, les cavités sont de type Sn, ayant une forme carrée. Le paramètre n indique le nombre de lignes et de colonnes absentes dans le carré. Par exemple, la cavité S1 est formée en omettant une ligne et une colonne [15].

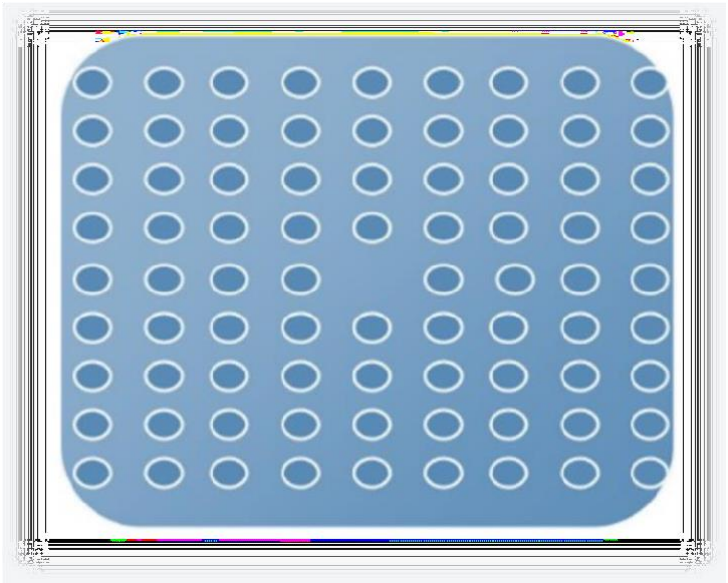


Figure I.13 : *Illustration d'une cavité carrée au sein d'un cristal photonique à réseau carré.*

I.8.1.4. Cavité triangulaire :

La figure I.14 illustre un autre type de cavité résonante au sein d'un cristal photonique bidimensionnel. Cette cavité est formée par l'élimination des atomes situés sur la ligne dans les directions principales du réseau, telles que ΓK ou ΓM pour le réseau triangulaire. La partie

(a) de la figure I.14 présente la cavité L2, où deux atomes voisins le long de la direction ΓK ont été retirés du réseau. La cavité L3, qui résulte de l'enlèvement de trois atomes, est également représentée sur la figure I.14 (b) [15].

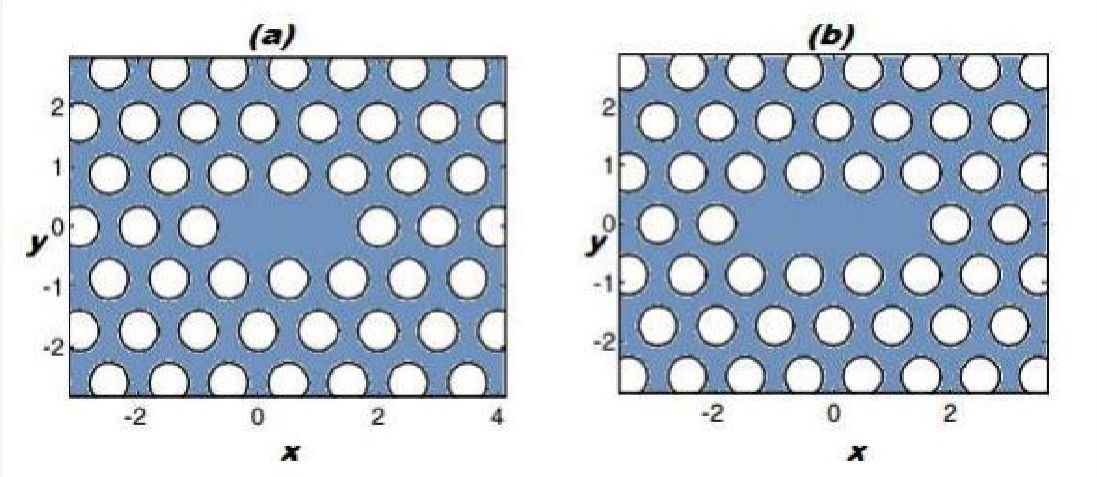


Figure I.14 : *Cavités résonnantes au sein de cristaux photoniques à réseau triangulaire. a) Cavité L1. b) Cavité L3.*

I.9. Guides d'ondes dans les cristaux photoniques:

En 1994, l'idée des guides d'ondes est apparue sous l'impulsion de *Joannopoulos, Mead* et *al* [16].Cependant, les premières percée sont eu lieu cinq ou six ans plus tard [12].

Le défaut est ici une ligne de trous omis, formant un défaut linéaire (figure ***I.15***). Comme la lumière ne peut pas pénétrer dans le cristal photonique, elle est forcée de se propager le long du défaut: C'est ainsi que le répertoire a été créé. On appelle ce guide un guide Wl, car il est formé par la suppression d'une ligne de trous. Les guides formés par la suppression de deux lignes de trous sont appelés W2, ceux de trois rangées de trous W3, etc [16].En effet, il existe une large gamme de guides en cristal photonique. Notons, par exemple, que les cristaux photoniques bidimensionnels composés de réseaux de trous sont généralement préférés aux réseaux de barres diélectriques discontinues, non seulement parce qu'ils permettent d'obtenir une bande interdite complète; mais aussi et surtout parce que les pertes dues à la diffraction en dehors du plan de propagation sont moins importantes. Dans le cas des réseaux de trous, la façon la plus naturelle de créer un guide optique est de fermer les trous en une ou plusieurs rangées. Ainsi, le cœur du guide a un indice moyen plus élevé que les zones environnantes. Nous pouvons donc aboutir à une situation hybride où nous avons à la fois un guide réfractif et un guide optique à bande interdite.

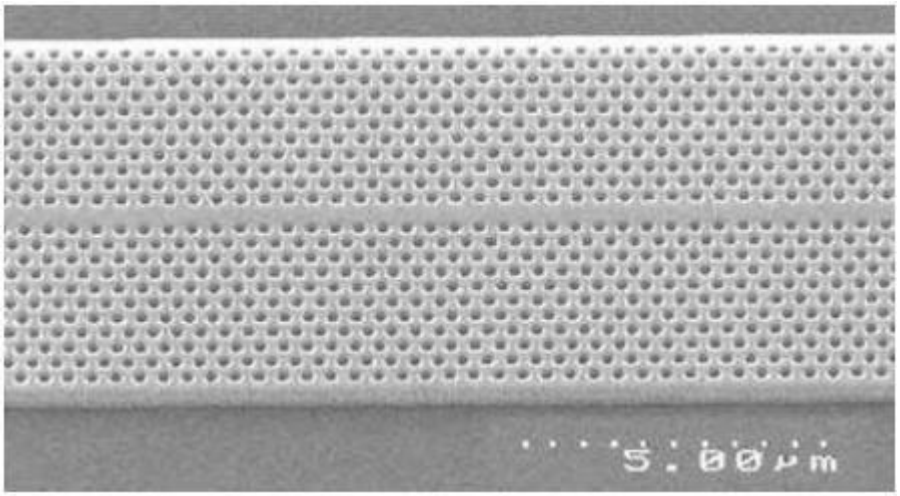


Figure I.15 : *Onde mono-rangée réalisé dans un cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant.*

I.10. Composants semi-conducteurs à cristal photonique 2D :

Les cristaux photoniques en deux dimensions (CPs 2D) se caractérisent généralement par un agencement périodique de cavités gravées dans une ou plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs. Le choix se porte fréquemment sur un motif hexagonal, qui garantit la présence d'une bande interdite photonique dans toutes les directions du plan pour au moins une polarisation du champ transverse électrique (TE). Cependant, ce sont les modifications apportées à ce réseau qui permettent de concevoir des fonctions et des dispositifs optiques. L'un des principaux défis des CPs 2D réside dans le confinement optique dans la troisième dimension, c'est-à-dire la direction verticale. La méthode conventionnelle en optoélectronique consiste à créer le CP dans un guide planaire multicouche, où le contraste de l'indice de réfraction entre les couches est modéré. Le défi consiste alors à disposer d'un système de gravure profonde pour minimiser les pertes dues à la diffraction du CP. Une alternative consiste à réaliser le CP dans une membrane semi-conductrice suspendue dans l'air, ce qui permet d'obtenir un contraste d'indice élevé et d'utiliser un système de gravure standard. Cette approche a permis d'atteindre les meilleures performances, avec les pertes les plus faibles pour les composants à CPs 2D. Toutefois, cette solution présente l'inconvénient que les structures en membrane sont plus sensibles aux effets de chauffage thermique, rendant l'excitation électrique plus complexe. Dans ce contexte, une troisième solution prometteuse pour la nanophotonique, notamment en silicium, consiste à réaliser le CP dans la couche

supérieure de silicium d'un substrat de silicium sur isolant (SOI), formant ainsi un guide planaire confiné entre la silice et l'air [17].

I.11. Usage des cristaux photoniques:

Depuis environ dix ans, les cavités résonnantes et les guides d'ondes à cristaux photoniques suscitent un intérêt considérable, car elles ouvrent de nouvelles perspectives pour la création de composants ultra-compacts destinés aux communications et aux capteurs photoniques. Au cours de ces dernières années, divers dispositifs ont été proposés et analysés dans plusieurs domaines disciplinaires, notamment les coupleurs directionnels [18], les doubles virages [19], les filtres [20], les démultiplexeurs, les diviseurs de puissance [21], les capteurs et biocapteurs [22]. Ces nouveaux dispositifs imitent les principes fonctionnels des divers éléments d'un circuit intégré, en se servant des photons comme vecteurs d'information au lieu des électrons.

I.12. Conclusion :

Les cristaux photoniques sont des substances dont la constante diélectrique présente une variation périodique à l'échelle de la longueur d'onde, que ce soit dans une, deux ou trois dimensions. Cette périodicité engendre diverses propriétés fascinantes, notamment la bande interdite photoniques, qui empêche la propagation de la lumière dans certaines conditions.

Dans ce chapitre, nous avons examiné les cristaux photoniques dont la constante diélectrique varie de manière périodique à l'échelle de la longueur d'onde. Ces cristaux se distinguent par la présence de bandes interdites photoniques, qui empêchent la propagation de la lumière au sein de leur structure. L'exploitation de cet effet de bande interdite permet de développer de nombreuses fonctions optiques, telles que le guidage et le filtrage de la lumière. Nous avons porté une attention particulière aux cristaux photoniques en deux dimensions et à leur pertinence pour les fibres optiques.

CHAPITRE II :

Les bases des capteurs

II.1. Introduction :

Les capteurs jouent un rôle essentiel en tant qu'outils de collecte d'informations, car ils sont largement utilisés dans divers processus industriels et dans les sciences de la mesure. Ils convertissent l'état d'une variable physique, telle que la température, la pression, la vitesse ou la force, en une forme utilisable, souvent sous la forme de signaux électriques (tension, courant ou charge), qu'ils se transmettent ensuite à une unité de contrôle pour un traitement ultérieur. Ils ont été développés pour détecter de diverses molécules potentiellement dangereuses, telles que des maladies, des virus ou des gaz.

Ce chapitre vise à poser les bases de la compréhension du fonctionnement des capteurs, en introduisant un ensemble de concepts et de définitions des principales caractéristiques qui les caractérisent. Nous étudierons le principe de fonctionnement des biocapteurs et en particulier des capteurs utilisant des cristaux photoniques.

II.2. Principes généraux des capteurs :

II.2.1. Définition d'un capteur :

Un capteur est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable, telle qu'une tension électrique, une hauteur de mercure, un courant électrique ou la déviation d'une aiguille.

Le capteur est le dispositif qui effectue cette conversion : il reçoit une grandeur physique non électrique en entrée (m) et fournit une réponse électrique en sortie (s), selon la relation : s= F(m)[52].

Le capteur est une interface entre une grandeur physique et une information exploitable, mais il ne fonctionne pas seul. Contrairement à l'instrument de mesure, qui intègre l'affichage ou le stockage des données, le capteur en est dépourvu. Il comprend au minimum un transducteur, qui convertit la grandeur physique en une grandeur mesurable. Ainsi, tout capteur contient un transducteur, mais un capteur ne se réduit pas forcément à celui-ci [69].

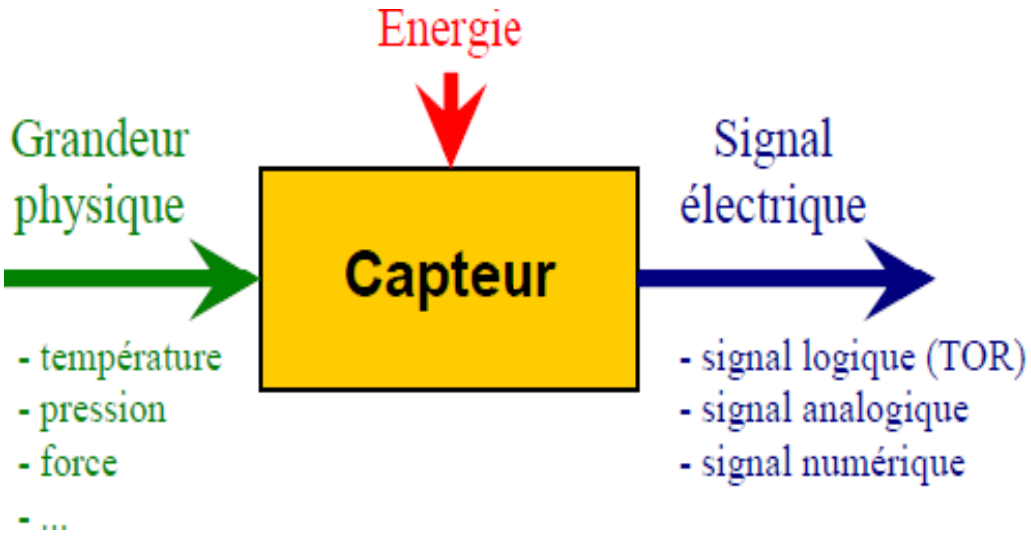


Figure II.1 : *Présentation d'un capteur.*

II.2.2. Classification des capteurs :

La sortie d'un capteur peut se manifester de différentes manières :

- de manière binaire (information vraie ou fausse), c'est le capteur Tout Ou Rien (TOR);
- de façon progressive (variation continue), c'est le capteur analogique;
- d'échelon de tension ou de courant, ce qui définit les capteurs numériques [53].

II.2.3. Chaine de mesure :

La chaîne de mesure se compose de l'ensemble des dispositifs, y compris le capteur, qui permettent, dans des conditions optimales, de déterminer avec précision la valeur du mesurande [52].

Une chaîne de mesure produit généralement un signal électrique. Elle fait appel à plusieurs transducteurs, chacun jouant un rôle dans la conversion ou le traitement du signal. Le corps d'épreuve est la partie en contact direct avec le mesurande (la grandeur physique à mesurer).

Le dernier transducteur est souvent relié à un adaptateur, qui transforme le signal en une variable de sortie électrique utilisable (par un affichage, un système de traitement, etc.).

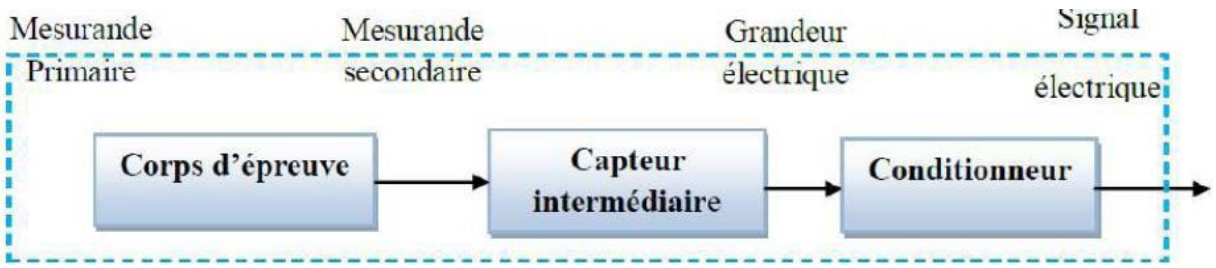


Figure II.2 : *Établissement d'une chaîne de mesure traditionnelle.*

II.2.4. Grandeur d'influence :

Le capteur, de part ses conditions d'emploi, peut se trouver soumis non seulement à la mesurande, mais à d'autres grandeurs physiques dont les variations sont susceptibles d'entraîner un changement de la grandeur électrique de sortie qu'il n'est pas possible de distinguer de l'action du mesurande. Ces grandeurs physiques « parasites »auxquelles la réponse du capteur peut être sensible sont les grandeurs d'influence [52].

Ainsi, par exemple :

- la température (c'est la grandeur d'influence la plus répandue et la plus gênante),
- la pression, l'accélération et les vibrations,
- l'humidité,
- les champs variables induisent des forces électromotrices qui se superposent au signal utile,
- les ambiances corrosives,
- les rayonnements nucléaires,
- les perturbations électromagnétiques,
- la tension d'alimentation.

II.2.5. Utilité du capteur :

Parmi les informations des grandeurs de la nature ; issues de notre environnement, on distingue les grandeurs physiques associées à des événements climatiques, géométriques ou encore lumineux ou temporels. Le rôle du capteur est de rendre exploitable ces différentes grandeurs physiques en vue de leur traitement ultérieur.

- Mesure de présence : indique la présence d'un « objet » à proximité ;
- Mesure de position, de déplacement ou de niveau : Indique la position actuelle. Un objet produit par un mouvement de rotation ou de translation ;

- Mesure de vitesse : Indique la vitesse linéaire ou la vitesse angulaire d'un « objet » ;
- Mesure de l'accélération, des vibrations ou des chocs ;
- Mesure du débit, de la force, du couple, de la pression ;
- Mesure de la température et de l'humidité [53].

II.2.6. Type des capteurs :

Les capteurs sont classés en deux grandes catégories selon la caractéristique électrique de la grandeur de sortie. Cette classification influe sur le conditionneur qui lui est associé.

II.2.6.1. Capteurs actifs :

Fonctionnant en générateur, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre au mesurande : énergie thermique, mécanique ou de rayonnement. Les plus importants parmi ces effets sont regroupés dans le tableau ***II***. 1 ; dans la suite du paragraphe, on en donne une description sommaire destinée à éclairer leur mode d'application.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Pyroélectricité	Charge
	Photoémission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photoélectromagnétique	Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

Tableau II.1 : *Capteurs actifs : principes physiques de base.*

II.2.6.2. Capteurs passifs :

Il s'agit d'impédances dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande. Dans l'expression littérale d'une impédance sont présents des termes liés :

– d'une part à sa géométrie et à ses dimensions ;

– d'autre part aux propriétés électriques des matériaux : résistivité, perméabilité, Magnétique μ, constante diélectrique.

La variation d'impédance peut donc être due à l'action du mesurande :

– soit sur les caractéristiques géométriques ou dimensionnelles ;

– soit sur les propriétés électriques des matériaux ;

– soit plus rarement sur les deux simultanément.

Les paramètres géométriques ou dimensionnels de l'impédance peuvent varier si le capteur comporte soit un élément mobile, soit un élément déformable. Dans le premier cas, à chaque position de l'élément mobile correspond une valeur de l'impédance et la mesure de celle-ci permet de connaître la position, c'est le principe d'un grand nombre de capteurs de position ou de déplacement, potentiomètre, inductance à noyau mobile et condensateur à armature mobile [52].

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Pyroélectricité	Charge
	Photoémission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photoélectromagnétique	Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

Tableau II.2 : *Capteurs passifs : principes physiques et matériaux.*

II.2.6.3. Les biocapteurs :

Un biocapteur est couramment décrit comme un dispositif analytique capable de transformer une réaction biologique en un signal physique quantifiable [55].

Les biocapteurs sont des instruments d'analyse qui intègrent un élément biologique tel que des tissus, des microorganismes, des organelles, des récepteurs cellulaires, des enzymes ou des anticorps, associé à un transducteur physicochimique. Lorsqu'une substance cible interagit avec le matériel biologique, cela engendre une modification physico-chimique qui est ensuite détectée par le transducteur. Ce dernier génère un signal électronique analogique qui est proportionnel à la concentration d'un analyte spécifique ou d'un ensemble d'analytes [56].

II.2.7. Caractéristiques des capteurs :

II.2.7.1. La sensibilité :

C'est un critère crucial lors de la sélection d'un capteur ; généralement, la sensibilité *S* se définit, à proximité d'une valeur centrale du paramètre mesuré, par le quotient de la fluctuation *Δs* de la grandeur produite à la fluctuation *Δm* du paramètre qui a conduit à sa génération [52] :

$$S = \frac{\Delta s}{\Delta m} \quad \text{.....(II.1)}$$

Avec :

- S : représente la sensibilité.
- *Δs* : représente la variation du signal de sortie.
- *Δm*: représente la variation du mesurande.

II.2.7.2. L'étalonnage :

L'étalonnage permet d'ajuster et de déterminer sous forme graphique la relation entre la grandeur à mesurer (mesurande) et la grandeur de sortie (figure II.3)

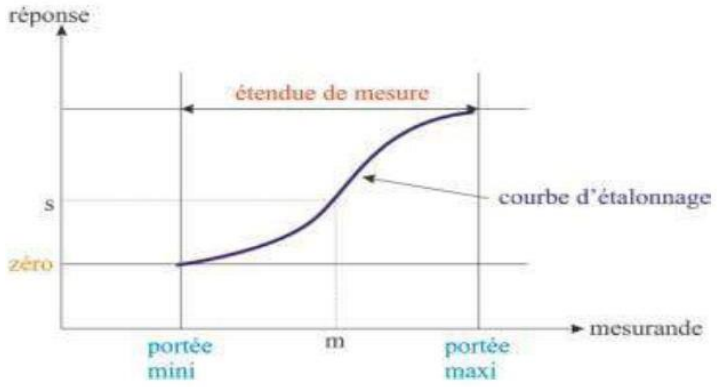


Figure II-3 : *Courbe d'étalonnage d'un capteur.*

II.2.7.3. La rapidité :

Il s'agit de la capacité d'un capteur à suivre les fluctuations de l'entité mesurée. On peut la quantifier en :

- l'intervalle de fréquence du capteur (à -3dB) ;

- Le délai de réponse (en %) à un échelon [54].

II.2.7.4. La fidélité :

Lors d'analyses répétées de la même grandeur physique m. La différence de fidélité se manifeste par la dispersion σ des résultats autour de la valeur moyenne <m> de n mesures effectuées sur m.

II.2.7.5. La précision :

Le sens du terme « précision » diffère selon les auteurs, englobant soit exclusivement la reproductibilité ou la fidélité, soit aussi le concept de « justesse ». Elle établit la différence en pourcentage qui peut exister entre la valeur réelle et celle obtenue par le biais du capteur [54].

II.2.7.6. La linéarité:

Dans ce domaine de linéarité, la variation de la grandeur de sortie est proportionnelle à la variation de la mesurande.

II.3. Capteur optique :

Un capteur optique est un dispositif électronique utilisé pour détecter la lumière ou ses changements, en convertissant les signaux optiques en signaux électriques lisibles et exploitables. Son travail est basé sur des composants optiques tels que les diodes et les phototransistors, et il est utilisé dans de nombreuses applications quotidiennes telles que la photographie numérique, la lecture de codes à barres, les souris optiques et les dispositifs de mesure du mouvement et de la vitesse [58], [59].

Il existe plusieurs types de ces capteurs, tels que la température, la pression, l'humidité, le déplacement et les biocapteurs. Les capteurs optiques basés sur des fibres optiques, des plasmons de surface, des guides d'ondes planaires ou des cristaux photoniques sont préférés en raison de leur haute sensibilité et de leur capacité d'analyse non destructive [58].

Les techniques de détection dans ces capteurs dépendent des changements physiques qui affectent les propriétés de la lumière, comme son intensité, sa longueur d'onde ou sa phase, ce qui permet le développement d'appareils précis et efficaces pour surveiller divers effets environnementaux ou biologiques **[**58].

II.3.1. Biocapteur optique :

Les biocapteurs optiques font partie des types de biocapteurs les plus utilisés et les plus répandus, en raison de leur haute résolution et de la diversité de leurs applications. Cette présentation propose une brève classification de ces dispositifs, en expliquant les principes fondamentaux sur lesquels ils reposent ainsi que leurs mécanismes de fonctionnement, tout en mettant en lumière leur rôle dans les applications bio analytiques [57].

Une attention particulière est accordée aux biocapteurs optiques basés sur la résonance plasmonique de surface (SPR), notamment l'imagerie SPR in situ et SPR localisé, pour leur grande sensibilité et leur capacité de détection sélective des analytes biologiques [57].

D'autres technologies de biocapteurs optiques sont également abordées, telles que les détecteurs de fluorescence à ondes évanescentes, les capteurs à fibres optiques bioluminescents, la spectroscopie interférométrique, la spectroscopie elliptique et de réflectance, ainsi que les capteurs de diffusion Raman améliorée en surface (SERS) [57].

Ces systèmes offrent des performances avancées pour la détection sensible et sélective d'une large gamme de cibles biologiques, y compris les virus, les toxines, les médicaments, les anticorps, les bios marqueurs tumoraux et les cellules cancéreuses [57].

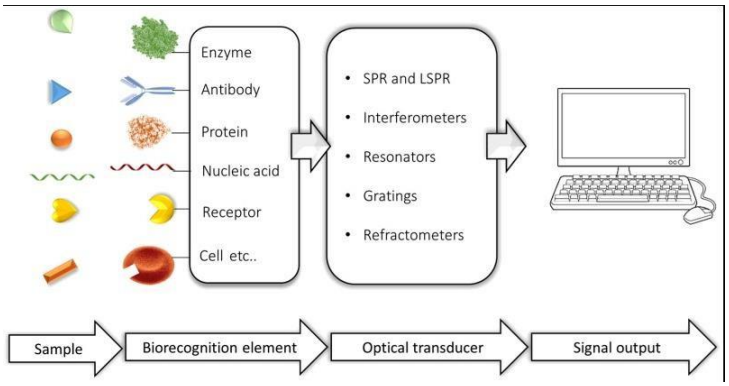


***Figure II-4**:Opticalbiosensor.*

II.3.2. Capteurs à fibre optique :

Les fibres à cristaux photoniques (PCF), aussi appelées fibres optiques micro structurées (MOF), représentent une classe innovante de fibres optiques, bien adaptées aux applications de détection telles que la mesure de la contrainte, de l'indice de réfraction, de la pression, de

la température ou encore du champ magnétique. Les capteurs basés sur les PCF se caractérisent par une sensibilité élevée, une structure compacte, une bonne robustesse, une flexibilité remarquable et une capacité à effectuer de la télédétection. De plus, leur utilisation est efficace dans des environnements extrêmes comprenant le bruit, les champs électromagnétiques intenses, les hautes tensions, les radiations nucléaires, les milieux corrosifs ou explosifs, ainsi que les températures élevées. Composées principalement de silice fondue, les PCF possèdent un cœur creux entouré de trous d'air agencés de manière périodique le long de l'axe de la fibre. Il est également essentiel de distinguer les fibres optiques monomodes PCF des fibres monomodes classiques (SMF). Les propriétés de propagation dans ces deux types de fibres peuvent être ajustées par la conception géométrique des paramètres tels que le diamètre du trou (h), le diamètre du cœur (d), le pas (x), la longueur de la fibre (L) et les matériaux utilisés [60].

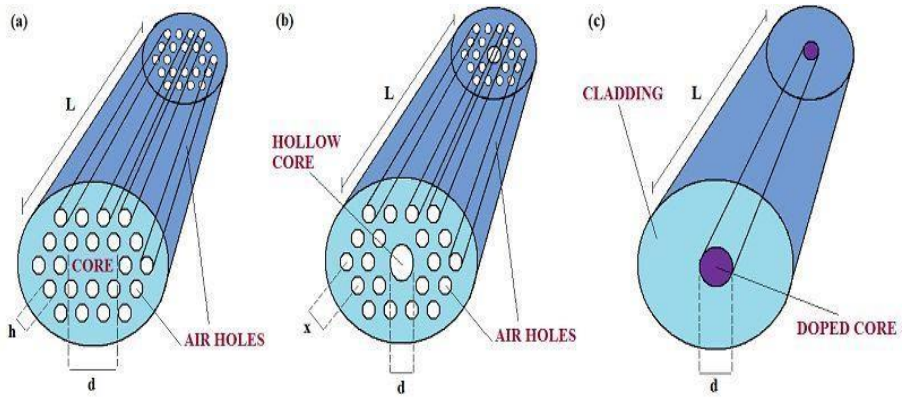


Figure II-5. *Schéma de (a) PCF à noyau plein, (b) PCF à noyau creux et (c) SMF conventionnel.*

II .3.3.Capteurs à cristaux photoniques :

L'utilisation des cristaux photoniques comme capteurs constitue un domaine de recherche prometteur. Leur microstructure périodique permet de piéger les photons et de générer des résonances optiques particulièrement sensibles à la présence de molécules cibles. Grâce à leur très forte miniaturisation (zone de détection de l'ordre de 0,1 mm^2), ces capteurs présentent une sensibilité spectrale élevée tout en nécessitant une préparation d'échantillon minimale, sans recours à un marquage fluorescent. Le cristal photonique offre en outre une

large plage de détection, ce qui le rend adapté à diverses mesures, allant des gaz jusqu'aux fluides très visqueux [60], [68].

Le principe de fonctionnement repose sur la variation des propriétés optiques du cristal, notamment l'indice de réfraction de l'analyte, qui induit un décalage de la longueur d'onde de résonance dans le spectre de transmission. Ce décalage est directement lié à l'indice de réfraction du liquide étudié [60], [68].

On distingue plusieurs types de capteurs à cristaux photoniques selon la façon dont leurs propriétés optiques sont influencées par les caractéristiques physiques ou structurelles du cristal :

- Capteurs d'indice de réfraction (RI-based PhC sensors) ;
- Capteurs opto-mécaniques à base de CPhs ;
- Capteurs intégrés basés sur un effet non linéaire ;
- Capteurs à cristaux photoniques à fibres optiques.

II.4. État de l'art des biocapteurs à cristaux photoniques :

Ces biocapteurs sont constitués d'un support en matériau plastique, recouvert d'une fine couche de matériau diélectrique périodiquement structuré, possédant un indice de réfraction plus élevé. Le dispositif est conçu pour réfléchir une bande spectrale d'environ 2 nm lorsqu'il est exposé à une lumière blanche sous un angle d'incidence normal. Un décalage vers des longueurs d'onde plus élevées (appelé décalage vers le rouge) est observé lorsqu'une substance est adsorbée à la surface du cristal photonique, indiquant ainsi une interaction. Lors des expériences de détection de l'ADN à la surface du cristal photonique, un décalage de 2,5 nm a été mesuré, ce qui correspond à une sensibilité de surface de 0,4 pg/mm² [58].

En 2004, Chow et ses collègues ont prouvé qu'il était possible de détecter un changement d'indice de réfraction de 0,002 (provenant d'une solution commerciale de silicone évaporée en surface) à l'aide d'une microcavité à photonic crystal 2D, présentant un facteur de qualité d'environ 400 [61].

Il aurait été possible d'améliorer la limite de détection à 0,001 RIU en recourant à une microcavité à photonic crystal 2D optimisée, comme le suggèrent Loncar et ses collègues [62].

En 2007, Lee et Fauchet ont introduit un biocapteur à cavité plasmonique sur silicium, capable de surveiller l'adsorption des protéines sur les parois des cavités et de mesurer de manière quantitative le diamètre des protéines (voir figure II.5). Ce système a permis de détecter des quantités minimales de protéines d'environ 2,5 fg. Peu après, les mêmes chercheurs ont réussi à améliorer la sensibilité à 1 fg en ciblant précisément les espèces sur la zone défectueuse de la surface sensible. Ils ont également réussi à détecter une seule bille de latex d'un diamètre de 370 nm, grâce à une surface de détection de la cavité plasmonique d'environ 40 μm² pour un volume sensible de 0,15 μm³ [63].

À partir de 2009, des structures de cavités à CP à tranchée commencent à démontrer des performances remarquables, avec des facteurs de qualité dépassant les 50 000 (voir figure II.6) [64].

À partir de 2009, des structures de cavités à CP à tranchée commencent à démontrer des performances remarquables, avec des facteurs de qualité dépassant les 50 000 (voir figure II.6) [64].

(a) (b)

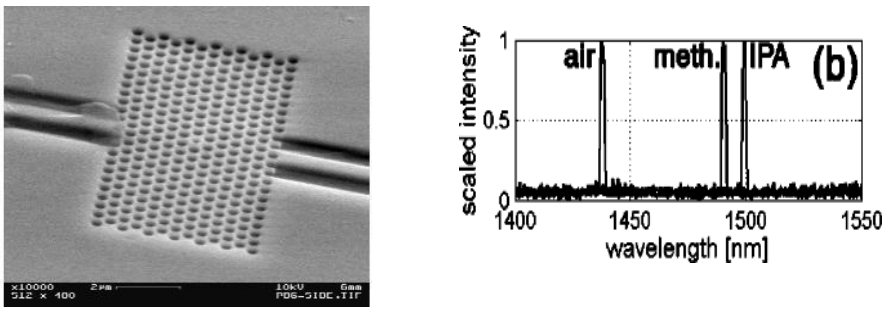


Figure II.6. *(a) Photographie par microscopie électronique à balayage d'un dispositif typique (biocapteur à base de cavité à CP). b) Réponses du capteur*

En 2012, Lin et ses collègues ont réussi à identifier un nombre limité de molécules au sein d'une solution complexe en utilisant des capteurs à CP conçus pour la détection de molécules individuelles [65]. (a) (b)

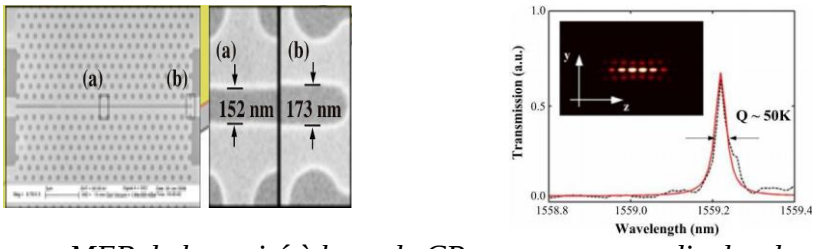
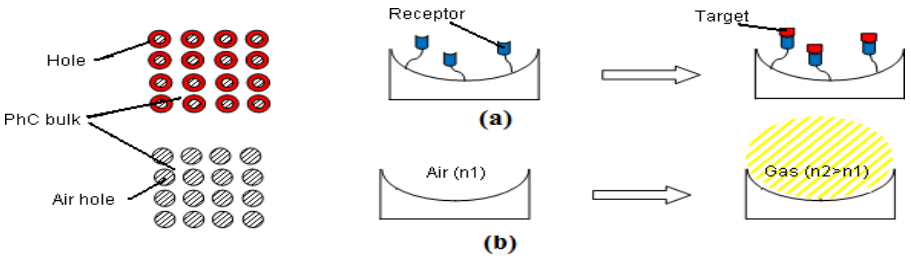


Figure II.7. *a) Image MEB de la cavité à base de CP avec vue agrandie des deux sections pertinentes de la fente. b) Spectre de transmission du mode cavité avec Q = 50 000 [64].*

II.5. Capteur l'indice de réfraction(RI) à base de CPs :

Les capteurs fondés sur l'indice de réfraction constituent la catégorie la plus courante des capteurs photoniques à cristaux. De nombreuses architectures sophistiquées, telles que les microcavités intégrées et les configurations interférométriques, exploitent cette méthode de détection. Les capteurs photoniques basés sur l'indice de réfraction offrent plusieurs avantages, notamment une préparation d'échantillons minimale sans nécessiter de marquage fluorescent, une détection en temps réel, ainsi qu'une sensibilité et une sélectivité élevées. Le principe de détection repose sur l'évaluation des variations de l'indice de réfraction d'une solution (comme l'eau dé ionisée, avec n_{Eau} = 1,33, ou l'air, avec n_{Air} = 1 à λ = 1,55 µm) causées par la présence d'analytes chimiques ou de gaz, qui sont généralement associés à des indices de réfraction plus élevés. Des études ont été menées sur des applications dans des milieux gazeux et aqueux pour mesurer les concentrations d'espèces chimiques et biologiques. Ces capteurs permettent de quantifier la densité surfacique ou volumique de molécules et de protéines, telles que la streptavidine, l'ADN ou l'ARNm. Récemment, des capteurs avancés utilisant la technologie des cristaux photoniques, spécifiquement conçus pour la détection de molécules uniques, ont prouvé leur capacité à évaluer le nombre de molécules présentes dans une solution complexe (Lin et al, 2012)[60].

Cette section aborde deux principes de détection fondamentaux fréquemment employés dans la détection photonique par indice de réfraction : la détection de surface et la détection homogène [60].



FigureII.8*.a) Détection de surface et (b) détection homogène. Les molécules sondes (bleues) sont déposées à la surface des trous et les molécules cibles (rouges) sont capturées par des récepteurs formant une couche à la surface du capteur.*

II.5.1. Capteurs RI à base des guides ondes à CP :

Un capteur à guide d'ondes à cristal photonique est présenté pour la bio détection. Ce capteur est utilisé pour la mesure de l'indice de réfraction et la détection des concentrations de protéines. Des concentrations d'environ 10 μg/ml (0,15 molaire) sont mesurées avec un excellent rapport signal/bruit, et une large plage de détection d'indice de réfraction dynamique s'étendant de l'air aux fluides à haute viscosité est présentée. Un guide d'ondes à cristal photonique a été développé pour effectuer des mesures en infrarouge et pour la détection de protéines, en utilisant une plaquette SOI commerciale et des méthodes de fabrication CMOS standards. Grâce à l'utilisation de diverses concentrations de protéines BSA, nous avons non seulement prouvé la capacité de détection des protéines, mais également la possibilité de différencier les différentes densités de couverture de surface. Le capteur présenté a révélé une réponse logarithmique aux variations de la longueur d'onde de coupure en fonction des concentrations de protéines, permettant de détecter aisément une couverture de surface de 6 ng/mm² [66].

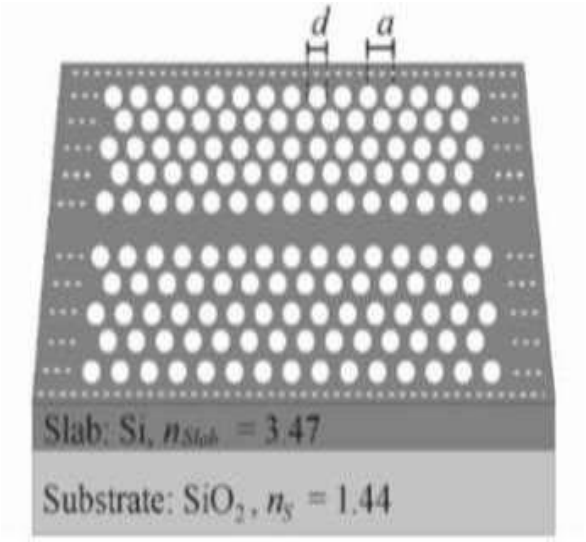


***Figure II.9.** : Schéma du capteur à guide d'ondes à cristal photonique (PCW) sur SOI2.*

II.5.2. Capteurs RI à base de microcavités résonantes à CP :

Ce capteur est élaboré pour identifier les fluctuations de l'indice de réfraction (RI) en analysant le décalage de la longueur d'onde de résonance de la microcavité [61].

La microcavité, conçue sur un substrat en silicium sur isolant (SOI), vise à atteindre une longueur d'onde de résonance d'environ 1,5 µm. Le spectre de transmission du capteur est évalué avec divers indices de réfraction ambiants, variant de n= 1,0 à n= 1,5. Une variation de l'indice de réfraction ambiant de $\Delta n = 0{,}002$ peut être détectée avec aisance. La relation entre l'indice de réfraction absolu et la longueur d'onde de résonance concorde avec les simulations numériques, affichant une précision de 4 %. De plus, l'évaporation de l'eau dans un mélange contenant 5 % de glycérine est exploitée pour illustrer la capacité de détection en temps réel in situ [61].

Ainsi, ce capteur présente une sensibilité remarquable aux variations de l'indice de réfraction, le rendant approprié pour des applications de détection biochimique en temps réel [61].

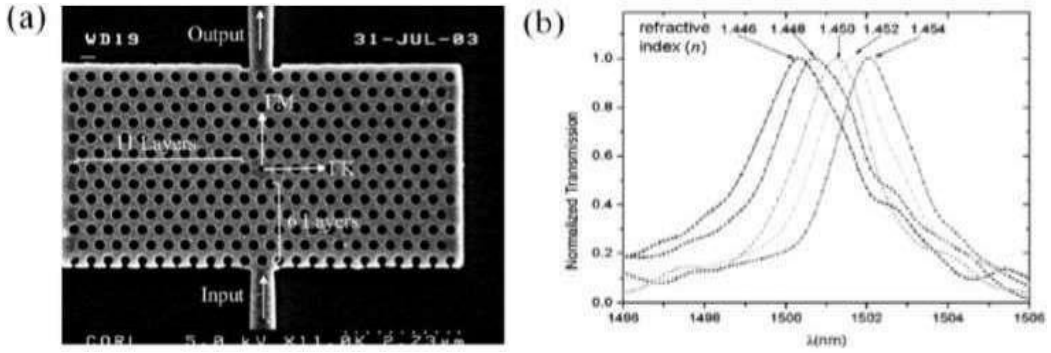


Figure II.10. : *(a) Vue au microscope électronique à balayage d'une microcavité à cristal photonique intégrée avec deux guides d'ondes ruban (b) Spectres de transmission normalisés de la microcavité montrée en (a) avec cinq différents indices de réfraction (variant de n=1.446 à n = 1.454) [61].*

II.5.3. Capteur RI utilisant des réseaux de Bragg à base de cristaux photoniques :

Les capteurs fondés sur des réseaux de Bragg exploitent des cristaux photoniques disposés de manière périodique pour former des structures réfléchissantes sensibles aux variations de l'indice de réfraction. Les modifications de l'indice de réfraction du matériau entraînent des changements dans la longueur d'onde de réflexion des réseaux de Bragg, permettant ainsi de mesurer cet indice [67].

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu global des capteurs, en exposant leurs types, leurs caractéristiques, leurs rôles, ainsi que leurs principes de fonctionnement fondamentaux. Nous avons ensuite abordé les capteurs optiques et examiné les principales techniques technologiques utilisées dans le domaine de la détection. Une attention particulière a été portée aux capteurs à base de cristaux photoniques, en raison de leurs propriétés optiques remarquables, telles que leur capacité à confiner fortement la lumière dans des volumes extrêmement réduits, ce qui leur confère une sensibilité accrue et les rend particulièrement adaptés à la détection en temps réel. Nous avons également expliqué que leur principe de fonctionnement repose principalement sur les variations de l'indice de réfraction (IR), permettant la mesure et l'analyse de concentrations variées de molécules et de substances.

Compte tenu des avancées significatives réalisées dans le domaine de la photonique au cours des dernières décennies, ainsi que des besoins croissants en matière de surveillance environnementale, de diagnostics rapides et précis, et du développement des micro technologies et de la biologie moléculaire; l'utilisation des cristaux photoniques comme capteurs constitue une voie de recherche prometteuse vers le développement de dispositifs performants, sensibles et à faible coût. C'est dans cette perspective que le chapitre suivant sera consacré à la présentation de l'outil numérique utilisé dans le cadre de cette étude pour la conception et l'analyse de ces capteurs.

CHAPITRE III :

Simulations : méthodes, outils, résultats et analyses

III.1. Introduction :

La modélisation électromagnétique des caractéristiques des cristaux photoniques requiert généralement un investissement considérable en programmation et en analyse numérique, représentant une activité qui demande des compétences élevées et un temps significatif. Le développement de méthodes de modélisation optique précises et rapides est donc essentiel pour l'exploration de ces structures. Parmi les approches théoriques concernant les cristaux photoniques, on peut identifier la méthode des ondes planes (PWE) et la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Nous avons appliqué la méthode FDTD à l'aide du logiciel Fullwave et la méthode PWE avec le logiciel Bandsolve de Rsoft CAD, qui permet de modéliser diverses structures en une, deux et trois dimensions. Ce chapitre présentera les méthodes PWE et FDTD. De plus, une étude a été réalisée sur un capteur basé sur des cristaux photoniques 2D en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel intégrée dans le logiciel Rsoft CAD. Le capteur constitue l'un des éléments clés du système de multiplexage en longueur d'onde (WDM) et de l'optique intégrée. Nous examinerons d'abord la bande interdite de la structure proposée, puis le guide d'onde à cristaux photoniques, et enfin le couplage entre ces éléments pour concevoir un capteur à cristaux photoniques. En conclusion, nous tenterons d'améliorer la sensibilité de notre structure de référence.

III.2. Méthodes de simulations :

La modélisation des cristaux photoniques implique le calcul des diagrammes de dispersion, de réflexion et de transmission, qui sont déterminés par les équations de Maxwell. Les approches les plus fréquemment mentionnées dans la littérature pour l'analyse des cristaux photoniques, ainsi que celles que nous avons employées dans nos simulations à l'aide du logiciel Rsoft, incluent la méthode des ondes planes (PWE) et la méthode des différences finies dans le temps (FDTD).

III.2.1. La méthode des ondes planes (PWE) :

Dans le domaine des cristaux photoniques, la méthode des ondes planes constitue la référence pour le calcul des bandes interdites. Elle s'avère particulièrement efficace pour des structures périodiques de dimensions infinies, permettant ainsi de déterminer les modes propres et le diagramme de dispersion de la structure. La technique PWE repose sur la résolution, dans l'espace fréquentiel, de l'équation d'onde linéaire, en développant le champ

électromagnétique sur une base d'ondes planes, conformément aux équations de Maxwell. Cette méthode de décomposition en ondes planes se révèle très performante pour le calcul des diagrammes de bandes des cristaux photoniques parfaitement périodiques. De plus, la PWE peut être adaptée à l'étude de certaines structures non périodiques, telles que les guides d'onde ou les cavités, grâce à l'utilisation de la technique des super cellules.

III.2.2. La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) :

La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) constitue une approche directe pour résoudre les équations de Maxwell dans le domaine temporel, en s'appuyant sur l'outil numérique des différences finies. Cette méthode permet d'obtenir simultanément les réponses en champs TE et TM, facilitant ainsi la cartographie du champ électromagnétique à tout moment et en tout lieu. La compréhension de l'évolution temporelle du champ offre également des insights sur la réponse spectrale de la structure [70].

Cette méthode implique la discrétisation des équations de Maxwell tant dans l'espace que dans le temps, en recourant à une grille de cellules élémentaires. Les équations de Maxwell sont substituées par un ensemble d'équations qui établissent un lien entre le champ électromagnétique de chaque cellule et ceux des cellules adjacentes. L'ensemble des calculs est effectué directement dans le domaine temporel, et les équations sont discrétisées localement à l'aide de formulations explicites. Il est à noter que le choix du pas d'échantillonnage a un impact sur la précision des résultats. Afin d'assurer la convergence des résultats, la discrétisation spatio-temporelle adoptée doit respecter une condition de stabilité, qui établit un lien entre un maillage fin et un pas temporel réduit [71],[72].

La méthode FDTD est couramment employée dans les recherches sur la mécanique des matériaux et la propagation des ondes. En photonique, elle se rapproche davantage de la réalité, car elle permet de créer une excitation (source) dans un CP et d'observer dans le temps le comportement de l'onde ainsi que son interaction avec le CP, facilitant ainsi l'étude de sa transmission.

III.3. Présentation de Rsoft CAD :

L'environnement de CAO RSoft est le programme principal des outils pour dispositifs photoniques RSoft. Il permet aux chercheurs et aux ingénieurs de créer des systèmes pour la conception de guides d'ondes, de circuits optiques et d'autres dispositifs photoniques. Il contrôle les modules de dispositifs passifs de RSoft, notamment BeamPROP, FullWAVE,

BandSOLVE, GratingMOD, DiffractMOD, FemSIM et ModePROP, et définit les données d'entrée importantes requises par ces programmes : les propriétés des matériaux et la géométrie structurelle du dispositif à étudier.

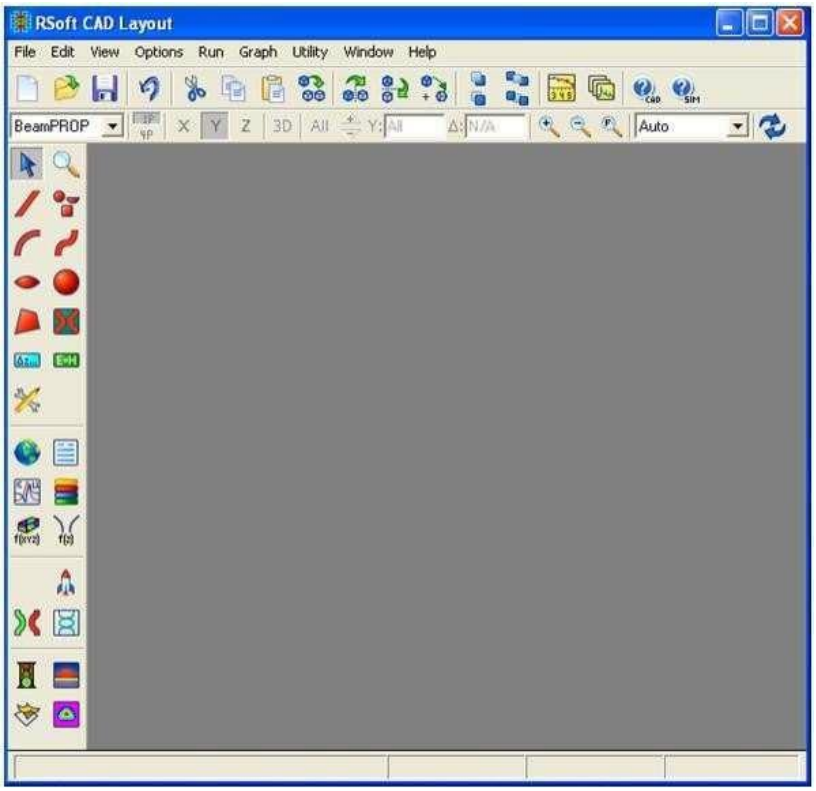


Figure III.1 **:** *Interface graphique du logiciel Rsoft.*

III.3.1. Le simulateur « BandSOLVE » :

BandSOLVE est le premier outil de conception disponible commercialement permettant d'automatiser et de simplifier la modélisation et le calcul des structures de bandes photoniques pour tous les dispositifs à cristaux photoniques (PC). Le moteur de simulation BandSOLVE utilise l'algorithme d'expansion d'ondes planes (PWE) pour effectuer les calculs de bandes et fournit également une représentation graphique des champs électromagnétiques et d'autres grandeurs d'intérêt pour une analyse plus approfondie.

Dans un espace à deux dimensions, il est essentiel de prendre en compte deux directions de propagation distinctes : TE (où le champ électrique E est aligné avec l'axe des trous) et TM (où E est orthogonal à l'axe des trous). Ces deux modes de polarisation sont indépendants et génèrent deux diagrammes de bandes séparés. BandSolve s'avère particulièrement efficace pour améliorer les caractéristiques des structures à cristaux photoniques.

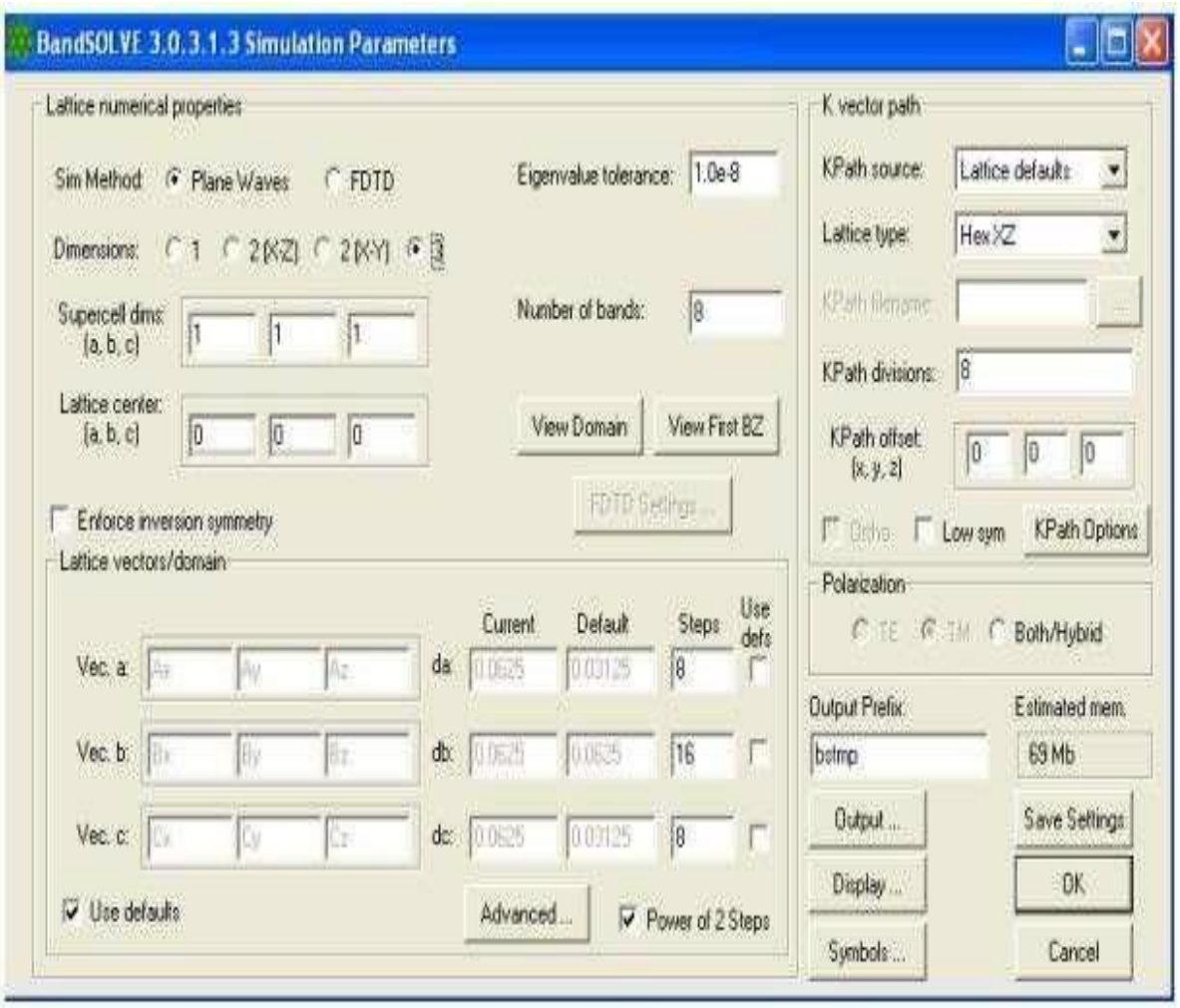


Figure III.2 *: La fenêtre de simulation BandSOLVE.*

III.3.2. Le simulateur «FullWAVE» :

L'outil de simulation FullWAVE utilise la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) pour réaliser une simulation vectorielle complète des structures photoniques. Cet outil hautement sophistiqué permet d'étudier la propagation de la lumière dans une grande variété de structures photoniques, notamment les dispositifs intégrés et à guide d'ondes à fibre optique, ainsi que les circuits et les dispositifs nano photoniques tels que les cristaux photoniques. La conception innovante et primée de FullWAVE et ses fonctionnalités en font le leader du marché des outils de simulation de dispositifs optiques.

Pour utiliser l'application FDTD intégrée dans FullWave, il est essentiel de disposer de paramètres tant physiques que numériques.

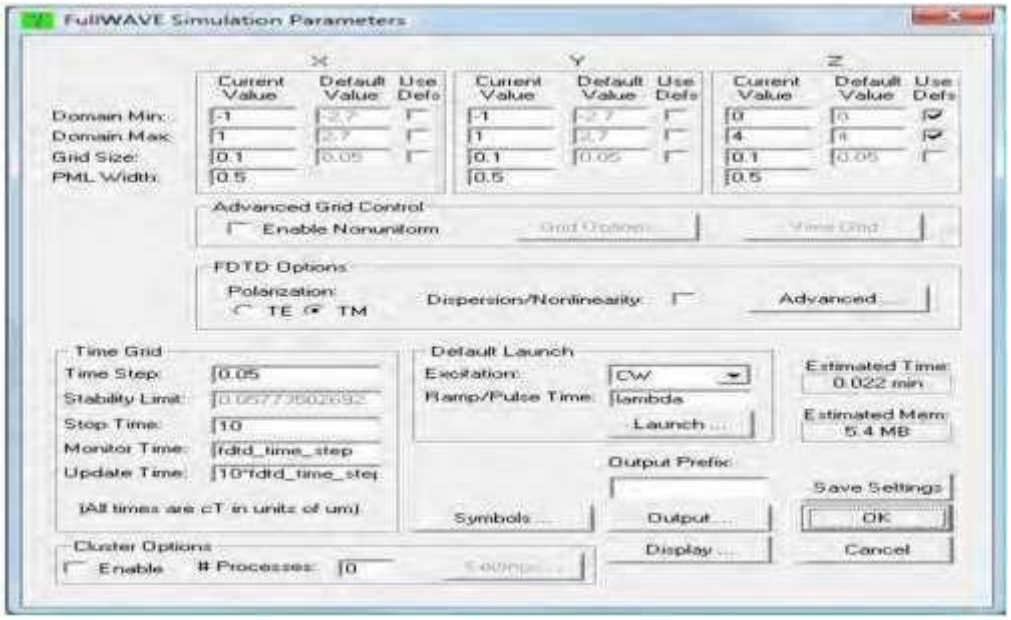


Figure III.3: *La fenêtre des paramètres de simulation FullWave où les paramètres de base de simulations numériques sont entrés.*

III.3.3. Présentation des autres applications :

PERFORME SIMULATION (Effectuer La simulation): Cette option permet d'accéder à la boîte de dialogue des paramètres de simulation, où l'utilisateur peut spécifier les paramètres nécessaires avant de procéder à la simulation.

Vérification du profil d'index : Pour évaluer la répartition des index de la structure que nous avons établie.

SYMBOLE TABLE Editor : cette option permet de créer des variables, ce qui nous permettra de modifier la période a et le rayon r.

LAUNCH DATA BROWSER : cette fonctionnalité permet d'accéder au navigateur de données RSOFT.

EDIT GLOBEL SETTINGS : (Editer les arrangements globaux): cette fonctionnalité permet d'accéder à la boîte de dialogue des arrangements globaux, où les configurations par défaut de la boîte peuvent être définies. Elle correspond à la nouvelle boîte de dialogue du circuit.

III.4. Présentation de la structure de base :

Dans cette section, nous allons étudier le cas des cristaux photoniques bidimensionnels membranaires à réseau de trous d'air (17 × 17) dans un diélectrique à fort indice (n_{si}=3.45), il s'agit d'un réseau à maille hexagonal (Figure III.4 et Figure III.5).

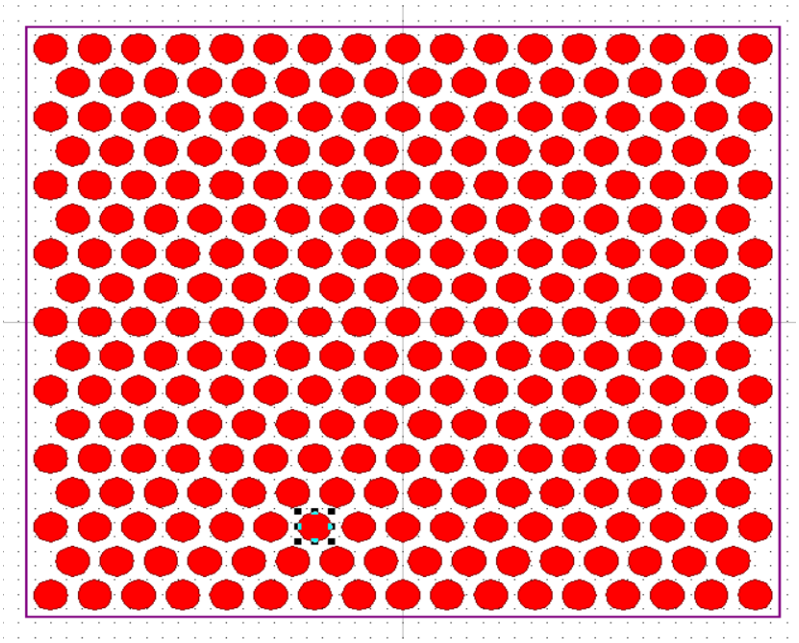


***Figure III.4**: Structure du cristal photonique formé par un réseau Hexagonal 17×17*

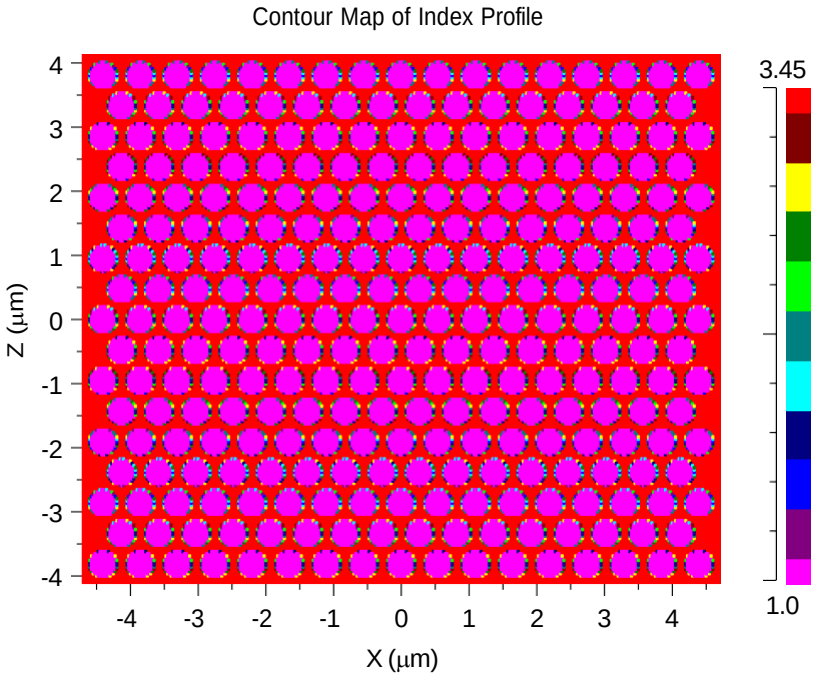


***Figure III.5:** Distribution de l'indice de réfraction d'un cristal photonique hexagonal.*

III.4.1. Paramètres de la structure étudiée :

Les propriétés des cristaux photoniques sont théoriquement décrites par leurs bandes interdites. Les graphiques de ces bandes sont calculés et développés de manière à obtenir une onde plane. Leur transmission est calculée par la méthode des différences finies dans le domaine temporel FDTD-2D. En ce qui concerne le réseau, notre choix s'est orienté vers le réseau triangulaire de trous d'air. Pour des raisons de symétrie, ce dernier présente la plus large bande interdite photonique.

Initialement, nous avons utilisé le logiciel de simulation (BandSOLVE de RSoft basé sur la méthode des ondes planes PWE) pour optimiser les premières bandes (TE et TM) en fonction de la largeur de la bande (TE et TM) en fonction du rayon R. Nous avons considéré un réseau triangulaire de trous d'air dans une membrane de silicium (n = 3,45 et une période de réseau de 0,55µm .En effet, la période est fixée de telle sorte que nous obtenions une bande interdite pour au moins une polarisation aux longueurs d'onde d'intérêt). Dans le présent travail, les conditions PML sont entièrement prises en compte dans les calculs, afin d'éviter toute réflexion à la limite de la région analysée. Avant l'étude des caractéristiques de transmission de la structure; il convient de présenter le diagramme de bande de la structure sans défaut. Car d'un point de vue matériel, il faut s'assurer qu'il y a une bande interdite optique suffisamment large.

Quand le facteur de remplissage est élevé, il peut y avoir des problèmes techniques : en effet, plus le facteur de remplissage est élevé, plus le taux de remplissage est élevé. Le rayon R optimal a donc été fixé à 0,209 µm pour un facteur de remplissage de f =38%.

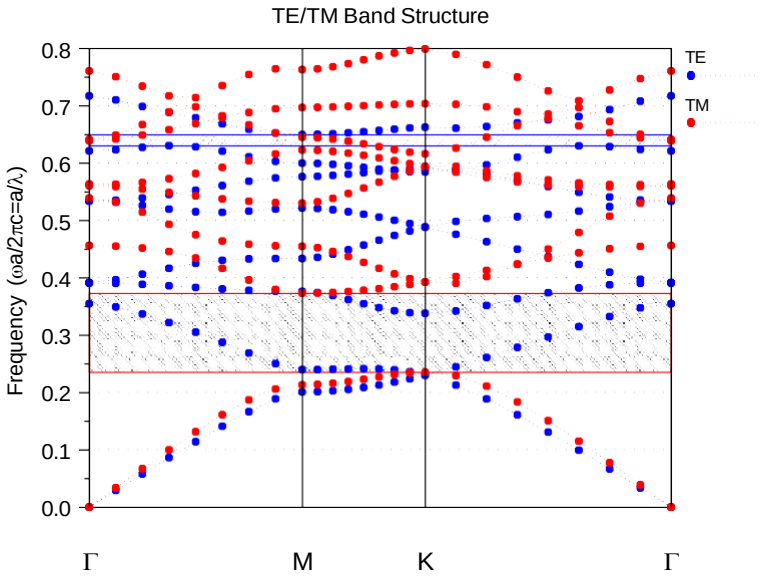
III.4.2. Diagramme de bande interdite photonique :

Le diagramme de bande calculé par la méthode de l'onde plane (méthode PWE) à l'aide du simulateur BandSOLVE est illustré à la figure *III.6(a)*; en utilisant un réseau triangulaire bidimensionnel, et une onde plane gaussienne comme source lumineuse. Sous ces conditions, le cristal considéré présente une large bande interdite centrée sur la fréquence propre a/λ égale 0,305. Cette bande se situe dans le mode TM entre les fréquences normales 0,235 et 0,373 correspondant à une longueur d'onde comprise entre 1,4717µm et 2,3404µm.

- a = 0.55 µm, R = 0.209µm
- a/λ_1 = 0.373, λ_1 =0.55/0.373 = 1.4717µm
- a/λ_2 =0.235, λ_2 =0.55/0.235 = 2.3404 µm donc : 1.4717 µm < λ < 2.3404µm.

A la figure *III.6(b)*, nous présentons le spectre de transmission calculé par la méthode FDTD à l'aide du logiciel FullWAVE de RSoft.

(a)



(b)

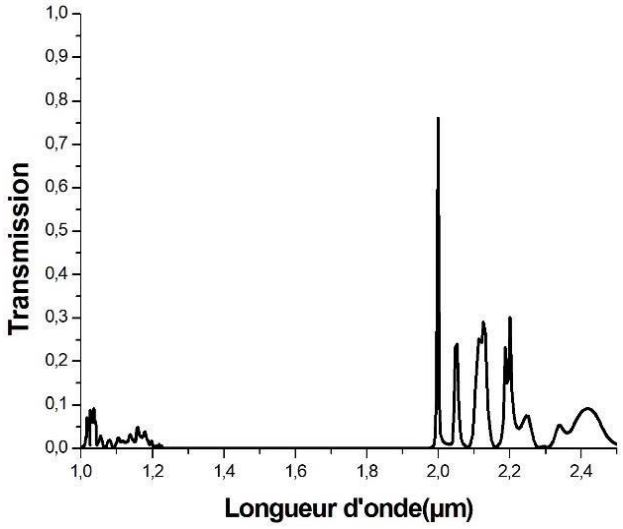


Figure III.6 : (a) *Diagramme de dispersion du CP-2D dans la membrane Si (un réseau hexagonal de trous d'air, a=0.55* µm*, R=0.209* µm*, f=38%.) calculé par la PWE.* ***(b)*** *la présentation du spectre de transmission calculé par la FDTD-2D.*

III.5. Guide d'onde sans cavité :

Le défaut dans le cristal photonique est dû à la rupture de la périodicité diélectrique. Cette rupture est responsable de l'ouverture d'une gamme de fréquence dans la bande interdite photonique. Les défauts peuvent avoir une infinité de plusieurs géométries possibles qui passent par la modification de la taille ou de l'indice d'un seul motif du cristal jusqu'au retrait de rangées entières de motifs qu'on appelle défauts linéiques.

Nous considérons que le guide d'onde est formé en enlevant une rangée de trous W1 la direction ΓK de réseau hexagonal, comme le montre la figure *III.7*. Le cristal photonique est un réseau hexagonal de trous d'air de périodicité a = 0.55μm, percés dans une membrane de Si d'indice n =3.45 et de rayon des trous r = 0.209μm.

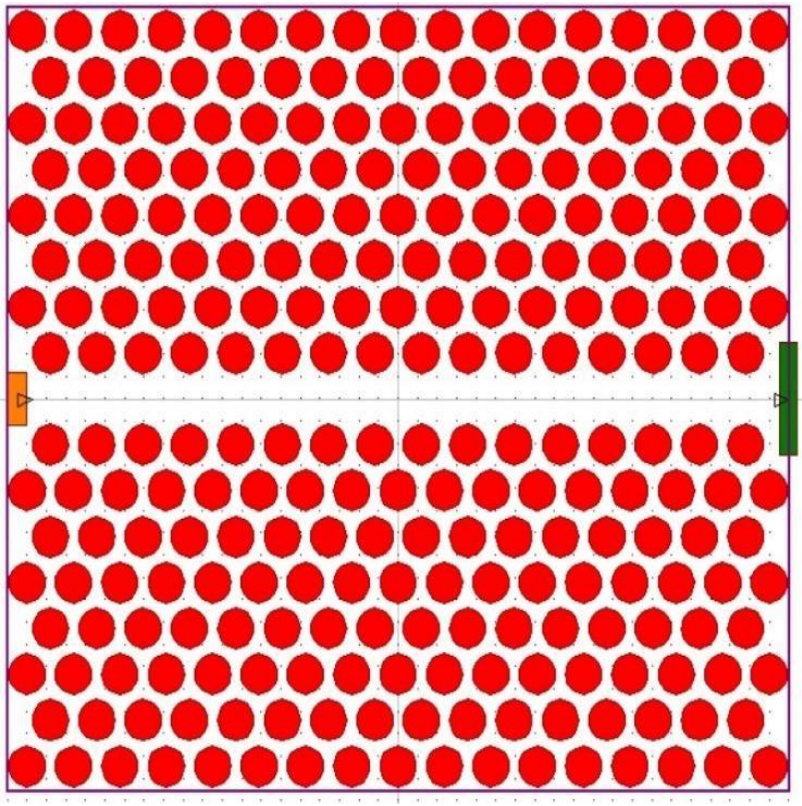


Figure III.7 : *Structure 2D avec un défaut de ligne (guide d'onde).*

Le calcul FDTD effectué à l'aide du logiciel FullWave de RSoft; permet de tracer le spectre de transmission (Figure III.8a), une large transmission du guide droit W1 est observée s'étalant sur plus de 600nm. Dans ce cas, nous nous sommes limités à la région spectrale de la bande interdite du cristal 2D calculée (BIP entre 1471 nm et 2340.4nm). A partir du calcul FDTD, la figure (III.8b) représente la distribution spatiale d'une excitation de type continue (CW) à une longueur d'onde de 1.55μm pour la polarisation TM du guide droit W1. Nous pouvons voir que le champ est bien confiné et que la forme de sa distribution montre clairement la présence du phénomène de guidage.

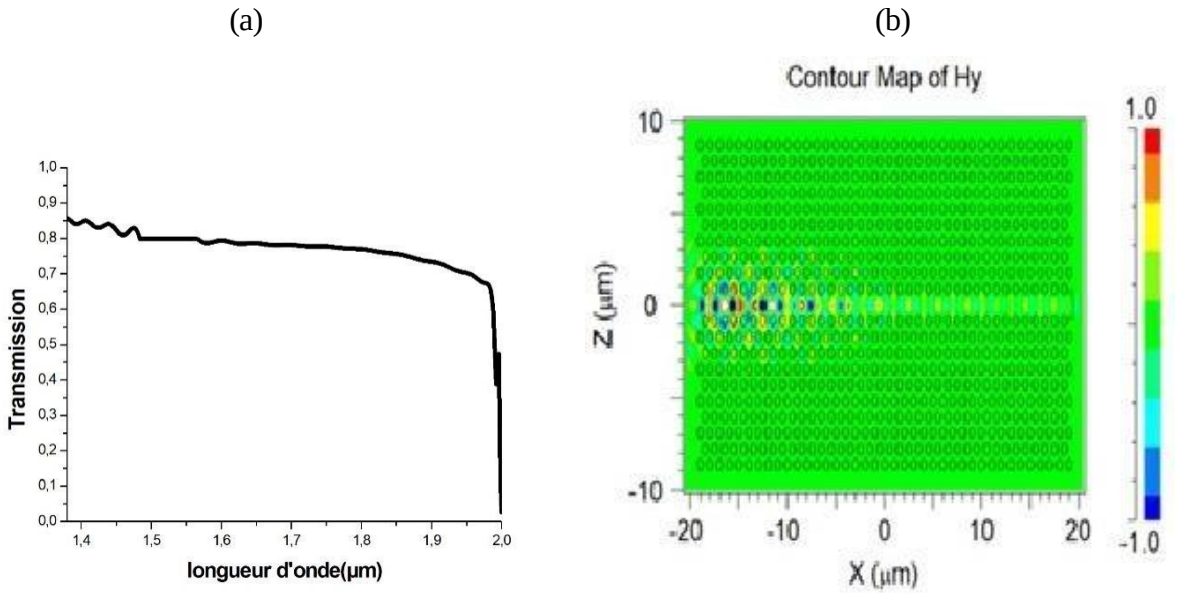


Figure III.8 : (a) *Spectre de transmission guide droit référence W1 en mode TM.* ***(b)*** *Distribution spatiale du champ à la suite d'une simulation de type FDTD et une excitation de type CW du guide droit référence W1, pour une polarisation TM à λ=1.55µm.*

III.6 Guide d'onde avec cavité hexagonale irrégulière :

III.6.1. Description de la première structure étudiée (biocapteur 1):

Afin d'appliquer les cristaux photoniques à la détection, nous avons optimisé la structure de référence initiale pour obtenir un changement de la transmission de la longueur d'onde de résonance en fonction du changement d'indice. Nous avons introduit une cavité composée d'un guide d'onde d'entrée, d'un résonateur et d'un guide d'onde de sortie. Ce type de cavité a été proposé pour la première fois par Kuramochi en 2006 [73].

La cavité hexagonale irrégulière est créée par l'omission de 9 trous de la 6eme ligne vers la gauche, et 9 trous de la 12eme ligne vers la droite ainsi qu'un seul trou au centre de la 7em et 13eme ligne.au centre de la structure, nous avons opté pour l'omission de 3 trous. Les paramètres des trous en forme d'anneau sont définis par leurs rayons internes et externes R= 209 nm et r = 160 nm respectivement. La région d'air annulaire est donnée par R-r = 49 nm (voir figure *III.9*).

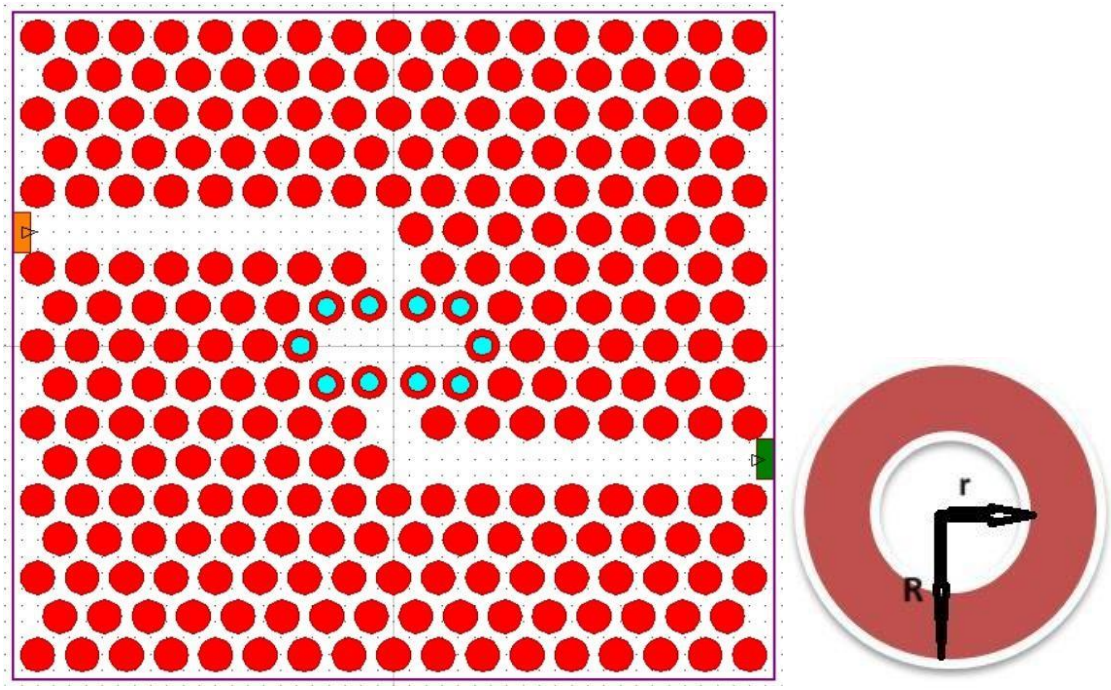
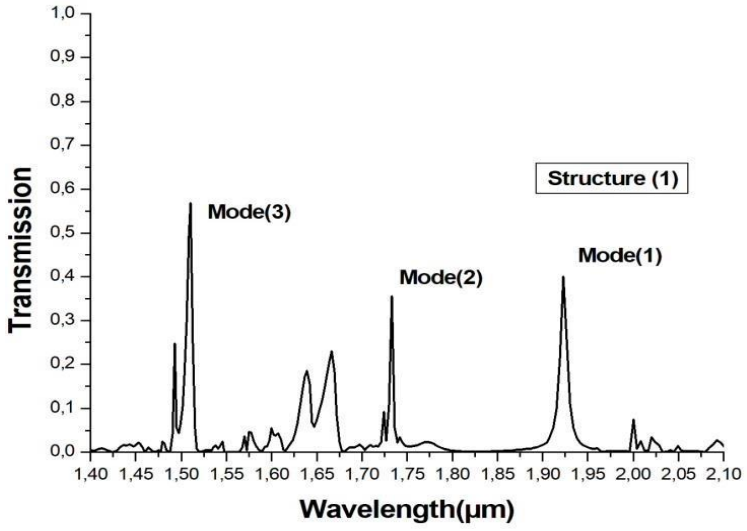


Figure III.9: *Structure d'un couplage cavité/guide (1^ere structure).*

III.6.2. Etude de la transmission et de la sensibilité :

Le spectre de transmission d'un système couplé à un guide d'ondes est illustré à la figure *III.10*, avec des cavités hexagonales irrégulières calculé par la méthode FDTD de logiciel FullWave de la structure1.

(a)



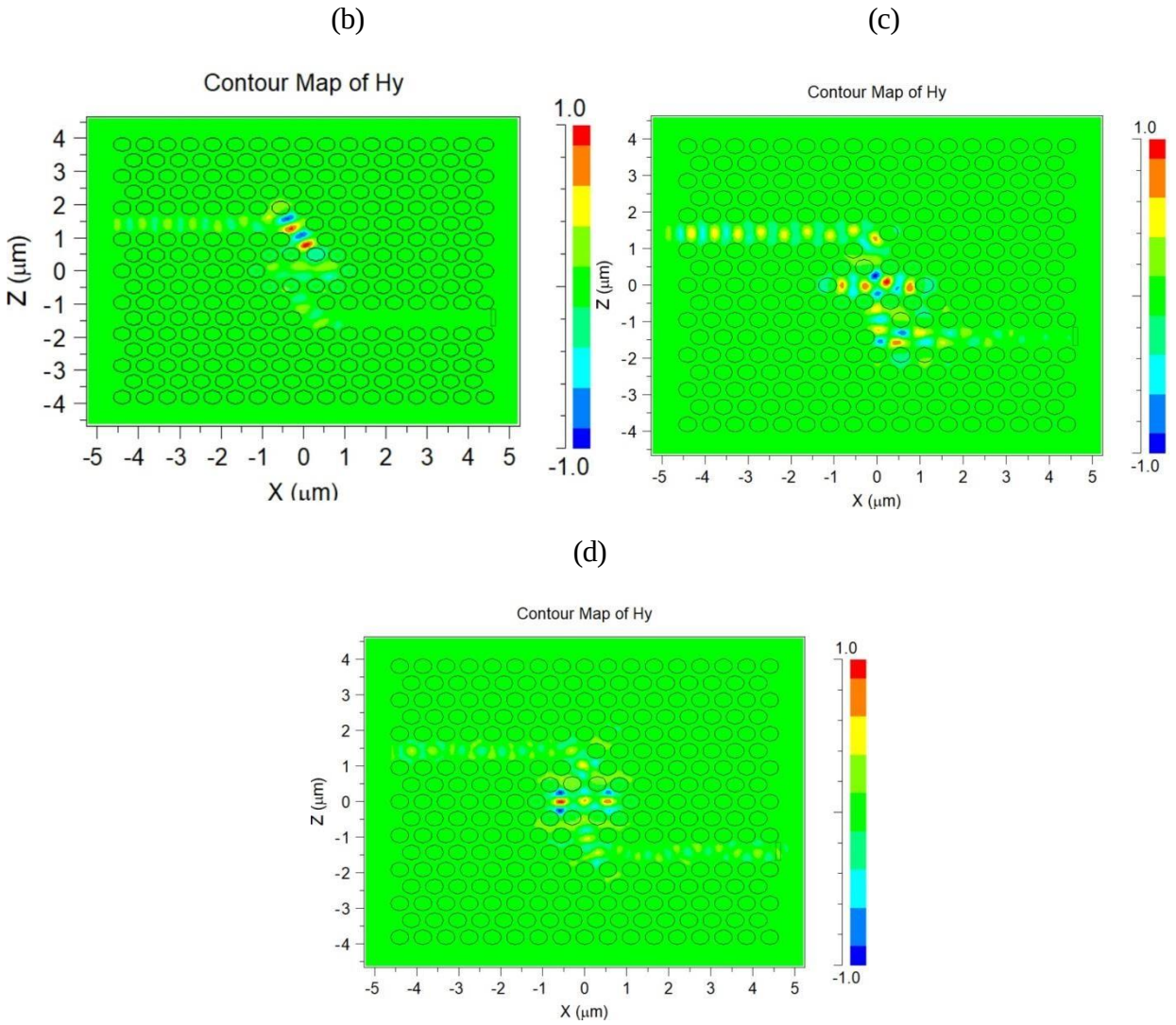


Figure III.10: (a) *Spectre de transmission de la structure couplage cavité/guide pour n=1. La distribution du champ magnétique dans la cavité dans le plan x-z à* $\lambda_{mode(1)}$*=1.9227µm* ***(b),*** $\lambda_{mode(2)}$*=1.7337µm* ***(c) et*** $\lambda_{mode(3)}$*=1.5094µm* ***(d).***

Comme on peut le voir à la Figure *III.10*, quand la cavité est en résonance, trois pics lorentziens étroits apparaissent à l'intérieur du BIP à une longueur d'onde de résonance 1.9227µm dans le mode (1), 1.7337µm dans le mode (2) et 1.5094 µm dans le mode (3),correspondant aux premier, deuxième et troisième mode de résonance du structure (1).

Dans la figure *III.10 (b, c et d),* la lumière incidente des longueurs d'onde de 1,9227µm dans le mode (1), 1,7337µm dans le mode (2) et 1,5094µm dans le mode (3) sont couplées au résonateur de la cavité hexagonale irrégulière, Cela le rend sensible aux changements d'indice de réfraction en raison de la forte interaction entre la lumière et le matériau.

III.6.3. Etude de la résonance de la cavité en fonction d'indices de réfraction :

Dans notre étude, nous avons analysé le spectre de transmission d'un cristal photonique 2D en présence d'un liquide inséré dans les trous d'air, représentant l'élément à détecter. Les simulations ont été effectuées pour différentes valeurs de l'indice de réfraction, allant de n =1 à n =1,06, avec un pas de 0,02. La figure *III.11(a)* illustre les spectres de transmission obtenus pour chaque valeur de n. On observe que l'augmentation de l'indice de réfraction provoque un décalage des pics de résonance vers des longueurs d'onde plus élevées pour les trois modes étudiés (mode 1, mode 2 et mode 3). La figure *III.11(b)* met en évidence la relation linéaire existant entre les longueurs d'onde de résonance et les indices de réfraction pour chacun des modes, confirmant la stabilité et la prévisibilité du comportement optique de la structure.

La sensibilité (S) du capteur, un paramètre fondamental dans l'évaluation de sa performance, est définie par la relation suivante : $S = \Delta\lambda / \Delta n$ (nm / RIU)). Où $\Delta\lambda$ représente le décalage de la longueur d'onde du pic de résonance et Δn représente la variation de l'indice de réfraction du matériau analysé. En maintenant tous les autres paramètres constants et en faisant varier n de 1,00 à 1,08; les sensibilités obtenues sont les suivantes : 258 nm/RIU pour le mode 1, 244.2 nm/RIU pour le mode 2 et 250 nm/RIU pour le mode 3. Ces résultats, récapitulés dans le tableau *III.1*, confirment le potentiel de la structure proposée en tant que capteur optique à haute sensibilité.

(a) (b)

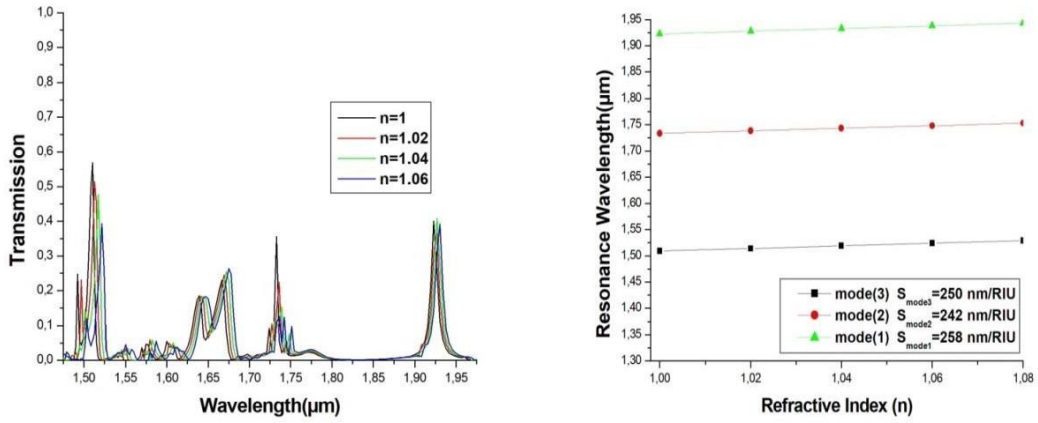


Figure III.11: (a) *Le spectre de transmission de la structure pour différents indices de réfraction n à R=209nm et a= 550 nm.* ***(b)*** *la longueur d'onde de résonance en fonction de l'indice de réfraction n du matériau à détecter.*

L'indice de réfraction	Sensibilité (nm/RIU) Mode 1	Sensibilité (nm/RIU) Mode 2	Sensibilité (nm/RIU) Mode 3
1	……..	……..	……..
1.02	254	249	255
1.04	250	244	259
1.06	245	243	262
1.08	251	241	256

Tableau III.1 : *la sensibilité (S) de la première structure en mode 1, mode 2 et mode 3 en fonction de l'indice de réfraction (RI).*

III.7. Guide d'onde avec une cavité hexagonale irrégulière en configuration anneau et trous :

III.7.1 Description de la deuxième structure étudiée (Biocapteur 2) :

Afin d'optimiser les performances de notre biocapteur et d'augmenter sa capacité de détection sur les petites concentrations d'analyte et les variations dans ce dernier; nous présentons la conception et la modélisation d'un biocapteur à CP basé sur un anneau dans la cavité centrale (Fig. *III.12(a)*) et avec un trou dans la cavité centrale (Fig. *III.12(b)*).

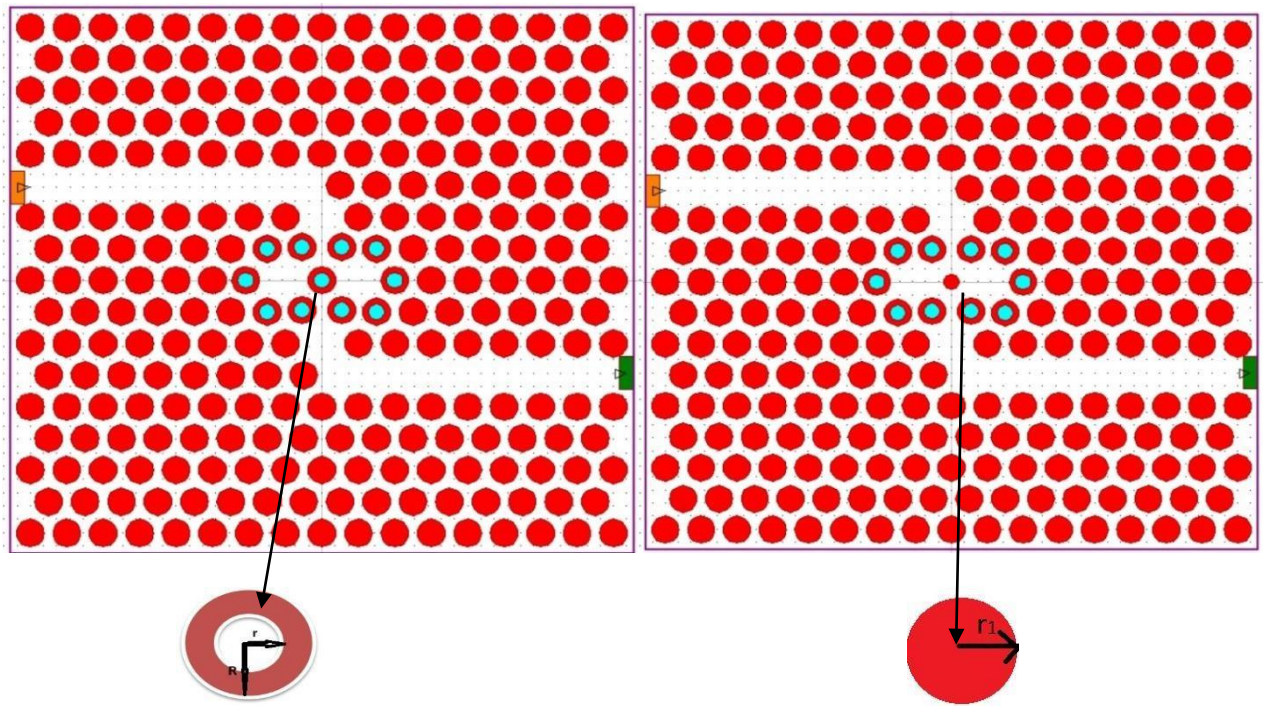


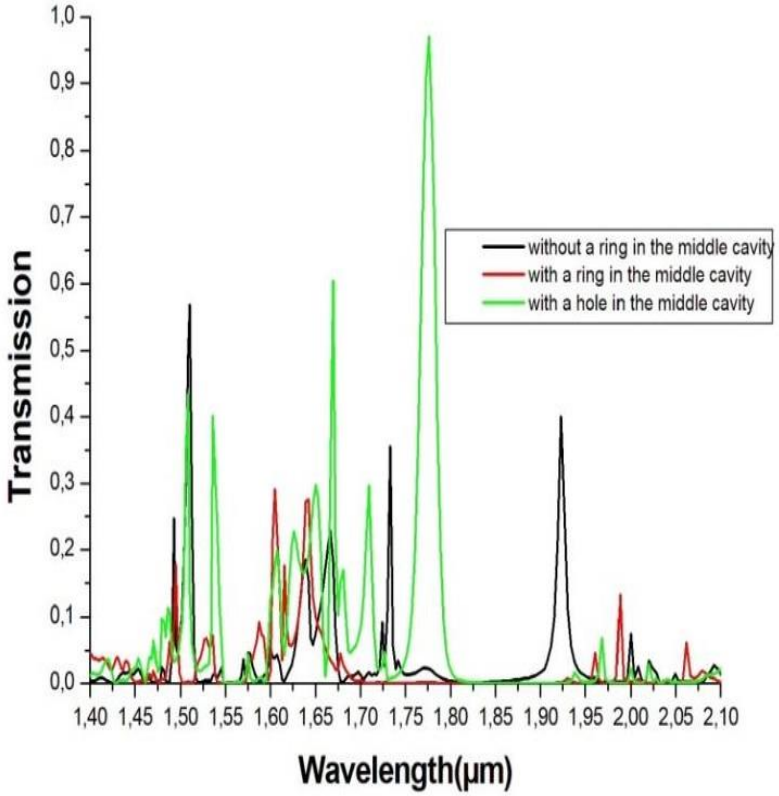
Figure III.12: *Structure d'un couplage cavité/guide :* ***(a)*** *avec un anneau dans la cavité centrale,* ***(b)*** *avec un trou dans la cavité centrale (R=209 nm, r=160 nm, r_1=140 nm et a= 550 nm).*

III.7.2. Etude de la transmission et de la sensibilité :

Premièrement, l'indice de réfraction *n* des trous et des cavités; est supposé égal à 1. Comme nous pouvons le voir sur la figure III.13(a), les deux pics de transmission sont observés à la résonance de longueurs d'onde de 1.612 µm pour le *mode 2* et de 1,641 µm pour le *mode 1*, concernant une cavité hexagonale irrégulière avec un anneau dans le centre, et de 1.9227 µm pour le *mode 1* et de 1,7337 µm pour le *mode 2*, concernant une cavité hexagonale irrégulière sans un anneau dans le centre, et de 1.775 µm pour le *mode 1* et de 1,67 µm pour le *mode 2*, concernant une cavité hexagonale irrégulière avec un trou dans le centre. On voit clairement que l'existence de trou dans la cavité centrale, se traduit par un décalage des longueurs d'onde de résonance et une augmentation de la transmission de 0.973 pour le *mode 1* et de 0.612 pour le *mode 1*.

Il apparaît clairement que la présence d'une cavité hexagonale irrégulière avec un trou dans la cavité centrale induit une perturbation des longueurs d'onde, Cela rend la cavité très sensible aux changements d'indice de réfraction en raison de la forte interaction lumière-matière.

(a)



(b) **(c)**

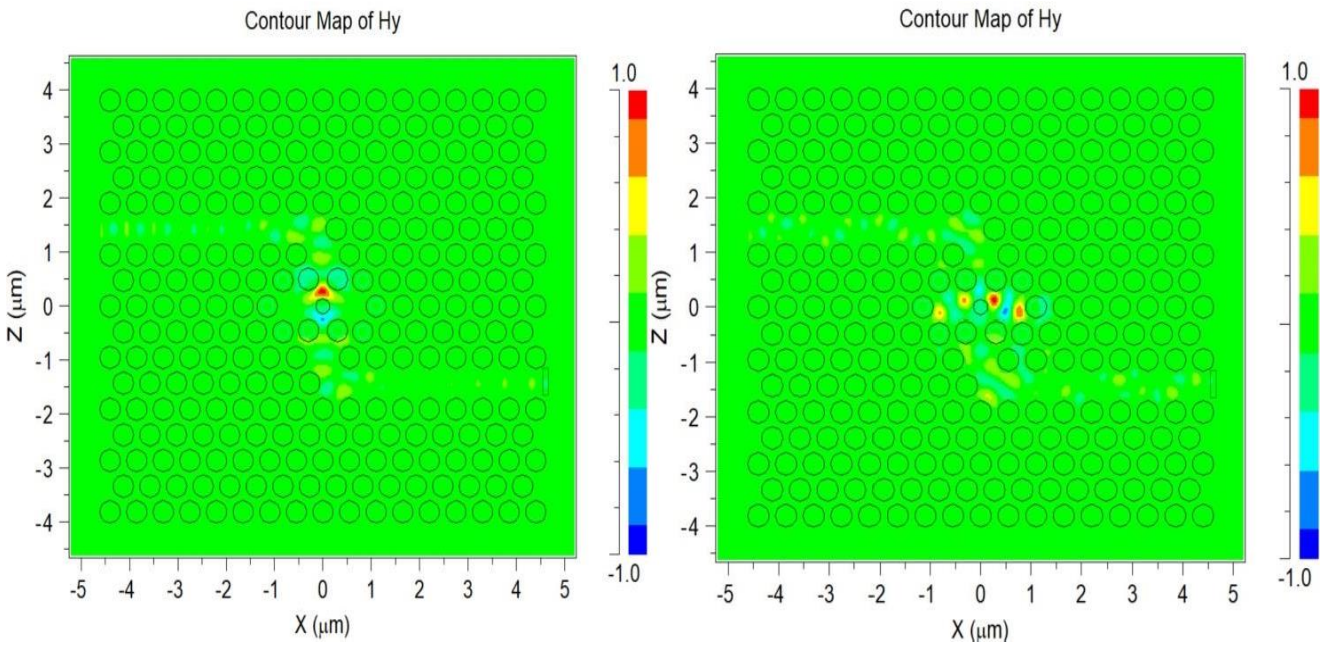


Figure III.13: (a) *Spectre de transmission de la structure couplage cavité/guide (sans un anneau dans la cavité centrale, avec un anneau dans la cavité centrale, avec un trou dans la cavité centrale pour n=1. La distribution du champ magnétique dans la structure avec un trou dans la cavité centrale dans le plan x-z à* $\lambda_{mode(2)} = 1.775\mu m$ ***(b),*** $\lambda_{mode(1)} = 1.670\mu m$ ***(c).***

Dans la figure *III.13 (b et c)*, la lumière incidente des longueur d'onde de 1,775µm dans le mode (1) et 1,670 µm dans le mode (2) est couplée au résonateur de la cavité hexagonale irrégulière avec un trou dans le centre , Cela le rend sensible aux changements d'indice de réfraction en raison de la forte interaction entre la lumière et le matériau.

A la figure *III.14*, les spectres de transmission de la structure 2 proposée (cavité hexagonale irrégulière avec un trou dans le centre) sont représentés pour différents indices de réfraction allant de 1 à 1,08 par pas de 0,02. L'augmentation de l'indice de réfraction n entraîne un décalage des spectres transmis vers les longueurs d'ondes les plus longues, avec un décalage plus important en mode 2 par rapport au mode 1.

En maintenant constants les autres paramètres existants et en augmentant l'indice de réfraction de n = 1 à 1.08, la sensibilité du premier mode est d'environ 384nm/RIU et pour le deuxième mode est d'environ 537nm/RIU.

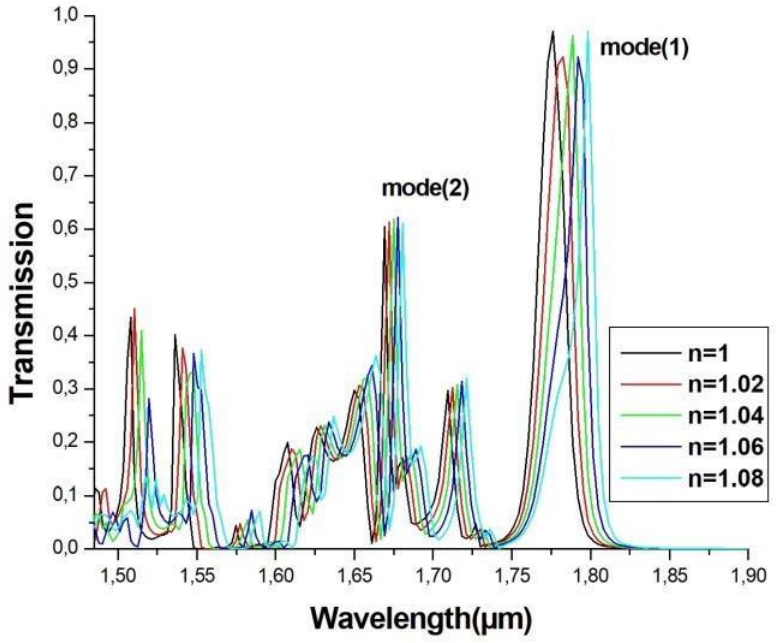


Figure III.14 : *Le spectre de transmission de la structure avec un trou dans la cavité centrale pour différents indices de réfraction n à R=209 nm, r_1=140 nm et a= 550 nm.*

L'indice de réfraction	Sensibilité (nm/RIU)
1	……
1.02	mode 1 : 386 et mode 2 :539.2
1.04	mode 1 : 389 et mode 2 :532
1.06	mode 1 : 381 et mode 2 :540.5
1.08	mode 1 : 382.5 et mode 2 :537

Tableau III.2 : *la sensibilité (S) de la structure avec un trou dans la cavité centrale en mode 1 et mode 2 en fonction de l'indice de réfraction (RI).*

D'après le tableau *III.1* et le tableau *III.2,* il est clair que la sensibilité est plus meilleure dans la deuxième structure que la première (plus de 2 fois).

III.7.3.Influence d'un rayon de trou (r_1) sur la sensibilité du Biocapteur :

Dans ce cas, nous avons analysé l'effet de différentes valeurs de r_1 sur les propriétés du biocapteur RI à base de cristaux photonique. Pour le biocapteur RI à base de cristaux photoniques, R a été fixé à 209 nm pour l'analyse suivante. Dans les spectres de transmission de l'indice 1 pour des valeurs de r_1 allant de 80 nm à 160 nm par pas de 20 nm dans la figure (*III.15)*, l'augmentation de la valeur r_1 est associée à une diminution de la longueur d'onde de résonance. Cela signifie que la valeur de r_1 provoque un décalage de la longueur d'onde de résonance.

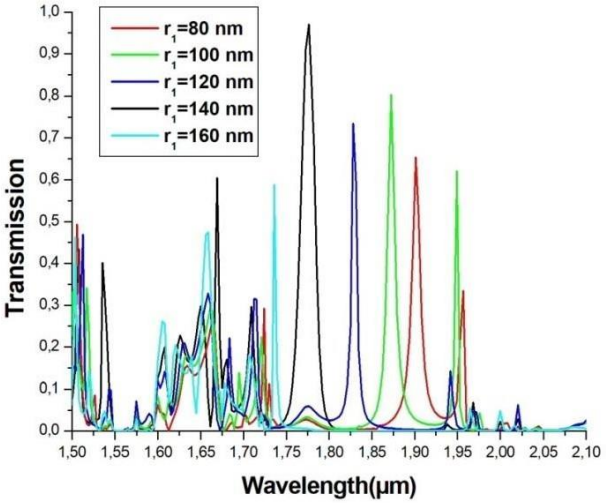


***Figure III.15*:** *Le spectre de transmission de la structure avec un trou dans la cavité centrale en fonction de r_1 pour n=1.*

Sur la figure (*III.16)*, il est clairement montré que plus la valeur de r_1 est élevée (80-140 nm), meilleures sont les performances du capteur. En outre, la sensibilité du biocapteur est obtenue en augmentant la valeur de r_1, pour le mode 1 la sensibilité est de 334 nm /RIU alors que dans le cas du mode 2, la sensibilité était de 437 nm / RIU, Cela correspond à une valeur de r_{in}= 160 nm, par rapport à la sensibilité de 305 nm/RIU pour le mode 1 et de 365 nm/RIU pour le mode 2, où r_1 était de 80 nm. Aussi, on remarque qu'il y a une très bonne amélioration de sensibilité pour différents changements de valeur de r_1 dans les deux modes, et on consiste quw la meilleur sensibilité est de 384 nm/RIU pour mode 2 et de 537nm/RIU pour mode 1 cela est pour r_1=140nm.

Les résultats de sensibilités pour les deux modes en fonctions de différentes valeurs de r_1 sont présentés dans le tableau *III.3*.

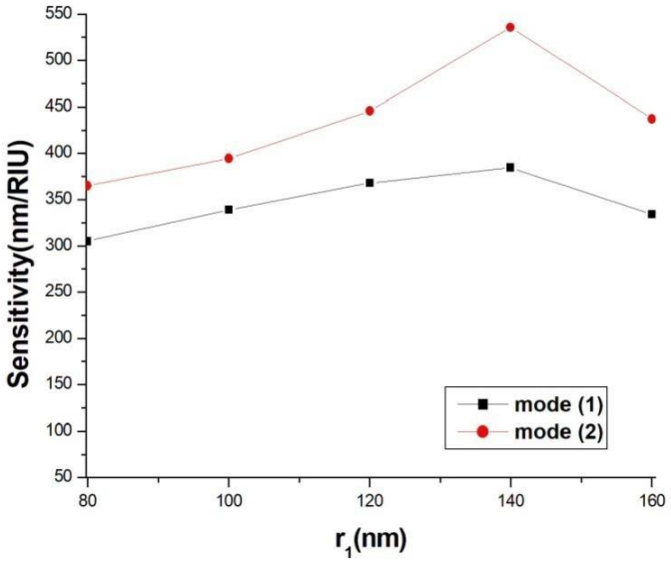


Figure III.16 : *La sensibilité en fonction du rayon r_1.*

Rayon r_1 (nm)	Sensibilité S (nm/RIU)
80	mode 1 : 305 et mode 2 :365
100	mode 1 : 339 et mode 2 : 394.5
120	mode 1 : 368 et mode 2 :445.8
140	mode 1 : 384 et mode 2 :537
160	mode 1 : 334 et mode 2 :437

Tableau III.3: *la sensibilité (S) de la deuxième structure en mode 1 et mode 2 en fonction du rayon intérieur de l'anneau (r_1).*

III.8. Exemple d'application :

III.8.1. Biocapteur de glucose :

En tant qu'exemple d'application de la dernière structure optimisée (structure avec un trou dans la cavité centrale avec r_1=140 nm), On va étudier le biocapteur optofluiquide pour détecter la concentration de glucose [74] dans une solution aqueuse.

Afin de simuler les conditions réalisées du capteur biologique proposé, l'indice de réfraction de la solution de glucose est décrit comme [74]:

$$n = 0.00011889C + 1.33230545 \text{……..(III.1)}$$

Où *C* et *n* représentent respectivement la concentration en (g / L) et l'indice de réfraction de la solution de glucose.

Pour analyser la relation entre le spectre de transmission et la concentration de glucose, on considère un échantillon dont la concentration est comprise entre 0 et 200 g/L dans la structure du biocapteur proposée. La variation de l'indice de réfraction de la solution de glucose dans la structure du biocapteur modifie la longueur d'onde de résonance du spectre. Dans ce cas, l'indice de réfraction de l'échantillon varie entre 1,33230545 et 1,35608345.

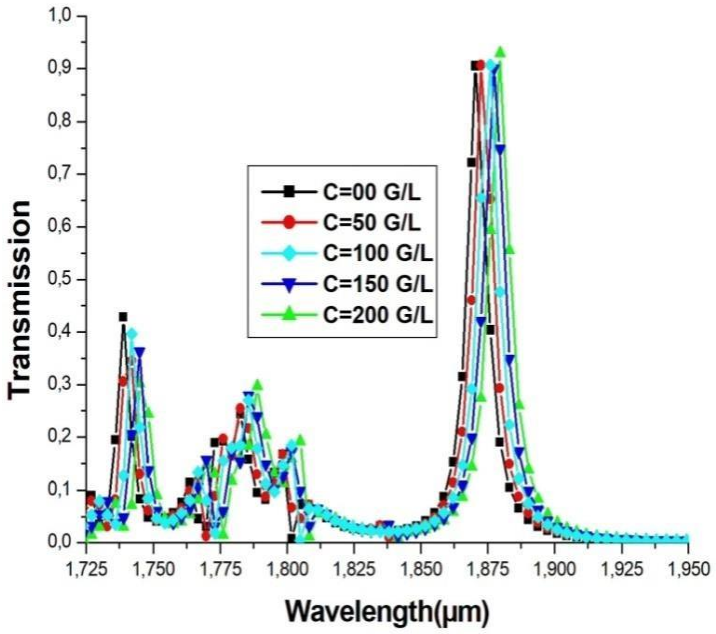


Figure III.17 : *Spectres de transmission correspondant à la variation de la longueur d'onde de résonance en fonction des différents cas de concentrations en glucose.*

Sur la figure *III.17*, on peut voir l'évolution du spectre de transmission du biocapteur de glucose dans la gamme de concentration allant de 0 à 200 g/L. Ainsi, selon la figure *III.17*, un décalage de 0.003180 µm du pic de résonance de sortie est calculé lorsque la concentration en glucose est augmentée de 50 g/L.

Les résultats de cette simulation montrent également que la sensibilité du biocapteur à un échantillon contenant une concentration de glucose comprise entre 0 et 200 g/l est égale à S = 535nm/RIU, Ce qui correspond à la plage du coefficient d'indice de réfraction de l'échantillon: 1,33230545-1,35608345.

III.8.2. Biocapteur des cellules cancéreuses :

Comme deuxième exemple d'application de la même structure (structure avec un trou dans la cavité centrale avec r_1=140 nm), nous allons considérer un capteur des cellules cancéreuses. Lorsque les cellules cancéreuses commencent à se développer dans le corps humain [75]. Les cellules basales normales ont un indice de réfraction de 1.36, lorsque les cellules cancéreuses commencent à se développer entre elles, leur indice de réfraction devient 1.38.

Le tableau *III.4*, montre la différence des valeurs des IR entre les cellules saines et celles affectées par un cancer, « Jurkat (cancer du sang), PC12(cancer des glandes surrénales), et MCF-7(cancer du sein - type 2) ».

Nom de cellule	Type de cellule avec niveau de densité	RI
Jurkat	cellule normale (30–70%)	1.376
	cancéreux (80%)	1.39
PC12	cellule normale (30–70%)	1.381
	cancéreux (80%)	1.395
MCF-7	cellule normale (30–70%)	1.387
	cancéreux (80%)	1.401

***Tableau III.4** : Certains types de cancer et leur RI [76,77].*

Sur la figure *III.18*, la transmission optimisée du biocapteur est calculée par 2D FDTD. Ces courbes sont obtenues pour des indices de réfraction *n*=1,36, 1,39, 1,395 et 1,401 correspondant à différents types de cellules cancéreuses (cellules normales, Jurkat, PC12, MCF-7). Cela montre que le pic de résonance se déplace vers des longueurs d'onde plus grandes à mesure que l'indice de réfraction augmente.

Le pic résonnant se déplace de 2,66 nm pour Δn=0,005 (Jurkat (leucémie) / PC12 (cancer des glandes surrénales)), ce qui permet au capteur d'atteindre une sensibilité de S_{mode1}= 532 nm / RIU et une transmission à 93 %.

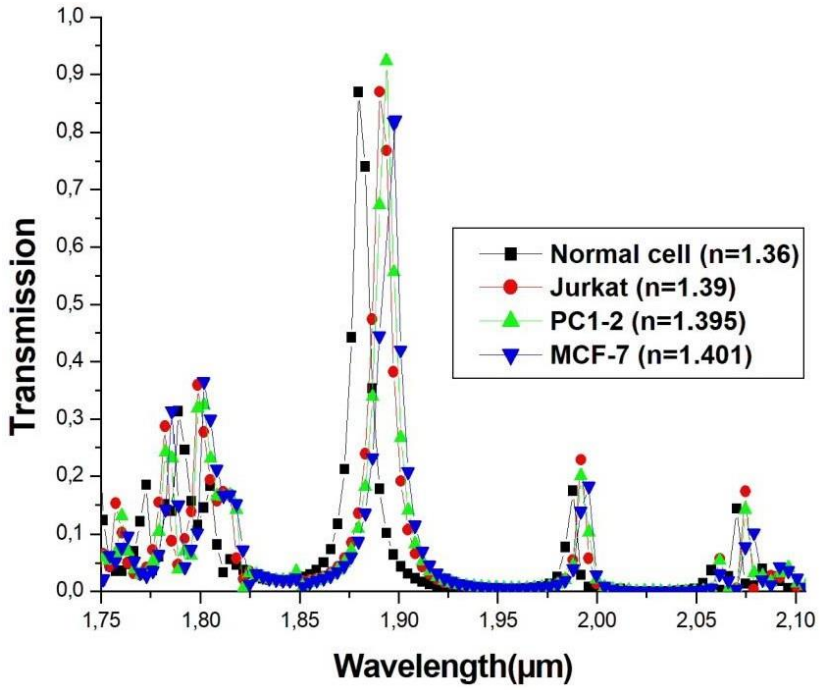


Figure III.18 : *Spectres de transmission correspondant à la variation de la longueur d'onde de résonance en fonction des différents types de cellules cancéreuses.*

Les résultats de sensibilités du biocapteur optimisé pour différents type de cellule sont présentés dans le tableau *III.5*.

nom de cellule	Indice de réfraction	Sensibilité (nm/RIU)
normal cell	1.36	
Jurkat	1.39	**532**
PC12	1.395	**537**
MCF-7	1.401	**541**

Tableau III.5 : *Sensibilité du biocapteur optimisé pour différents type de cellule.*

III.9. Comparaison du biocapteur RI proposé avec différents designs à bases CPs :

Le tableau *III.6* suivant montre une comparaison de la sensibilité (*S*) pour différents capteurs RI à bases CPs.

Références	Sensibilité (nm/RIU)	l'année
[78]	521	2022
[79]	571	2023
[80]	438.5	2024
Dans ce travail	537	2025

Tableau III.6 : *Comparaison du biocapteur RI proposé avec différents designs à bases CPs.*

III.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous présentons deux propositions de biocapteurs RI à cristaux photoniques 2D basés sur une cavité à guide d'ondes couplé. On a utilisé la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) intégrée dans le simulateur commercial R-Soft pour caractériser toutes les variantes de conception.

Notre première structure proposée est un guide d'ondes couplé à une cavité hexagonale irrégulière dans une configuration annulaire d'un biocapteur à indice de réfraction. Le positionnement des pics de transmission est intrinsèquement linéaire par rapport à l'indice de réfraction du matériau détecté. Cette structure présente une sensibilité linéaire maximale de S = 258 nm/RIU, S = 244,2 nm/RIU et S = 250 nm/RIU pour le mode 3, le mode 2 et le mode 1, respectivement, après optimisation des paramètres structurels.

Notre deuxième structure proposée est un guide d'ondes avec une cavité hexagonale irrégulière dans une configuration annulaire avec un trou dans la cavité centrale. Nous avons étudié la variation de la longueur d'onde et de la sensibilité S en fonction de la variation de l'indice de réfraction, et nous avons constaté que cette structure atteignait une sensibilité acceptable (384 nm/RIU pour le mode 2 et 537 nm/RIU pour le mode 1).

Finalement, nous avons montré que ce dispositif peut être utilisé pour détecter de faibles concentrations de glucose et de cellules cancéreuses dans une solution aqueuse avec une sensibilité très prometteuse (535 nm/RIU pour le glucose et 537 nm/RIU pour les cellules cancéreuses).

Conclusion générale

Conclusion générale :

Au cours de ce travail, nous avons mené une étude approfondie sur la conception et la simulation de biocapteurs optiques à base de cristaux photoniques bidimensionnels (CPs-2D), avec pour objectif principal le développement de capteurs à haute sensibilité pour des applications biomédicales.

Dans la première partie, nous avons présenté les cristaux photoniques en détaillant leur structure périodique, leurs différents types, leurs principes de fonctionnement et leurs domaines d'application. Ces structures offrent une capacité remarquable à contrôler la propagation de la lumière, ce qui les rend idéales pour le développement de capteurs optiques compacts et performants.

Dans la deuxième partie, nous avons fourni une description générale des capteurs, en soulignant leur rôle, leurs caractéristiques essentielles, ainsi que leur classification. Une attention particulière a été portée aux capteurs optiques, en mettant en évidence leurs avantages par rapport aux capteurs classiques. Nous nous sommes ensuite focalisés sur les capteurs d'indice de réfraction (RI) à base de cristaux photoniques, qui exploitent la variation de l'indice des milieux à détecter pour obtenir un signal optique mesurable.

La troisième partie a été consacrée à la modélisation, à la conception et à la simulation de plusieurs structures de biocapteurs, à l'aide des méthodes numériques PWE et FDTD implémentées dans le logiciel RSoft (BandSOLVE et FullWAVE). Une première structure à cavité hexagonale irrégulière a permis d'atteindre des sensibilités de 258 nm/RIU (mode 1)**,** 242 nm/RIU (mode 2) et 250 nm/RIU (mode 3)**.** Une deuxième structure optimisée, avec un trou au centre de la cavité, a significativement amélioré les performances, avec des sensibilités allant jusqu'à 384 nm/RIU (mode 2) et 537 nm/RIU (mode 1).

Parmi les applications concrettes étudiés, deux exemples biomédicaux ont permis d'évaluer les performances réelles du biocapteur développé.

D'une part, l'analyse de la concentration en glucose dans une solution aqueuse a démontré la capacité du dispositif à détecter des variations infimes de l'indice de réfraction, avec une sensibilité remarquable de 535 nm/RIU. Ce résultat positionne notre structure comme une solution prometteuse pour le suivi non invasif de paramètres métaboliques.

D'autre part, l'application du biocapteur à la détection de cellules cancéreuses — notamment les lignées Jurkat (leucémie), PC12 (cancer des glandes surrénales) et MCF-7 (cancer du sein) — a permis d'atteindre des sensibilités comprises entre 532 et 541 nm/RIU, tout en maintenant un taux de transmission supérieur à 93 %. Cette performance valide l'efficacité de la structure optimisée pour le diagnostic précoce du cancer, en se basant sur les variations subtiles de l'indice optique des cellules biologiques.

En conclusion, ce travail a mis en évidence le fort potentiel des CPs-2D pour la détection optique haute performance dans le domaine biomédical. Pour les perspectives futures, nous encourageons l'exploration de nouvelles configurations de cavités et guides d'ondes, ainsi que l'optimisation du facteur de qualité, afin d'atteindre une sensibilité encore plus élevée et une sélectivité accrue.

Bibliographie

[1] Andriy E. Serebryannikov (2012). "Basics of the Photonic Crystal Gratings, Photonic Crystals - Introduction, " Applications and Theory, Dr. Alessandro Massaro (Ed.), ISBN: 978-953-51-0431-5, InTech, Available from: http://www.intechopen.com/books/photonic-crystals-introduction-applications-and-theory/basics-of-thephotonic-crystal-gratings

[2] Deeksha rani ''design and analysis of all optical logic gates based on 2-d photonic crystals, '' Masters of engineering in electronics and communication engineering roll no. 801361006

[3] B.Ahlam, M.Sofiane ''Etude et simulation des cristaux photoniques,''mémoire de master, Département de génie électrique, Université de Kasdi Merbah Ouargla (2017)

[4] Tahar GHADBANE'' Simulation des métas matériaux à indice de réfraction négatif,'' MEMOIRE MAGISTER Option : Optique Appliquée, 2011.

[5] H. Malache and A. Mahi, *''*Nouvelles structures des démultiplexeurs en cristaux photoniques 2D pour les systèmes très hauts débits**,**'' Mémoire de Master, Spécialité : Systèmes des Télécommunications, Université AboubakrBelkaïd – Tlemcen, Faculté de Technologie, Algérie, 2019.

[6] C. Kittel, "Physique de L'état Solide", 7eme edn. (Dunod), Paris, (2005).

[7] Jonhson, S.G., **"**Guided modes in photonic crystal slabs**"**. Physical Review B, Vol.60, N°8, p. 5751-5758, 1999.

[8] Christian Grillet, ''Microcomposants optiques à base de cristaux photoniquesbidimensionnels pour l'optique intégrée,''Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2003.

[9] Guillaume Gomard, "Cristaux photoniques pour le contrôle de l'absorption dans les cellules solaires photovoltaïques silicium ultraminces", Thèse de Doctorat, L'École CentraledeLyon, Octobre 2012.

[10]. Melle BenaissaFatima, «Étude et Simulation de la Propagation des Ondes Électromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques» MEMOIRE MAGISTER EN PHYSIQUE, UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAÏD – TLEMCEN, 2013

[11] Fatima-Zohra MIROUH, "MODELISATION DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES PHYSIQUES ET GEOMETRIQUES DANS DES STRUCTURES PERIODIQUES: Application à un démultiplexeur", Thèse de Doctorat, Université Frères Mentouri – Constantine1, 2020.

[12] Marc ZELSMANN, "Cristaux photoniques en silicium sur isolant pour le guidage, le filtrage, l'émission et l'extraction de lumière", Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble 1, Novembre 2003.

[13] O. Painter, J. Vuckovic, et A. Scherer. "Defect modes of a two dimensional photonic Crystal in an optically thin dielectic slab". J. Opt. Soc. Am. B, vol. 16, p.275-285. 1999.

[14] J.M. Lourtioz, D. Maystre, H. Benisty, V. Berger, J. M. Gerard, A. Tchelnokov. "Le Cristaux photoniques ou la lumière en cage". GET et Lavoisier. Paris. 2003.

[15] BENDJEMAI Anes et SENHADJI Faiza,**"**Diviseurs à base des Résonateurs en Cristaux Photoniques **"**, mémoire de master, UniversitéAboubakr Belkaïd3 -Tlemcen,septembre 2020.

[16] Robert D Meade, A Devenyi, JD Joannopoulos, OL Alerhand, DA Smith, and K Kash. Novel applications of photonic band gap materials : Low-loss bends and high q cavities. *Journal of appliedphysics*, 75(9) :4753–4755, 1994.

[17] Jean-Michel LOURTIOZ, " Les cristaux photoniques Institut d'Électronique Fondamentale (IEF), " UMR 8622 du CNRS, Université ParisSud XI, Bât. 220, 91405 Orsay, France pp. 1-2.

[18] A. Sharkawy, S. Shi, D. W. Prather, and R. A. Soref, "Electro-optical switching using coupled photonic crystal waveguides", Optics Express, vol. 10, pp. 1048-1059, 2002.

[19] H. A. Badaoui, M. Feham, and M. Abri, "Double bends and Y-shaped splitter design for integrated optic,", Progress In Electromagnetics Research Letters, vol. 28, pp. 129-138, 2012.

[20] H. Takano, B.-S. Song, T. Asano, and S. Noda, "Highly efficient multi-channel drop filter in a two-dimensional hetero photonic crystal", Optics express, vol. 14, pp. 3491- 3496, 2006.

[21] A. Ghaffari, F. Monifi, M. Djavid, and M. S. Abrishamian, "Analysis of photonic crystal power splitters with different configurations " , Journal of Applied Science, vol. 8, pp. 1416-1425, 2008.

[22]A. Harhouz and A. Hocini, "Design of high-sensitive biosensor based on cavitywaveguides coupling in 2D photonic crystal", Journal of Electromagnetic Waves and Applications, vol. 29, pp. 659-667, 2015.

[23]E. Yablonovitch, "Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics,"*Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 20, pp. 2059–2062, 1987.

[24] K. Inoue and K. Ohtaka, Eds., *Photonic Crystals:*"Physics, Fabrication, and Applications." Springer, Berlin Heidelberg New York, 2004.

[25]C. Luo, S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos, and J. B. Pendry, "All-Angle Negative Refraction Without Negative Effective Index,"*Phys. Rev. B*, vol. 65, no. 20, 201104(R), 2002.

[26] J. D. Joannopoulos, "Photonic Crystals: Molding the Flow of Light." Princeton Univ. Press, Princeton, 1995.

[27]B. Gralak, S. Enoch, and G. Tayeb, "Anomalous Refractive Properties of Photonic Crystals," *J. Opt. Soc. Am.A*, vol. 17, no. 6, pp. 1012–1020, 2000.

[28] P. Vodo, P. V. Parimi, W. T. Wu, and S. Sridhar, "Focusing by Planoconcave Lens Using Negative Refraction,"*Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 20, 201108, 2005.

[29]Y. Saado, M. Golosovsky, A. Davidov, and A. Frenkel, "Near-Field Focusing by a Photonic Crystal Concave Mirror," *J. Appl. Phys.*, vol. 98, no. 6, 063105, 2005.

[30]L. Wu, M. Mazilu, J.-F.Gallet, and T. F. Krauss, "Dual Lattice Photonic-Crystal Beam Splitters," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 21, 211106, 2005.

[31] J. Schleuer and A. Yariv, "Circular Photonic Crystal Resonators,"*Phys. Rev. E*, vol. 70, no. 3, 036603, 2004.

[32]S. Nojima, “Long-Sojourning Light in a Photonic Atoll,” *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, vol. 9, no. 9, S425, 2007.

[33]S. Collardey, A.-C. Tarot, P. Pouliguen, and K. Mahdjoubi, “Use of Electromagnetic Band-Gap Materials for RCS Reduction,”*Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 44, no. 6, pp. 546–550, 2005.

[34]A. E. Serebryannikov, T. Magath, and K. Schuenemann, “Bragg Transmittance of s-Polarized Waves Through Finite-Thickness Photonic Crystals With Periodically Corrugated Interface,” *Phys. Rev. E*, vol. 74, no. 6, 066607, 2006.

[35]W. T. Lu, J. Y. Huang, P. Vodo, et al., “A New Mechanism for Negative Refraction and Focusing Using Selective Diffraction from Surface Corrugation,” *Opt. Express*, vol. 15, no. 15, pp. 9166–9175, 2007.

[36] A. E. Serebryannikov and E. Ozbay**,** “Unidirectional Transmission in Nonsymmetric Gratings Containing Metallic Layers,” *Opt. Express*, vol. 17, no. 16, pp. 13335–13345, 2009.

[37]A. E. Serebryannikov**,** “One-Way Diffraction Effects in Photonic Crystal Gratings Made of Isotropic Materials,”*Phys. Rev. B*, vol. 80, no. 15, 155117, 2009.

[38]A. O. Cakmak, E. Colak, A. E. Serebryannikov, and E. Ozbay**,** “Unidirectional Transmission in Photonic-Crystal Gratings at Beam-Type Illumination,”*Opt. Express*, vol. 18, no. 21, pp. 22283–22298, 2010.

[39] X.-F. Li, X. Ni, L. Feng, et al., “Sonic-Crystal-Based Acoustic Diode,”*Phys. Rev. Lett.*, vol. 106, no. 8, 084301, 2011.

[40]H. Caglayan, I. Bulu, and E. Ozbay**,** “Off-Axis Beaming From Subwavelength Apertures,”*J. Appl. Phys.*, vol. 104, no. 7, 073108, 2008.

[41]W. Smigaj, **“**Model of Light Collimation by Photonic Crystal Surface Modes,”*Phys. Rev. B*, vol. 75, no. 20, 205430, 2007.

[42] N. Le Thomas, R. Houdre, L. H. Frandsen, et al**.,** “Grating-Assisted Superresolution of Slow Waves in Fourier Space,” *Phys. Rev. B*, vol. 76, no. 3, 035103, 2007.

[43]N. Dermeche, “Étude théorique des cristaux magnéto-photoniques unidimensionnels pour l’amélioration de l’effet Faraday, ”Thèse de doctorat, Univ. de M’sila, Algérie, 2021.

[44]S. Kinoshita, S. Yoshioka, and J. Miyazaki, “The physics of structural colors,”*Rep. Prog.Phys.*, vol. 71, p. 076401, 2008.

[45]J. A. Noyes, P. Vukusic, and I. R. Hooper**,** “Experimental method for reliably establishing the refractive index of buprestid beetle exocuticle,”*Opt. Express*, vol. 15, pp. 4351–4358, 2007.

[46]A. R. Parker, D. R. McKenzie, and C. J. Large, “Multilayer reflectors in animals using green and gold beetles as contrasting examples,”*J. Exp. Biol.*, vol. 201, pp. 1307–1313, 1998.

[47]M. Kurachi, Y. Takaku, Y. Komiya, and Y. Hariyama, “The origin of extensive colour polymorphism in *Plateumarissericea* (Chrysomelidae, Coleoptera),”*Naturwissenschaften*, vol. 89, pp. 295–298, 2002.

[48]H. E. Hinton, “Some recent work on the colours of insects and their likely significance,”*Proc. Br. Ent. Nat. Hist. Soc.*, vol. 6, pp. 43–54, 1973.

[49]S. M. Doucet, M. D. Shawkey, G. E. Hill, and R. Montgomerie, “Iridescent plumage in satin bowerbirds: structure, mechanisms and nanostructural predictors of individual variation in colour,”*J. Exp. Biol.*, vol. 209, pp. 380–390, 2006.

[50] I. C. Cuthill, A. T. D. Bennett, J. C. Partridge, and E. J. Maier, “Plumage reflectance & the objective assessment of avian sexual dichromatism,” *Am. Nat.*, vol. 153, pp. 183–200, 1999.

[51]I. A. Sukhoivanov and I. V. Guryev,“*Photonic Crystals: Physics and Practical Modeling,* **”**Springer Series in Optical Sciences, Springer, USA, 2009, ISBN: 978-3-642-02645-4.

[52] Georges Asch et Coll, "Les capteurs en instrumentation industrielle, " 7e éd. Paris, France : Dunod, 2010.

[53] Lycées E. Pérochon et J. Desfontaines, section Sciences de l'Ingénieur. "capteurs _ cr"p1, 2.

[54] YacoubaSanogo "conception et fabrication de capteur et de leur technique dinterogation pourdes applications dons les domaines de la santé et de l'enivrement , " thèse de doctorat, 26 May 2014.

[55] A. Montrose, ″Développement d'un immunocapteur impédimétrique pour la détection et la quantification d'une sous-population cellulaire : Application au diagnostic précoce des infections″, Thèse de doctorat, Univ. Toulouse III - Paul Sabatier, Toulouse, France, 2013.

[56] M. I. Habia, ″Biocapteur Optique à Résonance, ″Thèse de doctorat, Univ. Ferhat Abbas Sétif 1, Institut d'Optique et de Mécanique de Précision, Sétif, Algérie, 2024.

[57] P. Damborský, J. Švitel, and J. Katrlík, "Optical biosensors," Essays Biochem., vol. 60, no. 1, pp. 91–100, 2016, doi: 10.1042/EBC20150010.

[58] A.harhouz , " Contribution à l'étude et la conception des capteurs à base de cristaux photoniques, "thèse du doctorat, Université Mohamed Boudiaf, Msila, 2017.

[59] K. E. Aiadi and F. Rehouma, "Les capteurs optiques , " in *Proc. SENALAP'99,* Alger, Algérie, 14–16 juin 1999, pp. 269–271.

[60] Benedetto Troia, Antonia Paolicelli, Francesco De Leonardis and Vittorio M. N. Passaro , "Photonic Crystals for Optical Sensing: A Review , " chapter book, Advances in Photonic Crystals, pp242-287, 2013

[61] E. Chow, A. Grot, L. W. Mirkarimi, M. Sigalas, and G. Girolami. "Ultracompact biochemical sensor built with two-dimensional photonic crystal microcavity , " Opt. Lett., 29(10), pp 1093, May 2004.

[62] M. Loncar, A. Scherer, Y. Qiu, "Photonic crystal laser sources for chemical detection, " Appl. Phys. Lett, Vol 82, N° 26, pp 4648–4650, 2003.

[63] M. R. Lee and P. M. Fauchet. "Two-dimensional silicon photonic crystal based biosensing platform for protein detection , " Opt. exp., 15(8), pp 4530–4535, 2007.

[64] A. Di Falco, L. O'Faolain, and T. F. Krauss, "Chemical sensing in slotted photonic crystal heterostructure cavities , " Appl. Phys. Lett., 94(6), 2009.

[65] H. Lin, Z. Yi, and J. Hu, "Double resonance 1-d photonic crystal cavities for single-molecule mid-infrared photothermalspectroscopy : theory and design , " Opt. Lett., 37(8), pp 1304–1306, 2012.

[66] Nina Skivesen, AmélieTêtu, Martin Kristensen, Jorgen Kjems, Lars H. Frandsen,and Peter I. Borel. " Photonic-crystal waveguide biosensor , " Opt. Express, Vol 15, N°6, pp 4648-4650, March 2007.

[67] M. C. Esselimani and M. Chergui, ″Bio-capteur à base de cristaux photoniques bidimensionnels (CP-2D) pour la détection de cellules cancéreuses, ″ Mémoire de Master, Univ. Yahia Farès de Médéa, Département du Génie Électrique, Médéa, Algérie, 2023.

[68] J. Topolancik, P. Bhattacharya, J. Sabarinathan, P. C. Yu, "Fluid detection with photonic crystal-based multichannel waveguides , " Appl. Phys. Lett, Vol 82, N° 8, pp1143–1145, 2003.

[69] G. Asch, "Les capteurs en instrumentation industrielle, " Dunod, (1993).

[70]M.FELLALI, " Etude et Conception d'un démultiplexeur 8 canaux à cristaux photoniques bidimensionnels, "thèse du doctorat, Université Mohamed Boudiaf, Msila, 2018.

[71]D. Botteldooren, "Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems, " J AcoustSoc Am, vol. 98, pp. 3302– 3308, 1995.

[72] S. Wang, "Finite-difference time-domain approach to underwater acoustic scattering problems," J AcoustSoc Am, vol. 99, pp. 1924–1931, 1996.

[73]E. Kuramochi, M. Notomi, S. Mitsugi, A. Shinya, T. Tanabe, et T.Watanabe, « Ultrahigh-Qphotonic crystal nanocavities realized by the local width modulation of line effect », Appl.Phys. Lett., Vol.88, N° 4, pp 041112-041113, 2006.

[74]S. Ghorbani, M. Sadeghi, Z. Adelpour, « A highly sensitive and compact plasmonic ring nano-biosensor for monitoring glucose concentration », Laser Physics, vol. 30, pp. 026204-026209, 2020.

[75]Why Is Early Diagnosis Important? |Cancer Research UK, (n.d.). Symptoms/why IsEarly-Diagnosis Important, Oct. 2021.

[76]H. Chopra, R.S. Kaler, B. Painam, Photonic crystal waveguide-based biosensor for detection of diseases, J. Nanophotonics 10 (2016), 036011.

[77]M.H. Sani, S. Khosroabadi, A novel design and analysis of high-sensitivity biosensor based on nano-cavity for detection of blood component, diabetes, cancer and glucose concentration, IEEE Sensor. J. 20 (2020) 7161–7168.

[78] Fellague Walid, Boukettab Fateh « Étude et conception d'un capteur de température à base des cristaux photoniques» UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA, 2022.

[79] Esselimani mohamed chaker, Chergui mohamed «Bio-capteur à base de cristaux photoniques bidimensionnels (CP-2D) pour la détection de cellules cancéreuses» UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA, 2023.

[80] FEKIH AKRAM, DAHMANI CHAIMA «Etude des microcavités à cristaux photonique couplée à un guide d'onde pour le diagnostic des globules rouge infectées par le paludisme (malaria)» UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA, 2024.