الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FA RES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département de Génie Électrique



Mémoire de Fin d'Études de Master

Filière : Électronique

Spécialité : Instrumentation

Thème

Etude des microcavités à cristaux photonique couplée à un guide d'onde pour le diagnostic des globules rouge infectées par le paludisme (malaria)

Préparé et présenté par,
FEKIH AKRAM
DAHMANI CHAIMA

Proposé et Dirigé par,
Dr. BEN SALAH HOCINE

Promotion 2024

Remerciements

Avant tout, nous remercions le BON DIEU pour nous avoir aidés à Accomplir ce présent travail.

Au nom de la science et de la technologie, au nom de la vertu du travail et de l'esprit d'élévation de la connaissance, nous tenons à exprimer tous nos respects à notre promoteur monsieur BENSALAH HOCINE, pour le sujet qu'il nous a proposé, Ses soutiens, ses précieux conseils et ses critiques positives.

Nous adressons tout Particulièrement à Mme MENASRI WAHIBA nos sincères reconnaissances et nos Remerciements les plus vifs, pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant la Présidence du jury. Nous voudrions également exprimer nos remerciements à monsieur ESKANDER REDAH qu'il veille bien trouver ici l'expression de notre profondes Reconnaissances pour avoir fait partie du jury.

En fin, que toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à la

Réalisation de ce projet, trouvent ici l'expression de nos profonds remerciements.

Dédicace

Je remercie mon Dieu le tout Puissant de m'avoir donné la force et le courage pour

Terminer mes études.

À mon père qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que Dieu lui procure bonne

Santé et longue vie. À ma chère mère que Dieu la garde dans son vaste paradis.

A mes très chers frères et soutiens, Tarek, Oussama, Hamza, Mahdi, Et à mes adorables sœurs.

Ainsi que mes amis, Siradj eddine Amrani, Zakaria Azzabi, Awsam Fekih, Fethi Bourkiza.

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents, pour leur soutien indéfectible tout au long

De ce parcours académique.

A mes chères sœurs.

A tous les membres de ma famille.

A mon professeur BENSALAH

Je vous en suis profondément reconnaissant.

Je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite.

Résumé

Les microcavités à cristaux photoniques sont des structures microscopiques capables de manipuler la lumière de manière précise et contrôlée, grâce à des matériaux spéciaux aux propriétés optiques uniques. Ce mémoire explore l'utilisation de ces microcavités, couplées à un guide d'onde, pour le diagnostic des globules rouges infectés par le paludisme (malaria). Lorsque les cristaux photoniques sont exposés à des échantillons de sang, ils interagissent avec les globules rouges, qu'ils soient sains ou infectés par le parasite *Plasmodium*. Cette interaction provoque des modifications dans les propriétés optiques des microcavités, telles que la réfraction ou la réflexion de la lumière. Ces changements optiques sont mesurés et analysés pour déterminer la présence et la concentration de globules rouges infectés.

Les biocapteurs basés sur les microcavités à cristaux photoniques offrent plusieurs avantages par rapport aux méthodes de diagnostic traditionnelles. Ils sont hautement sensibles, capables de détecter de faibles concentrations de globules rouges infectés, et permettent un diagnostic rapide et non invasif, essentiel pour le traitement efficace du paludisme, en particulier dans les zones à ressources limitées.

Ce travail propose une approche innovante et prometteuse pour le diagnostic du paludisme, combinant les avancées en photonique et en nanotechnologie pour répondre à un défi de santé mondial.
Mots clés : cristaux photoniques, biocapteur, guide d'onde.

ملخص

تعد التجاويف المجهرية في البلورات الضوئية هياكل مجهرية قادرة على معالجة الضوء بطريقة دقيقة ومتحكم فيها، وذلك بفضل موادها الخاصة التي تمتلك خصائص بصرية فريدة. يستكشف هذا البحث استخدام هذه التجاويف المجهرية، المرتبطة بدليل موجي، لتشخيص خلايا الدم الحمراء المصابة بالملاريا .عند تعرض البلورات الضوئية لعينات الدم، تتفاعل مع خلايا الدم الحمراء سواء كانت سليمة أو مصابة بطفيلي البلازموديوم. يؤدي هذا التفاعل إلى تغييرات في الخصائص البصرية لتجاويف المجهرية، مثل انكسار أو انعكاس الضوء. يتم قياس هذه التغييرات البصرية وتحليلها لتحديد وجود .وتركيز خلايا الدم الحمراء المصابة

تقدم أجهزة الاستشعار الحيوي القائمة على التجاويف المجهرية في البلورات الضوئية عدة مزايا مقارنة بالطرق التقليدية للتشخيص. فهي شديدة الحساسية، قادرة على اكتشاف تركيزات منخفضة من خلايا الدم الحمراء المصابة، وتتيح تشخيصًا سريعًا وغير جراحي، وهو أمر ضروري للعلاج الفعال للملاريا، خاصة في المناطق ذات الموارد المحدودة.

يقترح هذا العمل نهجًا مبتكرًا وواعدًا لتشخيص الملاريا، يجمع بين التقدم في الفوتونية وتقنيات النانو لمواجهة تحدي صحي عالمي.
الكلمات المفتاحية :البلورات الضوئية ،جهاز الاستشعار الحيوي ،الدليل الموجي.

Summary

Photonic crystal microcavities are microscopic structures capable of manipulating light in a precise and controlled manner, thanks to special materials with unique optical properties. This thesis explores the use of these microcavities, coupled with a waveguide, for diagnosing red blood cells infected with malaria. When photonic crystals are exposed to blood samples, they interact with red blood cells, whether healthy or infected by the Plasmodium parasite. This interaction causes changes in the optical properties of the microcavities, such as the refraction or reflection of light. These optical changes are measured and analyzed to determine the presence and concentration of infected red blood cells.

Biosensors based on photonic crystal microcavities offer several advantages over traditional diagnostic methods. They are highly sensitive, capable of detecting low concentrations of infected red blood cells, and allow for rapid and non-invasive diagnosis, which is essential for effective malaria treatment, particularly in resource-limited areas.

This work proposes an innovative and promising approach to malaria diagnosis, combining advances in photonics and nanotechnology to address a global health challenge.
Keywords: photonic crystals, biosensor, waveguide.

Liste des acronymes et abréviations :

CPhs : Cristaux photoniques.

BIP : Bande Interdite Photonique.

TE : Transverse Electrique, polarisation TE.

TM : Transverse Magnétique, polarisation TM.

λ : Longueur d'onde.

λ0 : Longueur d'onde de résonance.

a: Période du cristal photonique.

R : Rayon des motifs du cristal photonique.

n : Indice de réfraction.

ε : Permittivité diélectrique.

Δ : Le contraste d'indice.

E : Champ électrique.

H : Champ magnétique.

WDM : Wavelength Division Multiplexing, systèmes à multiplexage en longueur d'onde.

PICs : Photonics Integrated Circuits, circuits photoniques intégrés.

FDTD : Méthode de calcul des différences finies dans le domaine temporel.

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

RI : Réfractive Index.

S : Sensibilité.

Q : Facteur de Qualité.

LD : Limite de Détection.

RIU : unité de l'indice de réfraction

F : facteur de remplissage

SOI : SOI ou Silicon On Insulator (Le Silicium Sur Isolant)

Sommaire

Remerciements..... I

Dédicaces..... II

Résumé..... III

Liste des acronymes et abréviations..... IV

Sommaire..... V

Liste des figures..... VI

Liste des tableaux..... VII

Introduction générale..... VIII

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

I.1. Introduction..... 1

I.2. Les cristaux photoniques..... 1

I.2.1. Définition..... 1

I.2.2. Historique..... 2

I.3. Les types de cristaux photoniques..... 3

I.3.1. Les cristaux photoniques unidimensionnels..... 3

I.3.2. Les Cristaux photoniques bidimensionnelles..... 4

I.3.2.1. La réalisation des structures bidimensionnelles..... 4

I.3.2.2. Types de structures 2D..... 4

I.3.2.3. Familles de cristaux photonique 2D..... 5

I.3.3. Les Cristaux photoniques tridimensionnelles..... 5

I.4. Les caractéristiques principales des cristaux photoniques..... 6

I.4.1. Le contraste d'indice δ..... 6

I.4.2. La dimensionnalité..... 6

I.4.3. Facteur de remplissage F..... 7

I.4.4. Bande interdit..... 7

I.4.4.1. Ouverture d'une bande interdite omnidirectionnelle..... 7

I.4.4.2. Carte des bandes interdites..... 8

I.5. Les Défauts dans les cristaux photoniques..... 9

I.5.1. Les défauts ponctuels..... 9
I.5.2. Les défauts étendus..... 10
I.6. Microcavités à cristaux photoniques 2D..... 11
I.6.1. Les différents types de cavités..... 11
I.6.1.1. Cavité hexagonale..... 11
I.6.1.2. Les cavités linéiques..... 12
I.6.1.3. Cavité Carrée..... 13
I.6.1.3. Cavité triangulaire..... 13
I.6.2. Influence des paramètres géométriques sur les cavités..... 14
I.6.3. Facteur de qualité..... 15
I.7. Guide d'onde..... 16
I.7.1. Guide d'onde linéique..... 16
I.7.2. Guide d'onde courbée..... 17
I.8 Applications des cristaux photoniques..... 18
I.8.1. Les Filtre (Filtre ADD-DROP)..... 18
I.8.2. Capteurs à cristaux photoniques..... 19
I.9. Conclusion..... 19

Chapitre II : Généralités sur les capteurs

II.1. Introduction..... 22
II.2. Généralités sur les capteurs…..... 22
II.2.1. Définition..... 22
II.2.2. Différents types d'un capteur..... 23
II.2.2.1. Capteurs actifs…..... 23
II.2.2.2. Capteurs passifs…..... 23
II.3. Grandeurs d'influence..... 23
II.4. Caractéristique d'une capture..... 24
II.4.1. La sensibilité..... 24
II.4.2. Étalonnage..... 25
II.4.3. Temps de réponse et de recouvrement..... 25
II.4.4. Sélectivité..... 25

II.4.5. Domaine de linéarité..... 25
II.4.6. Réversibilité..... 25
II.4.7. Résolution..... 25
II.5. Définition d'un biocapteur..... 26
II.6. Biocapteur optique..... 26
II.7. Classification des biocapteurs…..... 27
II.8. capteurs optiques…..... 27
II.9. Capteur à fibre optique..... 28
II.10. Capteurs à cristaux photoniques…..... 28
II.11. État de l'art des capteurs à cristaux photoniques…..... 29
II.12. Capteurs d'indice de réfraction (RI) à base de CPs…..... 30
II.13. Capteur basé sur des guides d'onde à CPs..... 30
II.14. Capteurs à base de microcavités à CPs…..... 31
II.15. Conclusion..... 32

Chapitre III : Simulation et résultats

III.1. Introduction..... 34
III.2. Techniques de modélisation..... 34
III.2.1. La méthode FDTD (Finite Différence Time Domain..... 34
III.2.2. La méthode des ondes planes (PWE)..... 35
III.3. Présentation de l'outilles de simulation..... 35
III.3.1. Le simulateur « BandSOLVE »..... 35
III.3.2. Le simulateur «FullWAVE»..... 35
III.3.3. Fenêtre de programme de CAD..... 35
III.3.4. Présentation des autres applications..... 37
III.4. Présentation de la structure de base..... 37
III.4.1. Paramètres de la structure étudiée..... 38
III.4.2. Diagramme de bande interdite photonique..... 38
III.5. Guide d'onde sans cavité..... 39
III.6. Conception et analyse de biocapteur RI à base de guide-cavité couplée..... 40
III.6.1. Guide d'onde avec cavité hexagonale et cavité hexagonale irrégulière..... 40
III.6.1.1 Description de la première structure étudiée..... 40

III.6.1.2 Etude de la transmission et de la sensibilité.....42

III.6.2. Guide d'onde avec une cavité hexagonale irrégulière en configuration anneau.....46

III.6.2.1. Description de la deuxième structure étudiée..... 46

III.6.2.2. Exemple d'application (Capteur de paludisme).....47

III.6.2.3. Influence d'un rayon intérieur de l'anneau () sur la sensibilité du Biocapteur.....49

III.7. Conclusion.....51

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

Figure I-1 : Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D) Bidimensionnels (2D) et Tridimensionnels (3D).....2

Figure I.2: Schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un milieu diélectrique périodique fini.....3

Figure I.3 : structures bidimensionnelles:(a) connectée n1< n2 (b) déconnectée n1>n2.....5

Figure.I.4 : Structure 2D : (a) Structure carrée, (b) triangulaire et (c) hexagonale.....5

Figure I.5 : La première structure BIP 3D..... 6

Figure I.6: (a) Cristal photonique 2D, (b) Une bande interdite omnidirectionnelle est obtenue Dans le plan lorsque toutes les bandes interdites unidirectionnelles se recouvrent.....8

Figure I.7: Cartes des bandes interdites d'un réseau de trous d'air dans une matrice diélectrique (ε=11.4) : (a) Réseau carré ; (b) Réseau triangulaire.....9

Figure I.8 : les défauts ponctuels : (a) défauts lacunaires, (b) et (c) défauts de substitution..... 10

Figure I.9: Exemples de défauts linéaires dans un cristal photonique 2D créés : (a) en omettant une seule rangée de motifs, (b) en variant le rayon d'une seule rangée de motifs de la structure.....10

Figure I.10 : Quelques exemples des types de cavités à défauts ponctuels.....11

Figure I.11 : Signatures spectrales de cavités hexagonales.....12

Figure I.12 : Exemples de cavités de types Ln : (a) cavité L3, (b) cavité L5, (c) cavité L7..... 13

Figure I.13 : Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique a réseau carré.....13

Figure I.14 : (a) Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire, (b)spectre de photoluminescence d'une cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire de trous d'air..... 14

Figure I.15: Réponse spectrale d'une cavité..... 16

Figure I.16: Représentation réelle d'un guide d'onde de largeur W à base d'un CP2D.....17

Figure I.17 : Virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel.....18

Figure I.18 : La structure et le principe de fonctionnement d'un filtre Add- Drop, une rangée a été éliminée pour guider les ondes avec des fréquences f1, f2, …, fi et les défauts ponctuels pour Extraire les fréquences désirées fi, ...fj..... 18

Chapitre II : Généralités sur les capteurs

Figure II.1 : Définition d'un capteur..... **22**

Figure II.2 : Courbe d'étalonnage d'un capteur..... **25**

Figure II.3. : Principe de fonctionnement d'un biocapteur.....**26**

Figure II.4. : Classification schématique des biocapteurs en fonction des couches Biologiques.....**27**

Figure II.5: Schéma du capteur d'ADN à base de PhC caractérisé par des guides D'ondes monomodes d'entrée et de sortie de 500 nm de largeur.....**31**

Figure II.6. Le principe de transduction optique d'un résonateur à CPs.....**32**

ChapitreIII : Simulation et résultats

Figure III.1: La fenêtre de programme de R Soft CAD, montrant la barre de menus au-Dessus, les barres des outils supérieurs et gauches, et la ligne d'état au fond.....**36**

Figure III.2 : (a) Structure du cristal photonique formé par un réseau Hexagonal 23×23. (b) Distribution de l'indice de réfraction d'un cristal photonique hexagonal.....**37**

La Figure III.3 : (a) Diagramme de dispersion du CP-2D dans la membrane Si (un réseau Hexagonal de trous d'air, a=0.430, r=0.14, f=33%.) calculé par la PWE. (b) La présentation du Spectre de transmission calculé par la FDTD-2D.....**39**

Figure III.4 : (b) Spectre de transmission guide droit référence en mode TM. (a) Distribution spatiale du champ à la suite d'une simulation de type FDTD et une excitation de type CW du guide droit référence , pour une polarisation TM à λ=1.55µm.....**40**

Figure III.5 : (a) structure avec une cavité hexagonal, (b) structure avec une cavité hexagonale irrégulière..... **41**

III.6 : (a) Spectre de transmission du deux guides d'onde et sans cavité. (b) Distribution spatiale du champ à la suite d'une simulation de type FDTD et une excitation de type CW, pour une polarisation TM à λ=1.55µm.....**42**

Figure III.7 : Les spectres de transmission de la première structure étudiée avec n air =1, R = 140nm.....**43**

Figure III.8 : la Distribution du champ magnétique dans la cavité mode on /off : (λ=1.80 (a) et λ res =1.821 (b)) et (λ=1.82 (c) et λ res =1.8541 (d)..... **44**

Figure III.9 :(a) le spectre de transmission de la structure pour différents indices de réfraction n a R=140nm et a =430nm, (b) la langueur d'onde de résonance en fonction de l'indice réfraction n dumatériau à détecter..... 45

Figure III.10 : Structure avec une cavité irrégulière hexagonale Et ring avec = 0.14 µm et = 0,08 µm.....46

Figure III.11: (a) Spectre de transmission de la 3 éme structure pour n=1, R= 0.14 µm et = 0,08 µm.....47

Figure III.12: Spectre de transmission correspondant à la variation de la longueur d'onde de résonance en fonction des différents l'indice de réfraction de l'analyte de 1.373 à 1 .402.....49

Figure III.13 : (a)Spectre de transmission de la deuxième structure pour différentes valeurs de , (b) La langueur d'onde de résonance en fonction de rayon..... 50

Figure III.14 : La variation de sensibilités en fonction de déférentes valeurs de rayon.....50

LISTE DES TABLEAUS :

Tableau III.1 : La sensibilité (S) en fonction de l'indice de réfraction (RI).....**45**

Tableau III.2 : Certains types de paludisme et leur RI [1.373-1.402].....**48**

Table III.3: La variation de sensibilités (S) pour deux modes, en fonction de rayon.....**51**

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années, de nouvelles technologies ont été proposées afin de développer des besoins industriels dans divers domaines, notamment dans le domaine de la photonique. Parmi ces techniques figure la fabrication de structures à partir de cristaux photoniques de silicium.

Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans une, deux ou trois dimensions. Ce milieu périodique qui se propage dans le cristal photonique a un effet analogue à celui du potentiel périodique sur les électrons dans un cristal. De même qu'il existe pour des électrons des bandes d'énergie permises et des bandes interdites, il existe des bandes photoniques d'états permises et des bandes photoniques interdites. Une bande photonique correspond à un mode qui se propage dans le cristal photonique. Une bande interdite photonique (BIP) correspond à un intervalle d'énergie ou la propagation de la lumière est interdite dans certaines directions du cristal photonique. Les cristaux photoniques offrent la possibilité de contrôler la propagation de la lumière et ceci, sur une dimension de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde dans le matériau. C'est notamment cette propriété qui les rend intéressants pour de nombreuses applications [1].

Ces structures permettent la réalisation de nombreux composants tels que des filtres, des capteurs, des guides, des lasers sans seuil et des microcavités. Le BIP 3D (bande interdite photonique à trios dimensions) a une zone interdite omnidirectionnelle. Cependant, compte tenu des dimensions requises (de l'ordre de la longueur d'onde), leur réalisation est techniquement délicate. La recherche s'est donc concentrée sur les cristaux 2D pour le développement de composants optiques intégrés planaires de taille significativement réduite (plusieurs microns pour les applications optiques). Le but de l'étude du cristal photonique est d'améliorer la largeur de la bande interdite optique. Plus la bande interdite PhC est grande, plus les performances de la structure sont élevées. La symétrie structurelle est essentielle pour le contrôle de la bande interdite optique [2].

Actuellement, les capteurs sont devenus un élément crucial pour mesurer l'impact de divers phénomènes sur notre environnement. En surveillant les liens entre les individus, la technologie et l'environnement, les capteurs ont commencé à jouer un rôle de plus en plus important.

L'application des cristaux photoniques en tant que capteurs constitue un domaine de recherche très prometteur en raison de leur extrême miniaturisation, leur haute sensibilité spectrale et leur intégration possible dans les MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) [3].

De nos jours, Les capteurs d'indice de réfraction (RI) représentent la classe la plus répandue des capteurs à base de CP-2D. Une grande partie des composants photoniques reposent sur les technologies du SOI (Silicon On Insulator) et du silicium, car elles sont compatibles avec les techniques de fabrication de la microélectronique permettant en particulier d'envisager des productions massives à faible coût des micro-dispositifs.

Comme l'indice de réfraction de toute substance est lié à différents paramètres, la fabrication de divers capteurs pour mesurer la température, la pression, l'humidité et la concentration des produits chimiques sont applicables.

Notre travail porte sur l'étude des microcavités à cristaux photoniques couplées à un guide onde pour le diagnostic des globules rouges infectées par le paludisme (malaria) à base de cristaux photoniques bidimensionnels (CP-2D) pour application en optique intégrée.

Pour mener ce travail à bien, nous avons entrepris la simulation d'une structure bidimensionnelle de trous d'air percés dans une matrice de Silicium. La méthode d'expansion d'onde plane (PWE) et la méthode du domaine temporel de différence finie (FDTD) sont utilisées pour analyser et simuler les caractéristiques de la structure proposée. Dans ce contexte, ce mémoire s'articule autour de trois chapitres.

Le premier chapitre représente une synthèse bibliographique sur les cristaux photoniques et des définitions de bases relatives à ces matériaux. Il comporte également les différents types de cristaux photoniques, leurs caractéristiques et les principaux défauts existants.

Le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur les capteurs et les différents types de capteurs existants. Puis nous parlerons des biocapteurs à cristaux photoniques et leur classification, ainsi que des capteurs optiques et leurs différents types.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des méthodes numériques utilisées, plus particulièrement la méthode des ondes planes (PWE), et celle des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Nous présentons par la suite les logiciels RSoft (FullWAVE et BandSOLVE), utilisés pour la modélisation des structures à cristaux photoniques qui sont exploités dans ce travail.

Finalement, on termine par une conclusion générale qui regroupe tous les principaux résultats de ce travail.

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

I.1. Introduction

Dans le domaine de la photonique, l'étude des cristaux photoniques est hautement significative en raison de leurs propriétés optiques uniques et de leurs applications diverses. Les cristaux photoniques, tout comme les semi-conducteurs qui contrôlent le flux d'électrons, sont des structures périodiques qui dirigent le flux de lumière. Ce chapitre explore en détail les concepts fondamentaux et les propriétés complexes des cristaux photoniques lors de leur interaction avec les ondes lumineuses.

L'analyse des cristaux photoniques inclut une étude approfondie de leurs caractéristiques optiques telles que les bandes interdites, les relations de dispersion et les structures de bandes photoniques. La compréhension de ces aspects est essentielle pour tirer profit du potentiel des cristaux photoniques dans divers dispositifs et systèmes optiques. En outre, les méthodes de fabrication et de caractérisation utilisées pour créer et évaluer les cristaux photoniques ; jouent un rôle crucial dans l'avancement continu du domaine de la photonique.

I.2. Les cristaux photoniques

I.2.1. Définition

Les cristaux photoniques sont des motifs périodiques de matériaux diélectriques ou métalliques conçus pour altérer la propagation des ondes électromagnétiques. Ces nanostructures influencent la propagation des photons de manière analogue aux cristaux conventionnels sur les électrons, permettant (à certaines longueurs d'onde) de se propager, tandis que d'autres sont interdites. Cette capacité permet de manipuler la lumière sans perte d'intensité, ouvrant ainsi la voie à de nombreuses applications industrielles et technologiques [3].

La périodicité peut être unidimensionnelle (miroir de Bragg), bidimensionnelle ou encore tridimensionnelle (Figure**I**-1) [4].

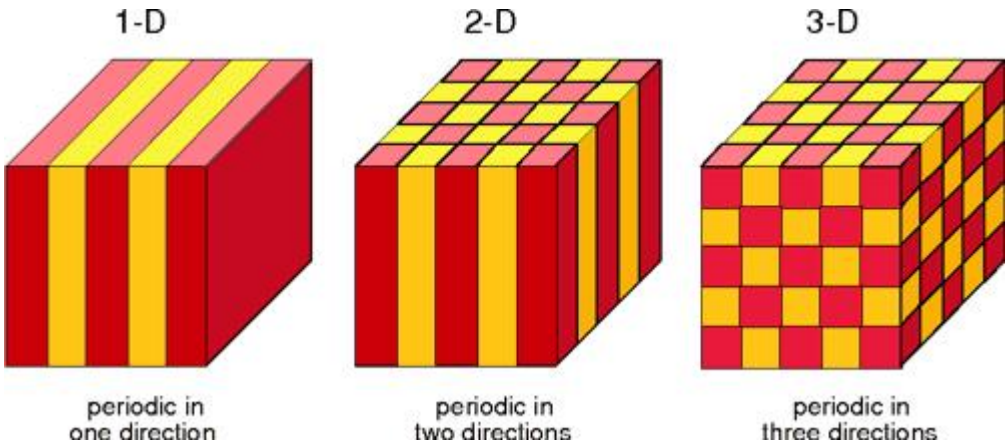


Figure I-1 : *Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D) Bidimensionnels (2D) et Tridimensionnels (3D).*

I.2.2. Historique

Les cristaux photoniques, aussi connus sous le nom de *cristaux optiques*, ont une histoire fascinante qui remonte aux années 1980. En 1987, le concept de "cristaux photoniques" a été introduit pour la première fois par Yablonovitch, marquant le début d'une exploration approfondie de ces structures périodiques composées de matériaux diélectriques ou métalliques, conçues pour altérer la propagation des ondes lumineuses [1], en passant par les premières études numériques en 1990, puis le premier cristal photonique a été réalisé en 1991,[2] inaugurant une nouvelle ère dans la manipulation de la lumière. Ces cristaux se distinguent par leur capacité à contrôler la propagation de la lumière à une échelle de longueur d'onde dans le matériau, ouvrant ainsi la voie à des possibilités innovantes pour diverses applications.

Parmi les exemples figure la fabrication de miroirs offrant une réflectivité extrêmement élevée, ce qui est très bénéfique pour améliorer la diffusion de la lumière. On compte également la création de guides d'ondes à faible perte grâce aux lasers, permettant de diriger efficacement la lumière vers les dispositifs optoélectroniques employés dans les télécommunications. De plus, il y a l'optimisation de la captation de lumière dans les cellules solaires et plus récemment, le développement de capteurs à haute sensibilité de taille réduite.

Au fil du temps, la recherche s'est focalisée sur les cristaux photoniques en deux dimensions, qui ont atteint un niveau de maturité propice au développement d'applications concrètes. Bien que la fabrication de cristaux photoniques en trois dimensions reste un défi technologique en raison des dimensions requises ; ces structures continuent d'attirer l'attention en raison de leurs propriétés uniques et de leur potentiel dans des domaines tels que les filtres optiques, les guides d'ondes, les lasers sans seuil, et bien d'autres encore [1].

I.3. Les types de cristaux photoniques

Les cristaux photoniques peuvent être classés en différents types en fonction de leur dimensionnalité :

- À une dimension (1D).
- À deux dimensions(2D).
- À trois dimensions(3D).

I.3.1. Les cristaux photoniques unidimensionnels

Les réseaux de Bragg ont une utilisation courante des cristaux photoniques unidimensionnels, représentant la forme la plus simple de ces structures, comme illustré dans la figure I.2. Les cristaux photoniques unidimensionnels sont parmi les plus anciens modèles et ont été largement étudiés et utilisés. Ils sont obtenus en empilant des couches de matériaux diélectriques avec des indices de réfraction différents. Ces structures consistent en une alternance périodique de deux milieux diélectriques avec des constantes diélectriques respectives ε1 et ε2 dans une seule direction de l'espace [5].

Pour comprendre ces structures, une approche traditionnelle consiste à laisser une onde plane se propager à travers le matériau et à considérer les multiples réflexions et transmissions qui se produisent à chaque interface, ainsi que les changements de phase des ondes planes se propageant de couche en couche. Sur la base de ce concept, une méthode matricielle a été introduite par Yeh pour modéliser la propagation des ondes électromagnétiques dans des couches de différents milieux [5].

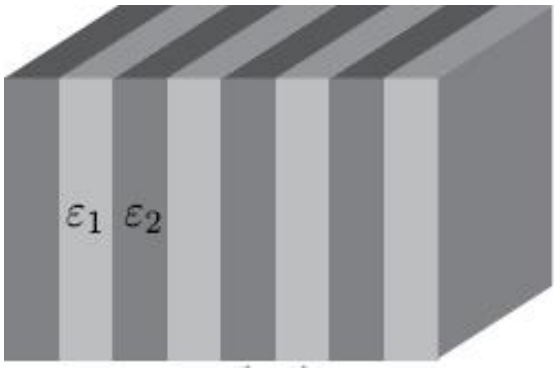


Figure I.2: *Schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un milieu diélectrique périodique fini.*

Les bandes interdites de cette structure, également connue sous le nom de miroir de Bragg; varient en fonction de l'angle d'incidence de l'onde. Ainsi, pour garantir un contrôle des bandes interdites indépendamment de l'angle d'incidence, il est nécessaire d'étendre la périodicité de la structure à deux ou trois dimensions [5].

Les applications des structures unidimensionnelles sont diverses, comprenant des filtres sélectifs de longueur d'onde, des multiplexeurs, des convertisseurs de modes pour les fibres optiques, la compensation de la dispersion, ainsi que des lasers spéciaux à bande étroit [6].

I.3.2. Les Cristaux photoniques bidimensionnelles

Un cristal photonique bidimensionnel est une structure caractérisée par une modulation périodique de la permittivité diélectrique dans deux directions de l'espace, tandis qu'elle reste homogène dans la troisième direction.

I.3.2.1. La réalisation des structures bidimensionnelles

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces structures bidimensionnelles. Par exemple, des tiges diélectriques peuvent être disposées dans l'air ou dans un autre matériau diélectrique.

Pour obtenir des bandes interdites larges, un contraste d'indice significatif (différence entre les indices du milieu et des tiges) est nécessaire [7].

Alternativement, un cristal photonique bidimensionnel peut être constitué d'un ensemble de trous percés dans un matériau diélectrique. Les caractéristiques optiques de ces structures dépendent de la polarisation et peuvent ne pas présenter une bande interdite complète. Une bande interdite est dite complète lorsqu'elle interdit la propagation pour toutes les directions dans le plan de la périodicité, indépendamment de la polarisation [5].

I.3.2.2. Types de structures 2D

Les cristaux photoniques bidimensionnels se composent soit d'un réseau périodique de trous d'air percés dans un matériau diélectrique (structure connectée), soit de piliers de diélectrique dans l'air (structure déconnectée), Il existe deux types de structures périodiques diélectriques :

- Les structures dites « connectées » (figure I.3.a), où les motifs élémentaires ont un indice inférieur à celui de la matrice diélectrique ($n1 < n2$).
- Les structures dites « déconnectées » (figure I.3.b) sont caractérisées par des motifs élémentaires ayant un indice n1 supérieur à celui de l'espace inter-motifs, noté n2. Elles sont

composées de tiges diélectriques ou métalliques alignées de manière périodique dans l'air ou dans de la mousse [8].

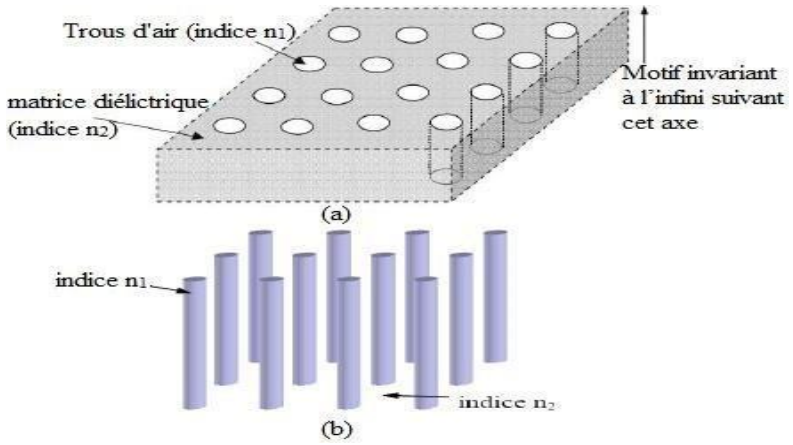


Figure I.3 : *structures bidimensionnelles:(a) connectée n1 < n2 (b) déconnectée n1>n2*

I.3.2.3. Familles de cristaux photonique 2D

Les structures bidimensionnelles se divisent principalement en trois catégories, caractérisées par les trois types de réseaux les plus fréquemment utilisés pour disposer les piliers (ou les trous) : le réseau carré, triangulaire et hexagonal (voir Figure I.4) [8].

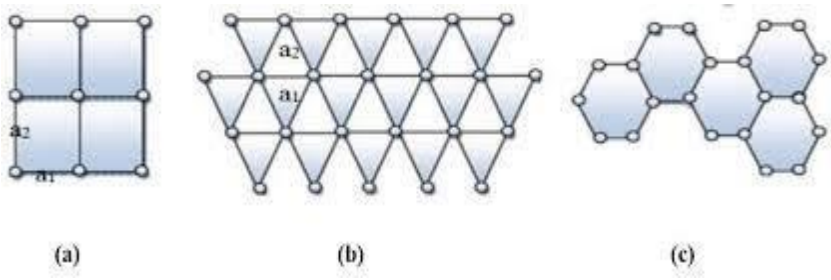


Figure.I.4 : *Structure 2D :* ***(a)*** *Structure carrée,* ***(b)*** *triangulaire et* ***(c)*** *hexagonale.*

I.3.3. Les Cristaux photoniques tridimensionnelles

Les cristaux photoniques tridimensionnels sont des structures où la permittivité diélectrique est périodiquement structurée dans les trois dimensions. Ils ont été développés par Yablonovitch après

les réseaux de Bragg, dans le but de créer une bande interdite complète pour toutes les directions de l'espace, afin de supprimer l'émission spontanée de lumière [9].

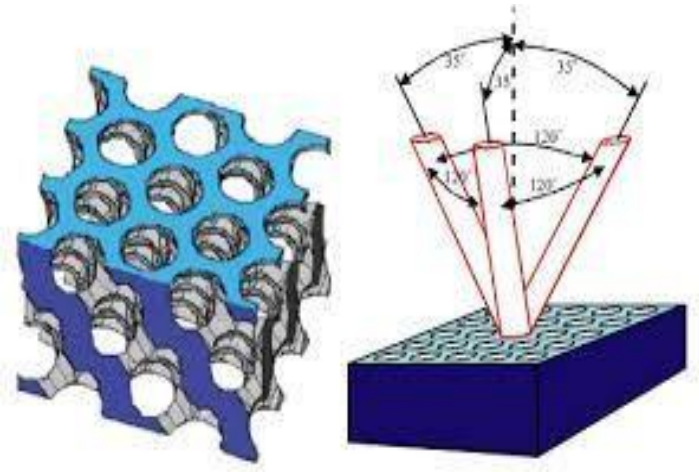


Figure I.5 : *La première structure BIP 3D.*

I.4. Les caractéristiques principales des cristaux photoniques

I.4.1. Le contraste d'indice δ

Rapport entre les indices des deux matériaux, qui peut être comparé à la hauteur de la barrière de potentiel de la physique du solide.

$$\delta = n_h/n_l \quad \text{.....(I.1)}$$

Avec :

n_h : l'indice de réfraction du matériau de haut indice.

n_l : l'indice de réfraction du matériau de faible indice [11].

I.4.2. La dimensionnalité

Elle dépend de la régularité dans la variation de l'indice de réfraction. La régularité peut se manifester à une, deux ou trois dimensions dans un cristal photonique [12].

I.4.3. Facteur de remplissage F

En ce qui concerne le réseau bidimensionnel, le facteur de remplissage en air, noté ***F,*** représente le rapport entre la surface du motif (un disque) et la surface de la cellule élémentaire du réseau considéré [10].

Pour des motifs circulaires de rayon **r** dans un cristal carré avec une période **a**, le facteur de remplissage dans l'air peut être défini de la manière suivante :

$$= \quad ( )^2 \qquad \text{(I.2)}$$

Pour des motifs circulaires de rayon r dans un cristal triangulaire avec une période **a** , le facteur de remplissage dans l'air peut être exprimé par la formule suivante [12]:

$$F = \frac{2}{\sqrt{3}} ( )^2 \qquad \text{(I.3)}$$

I.4.4. Bande interdit

La bande interdite photonique, parfois appelée "band gap", est une caractéristique des cristaux photoniques qui bloque la propagation de la lumière dans certaines plages de longueurs d'onde.

La bande interdite peut être bande interdite TM (transverse magnétique) ou bande interdite TE (transverse électrique), ou même les deux ensembles.

I.4.4.1. Ouverture d'une bande interdite omnidirectionnelle

Pour obtenir une bande d'énergie interdite dans toutes les directions du plan ou de l'espace, il est nécessaire d'étendre la périodicité de l'indice diélectrique à deux ou trois dimensions. Un exemple concret est illustré par le cristal photonique bidimensionnel représenté dans la figure I.6 (a).

Peu importe l'orientation de propagation dans le plan d'une onde lumineuse, elle traverse une structure diélectrique périodique. Chaque direction d'incidence **i**, **k** est associée à une bande interdite unidimensionnelle. Lorsque toutes ces directions partagent une plage spectrale commune, cela forme une bande d'interdiction omnidirectionnelle dans le plan (Figure I.6 (b)). Pour obtenir une bande d'interdiction dans tout l'espace, un cristal photonique tridimensionnel est nécessaire.

Pour ouvrir une bande d'interdiction dans le plan ou dans l'espace, toutes les bandes d'interdiction unidirectionnelles doivent se superposer au moins partiellement sur la première zone de Brillouin. Le degré de superposition sera maximal si les bandes d'interdiction sont centrées à des énergies proches. La situation la plus favorable est lorsque la zone de Brillouin est aussi isotrope que

possible. Les réseaux qui se rapprochent le plus de cette condition sont le réseau triangulaire à deux dimensions et le réseau cubique à faces centrées à trois dimensions.

Pour obtenir des bandes d'énergie interdites larges, le contraste d'indice doit être suffisamment élevé. Pour un réseau triangulaire, un contraste d'indice supérieur à 2.6 est requis pour ouvrir une bande d'interdiction dans tout le plan. Aux longueurs d'onde du proche infrarouge utilisées en optique intégrée ; les semi-conducteurs présentent à la fois un indice de réfraction élevé (entre 2.5 et 4) et une faible absorption. Ainsi, combinés à l'air, ils constituent un choix idéal pour la réalisation de cristaux photoniques à ces longueurs d'onde [13].

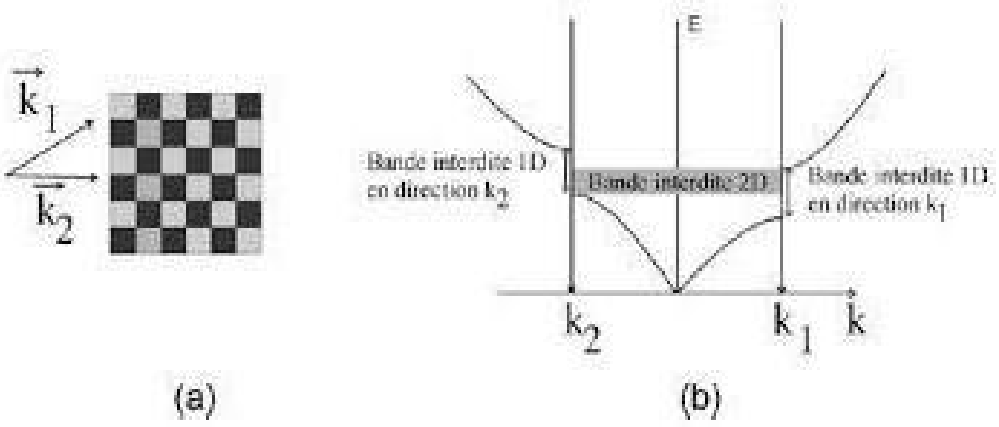


Figure I.6: (a) *Cristal photonique 2D,* ***(b)*** *Une bande interdite omnidirectionnelle est obtenue dans le plan lorsque toutes les bandes interdites unidirectionnelles se recouvrent.*

I.4.4.2. Carte des bandes interdites

Les cartes des bandes interdites illustrent les limites des bandes interdites pour un réseau donné en fonction du facteur de remplissage **f** (voir Figure I.7). Elles offrent un aperçu des possibilités de confinement de la lumière. Pour un réseau carré, les bandes interdites en polarisation TE et TM s'ouvrent respectivement à **f** = 35% et **f** = 50%. En revanche, pour un réseau triangulaire, elles s'ouvrent respectivement à **f** = 11% et **f** = 63%. La région de la bande interdite complète correspond à l'intersection des bandes interdites TE et TM, et se trouve dans la fenêtre d'énergie **u** = 0.37-0.56. Le réseau triangulaire est généralement plus avantageux que le réseau carré, car les bandes interdites TE sont plus larges et s'ouvrent pour des facteurs de remplissage plus faibles [14].

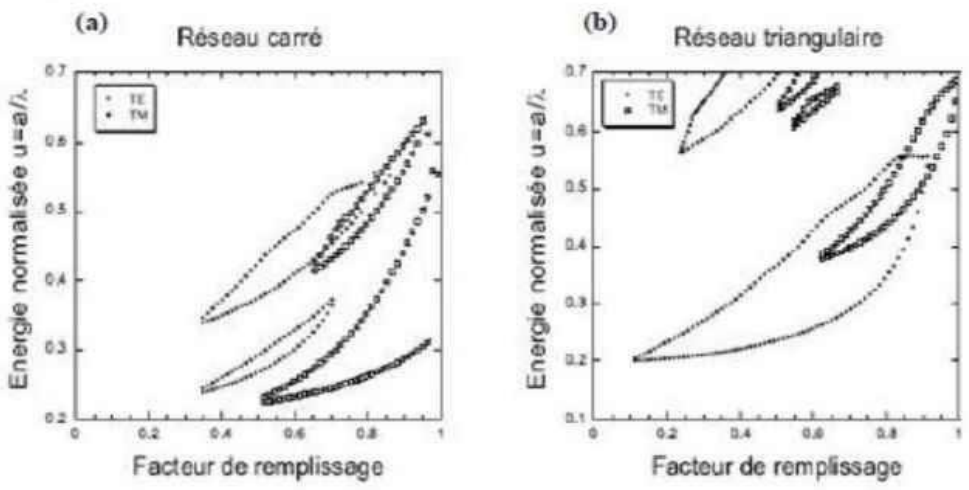


Figure I.7: *Cartes des bandes interdites d'un réseau de trous d'air dans une matrice diélectrique (ε=11.4) :* ***(a)*** *Réseau carré ;* ***(b)*** *Réseau triangulaire.*

I.5. Les Défauts dans les cristaux photoniques

Pour exploiter pleinement les capacités des cristaux photoniques dans la réalisation de fonctions optiques et le contrôle des flux lumineux, il est indispensable d'introduire des défauts dans leur structure. Ces défauts impliquent de perturber la régularité du réseau en ajoutant ou enlevant localement de la matière diélectrique. Par exemple, dans un réseau de trous, un défaut peut résulter de l'omission d'un ou de plusieurs trous, ou de la modification du rayon de ces derniers.

I.5.1. Les défauts ponctuels

La formation de ces défauts peut être réalisée de deux manières : soit en altérant localement l'indice de réfraction ou en modifiant la taille d'un motif cristallin (défaut de substitution), soit en retirant un motif, créant ainsi une lacune dans le cristal (défaut lacunaire) (voir Figure I.8). Cette création correspond à une microcavité à l'intérieur du cristal photonique. Le mode électromagnétique engendré par le défaut est appelé mode de défaut, caractérisé par une fréquence pouvant se situer dans la bande interdite et une localisation autour du site du défaut [15].

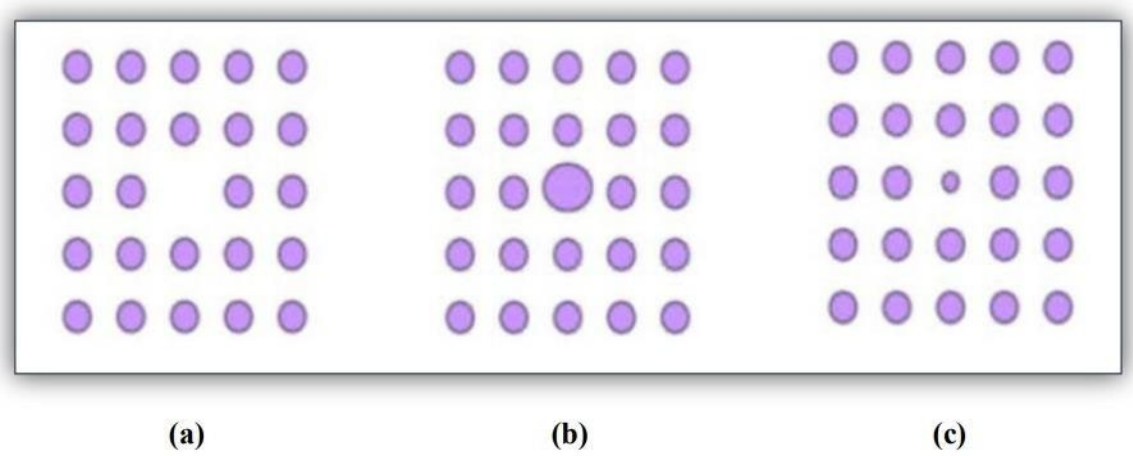


Figure I.8 *: les défauts ponctuels :* ***(a)*** *défauts lacunaires,* ***(b)*** *et* ***(c)*** *défauts de substitution.*

I.5.2. Les défauts étendus

En insérant un défaut linéaire dans un cristal photonique, il devient possible de diriger la propagation de la lumière dans une direction spécifique. Ces défauts peuvent être créés en supprimant ou en altérant une ou plusieurs rangées de motifs (trous ou tiges) du cristal photonique (voir Figure I.9). Ils sont également appelés défauts étendus et peuvent agir comme des guides d'ondes. À l'intérieur de ces défauts, des modes avec des fréquences appartenant à la bande interdite photonique peuvent émerger. Ces modes électromagnétiques associés aux guides d'ondes sont des modes confinés, capables de se propager le long de ces guides [15].

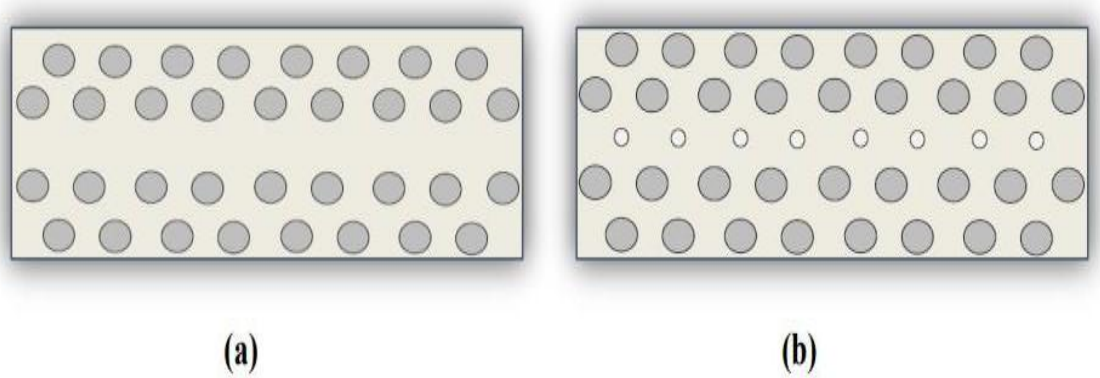


Figure I.9: *Exemples de défauts linéaires dans un cristal photonique 2D créés :* ***(a)*** *en omettant une seule rangée de motifs,* ***(b)*** *en variant le rayon d'une seule rangée de motifs de la structure.*

I.6. Microcavités à cristaux photoniques 2D

Si un seul défaut est introduit dans une structure périodique initialement considérée comme parfaite, un mode peut apparaître à une certaine fréquence dans la bande interdite photonique (BIP). Ce défaut peut être créé de différentes manières : en retirant un ou plusieurs trous du réseau (voir Figure I.10), en modulant localement un défaut linéaire, ou en utilisant des hétéro-structures formées par une modification locale de la période du réseau. Fonctionnant comme une cavité entourée de miroirs, ce défaut empêche la propagation des ondes à cette fréquence dans le cristal photonique parfait [16].

Les cavités à cristaux photoniques trouvent leurs diverses applications en optique intégrée, telles que la réalisation de filtres, de commutateurs, de modulateurs, de détecteurs, de nanolasers, ainsi que de capteurs ultrasensibles.

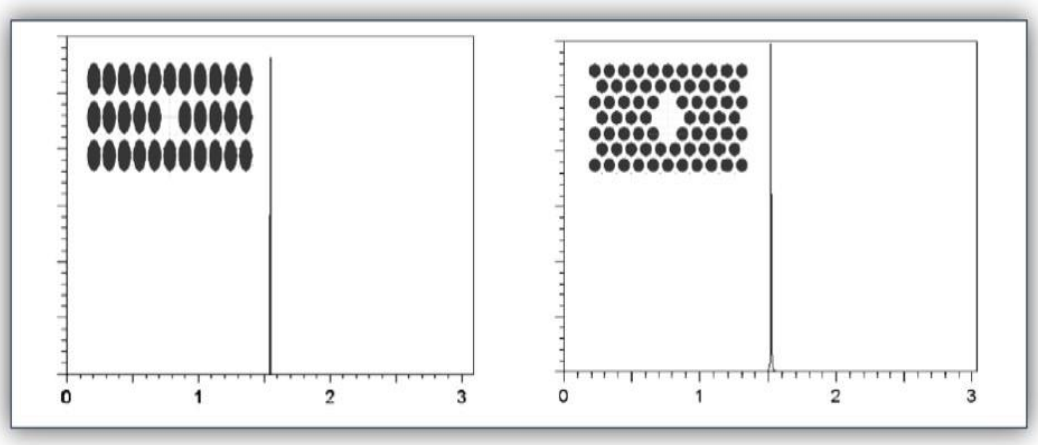


Figure I.10 : *Quelques exemples des types de cavités à défauts ponctuels [16].*

I.6.1. Les différents types de cavités

Différents types de cavités existent, variant selon la forme du réseau (triangulaire ou carrée) ou le nombre et le type de défauts (omission d'une ou plusieurs tiges, modification du rayon ou de l'indice). Parmi ces cavités, on peut mentionner :

I.6.1.1. Cavité hexagonale :

Dans un cristal triangulaire : les cavités hexagonales, avec leurs côtés alignés sur les rangées denses ; forment une série de cavités standard. Elles sont souvent désignées par le nombre de périodes le long de chaque côté. Par exemple, une cavité avec un seul trou manquant est appelée H1, tandis que celle avec sept trous manquants est nommée H2, et ainsi de suite (voir Figure I.11) [23].

Les cavités de type Hn, qui sont hexagonales, où n représente le nombre de rangées manquantes par côté de l'hexagone, sont les plus couramment étudiées [24].

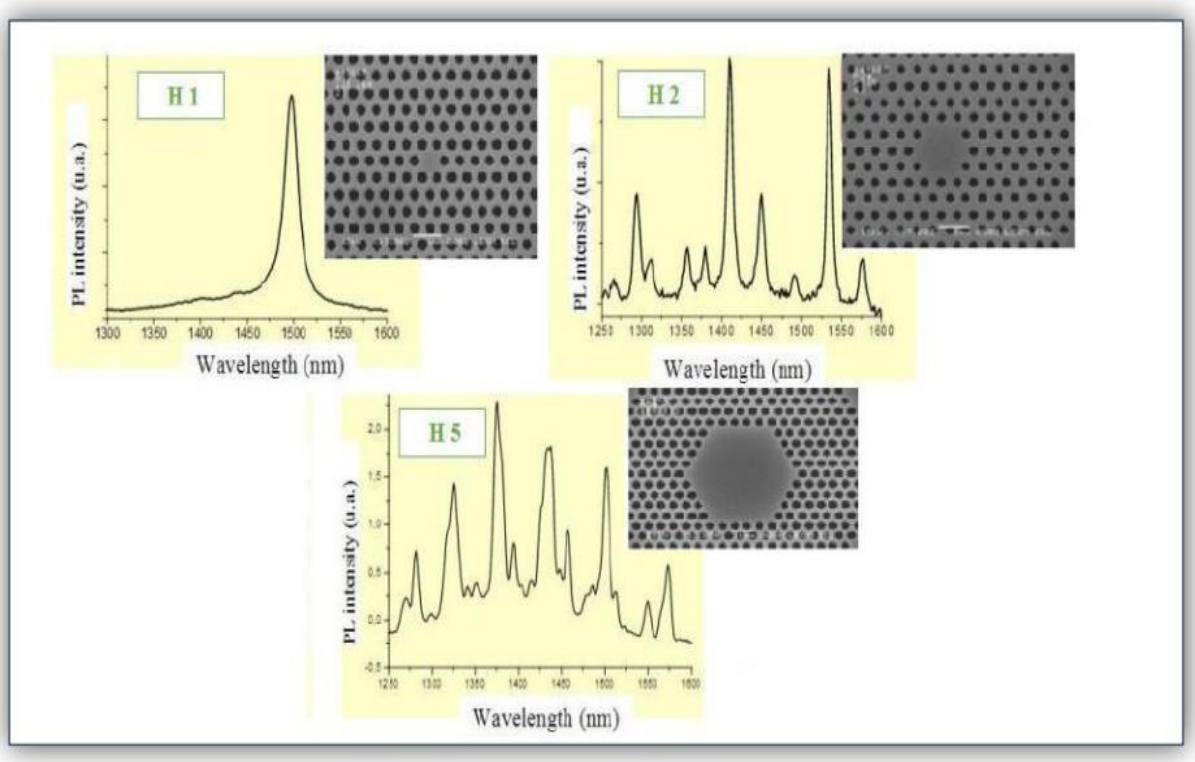


Figure I.11 : *Signatures spectrales de cavités hexagonales [16].*

I.6.1.2. Les cavités linéiques

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. Des exemples de telles cavités Ln dans des cristaux photoniques 2D sont illustrés dans la figure suivante (Figure I.12).

Les cavités de type L3 ont des modes avec des facteurs de qualité limités à quelques milliers. Cependant, des avancées significatives ont été réalisées dans ce domaine, notamment grâce aux travaux d'Akabane et al [25]. Ils ont mis en évidence l'importance d'un confinement progressif de la lumière en optimisant la position des trous aux extrémités de la cavité. Leurs travaux ont ouvert la voie à des améliorations significatives des performances des cavités linéiques.

En particulier, en modifiant les cavités linéiques de manière appropriée, il est possible d'atteindre des facteurs de qualité neuf fois supérieurs à ceux des cavités linéiques simples (45 000 par rapport à 5000) [26].

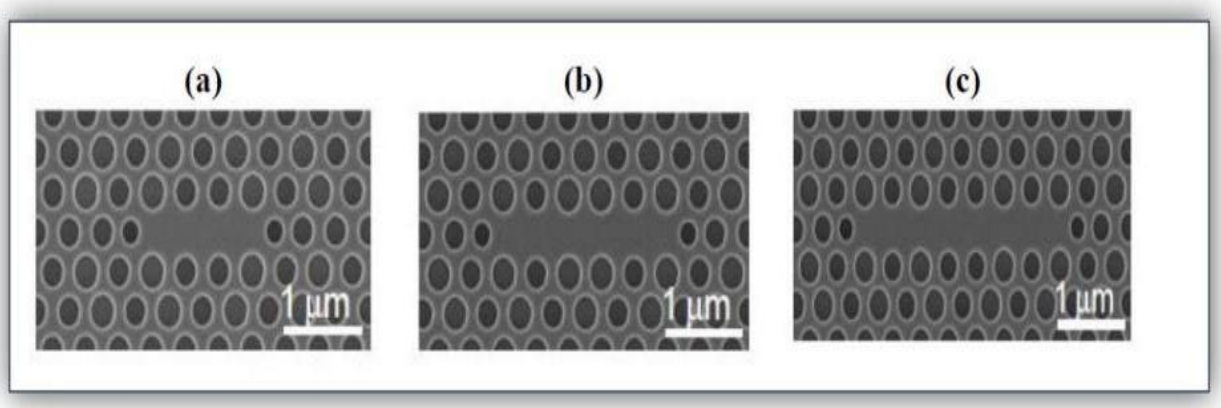


Figure I.12 : *Exemples de cavités de types Ln :* ***(a)*** *cavité L3,* ***(b)*** *cavité L5,* ***(c)*** *cavité L7.*

I.6.1.3. Cavité Carrée

Dans un réseau bidimensionnel carré, les cavités sont désignées par le type Sn, où n représente le nombre de lignes et de colonnes omises dans le carré. Par exemple, la cavité S1 est formée en omettant une ligne et une colonne du carré initial [15].

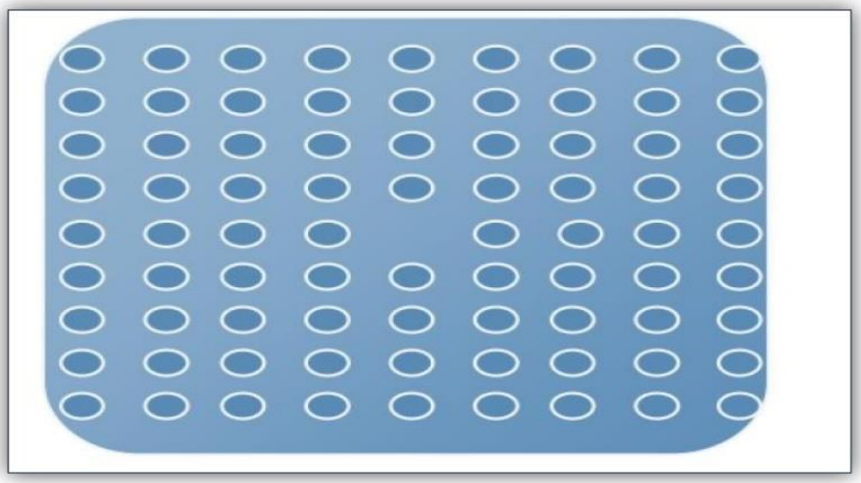
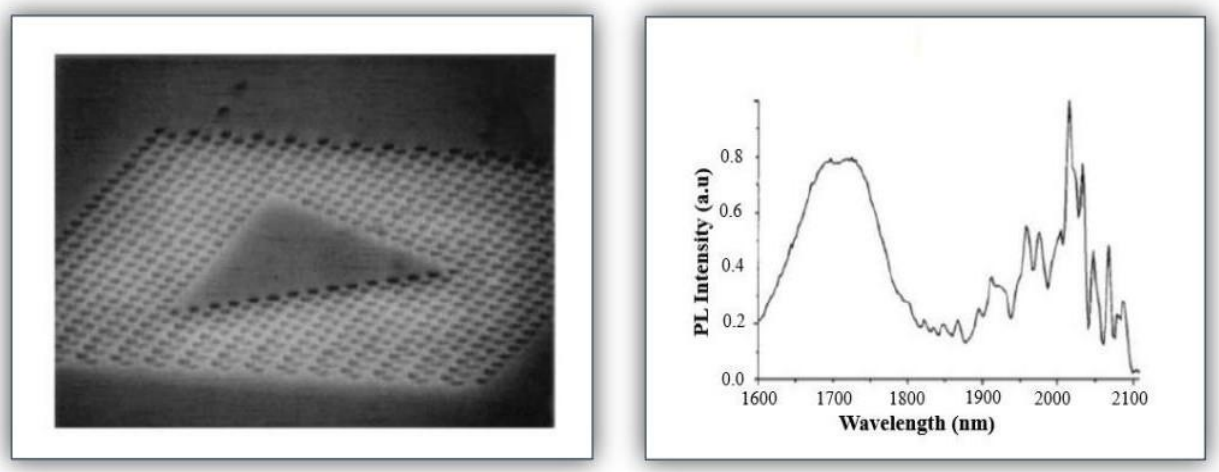


Figure I.13 : *Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique a réseau carré.*

I.6.1.3. Cavité triangulaire

La figure (I.14 (a)) présente une cavité triangulaire, formée en supprimant plusieurs trous dans un réseau triangulaire de trous d'air de section circulaire (r = 200 nm) immergé dans une matrice diélectrique (ε = 8,12). Ce cristal est illuminé par une onde plane avec une incidence normale et une polarisation TE. Le spectre de photoluminescence de cette cavité est illustré sur la figure (I.14 (b)).



(a) (b)

Figure I.14 : (a) *Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire,* ***(b)****spectre de photoluminescence d'une cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire de trous d'air* [15].

I.6.2. Influence des paramètres géométriques sur les cavités :

Une approche simple pour fabriquer des cavités à cristaux photoniques bidimensionnels (CP-2D) consiste profiter des propriétés de la bande interdite photonique (BIP). En retirant certaines tiges à l'intérieur d'un réseau CP-2D, on crée une zone entourée de rangées de tiges agissant comme des miroirs pour la gamme spectrale souhaitée [20,21]. Plusieurs variables peuvent être ajustées pour réguler les caractéristiques d'une cavité :

- La géométrie de la cavité, essentiellement sa forme et sa taille (variation du rayon du Point de défaut).
- Le changement de l'indice de réfraction des tiges par l'infiltration des liquides (polymère ou eau) dans les trous où les tiges des cristaux photoniques modifient les propriétés optiques de ces derniers.
- La période et le facteur de remplissage du CP-2D, responsables de la position spectrale des modes et de la BIP.
- Le nombre de rangées de CP-2D bordant la cavité, détermine la réflectivité des miroirs associés. Environ 8-9 rangées de CP-2D triangulaire suffisent en pratique pour s'affranchir des fuites de lumière dans le plan à travers la couronne CP [22].

I.6.3. Facteur de qualité

Les cavités optiques sont définies par deux principaux paramètres. Le premier décrit la localisation et l'existence des modes de résonance à l'intérieur de la bande interdite photonique : il s'agit de la longueur d'onde de résonance λ_0. Le second paramètre évalue la capacité du résonateur à retenir les photons en résonance, connu sous le nom de facteur de qualité Q du mode de résonance [15].

Le facteur de qualité est universellement défini comme la mesure de la capacité d'une cavité à maintenir l'énergie [17]. En termes simples, il représente le confinement d'un mode dans la cavité à une fréquence de résonance ωr, ce qui est équivalent au taux de pertes observé lors de l'oscillation du champ à cette même fréquence. Plus précisément, il s'agit du rapport entre l'énergie stockée W à l'intérieur de la cavité et la puissance dissipée p.

$$= \quad _ \qquad \text{(I.4)}$$

Le facteur de qualité **Q** peut également être défini comme le rapport entre la longueur d'onde de résonance λ_r et sa largeur à mi-hauteur $\Delta\lambda$ (full width at half maximum, FWHM). Cette expression du facteur de qualité en termes de longueurs d'onde est rendue possible grâce à la forme lorentzienne de la résonance, comme illustré sur la figure (I.15). Cette définition est formulée comme suit [18, 19] :

$$= - = \cdot - \qquad \text{(I.5)}$$

Le facteur de qualité est inversement proportionnel au FWHM, ce qui implique qu'une résonance étroite dans le domaine fréquentiel correspond à un résonateur à faibles pertes [15].

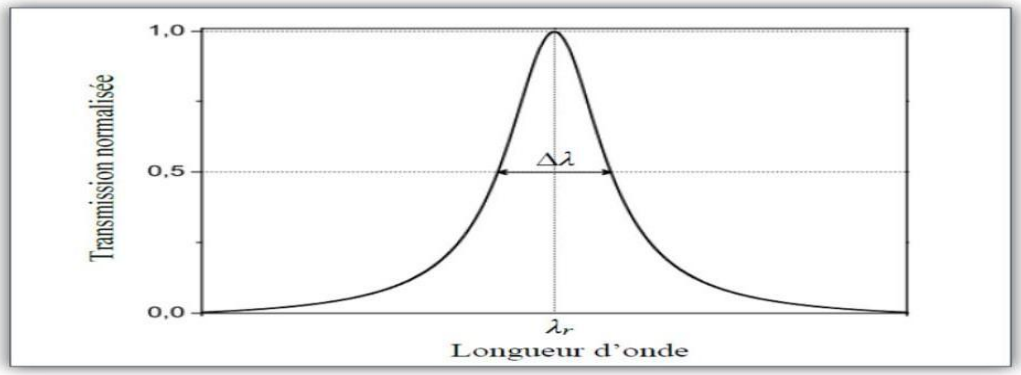


Figure I.15: *Réponse spectrale d'une cavité.*

I.7. Guide d'onde

Un guide d'onde est une structure qui permet de confiner et de guider la lumière à travers le cristal photonique. Ces guides d'ondes sont utilisés en optique intégrée et sont fabriqués en introduisant des défauts linéaires dans les cristaux photoniques, ce qui permet de choisir la direction de propagation de la lumière.

En créant un défaut linéaire, c'est-à-dire en omettant une ou plusieurs rangées de trous dans le cristal photonique, il devient possible de diriger la propagation de la lumière dans une direction spécifique. Pour qu'un photon demeure confiné dans le guide ainsi formé, son énergie doit se situer à l'intérieur de la bande interdite. Une variété de composants peut être fabriqués à partir de tels défauts linéaires, comme illustré dans la FigureI.16.

Pour optimiser la transmission à travers ces dispositifs, il est envisageable de modifier la taille ou la forme des trous au niveau des virages ou des jonctions. Ceci vise à réduire au minimum le couplage entre le mode guidé et les modes rayonnés, particulièrement aux courbures.

Effectivement, il existe une diversité considérable de guides à cristal photonique. En se basant sur leur configuration géométrique, on peut généralement diviser ces guides en deux catégories principales [23] :

I.7.1. Guide d'onde linéique

Les guides à cristaux photoniques sont réalisés en introduisant un défaut linéique dans la structure cristalline. Au sein de ces défauts, des modes avec des fréquences situées dans la bande interdite photonique peuvent se propager. Dans le cas des cristaux photoniques bidimensionnels, un guide à cristal photonique peut être formé en enlevant directement une ou plusieurs rangées de motifs du cristal photonique, comme illustré dans la FigureI.16 [24].

Les guides formés de l'omission d'une ligne de trous sont appelés W1, ceux de deux lignes de trous W2, etc.

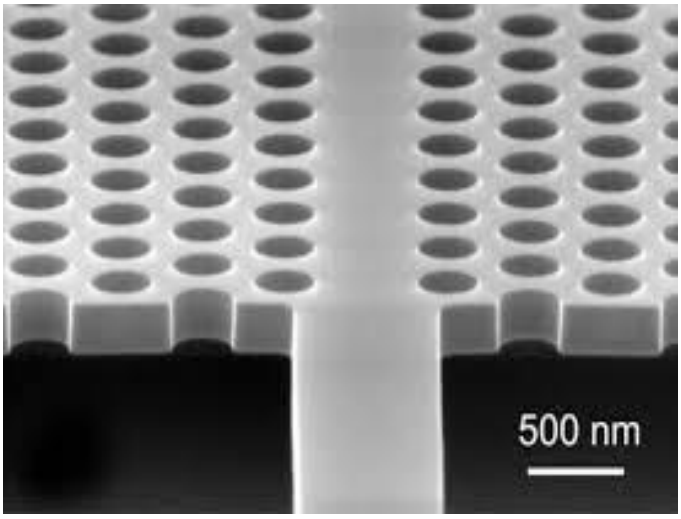


Figure I.16: *Représentation réelle d'un guide d'onde de largeur W à base d'un CP2D.*

I.7.2. Guide d'onde courbée

Les guides courbés sont un domaine d'application important des cristaux photoniques, car ils offrent la possibilité théorique de réaliser des virages avec des rayons de courbure de l'ordre de la longueur d'onde (voir figure I.17) [23].

Cependant, ces virages présentent des problèmes de réflexion et de pertes. Ils peuvent être réalisés en omettant simplement de graver des trous dans les directions de symétrie du cristal (virages à 60 et 120°). Pour les virages simples à 60°, les meilleures performances mesurées ont atteint des transmissions d'environ 80 à 90 % pour un guide étroit (W1) [25]. L'amélioration du virage peut être réalisée en ajoutant ou en supprimant des trous, ou encore en modifiant la topologie du coude.

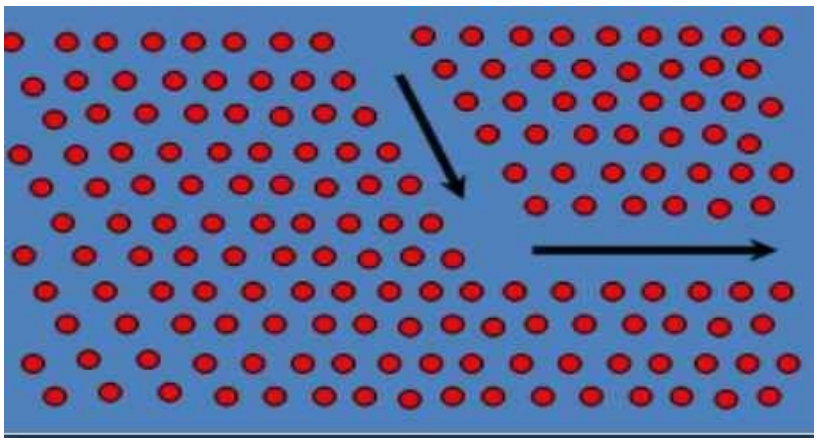


Figure I.17 : *Virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel.*

La confirmation expérimentale du guidage dans des virages a été réalisée rapidement, bien que des problèmes persistants de réflexion et de pertes subsistent. Dans les cristaux photoniques de structure hexagonale ou triangulaire, ces virages peuvent être réalisés simplement en omettant de graver des trous dans les directions de symétrie du cristal. Pour les virages simples, les meilleures performances mesurées ont atteint des transmissions d'environ 80 à 90 % pour un guide étroit (avec une rangée de trous omise), et de 78 % pour un guide plus large [26].

I.8 Applications des cristaux photoniques

Les cristaux photoniques présentent une grande utilité dans la manipulation, le confinement et le contrôle de la lumière dans toutes les dimensions de l'espace, ce qui ouvre la voie à diverses applications.

Leur principal domaine d'application réside dans la conception de dispositifs qui exploitent les photons au lieu des électrons comme vecteurs d'information, afin de reproduire les fonctionnalités des différents éléments des circuits intégrés. Nous illustrerons donc succinctement deux exemples de composants basés sur des cristaux photoniques bidimensionnels.

I.8.1. Les Filtre (Filtre ADD-DROP)

Un filtre ADD-DROP est un composant essentiel du multiplexage en longueur d'onde. Il permet un filtrage directionnel et sélectif en longueurs d'onde. Ce filtrage est souvent réalisé en couplant des guides d'ondes avec des cavités à cristaux photoniques. La Figure (I.18) illustre un exemple de ce type de filtre, où une cavité résonante est couplée à des guides d'ondes par le biais du recouvrement des ondes évanescentes [27].

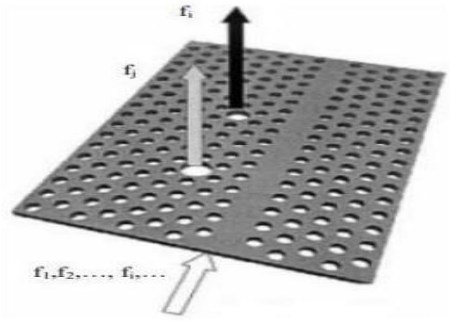


Figure I.18 : *La structure et le principe de fonctionnement d'un filtre Add- Drop, une rangée a été éliminée pour guider les ondes avec des fréquences f1, f2, …, fi et les défauts ponctuels pour extraire les fréquences désirées fi, …fj.*

I.8.2. Capteurs à cristaux photoniques

L'utilisation de composants optiques a permis de minimiser les perturbations dues aux champs électromagnétiques à basse fréquence et de réduire les pertes optiques lors de la propagation. Cette réduction des perturbations a ouvert la voie à une meilleure étude du comportement des dispositifs optiques face à leur environnement. Ainsi, il est désormais possible de développer des capteurs optiques performants en se concentrant sur les divers mécanismes d'interaction physique avec l'environnement que l'on souhaite caractériser.

Ces capteurs peuvent mesurer une gamme variée de paramètres tels que la pression, la température, la vitesse, la position, l'humidité, ainsi que des paramètres biologiques [28].

I.9. Conclusion

Ce chapitre offre un rappel succinct des principes fondamentaux des cristaux photoniques. Nous explorons les différents types de cristaux photoniques, soulignant comment la variation périodique des propriétés d'un matériau peut générer des bandes de propagation d'ondes. Nous abordons ensuite leurs caractéristiques physiques et techniques. L'étude des défauts demeure un domaine essentiel lors de la conception de dispositifs photoniques basés sur les cristaux photoniques. L'introduction d'un défaut dans les structures périodiques, qu'il soit linéaire ou local, altère les performances du matériau à une fréquence où un seul mode de propagation peut être observé. Ces cristaux photoniques trouvent de nombreuses applications dans divers domaines, parmi lesquels les capteurs à cristaux photoniques occupent une place importante, et nous examinerons en détail ces applications dans le chapitre suivant.

Chapitre II : Généralités sur les capteurs

II.1. Introduction

L'amélioration et la surveillance de la qualité de vie à long terme sont devenues des préoccupations mondiales majeures. Pour répondre à ces enjeux, des capteurs ont été développés pour détecter diverses molécules potentiellement nocives, telles que les maladies, les virus ou les gaz.

Les capteurs jouent un rôle essentiel dans notre société et sont utilisés dans tous les domaines de la vie. Dans ce chapitre, nous essayerons de donner un aperçu général sur les capteurs, plus particulièrement, leur définition ainsi que les paramètres qui les caractérisent.

II.2. Généralités sur les capteurs

II.2.1. Définition

Un capteur est un dispositif qui permet de sonder, caractériser, quantifier une grandeur physique et de la convertir en une grandeur facilement exploitable pour l'utilisateur (souvent, il s'agit d'un signal électrique, optique ou acoustique). On peut dire qu'un capteur est un dispositif qui, sous l'effet d'une grandeur physique que l'on souhaite caractériser, délivre une grandeur physique exploitable, on parle ainsi d'un transducteur (figure II.1). Les grandeurs d'influence sont des grandeurs extérieures qui, selon leur nature et leur importance, provoquent des perturbations sur le capteur. Parmi les principales grandeurs d'influence : température, pression, humidité, concentration chimique, ….

Un capteur est capable de prélever et de sélectionner une grandeur abstraite, appelée information, qui sélectionne un évènement particulier parmi un ensemble d'évènements possibles. Pour pouvoir être traitée, cette information est portée par un support physique, appelé donc un signal. D'une façon générale le capteur est composé de trois éléments principaux : un élément sensible, un transducteur, et une interface de commande entre le signal et l'utilisateur [32].

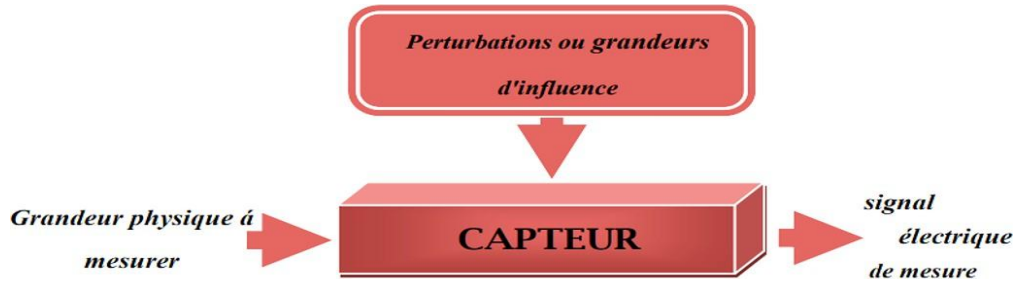


Figure II.1 *: Définition d'un capteur.*

II.2.2. Différents types d'un capteur

Suivant l'origine du signal électrique de sortie, on peut classer les capteurs en deux types :

II.2.2.1. 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.

II.2.2.2. Capteurs passifs

Il s'agit généralement d'impédance dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. La variation d'impédance résulte :

- Soit d'une variation de dimension du capteur, c'est le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteur de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile.
- Soit d'une déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression accélération (Armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée à une structure déformable) [33].

II.3. Grandeurs d'influence

Le système de mesure, de par ses conditions d'emploi, peut se trouver soumis non seulement au 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. Ainsi, par exemple :

- La température est grandeur d'influence pour un capteur optique comme la résistance photoconductrice.
- Il en est de même pour le champ magnétique vis-à-vis d'un capteur thermométrique comme la résistance de germanium.

Les principales grandeurs d'influence sont :

- La température, qui modifie les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur.
- La pression, l'accélération et les vibrations susceptibles de créer dans certains éléments constitutifs du capteur des déformations et des contraintes qui altèrent la réponse.

- L'humidité à laquelle certaines propriétés électriques comme la constante diélectrique ou la résistivité peuvent être sensibles et qui risque de dégrader l'isolation électrique entre composants du capteur ou entre le capteur et son environnement.
- La tension d'alimentation - amplitude et fréquence - lorsque, comme pour le transformateur différentiel, la grandeur électrique de sortie en dépend de par le principe même du capteur [34].

II.4. Caractéristique d'une capture

Les caractéristiques métrologiques d'un capteur constituent les liens effectifs entre le capteur et la grandeur qu'il mesure.

II.4.1. La sensibilité

Elle détermine l'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée en un point donné. C'est la pente de la tangente à la courbe issue de la caractéristique du capteur. Dans le cas d'un capteur linéaire, la sensibilité du capteur est constante.

$$S = \frac{\Delta_{Sout}}{\Delta_m} \quad \text{(II.1)}$$

Avec :

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

Plus un capteur est sensible plus la mesure pourra être précise. C'est une caractéristique importante pour l'exploitation et l'interprétation des mesures.

II.4.2. Étalonnage

L'étalonnage consiste à ajuster et établir, sous forme graphique la relation entre la grandeur à mesurer (mesurande) et la grandeur de sortie.

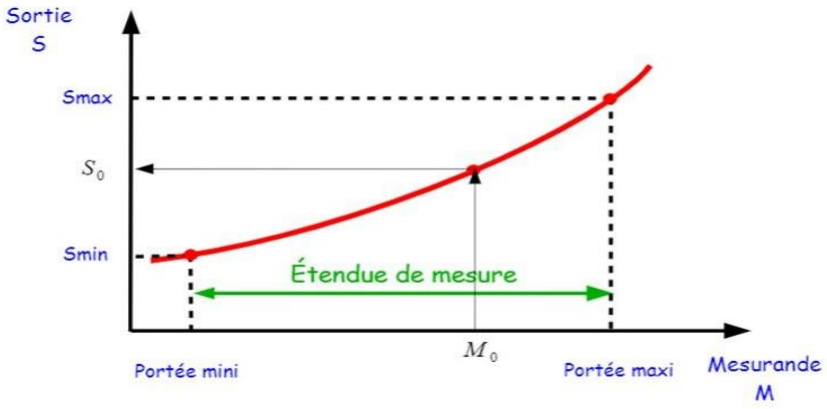


Figure II.2 : *Courbe d'étalonnage d'un capteur.*

II.4.3. Temps de réponse et de recouvrement

Il s'agit de quantifier le temps que met le capteur à réagir à un évènement (temps de réponse) et le temps mis pour revenir dans la configuration initiale une fois l'évènement disparu (temps de recouvrement) [35].

II.4.4. Sélectivité

Un capteur est dit sélectif, si la variation du signal de sortie est due uniquement à la seule grandeur (physique, chimique, biologique…) qu'on veut mesurer.

II.4.5. Domaine de linéarité

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

II.4.6. Réversibilité

Elle définit la capacité du matériau à revenir à son état initial lorsqu'on supprime l'excitation

II.4.7. Résolution

Généralement un capteur se caractérisent par un domaine de détection, la valeur petite de cette mesure souvent et souvent la résolution ou précision d'un capteur.

II.5. Définition d'un biocapteur

Un biocapteur peut être défini comme un dispositif électrochimique intégré capable de fournir des informations analytiques spécifiques quantitatives ou semi-quantitatives conçu pour transformer les informations du domaine biochimique, généralement la concentration d'analyte, en un signal de sortie chimique ou physique avec une sensibilité définie.

Les biocapteurs contiennent généralement deux composants de base connectés en série: le système de reconnaissance chimique (récepteur) et le transducteur. Le but principal du système de reconnaissance est de fournir au capteur un degré élevé de sélectivité pour l'analyse à effectuer .Les biocapteurs permettant d'obtenir, à partir de l'espèce à détecter dans un échantillon, toute information utile à son évaluation. Cette donnée pourra être traitée, enregistrée, stockée pour utilisation ultérieure [36].

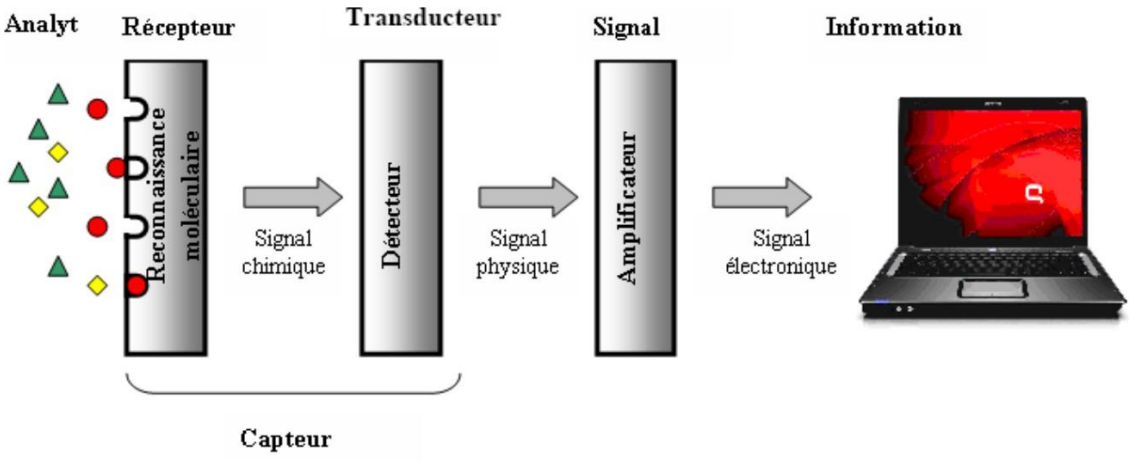


Figure II.3. : *Principe de fonctionnement d'un biocapteur [37].*

II.6. Biocapteur optique

Parmi les types de capteurs, nous avons le biocapteur optique, qui est un appareil qui utilise un principe de mesure optique. Ils utilisent le la fibre optique ainsi que des transducteurs optoélectroniques. Le terme optrode représente une compression des deux termes optiques et électrode. Ces capteurs impliquent principalement des anticorps et des enzymes comme les éléments transducteurs.

Les biocapteurs optiques permettent une détection sécurisée de l'équipement inaccessible non électrique. Un avantage supplémentaire est que ceux-ci n'ont souvent pas besoin de capteurs de référence, car le signal comparatif peut être produit en utilisant la source lumineuse similaire comme le capteur d'échantillonnage. Les biocapteurs optiques sont classés en deux types, à savoir le biocapteur à détection optique directe et le biocapteur à détection optique marqué.

II.7. Classification des biocapteurs

Les biocapteurs sont classés en fonction de leurs récepteurs biologiques ou éléments transducteurs. La figure II.4. Affiche un organigramme illustrant les différents types de biocapteurs basés sur les récepteurs biologiques et les éléments transducteurs.

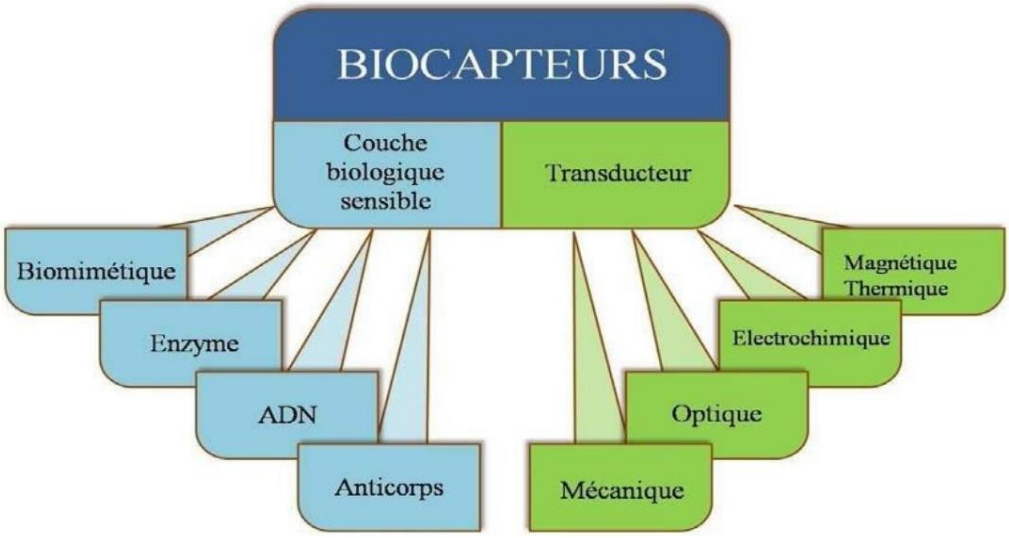


Figure II.4. : *Classification schématique des biocapteurs en fonction des couches biologiques.*

II.8. capteurs optiques

Le développement de capteurs optiques performants est rendu possible en examinant les divers mécanismes d'interactions physiques externes que l'on cherche à caractériser. Actuellement, plusieurs types de capteurs optiques sont disponibles, notamment les capteurs de température, de pression, d'humidité, de déplacement et les capteurs biologiques. Les capteurs optiques utilisant des technologies telles que les fibres optiques, les plasmons de surface, les guides d'ondes planaires ou les cristaux photoniques sont préférés en raison de leur sensibilité élevée et de leur capacité à réaliser des analyses non destructives.

II.9. Capteur à fibre optique

Les capteurs à fibres optiques résultent de la fusion de deux technologies : les fibres optiques, largement employées en télécommunication, et l'optoélectronique. Ces deux domaines ont connu un développement remarquable au cours des deux dernières décennies, caractérisé par l'amélioration des performances, la réduction des coûts et la miniaturisation.

Cette évolution a donné naissance à ces capteurs, dont les applications couvrent intégralement celles des capteurs traditionnels.

Un capteur à fibre optique est un dispositif dans lequel 1'information est créée dans un chemin optique par réaction de la lumière à la grandeur à mesurer, avant d'être acheminée vers le récepteur optique par 1'intermédiaire d'une ou plusieurs fibres optiques. Cette définition exclue les assemblages comportant un capteur conventionnel et un système de transmission par fibres optiques

II.10. Capteurs à cristaux photoniques

L'utilisation des cristaux photoniques comme capteurs représente un domaine de recherche très prometteur en raison de leur structure microscopiquement périodique. Cette structure permet de retenir les photons et de générer des résonances optiques extrêmement sensibles à la présence des molécules à détecter. Les cristaux photoniques disposent d'un large éventail de détection, les rendant applicables dans une large gamme de mesures s'étendant de l'air jusqu'aux fluides très visqueux [38].

Récemment, plusieurs travaux de recherches utilisant les cristaux photoniques, en tant qu'élément de détection, ont été entrepris, en raison de leur structure de bande et du confinement de la lumière [38-40].

En exploitant la dépendance des propriétés optiques du cristal photonique aux caractéristiques physiques et géométriques du cristal lui-même, on peut distinguer les types de capteurs suivants [41] :

- Capteur d'indice de réfraction (RI) à base de CPs,
- Capteur à gaz à base de CPs,
- Capteurs opto-mécaniques à base de CPs,
- Capteurs à cristaux photoniques intégrés basés sur un effet non linéaire,
- Capteurs à base de cristaux photoniques à fibres optiques, etc…

II.11. État de l'art des capteurs à cristaux photoniques

En 2003, Cunningham et al. Ont introduit les premiers capteurs à polymère CP 1D. Ces dispositifs comprennent un matériau plastique avec une fine couche périodiquement structurée d'un matériau diélectrique à indice de réfraction plus élevé déposé sur sa surface. Lorsqu'éclairé

par une lumière blanche sous une incidence normale, ce dispositif réfléchit une bande de longueur d'onde de 2 nm. Un décalage vers des longueurs d'onde plus élevées (dans le rouge) indique une absorption de matériau en surface. Lors de la reconnaissance d'ADN à la surface du CP, un décalage de 2,5 nm a été mesuré, correspondant à une sensibilité de surface de 0,4 pg/mm2.

En 2004, Chow et Al ont démontré la détection de changement d'indice de réfraction de 0.002 avec une microcavité à CP 2D ayant un facteur de qualité d'environ 400 [42]. La limite de détection aurait pu être améliorée à 0.001 RIU en utilisant une microcavité à CP 2D optimisée comme proposée par Lončar et al [43]. Une cavité à CP recouverte d'un film fin de polymère a permis une détection d'ions spécifiques en environnement liquide à des concentrations micromolaires [44]. Il a également été démontré que l'augmentation de la sensibilité et du facteur Q améliore la plage de détection en réduisant le niveau de bruit de l'appareil. Sur la base de ces critères, diverses conceptions ont été proposées et optimisées pour améliorer encore les propriétés de détection.

Plus tard en 2007, Lee et Fauchet ont introduit un biocapteur à CP sur silicium capable de surveiller l'adsorption des protéines sur les parois des trous de la cavité et de mesurer quantitativement le diamètre des protéines [45]. Ce système a permis de détecter une quantité minimale de protéines d'environ 2,5 fg. Par la suite, les mêmes auteurs ont amélioré la sensibilité à 1 fg en déposant précisément les espèces cibles sur la zone de défaut de la surface sensible. Ils ont même pu détecter une seule bille de latex de 370 nm de diamètre, grâce à la surface de détection de la cavité CP, qui valait environ 40 µm2 pour un volume sensible de 0,15 µm3.

En 2012, Lin et ses coauteurs ont réussi à détecter un nombre limité de molécules dans une solution complexe en utilisant des capteurs à cristaux photoniques spécifiquement conçus pour la détection de molécules uniques [46]. À partir de 2009, les architectures de cavités à cristaux photoniques à tranchée ont commencé à démontrer des performances remarquables, avec des sensibilités pouvant dépasser les 1000 nm/RIU et des facteurs de qualité excédant les 50 000. [47].

II.12. Capteurs d'indice de réfraction (RI) à base de CPs :

Dernièrement, de nombreux capteurs optiques basés sur les CPs ont été étudiés et développés dans une large gamme d'applications de détection, comme les capteurs de gaz [48],

les capteurs de fluide [48], les capteurs de température [49], les capteurs de pression [50], les capteurs d'humidité [50], les capteurs biochimiques [51] et les capteurs RI [52].

Les capteurs RI représentent le type le plus connu des capteurs basés sur les CPs. En fait, certaines architectures avancées (telles que, des microcavités intégrés et configurations interférométriques) utilisent l'indice de réfraction (RI) pour la détection. Les capteurs RI basés sur les CPs ont nombreux avantages, comme la détection en temps réel, l'utilisation minimale d'échantillon sans marquage par fluorescence, la sensibilité et la sélectivité élevées [53].

Le principe de cette détection est de mesurer le changement d'indice de réfraction (RI) d'un élément sensible en fonction de l'existence de l'analyte. La détection est réalisée par une monocouche sensible qui réagit avec l'analyte. La zone sensible est formée d'une structure photonique fonctionnant avec la monocouche. Cette monocouche réagit avec la substance à détecter, entrainant une modification d'indice de réfraction (RI), de l'absorption de la couche sensible et de son épaisseur. La structure doit être créée pour être très sensible aux changements d'indice de réfraction. L'étude de la variation d'indice de réfraction (RI) consiste à calculer le spectre de transmission qui fournir un décalage bien définie de la longueur d'onde, en présence de la substance à détecter [54].

II.13. Capteurs basé sur des guides d'onde à CPs :

Dans de nombreux capteurs utilisant l'indice de réfraction (RI), le guide d'onde CP agit comme un élément de détection sans nécessiter une conception de microcavité intégrée.

Un guide d'onde CP est généralement réalisé en introduisant un défaut linéique dans la structure plane périodique. On note que, les modes de propagation sont limités par la réflexion interne totale (TIR) le long de la direction verticale et par la structure périodique latéralement.

Un autre biocapteur RI à CP a été proposé pour détecter l'ssADN, présentant une limite de détection de 19,8 nm. Ce capteur, potentiellement capable de détecter des concentrations d'analyte très faibles (par exemple, des protéines, des bactéries, de l'ADN) est fabriqué dans une plaquette SOI avec une épaisseur de couche de silicium de 250 nm et un dioxyde de silicium enterré de 3 µm d'épaisseur.

La structure consiste en un cristal photonique bidimensionnel avec un réseau triangulaire de trous d'air ayant un rayon de 111 nanomètres et une périodicité de 390 nanomètres. A l'entrée et à la sortie du guide d'ondes CP, la lumière est couplée ou recueillie par un guide d'ondes monomode de 500 nm de largeur, Comme le montre la Figure II.5.

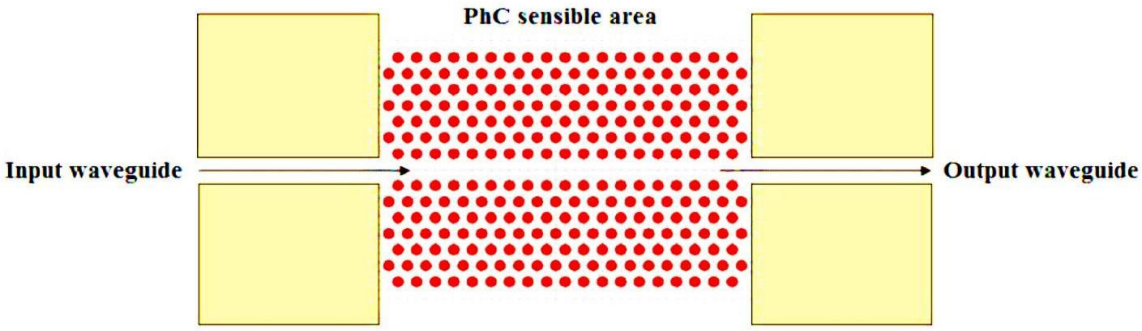


***Figure II.5**: Schéma du capteur d'ADN à base de PhC caractérisé par des guides d'ondes monomodes d'entrée et de sortie de 500 nm de largeur.*

II.14. Capteurs à base de microcavités à CPs

Dans la mesure où une petite variation d'indice de réfraction (RI) dans la cavité peut entrainer un faible changement de la fréquence du mode d'intérêt, cette caractéristique est utilisée comme méthode de transduction et prouve qu'il est raisonnable d'utiliser des CPs dans la détection optique. La position spectrale de la longueur d'onde de résonance de la cavité peut être utilisée comme référence. Par conséquent, mesurer le changement de la position spectrale ($\Delta\lambda$) revient à mesurer le changement d'indice de réfaction Δn associé à la reconnaissance de molécules à la surface de la cavité (Figure II.6).

- Le facteur de qualité (Q) : il doit être le plus élevé possible pour que de très faibles décalages en longueur d'onde puissent être observés lors de l'adsorption moléculaire. Ceci est associé à la limite de détection (LD) ;
- La sensibilité $S\lambda = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}$ exprimée en nm/RIU, plus le décalage de la longueur d'onde est important, plus la sensibilité est élevée.

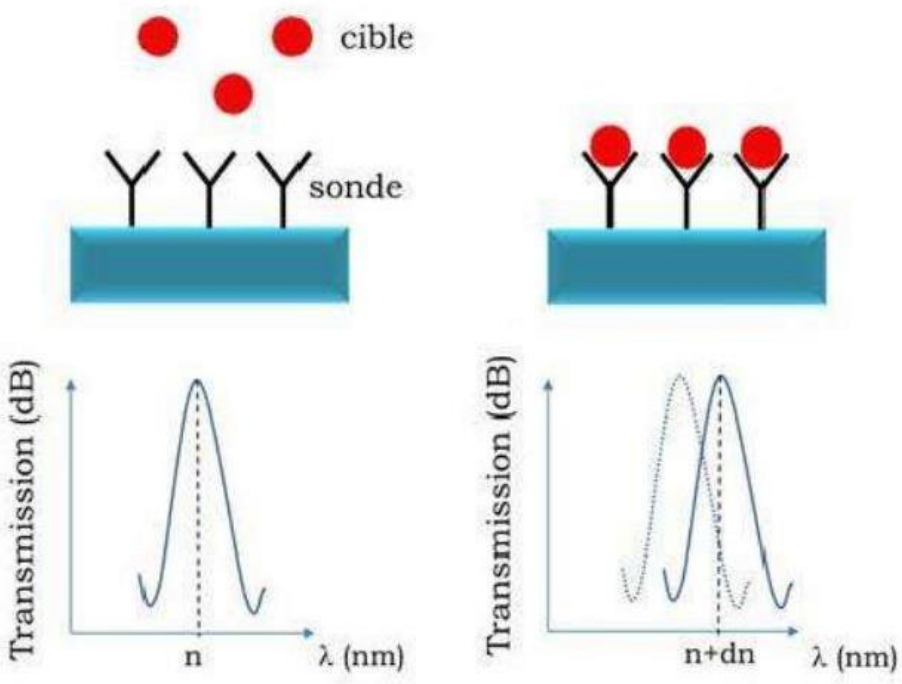


Figure II.6. *Le principe de transduction optique d'un résonateur à CPs.*

II.15. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons discuté les capteurs en terme générale, leurs caractéristiques, leurs types et leurs principes de fonctionnement. Puis nous avons mentionné les capteurs optiques nous avons présenté les principales technologies de détection. Grâce à leurs propriétés optiques, nous sommes plus particulièrement intéressés aux capteurs à cristaux photoniques.

Chapitre III : Simulation et résultats

III.1. Introduction

Les cristaux photoniques, avec leurs diverses applications dans les différents domaines technologiques ; ont un grand impact dans le développement de la nanotechnologie, cela est rendu possible grâce aux capteurs optiques.

Nous nous intéressons dans ce chapitre à décrire les différents outils de simulations numériques utilisés pour étudier les structures optiques à base de cristaux à bande interdites photoniques de différentes géométries, a cette finalité nous utilisons le simulateur RSOFT. Parmi les avantages de ce dernier, son interface CAD facile à utiliser et qui permet d'obtenir des résultats rapides et améliorés.

Plusieurs méthodes ont été envisagées, comme la méthode des ondes planes et la méthode FDTD qui est la plus utilisée pour la modélisation des cristaux photoniques.

III.2. Techniques de modélisation

Les différentes méthodes utilisées pour décrire la propagation des ondes électromagnétiques dans les cristaux photoniques nécessitent généralement un investissement important dans la programmation et l'analyse numérique. Les principales techniques utilisées sont la méthode des différences finies dans le domaine temporel FDTD (Finite Diffrence Time Domain), et la décomposition en ondes planes PWE (Plane Wave Expansion).

III.2.1. La méthode FDTD (Finite Différence Time Domain)

La méthode FDTD est actuellement l'une des méthodes les plus utilisées en électromagnétisme. Le premier algorithme a été proposé par Yee en 1966. Cette méthode est particulièrement intéressante pour connaître la réponse spectrale d'un système non nécessairement périodique et pour calculer les distributions de champ dans des structures de dimensions finies. La FDTD permet non seulement de calculer les diagrammes de bandes mais aussi de simuler l'évolution temporelle du champ électromagnétique dans les cristaux photoniques, ce qui permet d'avoir des informations sur de nombreuses autres grandeurs comme le vecteur de Poynting ou l'énergie électromagnétique stockée. La FDTD consiste également à approcher les dérivées ponctuelles spatiales et temporelles qui apparaissent dans les équations de Maxwell par des différences finies centrées.

III.2.2. La méthode des ondes planes (PWE)

La méthode de décomposition en ondes planes est une méthode de résolution dans le domaine fréquentiel des équations de Maxwell. Elle est basée sur la décomposition en ondes planes du problème électromagnétique. Cette méthode essentiellement utilisée pour analyser les propriétés dispersives des matériaux à bandes interdites photoniques et permet de déterminer la fréquence, la polarisation, la symétrie et la distribution du champ pour les modes d'une structure photonique.

III.3. Présentation de l'outils de simulation

RSoft CAD est le programme de base de RSoft Photonics Suite et sert de programme de contrôle pour les modules de simulation de périphériques passifs BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD et DiffractMOD de RSoft. Il est utilisé pour définir l'entrée la plus importante requise par ces modules de simulation, les propriétés du matériau et la géométrie de structure d'un dispositif photonique. Un utilisateur doit généralement, commencer par la conception d'une structure dans l'interface CAD, puis utiliser un ou plusieurs modules de simulation pour modéliser divers aspects de la performance du périphérique.

III.3.1. Le simulateur BandSOLVE

Le logiciel que nous avons exploité pour modéliser les structures par la méthode des ondes planes s'appelle « Band SOLVE » développé par Rsoft. BandSOLVE ; est un logiciel de simulation des structures de bande photoniques. Il est basé sur la méthode des ondes planes optimisée pour les structures périodiques, idéal pour produire des diagrammes de bandes des structures à bandes interdites photoniques classiques tels que 2D et 3D et les guides à cristaux photoniques en utilisant une méthode super cellule type onde plane. A deux dimensions, il est nécessaire de considérer deux directions de propagation différente : TE (avec le champ E perpendiculaire à l'axe des trous) et TM (où E est parallèle à l'axe des trous). Ces deux polarisations sont découplées et donnent lieu à deux diagrammes de bandes indépendants. Dans les deux cas, il n'y a pas certainement de BIP. BandSOLVE est généralement nécessaire pour améliorer les propriétés des structures à CPs, ces propriétés sont simulées par la méthode FDTD implémentée dans le module FullWAVE, pour vérifier les propriétés liées au temps, telles que les pertes, et pour calculer la distribution du champ dans une structure de dimension finie.

III.3.2. Le simulateur FullWAVE

Le moteur de simulation FullWAVE est une partie de Rsoft photonique. Il est basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel. Le FullWAVE est idéal pour étudier la propagation de la lumière dans une grande variété de structures photoniques. Permettant ainsi aux utilisateurs de déterminer les propriétés des matériaux et la géométrie structurelle du dispositif. Ce logiciel est très adapté à notre simulation car il permet de suivre l'évolution du champ électromagnétique en n'importe quel endroit de la structure au cours du temps.

III.3.3. Fenêtre de programme de CAD

La fenêtre de programme de RSoft CAD est composée d'une barre de menus en haut de la fenêtre, une barre des outils qui porte plusieurs icônes et la ligne d'état.

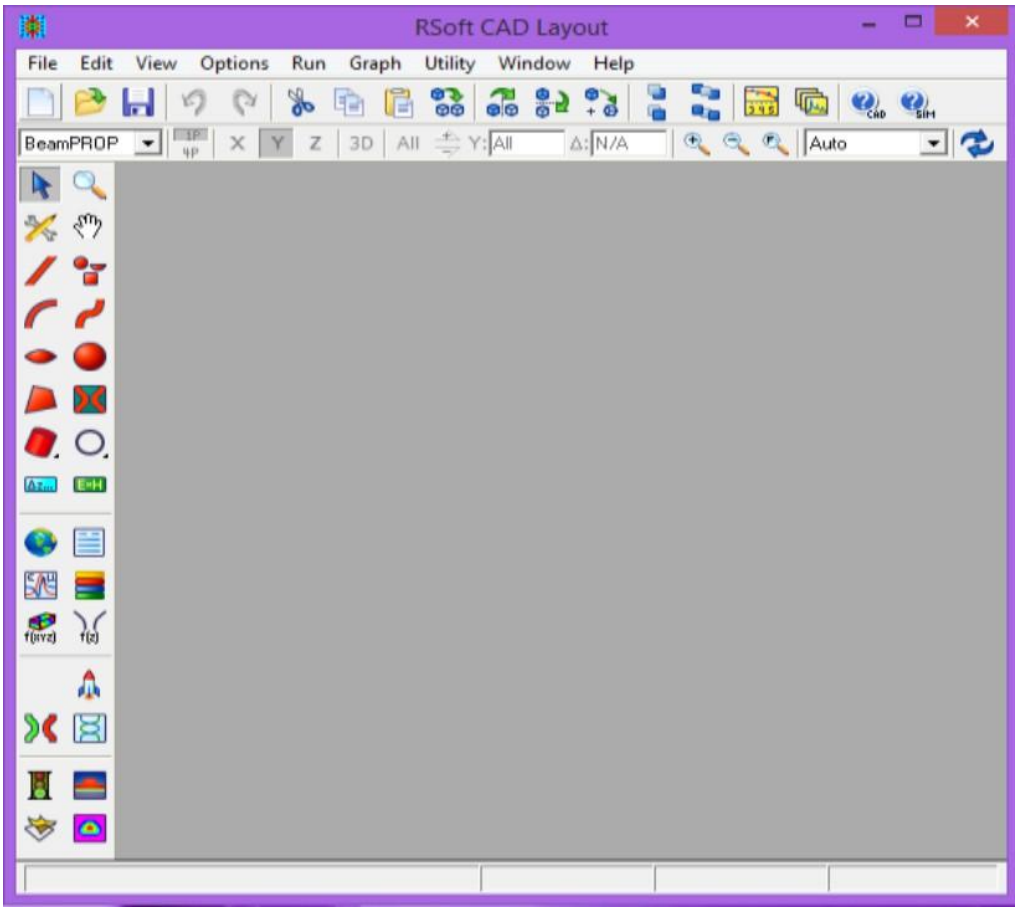


Figure III.1: *La fenêtre de programme de R Soft CAD, montrant la barre de menus au-dessus, les barres des outils supérieurs et gauches, et la ligne d'état au fond.*

III.3.4. Présentation des autres applications

PERFORME SIMULATION (Effectuer La simulation) : Cette option ouvre la boite de dialogue du paramètre de simulation ou l'utilisateur peut indiquer des paramètres de simulations avant de l'effectuer.

EDIT GLOBEL SETTINGS : (Editer les arrangements globaux) Cette option ouvre la zone de dialogue d'arrangement globale (global Settings) ou les arrangements par défaut de la boite, peuvent être places. Elle est équivalente à la nouvelle boite de dialogue du circuit.

AUNCH DATA BROWSER : Cette option ouvre le RSOFT data browser.

EDIT SYMBOL TABLE (Editer le tableau du symbole) : Cette option ouvre le tableau du symbole ou l'utilisateur peut créer de nouvelles variables et pour modifier des variables existantes.

III.4. Présentation de la structure de base

Dans ce chapitre, nous allons étudier le cas des cristaux photoniques bidimensionnels membranaires à réseau de trous d'air (39 × 23) dans un diélectrique à fort indice (n_{si}=3.48), il s'agit d'un réseau à maille hexagonal.

(a) (b)

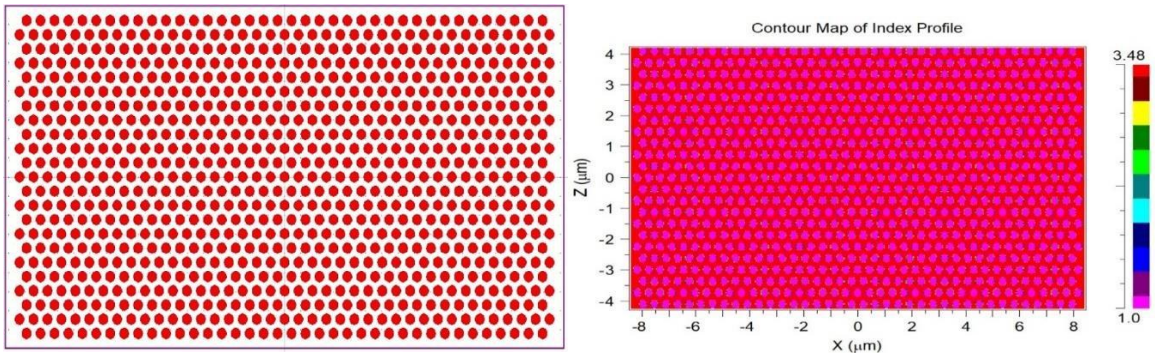


Figure III.2 : *(a) Structure du cristal photonique formé par un réseau Hexagonal 39×23. (b) Distribution de l'indice de réfraction d'un cristal photonique hexagonal.*

III.4.1. Paramètres de la structure étudiée

Les propriétés des cristaux photoniques sont théoriquement décrites par leurs structures de bandes interdites photoniques. Le calcul et l'évolution des diagrammes de ces bandes sont déterminés par la méthode des ondes planes. Tandis que pour la transmission, elle 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.

Dans un premier temps, Nous avons utilisé le logiciel de simulation (BandSOLVE de RSoft basé sur la méthode des ondes planes PWE) pour optimiser les premières bandes interdites (TE et TM) en fonction du rayon R. Nous considérons un réseau triangulaire de trous d'air dans une membrane de Silicium (n=3.48 et a la période du réseau est de 0,430 µm, la période étant fixée de façon à obtenir une bande interdite pour au moins une polarisation à des longueurs d'onde d'intérêt). Dans ce travail, les conditions de PML sont parfaitement prises en compte dans les calculs afin d'éviter toute réflexion à la limite de la région analysée. Avant d'examiner les caractéristiques de la structure en termes de transmission, il est judicieux de présenter le diagramme de bandes de la structure sans défaut car d'un point de vue matériau, il faut s'assurer de l'existence d'une bande interdite photonique suffisamment large : celle-ci n'existe que pour des contrastes d'indice suffisamment élevés.

Un facteur de remplissage *f* élevé peut poser des problèmes techniques : en effet, plus le facteur de remplissage est élevé, compte tenu de la production imprécise de composants de ces tailles, plus la possibilité de chevauchement de motifs est grande. Le choix optimal du rayon *R* est donc fixé à 0,14 µm pour un facteur de remplissage *f* =33%.

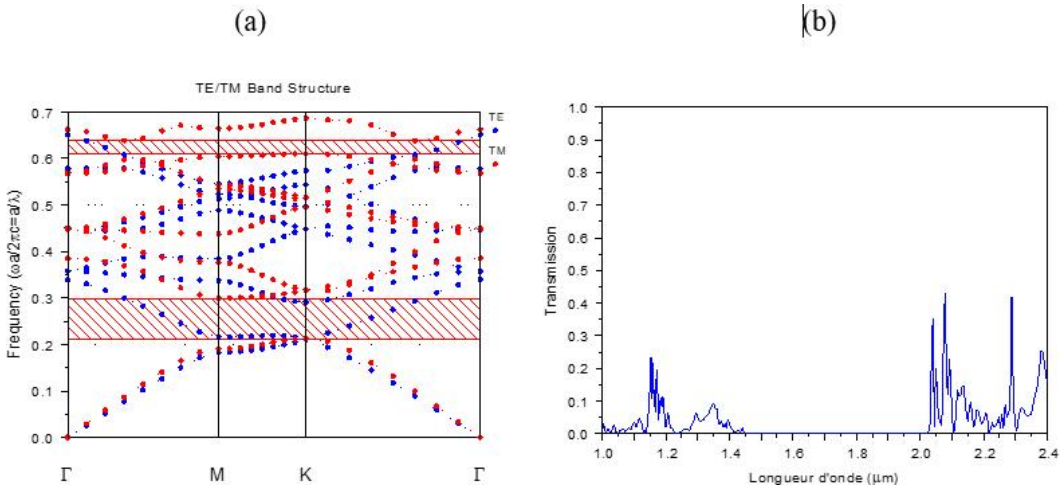
III.4.2. Diagramme de bande interdite photonique

La Figure III.3 (a) présente le diagramme de bande calculé par la méthode des ondes planes (méthode PWE) a l'aide de simulateur BandSOLVE, pour un réseau 2D triangulaire, comme source de lumière, nous utilisons une onde plane de type gaussien. Dans ces conditions, le cristal étudié présente une large bande interdite centrée autour d'une fréquence normalisée a/λ de 0.256. Cette bande est en mode TM comprises entre les deux fréquences normalisées 0.2129 et 0.2991 qui correspondant à une longueur d'onde de 1.43762 µm à 2.0197 µm.

- a = 0.430 µm, R = 0.14 µm

- $a/\lambda 1 = 0.2129$, $\lambda 1 = 0.430/0.2129 = 2.0197$ µm
- $a/\lambda 2 = 0.2991$, $\lambda 2 = 0.430/0.2991 = 1.4376$µm donc $1.4376 < \lambda < 2.0197$ µm.

La Figure III.3 (b) présente la présentation du spectre de transmission calculé par la méthode FDTD fait par le logiciel FullWAVE de RSoft.



La Figure III.3 : *(a) Diagramme de dispersion du CP-2D dans la membrane Si (un réseau hexagonal de trous d'air, a=0.430, r=0.14, f=33%.) calculé par la PWE. (b) la présentation du spectre de transmission calculé par la FDTD-2D.*

III.5. Guide d'onde sans cavité

La création d'un défaut dans un cristal photonique résulte de la rupture de la périodicité diélectrique, ce qui entraîne l'ouverture d'une bande de fréquence autorisée à l'intérieur de la bande interdite photonique. Les défauts peuvent prendre une infinité de formes, allant de la modification de la taille ou de l'indice d'un seul motif du cristal à la suppression de rangées entières de motifs, appelées défauts linéiques.

Dans cette section, nous examinons un guide d'onde à cristaux photoniques $W_1^K A$. (Une rangée de trous omise) Ce guide d'onde est formé en retirant une rangée de trous $W^K{}_1$ dans la direction ΓK du réseau hexagonal.

Le calcul FDTD réalisé avec le logiciel FullWAVE de RSoft permet de tracer le spectre de transmission (figure III.4 (a)). On observe une large transmission pour le guide droit $W_1^K A$, qui s'étend sur plus de 600 nm. Dans ce cas, nous nous sommes concentrés sur la région spectrale de la bande interdite du cristal 2D calculée précédemment (BIP entre 1437,6 nm et

2019,7 nm). Grâce au calcul FDTD (figure III.4 (b)), la distribution spatiale d'une excitation continue (CW) à une longueur d'onde de 1,55 µm (longueur d'onde permise) pour la polarisation TM du guide droit W1 a été montrée. Nous constatons que le champ est bien confiné, et la forme de sa distribution démontre clairement l'existence du phénomène de guidage de la lumière le long du guide W_1^K A.

(a) (b)

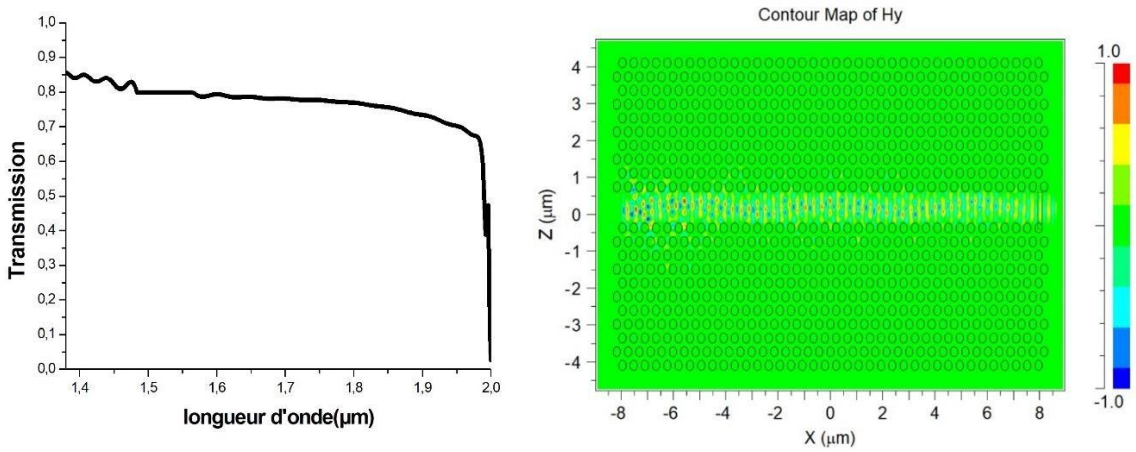


Figure III.4 : *(a) Spectre de transmission guide droit référence W_1^K A en mode TM. (b) Distribution spatiale du champ à la suite d'une simulation de type FDTD et une excitation de type CW du guide droit référence W1, pour une polarisation TM à λ=1.55µm.*

III.6. Conception et analyse de biocapteur RI à base de guide-cavité couplée

Les biocapteurs à base de guide-cavité couplée, offrent plusieurs avantages en termes de compacité, de sensibilité et de facteur de qualité (Q) élevé, d'extension facile aux réseaux de capteurs et de capacité de mesure parallèle. Pour cela une nouvelle conception basée sur cette approche de couplage, est donc proposée.

III.6.1. Guide d'onde avec cavité hexagonale et cavité hexagonale irrégulière

III.6.1.1 Description de la première structure étudiée

Pour utiliser la structure en détection, il est nécessaire d'introduire des défauts. L'ajout stratégique de défauts de périodicité dans le cristal est l'un des principaux avantages des structures à cristaux photoniques. Ces défauts peuvent adopter une variété infinie de géométries,

allant de la modification de la taille ou de l'indice d'un seul motif du cristal à la suppression de rangées entières de motifs, appelés défauts linéiques.

Le biocapteur comprend deux tronçons de guides (W1, 2) suivant la direction ΓK et une cavité hexagonale et cavité hexagonale irrégulière formée par l'omission des trous. La lumière d'excitation (un mode du guide d'onde) se propage dans le premier guide et se couple au deuxième à travers la microcavité. Cette lumière peut être détectée à la sortie du guide d'ondes (figure III. 5(a et b)). Ce couplage type permet d'extraire une ou plusieurs fréquences se propageant dans le guide.

La cavité hexagonale est créée par l'omission de 15 trous vers la gauche et ceux à côté droit et 24 trous au centre, de manière à former une figure hexagonale, comme le montre la figure ci-dessous (Figure III.5. (a). Dans la Figure III.5 (b), nous avons omis 15 trous vers la gauche et 16 trous vers droit, et 19 trous au centre, de manière à former une figure hexagonale irrégulière.

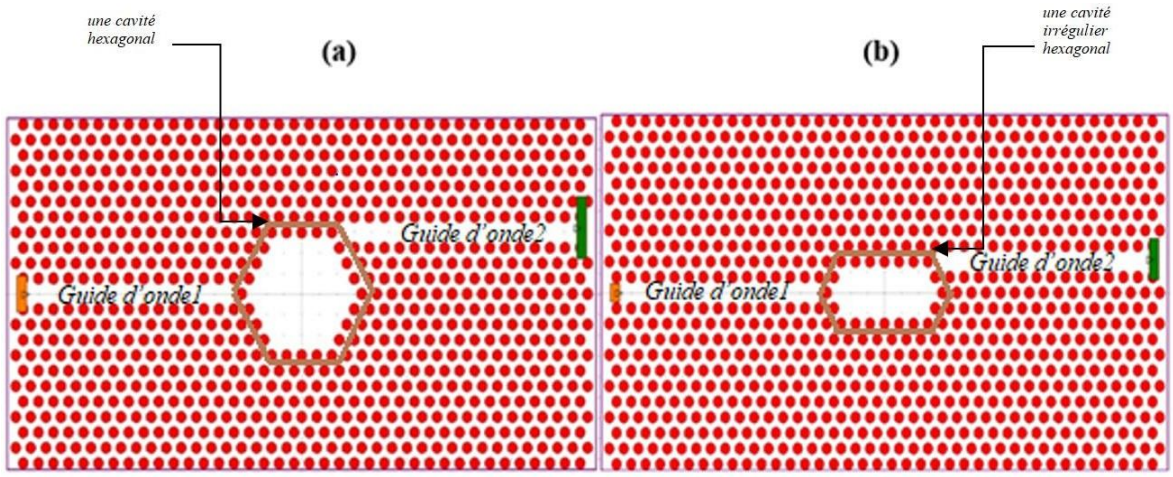


Figure III.5 : (a) structure avec une cavité hexagonal, (b) structure avec une cavité hexagonale irrégulière.

(a) (b)

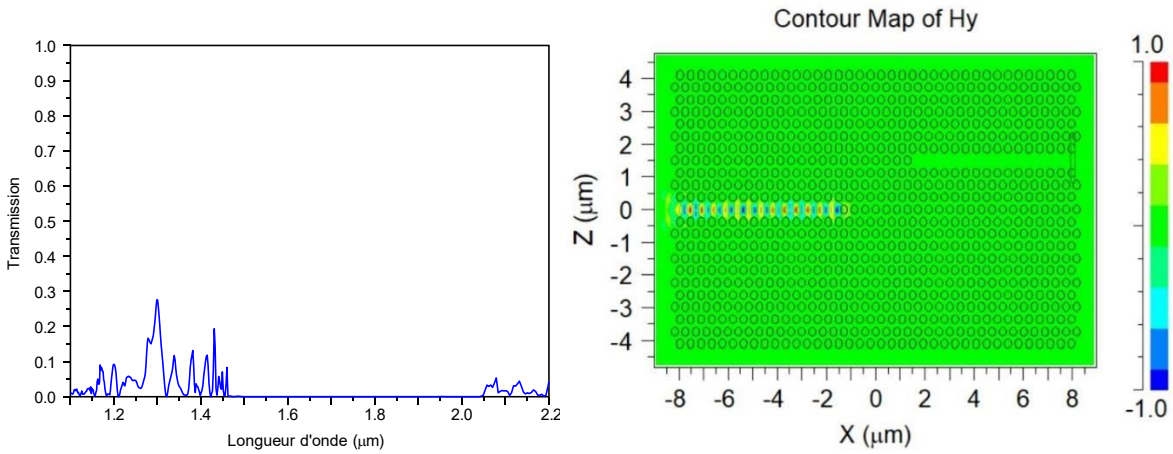


Figure III.6 *: (a) Spectre de transmission du deux guides d'onde W_1^K et $W_{12}^K A$ sans cavité. (b) Distribution spatiale du champ à la suite d'une simulation de type FDTD et une excitation de type CW, pour une polarisation TM à λ=1.55µm.*

La figure III.6 montre le spectre de transmission d'un système couplé entre guide d'onde 1 et guide 2 sans cavité, calculé par la méthode FDTD de logiciel FullWAVE. Dans ce cas, nous nous sommes concentrés sur la région spectrale de la bande interdite du cristal 2D calculée précédemment (BIP entre 1437,6 nm et 2019,7 nm).

Ensuite, nous envisageons dans la figure III.6 (b)) une carte de contour de Hy pour un cristal photonique 2D(a) pour deux guides W_1^Ket W_2^Ksans cavité, nous remarquons que le phénomène de guidage ne se produit pas après l'envoi d'un signal optique, car le signal apparait uniquement dans le premier guide ce que signifie qu'il n'y en a pas de transmission, et c'est ce que ça montre le spectre de transmission des deux guides d'onde $w1^kA$ et $w2^kA$ (Figure III.6 (a))

III.6.1.2 Etude de la transmission et de la sensibilité

- **Etude de la transmission**

La figure III.7 montre le spectre de transmission d'un système couplé entre guide d'onde W_1^K, W_2^K avec cavité hexagonale et hexagonale irrégulière, calculé par la méthode FDTD de logiciel FullWAVE.

Comme nous pouvons le constater sur la figure III.7, les deux pics de transmission sont observés à la résonance de longueurs d'onde de 1.821 µm pour le *mode 1* et de 1,884 µm pour le *mode 2*, concernant le résonateur en hexagonal, et de 1.8541 µm pour le *mode 1* et de 1.911 µm pour le *mode 2*,

concernant le résonateur irrégulier hexagonal. On voit clairement que l'existence de la cavité hexagonale irrégulière, se traduit par un décalage des longueurs d'onde de résonance vers de longueurs d'onde plus longues et une augmentation de la transmission de 88% pour le *mode 2* et de 72% pour le *mode 1*.

La figure III.8 représente les distributions de champ | Hy | pour les longueurs d'onde de résonance on et off des structures proposées. Il est clairement remarqué que la lumière incidente dans les longueurs d'onde de 1.821 µm se couple avec une cavité hexagonale et 1.8541 µm, se couple avec une cavité hexagonale irrégulière, il est donc interdit de passer à travers le guide d'ondes, contrairement au reste des longueurs d'onde qui sont transmises à la sortie.

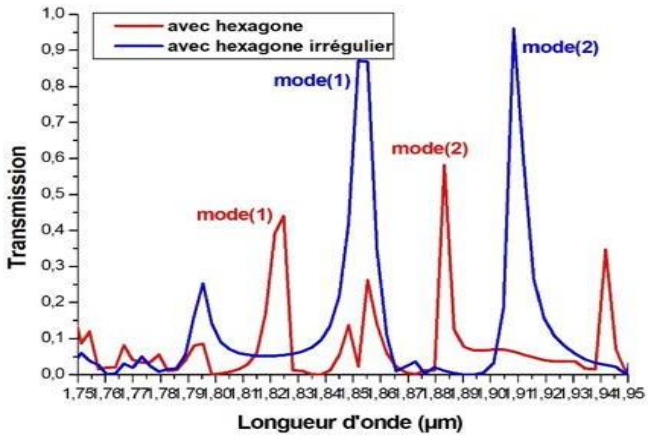
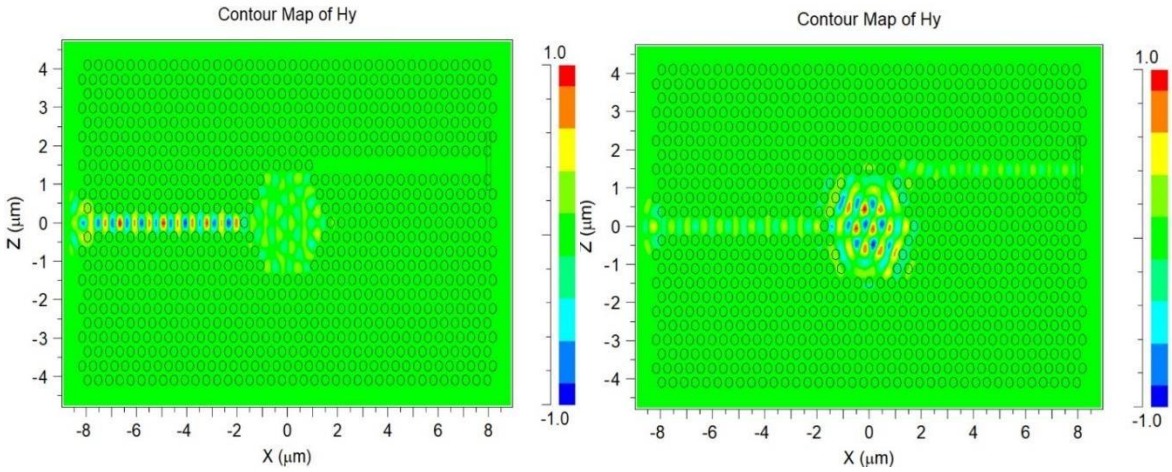


Figure III.7 : *Les spectres de transmission de la première structure étudiée avec* n_{air} *=1, R = 140nm.*

(a) (b)



(c) (d)

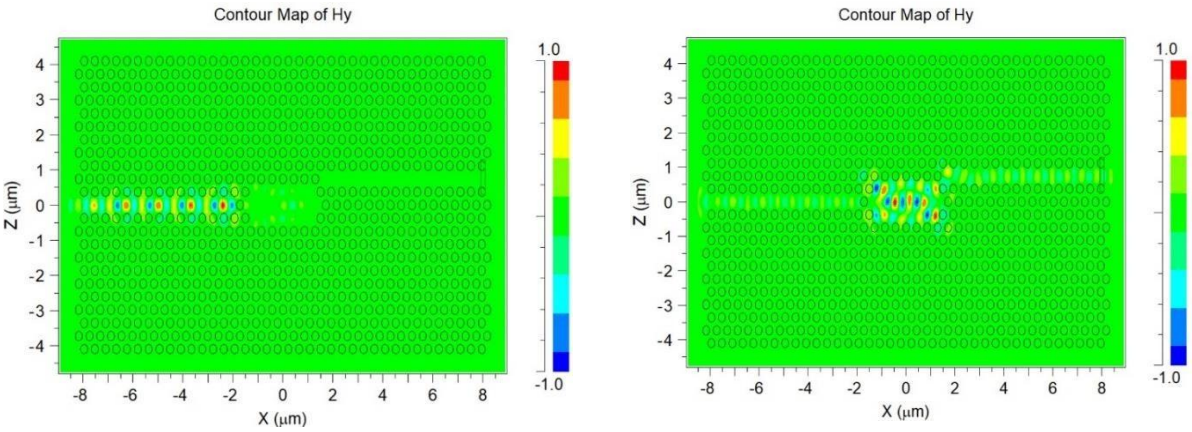


Figure III.8 : *La Distribution du champ magnétique dans la cavité mode on /off : ((λ=1.80 (a) et λ_{res}=1.821 (b)) et (λ=1.82 (c) et λ_{res}=1.8541 (d))).*

❖ **Etude de la résonance de la cavité en fonction d'indices de réfraction**

Notre étude consiste à calculer le spectre de transmission avec la présence d'un liquide dans les trous d'air (élément à analyser), ces spectres sont calculés pour différent indices de réfraction (n=1 jusqu'à n=1.08 avec un pas d'indices de 0.02).

La figure III.9 (a) illustre les spectres de transmission de la structure proposée pour différents indices de réfraction variant 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 pour le mode 1 et mode 2. La figure III.9 (b) représente la relation de linéarité maintenue entre les longueurs d'onde de résonance et les indices de réfraction pour le premier et deuxième mode.

La sensibilité (S), est un aspect important dans la conception et l'analyse des capteurs RI à base de cristaux photoniques, elle peut être calculée comme S = Δλ / Δn (nanomètre par indice de réfraction (nm / RIU)), où Δλ désigne le décalage de la longueur d'onde de pic de résonance de la transmittance, et Δn représente la variation de l'indice de réfraction dans la structure du capteur photonique. En gardant les autres paramètres existants fixes, et en augmentant l'indice de réfraction entre n = 1 et n = 1,08, la sensibilité pour le premier mode est d'environ 208.5 nm / RIU et pour le second mode est d'environ 217.5 nm / RIU (Tableau III.1).

(a) (b)

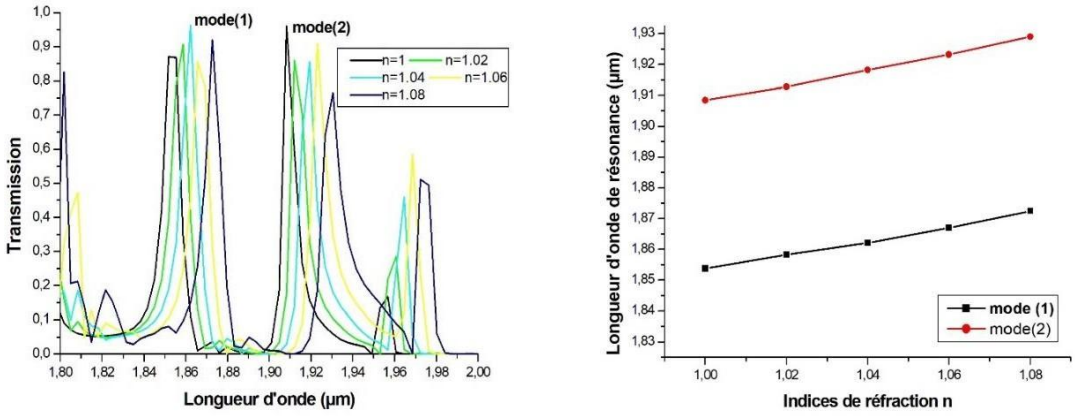


Figure III.9 : *(a) le spectre de transmission de la structure pour différents indices de réfraction n (R=140nm et a =430nm), (b) la langueur d'onde de résonance en fonction de l'indice réfraction n du matériau à détecter.*

L'indice de réfraction	*Sensibilité (nm/RIU) Mode 1*	*Sensibilité (nm/RIU) Mode 2*
1	----------	----------
1,02	204	209
1,04	208	219
1,06	210	215
1,08	212	227

Tableau III.1 : *La sensibilité (S) en fonction de l'indice de réfraction (RI).*

III.6.2. Guide d'onde avec une cavité hexagonale irrégulière en configuration anneau

III.6.2.1. Description de la deuxième structure étudiée

Dans le but d'amélioration des performances de notre biocapteur et l'augmentation de ses capacités à détecter les petites concentrations d'analyte et les variations dans ce dernier, nous présentons la conception et la modélisation d'un biocapteur à CPh basé sur une cavité à configuration anneaux. Cette dernière, fournit une excellente amélioration pour la sensibilité et le facteur de qualité. La structure proposée est composée d'un système d'un guide d'onde couplés à une cavité à configuration anneaux, Les paramètres des trous en forme d'anneau sont définis par leurs rayons internes et externes r_{in} = 0.08 µm (couleur jaune) et R_{out} = 0.14 µm). En rouge respectivement, comme illustré dans la Figure III.10.

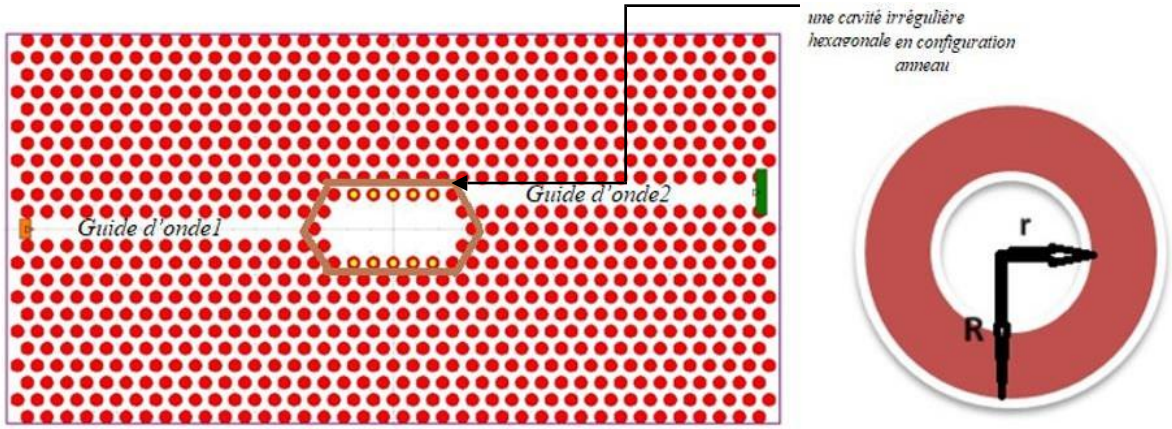


Figure III.10. : *Structure avec une cavité irrégulière hexagonale Et ring avec R = 0.14 µm et* r_{in} *= 0,08 µm.*

Comme nous pouvons le voir sur la figure III.11, les deux pics de transmission sont observés à la résonance de longueurs d'onde de 1.854 µm pour le mode 1 et de 1,911 µm pour le mode 2, concernant une cavité hexagonale irrégulière, et de 1.86 µm pour le mode 1 et de 1.92 µm pour le mode 2, concernant une cavité hexagonale irrégulière en configuration anneau. On voit clairement que l'existence de la cavité hexagonale irrégulière, se traduit par un décalage des longueurs d'onde de résonance vers de longueurs d'onde plus longues.

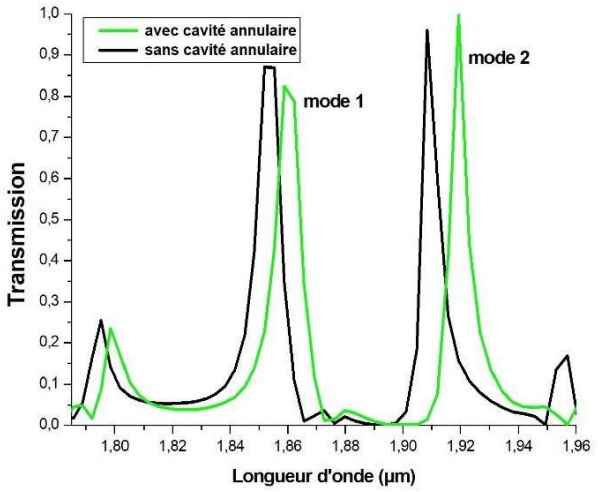


Figure III.11: *(a) Spectre de transmission de la 3 éme structure pour n=1, R= 0.14 µm et* r_{in} *= 0,08 µm.*

III.6.2.2. Exemple d'application (Capteur de paludisme)

Le paludisme est causé par le Plasmodium intra , un parasite intra érythrocytaire, alors qu'il existe quatre espèces de Plasmodium qui peuvent infecter l'homme [56] ; l'espèce Plasmodium falciparum est la forme de paludisme la plus pathogène avec le plus grand nombre de décès dans le monde (P. falciparum représentaient 99,7 % des cas de paludisme estimés dans le région africaine) [57], le paludisme se transmet par la piqûres de moustiques anophèles femelles infectés qui attaquent les cellules du sang rouge et du foie [58].

Les techniques analytiques classiques sont largement utilisé pour le diagnostic du paludisme. Cependant, la plupart de ces méthodes présentent des inconvénients, tels que le traitement en plusieurs étapes d'analyse, les équipements d'analyse longs et coûteux, le manque d'opérateurs qualifiés, ainsi que le manque d'applicabilité sur site, ce qui rend ces méthodes traditionnelles, inefficaces pour détecter et contrôler la propagation de la maladie. Il est donc nécessaire d'utiliser des capteurs de diagnostic hautement sensibles, rapides, simples, applicables sur le terrain et peu coûteux pour le diagnostic du paludisme. Les biocapteurs sont des outils de détection qui détectent un analyte spécifique à l'aide de molécules de récepteurs biologiques spécifiques [59], les biocapteurs à cristaux photoniques (PhC) jouent un rôle clé dans le diagnostic du paludisme, ils ont récemment suscité beaucoup d'intérêt en raison de leur forte interaction lumière-matière entre les modes de résonance et les analytes cibles, ce qui augmente la sensibilité de détection, et en raison de leur facilité de fabrication et compatibilité CMOS [60]. Les performances de ces biocapteurs sont évaluées par la capacité à détecter la plus petite variation de l'indice de réfraction. Dans la plupart des cas, à la suite d'une infection

palustre, les cellules sanguines rouge dégénèrent et les caractéristiques de la structure des globules rouges change en trois étapes : premièrement, stade annulaire d'une durée de 24 heures, puis l'étape des trophozoïtes dans les 24 à 36 heures. Enfin, le stade schizonte dans les 36 à 48 heures.

Selon ces étapes, l'indice de réfraction de chaque étape est de 1,395, 1,383 et 1,373 [61], respectivement. L'indice de réfraction varie donc des globules rouges normaux aux globules rouges infectés.

Le tableau III.2 présente certains types de paludisme ainsi que leur indice de réfraction (Ri) normales et infectées [9].

Types de cellule	RI
Phase schizonte (Schizont phase)	1.373
Phase trophozoïte (Trophozoites phase)	1.383
Phase anneau (Ring phase)	1.393
Globules rouges non infectés normaux (Normal uninfected RBCs)	1.402

Tableau III.2 : *Certains types de paludisme et leur RI [1.373-1.402].*

À titre d'exemple d'application de la deuxième structure, Nous étudierons le biocapteur optofluidique pour la détection de paludisme dans une solution aqueuse. Une variation de l'indice de réfraction provoque un décalage du pic de transmission correspondant à un état de défaut, qui peut être utilisé pour diagnostiquer le paludisme.

La figure III.12 représente le spectre de transmission normalisé de la deuxième conception avec les paramètres ($R = 0.14\ \mu m$ et $r_{in}=0.08\ \mu m$). Les spectres de transmission sont obtenus pour le stade normal et les trois stades du paludisme. Comme on peut le constater, le déplacement du pic de résonance vers la droite en fonction de l'évolution de l'indice de réfraction de l'analyte, ces pics résonants (mode 1) se produisent à 1.881 µm pour le stade schizonte (n = 1.373), 1.884 µm pour le stade trophozoïte (n = 1.383), 1.888 µm pour le stade annulaire (n = 1.395) et 1.8902 µm pour le stade normal (n = 1.402). En conséquence, le

biocapteur présente une sensibilité élevée jusqu'à 310 nm/RIU (mode 1) et 315 nm/RIU (mode 2).

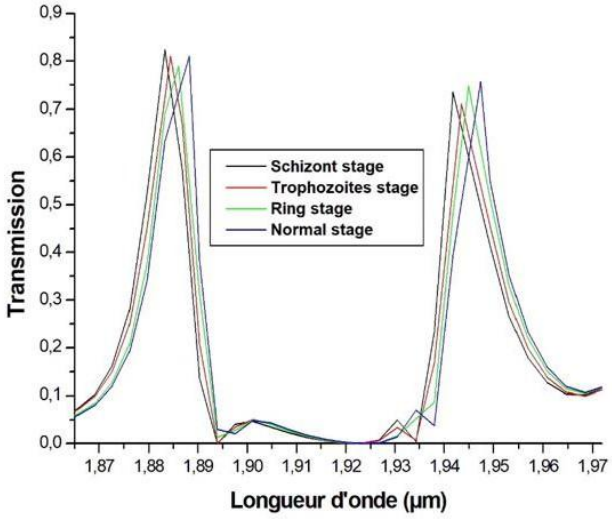


Figure III.12: *Spectre de transmission correspondant à la variation de la longueur d'onde de résonance en fonction des différents l'indice de réfraction de l'analyte de 1.373 à 1 .402.*

III.6.2.3. Influence d'un rayon intérieur de l'anneau (r_{in}) sur la sensibilité du biocapteur

Nous avons analysé l'impact de différentes valeurs de r_{in} sur les propriétés du biocapteur RI à base de cristaux photoniques. Des spectres de transmission d'indice 1 pour des valeurs de r_{in} variant de 60 à 100 nm par pas de 10 nm sont présenté sur la figure III.13(a), l'augmentation de la valeur r_{in} est associée à une augmentation de la longueur d'onde de résonance. Cela signifie que la valeur de r provoque un décalage de la longueur d'onde de résonance, et le décalage pour $r_{in} = 100nm$ est plus grand que celui pour r_{in}=60,70,80 et 90 nm.

Lorsque le rayon intérieur de l'anneau (r_{in}) augmente (Figure III.13 (b), nous observons une augmentation de la longueur d'onde de résonance.

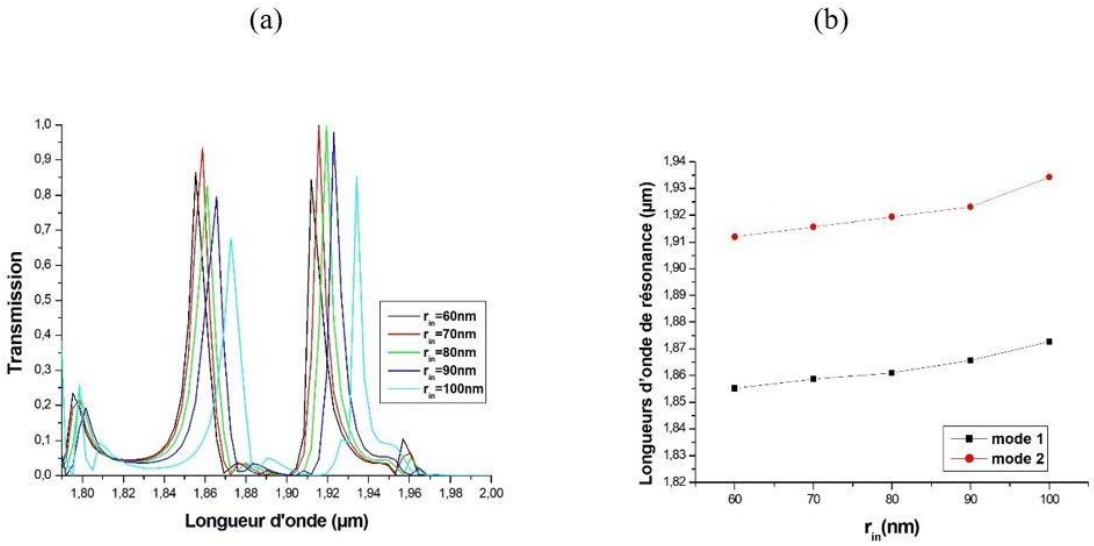


Figure III.13 : *(a)Spectre de transmission de la deuxième structure pour différentes valeurs de* r_{in}*, (b) La langueur d'onde de résonance en fonction de rayon* r_{in}*.*

La figure III.14 montre la relation entre la sensibilité et le rayon r_{in}. Il est clairement démontré que la sensibilité du biocapteur s'améliore avec l'augmentation de la valeur du rayon (r_{in}) : plus le rayon est grand, plus la sensibilité est élevée.

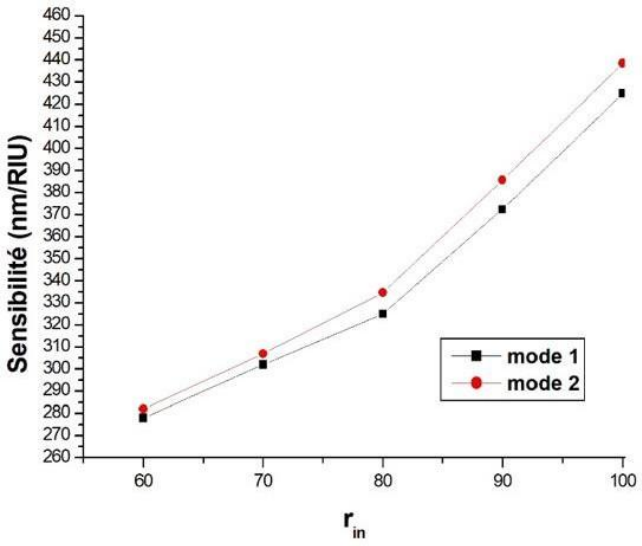


Figure III.14 : *La variation de sensibilités en fonction de déférentes valeurs de rayon* r_{in} *.*

Dans le tableau (III.3) suivant : les résultats obtenus (la sensibilité S en fonction du changement du rayon r_{in}) sont classés :

r_{in}	Sensibilité S (nm/RIU) Mode 1	Sensibilité S (nm/RIU) Mode 2
60	278	282
70	302	307
80	325	334.6
90	372.5	385.7
100	424.8	438.5

Tableau III.3: La variation de sensibilités (S) pour deux modes, en fonction de rayon r_{in}.

D'après le tableau III.3, la sensibilité du biocapteur est obtenue en augmentant la valeur de r_{in}, pour le mode 1 la sensibilité est de 424.8 nm / RIU alors que dans le cas du mode 2, la sensibilité était de 438.5 nm / RIU, est obtenue correspondant à la valeur de r_{in} = 100 nm, par rapport à la sensibilité de 278 nm / RIU pour le mode1 et 282 nm / RIU pour le mode2 où la valeur de r_{in} était de 60 nm.

III.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé deux propositions de biocapteurs RI aux cristaux photoniques bidimensionnelles à base de guide-cavité couplée. La méthode des différences finis dans le domaine temporel (FDTD) intégrée dans le simulateur commercial R-Soft est utilisée pour caractériser toutes les variations de conception.

La première structure proposée est un guide d'onde couplé avec une cavité hexagonale irrégulière pour un biocapteur d'indice de réfraction. Les positions des pics de transmission sont de nature linéaire par rapport à l'indice de réfraction du matériau détecté. Dans cette structure, la sensibilité linéaire maximale est S = 212 nm / RIU et S = 227 nm / RIU pour le *mode 2* et le *mode 1* respectivement, après optimisation des paramètres structurels.

La deuxième structure proposée est un guide d'onde avec une cavité hexagonale irrégulière en configuration anneau. Nous avons montré que ce dispositif peut être destiné à la

détection des globules rouges infectées par le paludisme (malaria) avec une sensibilité très prometteuse (310 nm / RIU pour mode1 et 315 nm / RIU pour mode 2).

Les positions des pics de transmission ont des relations linéaires par rapport à l'indice de réfraction. De plus, dans cette structure, et après optimisation de ses paramètres structurels (r_{in}=*100nm*), la sensibilité linéaire maximale obtenue est S = 438.5nm / RIU et S = 424.8 nm / RIU pour le *mode 2* et le *mode 1* respectivement.

Conclusion générale

Conclusion générale

En peu de temps, les cristaux photoniques ont pu établir l'étendue de leurs capacités et ont ainsi réussi à susciter l'intérêt de nombreux groupes de chercheurs et d'industriels. Ils ont démontré leur énorme potentiel dans de nombreux domaines variés, allant des télécommunications à la biotechnologie, en passant par les sources laser et les capteurs.

Le capteur à base de cristaux photoniques est une excellente solution en raison des nombreux avantages qu'il offre par rapport aux capteurs électriques classiques, notamment une sensibilité satisfaisante et une plage de fréquences plus large.

Le but de ce travail est de faire une étude des microcavités à cristaux photoniques couplées à un guide onde pour le diagnostic des globules rouges infectées par le paludisme (malaria) à base de cristaux photoniques 2D à l'aide du logiciel RSOFT CAD.

Nous avons divisé cette étude en trois chapitres. Le premier chapitre traite donc des cristaux photoniques, incluant leur définition, leurs différents types, ainsi que leurs caractéristiques. Le deuxième chapitre est consacré aux capteurs. Nous y avons examiné les caractéristiques générales et les divers types de capteurs, puis nous nous sommes concentrés sur ceux basés sur les cristaux photoniques. Dans le dernier chapitre, deux concepts de biocapteurs RI aux RI aux cristaux photoniques bidimensionnelles à base de guide-cavité couplée. La méthode des différences finis dans le domaine temporel (FDTD) intégrée dans le simulateur commercial R-Soft est utilisée pour caractériser toutes les variations de conception.

La première structure proposée est un guide d'onde couplé avec une cavité hexagonale irrégulière pour un biocapteur d'indice de réfraction. Les positions des pics de transmission sont de nature linéaire par rapport à l'indice de réfraction du matériau détecté. Dans cette structure, la sensibilité linéaire maximale est S = 212 nm / RIU et S = 227 nm / RIU pour le *mode 2* et le *mode 1* respectivement, après optimisation des paramètres structurels.

La deuxième structure proposée est un guide d'onde avec une cavité hexagonale irrégulière en configuration anneau. Nous avons montré que ce dispositif peut être destiné à la détection des globules rouges infectées par le paludisme (malaria) avec une sensibilité très prometteuse (310 nm / RIU pour mode1 et 315 nm / RIU pour mode 2). Les positions des pics de transmission ont des relations linéaires par rapport à l'indice de réfraction. De plus, dans cette structure, et après optimisation de ses paramètres structurels (r_{in}=*100nm*), la sensibilité

linéaire maximale obtenue est S = 438.5nm / RIU et S = 424.8 nm / RIU pour le *mode 2* et le *mode 1* respectivement.

Références bibliographiques

[1] S.Asmaa, “Propriétés optique des cristaux photoniques unidimensionnels périodiques.”Mémoire de Master, Université de Mostaganem,2018.

[2] John S. Strong.localization of photons in certain disordered dielectric superlattices.Phys Rev Lett 1987; 58(23):2486.

[3] Wonjoo Suh, M. F. Yanik, Olav Solgaard, and Shanhui Fan, « Displacementsensitive photonic crystal structures based on guided resonance in photonic crystal slabs », Appl.Phys. Lett, Vol 82, N°13, pp 1999- 2001, 2003.

[4] Techno-Science.net - "Cristal photonique - Définition et Explications"

[5] S. G. Johnson, P. R. Villeneuve, S. Fan, J.D. Joannopoulos, “Linear waveguides in photonic-crystal slabs.” Physical Review B, vol. 62, n° 12, 2000.

[6] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Winn, “Photonic crystals. Molding the Flow of Light” Princeton University Press, Princeton, 1995.

[7] H. Benisty, “Modal analysis of optical guides with two-dimensional photonic band-gap boundaries.” J. Appl. Phys., vol. 79, n° 10, 1996.

[8]B.Ahlam,M.Sofiane’’Etude et simulation des cristaux photoniques,’’mémoire de master, département de génie électrique , Université de kasdi merbah ouargla (2017

[9] Dave Steyaert’’Nouvelles structures`a bande interdite photonique pour applications antennaires’’Stage du Master 2, 2006

[10] RSoft CAD 5.1.9, “User guide” RSoft Design Group, 200 Executive Blvd. Ossining, NY 10562

[11] Yannick Merle, « Etude de la dispersion électronique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels », Thèse de doctorat n°47-2003, Université de limoges, Novembre 2003.

[12]: Yablonovitch, E.: Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. Physical Review Letters. 58, 2059–2062 (1987).

[13] Y. Merle, « Etude de la dispersion électronique dans les matériaux périodiques Diélectriques bidimensionnels », Thèse de doctorat n°47-2003, Université de limoges, Novembre 2003.

[14] GRINE Farouk « Principe de la propagation des ondes dans une fibre a cristaux Photoniques ». OPTION Master optique Promotion (2010-2011)

[15] E. Mohamed Chaker, C.Mohamed''Bio-capteur à base de cristaux photoniques Bidimensionnels (CP2D) pour la détection de cellules cancéreuses,'' Mémoire de Master, département de génie électrique , Université de Yahia fares de medea (2023)

[16] *D.Yazid''*Etude et modélisation de la bande interdite photonique dans les Cristaux photoniques bidimensionnel : cas d'une structure connectée*,''* mémoire de master, université de m'sila département d'électronique (2012*)*

[17] A.Halima,M.SLIMANE Zahra''Filtre bi-bandes sélectifs en cristaux photoniques 2D pour les systèmes très hauts débits,''mémoire de master, département de génie électrique , Université Aboubakr BelkaïdŔ Tlemcen(2018)

[18] A.Taklit,Y.Meriem'' ETUDE ET CONCEPTION D'UN DEMULTIPLEXEUR A BASE DE CAVITES A CRISTAUX PHOTONIQUES, 'mémoire de master, département de génie électrique, université de Bejaia,(2020)

[19] F. Lacour. "Propagation de la lumière dans les nanostructures et cristaux photoniques Planaires associés aux guides d'onde : fabrication et caractérisation". Thèse de doctorat en Optique. Université de Franche-Comté. 2005

[20] C. Blin. "Développement de cristaux photoniques en diamant : modélisation, technologie Et application à la bio détection". Thèse de doctorat en Chimie - Physique des matériaux. Université de Pierre et Marie Curie. 2015.

[21] L. Ghisa. "Couplage de micro résonateurs. Applications aux fonctions optiques de traitement du signal". Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, Rennes. 2008.

[22] P.H. Merrer. " Élaboration de sources hyperfréquences à haute pureté spectrale à base de résonateurs optiques ". Thèse de Doctorat, Université Toulouse III. Toulouse. 2009

[23] P. Pottier, C. Seassal, X. Letartre, J.L. Leclercq, P. Victorovitch, D. Cassagne et C. Jouanin. "Triangular and Hexaghonal High Q-Factor 2-D Photonic Bandgap Cavities on IIIV Suspended Membranes". IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 17, p.2058. 1999.

[24] R. K. Lee, O. J. Painter, B. D'Urso, A. Scherer, et A. Yariv. "Measurement of spontaneous Emission from a two-dimensional photonic band gap defined microcavity at nearinfrared Wavelengths". Appl. Phys. Lett., vol. 74, p.1522. 1999

[25] 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.

[26] 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.

[27] H. Rigneault. “La nanophotonique ”. GET et Lavoisier. Paris. 2005.

[28] S. Prorok. “Photonic Crystal Cavities, Nanophotonics and integrated optics”. Whitepaper, Germany. 2013.

[29] M. Zelsmann. “Nano-structures à base de cristaux photoniques en silicium sur isolant Pour les circuits intégrés photoniques et l'émission de lumière”. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble 1. 2003.

[30]B.Fouad,F.Fatima,’’ Etude et conception de capteur à cristaux photoniques bidimensionnels pour la bio détection, ’mémoire de master, département de génie électrique Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou (2021)

[31] KH. Bendemagh,« Etude de dimensionnement d’un coupleur à base de cristaux photoniques destiné aux systèmes de communications » , thèse pour l’obtention du diplôme de doctorat, université ferhat abbas – setif 1, 03/10/2019.

[32] S. Arafa, « Étude des composants à base de cristaux photoniques : Application dans le domaine du démultiplexage et de la détection », Université frères mentouri, constantine, 2018

[33] Lee, Mindy, and Philippe M. Fauchet. "Two-dimensional silicon photonic crystal based biosensing platform for protein detection." Optics express 15.8 (2007): 4530-4535.

[34] Asch. G et Coll, « Les capteurs en instrumentation industrielle » (7 ed), Dunod, Paris, 2006, 2010, p9

[35] P. Menini. Du capteur de gaz a oxydes métalliques vers les nez électroniques sans fil. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2011.

[36] Mai Anh Tuan, Développement des biocapteurs électrochimiques à base de tyrosinase pour la détection des polluants organiques en phase aqueuse, Université Claude Bernard-Lyon 1-france, thèse de doctorat en Chimie, 2004.

[37] Khadro Basma, Conception et réalisation de biocapteurs pour le suivi de polluants dans les eaux naturelles, Université Claude Bernard-Lyon 1-France, thèse de doctorat en Chimie, 2008.

[38] J. Topolancik, P. Bhattacharya, J. Sabarinathan, P. C. Yu, « Fluid detection with photonic crystalbased multichannel waveguides », Appl.

[39] T. Stomeo, M. Grande, A. Qualtieri, A. Passaseo, A. Salhi, M.Vittorio. « Fabrication of force sensors based on two-dimensional photonic crystal technology », Microelectronic Engineering, Vol. 84, issue 5-8, pp 1450-1453, 2007

[40] T.M. Geppert, S.L. Schweizer, J. Schilling, C. Jamois, A.v. Rhein, D. Pergande, R. Glatthaar, P. Hahn, A. Feisst, A. Lambrecht, and R. B. Wehrspohn, « Photonic crystal gas sensors», Proceedings of SPIE, Vol. 5511, 2004.

[41] 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

[42] Chow, Edmond, et al. "Ultra-compact biochemical sensor built with two-dimensional photonic crystal microcavity." Optics letters 29.10 (2004): 1093-1095.

[43] Lončar, Marko, Axel Scherer, and Yueming Qiu. "Photonic crystal laser sources for chemical detection." Applied Physics Letters 82.26 (2003): 4648-4650.

[44] Chakravarty, S., et al. "Ion detection with photonic crystal microcavities." Optics letters 30.19 (2005): 2578-2580.

[45] Lin, Hongtao, Zou Yi, and Juejun Hu. "Double resonance 1-D photonic crystal cavities for single-molecule mid-infrared photothermal spectroscopy: theory and design." Optics letters 37.8 (2012): 1304-1306.

[46] Di Falco, A., L. O'faolain, and T. F. Krauss. "Chemical sensing in slotted photonic crystal heterostructure cavities." Applied physics letters 94.6 (2009): 063503.

[47] Di Falco, A., L. O'faolain, and T. F. Krauss. "Chemical sensing in slotted photonic crystal heterostructure cavities." Applied physics letters 94.6 (2009): 063503.

[48] W. C. Lai et al, On-chip methane sensing by near-IR absorption signatures in a photonic crystal slot waveguide, Optics Letters. Vol. 36, Iss 6, pp. 984-986, (2011).

[49] Y. Chang et al, Temperature dependence of defect mode in a defective photonic crystal, Optics Communications, Vol. 285, Iss 6, pp. 1501-1504, (2012).

[50] T. Lu, P. T. Lee, Ultra-high sensitivity optical stress sensor based on double-layered photonic crystal microcavity, Optics Express. Vol. 17, Iss 3, pp. 1518-1526 (2009).

[51] A. Casas-Bedoya et al, Chip scale humidity sensing based on a microfluidic infiltrated photonic crystal, Appl. Phys. Lett, Vol. 103, Iss 18, pp.181109(1-4), (2013).

[52] C. Fenzl et al, Photonic crystals for chemical sensing and biosensing, Angewandte Chemie-International Edition. Vol. 53, Issue13, pp. 3318-3335. (2014).

[53] Y. Liu, H. W. M. Salemink, All-optical on-chip sensor for high refractive index sensing in photonic crystals, Appl. Phys. Lett, Vol. 106, 031116, (2015).

[54] B. Troia et al, Photonic Crystals for Optical Sensing: A Review, Intechopen chapter book, Advances in Photonic Crystals, pp 242-287, (2013).

[55] D. Benelarbi, Étude de cristaux photoniques en silicium pour l'application à la biodétection, Thèse de doctorat, Univ.Constantine, 2018.

[56] Y. Lo, Y.W. Cheung, L.Wang, M.Lee, G.Figueroa-Miranda, S.Liang, D.Mayer, J.A.Tanner, *Biosens. Bioelectron.* **192**, 113472 (2021).

[57] WHO, “Malaria”.

[58] A. Rashidnia, H. Pakarzadeh, M. Hatami, *Opt Quant Electron*. **54**, 38 (2022).

[59] G. Dutta, *Mater. Sci. Energy Technol.* **3**, 150 (2020).

[60] A. Harhouz, A. Hocini, H. Tayoub, *Telematique*, **21**, 1 (2023).

[61]. N.A. Mohammed, M.M. Hamed, A.A.M. Khalaf, S. ELRabaie, *Eur. Phys. J. Plus*, **135**, 11 (2020)