REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Département du Génie Electrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Electronique

Spécialité : Instrumentation

Bio-capteur à base de cristaux photoniques bidimensionnels (CP-2D) pour la détection de cellules cancéreuses

Présentés par :

Esselimani mohamed chaker

Chergui mohamed

Proposé et Dirigé par :

Dr. BENSALAH Hocine

Promotion 2023

Remerciement

Avec l'aide de Dieu tout puissant, j'ai pu accomplir ce modeste travail.

Je tiens à remercier très chaleureusement mon promoteur de thèse, monsieur BENSALAH HOCINE pour son encadrement, son suivi permanent et ses précieux conseils, ainsi que la patience, et la patience qu'il m'a prodigué au cours de ce travail.

Je voudrais également remercier monsieur le chef de département pour la gérance exemplaire du département de génie électrique.

Je tiens aussi à remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail, pour toutes leurs remarques et critiques constructives.

Enfin, merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

A nos chères pères et mères
Pour leur encouragements, soutien précieux et surtout pour leurs amour et sacrifice pour que rien n'entrave le déroulement de mes études.

A nos très chers frères, Et à toutes nos chères sœurs.

A toute la famille ESSELIMANI et CHERGUI

A tous mes amis KHIRO, ZAKI, YASSER, ZINO, FOUAD, WASSEL, AYMEN et beaucoup autres pour l'entourage qu'ils sont créé dans tout ma carrière universitaire

A tous mes amis SALAH, WAIL, HAKO, SOUHAIB, CHITA, SMAIL, ZINOU et tous les amis qui m'ont aidé de loin et de pris

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.
A tous ceux que j'aime.

الملخص:

البلورات الضوئية هي هياكل مجهرية يمكنها التعامل مع الضوء بطرق دقيقة ومضبوطة. إنها مصنوعة من مواد خاصة لها خصائص بصرية فريدة. عندما تتعرض البلورات الضوئية لعينات بيولوجية ، مثل الدم أو النسجة ، فإنها تتفاعل مع المؤشرات الحيوية للسرطان الموجودة في تلك العينات. يتسبب هذا التفاعل في حدوث تغييرات في الخصائص البصرية للبلورات ، مثل انكسارها أو انعكاس الضوء. يتم قياس وتحليل هذه التغييرات البصرية لتحديد وجود وتركيز المؤشرات الكشف التقليدية. إنها حساسة للغاية، مما يعني أنها يمكن أن تكتشف المستويات المنخفضة من الخليا السرطانية. الحيوية للسرطان. توفر المستشعرات الحيوية القائمة على البلورات الضوئية العديد من المزايا المهمة مقارنة بأساليب الكلمات

المفتاحية : البلورات الضوئية ، المؤشرات الحيوية ، أجهزة الستشعار الحيوية .

Résumé :

Les cristaux photoniques sont des structures microscopiques qui peuvent manipuler la lumière de manière précise et contrôlée. Ils sont fabriqués à partir des matériaux spéciaux qui présentent des propriétés optiques uniques. Lorsque les cristaux photoniques sont exposés aux échantillons biologiques, tels que le sang ou les tissus, ils interagissent avec les biomarqueurs du cancer présents dans ces échantillons. Cette interaction provoque des modifications dans les propriétés optiques des cristaux, telles que leur réfraction ou leur réflexion de la lumière. Ces changements optiques sont mesurés et analysés pour déterminer la présence et la concentration des biomarqueurs du cancer. Les biocapteurs à base de CP offrent plusieurs avantages significatifs par rapport aux méthodes de détection traditionnelles. Ils sont hautement sensibles, ce qui signifie qu'ils peuvent détecter de faibles concentrations de cellules de cancer.

Mots clés : Les cristaux photoniques, biomarqueurs, biocapteurs.

Abstract :

Photonic crystals are microscopic structures that can manipulate light in precise and controlled ways. They are made from special materials that have unique optical properties. When photonic crystals are exposed to biological samples, such as blood or tissue, they interact with cancer biomarkers present in those samples. This interaction causes changes in the optical properties of crystals, such as their refraction or reflection of light. These optical changes are measured and analyzed to determine the presence and concentration of cancer biomarkers.CP based biosensors offer several significant advantages over traditional detectionmethods. They are highly sensitive, meaning they can detect low levels of cancer cells.

Keywords : Photonic crystals, biomarkers, biosensors.

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.

T : Epaisseur de trou.

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 : Photonic 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

Sommaire

Remerciements I

Dédicaces II

Liste des acronymes et abréviations III

Sommaire IV

Liste des figures IIV

Liste des tableaux IIIV

Introduction général 1

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

I.1. Introduction 4

I.2 Historique 4

I.3 Les cristaux photoniques (CPs) 5

I.3.1 C'est quoi Les cristaux photoniques (CPs) 5

I.3.2. Caractéristiques des cristaux photoniques 5

I.3.3. Classification des cristaux photonique 7

I.3.4. Cristaux photoniques unidimensionnelle 7

I.3.4.1. Miroir de Bragg 7

I.3.4.2. Propagation dans un cristal photonique 1D 8

I.3.5. Cristaux photoniques bidimensionnels 10

I.3.5.1. Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels 11

I.3.6. Cristaux photoniques tridimensionnels 12

I.4 Diagrammes de bandes 13

I.4.2. Réseaux directs, réciproques et zones de Brillouin 13

I.4.2. Cristal photonique 2D - Diagramme de bandes 15

I.4.3. Ouverture d'une bande interdite 17

I.4.4. Cartes des bandes interdites 18

I.5 Les types des défauts en CPs 19

I.5.2. Les défauts ponctuels 19
I.5.3. Les défauts linéaires (étendus) 21
I.6 Guides d'ondes dans les cristaux photoniques 22
I.6.1. Direction cristallographique ..... .23
I.6.2. Symétrie des bords 24
I.7 Microcavités à cristaux photoniques 2D 24
I.7.1 Différents types de cavités 25
I.7.1.1 Cavité hexagonale 25
I.7.1.2 Cavité triangulaire 25
I.7.1.3 Cavité rectangulaire 26
I.8 Domaines d'application 26
I.8.1. Le domaine d'optique 27
I.8.1.1 Les fibres optiques 27
I.8.1.2. Les micro-résonateurs 27
I.8.1.3. Filtres et multiplexeurs 27
I.8.2. Le domaine micro-onde 28

I.9 Les ifférents matériaux utilisés 29
I.9.1. Le Silicium 29
I.9.2. Les semi-conducteurs III-V 29
I.10 Conclusion 29
Bibliographiques du chapitre I 30

Chapitre II : Capteurs à base de cristaux photoniques

I.1 introduction 35
I.2 Généralité sur les capteurs 35
II-1-1 définition 35
II-1-2 Rôle d'un capteur 36
II-3-caracterestique d'un capteur 36

II-3-1 Etalonnage 37
II-3-2 sensibilité 37
II-3-3 rapidité 37
II-3-4 précision 38
II-3-5 hystérésis 38
II-3-6 finesse 38
II-4 Généralité sur les capteurs optiques 38
II-4-1 c'est quoi un capteur optique 38
II-4-2 les différents types de capteurs optiques 38
II-4-2-1 capteurs à fibre optique 39
II-4-2-2 capteurs à résonance plasmon de surface (SPR) 39
II-4-2-3 fluorescence 40
II-4-2-4 capteur à base cristaux photonique 41
II-4-3 Etat de l'art de capteur à base de CPs 41
II-4-4 Capteurs d'indice de réfraction (RI) à base de CPh 44
II-4-4-1 Capteurs RI à base des guides ondes à CP 45
II-4-4-2 Capteurs RI à base de microcavités résonantes à CP 46
II-4-4-3 capteur RI a base de réseaux de Bragg a CP 47
II-5 conclusion 47
Bibliographie du chapitre II 48

Chapitre III : Méthodes et Outils de simulations,résultat et interprétation

III.1. Introduction 51
III.2. Méthodes de simulations des cristaux photoniques 51
III.2.1. La méthode des ondes planes (PWE) 52
III.2.2 La méthode FDTD (Finite Différence Time Domain) 52
III.2.2.1. Modélisation de la FDTD 53
III.2.2.2 Conditions aux limites 54
III.3. Outils numériques disponibles 55
III.3.1. Le simulateur « BandSOLVE » 56

III.3.2. Le simulateur «FullWAVE» 57
III.3.2.1. Paramètres physiques 57
III.3.2.2. paramètres numériques..... 58
III.3.3. Présentation des autres applications..... 58
III.4. Présentation de la structure de base..... 59
III.4.1Choix de réseau 60
III.5. Présentation de la structure avec défaut 62
III.5.1. Défaut linéique (Guide d'onde sans cavité)..... 62
III.5.2. Guide d'onde avec cavité..... 63
III.5.2.1 Description de la première structure étudiée..... 63
III.5.2.2 Etude de la résonance de la cavité en fonction d'indices de réfraction..... 65
III.5.3 Guide d'onde avec cavité hexagonale et un cercle central..... 67
III.5.3.1 Description de la deuxième structure étudiée.....67
III.5.3.2 Etude de la résonance de la cavité en fonction d'indices de réfraction..... 68
III.5.4.1 Guide d'onde avec cavité hexagonale et une capsule centrale..... 69
III.5.4.2 Etude de la résonance de la cavité en fonction d'indices de réfraction..... 71
III.5.5. Influence de la taille de la capsule.....74
III.5.5.1 Influence de l'épaisseur T 74
III.5.5.2 Influence de rayon de capsule (R)..... 75
III.5.6. Etude comparative..... 77
III.6. Exemple d'application : capteur de cancer.....78
III.7. Comparaison du biocapteur RI proposé avec différents designs à bases CPs.....80
III.8. Conclusion..... 80
Conclusion général

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

Figure I.1 : Exemple des cristaux photonique naturels 5

Figure I.2 : Structures des cristaux photoniques 7

Figure I.3 : Représentation schématique de l'interférence des ondes réfléchies par chaque dioptre..... 8

Figure I.4 : Structure périodique Bidimensionnelle 10

Figure I.5 : (a) structure 2D connectée (b) structure 2D déconnectée..... 11

Figure I.6 : Représentation (a) d'un réseau carré (b) d'un réseau triangulaire (c) d'un réseau hexagonal 12

Figure I.7 : La première structure BIP 3D: la yablonovite..... 12

Figure I.8 : Diagramme de bandes des modes guidés du cristal photonique sur membrane (calcul 3D) pour un réseau triangulaire de trous d'air et un facteur de remplissage de 50%. Les modes pairs (courbes bleues) présentent une bande interdite à la différence des modes impairs (courbes noires). La zone bleue désigne le cône de lumière..... 13

Figure I.9 : Réseau direct 14

Figure I.10 : zones de Brillouin..... 15

Figure I.11 : Réseau triangulaire. a) réseau direct, b) réseau réciproque c)zone de Brillouin irréductible 15

Figure I.12 : Représentation des polarisations TE et TM dans un BIP 2D 16

Figure I.13 : Diagramme de bande d'un BIP 2D en polarisation TM et TE 17

Figure I.14: (a) Schéma d'un cristal photonique à 2 dimensions (vue de dessus) (b) Schéma d'une relation de dispersion d'un cristal photonique bidimensionnel; une bande interdite est obtenue 18

Figure I.15 : Cartes des bandes interdites d'un réseau de trous d'air dans une matrice diélectrique (ε=12.25). (a) réseau hexagonal. (b) réseau carre..... 19

Figure I.16 : Défauts ponctuels : a) Modification de la permittivité d'une tige (il vaut mieux faire la tige centrale en rouge). b) Absence de la tige centrale..... 20

Figure I.17 : Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions..... 20

Figure I.18 : Résonance à 35.5 GHz de la cavité engendrée par la suppression d'une tige pour le réseau carré diélectrique des tiges d'alumine, période a=3mm, d=1.5mm (onde polarisée TM). L'énergie est concentrée sur les quatre premières tiges voisines des défauts 21

Figure I.19 : Illustration de la propagation du champ dans un cristal à défaut linéaire 22

Figure I.20 : Exemple du guide d'onde mono-rangée réalisé dans un cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant 22

Figure I.21 : Schéma d'un guide d'onde défini (a) dans un réseau bidimensionnel de tiges de diélectriques et (b) dans un réseau de trous d'air 23

Figure I.22 : Schéma de guides W5 pour différentes géométries et orientations de mailles.... 23

Figure I.23 : exemple de guide créé dans un réseau bidimensionnel triangulaire de trous d'air (a) de type A et (b) de type B 24

Figure.I.24 : Signatures spectrales de cavités hexagonales obtenues par photoluminescence. 25

Figure I.25 : Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire (Paramètre de maille a = 600nm, rayon r =200nm) plongé dans une matrice diélectrique (ε=8.12) 26

Figure I.26 : Exemple de cavité rectangulaire dans un cristal photonique triangulaire (a = 560 nm, facteur de remplissage 0.35) 26

Figure I.27 : photographie d'une fibre à trous, de diamètre de cœur (au centre) de 1μm 27

Figure I.28 : Un principe parmi d'autres de filtre add-drop utilisant les CPs 28

Chapitre II : Capteurs à base de cristaux photoniques

Figure II.1 : Définition d'un capteur 36

Figure II.2 : Courbe d'étalonnage d'un capteur 37

Figure II.3 : exemple d'un capteur (SPR) 40

Figure II.4 : Noyau d'une cellule de cancer des os (technique dite dual-color localization microscopy ou 2CLM pour les anglophones). Image obtenue par fluorescence de marqueurs fusionnés avec les protéines GFP et RFP, pour 120 000 molécules localisées dans une zone restreinte (de 470 μm2) 40

Figure II.5 : Photographie par microscopie électronique à balayage d'un dispositif typique (biocapteur à base de cavité à CP)..... 43

Figure II.6 : a) Image MEB de la cavité à base de CP avec vue agrandie des deux sections pertinentes de la fente. b) Spectre de transmission du mode cavité avec Q = 50 000.....43

Figure II.7 : (a) Détection de surface (b) Détection homogène.....45

Figure II.8 : (a) Schéma du capteur à guide d'ondes à cristal photonique (PCW) sur SOI2

(b)Spectres de transmission mesurés pour quatre solutions d'indices différents 46

Figure II.9: (a) Vue au microscope électronique à balayage d'une microcavité à cristal photonique intégrée avec deux guides d'ondes ruban

(b) Spectres de transmission normalisés de la microcavité montrée en (a) avec cinq différents indices de réfraction (variant de n = 1.446 à n = 1.454) 46

Chapitre III : Méthodes et Outils de simulations, résultat et interprétation

Figure III.1 : Décomposition spatiale du volume de calcul 52

Figure III.2 : La technique PML 55

Figure III.3 : Utilisation des couches PML. (a) dans le cas 2D. (b) Exemple d'un maillage d'une structure circulaire avec application des conditions aux limites PML..... 55

Figure III.4 : La fenêtre Rsoft CAD, montrant la barre de menus en haut, les barres d'outils en haut et à gauche, et la barre d'état en bas..... 56

Figure III.5 : La fenêtre de simulation BandSOLVE 57

Figure III.6 : La fenêtre des paramètres de simulation FullWave où les paramètres de base de simulations numériques sont entrés..... 58

Figure III.7 : Distribution de la constante de permittivité. a) réseau carré. b) triangulaire..... 59

Figure III.8 : (a) Diagramme de dispersion du CP-2D dans la membrane Si (un réseau carré de trous d'air, a=0.47µm, r=0.19µm) calculé par la PWE.
(b) la présentation du spectre de transmission calculé par la FDTD-2.....60

Figure III.9 : (a) Diagramme de dispersion du CP-2D dans la membrane Si (un réseau hexagonal de trous d'air, a=0.47µm, r=0.19.) calculé par la PWE.
(b) la présentation du spectre de transmission calculé par la FDTD-2D.....61

Figure III.10 : Guide droit référence W1 (Une rangée de trous omise) réalisé dans un cristal photonique triangulaire de trous d'air sur une membrane de Si suivant la direction ΓK, f=59%..... 62

Figure III.11 : (a) Distribution spatiale du champ à la suite d'une simulation de type FDTD- 2D et une excitation de type CW du guide droit référence W1K A, pour une polarisation TM à λ=1.55µm. (b) Spectre de transmission du guide droit référence W1K A en mode TM..... 63

Figure III.12 : Structure d'un couplage cavité/guide (1ere structure) 64

Figure III.13 : spectre de transmission de la première structure 65

Figure III.14 : La distribution du champ magnétique en deux mode dans la cavité dans le plan x-z à λrésonnance (mode1)=1.6637 µm et λrésonnance(mode2)=1.7274 µm 65

Figure III.15 : (a)Spectre de transmission de la première structure pour différents indices de réfraction. (b) la langueur d'onde de résonance en fonction de l'indice réfraction n du matériau à détecter 66

Figure III.16 : structure d'un couplage cavité/guide (2éme structure) 67

Figure III.17 : Spectre de transmission de la 2éme structure pour n=1 68

Figure III.18 : (a)Spectre de transmission de deuxième structure pour différents indices de réfraction. (n=1, n=1.025, n=1.05). (b) la langueur d'onde de résonance en fonction de l'indice réfraction n du matériau à détecter 69

Figure III.19 : (a) Structure d'un couplage cavité/guide (3éme structure), (b) Capsule avec R=190 nm et T= 140 nm 70

Figure III.20 : (a) Spectre de transmission de la structure couplage cavité à configuration anneaux /guide pour n=1. (b) La distribution du champ magnétique dans la cavité dans le plan x-z à λrésonance (mode1)=1.6566µm, λrésonance (mode2) =1.8092µm 71

Figure III.21 : (a) Spectre de transmission de troisième structure pour différents indices de réfraction. (n=1, n=1.025, n=1.05). (b) la langueur d'onde de résonance en fonction de l'indice réfraction n du matériau à détecter 72

Figure III.22 : (a)Spectre de transmission de troisième structure pour différents épaisseur (T=100nm jusqu'à T=260nm). (b) la langueur d'onde de résonance en fonction de l'épaisseur de trou 73

Figure III.23 : la variation de sensibilités en fonction de déférentes valeur d'épaisseur 74

Figure III.24 :(a)Spectre de transmission de troisième structure pour différents épaisseur (R=150nm jusqu'à R=210nm), (b) la langueur d'onde de résonance en fonction de rayon de trou (R) 76

Figure III.25 : la variation de sensibilités en fonction de déférentes valeur de rayon de trou.. 77

Figure III.26 : Transmission de la structure optimisée du biocapteur pour quatre solutions infiltrées dans les trous de CP 79

Figure III.27 : Longueur d'onde de résonance en fonction de l'indice de réfraction pour la structure optimisée du biocapteur 79

LISTE DES TABLEAUS :

Tableau III.1 : La longueur d'onde de résonance (λ0) pour deux mode, en fonction de l'indice de réfraction (RI), (structure 1) 66

Tableau III.2 : La longueur d'onde de résonance (λ0) pour deux mode, en fonction de l'indice de réfraction (RI), (structure 2) 69

Tableau III.3 : La longueur d'onde de résonance (λ0) pour deux mode, en fonction de l'indice de réfraction (RI), (structure 3) 72

Tableau III.4 : La longueur d'onde de résonance (λ0) pour deux mode, en fonction de l'épaisseur de trou (T) 74

Tableau III.5 : La variation de sensibilités (S) pour deux mode, en fonction de l'épaisseur de trou..... 75

Tableau III.6 : La longueur d'onde de résonance (λ0) pour deux modes, en fonction de rayon de trou (R) 76

Tableau III.7 : La variation de sensibilités (S) pour deux mode, en fonction de rayon de trou..... 77

Tableau III.8 : Certains types de cancer et leur RI..... 78

Tableau III.9 : Sensibilité du biocapteur optimisé pour différents type de cellule.....80

Introduction générale

Introduction générale :

Le cancer est l'une des principales causes du décès dans le monde, avec un impact considérable sur la santé publique. La détection précoce et précise du cancer joue un rôle crucial dans l'amélioration des résultats cliniques et dans la mise en place de stratégies de traitement efficaces. Dans cette perspective, les technologies de détection avancées sontdevenues un domaine de recherche prometteur pour le développement de dispositifs de diagnostic innovants.

Parmi ces technologies, les capteurs à base de cristaux photoniques ont émergé comme une approche prometteuse pour la détection sensible et sélective du cancer. Les cristaux photoniques sont des structures périodiques qui présentent des variations d'indice de réfraction contrôlées à l'échelle nanométrique, permettant la manipulation précise de la lumière à des échelles sublongueur d'onde. Ces cristaux photoniques offrent des fonctionnalités optiques uniques, telles que des bandes interdites photoniques, des modes de résonance optique et des effets de champ proches, qui peuvent être exploités pour la détection sensible des biomarqueurs spécifiques au cancer.

Les cristaux photoniques à une, deux ou trois dimensions sont des structures caractérisées par une modulation périodique de la constante diélectrique. Ceux-ci sont considérés comme des matériaux à bande interdite photonique, présentant une construction artificielle dans une ou plusieurs directions.

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 et du silicium, car elles sont compatibles avec les techniques de fabrication de la microélectronique permettant en particulier d'envisager des productionsmassives à faible coût des micro-dispositifs.

Suite au développement considérable des recherches en électronique, 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).

Dans ce travail, nous avons fait le design et la simulation d'un capteur de cancer à base CP. . Ceci sera détaillé en 3 chapitres.

Dans le premier chapitre, nous commençons à faire des rappels généraux sur les cristaux photoniques. Puis, on présente les concepts de base concernant les cristaux photoniques, (Définition, types, principes de fonctionnement…).

Dans le deuxième chapitre, nous démontrons en détail la notion des captures, tel que la définition d'un capteur, son rôle et ses caractéristiques. Puis, on parle des capteurs optiques, leur importance et leur différents types, comme nous discuterons les capteurs à base CP. Ensuite, nous abordons précisément les Capteurs d'indice de réfraction (RI) à base de CPh et les différents types utilisés.

Dans le troisième chapitre , l'étude est consacrée aux outils de modélisation des cristaux photoniques. . Tout d'abord nous parlons sur des différentes méthodes utiles pour la modélisation des cristaux photoniques et notamment la FDTD « Finite Difference TimeDomain » et la PWE « Plane Wave Expansion ». Par la suite, nous décrivons les logiciels de simulation utilisés pour effectuer ce travail. Ensuite on fait une étude et la conception des biocapteurs à indice de réfraction (RI) à base de cristaux photoniques. Par la suite, nous donnerons les résultats du design et de conception que nous avons. Nous tenterons d'améliorer la sensibilité et le facteur de qualité d'une structure optimale proposée à base du couplage guide-cavité, par l'étude de l'influence d'un certain nombre de modifications apportées au capteur de cancer. Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralités sur les cristaux photoniques

I.1. Introduction :

Les progrès récents de la micro-nanotechnologie ont maintenant permis la fabrication de structures ultra miniatures avec de nouveaux effets physiques. La structure périodique du matériau sur l'échelle de taille, proche de la longueur d'onde des photons, permet la réalisation de milieux qui peuvent empêcher la propagation de la lumière sur toute la bande defréquence (bandes interdites Photonique ou BIP) en anglais : Photonique Band Gap PBG).

Ces matériaux, appelés «cristaux photoniques» (PC, Photonic Crystal). Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice diélectrique varie de manière périodique àl'échelle de la longueur d'onde que l'on souhaite contrôler, sur une ou plusieurs directions de l'espace. Cette variation périodique de l'indice optique suivant les différentes directions entraine l'apparition des gammes de fréquence pour laquelle la lumière ne peut alors plus se propager.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les concepts de base concernant les cristaux photoniques, Nous étudierons le phénomène d'ouverture de bandes interdites et les différents types de cristaux photoniques notamment les cristaux bidimensionnels CP 2D. Nous décriverons ensuite le principe de guidage et les différents types de guides et cavités à base des CPs 2D.

I.2. Historique :

Le terme « cristal photonique » a été utilisé pour la première fois il y a plus de 100 ans, les premières hypothèses sur la possibilité de contrôler la propagation de la lumière utilisant des structures périodiques se rapportent à 1887 avec les travaux de Lord Rayleigh.

Le domaine des cristaux photoniques a démarré en 1987, quand Eli Yabonovitch et Saier John ont introduit séparément et dans des contextes différents, le concept de matériaux àbande interdite.

En 1991, A.Genack et Al ont montré expérimentalement l'existence de l'effet de localisation de la lumière dans les structures périodiques. En même temps, Yablonovitch avait démontré la première bande interdite photonique 3D dans la région des micro-ondes. [1]

En 1996, Thomas Krauss fit la première démonstration du cristal photonique 2D à longueur d'onde optique [2].

En 2000, le premier cristal photonique tridimensionnel avec une bande interdite photonique complète dans le domaine infrarouge proche a été obtenu. [3]

Au cours des dernières années, la recherche dans le domaine des cristaux photoniques a connu une expansion extraordinaire et a couvert presque toutes les disciplines scientifiques en réalisant des progrès importants [3].

I.3 Les cristaux photoniques (CPs)

I.3.1. C'est quoi un cristaux photonique(CP) :

Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans une, deux ou trois dimensions. (Figure I.2). Ce milieu périodique produit sur la lumière qui se propage dans le cristal photonique ; un effet analogue à celui du potentiel périodique sur les électrons dans un cristal, parce qu'ils produisent une certaine région de fréquence, où la propagation des ondes électromagnétiques est interdite, ce qu'on appelle la bande interdite photonique (BIP). Cette priorité intéressante offre aux cristaux photoniques la possibilité du contrôle de la propagation sans absorption des ondes électromagnétiques et permet ainsi des perspectives nouvelles pour la manipulation de la lumière [5].

Dans la nature, certaines espèces animales et minérales utilisent et fabriquent ces structures à des fins esthétiques et stratégiques depuis bien longtemps (Fig I.1) [4] et c'est récemment que l'homme y a trouvé des applications.



Figure I.1 : Exemple des cristaux photonique naturels.

I.3.2. Caractéristiques des cristaux photoniques :

Un cristal photonique est caractérisé par les différents matériaux qui le composent, le système cristallin selon lequel ces matériaux sont organisés et les volumes relatifs qu'ils occupent dans la cellule élémentaire du cristal.

- **La dimensionnalité :**

Elle est déterminée par la périodicité de l'indice de réfraction. La périodicité d'un cristal photonique peut s'étendre à une, deux ou trois dimensions.

- **La symétrie** :

La position des éléments d'un CP détermine la symétrie du réseau. Par exemple, pour un CP 3D de particules sphériques, une symétrie cubique, hexagonale compacte (hc) ou cubique à face centrée (cfc) peut être obtenue.

- **La topologie** :

La topologie rend compte de l'architecture, de la compacité du matériau. Un réseau d'une symétrie donnée peut présenter des topologies différentes (cas de briques constitutives interpénétrées, en contact ou isolées).

- **Le paramètre du réseau** :

C'est la distance fondamentale entre deux éléments constitutifs. Il détermine la région spectrale où le CP interagit avec l'onde électromagnétique.

- **Le contraste d'indice de réfraction** :

Ce paramètre est défini comme le rapport n1/n2 entre les indices de réfraction des éléments et de la matrice. Il offre une idée générale de la force de diffusion des deux matériaux composants du cristal photonique.

- **Facteur de remplissage F :**

Pour le réseau bidimensionnel, Le facteur de remplissage en air f désigne le rapport entre l'aire du motif(un disque) et l'aire de la cellule élémentaire du réseau considéré [17].

$$F=\frac{Amotif}{Amaill\ élémenatire} \quad \text{.....I.1}$$

Dans le cas de motifs circulaires de rayon r dans un cristal carré de période a, on peut définir le facteur de remplissage dans l'air comme suit :

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

Dans le cas de motifs circulaires de rayon r dans un cristal triangulaire de période a, le facteur de remplissage dans l'air est donné pour l'expression :

$$F=\frac{2\pi}{\sqrt{3}}\left(\frac{r}{a}\right)^2 \quad \text{.....I.3}$$

I.3.3. Classification des cristaux photonique :

Le nombre de directions de la périodicité de l'indice de réfraction(RI) indique le type de cristal photonique :

- Périodicité dans une seule direction: cristal photonique 1D ou encore miroir de Bragg.
- Périodicité dans deux directions de l'espace : cristal photonique 2D.
- Périodicité dans toutes les directions de l'espace : cristal photonique 3D.

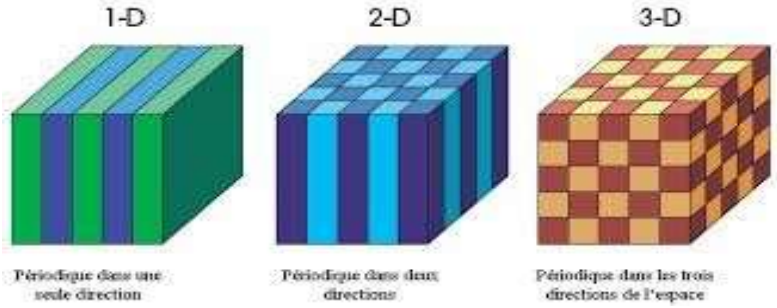


Figure I.2 : Structures des cristaux photoniques.

I.3.4.Cristaux photoniques unidimensionnelle :

I.3.4.1. Miroir de Bragg :

Les réseaux de Bragg sont des successions de couches d'indice de réfraction différent, empilées, de manière périodique. Le comportement du réflecteur de Bragg est expliqué àpartir de processus d'interférences multiples. Comme le montre la figure I-3, une onde qui se propage dans le système multicouche, subit une réflexion à chaque interface. Cette réflexion s'accompagne d'un changement de phase Π si l'onde va d'un milieu de faible indice vers un milieu de fort indice. Elle s'effectue sans changement de phase dans le cas contraire. Lorsque l'épaisseur optique totale des alternances est de λ/2, l'onde réfléchie par l'interface (1) est en phase avec celles réfléchies par les interfaces (3), (5), (7)…Par suite de ces interférences constructives, on finit ainsi par aboutir à une réflexion totale, ce qui revient à dire que l'onde ne peut se propager et que l'on est en présence d'une bande interdite photonique ou BIP [6].

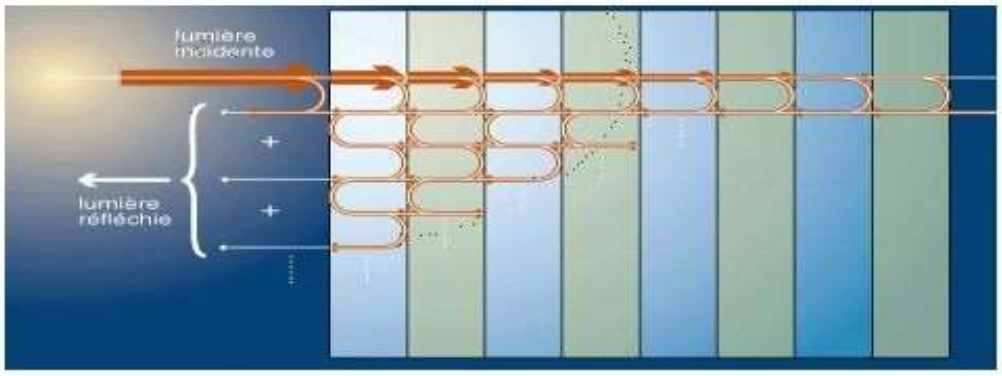


Figure 1.3 : Représentation schématique de l'interférence des ondes réfléchies par chaque dioptre [20].

I.3.4.2. Propagation dans un cristal photonique 1D :

Supposons qu'une onde plane électromagnétique arrive en incidence normale aux couches et essayons de déterminer sa propagation dans le miroir. Nous pouvons distinguer trois domaines différents suivant la valeur de sa longueur d'onde λ par rapport à la période de l'empilement.[7]

- Pour $\lambda << a$: l'onde se propage dans une succession de milieux, la transmission aux interfaces pouvant être bien approchée par les formules de Fresnel.
- Pour $\lambda >> a$: l'onde est peu affectée par la structuration et se propage comme dans un matériau homogène de permittivité moyenne ε_{moy}.
- Pour $\lambda \approx a$: l'onde est fortement perturbée par la périodicité du milieu. La propagation de la lumière nécessite une étude électromagnétique plus complexe que dans les cas précédents.

longueur d'onde de Bragg. Les ondes réfléchies sont alors en phase. Celles-ci interfèrent constructivement pour donner naissance à une onde réfléchie dans le milieu incident. Le milieu périodique se comporte comme un miroir pour cette longueur d'onde particulière. Si le nombre de couches est suffisant, il permet d'atteindre des coefficients de réflectivité très élevés [19].

- **Etude électromagnétique :**
- **Equations de Maxwell :**

Les équations gouvernant la propagation de la lumière dans un cristal photonique sont les équations de Maxwell. Si nous considérons un matériau non magnétique **(μ r = 1)** , sans charges **(ρ = 0)** ni courants et de constante diélectrique réelle **ε (r)**(le matériau est non absorbant), les quatre équations de Maxwell s'écrivent :

E : champ électrique

H: champ magnétique

$= e^{2+1}$

c : célérité dans le vide

ε (r) : permittivité diélectrique

$$\nabla \cdot (\varepsilon(r)E(r,t)) = 0 \quad \text{.....I.4}$$

$$\nabla . H(r,t) = 0 \quad \text{.....I.5}$$

$$\nabla \times E(r,t) = -\mu 0 \frac{\partial}{\partial t} H(r,t) \quad \text{.....I.6}$$

$$\nabla \times H(r,t) = \varepsilon 0\, \varepsilon(r) \frac{\partial}{\partial t} E(r,t) \quad \text{.....I.7}$$

On applique $\frac{\partial}{\partial t}$ à I-6 on obtient :

$$\nabla \times \left(\frac{\partial E(r,t)}{\partial t}\right) = -\mu 0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} H(r,t) \quad \text{.....I.8}$$

De I-7 on a :

$$\frac{\partial E(r,t)}{\partial t} = \frac{\nabla \times H(r,t)}{\varepsilon 0\, \varepsilon(r)} \quad \text{.....I.9}$$

En remplaçant la valeur dans I.8:

$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times H(r,t)}{\varepsilon(r)}\right) = -\mu 0\, \varepsilon 0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} H(r,t) \quad \text{.....I.10}$$

Où $c=(\mu 0\ \varepsilon 0)^{\frac{-1}{2}}$ est la vitesse de la lumière dans le vide :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla \times H(r,t)\right) = -\frac{\partial^2}{c^2 \partial t^2} H(r,t) \quad \text{I.11}$$

Si l'on cherche des solutions à cette équation sous la forme d'ondes harmoniques,

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla \times H(r,t)\right) = \frac{\omega^2}{c^2} H(r) \quad \text{I.12}$$

L'équation (I-9) est l'analogue formel de l'équation de Schrödinger décrivant le mouvement des électrons dans le potentiel périodique d'un cristal, **H(r)** étant l'analogue électromagnétiquede la fonction d'onde électronique **ψ (r)** et **ε (r)** celui du potentiel atomique**V(r).** Cette analogie va nous permettre d'appliquer les outils et les concepts développés en physique du solide, tels que les notions de réseau réciproque, de zone de Brillouin ou le théorème de Bloch[12].

I.3.5.Cristaux photoniques bidimensionnels :

Un cristal photonique bidimensionnel est une structure qui présente une modulation périodique de la permittivité diélectrique suivant deux directions dans l'espace, et homogène dans la troisième.(figure I.4)

Ces structures périodiques sont composées de cylindres diélectriques. Elles présentent une relative simplicité géométrique qui facilite les études théoriques et expérimentales.

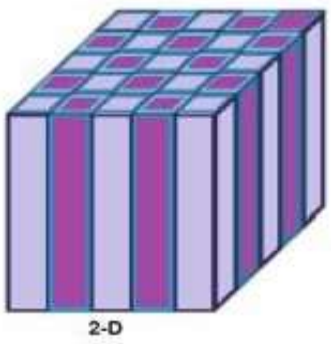


Figure I.4 : Structure périodique Bidimensionnelle.

Il existe deux types de structures périodiques diélectriques :

- Les structures dites « connectées » (figure I.5-a-) : les motifs élémentaires sont l'indice n1 inférieur à l'indice n2 de la matrice diélectrique [9].
- Les structures dites « déconnectées » (figure I.5-b-) : les motifs élémentaires sont d'indice n1 supérieur à l'indice n2 de l'espace inter motifs. Elles sont constituées de tiges diélectriques ou métalliques alignés périodiquement dans l'air [9].

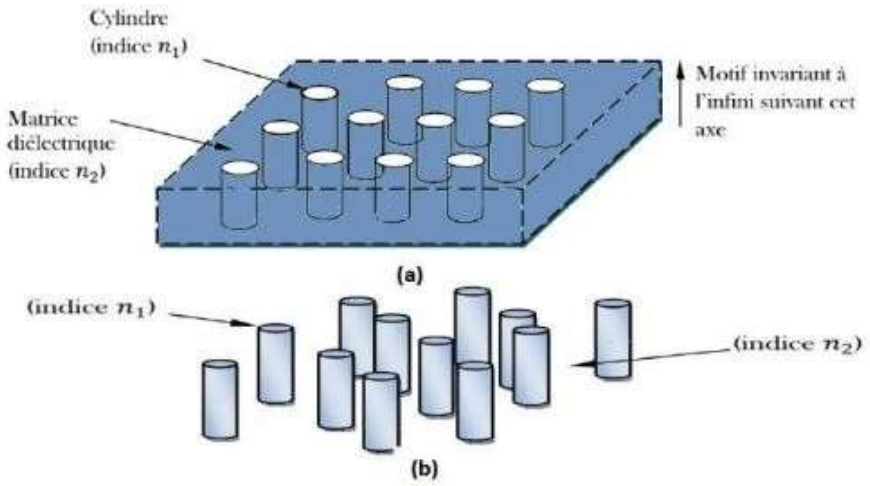


Figure I.5 : (a) structure 2D connectée (b) structure 2D déconnectée [9].

I.3.5.1. Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels :

De nombreux théoriciens ont cherché à optimiser les dimensions des structures pour obtenir des bandes interdites complètes même si celles-ci possèdent des applications. On distingue trois principales familles des matériaux à BIP bidimensionnelle selon la forme du réseau :

- **Réseau carré :**(figure I.6-a-) : La maille primitive est un carré de côté a. Il a été montré que ce type de réseau est très sensible à l'angle d'incidence et à la polarisation de l'onde électromagnétique. Il est ainsi difficile d'obtenir une bande interdite totale. [11]

- **Réseau triangulaire :**(figure I.6-b-) Chaque nœud du réseau est espacé de son proche voisin d'une même distance "a" Cette structure est moins sensibleà l'angle d'incidence que celle du réseau carré mais la bande interdite complète reste aussi difficile à obtenir.

- **Réseau hexagonal :** (figure I.6-c-) En ôtant quelques motifs au réseau précédent. Cette structure est moins sensible à l'angle d'incidence que celledes réseaux précédent. Ce réseau permet d'ouvrir des bandes interdites les plus large dans le plan.

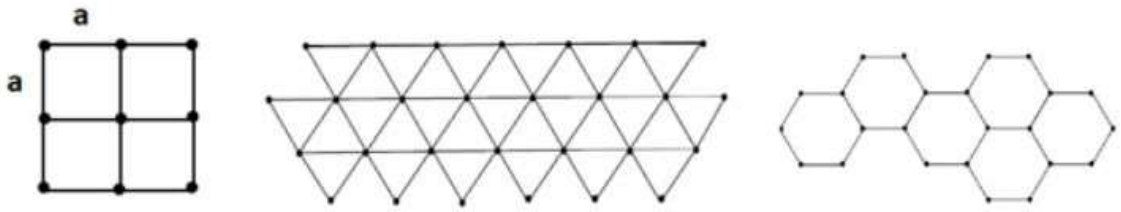


Figure I.6 : Représentation (a) d'un réseau carré (b) d'un réseau triangulaire (c) d'un réseau hexagonal [26].

I.3.6.Cristaux photoniques tridimensionnels :

Les cristaux photoniques tridimensionnels sont des structures dont la permittivité diélectrique est structurée périodiquement dans les trois directions. Elles ont été les deuxièmes à être réalisées par Yablonovitch après les réseaux de Bragg. Son objectif était d'obtenir une bande interdite complète pour toutes les directions de l'espace afin d'inhiber l'émission spontanée de la lumière [10].

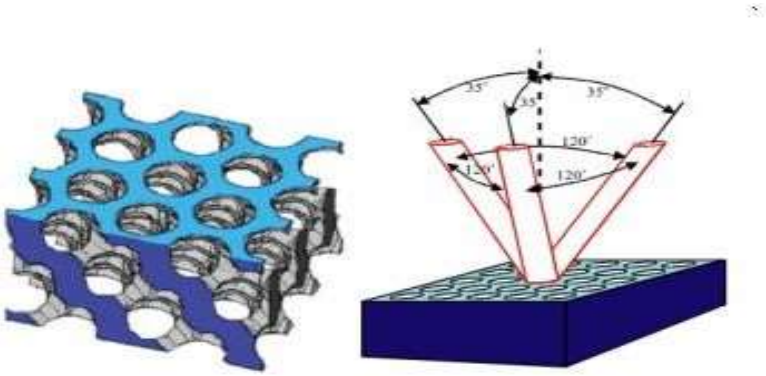


Figure I.7 : La première structure BIP 3D [21].

I.4. Diagrammes de bandes :

N'importe quel cristal photonique est caractérisé par son diagramme de bande. Pour calculer les diagrammes de bandes, il faut considérer pour chaque cristal toutes les directions de propagation possibles. Comme en physique du solide [13], on montre que pour certaines symétries du cristal, on peut limiter l'étude aux vecteurs d'ondes k situés à l'intérieur d'une zone restreinte appelée zone de Brillouin irréductible. Le vecteur k varie le long des directions de hautes symétries de cette zone qui fait partie du réseau réciproque.

Le Diagramme de bandes des modes guidés du cristal photonique sur membrane (calcul 3D) est effectué pour un réseau triangulaire de trous d'air et un facteur de remplissage de 50% (figure I.8). L'épaisseur du guide d'onde est un paramètre crucial pour appréhender les caractéristiques de dispersion d'une structure donnée. La prise en compte de l'épaisseur nécessite en toute rigueur un vrai calcul 3D [28]. Nous présentons le résultat d'un calcul onde plane 3D en configuration guide d'onde.

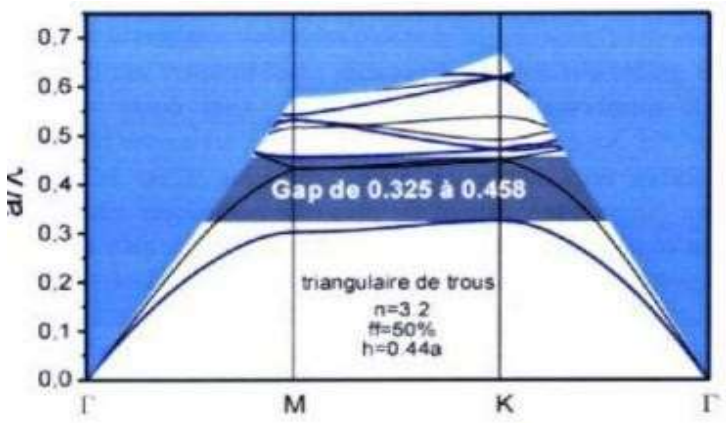


Figure I.8 : Diagramme de bandes des modes guidés du cristal photonique sur membrane (calcul 3D) pour un réseau triangulaire de trous d'air et un facteur de remplissage de 50%. Les modes pairs (courbes bleues) présentent une bande interdite à la différence de modes impairs (courbes noires). La zone bleue désigne le cône de lumière [29].

Nous allons définir dans la section suivante le réseau réciproque et la zone de Brillouin.

I.4.1 Réseaux directs, réciproques et zones de Brillouin :

Beaucoup de propriétés des cristaux photoniques (CPs) sont directement compréhensibles par l'étude de leur diagramme de bandes. Pour les étudier, on utilise les

notions de réseau réciproque et de zones de Brillouin. Le réseau réciproque d'un CP 2D est défini à partir du réseau réel par la relation suivante :

$$\alpha\,\beta j = 2\pi\delta j \quad \text{.....I.13}$$

Où les α et βj sont les vecteurs des réseaux réels et réciproques. δ j est le symbole de Kronecker.

$$\boldsymbol{\delta\ j}\ \begin{cases} 0 \text{ si } i \neq k \\ 1 \text{si } i = k \end{cases}$$

Considérons une structure périodique à deux dimensions représentée sur la figure suivante.

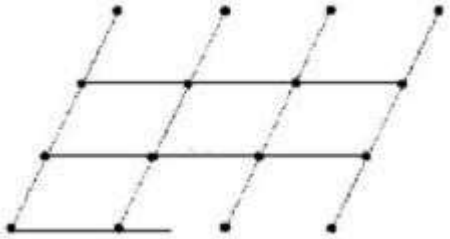


Figure I.9 : Réseau direct.

Les zones de Brillouin (ZB) sont des régions qui partitionnent l'espace réciproque associé au cristal. Il en existe une infinité et peuvent être définies à l'aide des plans de Bragg qui sont les plans médiateurs de l'ensemble des vecteurs formés par des combinaisons linéaires des vecteurs du réseau réciproque.

La définition de la nième zone de Brillouin est la suivante : ensemble des points pouvant être atteint depuis l'origine en croisant $1 - n$ plans de Bragg (figure I.10).

Dans la figure I.10 : Premières zones de Brillouin (ZB) d'un réseau carré. Les plans de Bragg sont tracés en différentes couleurs. La ZB n°3 est atteinte en traversant 2 plans de Bragg (droite noire puis droite rouge).

On appelle zone de Brillouin irréductible la plus petite surface qui permet de déduire la relation de dispersion dans tout l'espace réciproque. Elle correspond à la plus petite surface

qui peut être utilisée pour reconstruire la première zone de Brillouin (ZB) en utilisant les symétries du réseau réciproque.

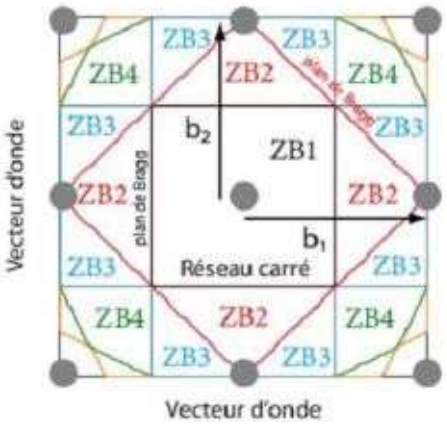


Figure I.10 : zones de Brillouin [22].

❖ **Le réseau triangulaire :**

La géométrie la plus utilisée dans la littérature pour réaliser les structures BIP 2D est la structure hexagonale [14]. On peut obtenir un réseau hexagonal en ôtant quelques motifs au réseau triangulaire précédent. La figure I.11 en donne les principales caractéristiques.

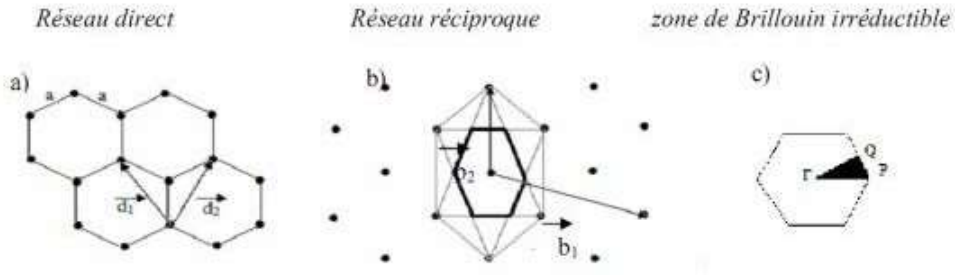


Figure I.11 : Réseau triangulaire. a) réseau direct, b) réseau réciproque c)zone de Brillouin irréductible [14].

I.4.2. Cristal photonique 2D - Diagramme de bandes :

Un cristal BIP bidimensionnel est une structure dont la permittivité diélectrique est modulée périodiquement dans deux dimensions et reste homogène dans la troisième. Ces structures périodiques sont par exemple composées de cylindres diélectriques parallèles. Elles

présentent une relative simplicité géométrique qui facilite les modélisations théoriques et les études expérimentales [15].

Pour étudier le comportement d'une onde électromagnétique incidente sur une telle structure deux polarisations sont possibles :

La polarisation électrique TE correspond au cas où le champ électrique E est parallèle aux cylindres infinis. Alors que celle magnétique TM correspond au cas où E leur est perpendiculaire (figure I-12) :

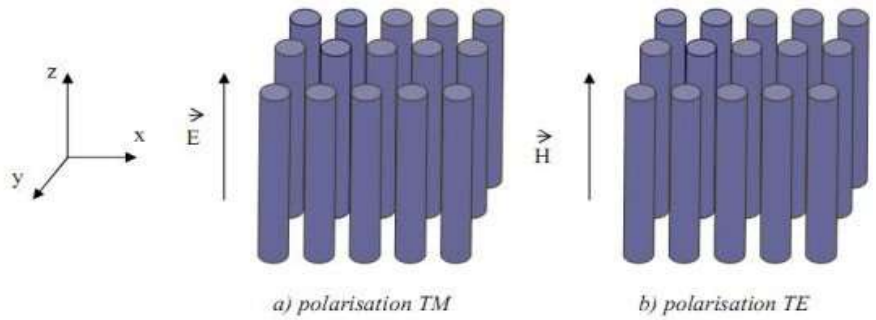


Figure I.12 : Représentation des polarisations TE et TM dans un BIP 2D.[6]

Dans les cristaux 2D, les ondes électromagnétiques se propagent dans le plan perpendiculaire aux tiges et peuvent être séparées en deux polarisations TE ou TM. Les bandes interdites qui apparaissent dans chaque cas doivent se superposer pour former une bande interdite totale.

Elle empêche ainsi la propagation de l'onde incidente quelle que soit sa polarisation. Nous présentons sur la figure I-13 l'exemple d'un diagramme de bande d'un cristal photonique 2D en polarisation TE et TM. [16]

Les diagrammes de la figure I-13 représentent:

- en abscisse, le parcours fait par le vecteur d'onde lorsqu'il décrit lecontour formé par les points de haute symétrie Γ, M, K de la première zone de Brillouin.
- en ordonnée, les fréquences des modes calculés.

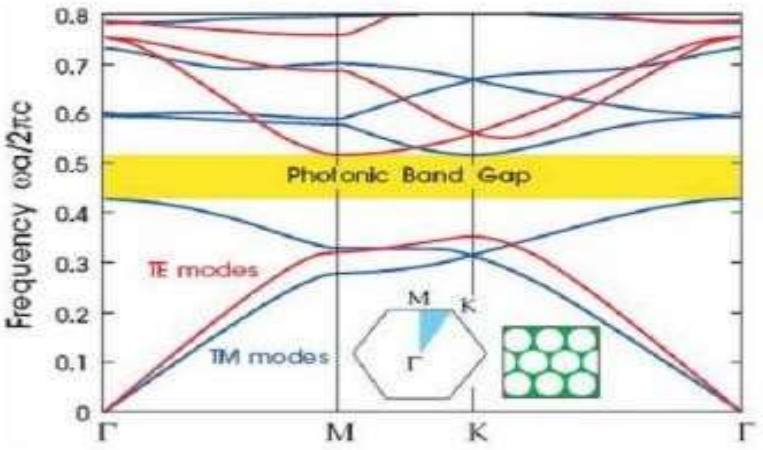


Figure I.13 : Diagramme de bande d'un BIP 2D en polarisation TM et TE.[16]

.

I.4.3.Ouverture d'une bande interdite :

Afin de mieux contrôler la propagation de l'onde électromagnétique quelle que soit son incidence, il faut étendre la bande interdite à deux dimensions pour un contrôle dans tout le plan et à trois dimensions pour le contrôle de l'espace. Considérons un matériau dont l'indice de réfraction est à deux dimensions (figure I.14 (a)) Quelle que soit sa direction d'incidence dans le plan, l'onde voit une structure périodique. A chaque direction dans le planon peut associer une bande interdite unidimensionnelle. La plage spectrale commune à toutes les bandes interdites dans le plan constitue la bande interdite bidimensionnelle. Pour obtenir lecontrôle d'une onde incidente dans les trois directions de l'espace, un cristal photonique tridimensionnel est nécessaire.

Pour qu'une bande interdite existe, il faut que les bandes interdites unidirectionnelles se recouvrent au moins partiellement sur la première zone de Brillouin (figure I-14(b)). Ce recouvrement des bandes interdites unidimensionnelles sera maximal si les bandes interdites sont centrées à des fréquences proches.

Il existe des lois d'échelle simples pour ces structures : les fréquences des bandes interdites sont proportionnelles à l'inverse de la période du cristal, de sorte qu'on peut utiliser la relation [18] :

$$u = \frac{a}{\lambda} = \frac{a\omega}{2\pi c} \quad \text{.....I.14}$$

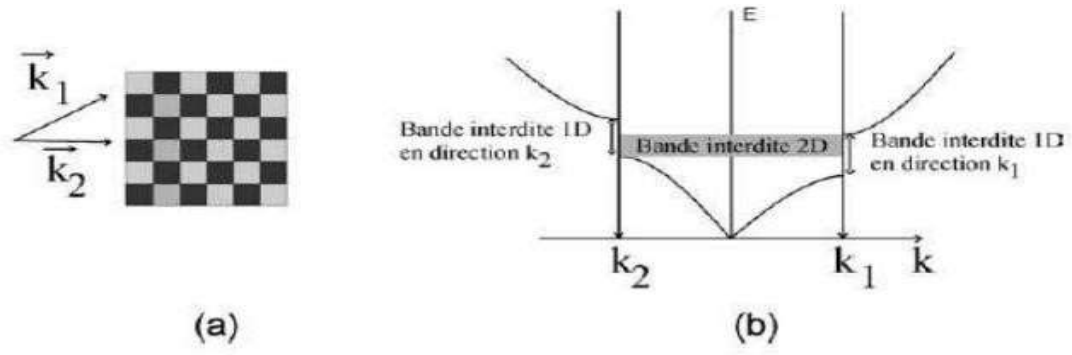


Figure I.14 : (a) Schéma d'un cristal photonique à 2 dimensions (vue de dessus) (b) Schéma d'une relation de dispersion d'un cristal photonique bidimensionnel; une bande interdite est obtenue [18].

I.4.4.Cartes des bandes interdites :

Une carte des bandes interdites montre la position de la bande interdite en fonction du facteur de remplissage. La figure I-15 (a,b) montre une carte des bandes interdites d'un réseau de trous d'air dans une matrice diélectrique (ε=12.25). (a) réseau hexagonal, (b) réseau carre, (en polarisation TE et TM).

Pour un réseau hexagonal de trous d'air dans du silicium, une bande interdite s'ouvre pour f = 0.10 en polarisation TE et f = 0.61 en polarisation TM. Pour le réseau carre, les bandes interdites s'ouvrent pour f = 0.32 en polarisation TE et f = 0.48 en polarisation TM. Larégion de la bande interdite complète correspond à l'intersection des bandes interdites TE et TM et se situe dans la fenêtre d'énergie u = 0.37- 0.56. Les énergies des bords de bandes se décalent vers les hautes énergies lorsque le facteur de remplissage augmente. La plus large bande interdite pour les modes TE est obtenue par le réseau hexagonal. De plus, la BIP apparaît pour des facteurs de remplissage plus faibles que ceux du réseau carre. Le réseau hexagonal est par conséquent souvent, préféré pour confiner la lumière. On remarque que les bords de bandes interdites augmentent avec le facteur de remplissage du matériau de faible indice.

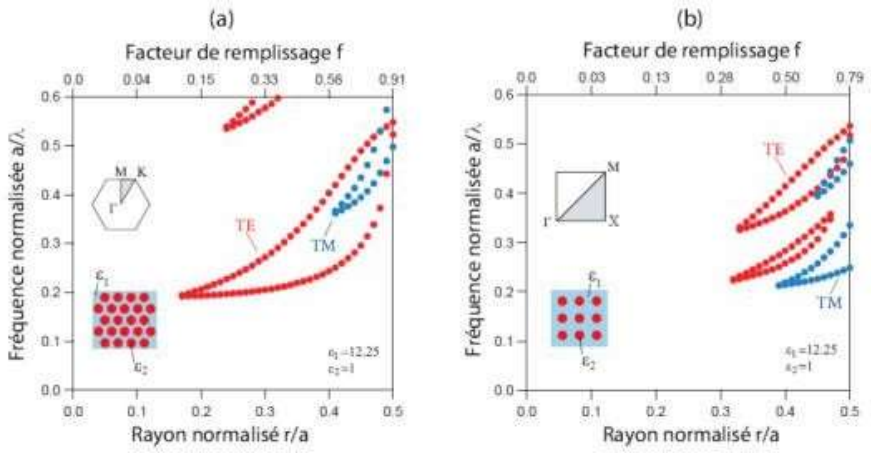


Figure I.15 : Cartes des bandes interdites d'un réseau de trous d'air dans une matrice diélectrique (ε=12.25), (a) réseau hexagonal. (b) réseau carre.

I.5. Les types des défauts en CPs :

Les défauts dans les cristaux photoniques peuvent localiser les motifs. Exister avec de cristaux unidimensionnels, nous pouvons confiner les rayons lumineux à un plan par défaut. Dans les cristaux bidimensionnels, on peut positionne les rayons dans les imperfections linéaires. Enfin en tridimensionnels on peut limiter la lumière à une panne locale, donc à un certain point du réseau.

Dans le cas d'un réseau de trous, le défaut peut consister en l'absence d'un ou plusieurs trous. Il existe principalement deux types de défauts, les défauts ponctuels et les défauts linéaires .Il reste néanmoins possible de jouer sur plusieurs paramètres pour obtenir une grande variétés de défauts (variation de la taille des trous et de leurs formes par exemple).

Les deux façons les plus faciles à perturber la périodicité du réseau sont :

1. Ajouter du matériau diélectrique en plus : un défaut diélectrique.
2. Supprimer du matériau diélectrique : un défaut d'air.

I.5.1. Les défauts ponctuels :

Les défauts ponctuels sont créés en modifiant les caractéristiques d'une cellule du réseau. Pour les cristaux photoniques composés de cylindres diélectriques, la constante diélectrique d'un cylindre peut être changée (figure 1.16). Le cylindre peut être enlevé, ce qui crée une lacune dans le cristal. Cela correspond à une micro-cavité à l'intérieur du cristal photonique. Pour les cristaux photoniques constitués de trous dans un matériau diélectrique, ces trous peuvent être modifiés géométriquement (figure 1.17).

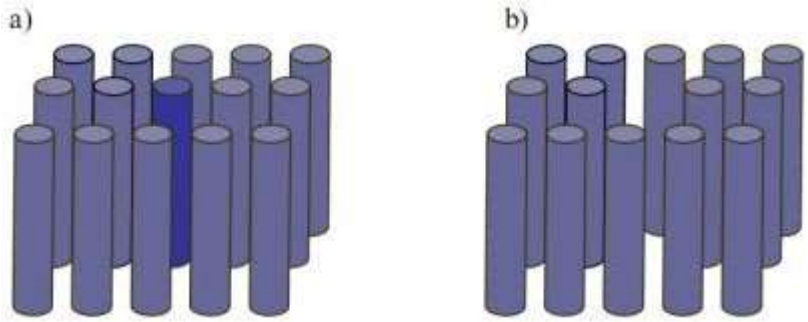


Figure I.16 : Défauts ponctuels : a) Modification de la permittivité d'une tige (il vaut mieux faire la tige centrale en bleu) b) Absence de la tige centrale.

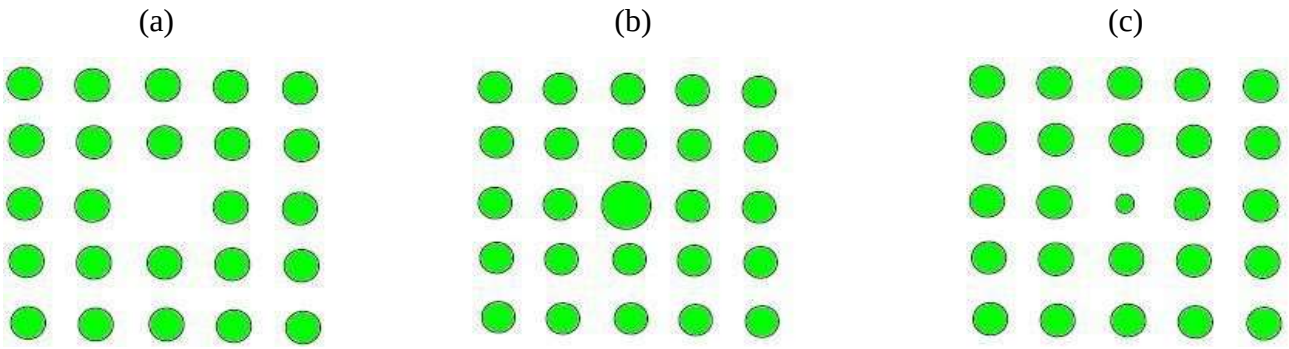


Figure I.17 : Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions.

Les modes électromagnétiques introduits par le défaut sont appelés modes de défaut. C'est un mode dont la fréquence peut se situer dans la bande interdite et qui est localisé autour du site du défaut.

Les caractéristiques de ces défauts ont été étudiées par plusieurs équipes [21], [23] Ces deux derniers ont été parmi les premiers dès 1991 à calculer les fréquences des modes de défauts dans un cristal photonique de réseau carré. La transmission de ces structures à été étudiée par [8;24] Joanopoulos et al ont montré théoriquement que les propriétés des modesde défauts peuvent être contrôlées en modifiant la taille et le type de défauts.

La figure I.18 Pour les cristaux photoniques constitués de trous dans un matériau diélectrique ces trous peuvent être modifiés géométriquement, généralement, on modifie le rayon du trou en question pour faire varier continûment la perturbation qu'on introduit.

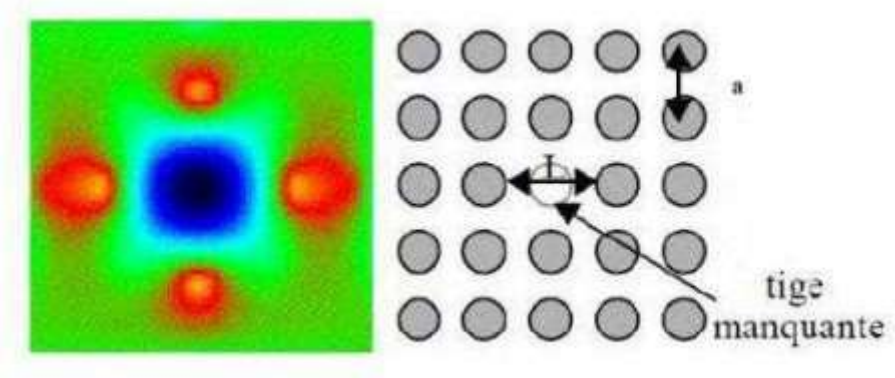


Figure I.18 : Résonance à 35.5 GHz de la cavité engendrée par la suppression d'une tige pour le réseau carré diélectrique des tiges d'alumine, période a=3mm, d=1.5mm (onde polarisée TM). L'énergie est concentrée sur les quatre premières tiges voisines des défauts [25].

I.5.2 Les défauts linéaires (étendus):

Un attrait majeur de ces structures repose sur l'insertion contrôlée de défauts au sein du cristal lors de sa fabrication [22]. Les défauts étendus sont obtenus en modifiant les cylindres ou les trous sur plusieurs sites voisins. Il existe trois types de défauts étendus, défauts 1D, 2D et 3D. Ils ne peuvent être obtenus que dans les cristaux de dimensions au moins équivalentes. Les défauts étendus de dimension 1D sont appelés aussi défauts linéiques et peuvent servir de guides d'ondes ou de cavités lasers. Ils sont certainement ceux qui ont suscité le plus grand nombre d'études [16]. Les défauts 2D et 3D sont constitués d'une suite de guides 1D, orientés dans des directions différentes de façon à véhiculer la lumière sur tous les chemins optiques possibles à l'intérieur du cristal.

Les modes électromagnétiques associés aux guides d'onde sont des modes confinés dans le guide et qui peuvent se propager le long de ce guide et avec les parois parfaitement réflectives. De cette façon, on peut dévier le chemin de la lumière. Les réalisations expérimentales ont été effectuées par [30,31] sur le type 1D. On l'illustre sur la figure I.19 pour un cristal 2D, dont on a enlevé quelques tiges, en formant un virage.

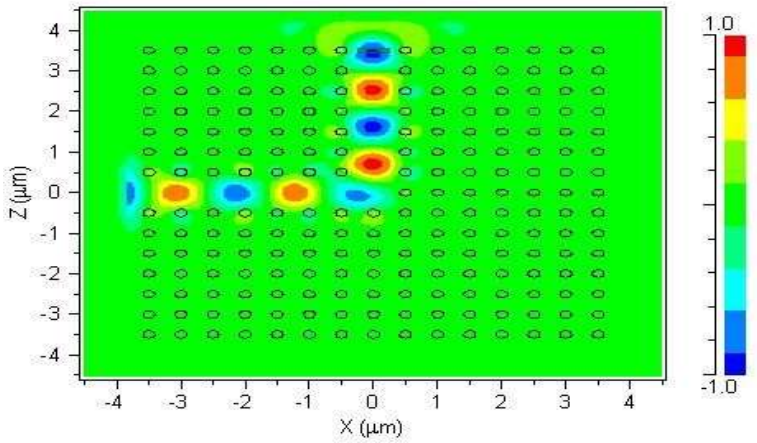


Figure I.19 : Illustration de la propagation du champ dans un cristal à défaut linéaire [26].

I.6 Guides d'ondes dans les cristaux photoniques :

L'idée des guides d'ondes est apparue en 1994 sous l'impulsion de Joannopoulos, Meade et al [33], mais les premières réalisations ont été effectuées cinq à six ans plus tard [33]. Ici, le défaut est une ligne de trous qui a été omise, formant un défaut linéique figure I.20 La lumière ne pouvant pénétrer au sein du cristal photonique, elle est contrainte de se propager le long du défaut : on a ainsi réalisé un guide. Ce guide est appelé guide W1, car il est formé par l'omission de la gravure d'une ligne de trous. Les guides formés de l'omission dedeux lignes de trous sont appelés W2, ceux de trois rangées de trous W3, ceux de N rangéesde trous WN.

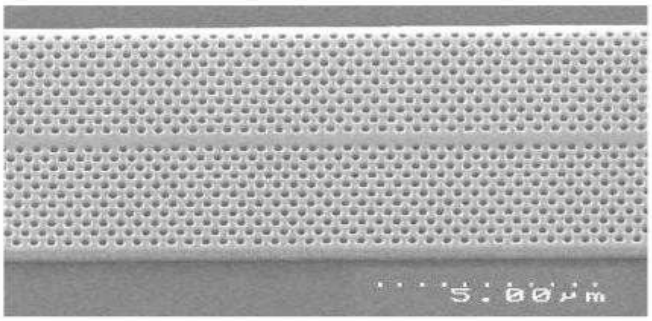


Figure I.20 : Exemple du guide d'onde mono-rangée réalisé dans un cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant [33].

En fait, il existe une grande variété de guides à cristal photonique. Notons, par exemple, que les cristaux photoniques 2D constitués de réseaux de trous sont généralement préférés aux

réseaux de tiges diélectriques déconnectées. Un guide d'onde peut alors être crée en écartant deux demi-plans de cristaux photoniques figure I.21.

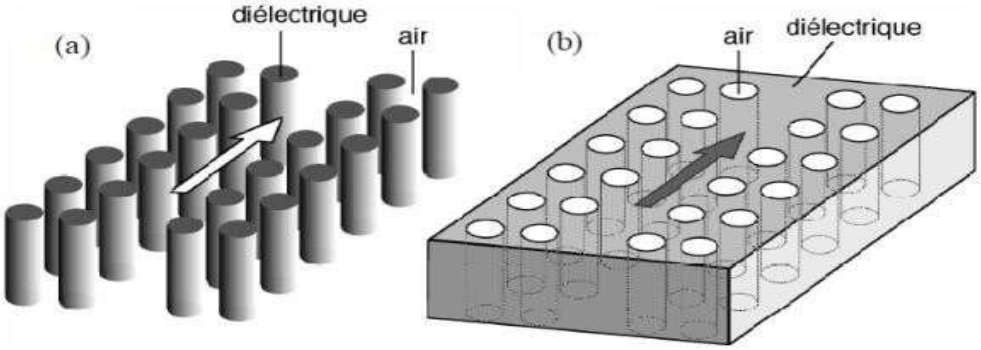


Figure I.21 : Schéma d'un guide d'onde défini (a) dans un réseau bidimensionnel de tiges de diélectriques et (b) dans un réseau de trous d'air.

I.6.1. Direction cristallographique :

Par analogie avec la cristallographie des solides, dans chaque réseau périodique Indice optique bidimensionnel, pouvant être associé à des réseaux réciproques. dans l'espace Au lieu de cela, il existe des directions de symétrie supérieure. suffisant pour décrire le comportement Ondes se propageant dans ces directions pour décrire complètement le cristal Photonique (CP). Nous avons considéré uniquement des guides définis par l'omission d'une ou plusieurs rangées de trous selon une orientation donnée. Par convention, nous appellerons un guide Wi, un guide défini par l'omission de i rangées de trous. A titre d'exemple, la figure
I.22 illustre un guide W5 dans les mailles carrée et triangulaire selon les orientations ΓK et ΓM en considérant un paramètre de maille a identique. L'omission des 5 rangées de trous, représentée par des cercles évidés sur la figure, constitue le guide d'onde. La largeur du guide dépend de la maille et de la période a du CP[34].

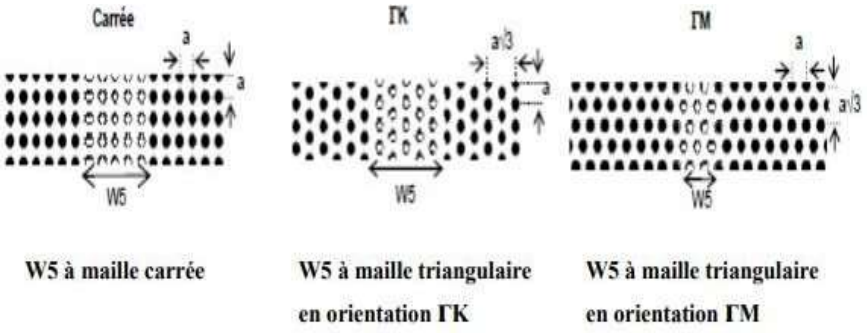


Figure I.22 : Schéma de guides W5 pour différentes géométries et orientations de mailles [34].

I.6.2. Symétrie des bords :

Les trous situés de part et d'autre du guide peuvent être : (i) soit en vis-à-vis, et, dans ce cas, le guide est dit symétrique, ou encore du type A (Figure I-23(a)) ; (ii) soit décalés d'un nombre demi entier de périodes, dans ce cas le guide est dit antisymétrique, ou encore de type B (Figure I.23(b)).

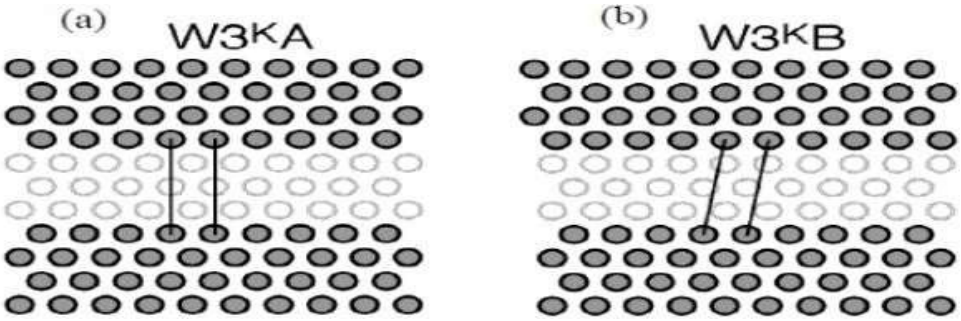


Figure I.23 : exemple de guide créé dans un réseau bidimensionnel triangulaire de trous d'air (a) de type A et (b) de type B.

I.7. Microcavités à cristaux photoniques 2D :

Les cavités à cristaux photoniques sont des structures optiques qui exploitent les propriétés des cristaux photoniques, qui sont des matériaux périodiques présentant une structure répétitive à l'échelle de la longueur d'onde de la lumière. Ces cavités sont utilisées pour confiner et manipuler la lumière de manière efficace et contrôlée. à condition qu'ils se situent dans la bande interdite, concentrent leur énergie dans cette zone de défauts. Le cristal environnant se comporte comme un miroir et la lumière est réfléchie par les bords du défaut. Les défauts ou microcavités les plus étudiés sont obtenus en omettant un certain nombre de trous dans le réseau périodique, notamment dans les réseaux triangulaires, les microcavités de type Hn, de forme hexagonale, n étant le nombre de rangées manquantes par côté de l'hexagone.

Considérons un cristal photonique bidimensionnel ; il est en général constitué d'un réseau de trous percés dans un matériau diélectrique, ou de colonnes de diélectrique dans l'air.Dans un cas comme dans l'autre, considérons un défaut localisé : un emplacement où le trou n'est pas percé, ou bien où il n'y a pas de colonne. Généralement, on peut faire varier le rayonde la colonne ou du trou en question pour faire varier continûment la perturbation qu'on introduit.

Les cavités à cristaux photoniques offrent des avantages tels qu'une forte confinement de la lumière, un contrôle précis de la propagation et de la dispersion de la lumière, ainsi que des propriétés optiques personnalisables. Elles sont largement utilisées dans les domaines de l'optique intégrée, des lasers, de la photonique quantique et des dispositifs optiques avancés.

I.7.1 Différents types de cavités :

Il existe plusieurs types de cavités qui dépendent de la forme du réseau (triangulaire ou carré), ou du nombre de défauts (omission d'un ou plusieurs tiges); parmi ces cavités nous citons.

I.7.1.1 Cavité hexagonale :

Dans un cristal triangulaire, les côtés de la cavité hexagonale sont les rangées Dense, formant une série de cavités standardisées. Il est recommandé de nommer les élémentssuivants Le nombre de cycles par côté. Par conséquent, un seul trou manquant correspond à H1, H2 manque sept trous, les cavités de type Hn, de forme hexagonale, n' étant le nombre de rangées manquantes par côté de l'hexagone sont les plus étudiées[36].Dans la figure I.24 nous représentons trois exemple de cavités hexagonal(H1,H2,H5).

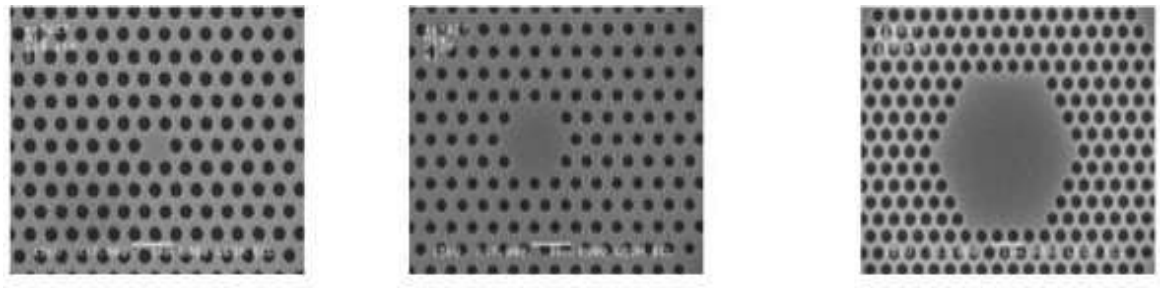


Figure.I.24 : Signatures spectrales de cavités hexagonales obtenues par photoluminescence [37].

I.7.1.2 Cavité triangulaire :

La figure I.25 représente la cavité triangulaire, cette cavité est obtenue en omettant plusieurs trous dans un réseau triangulaire de trous d'air de section circulaire (r = 200nm) plongé dans une matrice diélectrique (ε=8.12).

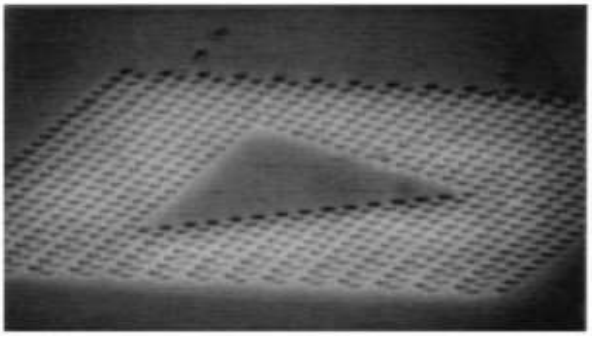


Figure I.25 : Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire (Paramètre de maille a = 600nm, rayon r =200nm) plongé dans une matrice diélectrique (ε=8.12) [38].

I.7.1.3 Cavité rectangulaire :

Le réseau CP2D triangulaire est défini par les paramètres suivants : paramètre de maille a=560nm, facteur de remplissage environ 35%. Ces paramètres permettent d'ouvrir une large bande interdite approchant les 500nm pour le mode TE autour des 1500nm[19].La figure I.26 représente une cavité rectangulaire correspondant à l'omission de 3 rangées finies de trous dans le CP, lorsque celle ci est éclairée directement par le laser.

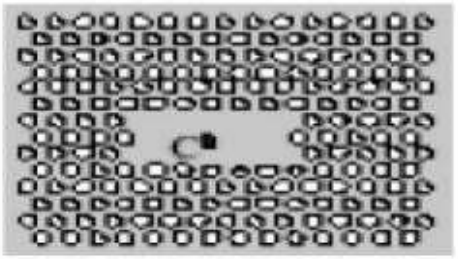


Figure I.26 : Exemple de cavité rectangulaire dans un cristal photonique triangulaire (a = 560nm, facteur de remplissage 0.35) [39].

I.8. Domaines d'application :

Les cristaux photonique ont connu des développements dans les différents domaines surtout le domaine optique, informatique, microonde , télécommunication, Lasers et sources de lumière. Dans cette section, nous décrivons diverses applications possibles du matériau Interdit. Nous nous limiterons au cas des cristaux photoniques Deux dimensions, offre

actuellement une variété d'applications. Nous aborderons d'abord le domaine optique, puis nous aborderons le domaine micro-onde.

I.8.1. Le domaine d'optique :

I.8.1.1.Les fibres optiques :

Les fibres à cristaux photoniques sont déjà rentrées dans le domaine des applications industrielles [40]. Elles ont été proposées pour la première fois dans les années 1995 [41]. Ces fibres sont obtenues par empilement de plusieurs tubes de silices pour obtenir une, « préforme». Ensuite cette préforme est chauffée à une très haute température de l'ordre de 1800°C puis étirée afin qu'elle obtienne un diamètre d'environ 125 μm, pour être similaire à une fibre classique. La fibre est ensuite protégée par une gaine plastique. Comme on le voit sur le graphe de la figure I.27. Ces fibres à cristaux photoniques possèdent aussi des propriétés de dispersion qu'on pourra contrôler à travers leurs paramètres géométriques [41].

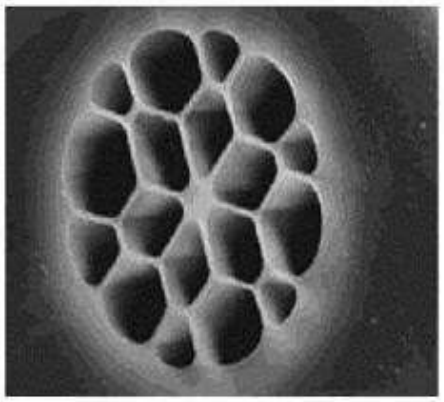


Figure I.27 : photographie d'une fibre à trous, de diamètre de cœur (au centre) de 1μm [42].

I.8.1.2. Les micro-résonateurs :

L'utilisation des défauts ponctuels et linéaires permettent de faire des micro-résonateurs et des guides d'ondes respectivement. La réalisation des micro-résonateurs est obtenue par inclusion des défauts ponctuels dans une structure à cristaux photoniques. Les premières études sur les micros résonateurs avec des structures bidimensionnelles ont été réalisées en 1997 par labilloy [43].

I.8.1.3. Filtres et multiplexeurs :

Une fonction importante qu'on peut réaliser avec des cristaux photoniques : le multiplexage en longueurs d'ondes (WDM, Wavelenght Division Multiplexing). L'objectif

est d'insérer ou d'extraire des longueurs d'onde bien précises. Plusieurs réalisations ont montré la possibilité du couplage d'une cavité avec un guide. Par exemple, la réalisation de Chutinan et al [44] permet l'extraction ou l'insertion dans un guide d'une longueur d'onde bien précise est schématisé sur la figure I.28.

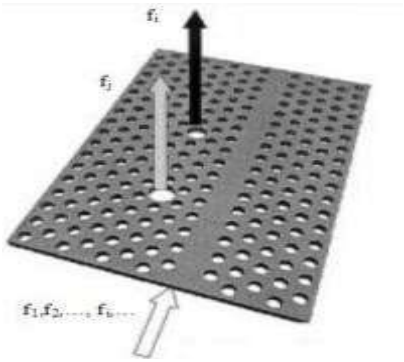


Figure I.28 : Un principe parmi d'autres de filtre add-drop utilisant les CPs [44].

Dans la figure I.28, le filtre représenté est conçu à partir d'un cristal photonique 2D de symétrie hexagonale où l'on a introduit deux guides d'ondes couplés entre eux par une cavité centrale, également de forme hexagonale.

I.8.2. Le domaine micro-onde :

Un grand nombre d'équipes de recherche se sont intéressées à l'étude des BIPs aux fréquences micro-ondes en raison des multiples applications envisageables dans ce domaine de fréquence. Dans le domaine des micro-ondes, les cristaux photoniques trouvent leur place dans plusieurs domaines, notamment :

- Antennes et guides d'ondes.
- Filtres micro-ondes.
- Composants micro-ondes intégrés.
- Dispositifs de détection micro-ondes.
- Dispositifs de modulation micro-ondes

En combinant les propriétés photoniques et électromagnétiques des cristaux photoniques, il est possible de développer des solutions innovantes pour les systèmes micro- ondes, offrant des fonctionnalités améliorées, une intégration accrue et des performances optimisées dans des applications telles que les communications sans fil, la radar, la télédétection et l'imagerie micro-ondes.

I.9. Les différents matériaux utilisés :

De nombreuses structures à bandes interdites unidimensionnelles, bidimensionnelles ont déjà été réalisées sur différents matériaux tels que le silicium, les semi-conducteurs III-V.

I.9.1. Le Silicium :

A l'heure actuelle, on ne sait pas quel matériau est le plus adapté aux nanotechnologies pour la réalisation des cristaux photoniques mais parmi les matériaux d'indice de réfraction élevé, le silicium semble être très approprié : en effet, la technologie Si est extrêmement bien contrôlée et compatible avec des applications intégrées CMOS pour l'électronique.

I.9.2. Les semi-conducteurs III-V :

La réalisation de cristaux photoniques sur semi-conducteur est bien maîtrisée actuellement. Les semi-conducteurs III-V sont une famille de matériaux semi-conducteurs composés d'éléments du groupe III par exemple : Arséniure de gallium (GaAs), Phosphure d'indium (InP), Nitrure de gallium (GaN), Phosphure de gallium (GaP) sont les plus répandus. Ils ont un gap électronique direct, ce qui leur procure de bonnes propriétés optiques. Les puits et boîtes quantiques ont un très bon rendement dans ces matériaux, même à température ambiante. Dans les structures actives (émetteurs de lumière), ce sont presque exclusivement ces semi-conducteurs qui sont utilisés, mais ils le sont aussi pour des dispositifs passifs.

I.10. Conclusion :

Les cristaux photoniques sont des matériaux dont la constante diélectrique varie de façon périodique, à l'échelle de la longueur d'onde dans une, deux ou trois directions. La périodicité est à l'origine de plusieurs propriétés intéressantes, telles que La bande interdite photonique, qui interdit la propagation de la lumière, qui est ouverte.

Dans ce chapitre, nous introduisons les concepts de base liés aux cristaux photoniques et plus particulièrement les cristaux photoniques bidimensionnels. D'abord, nous listons différents types de cristaux photoniques, nous montrons qu'il existe également des principes et des diagrammes de bande pour ouvrir la bande interdite photonique. Ensuite, nous citons leurs propriétés physiques et géométriques ainsi que les différentes applications dans les domaines d'optique et micro-onde. À la fin de ce chapitre, nous citons Les différentsmatériaux utilisés.

Bibliographie du chapitre I :

[1] A. Genack and N. Garcia, Observation of Photon localisation in a Three-Dimensional Disordered System, Phys. Rev. Lett., 66 (16), (1991) pp. 2064.

[2] T.F. Krauss, R.M. De la Rue and S. Brand, Two dimensional photonic band gap structures operating at near-infrared wavelengths, Nature 383, (1996) pp. 699-702.

[3] A. Blanco, E.Chomski, S.Grabtchak, et al., Large scale synthesis of a silicon photonic crystal with a complete three-dimensional bandgap near 1.5 micrometres. (2000) pp.437–440.

[4] E.VAN HOOIJDONK et al ;Bi-functional photonique structure in the Papiio nireus : modeling by sattering-matrix optical simulations,in optics Express, vol.20,pp.22001-22011,2012.

[5] E. Yablonovitch, « Photonic band-gap crystals », J. Phys: Condensed Matter, Vol 5 N°16, pp. 2443-2460, 1993.

[6] Sandrine MASSY, «Contribution à la réalisation de fonctions optiques à base de cristaux photoniques sur LiNbO3», Thèse de doctorat N° 4, Université de Limoges, 2004.

[7] Y. Benachour, « Optimisation de cristaux photoniques pour l'optique non linéaire», Thèse de Doctorat n.8997, Université de Paris Sud XI, Orsay, 2008.

[8] K. Sakoda, « Optical Properties of Photonic Crystals», Springer, Berlin, Springer Seriesin Optical Sciences, Vol 80, pp 253, 2001.

[9] Merle Yannick. Etude de la dispersion électromagnétique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels. , thèse de doctorat, université de limoges, (2003).

[10] E. Yablonovitch. Physical Review Letters 58(20), 20592062 (1987).

[11] P.R. Villeneuve, M. Piche, « Photonic band gap in two-dimensional square lattices: Square and Circular rods », Phys. Rev. B, Vol 46, N°8, pp. 4673 1992.

[12] Davy GERARD, « Etude en champ proche et en champ lointain de composants périodiquement nano structurés : cristaux photoniques et tamis à photons », Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 09 juillet 2004.

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

[14] D. Cassagne, C. Jouanin, D. Bertho "Hexagonal photonic band gap structures" Physical Review B, Vol. 53, pp. 7134-7141, (1996).

[15] H. Roussel, V. Vigneras, W. Tabbara, J.P. Parneix "Etude théorique et expérimentale de structures à Bande Photonique Interdite bidimensionnelle"JNM 99, Arcachon, (1999).

[16] Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Win, Photonic Crystal: Molding the Flow of Light, Princeton Univ. Press (1995).

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

[18] Barbara WILD « Etude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photoniques bidimensionnels et de leur accordabillité», Thèse de doctorat nº 3573, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (2006).

[19] HARHOUZ Ahlam «Contribution à l'étude et la conception des capteurs à base de cristaux photoniques» Thèse de doctorat ;Université Mohamed Boudiaf - M'sila ;2017.

[20] J.M. LOURTIOZ, D. MAYSTRE, H. BENISTY, V. BERGER, J. M. GERARD, A. TCHELNOKOV, «Les cristaux photoniques ou la lumière en cage », GET et Lavoisier, Paris, 2003.

[21] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, K. M. Leung. «Photonic band structure: The facecentered-cubic case employing nonspherical atoms. » Phys. Rev. Lett., Vol.67, 1991: 2295 – 2298.

[22] Yohan Desieres , « conception et études optiques des composants micro photoniques sur matériaux III-V à base de structures à bandes interdite de photon », thèse de doctorat n°01-0081, Institut national des sciences appliquées de lyon, décembre 2001.

[23] R. D. Meade, Karl D. Brommer, Andrew M. R, and J. D. Joannopoulos, Photonic bound states in periodic dielectric materials, Phs. Rev. B, 44, pp13772-13774(1991).

[24] M. Sigalas, C. M. Soukoulis, E. N. Economou, C. T. Chan, and K. M. Ho, Photonic band gaps and defects in two dimensions: Studies of the transmission coefficient, Phys. Rev. B 48, 14121(1993).

[25] F. Gadot, Modélisation et caractérisation expérimentale de matériaux à Bandes Interdites Photoniques (BIP) en Micro-ondes, thèse de Doctorat, Univ. De Paris sud, Janvier(1999) .

[26] Ahlem benmerkhi, « Optimisation du confinement de la lumière dans des cavités a cristaux photoniques », Thèse de doctorat, Université Mentouri – Constantine, 20 /05 / 2012.

[27] B. Lombardet, « Étude et réalisation des cristaux photoniques pour l‟optique intégrées », Thèse de doctorat nº3254, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.

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

[29] Christian Grillet, «Microcomposants optiques à base de cristaux photoniques bidimensionnels pour l'optique intégrée», Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2003.

[30] M. Loncar, D. Nedeljkovic, T. Doll, J. Vuckovic, A. Scherer and T. P. Pearsall, "waveguiding in planar photonic crystals", Appl. Phys. Lett., Vol.77, p.1973, 2000.

[31] M. Tokushama, H. Kedosaka, A. Tomita and H. yamada, "Lightwave propagation throupht a 120° sharply bent single-line-defect photonic crystal waveguide", Appl. Phys. Lett.,Vol.76, p.952, 2000.

[32] R. D. MEADE, A.DEVENYI, J. D. JOANNOPOULOS, O. L. ALERHAND, D. A. SMITH et K. KASH, «Novel applications of photonic band gap materials: Low loss bends and Q cavities», Journal of applied physics 75, p. 4753(1994).

[33] Marc ZELSMANN, « Cristaux photoniques en silicium sur isolant pour le guidage, le filtrage, l'émission et l'extraction de la lumière », Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble 1, Novembre 2003.

[34] O. Bouchard, « Etude de diodes laser à cavité planaire entièrement définie par cristal photonique : nouvelle approche pour le contrôle de l'émission », Thèse de doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier, 2008.

[35] W.Streifer, D.R. Scifres, and A.D. Burnham, "Coupled wave analysis of DFB andDBR lasers". IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.13, N°4, p. 134-141, 1977.

[36] H. Rigneault, « la nanophotonique » GET et Lavoisier, Paris, 2005.

[37] O. Levy, B.Z. Steinberg, A. Boag, S. Krylov, I. Goldfarb, « Mechanical tuning of two-dimensional photonic crystal cavity by micro Electro mechanical flexures », Sens. and Act. A., Vol 139, N° 1-2, pp 47–52. 2007.

[38] 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 III-V Suspended Membranes », IEEE J. Lightwave Technol. Vol 17, N° 11, pp 2058 – 2062, 1999.

[39] C. Grillet, « Microcomposants optiques à base de cristaux photoniques bidimensionnels pour l'optique intégrée », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2003.

[40] J. M. Lourtioz , H. Benisty, V. Berger, J.M. Gérard, D. Maystre, A. Tchelnokov, « Les cristaux photoniques ou la lumière en cage », collection technique et scientifique des télécommunication, Lavoisier,2003.

[41] A. Ferrando, E. Silvestre, J.J Miret, J. A. Monsoriu, M. V. Andrés and P. St. J.Russell, "Designing a photonic crystal fibre with flattened chromatic dispersion", Electro. Lett.,Vol. 35, N° 4, p.325,1999.

[42] J. C. Knight, J. Arriaga, T. A. Birks, Member, IEEE, A. Ortigosa-Blanch, W. J. Wadsworth , and P. St. J. Russell, "Anomalous Dispersion in Photonic Crystal Fiber", IEEE,Photon. Tech. Lett, Vol.12, N°7, p.807, 2000.

[43] D. Labilloy, H. Bénisty, C. Weisbush, T. F. Krauss, V. Bardinal and U. Osterle, "Demonstration of cavity mode between two-dimensional-crystal mirrors", Elect. Lett.Vol.33, p.1978, 1997.

[44] A. Chutinan, M. Masamitsu, M. Imada, S. Noda, "Surface-emitting channel drop filters using single defects in two-dimensional photonic crystal slabs", App. Phys. Lett., Vol.79, p.2690, 2001.

Chapitre II :

Capteurs à base de cristaux photoniques

II-1 Introduction :

Avec les progrès spectaculaires de la technologie, notamment en ce qui concerne la miniaturisation, la communication sans-fil et la puissance de calcul, les équipements informatiques deviennent de plus en plus petits, puissants et autonomes, Les capteurs constituent un vrai progrès et sont développés depuis quelques dizaines d'années et maintenant nécessaires et largement utilisés dans tous les domaines de la vie quotidienne. La sensibilité, la sélectivité, la spécificité et la durabilité des capteurs ont toujours été des paramètres essentiels dans leur conception. Récemment, il y a eu plusieurs travaux de recherches utilisant les cristaux photoniques en tant qu'élément de détection en raison de leur structure de bande et du confinement de la lumière.

Dans ce deuxième chapitre, nous présentons les notions de base sur les capteurs et dans ce cadre nous aborderons leurs principales caractéristiques et leurs différents types.

II-2 Généralité sur les capteurs :

II-2-1 Définition :

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

Le capteur se distingue de l'instrument de mesure par le fait qu'il ne s'agit que d'une interface entre un processus physique et une information manipulable. Par opposition, l'instrument de mesure est un appareil se suffisant à lui-même, disposant d'un affichage ou d'un système de stockage des données. Le capteur, lui, en est dépourvu. On peut dire qu'un capteur est un dispositif qui, sous l'effet d'une grandeur physique que l'on veut connaître et caractériser, délivre une grandeur physique exploitable on parle ainsi d'un transducteur [1]

De même, un capteur est distinct d'un transducteur : il est au minimum constitué d'un transducteur.

Les capteurs sont les éléments de base des systèmes d'acquisition de données. Leur mise en œuvre est du domaine de l'instrumentation [2].



Figure II.1 : Définition d'un capteur

II-2-2 Rôle d'un capteur :

Parmi les différentes informations issues de notre environnement , on distingue des grandeurs physiques liées au climat, à la géométrie, ou encore à des événements lumineux ou temporels.

Le rôle des capteurs est de rendre ces différentes grandeurs physiques disponibles pour un traitement ultérieur, ainsi on distingue plusieurs types de mesures:

* Mesure de présence : indique la présence d'un "objet" à proximité immédiate.

*Mesure de position: de déplacement ou de niveau : indique la position courante d'un objet animé d'un mouvement de rotation ou de translation.

* Mesure de vitesse : indique la vitesse linéaire ou angulaire d'un "objet".

*Mesure d'accélération : de vibrations ou de chocs.

* Mesure de débit : de force, de couples, de pressions.

* Mesure de température: d'humidité.

II-3-Caracterestique d'un capteur :

Il existe plusieurs nombre de caractères communs à tous les capteurs dont les plus courants sont :

II-3-1 Etalonnage : l'étalonnage permet d'ajuster et visualiser la relation entre la grandeur à mesurer (mesurande) et la grandeur de sortie (figure II.2).

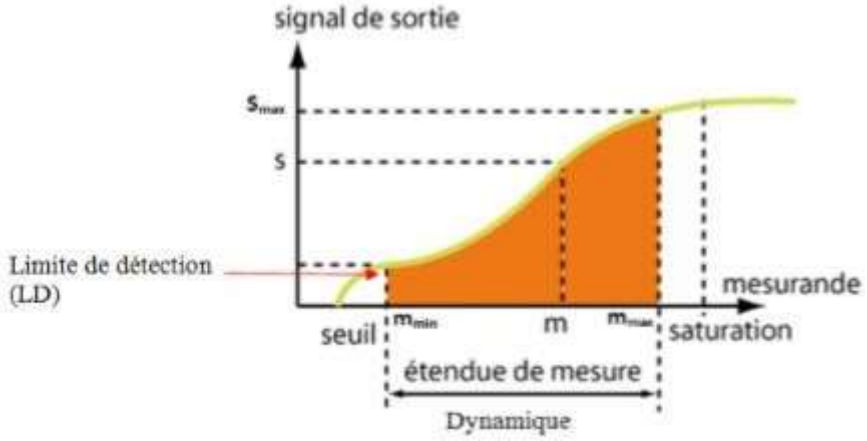


Figure II.2. Courbe d'étalonnage d'un capteur.

II-3-2 Sensibilité : Ce paramètre caractérise l'aptitude du capteur à détecter la plus petite Variation de la grandeur à mesurer. C'est une caractéristique importante pour l'exploitation et l'interprétation des mesures. Elle est définie comme étant la variation du signal de sortie (Sout) par rapport à la variation du mesurande Δm (pente du porti linéaire de la courbe d'étalonnage) et s'écrit par la formule suivante :

$$S=\Delta S_{out}/\Delta m \quad \text{.....(II.1)}$$

Avec :

- S : représente la sensibilité.
- S_{out} : 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-3-3 Rapidité : la rapidité est caractérisée par le temps que met le capteur à réagir à une variation brusque de la mesurande. Cependant la valeur finale est le plus souvent atteinte de manière asymptotique, elle correspond au temp nécessaire pour que le capteur délivre une certaine portion α de la pleine amplitude du signal. Le temps de réponse noté tα est tel que α

vaut généralement 90%. La connaissance du temps de réponse d'un capteur est un élément essentiel lors de la réalisation de mesures.

II-3-4 Précision : La précision caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des indications proches de la valeur vraie de la grandeur mesurée.

II-3-5 Hystérésis : L'hystérésis ou la réversibilité caractérise l'aptitude d'un capteur à fournir la même indication lorsqu'on atteint une même valeur de la grandeur mesurée par variation croissante continue ou par variation décroissante continue de la grandeur. En cas d'indications différentes on parle d'erreur d'hystérésis, qu'on exprime aussi en pourcentage de l'étendue de mesure.

II-3-6 Finesse : C'est la qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner la valeur de la grandeur sans modifier celle-ci par sa présence (un capteur peut perturber son environnement et perçoit de ce fait une information sensiblement erronée).

II-4 Généralité sur les capteurs optiques :

II-4-1 C'est quoi un capteur optique ? :

Un capteur optique est un dispositif électronique conçu pour détecter et mesurer la lumière ou les variations de lumière. Il utilise des composants optiques tels que des photodiodes, des phototransistors pour convertir la lumière en signaux électriques exploitables. Ces capteurs sont utilisés dans une variété d'applications, notamment la photographie numérique, les lecteurs de codes-barres, les souris optiques, les détecteurs de mouvement, les compteurs de vitesse et bien d'autres.

Il existe de nombreux types de capteurs optiques tels que la température, la pression, l'humidité, le déplacement et les biocapteurs. Les capteurs optiques basés sur des fibres optiques, des plasmons de surface, des guides d'ondes planaires ou des cristaux photoniques sont préférés en raison de leur sensibilité élevée et de leur analyse non destructive. Différentes techniques de détection associées à ces capteurs sont basées sur l'évolution des informations caractérisant les ondes lumineuses [3].

II-4-2 Les différents types de capteurs optiques :

Il existe plusieurs catégories dans ce domaine de capteur, parmi lesquels on cite :

II-4-2-1 Capteurs à fibre optique :

Les capteurs à fibre optique sont des dispositifs qui utilisent des fibres optiques pour détecter, mesurer et transmettre des informations sur des grandeurs physiques telles que la température, la pression, la déformation, l'accélération, etc. Ces capteurs exploitent les propriétés de transmission de la lumière à travers les fibres optiques pour convertir les changements physiques en variations de la lumière qui est transmise à travers la fibre.

Les capteurs à fibre optique offrent de nombreux avantages, tels qu'une bonne immunité aux interférences électromagnétiques, la possibilité de mesurer à distance et dans des environnements hostiles, ainsi qu'une grande sensibilité et une large bande passante. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines tels que la surveillance des structures, l'industrie pétrolière et gazière, la médecine, les télécommunications, ect...

II-4-2-2 Capteurs à résonance plasmon de surface (SPR) :

Un capteur à résonance des plasmons de surface (SPR, pour Surface Plasmon Resonance en anglais) est un type de capteur optique largement utilisé pour détecter les interactions biomoléculaires en temps réel. Il exploite les propriétés des plasmons de surface, qui sont des oscillations collectives des électrons à l'interface entre un matériau conducteur (généralement de l'or ou de l'argent) et un milieu diélectrique, comme un liquide.

Le principe de fonctionnement d'un capteur SPR repose sur la mesure des changements de résonance des plasmons de surface en fonction de l'indice de réfraction de l'environnement proche de la surface métallique. Lorsque des molécules cibles se lient spécifiquement à la surface du capteur, elles modifient l'indice de réfraction local, provoquant ainsi un décalage dans la résonance des plasmons de surface. Ce décalage est mesuré et peut être corréler à l'interaction moléculaire en cours.

Les capteurs SPR sont couramment utilisés dans des domaines tels que la recherche biomédicale, la découverte de médicaments, le diagnostic médical, la détection d'agents pathogènes, la caractérisation de liaisons moléculaires et la surveillance de l'activité enzymatique. Ils ont également trouvé des applications dans l'industrie alimentaire, l'analyse de l'eau, la chimie analytique, etc.

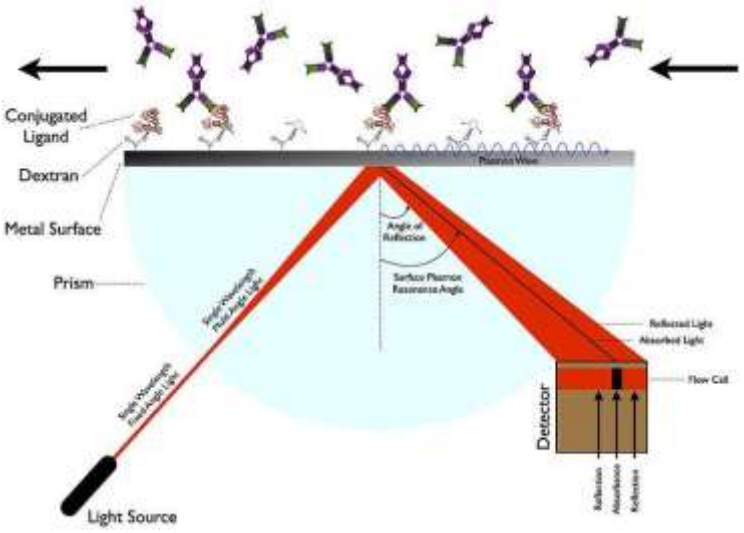


Figure II.3 : Exemple d'un capteur (SPR).

II-4-2-3 Fluorescence :

Une molécule fluorescente (fluorophore ou fluorochrome) possède la propriété d'absorber de l'énergie lumineuse (lumière d'excitation) et de la restituer rapidement sous forme de lumière fluorescente (lumière d'émission). Le principe du capteur par fluorescence repose sur l'association de la molécule à détecter avec une autre molécule fluorescente, appelée alors "marqueur" fluorescent. Cette technique est largement utilisée, notamment pour la visualisation de tissus biologiques à l'aide de microscopes fluorescents [4].

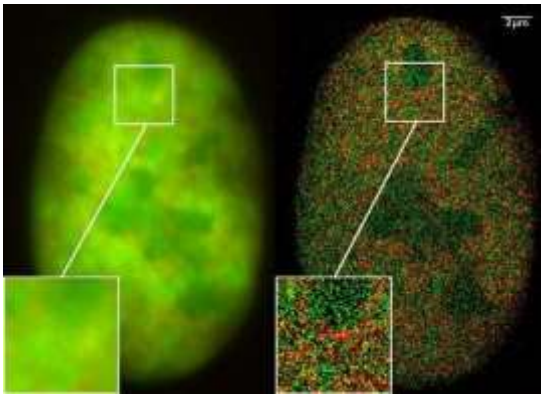


Figure II.4 : Noyau d'une cellule de cancer des os (technique dite *dual-color localization microscopy* ou *2CLM* pour les anglophones). Image obtenue par fluorescence de marqueurs fusionnés avec les protéines GFP et RFP, pour 120 000 molécules localisées dans une zone restreinte (de 470 μm^2).

II-4-2-4 capteur à base cristaux photonique :

Un capteur à base de cristaux photoniques est un type de capteur optique qui utilise des structures cristallines périodiques pour manipuler la propagation de la lumière. Les cristaux photoniques sont des matériaux dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans l'espace, ce qui leur confère des propriétés optiques particulières. Le cristal photonique a une large plage de détection, ce qui le rend adapté à une large gamme de mesures allant de l'air aux fluides très visqueux [5].

Le principe de fonctionnement d'un capteur à base de cristaux photoniques repose sur la modification des propriétés optiques du cristal en présence d'une grandeur physique à mesurer. Lorsque la grandeur physique change, cela peut entraîner une variation de l'indice de réfraction du matériau cristallin ou de la structure périodique du cristal photonique, ce qui modifie la propagation de la lumière à travers le capteur.

Les capteurs à base de cristaux photoniques offrent plusieurs avantages, tels qu'une sensibilité élevée, une grande précision, une large gamme dynamique et une faible consommation d'énergie. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines, notamment la surveillance de structures, les télécommunications, les dispositifs médicaux, les sciences de la vie et l'industrie chimique.

En exploitant la dépendance des propriétés optiques du cristal photonique aux caractéristiques physiques et géométriques du cristal lui-même, on peut distinguer les types des capteurs suivants [6] :

- Capteur d'indice de réfraction (RI) à base de CPs (RI- based PhC sensors).
- 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.

II-4-3 : Etat de l'art de capteur à base de CPs :

Les capteurs à base de cristaux photoniques ont connu un développement significatif au fil des ans. Voici quelques jalons historiques importants dans le domaine des capteurs à base de cristaux photoniques :

Années 1980 : Les premiers travaux sur les cristaux photoniques et leur utilisation potentielle dans les capteurs optiques ont commencé à émerger. Les chercheurs ont exploréles propriétés de propagation de la lumière dans les cristaux photoniques et ont commencé à envisager leur application en tant que capteurs.

Années 1990 : Des progrès ont été réalisés dans la fabrication des cristaux photoniques et leur caractérisation optique. Les chercheurs ont développé des techniques de fabrication pour créer des structures cristallines périodiques avec un contrôle précis de l'indice de réfraction. Les capteurs basés sur des microcavités cristallines ont été proposés pour des applications de détection de faibles concentrations de molécules.

Pendant cette période, les chercheurs ont commencé à explorer les applications potentielles des capteurs à base de cristaux photoniques. Ils ont notamment étudié les capteurs basés sur des microcavités cristallines, qui exploitent les propriétés de résonance optique pour détecter des variations infimes de l'indice de réfraction.

Année 2003, Cunningham et Al ont proposé le premier capteur de CP unidimensionnel en polymère [7], Ce biocapteur est constitué d'un matériau plastique constitué d'une fine couche diélectrique qui est périodiquement déposée sur une surface à haut indice de réfraction.
L'appareil est conçu pour réfléchir une longueur d'onde de 2 nanomètres lorsqu'il est allumé en présence de lumière blanche normale. Des changements de longueur d'onde plus longs (changements de rouge) signifient que le matériau est absorbé par la surface.

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 [8].
En utilisant la microcavité CP 2D optimisée proposée par Lončar et al. La limite de détection peut être améliorée à 0,001 RIU [9].

Par la suite, en 2007, Lee et Fauchet ont présenté pour la première fois le biocapteur CP sur silicium, capable de suivre l'adsorption de protéines sur les parois des ouvertures de cavité (Fig. II.5) et de mesurer quantitativement le diamètre de la protéine. La quantité minimale de protéines pouvant être détectée avec ce système est d'environ 2,5 fg. Peu de temps après, les mêmes auteurs ont amélioré la sensibilité à 1 fg en spécifiant l'espèce cible sur défauts de surface sensibles. Il a été possible de détecter une seule sphère de latex d'un diamètre de 370 nm puisque la zone de détection de la cavité CP était d'environ 40 μm2 avec un volume sensible de 0,15 μm3 [10].

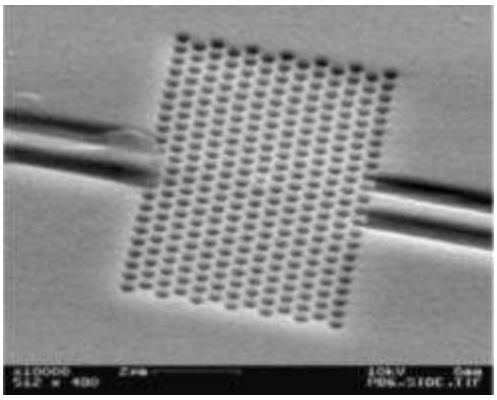


Figure II.5. Photographie par microscopie électronique à balayage d'un dispositif typique (biocapteur à base de cavité à CP).

En 2012, Lin et Al ont réussi à détecter un nombre fini de molécules dans une solution complexe à l'aide de capteurs CP à une seule molécule [11]. Depuis 2009, les architectures de cavité de tranchée CP ont bien fonctionné, des sensibilités supérieures à 1 000 nm/RIU et des facteurs de qualité supérieurs à 50 000 peuvent être atteints (Figure II.6) [12].

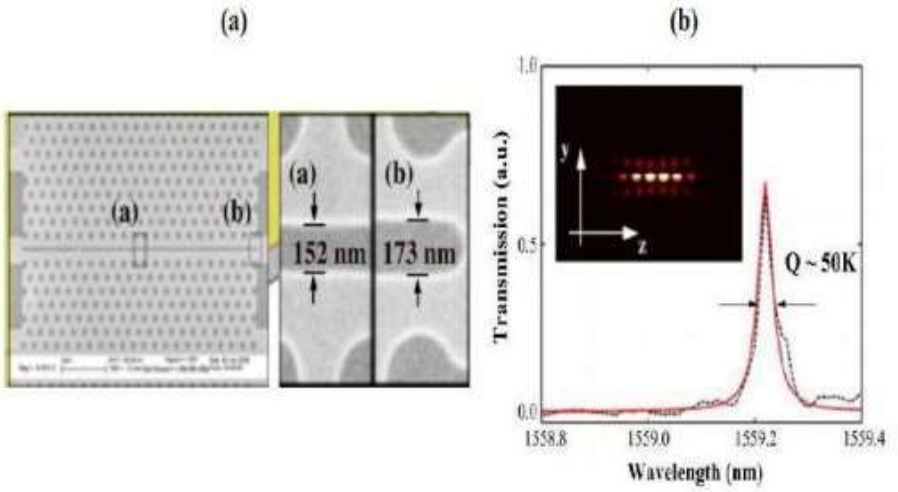


Figure II.6 : a) Image MEB de la cavité à base de CP avec vue agrandie des deux sections pertinentes de la fente. b) Spectre de transmission du mode cavité avec Q = 50 000 [12].

Dernièrement : Les capteurs à base de cristaux photoniques continuent de faire l'objet de recherches actives et de développements. Des avancées ont été réalisées dans l'utilisation de matériaux fonctionnels et de revêtements spécifiques pour améliorer la sélectivité des capteurs. Des efforts sont également en cours pour développer des capteurs à base de cristaux photoniques à faible coût et faciles à produire en série.

Ces développements historiques ont permis de repousser les limites des capteurs à base de cristaux photoniques et d'explorer leur potentiel dans de nombreux domaines, allant de la médecine à l'industrie chimique en passant par la surveillance environnementale.

II-4-4 Capteurs d'indice de réfraction (RI) à base de CPh :

Les capteurs d'indice de réfraction (RI) à base de cristaux photoniques sont des dispositifs qui exploitent les propriétés optiques des cristaux photoniques pour mesurer et détecter les variations de l'indice de réfraction d'un matériau ou d'un milieu environnant. Ces capteurs offrent plusieurs avantages tels que l'utilisation minimale de l'échantillon sans marquage par fluorescence, la détection en temps réel, une haute sensibilité et une grande sélectivité [13].

En effet, plusieurs architectures avancées (par exemple, des microcavités intégrés et configurations interférométriques) utiliser l'indice de réfraction pour la détection.

Le principe de détection de ce type de capteur est basé sur une variation de la longueur d'onde de résonance ou de la position spectrale de la bande due à une variation de l'indice de réfraction.

En particulier, le principe de détection consiste à mesurer les variations de l'indice de réfraction d'une solution. Notamment, les changements de RI (par exemple, l'eau, n silicium = 3.42 ou air, n air = 1 à λ = μm 1,55) due à la présence des analytes ou des gaz chimiques généralement caractérisés par des indices de réfraction plus élevés. Les applications au milieu gazeux et aqueux ont été étudiées pour détecter les concentrations d'espèces chimiques et biologiques. En fait, en utilisant ces capteurs, il est possible de quantifier la surface de la molécule et de la protéine ou la densité volumétrique [14].

Ces capteurs RI à base de CP peuvent fournir deux méthodes de détection :
détection homogène et détection de surface. La détection homogène est basé à mesurer l'évolution de l'indice de réfraction optique d'une solution aqueuse dans laquelle les molécules cibles sont reparties de façon homogène. Dans la méthode de détection de surface, la surface du micro résonateur est fonctionnalisée, en y accrochant des récepteurs appropriés, de sorte que les molécules cibles peuvent être immobilisées de manière covalente sur la surface.

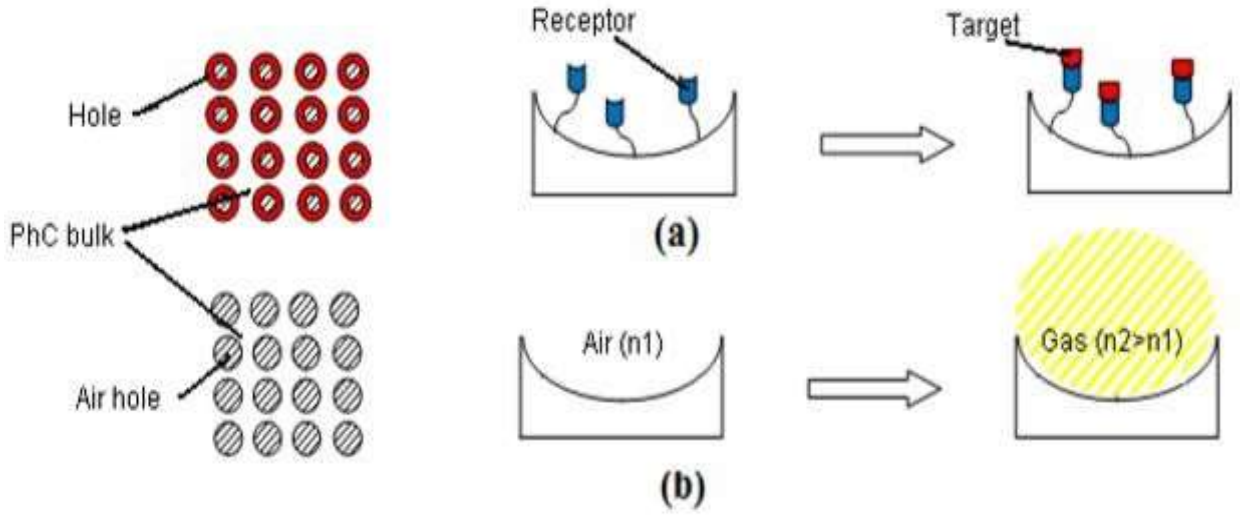


Figure II.7 : (a) Détection de surface, (b) Détection homogène.

II-4-4-1 Capteurs RI à base des guides ondes à CP :

Dans nombreux capteurs à base RI, le guide d'onde CP agit directement comme un élément de détection sans concevoir de microcavité intégrée. Généralement Un guide d'onde CP est 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.

Les performances des capteurs RI à base de guide d'ondes sont quantifiées en surveillant les changements de la longueur d'onde de coupure (λ_{cutoff}) en fonction de l'indice de réfraction. On note que, λ_{cutoff} décrit la longueur d'onde maximale à laquelle le mode optique peut se propager dans le guide d'ondes CP. Elle dépend de RI du milieu de couverture. Par conséquent, la sensibilité du capteur peut être définie comme le rapport entre les changementsde longueur d'onde de coupure et les changements RI de couverture, comme suit :

$$S = \frac{\Delta\lambda cutoff}{\Delta nc} \qquad (II.2)$$

Ou Δn_c est le changement d'indice de réfraction et $\Delta\lambda_{cutoff}$ est le changement de longueur d'onde de coupure. L'année 2007, un capteur RI à cristaux photonique à base de guide d'ondeest proposé pour la bio détection (figure II.8) [15]. Ce capteur est utilisé pour mesurer l'indice de réfraction et détecter la concentration protéine.

(a) (b)

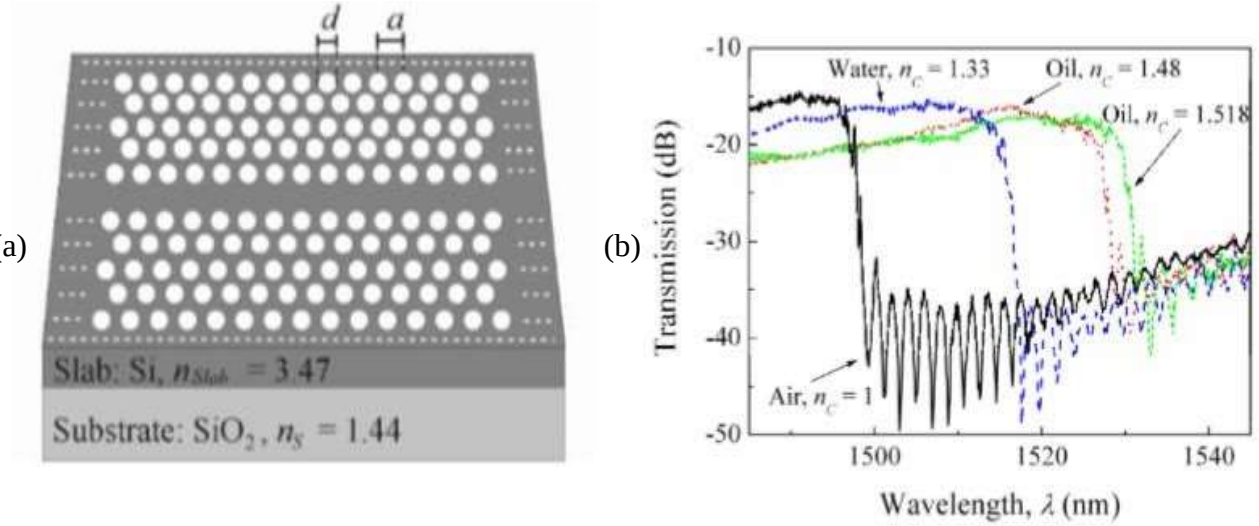


Figure II.8 : (a) Schéma du capteur à guide d'ondes à cristal photonique (PCW) sur SOI2 (b) Spectres de transmission mesurés pour quatre solutions d'indices différents [15].

II-4-4-2 Capteurs RI à base de microcavités résonantes à CP :

Ces dispositifs sont créés en supprimant un ou plusieurs trous c'est-à-dire en introduisant des défauts localisés dans la distribution périodique des trous. De cette façon, la périodicité parfaite du cristal photonique est compromise et un état défectueux dans la carte de bande interdite est introduit, permettant l'excitation des modes de résonance. Deux paramètres, le facteur de qualité Q et la sensibilité de longueur d'onde Sλ, doivent être pris en compte pour évaluer les performances des capteurs à cavité CP. (La figure II.9) montre le dispositif de détection à cristaux photoniques à base de RI et les résultats de sa caractérisation.

(a) (b)

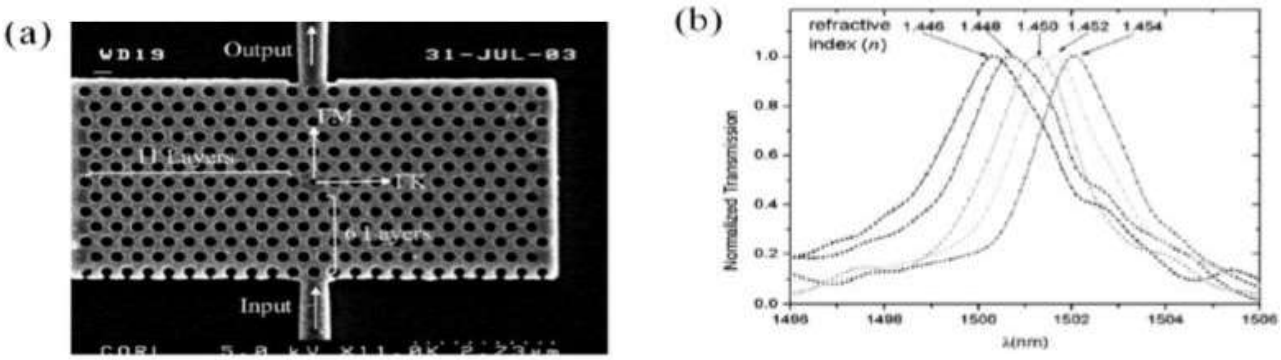


Figure II.9 : (a) Vue au microscope électronique à balayage d'une microcavité à cristal photonique intégrée avec deux guides d'ondes ruban (b) Spectres de transmission normalisés de la microcavité montrée en (a) avec cinq différents indices de réfraction (variant de n = 1.446 à n = 1.454) [16]

II-4-4-3 Capteur RI à base de réseaux de Bragg a CP :

Les capteurs à réseaux de Bragg utilisent des cristaux photoniques périodiques pour créer des structures réfléchissantes qui réagissent aux variations d'indice de réfraction. Les changements d'indice de réfraction du matériau modifient la longueur d'onde de réflexion des réseaux de Bragg, ce qui peut être mesuré pour déterminer l'indice de réfraction.

II-5 conclusion :

A travers ce chapitre, nous avons pu définir les capteurs en terme général, leurs caractéristiques, leurs rôles et leurs principes de fonctionnement comme nous avons évoqué les capteurs optiques. Nous avons également présenté les principaux types technologiques de la détection. Ensuite, nous avons pu montrer que l'utilisation des cristaux photoniques en tant que capteurs constitue un domaine de recherche très prometteur comme nous avons vu que le domaine photonique a réalisé un progrès considérable ces dernières décennies. Nous avons aussi présenté le principe de fonctionnement et démontré la conception des capteurs utilisant le changement d'indice de réfraction (RI) pour la détection de mesurande.

Bibliographie du chapitre II :

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

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

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

[4] N. Moll, « Étude et réalisation d'un système immunocapteurs à ondes de Love : application à la détection de toxines, de virus ou de bactéries », these du doctorat, l'universitébordeaux 1, 29 juin 2007.

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

[6] 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

[7] Cunningham, Brian, et al. "A plastic colorimetric resonant optical biosensor for multiparallel detection of label-free biochemical interactions." Sensors and Actuators B: Chemical 85.3 (2002): 219-226.

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

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

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

[11] 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

[12] 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.

[13] 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

[14] H. Lin, Z. Yi, & J. Hu, « Double resonance 1-D photonic crystal cavities for singlemolecule mid-infrared photothermal spectroscopy: theory and design », Opt. Lett.,37(8), pp 1304-1306, 2012

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

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

CHAPITRE III :

Méthodes et Outils de simulations,

résultat et interprétation

III.1. Introduction :

La complexité de la fabrication et de la caractérisation des cristaux photoniques aux fréquences optiques rend coûteuses en temps et argent les études expérimentales systématiques sur des dispositifs à cristaux photoniques. Le développement des méthodes de modélisation numérique précises et rapides reste donc primordial pour l'étude de ces structures.

Le comportement de la lumière dans une structure BIP de dimension finie ou infinie est régi par les équations de Maxwell. D'une manière générale, la modélisation des cristaux photoniques passe par le calcul des diagrammes de dispersion, de la réflexion et de la transmission.

Pour simuler les cristaux photoniques en géométrie de guide d'onde, on peut distinguer la méthode des ondes planes PWE(Plane Wave Expansion) et la méthode des différences finies dans le domaine du temps FDTD, nous avons utilisé la méthode (FDTD) à l'aide de logiciel Fullwave et la méthode (PWE)à l'aide de logiciel BandSOLVE de Rsoft CAD qui permet de modéliser différentes structures en une, deux et trois dimensions.

Une autre étude a été également réalisée, pour le capteur à base de cristaux photoniques 2D, Le capteur est l'un des éléments de base du système de multiplexage en longueur d'onde (WDM) et optique intégrée, nous apprendrons d'abord; la bande interdite de la structure proposée, puis le guide d'onde à cristal photonique, après connexion entre eux pour concevoir le capteur avec des cristaux photoniques. Enfin, nous essayerons d'améliorer la sensibilité de notre structure référence.

III.2. Méthodes de simulations des cristaux photoniques :

La modélisation des cristaux photoniques passe par le calcul des diagrammes de dispersion, de la réflexion et de la transmission, qui sont régis par les équations de Maxwell. Les méthodes les plus citées dans la littérature pour l'étude des cristaux photoniques ainsi que celles utilisées dans nos simulations par le logiciel Rsoft sont : la méthode des ondes planes (PWE) et la méthode des différences finies temporelles (FDTD).

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

Dans les cristaux photoniques, la méthode des ondes planes est la méthode de référence pour le calcul des bandes interdites. Elle est bien adaptée pour des structures périodiques de dimensions infinies pour la détermination des modes propres et du diagramme de dispersion de la structure.

La technique PWE consiste à résoudre, dans l'espace fréquentiel, l'équation d'onde linéaire en développant le champ électromagnétique sur une base d'ondes planes (équations de Maxwell). La méthode de décomposition en ondes planes est très efficace pour calculer les diagrammes de bandes des cristaux photoniques parfaitement périodiques.

La PWE peut être adaptée pour étudier certaines structures non périodiques comme les guides d'onde ou les cavités grâce à la technique des supercellules.

III.2.2 La méthode FDTD (Finite Différence Time Domain):

La méthode des différences finies temporelles (en anglais FDTD (Finite Difference in the Time Domain) est fondée sur le schéma explicite de Yee, présenté en 1966. Elle permet de calculer à chaque instant discret de l'espace, les composantes du champ électromagnétique dans chaque cellule (maille) parallélépipédique du volume tridimensionnel (figureIII.1), à l'intérieur desquelles sont calculées les 6 composantes orthogonales des champs électromagnétiques (Ex, Ey, Ez et Hx, Hy, Hz) les équations de maxwell sont remplacées par un système d'équations qui relie le champ électromagnétique de chaque cellule aux champs des cellules voisines. Ces équations sont résolues en fonction des conditions aux limites.[2]

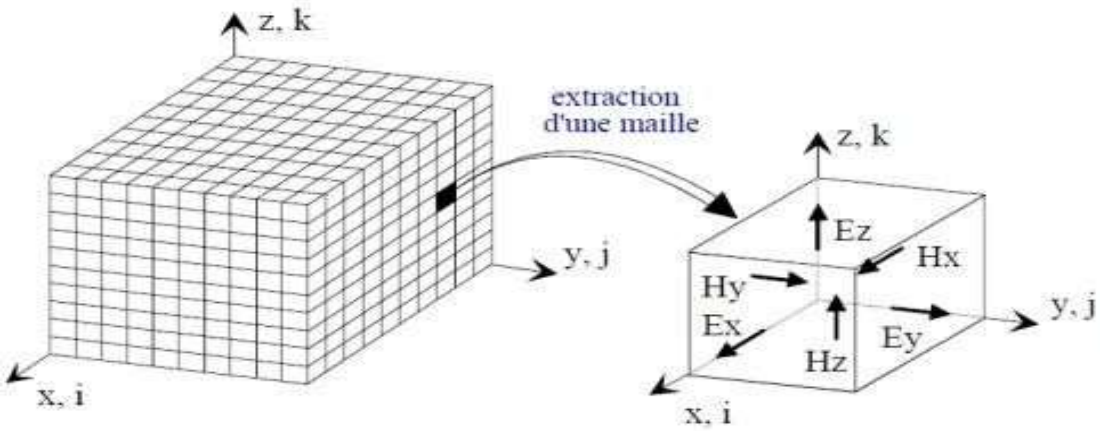


Figure III.1 : Décomposition spatiale du volume de calcul [3].

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 [1]. 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 électromagnétiquestockée.

III.2.2.1. Modélisation de la FDTD :

La méthode FDTD repose sur une résolution directe des équations de Maxwell sous leur forme différentielle dans le cas où le matériau est isotrope, non dispersif, sans sources et transparent (constante diélectrique purement réelle), ces relations s'écrivent :

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu}\nabla \times E \\ \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\nabla \times H \end{cases} \quad \text{.....(III.1)}$$

Considérons les équations de Maxwell de (III-1), le système à discrétiser devient alors dans un repère cartésien (Oxyz) [4] :

$$\begin{cases} \frac{\partial Hx}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial Ey}{\partial z} - \frac{\partial Ez}{\partial y}\right) \\ \frac{\partial Hy}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial Ez}{\partial x} - \frac{\partial Ex}{\partial z}\right) \\ \frac{\partial Hz}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial Ex}{\partial y} - \frac{\partial Ey}{\partial x}\right) \\ \frac{\partial Ex}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial Ez}{\partial y} - \frac{\partial Ey}{\partial z}\right) \\ \frac{\partial Ey}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial Ex}{\partial z} - \frac{\partial Ez}{\partial x}\right) \\ \frac{\partial Ez}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial Ey}{\partial x} - \frac{\partial Ex}{\partial y}\right) \end{cases} \quad \text{.....(III.2)}$$

Pour passer en 2D, on considère qu'il n'y a pas de variation suivant la direction (Oz). C'est-à-dire que toutes les dérivées partielles par rapport à z sont nulles.

On remarque qu'il est donc possible d'effectuer deux regroupements. Dans ce cas-là, chacun de ces deux regroupements se réfère à un mode de polarisation TE et TM.

La polarisation TE (Transverse Electrique), est la polarisation où le champ est perpendiculaire à la direction (Oz), se définit de la manière suivante :

$$\begin{cases} \frac{\partial Ex}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial Hz}{\partial y}\right) \\ \frac{\partial Ey}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(-\frac{\partial Hz}{\partial x}\right) \\ \frac{\partial Hz}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial Ex}{\partial y} - \frac{\partial Ey}{\partial x}\right) \end{cases} \quad \text{.....(III.3)}$$

La polarisation TM (Transverse Magnétique) est la polarisation où le champ est perpendiculaire à la direction (Oz), se définit de la manière suivante :

$$\begin{cases} \frac{\partial Hx}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(-\frac{\partial Ez}{\partial y}\right) \\ \frac{\partial Hy}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial Ez}{\partial x}\right) \\ \frac{\partial Ez}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial Hy}{\partial x} - \frac{\partial Hx}{\partial y}\right) \end{cases} \quad \text{.....(III.4)}$$

III.2.2.2 Conditions aux limites :

Le module Fullwave utilise les conditions aux limites dites PML (Perfectly Matched Layer) [5] basée sur le modèle des couches absorbantes découverte par J.P. Béranger [6] et parfaitement adapté à la modélisation des frontières absorbantes en électromagnétisme.

La condition d'absorption de type PML est un domaine artificiel créé pour le calcul numérique afin de traiter les problèmes de propagation d'ondes dans les milieux infinis. Sachant qu'en simulation numérique les domaines conçus ne peuvent pas être infinis, l'idéeest de mettre en place des conditions aux limites absorbantes aux frontières du domaine étudiépour empêcher l'onde de se réfléchir au niveau de ces frontières (figure III.2). Les ondes qui traversent ainsi l'interface entre le domaine non PML et le domaine PML sont absorbées au niveau de ce dernier [7].

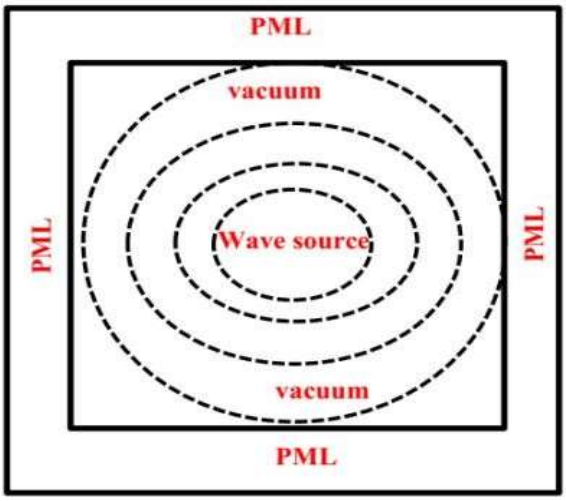


Figure III.2 : La technique PML.

La figure III.3 montre l'utilisation des PML pour un système à 2D.

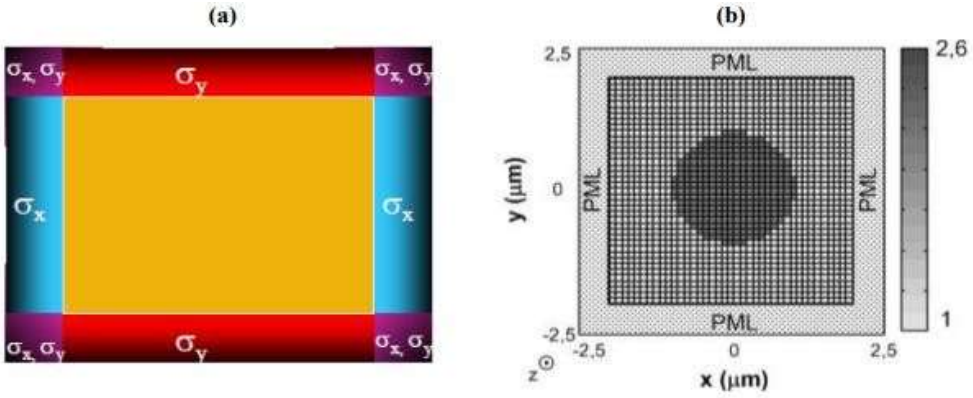


Figure III.3 : Utilisation des couches PML. (a) dans le cas 2D. (b) Exemple d'un maillage d'une structure circulaire avec application des conditions aux limites PML [8].

Le seul inconvénient de cette méthode est qu'elle augmente le temps de calcul par la discrétisation d'une couche supplémentaire et l'ajout du terme absorbant dans les équations d'élasticité.

III.3. Outils numériques disponibles :

Le RSoft CAD est le programme de base de RSoft Photonics Suite, et agit en tant que programme de commande pour les modules de simulation du dispositif de RSoft qui sont : BeamPROP, FULLWAVE, BandSOLVE, GratingMOD, DiffractMOD, FemSIM, et ModePROP. Il est employé pour définir l'entrée la plus importante exigée par ces modules de

simulation : les propriétés matérielles et la géométrie structurelle d'un dispositif photonique. L'utilisateur doit d'abord concevoir une structure dans l'interface de CAD et utilisera ensuite un ou plusieurs modules de simulation pour modéliser les divers aspects de la performance du dispositif.

Tous les diagrammes de bandes de notre étude ont été calculés en utilisant le logiciel «Bandsolve» de la même suite de logiciels que « Fullwave », c'est à dire celle de Rsoft.

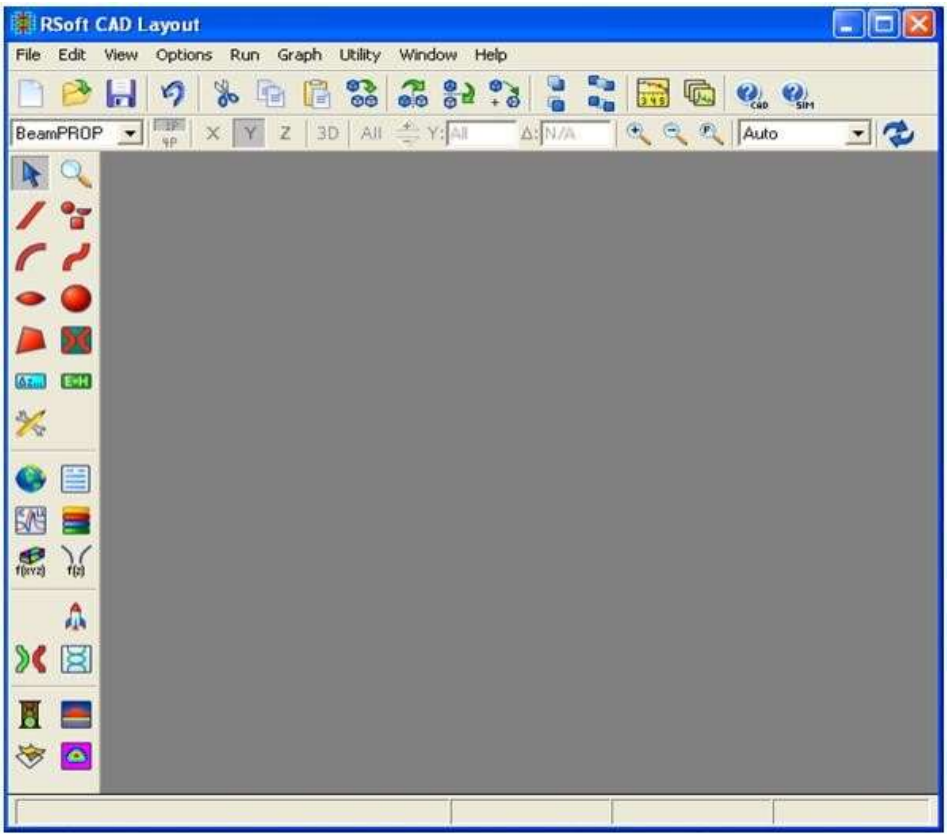


Figure III.4 : La fenêtre Rsoft CAD, montrant la barre de menus en haut, les barres d'outils en haut et à gauche, et la barre d'état en bas

III.3.1. Le simulateur « BandSOLVE » :

C'est un logiciel de simulation qui permet de générer et d'analyser les diagrammes de bandes photoniques. Le calcul des diagrammes est basé sur une méthode de décomposition des champs électromagnétiques en ondes planes pour les structures périodiques. Les structures dont nous voulons calculer les diagrammes de bandes sont toutes des structures qui se répètent périodiquement.

A deux dimensions, il est nécessaire de considérer deux directions de propagation différente : TE (avec le champ E parallèle à l'axe des trous) et TM (où E est perpendiculaire à

l'axe des trous). Ces deux polarisations sont découplées et donnent lieu à deux diagrammes de bandes indépendants. BandSolve est particulièrement utile pour optimiser les propriétés des structures à cristaux photoniques.

La boite de dialogue de simulation BandSOLVE est la suivante (figure III-5).

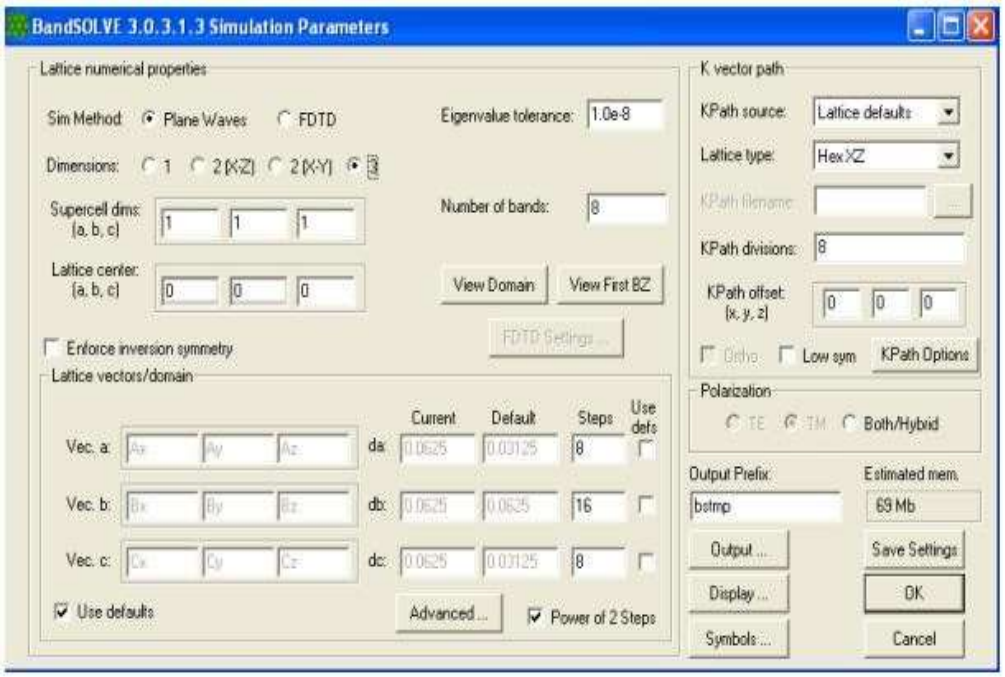


Figure III.5 : La fenêtre de simulation BandSOLVE.

III.3.2. Le simulateur «FullWAVE» :

L'objectif de FullWAVE est de fournir un ensemble de simulations pour calculer la propagation de la lumière dans les guides d'ondes de géométries arbitraires. La simulation est basée sur la technique de la FDTD (Finite Difference Time Domain). Ce logiciel est bien adapté à nos simulations puisqu'il permet la conception de structures photoniques complexes.

Pour exploiter l'application FDTD utilisé dans FullWave, les paramètres à la fois physiques et numériques sont nécessaires.

III.3.2.1. Paramètres physiques :

Deux paramètres physiques sont nécessaires pour effectuer une simulation FullWave :

- Les paramètres du matériau qui sont la permittivité relative ε (r, ω) et la perméabilité relative μ (r, ω) en fonction de l'espace et de la fréquence.
- L'excitation du champ électromagnétique.

III.3.2.2. paramètres numériques :

En outre, l'algorithme de résolution nécessite une entrée supplémentaire sous la forme de paramètres de simulation numériques telles que :

- Le domaine de calcul fini.
- Les conditions aux limites.
- Le pas spatial.
- Le pas temporel.

La boite de dialogue des paramètres de simulation FullWave est indiquée sur la figure III-6. Cette boîte permet d'accéder à la base des paramètres nécessaires pour une simulation numérique et le bon contrôle d'autres aspects importants à la simulation.

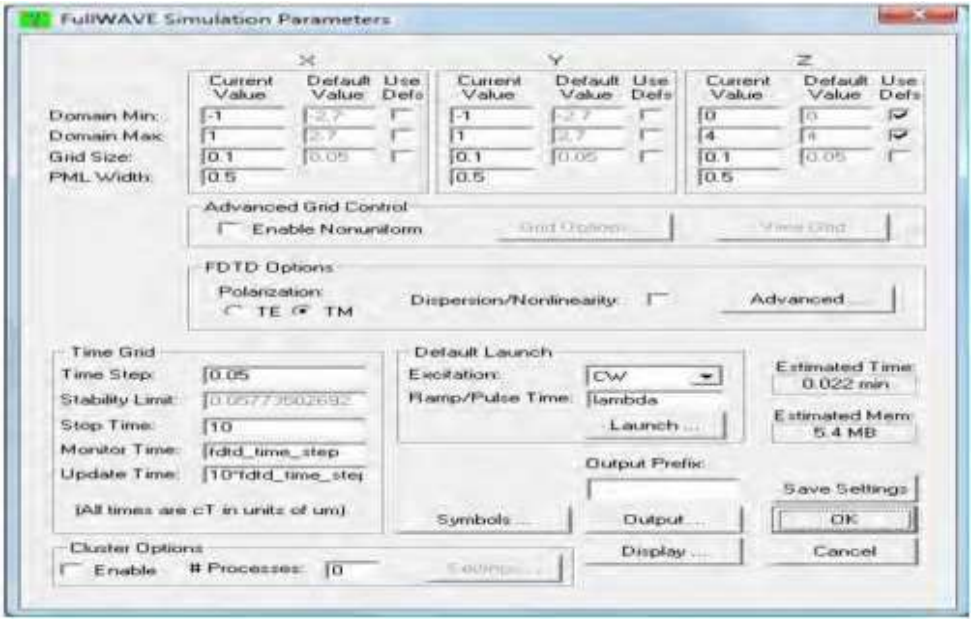


Figure III.6 : La fenêtre des paramètres de simulation FullWave où les paramètres de base de simulations numériques sont entrés.

III.3.3. Présentation des autres applications :



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

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

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

 SYMBOLE TABLE Editor : cette option pour créer des variables ceci ouvrira on fait varier la période a et le rayon r.

 Vérification du profil d'index : Pour vérifier la distribution d'indexe de la structure qu'on a créé.

III.4. Présentation de la structure de base :

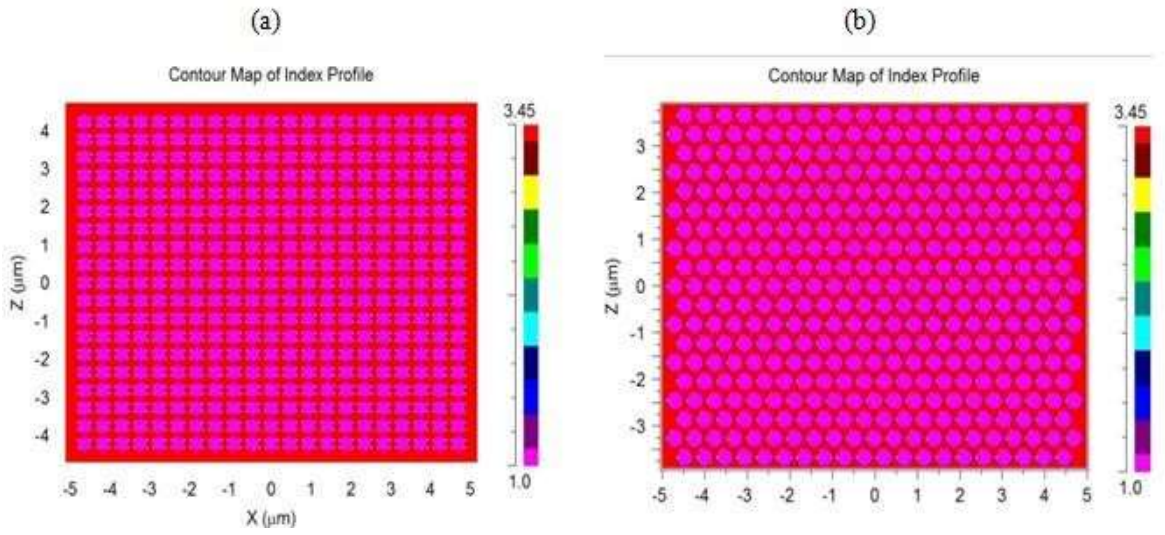


Figure III-7: Distribution de la constante de permittivité. a) réseau carré. b) triangulaire.

Une étude de deux structures est tout d'abord initiée, afin de déterminer le diagramme de bandes interdites photoniques.

La première structure étudiée de (figure (a)) est à base de cristaux bidimensionnels membranaires à réseau de trous d'air (21 × 19) dans un diélectrique à fort indice (n_{Si}=3.45), il s'agit d'un réseau carré, la deuxième structure étudiée de (figure (b)) est aussi à base de

cristaux bidimensionnels membranaires à réseau de trous d'air (21 × 19) dans un diélectrique à fort indice (n_{Si}=3.45), il s'agit d'un réseau triangulaire .

III.4.1 Choix de réseau :

Le cristal photonique 2D contient deux polarisations TE (transverse électrique) et TM (transverse magnétique). La polarisation TE (respectivement TM transverse magnétique) est définie quand le vecteur champ électrique E (respectivement magnétique M) est parallèle aux cylindres d'air du réseau considéré. Ainsi, une bande interdite terminée simultanément pour les deux polarisations n'est possible que pour un très haut facteur de remplissage en air.

Dans le cas du réseau carré, nous allons prendre un cristal de facteur de remplissage en air de 40.4%, (figure III-8(a)) deux bandes interdites photoniques (BIP) sont observées pour la polarisation TM : la première pour a/λ variant entre 0,3725 et 0,4232 et la deuxième plus étroite pour a/λ comprise entre 0.2639 et 0.2906. Pour la polarisation TE, aucune bande interdite n'apparait.

La mesure de la transmission en fonction de la longueur d'onde en polarisation TM avec la méthode des différences finies dans le domaine temporel FDTD permet de retrouver la même bande interdite photonique (Figure III-8 (b)).

(a) (b)

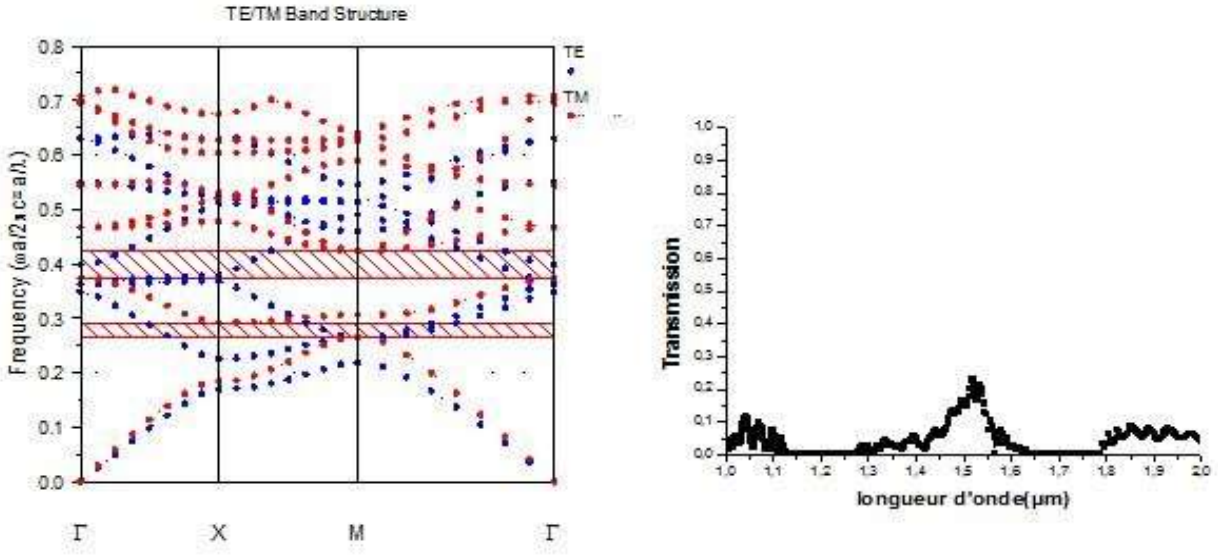


Figure III-8(a) Diagramme de dispersion du CP-2D dans la membrane Si (un réseau carré de trous d'air, a=0.47µm, r=0.19µm) calculé par la PWE. (b) la présentation du spectre de transmission calculé par la FDTD-2.

Cependant, pour le réseau triangulaire (figure III-9(a)) nous allons prendre un cristal de facteur de remplissage en air de 40.4% et on observe une large bande interdite photoniques (BIP) pour la polarisation TM pour a/λ variée entre 0.2501 et 0.41325 qui correspondent à une longueur d'onde de 1.1373 à 1.8792 µm.

La mesure de la transmission en fonction de la longueur d'onde en polarisation TM avec la méthode des différences finies dans le domaine temporel FDTD permet de retrouver la même bande interdite photonique (Figure III-9 (b)).

(a) (b)

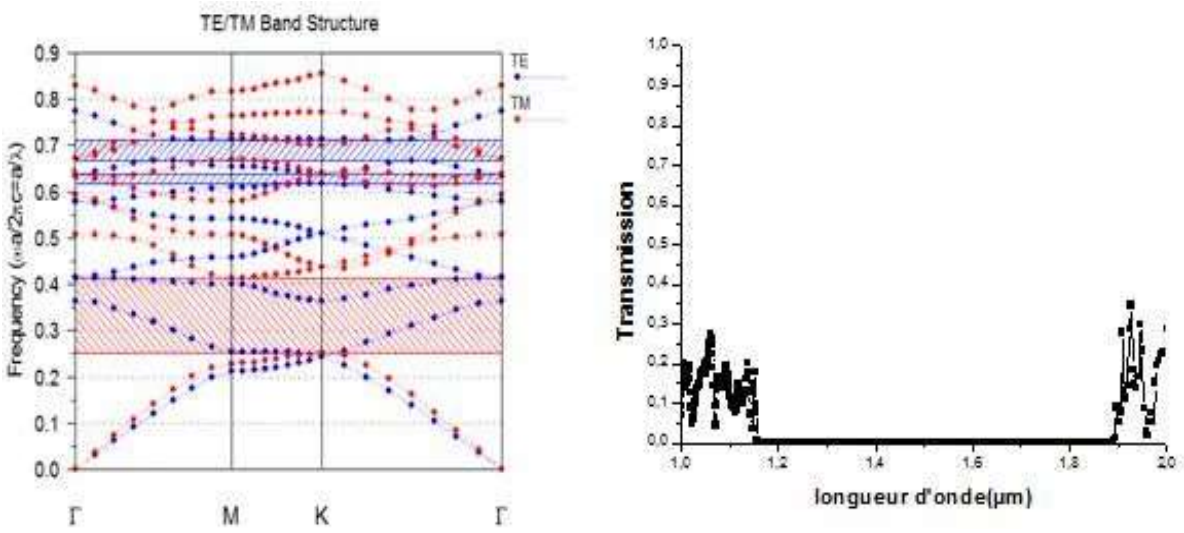


Figure III-9 : (a) Diagramme de dispersion du CP-2D dans la membrane Si (un réseau hexagonal de trous d'air, a=0.47µm, r=0.19.) calculé par la PWE. (b) la présentation du spectre de transmission calculé par la FDTD-2D.

En effet pour r =0.19µm, la plus large BIP est obtenue avec un réseau triangulaire de trous d'air en polarisation TM. C'est cette structure que nous exploitons dans notre étude.

Généralement, les bandes interdites TM s'ouvrent pour des zones connectées de forts indices, tandis que l'ouverture de bandes TE est plutôt favorisée par des zones de forts indices isolées (déconnectées) comme des piliers diélectriques dans l'air [11].

Donc la meilleur structure est la structure qui offre la plus large bande interdite, à savoir; la structure triangulaire.

III.5. Présentation de la structure avec défaut :

La structure que l'on propose initialement n'est plus optimale pour le domaine de détection. Pour utiliser cette structure en détection, on doit introduire des défauts.

L'insertion justifiée de défauts de périodicité au sein du cristal constitue l'attrait majeur des structures à cristaux photoniques. Les défauts peuvent avoir une infinité de géométries possibles qui passent par la modification de la taille ou de l'indice d'un seul motif du cristal jusqu'au retrait de rangées entières de motifs qu'on appelle défauts linéiques.

III.5.1. Défaut linéique (Guide d'onde sans cavité) :

Parmi l'infinité des structures contenant des défauts linéiques réalisables, permettant l'apparition de modes guidés à une fréquence appartenant à la bande interdite du cristal parfait [9,10], nous nous sommes limités, dans cette partie, à une seule géométrie de défaut. Elle consiste en une rangée manquante dans un cristal photonique triangulaire de période a,suivant la direction des plus proches voisins (direction ΓK).

Le guide d'onde droit W1 est l'une des structures qui a été largement explorée.

Nous considérons dans cette section un guide d'onde à cristaux photoniques. Le cristal photonique est un réseau triangulaire (21×19) de trous d'air de périodicité a = 0.470 μm, percés dans une membrane de Si d'indice n = 3.45 et de rayon des trous r = 0.19 μm. Le guide d'onde est formé en enlevant une rangée de trous 1 dans la direction ΓK du réseau triangulaire comme c'est schématisé sur la figure (III-10).

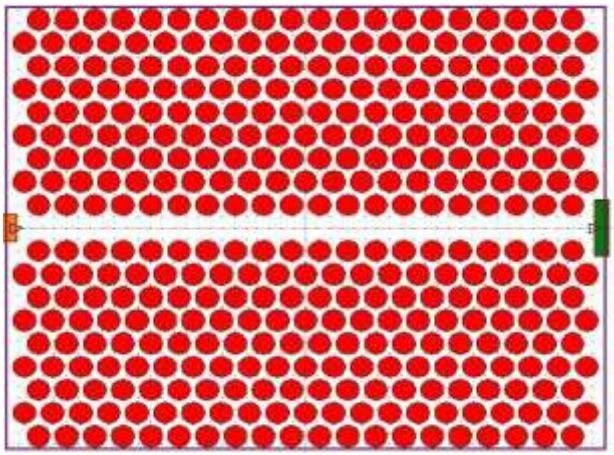


Figure III-10 : Guide droit référence W1 (Une rangée de trous omise) réalisé dans un cristal photonique triangulaire de trous d'air sur une membrane de Si suivant la direction ΓK, f=59%.

Un calcul FDTD fait par le logiciel FullWave de RSoft, permet de tracer le spectre de transmission (Figure III.11 (a)), une large transmission du guide droit W1 est observées'étalant sur plus de 400nm et elle est de 90%. On s'est limité dans ce cas à la région spectralede la bande interdite du cristal 2D calculée précédemment (BIP entre 1419 nm à 1986nm).

Issue du calcul FDTD, la (Figure III-11(b)) représente la distribution spatiale d'une excitation de type continue (CW) à une longueur d'onde de 1.5µm (longueur d'onde permise) pour la polarisation TM du guide droit W1. Nous constatons que le champ est bien confiné et l'allure de sa distribution démontre clairement l'existence du phénomène de guidage de la lumière le long du guide W1.

(a) (b)

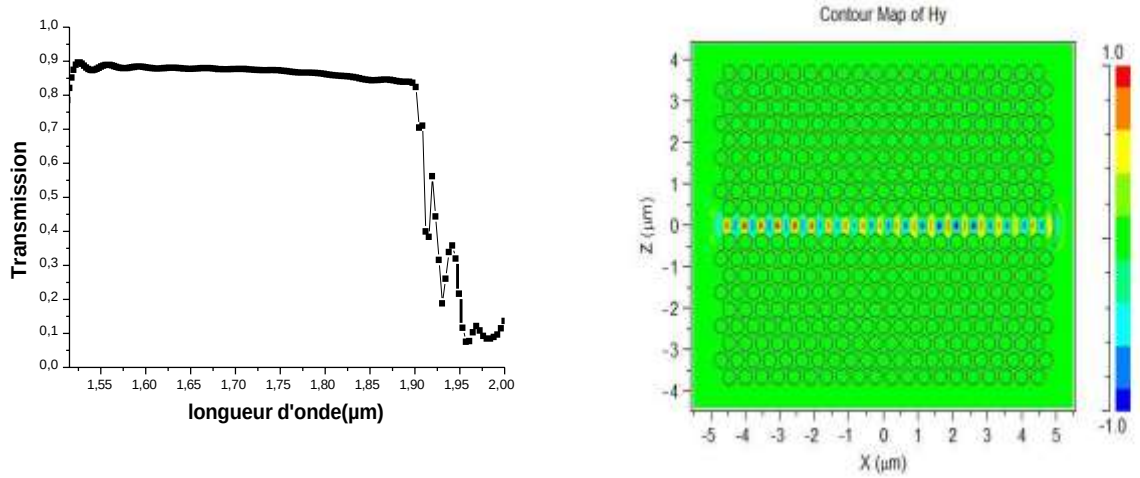


Figure III.11 : (a) Distribution spatiale du champ à la suite d'une simulation de type FDTD-2D et une excitation de type CW du guide droit référence W1KA, pour une polarisation TM à λ=1.55µm. (b) Spectre de transmission du guide droit référence W1KA en mode TM.

III.5.2. Guide d'onde avec cavité :

III.5.2.1 Description de la première structure étudiée (Guide d'onde avec cavité hexagonale) :

Les structures des cavités à modulation locale de la largeur du défaut linéique, ont été proposées initialement par Kuramochi en 2006 [12] .Ce genre de cavité est basé sur un défaut linéique dans les cristaux photoniques, et pour avoir l'application des cristaux photonique en détection, nous avons effectué une optimisation de la structure initiale dite de référence pour avoir un changement de la transmission de la longueur d'onde de résonance en fonction du

changement d'indice qui est créé par une cavité formée d'un guide d'onde d'entrée, un résonateur et un guide d'onde de sortie.

La cavité est obtenue par l'omission des 8 trous vert la gauche et ceux à côté droit dans le 10^{éme} ligne et 7 trous dans le centre de façon à former un hexagone (H2) [13] comme le montre la figure ci-dessous (figure III.12).

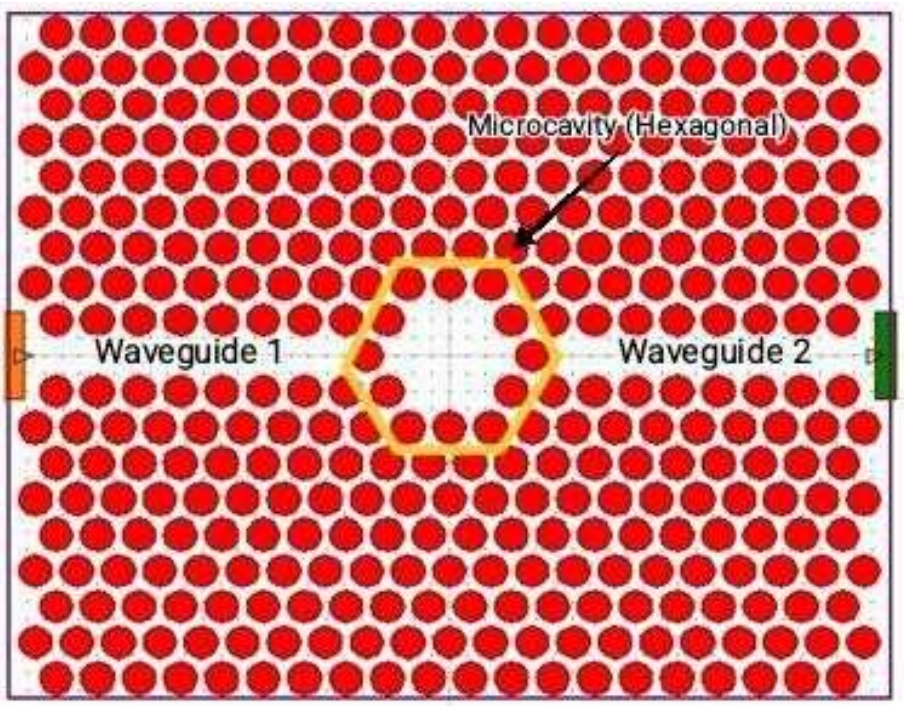


Figure III-12 : Structure d'un couplage cavité/guide (1^{ere} structure).

La figure III-13 montre le spectre de transmission d'un système couplé entre guide d'onde 1 A et cavité hexagonale, calculé par la méthode FDTD de logiciel FullWave. Comme on peut le voir sur la figure III 3, lorsque la cavité est en état de résonance, deux pics aigus de forme lorentzienne apparaissent à l'intérieur de la BIP à une longueur d'onde de résonance de 1,6637 μm en mode (1) et 1.7274 μm en mode (2). La figure III.14 montre le profil de propagation de la lumière à travers la structure de la cavité dans le plan (XZ). Sur cette figure on peut nettement voir que le champ est étroitement confiné dans la zone hexagonale de la cavité. Cela rend la cavité très sensible aux changements d'indice de réfraction en raison de la forte interaction lumière-matière.

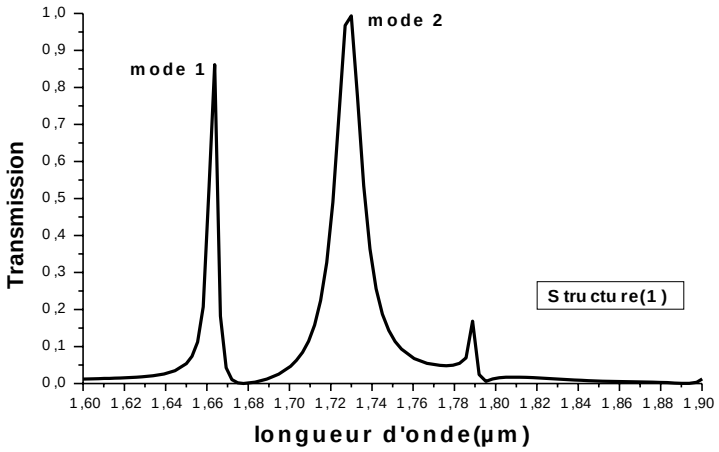


Figure III.13 : spectre de transmission de la première structure.

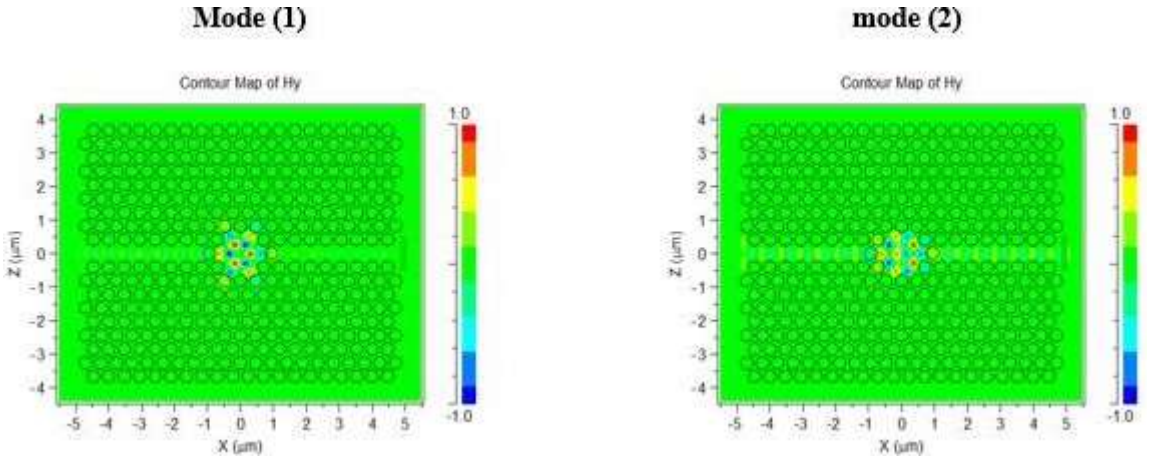


Figure III.14 : La distribution du champ magnétique en deux mode dans la cavité dans le plan x-z à $\lambda_{résonnance}$ (mode1) =1.6637 µm et $\lambda_{résonnance}$ (mode2) =1.7274 µm.

III.5.2.2 Etude de la résonance de la cavité en fonction d'indices de réfraction :

Dans ce travail nous calculons les spectres de transmission en présence d'un liquide dans les trous d'air (élément à analyser) dans deux modes, ces spectres sont calculés pourtrois solutions de couverture homogènes (différents indices de réfraction n=1 jusqu'à n= 1.05 avec un pas d'indice de 0.025).

La Figure III.15 (a) présente les spectres de transmission du biocapteur pour trois indices de réfraction (n=1, n=1.025, n=1.05) avec un pas de 0.025 On constate que les décalages de la longueur d'onde de résonance λ_0 augmentent avec l'augmentation de l'indice de couverture du milieu RI. Les résultats obtenus (le changement de la longueur d'onde en

deux mode en fonction de du changement du l'indice de réfraction) sont classés dans le tableau (III.1).

Figure III.15 (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 jusqu'à n = 1,05, la sensibilité pour le premier mode est d'environ 132 nm / RIU et pour le second mode est d'environ 182 nm / RIU.

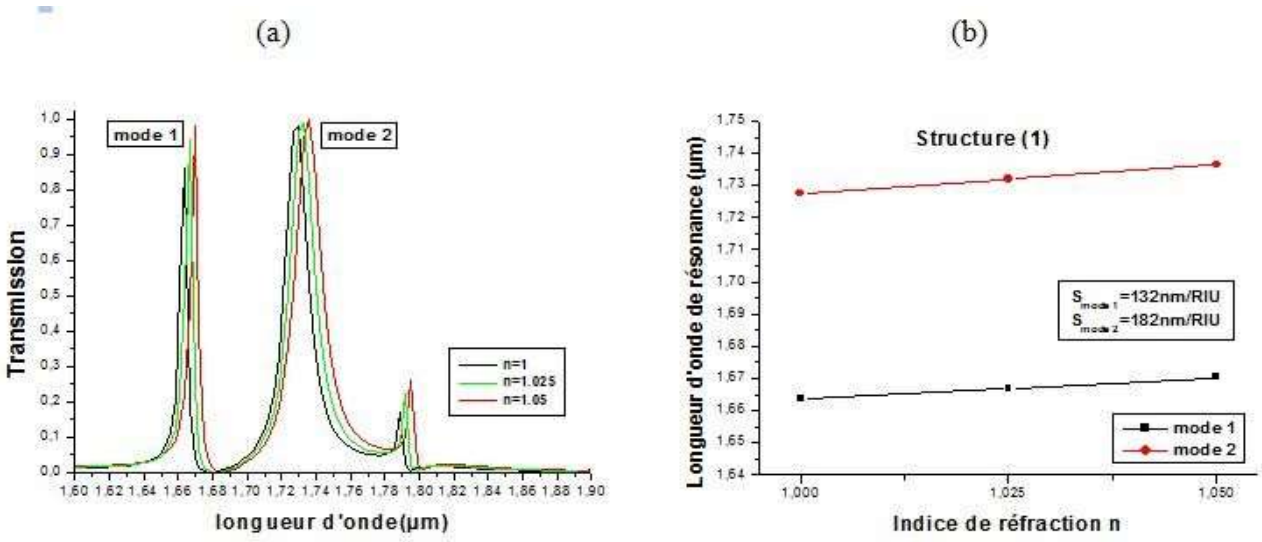


Figure III.15 : (a)Spectre de transmission de la première structure pour différents indices de réfraction. (b) la langueur d'onde de résonance en fonction de l'indice réfraction n du matériau à détecter.

n	Mode 1	Mode 2
1	1,6637	1,7274
1,025	1,667	1,73195
1,05	1,6703	1,7365

Table III.1 : La longueur d'onde de résonance (λ_0) pour deux modes en fonction de l'indice de réfraction (RI).

III.5.3 Guide d'onde avec cavité hexagonale et un cercle central :

III.5.3.1 Description de la deuxième structure étudiée :

Afin d'améliorer les performances de notre biocapteur et d'augmenter sa 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 hexagonale avec un cercle central. Cette dernière, offre une excellente amélioration pour la sensibilité et lefacteur de qualité. La structure proposée est composée d'un système d'un guide d'onde couplés à la même cavité de structure 1 mais on ajoute un cercle dans le centre comme représente la figure III-16.

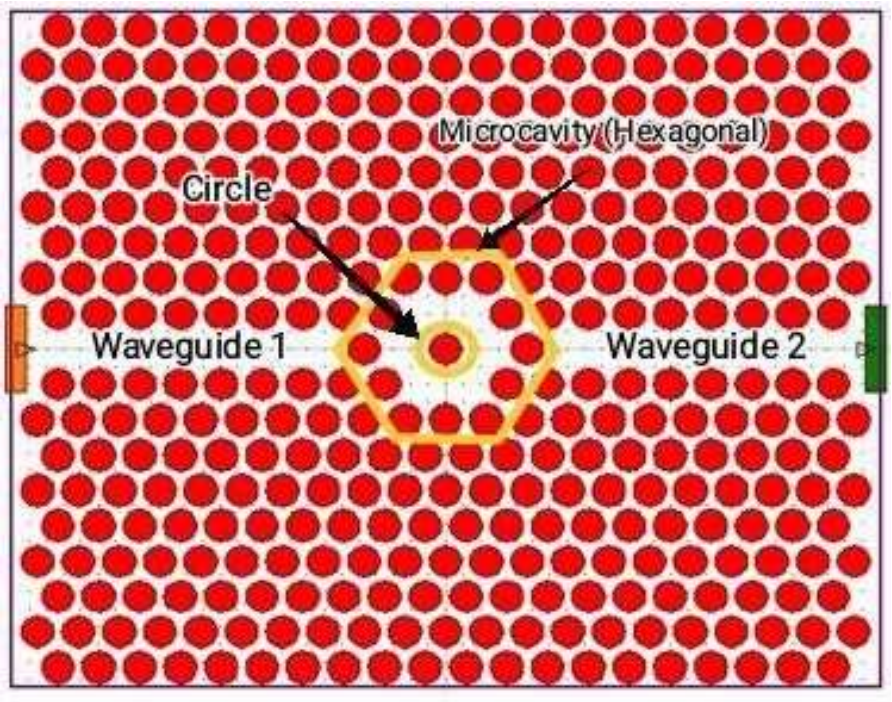


Figure III-16 : Structure d'un couplage cavité/guide (2éme structure).

La figure III.17 représente le spectre de transmission et la distribution du champ magnétique calculés par la méthode FDTD du logiciel Fullwave de la 2eme structure proposée. Comme on peut le constater sur la figure III.17, lorsque la cavité est en situation de résonance, deux pics aigus de forme lorentzienne apparaissent à l'intérieur de la BIP à une longueur d'onde de résonance de 1.700 µm et 1.8687 µm.

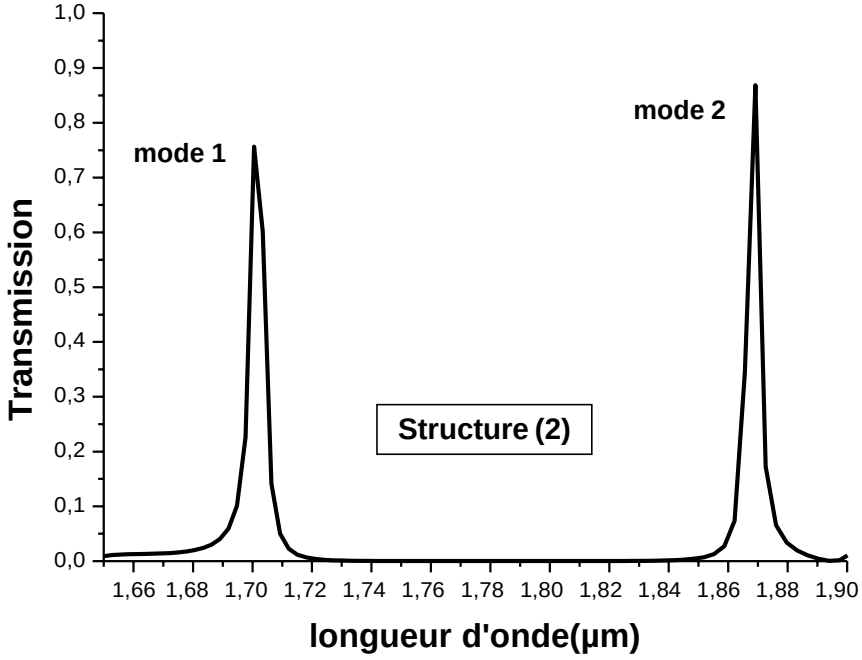


Figure III.17 : Spectre de transmission de la 2éme structure pour n=1.

III.5.3.2 Etude de la résonance de la cavité en fonction d'indices de réfraction :

La figure III.18 (a) illustre les spectres de transmission de la structure (2) proposée pour différents indices de réfraction variant de 1 à 1,05 par pas de 0,025. L'augmentation de l'indice de réfraction n entraîne un décalage des spectres transmis vers les longueurs d'ondes les plus longues, avec un décalage plus important en mode 2 par rapport au mode 1. Les résultats obtenus(le changement de la longueur d'onde on deux mode en fonction de du changement du l'indice de réfraction) sont classer dans le tableau (III.2).

La figure III.18 (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.

Tout en gardant les autres paramètres existants fixés et en augmentant l'indice de réfraction de n = 1 à 1,05; la sensibilité pour le mode 1 est d'environ 201 nm / RIU et pour le mode 2 est d'environ238nm/RIU.

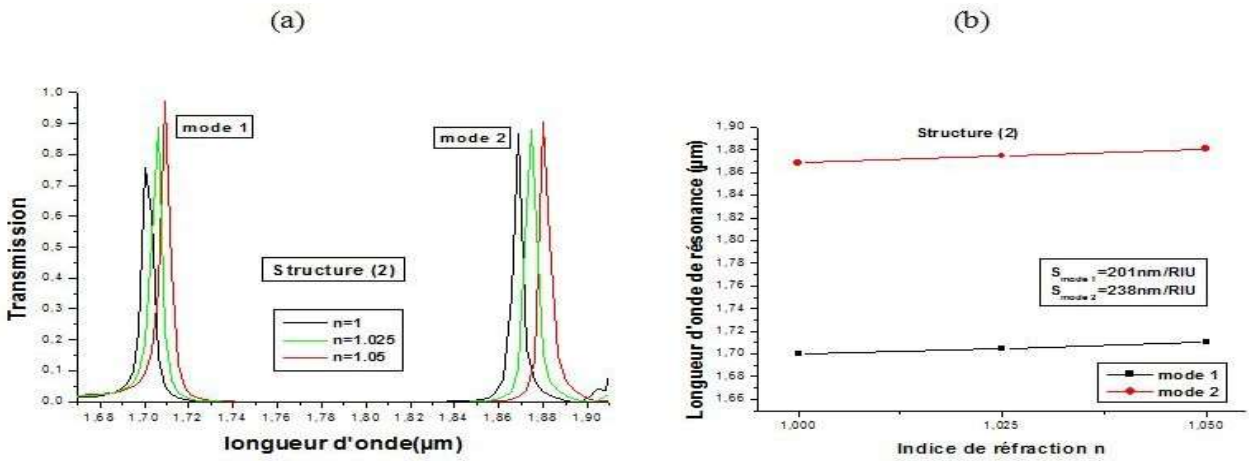


Figure III.18 : (a) Spectre de transmission de deuxième structure pour différents indices de réfraction. (n=1, n=1.025, n=1.05). (b) la langueur d'onde de résonance en fonction de l'indice réfraction n du matériau à détecter.

N	Mode 1	Mode 2
1	1,7	1,8687
1,025	1,7048	1,8745
1,05	1,71	1,8806

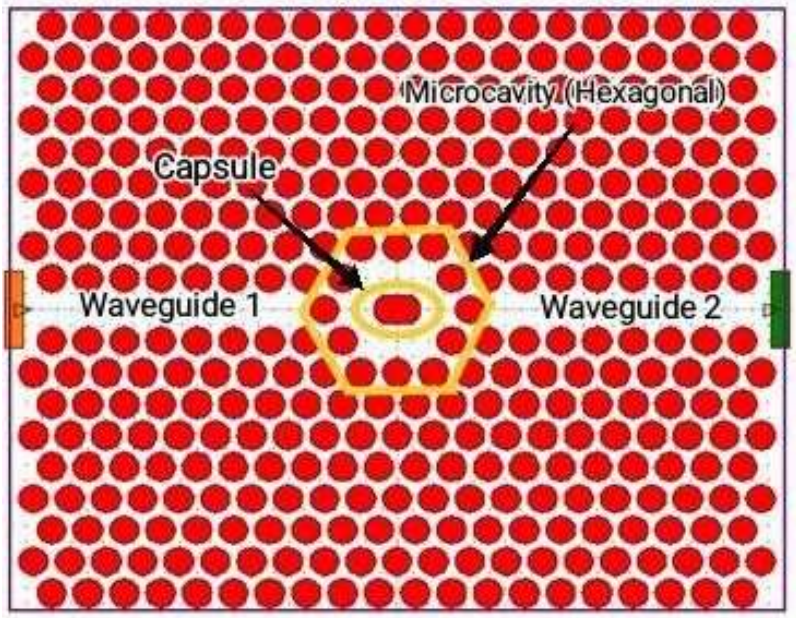
Tableau III.2 : La longueur d'onde de résonance (λ0) pour deux mode, en fonction de l'indice de réfraction (RI), (structure 2).

D'après le tableau III.1 et le tableau III.2, on remarque que la sensibilité dans la 2^{éme} structure est plus meilleure que la 1^{ere} structure.

III.5.4.1: Guide d'onde avec cavité hexagonale et une capsule centrale :

D'après les résultats obtenus dans la 2^{éme} structure et pour plus d'amélioration des performances de notre biocapteur, on propose cette structure en gardant la même forme de structure 2 mais on change la forme de cercle dans le centre par une cavité de forme capsule avec (R=.190 nm et T= 140 nm), comme représente la figure III.19.

(a)



(b)

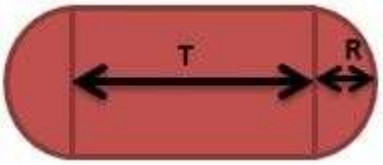
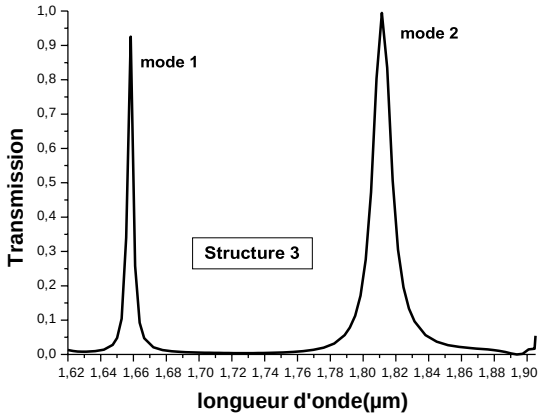


Figure III-19 : (a) Structure d'un couplage cavité/guide (3éme structure), (b) Capsule avec R=.190 nm et T= 140 nm

La figure III.20 (a) représente le spectre de transmission et la distribution du champ magnétique calculés par la méthode FDTD du logiciel Fullwave de la 3eme structure proposée. Comme on peut le constater sur la figure III.20 (a), lorsque la cavité est en situation de résonance, deux pics aigus de forme lorentzienne apparaissent à l'intérieur de la BIP à une longueur d'onde de résonance de 1,6473 µm on mode 1 et 1.8092µm on mode 2.

Le profil de propagation de la lumière à travers la structure de la cavité dans le plan (XZ) est représenté sur la figure III.20 (b), sur cette figure on peut clairement voir que le champ est fortement confiné dans la zone de la cavité et il est plus renforcé que la première structure. Ce qui rend la cavité très sensible aux variations de l'indice de réfraction dues à la forte interaction lumière-matière.

(a)



(b)

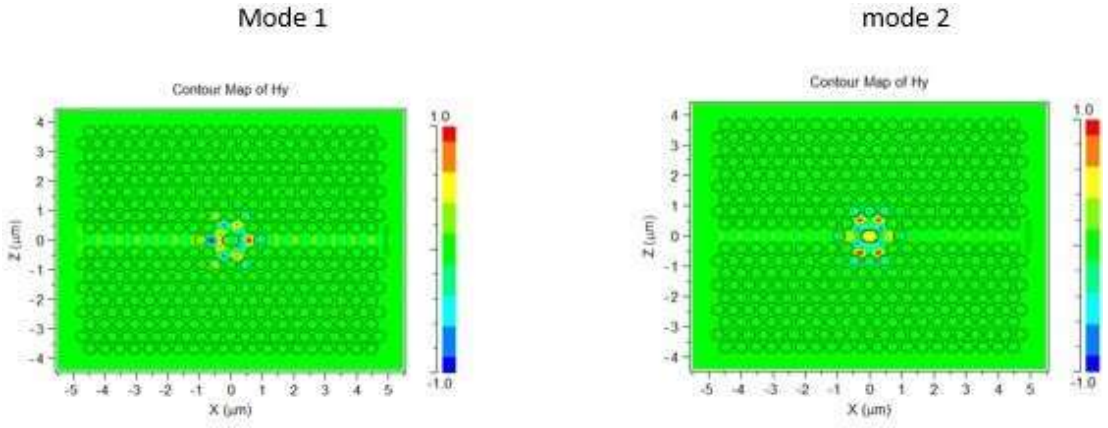


Figure III.20 : (a) Spectre de transmission de la 3eme structure pour n=1, T=140 nm, R= 190 nm). (b) La distribution du champ magnétique dans la cavité dans le plan x-z à $\lambda_{résonance}$ (mode1) =1.6566 µm, $\lambda_{résonance}$ (mode2) =1.8092 µm.

III.5.4.2 Etude de la résonance de la cavité en fonction d'indices de réfraction :

La Figure III.21 (a) présente les spectres de transmission du biocapteur pour trois indices de réfraction (n=1, n=1.025, n=1.05) avec un pas de 0.025 On constate que les décalages de la longueur d'onde de résonance λ_0 augmentent avec l'augmentation de l'indice de couverture du milieu RI. Les résultats obtenus (le changement de la longueur d'onde en deux mode en fonction de du changement du l'indice de réfraction) sont classés dans le tableau (III.3).

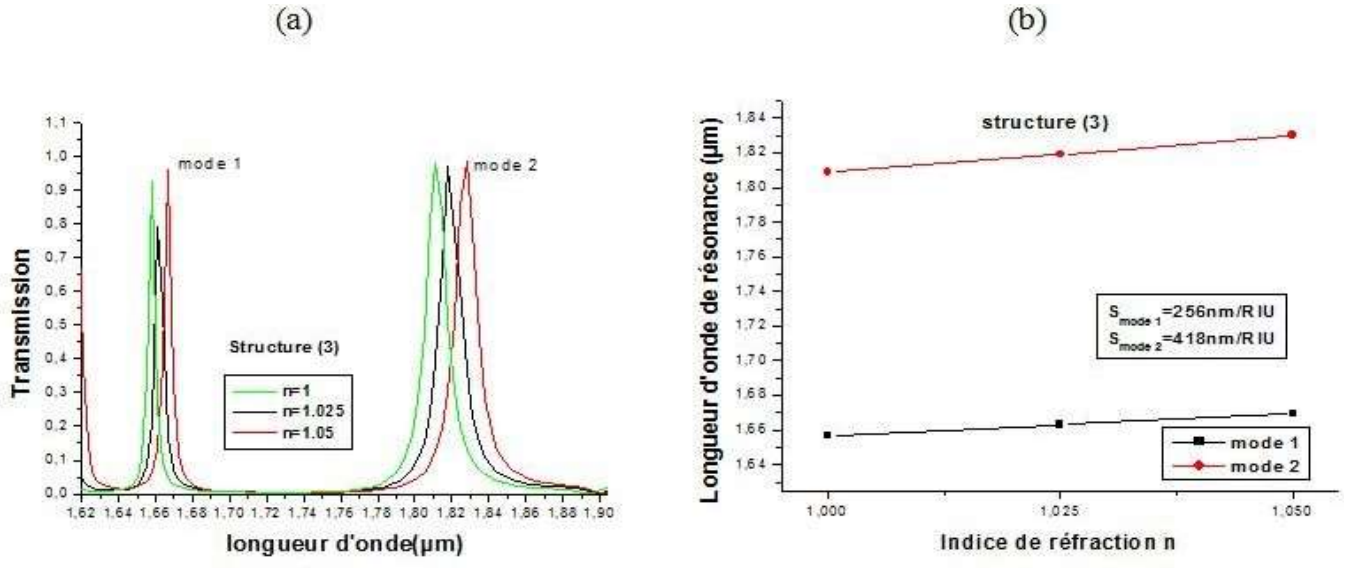


Figure III.21 : (a)Spectre de transmission de troisième structure pour différents indices de réfraction. (n=1, n=1.025, n=1.05) (b) la langueur d'onde de résonance en fonction de l'indice réfraction n du matériau à détecter.

N	Mode 1	Mode 2
1	1,6566	1,8092
1,025	1,663	1,819
1,05	1,6694	1,8301

Tableau III.3 : La longueur d'onde de résonance (λ_0) pour deux mode, en fonction de l'indice de réfraction (RI), (structure 3).

La sensibilité pour le mode 1 est d'environ 256 nm / RIU et pour le mode 2 est d'environ 418 nm / RIU. On remarque que la 3eme structure offre une très bonne sensibilité par rapport aux autres structures, Cette amélioration est de grand intérêt pour les applications des biocapteurs, à titre d'exemple les réactions biochimiques sont contrôlées en mesurant les faibles changements d'indice de réfraction dans des milieux réactionnels.

III.5.5. Influence de la taille de la capsule :

Dans cette partie, une modification de rayon (R) et de l'épaisseur (T) de capsule dans le centre est proposée pour améliorer la sensibilité ainsi que la limite de détection du biocapteur.

III.5.5.1 Influence de l'épaisseur T :

Premièrement on fixe le rayon R=190nm et on varie l'épaisseur comme suit T=100 nm, 140, 180, 220, 260 nm.

La Figure III.22 (a) présente les spectres de transmission du biocapteur pour différentes épaisseur de T (T=100nm jusqu'à T=260nm avec un pas de 40nm), On remarque que les décalages de la longueur d'onde de résonance λ_0 diminuer avec l'augmentation de l'épaisseur.

Les résultats obtenus (le changement de la longueur d'onde en deux mode en fonction de changement de l'épaisseur (T)) sont classés dans le tableau (III.4)

La figure III.22 (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.

(a) (b)

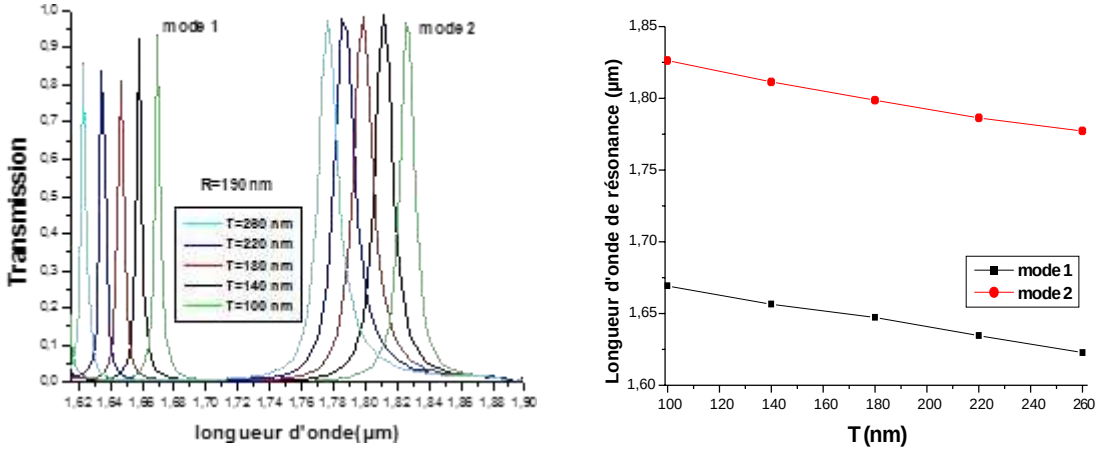


Figure III.22 : (a)Spectre de transmission de troisième structure pour différents épaisseur (T=100nm jusqu'à T=260nm). (b) la langueur d'onde de résonance en fonction de l'épaisseur T.

T (nm)	Mode 1 (um)	Mode 2 (um)
100	1,6693	1,8263
140	1,6566	1,8092
180	1,6473	1,7987
220	1,6346	1,7864
260	1,6228	1,7772

Tableau III.4 : La longueur d'onde de résonance (λ_0) pour deux modes, en fonction de l'épaisseur T.

D'après la figure (III.23) on remarque qu'il y a une très bonne amélioration de sensibilité pour différents changements de valeur d'épaisseur dans les deux modes, et on consiste la meilleur sensibilité est de 343 nm/RIU pour mode 1 et de 571nm/RIU pour mode 2cela est pour une épaisseur de T=220.

Cela signifie que le changement de valeur d'épaisseur (T) provoque un changement de la sensibilité pour notre biocapteur.

Les résultats de sensibilités pour les deux modes en fonctions de déférentes valeurs d'épaisseur sont présentés dans le tableau III.5.

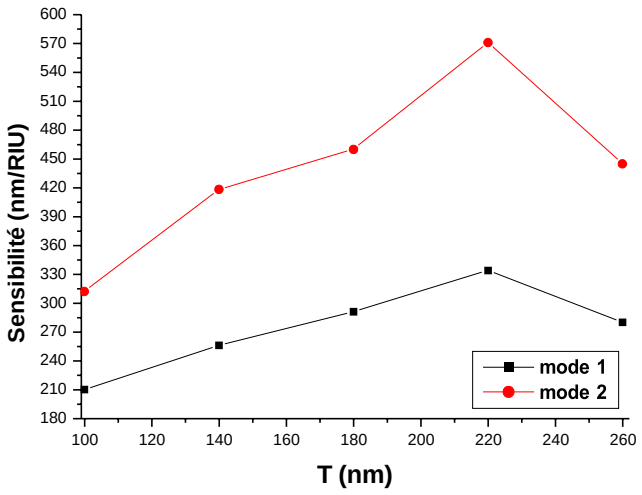


Figure III.23 : la variation de sensibilités en fonction de déférentes valeurs d'épaisseur.

T (nm)	Sensibilité (nm/RIU) Mode 1	Sensibilité (nm/RIU) Mode 2
100	210	312
140	256	418
180	291	460
220	334	571
260	280	445

Tableau III.5 : La variation de sensibilités (S) pour deux modes, en fonction de l'épaisseur T.

III.5.5.2 influence de rayon de capsule (R) :

Ensuite, nous avons analysé l'impact de différentes valeurs de rayon (R) sur les propriétés du biocapteur RI à base de cristaux photoniques, on fixe la meilleur valeur d'épaisseur obtenu d'après le travail précédent sur T = 220 nm, Des spectres de transmission d'indice 1 pour des valeurs de Rayons (R=150 nm, R=170 nm, R= 190, R=210 nm) par pas de20 nm sont présentés sur la figure III.24 (a). L'augmentation de la valeur R est associée à une diminue de la longueur d'onde de résonance. Cela signifie que la valeur de Rayon provoqueun décalage de la longueur d'onde de résonance.

Les résultats obtenus (le changement de la longueur d'onde en deux modes en fonction de changement du rayon de trou (R)) sont classés dans le tableau (III.6).

La figure III.24 (b) représente la relation de linéarité maintenue entre les longueurs d'onde de résonance et les différents rayons R étudie pour le premier et deuxième mode.

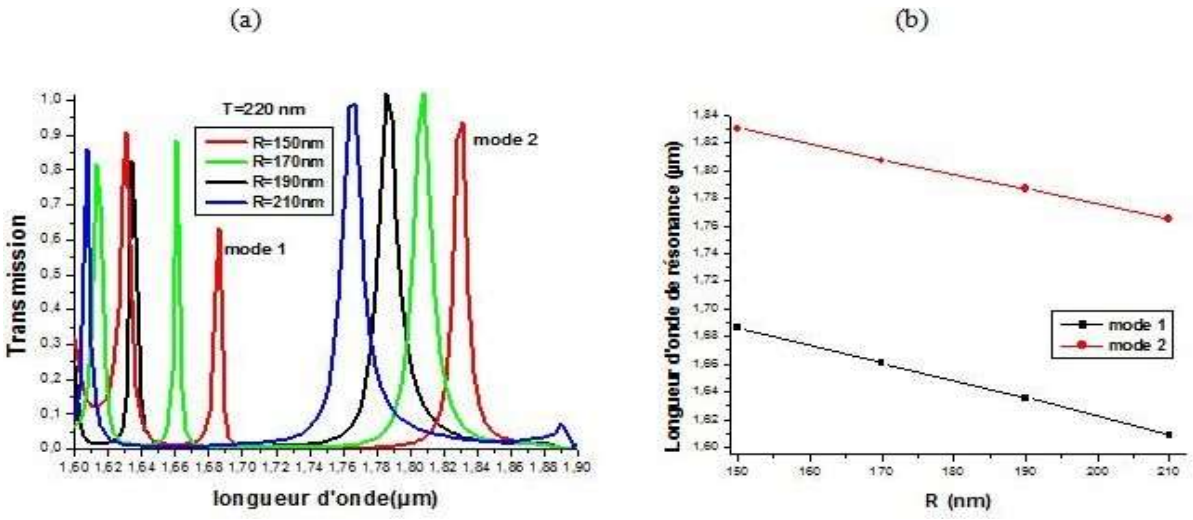


Figure III.24 : (a)Spectre de transmission de troisième structure pour différents épaisseur (R=150 nm jusqu'à R=210 nm), (b) la langueur d'onde de résonance en fonction de rayon R.

R (nm)	Mode 1 (um)	Mode 2 (um)
150	1,6863	1,8305
170	1,6609	1,8073
190	1,6357	1,7869
210	1,6082	1,7649

Tableau III.6 : La longueur d'onde de résonance (λ_0) pour deux modes, en fonction de rayon R.

La figure III.25 montre la relation entre la sensibilité en fonction de rayon R, il est clairement montré qu'une amélioration de la sensibilité du biocapteur est obtenue quand on augmentant la valeur de rayon (R) (tant que le rayon est élevé, la sensibilité est améliorée), la meilleur sensibilité obtenue pour le mode 1 est S=343 nm/RIU, et pour le mode 2 S=571 nm/RIU pour R=190 nm.

Les résultats de sensibilités pour les deux modes en fonctions de différentes valeurs de rayon R sont présentés dans le tableau III.7.

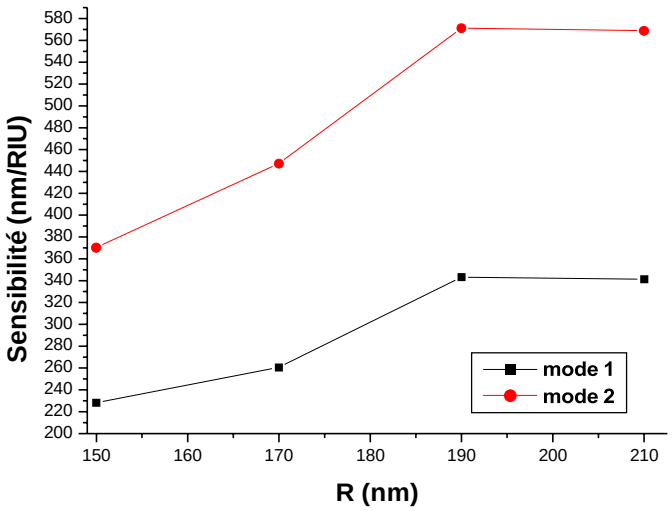


Figure III.25 : La variation de sensibilités en fonction de déférentes valeurs de rayon de la capsule.

R (nm)	Sensibilité (nm/RIU) Mode 1	Sensibilité (nm/RIU) Mode 2
150	228	370
170	260,4	447
190	343	571
210	341	568.7

Tableau III.7 : La variation de sensibilités (S) pour deux modes, en fonction de rayon de la capsule.

III.5.6. Etude comparative :

- D'après les spectres de transmission obtenue on peut dire que la deuxième structure (distribution hexagonale) est plus directive que la première (distributioncarré).
- avec la troisième structure du paramètres de capsule (R=190 nm et T=220 nm) on obtient la meilleur valeur de sensibilité S = 571 nm/RIU.

III.6. Exemple d'application : capteur de cancer:

Comme exemple d'application de la dernière structure optimisée (figureIII.19avec R=190 nm et T=220 nm), nous étudierons, le capteur de cancer. L'indice de réfraction (RI) dela cellule cancéreuse particulière dévie lorsque les cellules cancéreuses commencent à se développer dans le corps humain [16]. Les cellules basales normales ont un indice de réfraction de1.36, lorsque les cellules cancéreuses commencent à se développer entre elles, leur indice de réfraction devient 1.38.

Dans le tableau III.8 on a certains types de cancer et leur Ri « Jurkat (cancer du sang), PC12 (cancer des glandes surrénales), et MCF-7 (cancer du sein - type 2) » pour les cellules saines et affectées. [14,15]

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

Tableau III.8 : Certains types de cancer et leur RI [14,15].

La figure III.26 montre la transmission du biocapteur optimisé qui est calculée par FDTD 2D. Les courbes sont obtenues pour des indices de réfraction des trous n=1.36, 1.39, 1.395et1.401 correspondant à différents types de cellules cancéreuses (normal cell, jurkat, PC12, MCF-7).

Elles illustrent la manière dont le pic résonant se déplace vers les hautes longueurs d'onde lorsque l'indice de réfraction augmente.

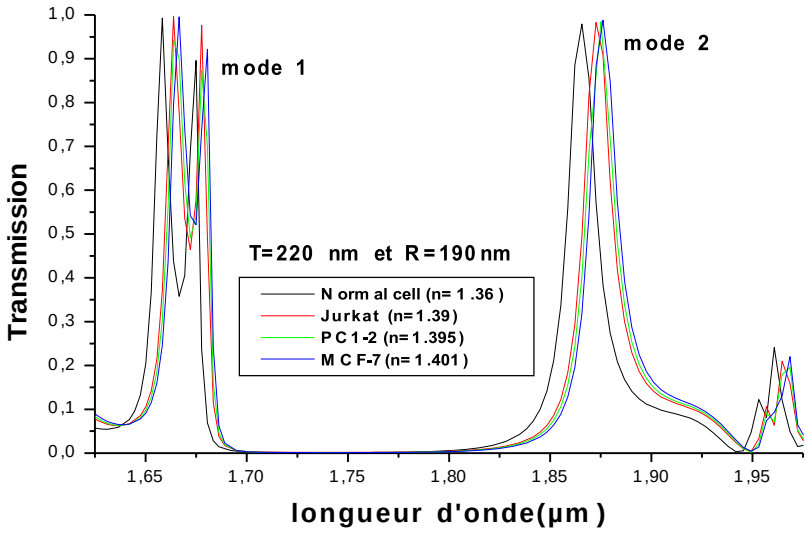


Figure III.26 : Transmission de la structure optimisée du biocapteur pour quatre solutions infiltrées dans les trous de CP.

Pour le types Jurkat, le pic résonant dans le mode 1 se déplace avec 9.24 nm pour $\Delta n=0,03$ donc la sensibilité du capteur peut atteindre S_{mode1}= 308 nm / RIU. Dans le mode 2 le déplacement est 16.5 nm pour $\Delta n=0.03$ alors la sensibilité du capteur S_{mode2} = 550 nm / RIU et la transmission dépasse les 95% dans les deux modes.

A partir de la figure III.26, et si l'on suppose que la relation entre le décalage de résonance et l'indice de réfraction est approximativement linéaire.

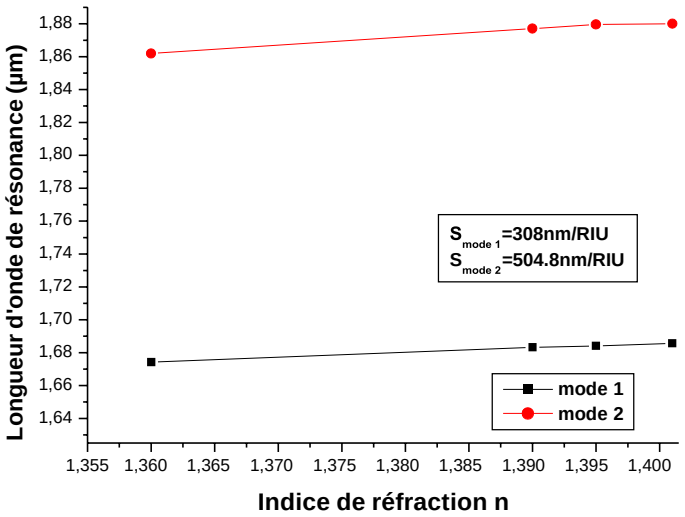


Figure III.27 : Longueur d'onde de résonance en fonction de l'indice de réfraction pour la structure optimisée du biocapteur.

Les résultats de sensibilités du biocapteur optimisé pour différents type de cellule cancer sont présentés dans le tableau III.9.

Nom de cellule	Indice de réfraction	Sensibilité (nm/RIU) Mode 1	Sensibilité (nm/RIU) Mode2
Normal cell	1.36	/	/
Jurkat	1.39	308	550
PC12	1.395	313	562
MCF-7	1.401	311	559

Tableau III.9 : Sensibilité du biocapteur optimisé pour différents type de cellule cancer.

III.7. Comparaison du biocapteur RI proposé avec différents designs à bases CPs :

Références	Sensibilité (nm/RIU)	**l'année**
[8]	530	2017
[17]	510	2021
[18]	429	2022
Dans ce travail	571	2023

Tableau III.10 : comparaison du biocapteur proposé avec déférentes designs à base des CP.

III.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, au début nous avons choisi la structure générale de notre biocapteur avec un réseau de trous d'air hexagonal percés dans une membrane de silicium, d'abord nous avons proposé 3 structures à base d'indice de réfraction (RI) pour la réalisation d'un biocapteur et on choisit la meilleur structure qui offre la meilleur sensibilité possible à partir des simulations PWE et FDTD. Après on a modifié et bien sélectionné les paramètres de capsules (rayon et épaisseur) pour améliorer la sensibilité, nous avons obtenu de très satisfaisants résultats de sensibilité qui est de 343 nm/RIU en mode 1, et 571 nm/RIU en mode 2.

Enfin, nous avons montré que ce dispositif peut être destiné à la détection de cellules de cancer dans une solution aqueuse avec une sensibilité très prometteuse (S_{mode1} = 311 nm/RIU et S_{mode2} = 557 nm/RIU)

Références bibliographiques du chapitre III :

[1] C. T. Chan, Q. L. Yu et K. M. Ho, Order N spectral method for electromagnetic waves, Physical Review B 51, p. 16635 (1995).

[2] Faida Bougriou, « Etude théorique des matériaux a bandes interdites photoniques bidimensionnels : applications dans le domaine du guidage optique et la détection», Thèse de doctorat, Université Constantine 1, 16 Décembre 2013.

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

[4]M.Grillet, « cristaux photoniques et intégration photonique », Thèse de doctorat de l'université de Lyon, 2003.

[5]O. Bouleghlimat, « Etude des cristaux photoniques anisotropes pour l'application dans l'optique intégrée », Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016.

[6]J. P. Berenger, « Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves », J. Comput. Phys, vol. 127, pp. 363-379, 1996.

[7] M. Moukhtari, « Contribution à L'étude et La Conception Des Cavités à Cristaux Magneto Photoniques », Thèse de doctorat en Electronique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2018.

[8] HARHOUZ Ahlam «Contribution à l'étude et la conception des capteurs à base decristaux photoniques» Thèse de doctorat ;Université Mohamed Boudiaf - M'sila ;2017.

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

[10] R. Coccioli, M. Boroditsky, K.W. KIM, Y. Rahmat-Samii, E. Yablonovitch, "Smallest possible electromagnetic mode volume in a dielectric cavity" IEE Proceedings optoelectronics, vol. 145, n° 6, 1998.

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

[12] R.L. Smith, S.D. Collins, « Porous silicon formation mechanisms », J. Appl. Phys. Vol 71, N° 8, pp 1-22, 1992.

[13] H. Rigneault, « la nanophotonique » GET et Lavoisier, Paris, 2005.

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

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

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

[17] Elkous Ayoub Bailiche Zohier, Etude et conception d‟un biocapteur à base de cristaux photoniques, UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA, 2021.

[18] BENYAHIA Khaoula CHAHBOUB Aissa «Conception d'un biocapteur de la concentration en glucose à base des cristaux photoniques» UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA, 2021.

Conclusion général

Conclusion général :

Les études menées depuis une dizaine d'années sur l'utilisation de cristaux photoniques (CPs) pour la réalisation de capteurs à lecture optique, ont montré qu'elles pouvaient offrir de nombreuses avantages et bénéfices dans plusieurs domaines. Le développement de détecteurs et bio-détecteurs optiques a connu un grand progrès. De ce fait, des différentes techniques et configurations sont constamment développées et optimisées afin d'augmenter les performances de détection.

L'objectif de ce travail est l'étude et la conception de capteur à base de cristaux photoniques bidimensionnels (CPs-2D) pour des applications biomédicales ayant une haute sensibilité.

Dans la première partie de mémoire, nous avons discuté des caractéristiques générales des cristaux photoniques, y compris leurs définitions, les différents types, les principes de fonctionnement et leurs applications.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté une description générale des capteurs tels que leur rôle et leur caractéristiques, après nous avons fait une étude sur les capteurs optiques Puis on s'est focalisés sur l'étude des capteurs d'indice de réfraction (RI) à base de CPhs.

La troisième partie c'est la présentation des résultats de notre travail.
Premièrement nous avons présenté les méthodes des calculs (la méthode FDTD et la méthode des ondes planes PWE) ainsi que l'outil de simulation RSoft et ses modules Fullwave et BandSOLVE . Ensuite, nous avons choisi une structure générale des cristaux photoniques bidimensionnels, pour definir ses caractéristiques (période, rayon de trous r,) et définir la plage de longueur d'onde dans laquelle elle doit être exploitée. Ensuite , nous avons créé un défaut linéaire dans le cristal photonique bidimensionnel étudié, permettant ainsi le confinement de la lumière dans une dimension et sa propagation dans l'autre dimension, cequi forme un guide d'onde permettant de traiter toute l'information sous forme lumineuse, Après, Nous avons également proposé une structure de notre biocapteur à base des cristaux photoniques bidimensionnels, qui est basé sur le couplage cavité/guide ou nous avons calculé le spectre de transmission à la sortie du guide pour différents indices avec une sensibilité satisfaisante (132 nm / RIU pour mode1 et 182 nm / RIU pour mode 2).
Pour améliorer la sensibilité de notre capteur biomédical, nous avons proposé une nouvelle conception basée sur le couplage cavité/guide (avec un cercle dans le centre).Cette structure a permis d'augmenter la sensibilité à 201 nm / RIU pour mode1 et 238 nm / RIU pour mode2.

et pour plus d’amélioration nous avons présenté une autre structure qui est basé sur lastructure précédente mais avec un changement de la forme de cercle dans le centre en formede Capsule, ce qui a fait augmenter la sensibilité à 268 nm / RIU pour mode1 et 418 nm / RIUpour model 2 pour obtenir une sensibilité plus meilleur que les précédentes ,on fait des modifications sur les caractéristique de capsule sachant que le rayon (R) et l’épaisseur (T), sont responsable de l'optimisation de la sensibilité vers 343 nm / RIU pour mode1 et 571 nm
/ RIU pour mode2.

Enfin, nous avons terminé notre travail par la présentation d’un exemple pratique bien utilisé et très utile dans le domaine biomédical représenté par le biocapteur de cancer. Nous avons obtenu des résultats très satisfaisants (Smode1 =311 nm / RIU et Smode2= 557 nm / RIU).