REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

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

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : **E**lectronique

Spécialité : **E**lectronique des **s**ystèmes **e**mbarquée

Conception d'un biocapteur de la concentration en glucose à base des cristaux photoniques

Présentés par :

BENYAHIA Khaoula

CHAHBOUB Aissa

Proposés et Dirigés par :

Dr. BENSALAH Hocine

Promotion 2022

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord le bon dieu pour m'avoir donné le courage et la force de mener à bien ce travail

Je remercie particulièrement mon promoteur monsieur **BENSALAH Hocine** son patience, son confiance, ses Remarques, ses conseils, son disponibilité et son bienveillance. qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Je voudrais également remercier monsieur le chef de département pour la gérance exemplaire du département d'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 mon cher père, ses encouragements et son soutien matériel et moral tout au long de ma scolarité.

A ma chère mère qui a beaucoup sacrifiée pour me voire réussir.

A mon frère Abdelaziz pour son encouragement qui ma aidé à surmonter toutes les difficultés, et sa femme Kahina.

A mes chers frères Hamza, Abdelkader et Houssem.

A mes grand-mères Meriem et Khadoudja et mon grand-père Mohamed.

A toute la famille BENYAHIA et LAIDANI et toutes mes amies ; Amel, Rachida, Nada et Ahlem.

Khaoula

Dédicace :

Je dédie ce travail à ceux qui me sont chère

A mes chers parents, pour leur sacrifices, leur amour, leur tendresse.

A ma chère femme et mes chers enfants Achraf, Rahma, Anass, Houssem.

A mes chers frères et sœurs a tous mes amis, mes proches et mes collègues.

Liste des acronymes et abréviations

CPhs : Cristaux photoniques.

BIP : Bande Interdite Photonique.

TE : Transverse Electrique, polarisation TE.

TM : Transverse Magnétique, polarisation TM.

λ : Longueur d'onde.

λ0 : Longueur d'onde de résonance.

a: Période du cristal photonique.

r : Rayon des motifs du cristal photonique.

n : Indice de réfraction.

ε : Permittivité diélectrique.

Δ : Le contraste d'indice.

E : Champ électrique.

H : Champ magnétique.

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

PICs : Photonic Integrated Circuits, circuits photoniques intégrés.

FDTD : Méhode 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.

ΓK : La direction du réseau réciproque correspond à la direction des premiers voisins du réseau réel. ΓM : La direction correspond à la direction des seconds voisins.

RIU : unité de l'indice de réfraction

SOMMAIRE

Remerciements .....

Dédicace……..……..

Liste des acronymes et abréviations…….…….....

Sommaire ……..….....

Liste des figures ....…… ……..…..……..……

Liste des tableaux …….……...…….....

Introduction générale…..……..……..1

Chapitre I : généralités les cristaux photoniques

I.1.Introduction 4

I.2. Définition d'un cristal photonique 5

I.3. Type des cristaux photoniques : 5

I.3.1. Cristaux photoniques unidimensionnels (CP_S1D.) ……..... 5

I.3.2. cristaux photoniques bidimensionnels CP_S2D. 5

I.3.3. Structures périodiques tridimensionnelles 3D..... 6

I.4. Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels..... 7

a. Le réseau carré .....…7

b. Le réseau triangulaire .....……..……8

c. Le réseau hexagonal …..... 8

I.5.Principales Caractéristique des cristaux photoniques ….....9

I.5.1. Le contraste d'indice .....….9

I.5.2. La période 9

I.5.3. Le facteur de remplissage f ….....10

I.6. La bande interdite photonique …..... 10

I.7. Les types des défauts en CP_S…..... 11

I.7.1. Les défauts ponctuels .....…12

I.7.2.Les défauts linéaire 13

I.8. Les applications des cristaux photoniques .....……14

I.8.1. Cavités 14

I.8.1.1.Cavités hexagonale ..... ……..….15

I.8.1.2.Cavités Carré 15

I.8.1.3.Cavités Triangulaire… .....……..……16

I.8.2. Guides d'onde à cristaux photoniques 16

I.8.3.Capteurs à cristaux photoniques ….....…….17

I.8.4. Les multiplexeurs/démultiplexeurs 18

I.9.Technologies et matériaux.....19

I.9.1.Les semi-conducteurs……..……..……..…...19

I.10. conclusion 19

Chapitre III : Généralités sur les captures

II.1.Introduction.....21

II.2.Géneralité sur les capture 21

II.2.1.Définition 21

II-2-2- Chaîne de mesure 22

II.2.3.Type de grandeur physique 23

II-2-4 - Grandeurs d'influence 23

II-2-5- Rôle du capteur 24

II-2 -6- Eléments constitutifs d'un capteur 24

II-3- Classification des capteurs 24

II.3.1. Capture passif 25

II.3.2. Capteur actif 26

II.4.Caractéristique d'une capture 26

II.4.1.La sensibilité 26

II.4.2.Etallonage 27

II-4. 3. Domaine de linéarité 27

II-4-4-Précision 27

II-4-5 -Temps de réponse ou rapidité 27

II-4-6-Sélectivité 28

II-4-7-Fidélité 28

II-5 Différents types de capteurs 28

II-5-1- Capteurs physiques 28

II-5-2- Biocapteurs 29

II-5-3- Les capteurs chimiques 29

II-5-4-Capteur de glucose 30

II.6.Capteurs optiques label-free pour application de détection biochimique..... 30

II.6.1 Principe..... 31

II.6.2. Utilisation des cristaux photoniques (CP) pour la détection 32

II.6.3 État de l'art des capteurs à cristaux photoniques 33

II-7- Conclusion 34

Chapitre III : Outils de simulations, résultat et interprétation

III.1.Introduction 36

III.2. Techniques de modélisation 36

III.2.1.La méthode des ondes planes (PWE) 36

III.2.2. La méthode FDTD (Finite Différence Time Domain) 37

III.2.3.Méthode des réseaux de diffraction 37

III.3. Présentation de l'interface graphique du logiciel Rsoft.....37

III.3.1.Le simulateur « BandSOLVE » 38

III.3.2.Le simulateur «FullWAVE» 38

III.3.3.Fenêtre de programme de CAD 38

III.3.4.Générer la structure de réseau.....39

III.4.Présentation de la structure de base 40

III.4.1 .Paramètres de la structure étudiée 40

III.4.2.Choix de la polarisation 41

III.5. Guide d'onde sans cavité.....42

III.5. Guide d'onde avec cavité.....44

III.6.1 Description de la première structure étudiée (Biocapteur (1)) 44

III.6.2. Etude de la transmission et de la sensibilité 44

III.7 Guide d'onde avec couplage cavité en configuration anneau 46

III.7.1 Description de la deuxième structure étudiée (Biocapteur (2)) 46

III.7.2. Etude de la transmission et de la sensibilité 47

III.7.3. Influence d'un rayon intérieur de l'anneau (r_{in}) sur la sensibilité du biocapteur 48

III.8. Exemple d'application : biocapteur de glucose 50

III.9. Conclusion 51

Conclusion général 54

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photonique

Figure I. 1 : structure périodique unidimensionnelle ……..……....5

Figure I. 2 : Structure à deux dimensions 2D connectée…….……...…….6

Figure I. 3 : Structure à deux dimensions 2D déconnectée……...……6

Figure I. 4 : La première structure BIP 3D: la Yablonovite [5] ……...……7

Figure I.5 : Exemple des structures artificielles 3D: structure cubique(1), tas des bois(2), Structure spirale (3), diamant (4) [6] ……..…….……7

Figure I. 6 : Le réseau carré……..……..……..……..…8

Figure I.7 : (a) réseau direct, (b) réseau réciproque, (c) première zone de Brillouin et la zone de Brillouin irréductible [7] ……...……...……..… 8

Figure I. 8 (Structure hexagonale 2 : (a) Nitrure de Bore, (b) graphite)……..…...…….9

Figure I. 9 (Période d'un cristal photonique unidimensionnel)……..…..……...……..10

Figure I. 10: Exemple d'un diagramme de bandes interdites BIP) d'une structure 2D …….....11

Figure I. 11 Les deux types de polarisation TM et TE…….……...……11

Figure I. 12: Exemple de défaut lacunaire (a); défauts de substitutions (b)et c)….. ……...……12

Figure I.13 : Résonance à 35.5 GHz de la cavité engendrée par la suppression d'une tige pour le réseau carre diélectrique de tiges d'alumine, période a = 3mm, d =1.5mm (onde polarisée TM). L'énergie est concentrée sur les quatre première tiges voisines des défauts …….……12

Figure I. 14: (Spectre de transmission d'un CP 2D avec un motif manquant)……...…..……13

Figure I.15 : Exemple de guide W1 à cristal photonique triangulaire de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant ……...…..…….……13

Figure I.16 : Quelques exemples de dispositifs à base de cristaux photoniques bidimensionnels : (a) coupleur directionnel, (b) biocapteur, (c) diviseur de puissance, (d) filtre, (e) démultiplexeur et (f) double virage ……...…….……14

Figure I. 17: Les différents types de cavités…….…….…….……15

Figure I.18 : Exemple de cavité carré dans un cristal photonique carré avec un paramètre de maille 600 nm ……...…….……..15

Figure I. 19: cavité triangulaire sur membrane suspendue……..……...……16

Figure I.20 : Guide d'onde de la structure GaAs dans l'air à motif carré montrant la distribution

du champs Ey autour du défauts en polarisation (a) rectiligne (b) courbures à 90° simulée par logiciel

Rsoft ……...…….…….……..16

Figure I.20 : (a) Guide réfractif : modèles de rayons en zig-zag avec réflexions totales et ondes évanescentes. (b) guidage par bande interdite photonique …….17

Figure I.22 : Schéma du capture d'ADN à base de PhC caractérisé par des guides d'ondes monomode d'entrée et de sortie de 500 nm de largeur ……18

Figure I.23 : Schéma de principe d'un dispositif de multiplexage insertion ou extraction d'une certaine longueur d'onde ….18

Chapitre II :

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

Figure II.2: constitution d'une chaîne de mesure classique……22

Figure II.3 : Eléments constitutifs d'un capteur….24

Figure II-4 : Courbe d'étalonnage d'un capteur.....27

Figure II.5 En haut : Détection homogène du changement d'indice de réfraction - En bas.....32

Figure II.6 Principe de la mesure de transduction optique d'un résonateur à cristaux photoniques.....33

Chapitre III : Outils de simulations, résultat et interprétation

Figure III. 1 Interface graphique du logiciel Rsoft.....39

Figure III.2 : (a) Arrangements de disposition de la rangée XZ. (b) Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD ……..……..……..39

Figure III.3 : Structure du cristal photonique formé par un réseau Hexagonal 17x17 …….....….40

Figure III.4 : Distribution de l'indice de réfraction d'un cristal photonique Hexagonal 40

Figure III.5 : Carte des bandes interdites pour les deux polarisations dans le cas d'un cristal photonique de trous d'air dans une matrice de constante diélectrique $\varepsilon = 11.7$ d'un réseau…….

hexagonal …….…….41

Figure III.6 : (a) Diagramme de dispersion du $CP-2D$ dans la membrane Si (un reseau hexagonal de trous d'air, $a = 0.475$, $r = 0.185$,$f = 39\%$ calculé par la PWE) (b) La présentation du spectre de transmission calculé par la $FDTD-2D$ ……..…..42

Figure III. 7 : Structure 2D avec un défaut de ligne guide d'onde…….……..…..…..43

Figure III.8 : (a) Spectre de transmission guide droit référence W1 en mode TM. (b) Distribution spatiale du champ à la suite d'une simulation de type FDTD et une excitation de type CW du guide droit référence W1, pour une polarisation TM à $\lambda = 1.55\mu m$ ……...…....…….43

Figure III. 9 : Structure d'un couplage cavité/guide 1ere structure.....44

Figure III.10 : (a) spectre de transmission de la structure couplage $\frac{\text{cavité}}{\text{guide}}$ pour $n = 1$. (b) la distribution de champ magnétique dans la cavité dans le plan $x - z$

à résonnance $= 1.543\mu m$ …….....……..45

Figure III.11 : Le spectre de transmission de la structure pour différents indices de réfraction n à $R = 185nm$ et $a = 475nm$ ……..……45

Figure III.12 : la longueur d'onde de résonance en fonction de l'indice réfraction n du matériau à détecter ……..……..……47

Figure III. 13 .structure d'un couplage cavité en configuration anneaux/guide (guide (2eme structure)……..…...47

Figure III .14 : (a) Spectre de transmission de la structure (3) couplage cavité/guide pour n=1. (b) La distribution du champ magnétique dans la cavité dans le plan x-z à λrésonnance=1.5523µm 50

Figure III.15 :(a) Le spectre de transmission de la structure pour différents indices de réfraction n à R=185nm, a= 475 nm et rin =85nm. (b) la longueur d'onde de résonance en fonction de l'indice de réfraction n du matériau à détecter 49

Figure III.16. Les spectres de transmission de l'indice de réfraction 1 en fonction de rin.(b) Les longueurs d'onde de résonance en fonction de rin 49

Figure III.17 Spectres de transmission correspondant à la variation de la longueur d'onde de résonance en fonction des différents cas de concentrations en glucose. (b) Les longueurs d'onde de résonance du biocapteur en fonction de la concentration de glucose….....51

LISTE DES TABLEAUS :

Tableau II.1: Capteurs actifs : principes physiques de base……..25

Tableau II.2: Type de matériau utilisé et caractéristique électrique des capteurs passifs…….....…26

Chapitre III : Outils de simulations, résultat et interprétation

Table III.IV.6. Comparaison du biocapteur RI proposé avec différents designs à bases CPs….……51

Introduction générale

Introduction général :

La cristophotonie a vu le jour pour la première fois en 1987. Quatre ans plus tard ; le premier cristal photonique a été réalisé(en 1991).

Les structures à cristaux photoniques (PhCs) sont formées par l'empilement de matériaux dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans une, deux ou trois dimensions. Cette périodicité du milieu induit sur la lumière qui se propage dans ce cristal ; un effet analogue à celui du potentiel périodique sur les électrons dans un cristal. De même qu'il existe pour les électrons des bandes d'énergie permises et des bandes interdites ; il existe des bandes photoniques d'états permises et des bandes photoniques interdites. Une bande photonique correspond à un mode qui se propage dans le cristal photonique et une bande interdite photonique (BIP) correspond à un intervalle d'énergie où la propagation de la lumière est interdite dans certaines directions de ce cristal.

Les cristaux photoniques (PhCs) forment un bon support physique pour le contrôle de la propagation de la lumière à des dimensions de l'ordre des grandeurs de longueurs d'ondes se propageant dans ce cristal, et c'est d'ailleurs cette propriété qui les rend un bon support pour de nombreuses applications. L'adaptation des cristaux photoniques à l'optoélectronique permet d'envisager de nouvelles perspectives telles que : la réalisation des composants pour l'optique intégrée de dimensions réduites, et l'intégration de plusieurs fonctions sur un même substrat.

Les applications potentielles des BIP (bandes interdites photoniques) 2D sont différentes et multiples. Entre autre, on trouve la réalisation des cavités résonantes de taille très réduite, des guides d'ondes, des virages, des filtres sélectifs, des multiplexeurs - démultiplexeurs et des fibres optiques. Ces matériaux ont donné à jour de nouveaux composants optoélectroniques plus performants et plus compacts que les composants classiques connus actuellement.

Les cristaux photoniques dans leur état intrinsèque sont peu utiles mais leur vrai intérêt est du à la réalisation de cavités par l'inclusion de défauts structurels dans ces cristaux. Les cavités (les défauts) ne sont apparues qu'en

1998 et les excellentes propriétés de réflexion de lumières dans ce cristal environnant, permettent d'avoir des facteurs de qualités élevés pour les modes résonnants créés par ces défauts dans sa BIP. Ce sont ces modes résonants qui représentent le point de départ de l'utilisation des PhCs dans les domaines de la détection, de la mesure et de la capture des grandeurs physiques connues. En effet, actuellement les capteurs les plus performants qu'on trouve sur le marché, quel que soit le genre ; utilisent au moins une cavité résonante implantée dans une structure à cristaux photoniques.

La mesure exacte du glucose (quelques soit son ordre de grandeur) dépend principalement de la sensibilité du capteur. Cette propriété (la sensibilité) est très importante et constitue, de nos jours ; un domaine de recherche le plus compétitif. Des publications différentes ont été menées dans ce domaine, ayant toutes comme but d'améliorer l'ordre de grandeur et par conséquent la limite de détection des capteurs de glucose à base de cristaux photonique, ce qui est le thème discuté dans notre travail.

Dans ce travail nous avons fait le design et la simulation d'un capteur de glucose à haute sensibilité, destiné à la mesure du glucose de l'ordre de g /L (gramme par litre). La structure que nous avons utilisée représente un design amélioré de la structure proposée. Ceci sera détaillé en 3 chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les cristaux photoniques, ainsi que les définitions de base relatives à ces structures. Dans ce contexte nous avons montré leurs caractéristiques très importantes et leurs capacité à fournir une bande interdite photonique (BIP) qui représente le support essentiel pour la réalisation de différents types de capteurs utilisant ce type de structure.

Dans le deuxième chapitre, nous avons discuté en détail la notion des captures, Dans ce contexte, nous avons cité les caractéristiques générales communes aux différents types de capteurs, leurs structures et leurs principes de fonctionnement. Puis nous avons abordé précisément les capteurs de glucose et en particulier ceux à base de cristaux photoniques.

Le troisième chapitre est préconisé pour les outils de modélisation des

cristaux photoniques. Au début, nous parlerons des principales techniques utilisées (la FDTD et la PWE). Par la suite, nous décrirons les logiciels de simulation utilisés pour effectuer ce travail. Après nous ferons une étude et une conception des capteurs à indice de réfraction (RI) à base de cristaux photoniques. Nous commencerons par les structures sans défaut à structure hexagonale. Les réponses spectrales en transmission ainsi que la répartition du champ seront présentées et discutées. Nous étendrons cette étude à la conception des guides d'ondes mono rangée W1. Nous passerons après à la présentation d'un capteur RI à CP-2D basé sur le couplage guide-cavité, Nous essayerons d'améliorer la sensibilité de notre structure proposée. Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I : Généralité sur les cristaux photoniques

I.1. Introduction :

Jour après jour la technologie se développe dans plusieurs domaines surtout celui de l'informatique électronique et optique et ça nous a offert des systèmes photoniques ; on parle des cristaux photoniques qui sont des structures électroniques périodiques.

La notion de "cristaux photoniques" a été proposée pour la première fois en 1987[1,2] grâce aux travaux d'E. Yablonovitch et S. John afin d'inhiber l'émission spontanée de la lumière. Le premier cristal photonique a été réalisé en 1991[3]. Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans une, deux ou trois dimensions. 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.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les bases générales nécessaires pour la connaissance des cristaux photoniques, en mentionnant également leurs différents types, leurs caractéristiques ainsi que les applications dans les différents domaines.

I.2-Définition d'un cristal photonique :

Les cristaux photoniques sont des matériaux de nanostructures diélectrique et des structures artificielles dont l'indice de réfraction se change périodiquement dans l'espace ; permettant ainsi de contrôler la propagation de la lumière.

Les cristaux photoniques appelés aussi ***matériaux à bande interdite photonique***, sont très utilisés dans le domaine optique non linéaire.

I.3-Les types des cristaux photoniques :

Les matériaux à bande interdite photonique sont des matériaux diélectriques périodiques ; cette périodicité peut exister selon certaine direction dans l'espace (une, deux, trois) ; il existe néanmoins trois principales catégories unidimensionnelles, qui dépend de trois directions :

I.3.1. Cristaux photoniques unidimensionnels (CP_S1D) :

Les matériaux à bande interdite photonique a une dimension (CP_S1D) sont les formes les plus simples, ils sont composés d'une succession de couche d'indice de réfraction différent, autrement dit : « empiles »; de manière périodique ayant des constants diélectrique différents $\varepsilon_1\varepsilon_2$.



Figure I.1 : Structure périodique unidimensionnelle

I.3.2 cristaux photoniques bidimensionnels CP_S2D :

Un cristal photonique bidimensionnel est une structure qui présente une modulation périodique de la constante diélectrique suivant deux directions de l'espace, et homogène dans la troisième. Il existe deux types de structures périodiques bidimensionnelles :

- **La structure dite « connectée** » (figure I.2) : cette structure est constitué des trous dans l'air d'une matrice formée de matériaux isolants .les motifs élémentaires sont d'indice n2 supérieur à l'indice n1 de la matrice diélectrique.

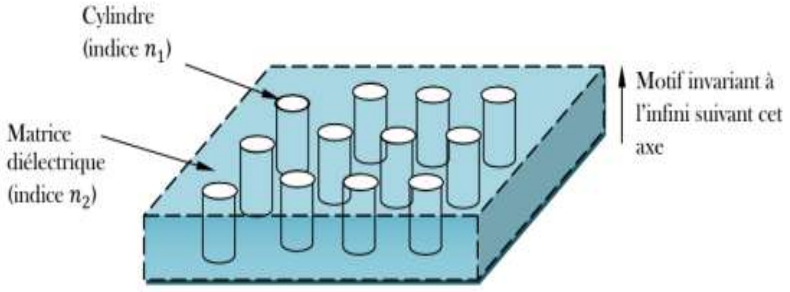


Figure I.2 : Structure à deux dimensions 2D connectée.

➢ **Les structures dite« déconnectée** » : elle se compose d'une tige diélectrique ou métallique alignée périodiquement dans l'air. Les motifs élémentaires sont d'indice n2 inferieur à l'indice n1» de l'espace inter motifs.

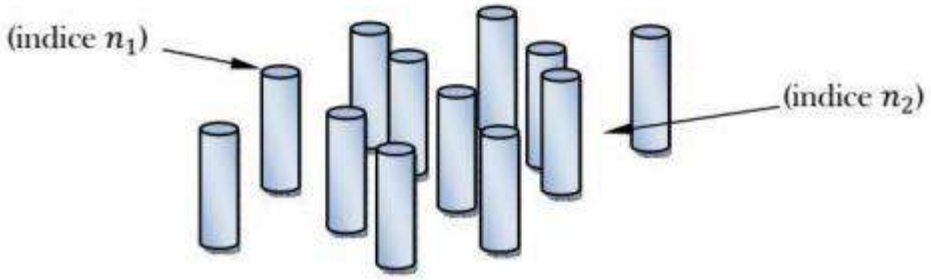


Figure I.3 : Structure à deux dimensions 2D déconnectée.

I.3.3. Structures périodiques tridimensionnelles 3D :

Ce sont des structures bidimensionnelles périodiques suivant les trois directions de l'espace. Le premier cristal photonique tridimensionnel a été fabriqué par S. Y. Lin et al. Il était formé de sphères de silicium arrangés selon une structure diamant. En 1993, E. Yablonovitch fabriquait un cristal photonique 3D en perçant chaque trou dans un bloc de plexiglas selon trois angles azimutaux séparés de 120° (figure I.12) [9]. Ce cristal photonique s'appelle d'après son inventeur "la Yablonovite", avec ce cristal photonique, le concept de la bande interdite photonique a été démontré expérimentalement pour la première fois. Après, De nombreuses méthodes de fabrication des cristaux photoniques tridimensionnels ont été proposées (figure I.4) [4].

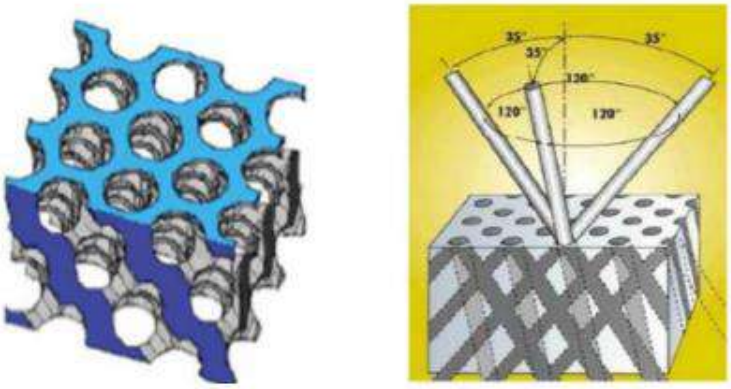


Figure I.4 : La première structure BIP 3D Yablonovite [5].

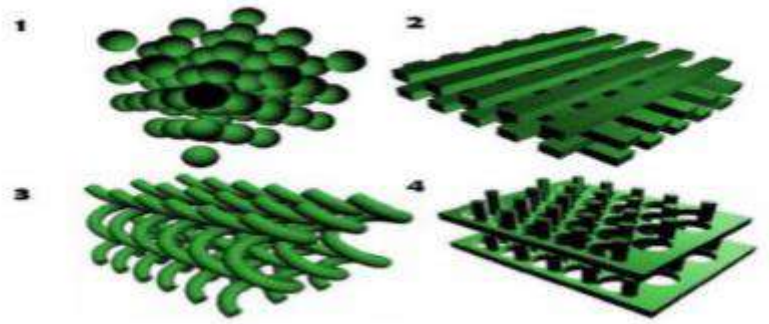


Figure I.5 : Exemple des structure artificielles 3D : Structure cubique (1), tas de bois(2), structure spirale(3), diamant(4) [6]

I.4.Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels :

Les cristaux photoniques ou bien les miroirs de barrage ne contrôlent pas les radiations lumineuses que dans une certaine ouverture angulaire autour de la normale. Pour contrôler l'angle d'incidence avec la propagation des ondes électromagnétiques on utilise des matériaux BIP bidimensionnels. Ils sont structurés suivant les réseaux semblables aux réseaux cristallins. On distingue trois familles de cristaux bidimensionnels selon la forme de réseaux.

- **Réseau carré :**

La maille primitive est un carré de côté « a »il a été montré que ce type des réseaux est très sensible à l'angle d'indice des ondes électromagnétiques, ainsi il est difficile d'obtenir une bande interdite totale, c'est-à-dire une bande interdite qui empêche la propagation quelle que soit la polarisation.

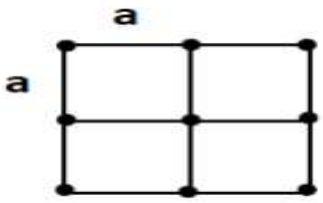


Figure I.6 : Le réseau carré.

- **Le Réseau triangulaire :**

C'est un réseau en forme de triangles symétriques équilatérales distanciés de **« a »** ; les réseaux triangulaires sont moins sensibles à l'angle d'incidence que les réseaux carrés; tandis que c'est difficile d'obtenir une bande interdite totale.

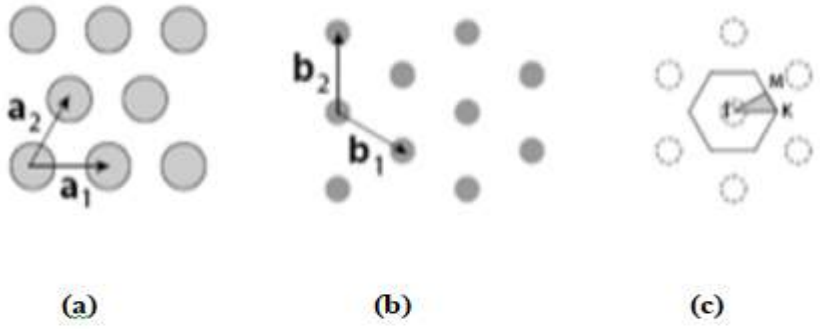


Figure I.7 : (a) réseau direct, (b) réseau réciproque, (c) première zone de Brillouin et la zone de Brillouin irréductible [7]

- **Le réseau hexagonal :**

Dans un réseau hexagonal si tous les nœuds sont identiques et espacés de **« a »** on appelle cette structure « graphite » parce qu' 'elle est similaire à la structure Cristalline du graphite figure **(a)**. Mais, si un nœud diffère de son suivant par sa nature ou sa dimension, on obtient ainsi la structure Cristalline de nature nitrure de Bore. Figure**(b)**.

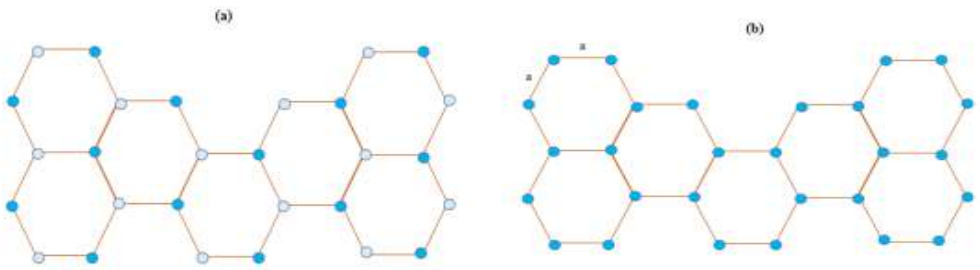


Figure I.8 : Structure hexagonal 2 : (a)Nitrure de Bore, (b) graphite.

I.5.Principales 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.

I.5.1. Le contraste d'indice:

Le contraste d'indiceΔ_n, est la différence entre les indices de réfraction des deux matériaux utilisés dans la conception du cristal à savoir $n1$ et $n2$

$\Delta_n = n1 - n2$, Tandis que :

$n1$: L'indice de réfraction du matériau de haut indice.

$n2$: L'indice de réfraction du matériau de faible indice.

I.5.2. La période:

Dans un cristal photonique bidimensionnel, La période (a) est donnée par : $a = a1 + a2$, avec $a1$ est l'épaisseur de la couche de permittivité $\varepsilon 1$ et $a2$ est l'épaisseur de la couche de permittivité $\varepsilon 2$, il faut noter que l'indice de réfraction et la permittivité sont reliés par la relation : $n = \sqrt{\varepsilon}$ ..... (I.1)

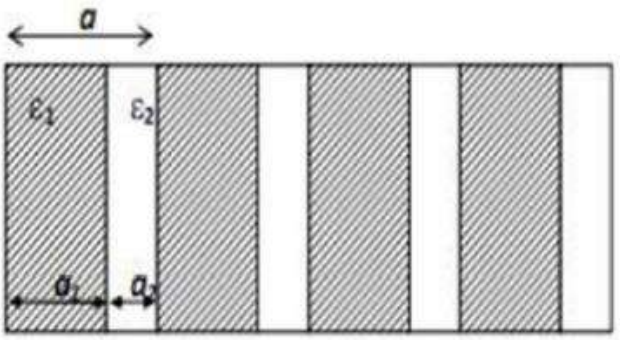


Figure I.9 : Période d'un cristal photonique unidimensionnel.

I.5.3. Le facteur de remplissage f :

Pour un cristal photonique bidimensionnel planaire composé de trous d'air percés dans une matrice diélectrique, le facteur de remplissage en air f désigne le rapport entre l'aire du motif et l'aire de la cellule élémentaire du réseau considéré [8].

$$F = \frac{\text{A motif}}{\text{A cellule élémentaire}} \quad \text{(I.2)}$$

Le facteur de remplissage dans l'air est donné par la relation $f = \frac{ar^2}{a^2}$ si c'est pour montrer une particule circulaire de rayon **r** dans un cristal de réseau carré et de période **a**, ou bien le facteur de remplissage dans l'air est donne par l'expression :

$$f = e^x \frac{2\pi r^2}{\sqrt{3}a^2} \quad \text{(I.3)}$$

Particule cellulaire de rayon **r** dans un cristal de réseau triangulaire et de période **a**

I.6.Bande interdite photonique :

Chaque cristal photonique est caractérisé par son diagramme de bande photonique qui est une représentation de la fréquence possible pour l'onde électromagnétique au sein de cristaux photoniques en fonction de son vecteur d'onde (sa direction de propagation au sein du cristal).

La description théorique d'un cristal photonique peut se faire à l'aide d'un diagramme de bandes donnant, pour chaque valeur du vecteur d'onde pris dans la zone de Brillouin du cristal, les fréquences correspondant aux modes électromagnétiques supportées par la structure [9].

La Figure I.10 montre le diagramme de bandes du CP pour une certaine direction de propagation de la lumière. Nous pouvons analyser deux bandes permises (courbe Rougeet Blue).). L'onde électromagnétique pourra se propager dans le CP comme dans un milieu diélectrique homogène, si son énergie est contenue dans ces bandes permises. Ces deux bandes permises sont séparées par une bande interdite (région jaune) où aucune fréquence n'est autorisée.

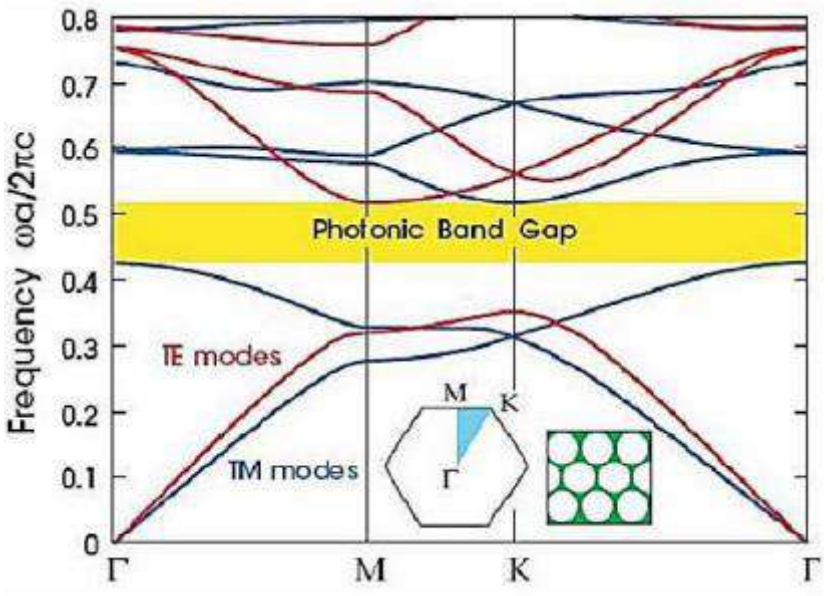


Figure I.10 : Exemple d'un diagramme de bandes interdites (BIP) d'une structure 2D.

il y a deux modes de propagation différente : TE (avec le champ H perpendiculaire à l'axe des tiges) (la figure 11.a) et TM (où E est parallèle à l'axe des tiges)(la figure 11.b)

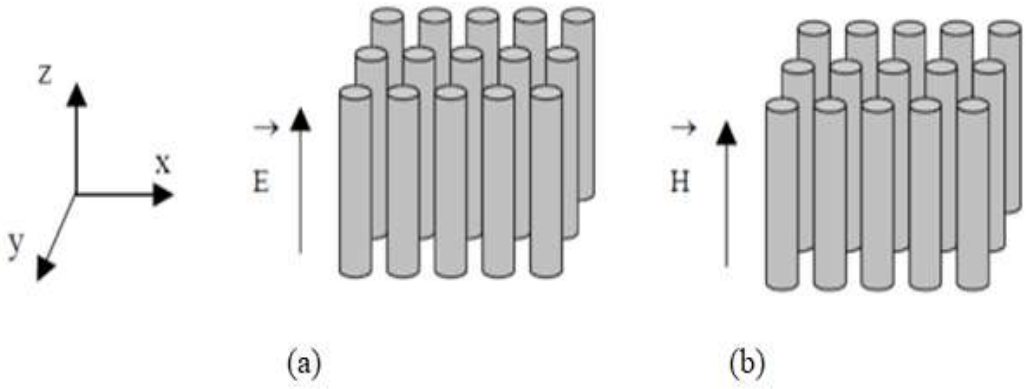


Figure I.11 : Les deux types de polarisation TM et TE.

I.7.Les types des défauts en CP_S :

En introduisant des défauts dans la structure du cristal photonique, on interrompt la périodicité de celle-ci, la bande interdite photonique devient alors incomplète, ce qui permettra à certaines longueurs d'onde de passer à travers.

Le contrôle de ces longueurs d'onde permet de concevoir plusieurs dispositifs photoniques à base de cristaux photoniques tel que les coupleurs, les modulateurs, filtres, capteurs. Il existe principalement deux types de défauts : les défauts ponctuels (cavités) et les défauts linéaires (guide d'ondes)[10]

I.7.1Les Défauts ponctuelle :

Les défauts ponctuels sont obtenus en modifiant les caractéristiques d'une cellule de réseau, ces défauts se comportent comme des micro-résonateurs pour reprendre la terminologie de la physique du cristal, on peut réaliser alors des défauts lacunaires ou de substitution (Figure 12).

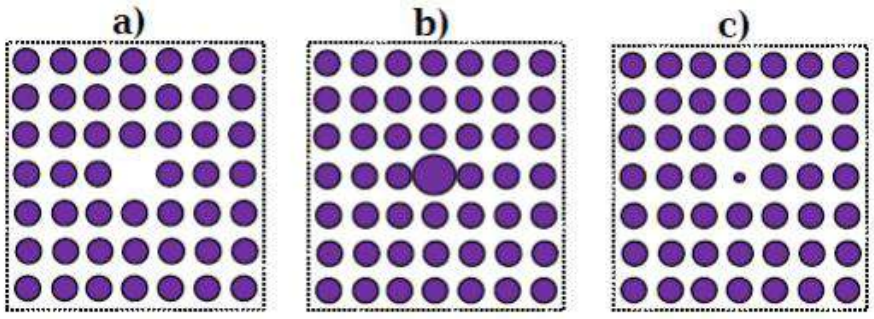


Figure I.12 : Exemple de défaut lacunaire (a), défauts de substitutions (b) et (c).

En ce qui concerne les cristaux photoniques composés de cylindre électrique ; le constant diélectrique d'un cylindre peut être varié. Le cylindre peut être enlevé, ce qui crée une lacune dans le cristal. Cela correspond à une microcavité à l'intérieur du cristal (figure 13 et figure14). 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 [11].

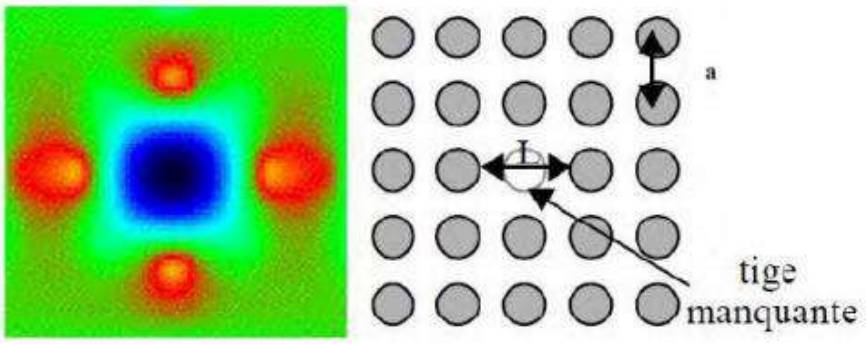


Figure I.13 : Résonance à **35.5 GHz** de la cavité engendrée par la suppression d'une tige pour le réseau carré diélectrique des tiges d'alumine, période **a=3mm**, **d=1.5mm** (onde polarisée TM). L'énergie est concentrée sur les quatre premières tiges voisines des défauts.

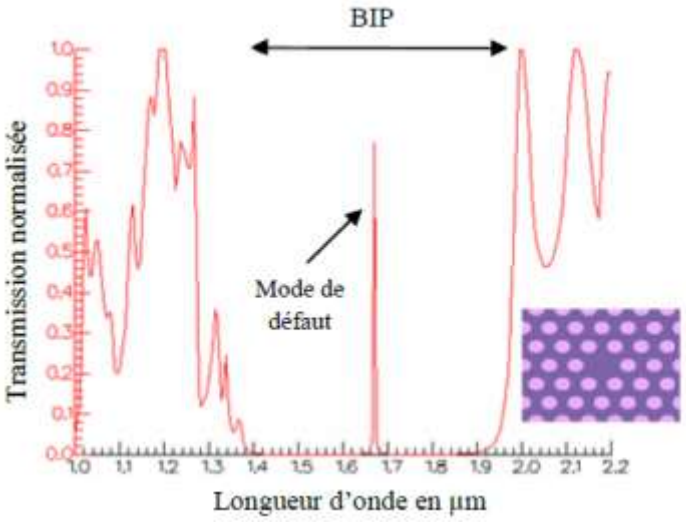


Figure I.14 : Spectre de transmission d'un CP 2D avec un motif manquant.

Le CP est composé d'un réseau triangulaire de trous d'air de rayon R=0.32a gravés dans une matrice diélectrique d'indice de réfraction n=3.42. Le pas du réseau est a= 0.42µm

I.7.2.Les défauts linéaires :

Les défauts linaires sont appelés aussi les défauts étendus, ils permettent de réaliser un guidage diffractif des ondes ; les défauts étendus de la dimension 1, 2,3 ne peuvent évidemment être obtenus que dans les cristaux de dimension au moins équivalent. Parmi ces défauts, il existe les défauts 1D appelé couramment W1étendus,) (figure 15) se sont

certainement ceux qui ont suscité le plus grand nombre d'études parce qu' ils ont vocation à être utilisé comme guides de lumière au sein d'un cristal donné.il y a d'autre défauts 2D (W2) ou 3D (W3) constitués d'une suite de guides W1,mis bout à bout et orientés dans les directions différentes, de façon à véhiculer la lumière sur tous les chemins possibles à l'intérieur du cristal.

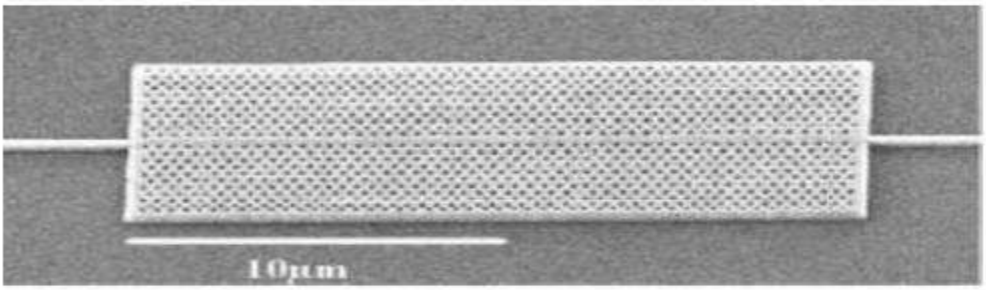


Figure I.15: Exemple de guide **W1** à cristal photonique triangulaire de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant.

I.8.Les Applications des cristaux photoniques :

Les cristaux photonique ont connus des développements dans les différents domaines surtout le domaine optique, informatique, microonde et télécommunication .dans cette partie nous présentons des applications qui ont intérêt dans le domaine optique : se sont les captures qui sont des dispositifs transformant l'état d'une grandeur physique a une grandeur électrique. Durant ces dernières années, l'application des cavités résonantes et des guides d'ondes à CPhs comme briques de base de circuits photoniques intégrés ; a fait l'objet de recherches significatives depuis cette dernière décennie. En se basant sur ces composants, différents dispositifs ont été proposés et démontrés tels que : filtres [12], capteurs et biocapteurs [13], multiplexeurs/démultiplexeurs [14], résonateurs [15] et les antennes [16].

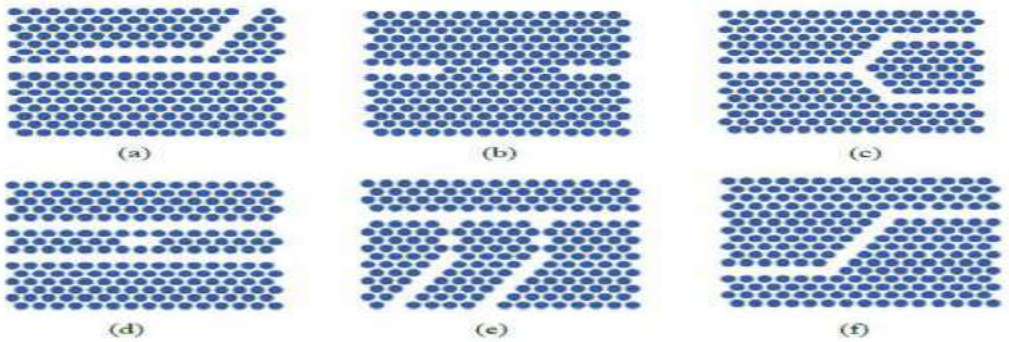


Figure I.16 : Quelques exemples de dispositifs à base de cristaux photoniques bidimensionnels : (a) coupleur directionnel, (b)biocapteur, (c)diviseur de puissance, (d) filtre, (e) démultiplexeur et (f) double virage.

I.8.1Les cavités :

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 rayon de la colonne ou du trou en question pour faire varier continûment la perturbation qu'on introduit. Si on injecte dans ce défaut un mode électromagnétique dont l'énergie est dans la bande interdite du cristal photonique où situé autour, il se retrouve complètement confiné, vu qu'il est entouré d'un matériau réfléchissant à cette longueur d'onde. 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.8.1.1Cavité hexagonale :

Dans un cristal triangulaire, les cavités hexagonales, dont les côtés sont les rangées denses, constituent une série de cavités canoniques. Il est recommandé de les nommer par le nombre de périodes le long de chaque côté. Ainsi, un seul trou manquant correspondra à H_1, sept trous manquants à H_2, etc. [17]. (Figure 17-). Les cavités de type H_n, de forme hexagonale, n' étant le nombre de rangées manquantes par côté de l'hexagone sont les plus étudiées. [18].

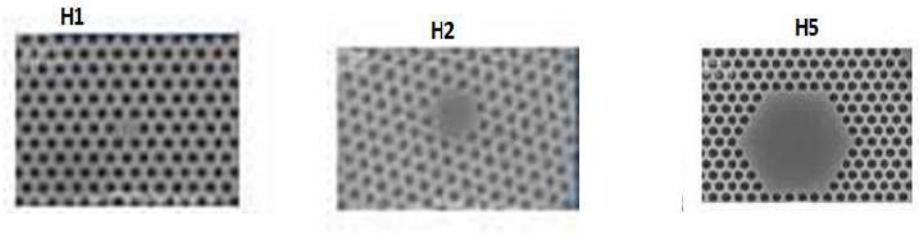


Figure I.17 : Les différents types de cavités.

I.8.1.2Cavité carrée :

Dans un réseau bidimensionnel carré, les cavités sont de type Sn, de forme carrée, n' : étant le nombre de lignes et de rangés manquantes du carré. Par exemple la cavité S1 est constituée en omettant une ligne et une rangée.



Figure I.18 : Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique carré avec un paramètre de maille **600nm**

I.8.1.3. Cavité triangulaire :

La Figure 18 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).

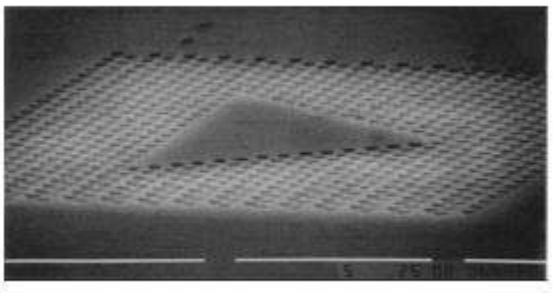


Figure I.19: Cavité triangulaire sur membrane suspendue.

I.8.2Guides d'ondes dans les cristaux photoniques :

En introduisant un défaut linéaire (omission d'une ou de plusieurs rangées de trous) dans un cristal photonique, il est possible de constituer des guides optiques au sein de ce cristal. La lumière va se propager le long de ce guide avec une fréquence appartenant à la bande interdite photonique du cristal (figure 19 a).[19]Des guides d'ondes classiques à base de matériaux diélectriques sont réalisés depuis longtemps. L'onde se propage dans le diélectrique d'indice fort et se réfléchit totalement sur les bords qui sont constitués d'un diélectrique d'indice plus faible. L'intérêt des guides d'ondes BIP par rapport à ceux traditionnels c'est qu'ils présentent de faibles pertes au niveau des courbures (figure 19 b)[20].

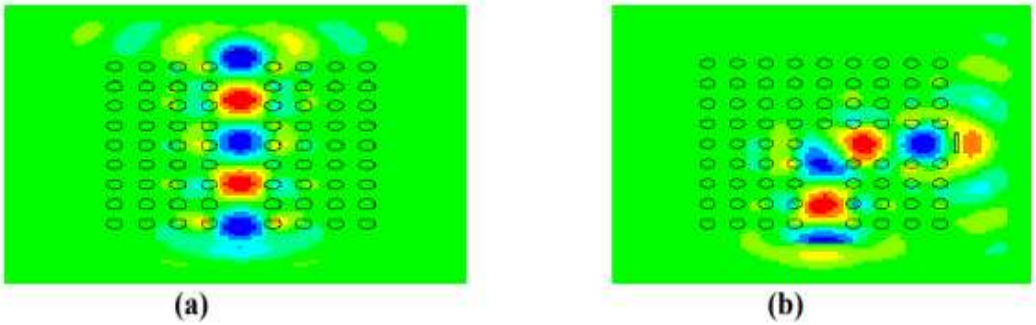


Figure I.20 : guide d'onde de la structure GaAs dans l'air à motif carré montrant la distribution du champ Ey autour de défaut en polarisation (a) Rectiligne (b) Courbure à 90° (simulée par le logiciel Rsoft).

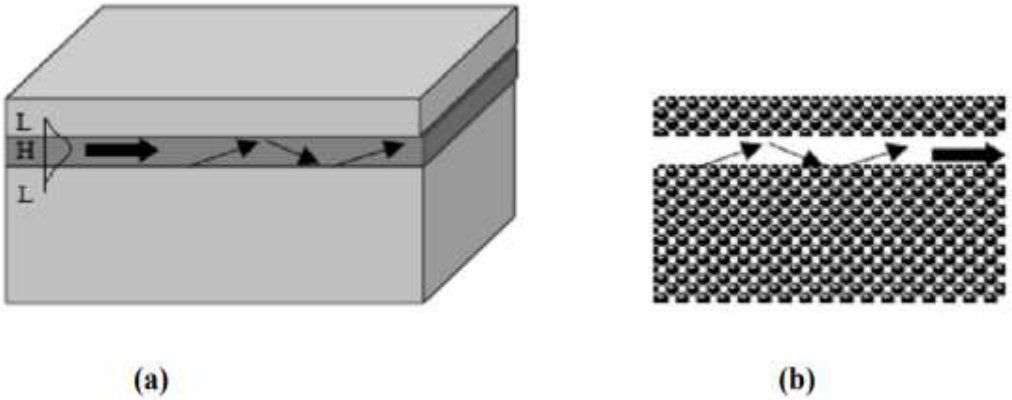


Figure I.21 : (a) Guide réfractif : modèles de rayons en zig-zag avec réflexions totales et ondes évanescentes (b) guidage par bande interdite photonique.

I.8.3.Capteurs à cristaux photoniques :

La contribution des cristaux photoniques a amélioré les capacités de détection précisément d'un point de vue interaction lumière-matière, de la miniaturisation des interfaces ou bien de meilleures sensibilités et limites de détection qu'on peut les obtenir, pour des temps de détection très courts. Avec l'utilisation des techniques de fabrication microélectronique, les dispositifs hautement ordonnés peuvent être fabriqués et peuvent être facilement intégrés au système micro fluidique ;

Ces captures ont un fonctionnement qui a comme principe les variations de leurs propriétés optiques lorsque l'indice de réfraction des substances à analyser change en mesurant le décalage de la longueur d'onde de résonance dans le spectre de transmission en fonction de l'indice de réfraction du liquide.

On a l'exemple de la détection dans un biocapteur qui est effectuée par une monocouche sensible qui réagit avec l'analyte.la structure photonique fonctionne là avec une

monocouche sensible.se sont les composantes de la zone de détection qui réagit avec l'analyte qui induisent une variation de l'indice de réfraction, de l'épaisseur de la couche sensible et de son absorption.

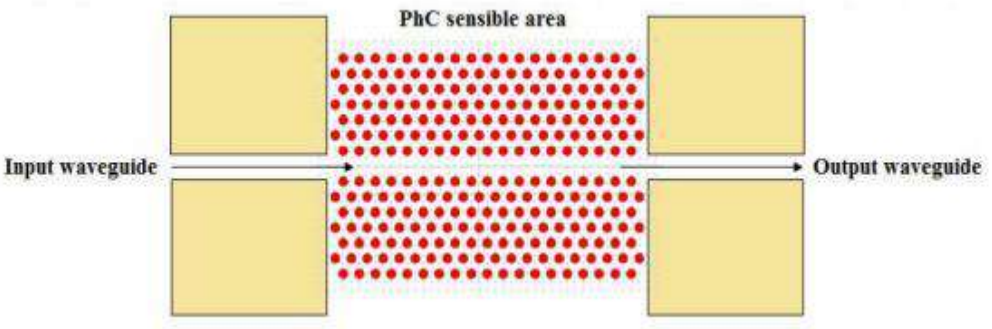


Figure I.22 : Schéma de la capture d'ADN à base de PhC caractérisé par des guides d'ondes monomode d'entrée et de sortie de 500nm de largeur.

I.8.4.Les multiplexeurs/démultiplexeurs:

Le multiplexage en longueurs d'ondes (WDM, Wavelenght Division Multiplexing) est une fonction importante en optique intégrée. Ce dernier avec Le multiplexage ou démultiplexage optique à cristal photonique bidimensionnel pouvant être réduit au niveau de la taille et présente un Q élevé qu'on peut l'obtenir de la manière suivante :

Formation d'un guide d'ondes en créant dans le cristal des trous non linéaires; et formation d'un défaut en grappe de type galette sans créer de trous en au moins deux points du réseau continu au guide d'ondes. Ainsi, seul un faisceau lumineux d'une longueur d'onde donnée provenant de l'extérieur peut s'épanouir à partir du défaut en grappe (multiplexage). A l'inverse, parmi tous les faisceaux lumineux se propageant à travers le guide d'ondes, seul un faisceau de longueur d'onde donnée résonne au niveau du défaut en grappe et peut être piégé pour ressortir (démultiplexage). [21].

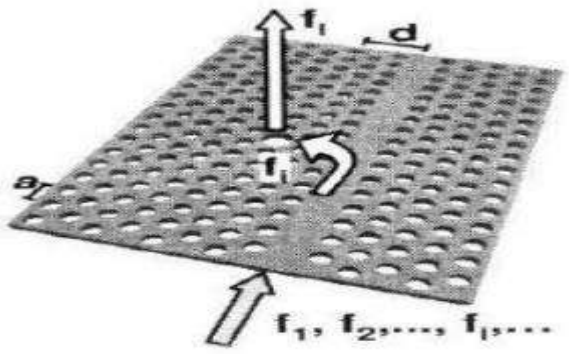


Figure I.23 : Schéma de principe d'un dispositif de multiplexage (insertion ou extraction d'une certaine longueur d'onde).

I.9.Technologies et matériaux

La réalisation d'un contraste d'indice périodique à l'échelle de la longueur d'onde ne se fait pas facilement, par contre Les cristaux photoniques 1D et 2D sont les plus faciles à réaliser, par ce qu'ils sont compatibles avec les technologies salle blanche. Les CP 1D, sont relativement simples et ont été largement étudiés jusque-là. Les CP 2D ont connu un développement considérable, surtout du point de vue de l'étude des procédés de fabrication de telles structures. Les CP 3D permettent de contrôler la lumière et c'est ce qui en fait leur principal intérêt. Cependant, les techniques de fabrication de telles structures sont encore à un niveau de maturité technologique relativement faible, bien que des progrès ont été marqués dans ce domaine. La réalisation de cristaux photoniques nécessite des matériaux qui doivent être transparents dans la gamme spectrale sur laquelle ils sont étudiés et doivent avoir une permittivité diélectrique la plus grande possible pour confiner fortement le champ

I.9.1Les semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs sont des matériaux de choix. Parce que leur technologie est bien maîtrisée. La plupart des structures actives sont réalisées à partir de semi-conducteurs des colonnes III-V dans la mesure où leurs gap électronique est direct et leur procure de bonnes propriétés d'émission. Le monde des semi-conducteurs est dominé par le **r** le silicium, pour une raison simple : son faible coût.

Le silicium a été largement étudié, son indice de réfraction est de 3.48 à longueur d'onde de λ=1550 nm, il permet de réaliser des cavités et des guides d'ondes optique.

I.10. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons défini le concept de bases des cristaux photoniques qui sont très prometteurs pour la réalisation des composantes optiques planaires, en ce première lieu , nous avons énuméré les types des CPhs ;Selon la littérature, ils ont prouvé que les cristaux photoniques offrent la possibilité de contrôler la propagation de la lumière en se basant sur la propriété de la bande interdite photonique, , et on a décrit spécialement la structure bidimensionnelle, les cavités à cristaux photoniques, les guides d'onde à cristaux photoniques et l'utilisation de CPhs pour la détection Nous avons terminé ce chapitre par une identification des différentes technologies et matériaux utilisés.

Chapitre I : Généralité sur les captures

II.1. Introduction

Les capteurs chimiques, physiques et les biocapteurs qui ont été développés depuis quelques dizaines d'années, sont maintenant adoptés et largement utilisés dans tous les domaines de la vie courante (qualité de l'eau et de quelques produits de l'agroalimentaire, analyses biologiques, dépollution,etc)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, nous aborderons dans ce cadre, leurs principales caractéristiques et leurs différents types.

II.2Généralités 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, une intensité ou la déviation d'une aiguille. On fait souvent (à tort) la confusion entre un capteur et un transducteur. Le capteur est au minimum constitué d'un transducteur.

Le capteur se distingue de l'instrument de mesure par le fait qu'il ne s'agit que d'une simple interface entre une grandeur physique et une information manipulable. Par opposition, l'instrument de mesure est un appareil autonome se suffisant à lui-même, disposant d'un affichage ou d'un système de stockage des données. Le capteur, lui, en est dépourvu. Les capteurs sont les éléments de base des systèmes d'acquisition de données. Leur mise en œuvre est du domaine de l'instrumentation [22].

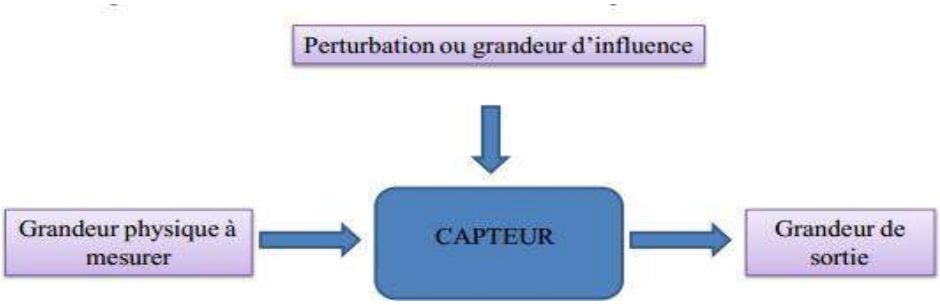


Figure II.1 : Définition d'un capteur. [5]

II-2-2- Chaîne de mesure

Pour obtenir une image d'une grandeur physique, on fait appel à une chaîne de mesure qui peut faire intervenir plusieurs phénomènes différents. Par exemple, la mesure d'un débit peut se faire en plusieurs étapes :

- -Transformation du débit en une pression différentielle.
- - Transformation de la pression différentielle en une déformation mécanique d'unemembrane.
- Transformation de la déformation mécanique en une grandeur électrique (à l'aide d'un piézo-électrique) via un circuit électronique associé **figure I-2.**

L'ensemble de ces étapes constitue la chaîne de mesure : [23]

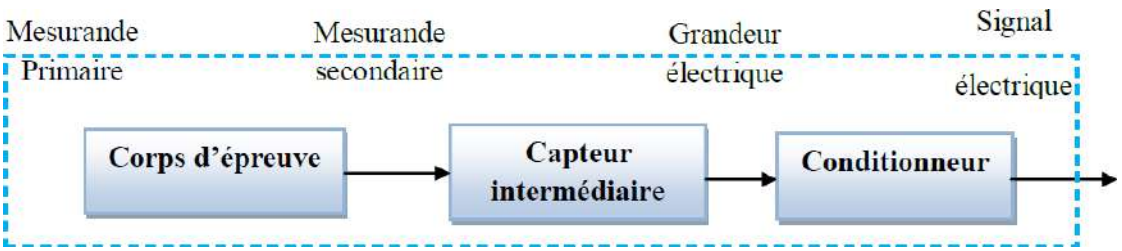


Figure II.2 : constitution d'une chaîne de mesure classique.

De manière classique, la sortie d'une chaîne de mesure est du type électrique ; Si la chaînede mesure fait intervenir plusieurs transducteurs. On appelle corps d'épreuve celui qui est en contact direct avec le mesurande, le dernier transducteur est associé à un conditionneur qui fournit la grandeur électrique de sortie de manière exploitable.

II-2-3-Types de grandeur physique

On peut classer les grandeurs physiques en 6 familles, chaque capteur s'associe à l'une d' entre elles :

- Mécanique : déplacement, force, masse, débit…
- Thermique : température, capacité thermique, flux thermique…
- Electrique : courant, tension, charge, diélectrique…
- Magnétique : champs magnétique, perméabilité, moment magnétique…
- Radiatif : lumière visible, rayon X, micro-onde…
- (Bio) chimique : humidité, gaz, sucre, hormone… [23]

II-2-4 - Grandeurs d'influence :

Les grandeurs d'influence sont des grandeurs étrangères qui, selon leur nature et leur importance, peuvent provoquer des perturbations sur le capteur. C'est donc une cause d'erreurs agissant sur le signal de sortie.

La plupart des grandeurs d'influence sont liées à l'environnement du capteur. Citons enparticulier :

- la température (c'est la grandeur d'influence la plus répandue et la plus gênante),
- la pression environnante,
- les vibrations mécaniques ou acoustiques, les chocs, le temps,
- la position du capteur et sa fixation,
- l'humidité, la projection d'eau, l'immersion,
- les ambiances corrosives,
- les perturbations électromagnétiques,
- les rayonnements nucléaires,
- les accélérations et la pesanteur,
- l'alimentation électrique du capteur.

II-2-5- Rôle du capteur :

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

- Mesure de présence: indique la présence d'un "objet" à proximité immédiate.
- Mesure de position, de déplacement ou de niveau: indique la position courante d'unobjet 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 [22].

II-2 -6- Eléments constitutifs d'un capteur :

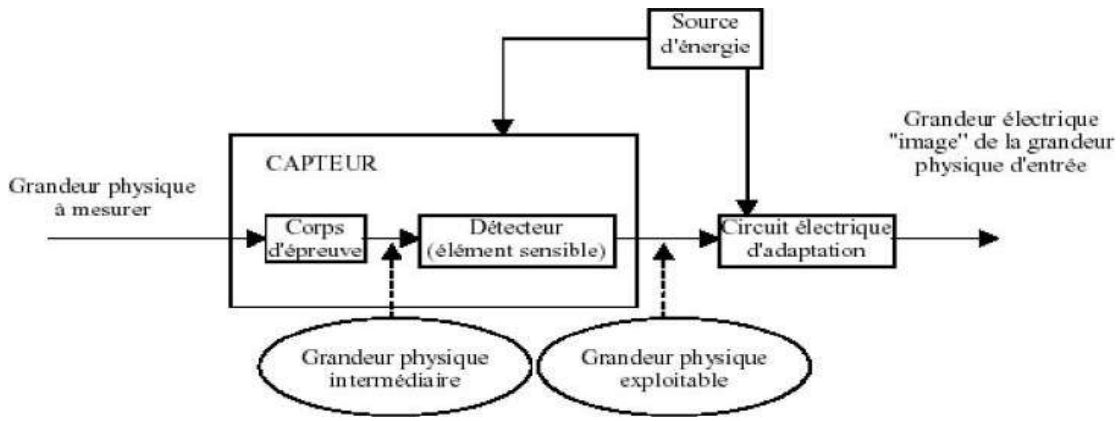


Figure II.3 : Eléments constitutifs d'un capteur [23].

II-3- Classification des capteurs :

On classifie les capteurs en deux grandes familles en fonction de la caractéristique électrique de la grandeur de sortie. Cette classification influe sur le conditionneur qui lui est associé.

II-3-1- Capteurs passifs :

Il s'agit d'impédances dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande.

Dans l'expression littérale d'une impédance sont présents des termes liés :

– d'une part à sa géométrie et à ses dimensions ;
– d'autre part aux propriétés électriques des matériaux : résistivité, perméabilité Magnétique μ, constante diélectrique.

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

– soit sur les caractéristiques géométriques ou dimensionnelles ;
– soit sur les propriétés électriques des matériaux ;
– soit plus rarement sur les deux simultanément.

Les paramètres géométriques ou dimensionnels de l'impédance peuvent varier si le capteur comporte soit un élément mobile, soit un élément déformable. Dans le premier cas, à chaque position de l'élément mobile correspond une valeur de l'impédance et la mesure de celle-ci permet de connaître la position, c'est le principe d'un grand nombre de capteurs de position ou de déplacement, potentiomètre, inductance à noyau mobile et condensateur à armature mobile [24].

Mesurande	Effet utilisé	Matériaux
Température **Très basse température**	Résistivité Constant diélectrique	Platine, nickel, cuivre, semi-conducteur, verre
Flux optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité	Alliages nickel Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistances : Bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de Lithium

Tableau II-1- Les effets utilisés pour réaliser la mesure.

II-3-2- Capteurs actifs :

On parle de capteur actif lorsque le phénomène physique qui est utilisé pour la détermination du mesurande effectue directement la transformation en grandeur électrique. C'est la loi physique elle-même qui relie le mesurande et la grandeur électrique de sortie. Un capteur actif fonctionne assez souvent en électromoteur et dans ce cas, la grandeur desortie est une différence de potentiel.

Le nombre des lois physiques permettant une telle transformation est évidemment limité,on peut donc recenser facilement les capteurs actifs (dont le nombre est fini). Toutefois, lesdomaines d'application sont à eux très étendus.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectrique (thermocouple)	Tension
Flux optique	Photoémission pyroélectricité	Courant Charge
Force, pression, accélération	Piézoélectricité	Charge
Position	Effet Hall	Tension
Vitesse	Induction	Tension

Tableau II-2- L'effet utilisé sur la mesurande pour réaliser la grandeur de sortie.

II.4 Caractéristiques d'un capteur :

II.4-1-La 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 (S_{out}) par rapport à la variation du mesurande (m) (pente de la portiolinéaire de la courbe d'étalonnage) et s'écrit :

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

Plus un capteur est sensible plus la mesure pourra être précise. C'est une caractéristiqueimportante pour l'exploitation et l'interprétation des mesures.[25]

II-4- 2-Etalonnage :

L'étalonnage permet d'ajuster et de déterminer, sous forme graphique, la relation entre lemesurande et la grandeur électrique de sortie (figure II.4).

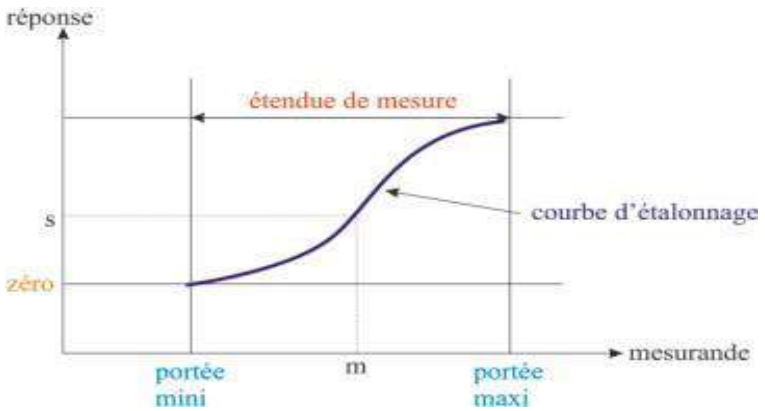


Figure II-4 : Courbe d'étalonnage d'un capteur

II-4- 3- Domaine de linéarité :

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

II-4-4-Précision :

La définition du terme « précision » inclut soit uniquement la reproductibilité ou fidélité, soit également la notion de « justesse ». Elle définit l'écart en % que l'on peut obtenir entre la valeur réelle et la valeur obtenue en sortie du capteur [26].

II-4-5 -Temps de réponse ou rapidité :

La chaine d'acquisition est rapide quand c'est à elle-même de suivre les évolutions de la grandeur d'entrée. On doit connaître la plage de variation de fréquence du mesurande. Par exemple, la variation de température sera un phénomène assez lent à comparer par l'acquisition d'une tension. Pour respecter la condition de Nyquist, l'échantillonnage doit respecter la condition suivante [27].

$$F_e \geq 2.F_{max} \quad \text{(II.2)}$$

II-4-6-Sélectivité :

Un capteur est dit sélectif, si la variation du signal de sortie est due uniquement à la seule grandeur (physique, chimique, biologique.) qu'on veut mesurer. C'est la capacité du capteur à ne mesurer qu'une seule grandeur dans le milieu où il est utilisé ou autrement dit, d'être le plus insensible aux grandeurs d'influence, grandeurs qui ne font pas l'objet de la mesure, mais influent sur la sortie du capteur.

II-4-7-Fidélité

Elle définit la qualité d'un capteur à délivrer des résultats les plus proches possibles lors d'analyses répétées sur une même grandeur physique m. L'erreur de fidélité correspond à la dispersion (écart type) σ des résultats autour de la valeur moyenne <m>den mesures effectuées sur m :

$$< m >= \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i}{\text{n}} \quad \text{……..(II.3)}$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (m_i - < m >)^2}}{\text{n}-1} \quad \text{……..(II4)}$$

Où mi est la valeur de m à la $i^{\text{ième}}$ mesure. Parmi les écarts de fidélité on distingue : larépétabilité et la reproductibilité [25].

II-5 Différents types de capteurs :

Il existe plusieurs classifications des capteurs. La plus répandue se réfère à la naturede mesurant ou à la transduction, de façon indépendante de l'utilisation.

II-5-1- Capteurs physiques

Ce sont des dispositifs sensibles à des phénomènes physiques, les mesura des étant notamment la température, la pression, la masse, la force, la vitesse, le débit ...etc. La sensibilité est assurée par divers phénomènes physique, comme

la piézoélectricité l'effet hall, les variations d'impédance, la photosensibilité...etc. cette dénomination n'a donc rien à voir avec l'utilisation, tous ces capteurs pouvant trouver des applications par exemple dans des systèmes chimiques.

II-5-2- Biocapteurs :

Par définition un biocapteur est un système analytique qui exploite la capacité de détection biologique pour une molécule cible, en conjonction avec un transducteur physicochimique qui transforme la reconnaissance biologique en un signal physiquement mesurable. Trois principaux éléments composent un biocapteur : une couche biologique sensible, un transducteur et un signal de sortie. La couche biologique contient un bio récepteur, qui reconnait l'espèce biologique souhaitée et qui est immobilisé sur le transducteur. Ce dernier assure la conversion de la réponse biologique en un phénomène physique. Au plus haut niveau, le signal de sortie permet la mesure du phénomène physique élaboré par le transducteur. Ce niveau contient souvent des étapes d'amplification et d'affichage, de manière appropriée et interprétable par l'utilisateur [25].

II-5-3- Les capteurs chimiques :

Les problèmes de sécurité, pollution, économie d'énergie, contrôle de qualité des produits, santé, etc...., se posent avec acuité depuis ces dernières années du fait de l'essor industriel sans précédent dans de nombreux pays.

La connaissance d'un problème nécessite la mesure préalable du phénomène correspondant, en d'autres termes l'utilisation de capteurs. Le capteur constitue en effet le maillon de base de toute chaîne de mesures.

La possibilité de réaliser des dispositifs performants par adjonction d'une électronique sophistiquée (microprocesseurs, ASIC, etc) aux capteurs est sans doute à l'origine du développement considérable des recherches fondamentales et appliquées dans ce domaine. On peut citer par exemple les capteurs de température.

Le terme "capteur", dans sa définition la plus générale désigne un élément sensible qui, soumit à une modification de son environnement physico-chimique ; présente une caractéristique électrique fonction de cette variation.

Les capteurs chimiques sont destinés à la détection et/ou à l'analyse de la concentration d'espèces chimiques ou biochimiques, gazeuses ou liquides en général. L'analyse d'espèces solides, bien que moins évidente, peut cependant être envisagée. Contrairement aux autres types de capteurs, les capteurs chimiques ont connu un succès limité sur le plan commercial, malgré la forte demande de nombreux secteurs de l'économie, tels que les industries chimique, métallurgique, automobile, électronique, agro-alimentaire, l'environnement, le domaine médical, les biotechnologies, etc... Ce fait estvraisemblablement lié à la difficulté technique de transformer une grandeur telle que la concentration d'une espèce chimique dans un liquide ou un gaz en signal électrique, tout en assurant simultanément la reproductibilité, la sensibilité et la sélectivité.

II-5-4-Capteur de glucose :

Le glucose constitue une variable essentielle pour l'étude métrologique d'un milieu environnant qui peut-être soit un gaz soit un fluide.

La mesure de cette variable est réalisée à l'aide d'un capteur de glucose, dispositif capabled'associer à la grandeur mesurée, un signal électrique reconnaissable appelé :

« réponse ».

Il est constitué de deux parties : une partie de détection dite « Cellule sensible » et une partie de traitement de l'information par l'intermédiaire d'un circuit électronique que l'on peut appeler « Circuit électronique de traitement » ou encore « Circuit convertisseur ». La partie détection est quant à elle constituée d'un « corps d'épreuve » et d'un « transducteur

» qui transforme la déformation de ce corps d'épreuve en une grandeur physique, la plupartdu temps électrique.

II.6.Capteurs optiques label-free pour application de détection biochimique :

Depuis quelques années, les capteurs optiques ont connu un réel développement en raison de l'augmentation du nombre d'applications de détection dans les domaines aussi variés que la santé, la défense, la sécurité, l'automobile, l'aéronautique, le contrôle qualité pour n'en citer que quelques-uns. Les progrès réalisés en photonique, tant sur la compréhension des phénomènes physiques que sur la maitrise des procédés de fabrication, ont

contribué à améliorer grandement leurs capacités de détection, notamment d'un point de vue des interactions lumière matière, de la miniaturisation des interfaces ou encore de l'intégration de systèmes micro fluidiques. De meilleures sensibilités et limites de détection ont ainsi pu être obtenues, pour des temps de détection plus courts, avec une maniabilité plus simple et des coûts de revient par mesure plus faibles.

II.6.1 Principe

Le principe général de détection optique label-free repose sur le changement d'une des propriétés de la lumière lorsque celle-ci est en contact avec l'élément d'intérêt. Il existe pour cela différentes méthodes de détection comme celles exploitant des effets de changement d'indice de réfraction, de propriété d'absorbance ou de non-linéarité. Par la suite nous nous intéresserons seulement à la détection basée sur le changement d'indice.

Le principe d'une telle détection consiste à mesurer la variation d'indice de réfraction du milieu analytique environnant interagissant à l'interface avec le champ électromagnétique évanescent. Dans la majorité des cas, le champ électromagnétique est concentré dans le milieu d'indice le plus élevé et décroît exponentiellement à partir de l'interface entre le capteur et le milieu environnant sur une longueur allant jusqu'à quelques centaines de nanomètres.

On distingue deux catégories de biocapteurs, dont le principe est présenté schématiquement sur la Figure II.5. La première catégorie concerne les capteurs capables de mesurer le changement d'indice de réfraction global lorsque celui-ci est mis en contact avec un milieu environnant (gaz ou liquide). C'est le principe des réfractomètres par exemple. Dans la mesure où le champ est très intense à l'interface du capteur, une réponse de surface peut se superposer au changement d'indice de réfraction global : il s'agit de la deuxième catégorie de capteurs. Ils sont capables de mesurer le changement d'indice de réfraction induit par une reconnaissance moléculaire de surface. Idéalement, les molécules détectées seront donc seulement celles se trouvant dans le domaine où le champ est localisé.

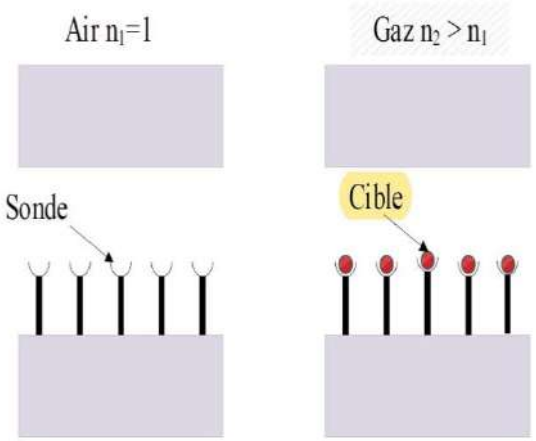


Figure II.5 En haut : Détection homogène du changement d'indice de réfraction - En bas

Détection de surface. Les molécules cibles (en rouge) viennent spécifiquement reconnaitre les récepteurs (en noir) déposés sur la surface formant une couche modifiant localement l'inde de réfraction.

II.6.2. Utilisation des cristaux photoniques (CP) pour la détection :

Dans la mesure où une faible variation du changement d'indice au sein de la cavité a pour conséquence une faible variation de la fréquence du mode d'intérêt, cette propriété peut être utilisée comme méthode de transduction et justifie l'utilisation des CP comme détecteurs optiques. La position spectrale l_0 de la résonance de la cavité peut servir de référence. Ainsi, la mesure de la variation de la position spectrale D_1 revient à mesurer la variation du changement d'indice D_n lié à la reconnaissance de molécules à la surface de la cavité. Ce principe est représenté sur la Figure II.6.

Ainsi, les performances d'une cavité à base de CP pour des applications de détection sont caractérisées par deux paramètres :

- **Le facteur de qualité de la résonance** : il doit être le plus élevé possible afin que de très faibles décalages en longueur d'onde puissent être observables lors d'une adsorption moléculaire. Cela est directement lié à la limite de détection.
- **La sensibilité** $S_\lambda = \Delta_\lambda/\Delta_n$ exprimée en nm/RIU : pour une concentration d'analytes en solution à détecter, plus le décalage en longueur d'onde mesuré est grand, plus le capteur est dit sensible. Il est important de signaler que cette valeur est intrinsèque au transducteur et ne dépend pas ou peu des autres équipements de mesure (spectromètre, lampe, . . .). Cette

définition de la sensibilité est la plus rencontrée dans la littérature dans le domaine d'application des CP à la détection.

Il est alors possible de réaliser des études quantitatives sur la bio-reconnaissance de molécules en surface des cavités des CP en mesurant le décalage de la résonance en temps réel.

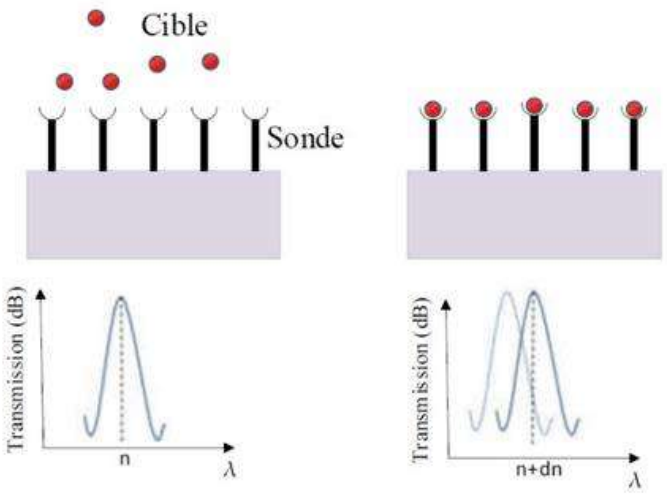


Figure II.6 Principe de la mesure de transduction optique d'un résonateur à cristaux photoniques

II.6.3 État de l'art des capteurs à cristaux photoniques :

Les premiers capteurs à CP 1D en polymère ont été proposés dès 2003 par Cunningham et al [63]. Ces biocapteurs consistent en un matériau plastique sur la surface duquel est déposée une fine couche structurée périodiquement d'un matériau diélectrique de plus fort indice de réfraction. Le dispositif a été conçu de telle sorte qu'une bande de longueur d'onde de 2 nm soit réfléchie lorsque celui-ci est éclairé sous incidence normale par une lumière blanche. Le décalage selon les plus grandes longueurs d'onde (décalage dans le rouge) signifie qu'un matériau est absorbé en surface. Un décalage de 2.5 nm a été mesuré lors de la reconnaissance d'ADN à la surface du CP pour une sensibilité de surface de 0.4 pg/mm2.

En 2004, Chow et al ont démontré la détection de changement d'indice de réfraction de 0.002 (solution commerciale de silicone évaporée en surface) avec une microcavité à CP 2D ayant un facteur de qualité d'environ 400 [64]. La limite de détection aurait pu être améliorée à 0.001 RIU en utilisant une microcavité à CP 2D optimisée comme proposée par Lončar et al [65]. Une cavité à CP recouverte d'un film fin de polymère a permis

une détection d'ions spécifiques en environnement liquide à des concentrations micromolaires [66].

En 2012, Lin et al ont réussi à détecter un nombre fini de molécules dans une solution complexe grâce à des capteurs à CP destinés à la détection de molécules uniques [68]. A partir de 2009, des architectures de cavités à CP à tranchée commencent à montrer de bonnes performances, des sensibilités dépassant les 1000 nm/RIU pouvant être atteintes [69]. Les mêmes auteurs ont ainsi montré deux ans plus tard la détection d'avidine via la reconnaissance par la biotine à différentes concentrations. Une limite de détection de 1 µg/mL a pu être mesurée, correspondant à une densité de masse adsorbée de 60 pg/mm2.

Si jusque-là l'intérêt portait davantage à évaluer les performances de détection de la technologie à CP, l'étude de la diversification des espèces à détecter et des interactions moléculaires dans des solutions complexes sont de plus en plus concernées. Chakravarty et al ont très récemment réalisé un biocapteur sans marqueur avec une cavité à CP en SOI et s'en servent pour détecter le ZEB1 (facteur de transcription de la transition épithélio-mésenchymateuse (EMT)) issu de cellules cancéreuses du poumon (NCI-H358) [70].

II-7- Conclusion :

Parmi toutes les technologies étudiées et les différents capteurs réalisés, les capteurs optiques présentent de nombreux avantages pour répondre aux différents besoins comme l'immunisation aux interférences électromagnétiques, leur stabilité dans les environnements agressifs et leur faculté à réaliser de la détection [2]. Un grand intérêt a été porté plus particulièrement aux capteurs optiques intégrés à base de guides d'onde. Ces capteurs ont connu une croissance rapide et une grande variété de conception a été développée afin d'être intégrée sur des plateformes optiques [3]. La nature robuste de ces capteurs en fait de bons candidats destinés à la détection de molécules spécifiques hors laboratoire par des personnes qualifiées ou non.

Outils de simulations, résultats et interprétation

III.1.Introduction :

Au cours des dernières années de nombreuses recherches ont été menés pour l'étude et le développement d'une nouvelle génération de dispositifs photonique basée sur les structures de bande interdite photonique(PBG). Ces structures ont la propriété de confinement de la lumière et de la localisation avec la forte réduction de la taille de l'appareil.

Le Rsoft est un programme de base de Rsoft photonique, il permet aux chercheurs de créer des systèmes pour la conception de différents dispositifs tel que : des guides d'onde, des cavités de résonance, des circuit optique et d'autre dispositifs photoniques. Ce logiciel calcule la diffraction sans la fournis d'un la réflexion ou la transmission parmi les avantages de ce programme, qu'il est possédé une interface CAO facile a utilisé qui permet une définition précise d'un profil arbitraire associes à une approximation grossière des résultats améliorés peuvent être trouve rapidement, le processus de conception de la modulation est intéressante permettant l'émulation pur lots.

III.2.Techniques de modélisation :

Cette méthode est basée sur un diagramme de dispersion, de la réflexion et de la transmission, qui sont régis par les équations de Maxwell. Les principales techniques utilisées sont la décomposition en ondes planes, la méthode des différences finies dans le domaine temporel(FDTD), les matrices de transfert, et les théories de diffraction par les réseaux…

III.2.1. La méthode d'ondes planes (PWE)

La technique de décomposition en ondes planes (plane wave expansion, PWE), est la méthode privilégiée pour le calcul des diagrammes de dispersion dans les CP, elle est basée sur la résolution des équations de Maxwell dans le domaine fréquentiel ; Elle est bien adaptée pour des structures périodiques de dimensions infinies et pour la détermination des modes propres et du diagramme de dispersion de la structure. Cette méthode est utilisée pour analyser les propriétés dispersives des matériaux à bandes interdites photoniques et permet de déterminer la fréquence, la symétrie et la distribution du champ pour les modes d'une structure photonique. 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.

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

La méthode FDTD (Finite Différences Time Domain) ou la méthode des différences finies dans le domaine temporel, est une approche numérique permettant la résolution des équations de Maxwell portant sur les variables spatiales et la variable temporelle [35]. On peut obtenir les réponses en champs TE et TM simultanément, On peut ainsi obtenir les cartographies du champ EM à n'importe quel endroit et n'importe quel moment.

En 1966, Yee proposa un schéma de différences finies temporelles appliqué à l´électromagnétisme, la FDTD était né, Elle est devenue rapidement un moyen incontournable de modélisation. On peut citer comme domaines d'utilisation celui des effets des téléphones portables sur le corps humain, la conception des antennes, et les circuits imprimés. Le succès de cette méthode réside dans la robustesse d'un algorithme basé sur le développement de Taylor du second ordre [36]. Cette méthode a pour but de discrétiser les équations de Maxwell dans l'espace et dans le temps en utilisant une grille de cellules élémentaires. Les équations de Maxwell sont remplacées par un système d'équations qui relie le champ électromagnétique de chaque cellule aux champs des cellules voisines.

III.2.3.Méthode des réseaux de diffraction :

Elle considéré le cristal photonique comme un ensemble de réseaux de diffraction successif. Les champs sont décomposés dans chaque région séparant ces réseaux et la théorie des réseaux est appliquée pour relier les coefficients de cette décomposition d'une région à l'autre. L'intérêt de cette méthode est qu'elle donne non seulement les modes guidés et les résonances (ce sont les pôles de la matrice de diffusion), mais aussi les pertes intrinsèques de ceux-ci [37].

III.3. Présentation de l'interface graphique du logiciel Rsoft

Le logiciel RSoft CAD est un programme de base de Rsoft photonique, il permet la conception et la simulation des différents dispositifs optique ; il s'agit d'un programme de gestion pour module passifs comme : BeamProb, Diffract Mod, Fullwave, Band Solve et Grating mod.

Les deux modules permettant la simulation des cristaux photoniques sont : le module Band Solve et le module FullWave.la figure 1 présente la fenêtre de l'interface graphique pour logiciel Rsoft.

III.3.1. Le simulateur BandSolve :

Band solve est un logiciel de simulation des structures de bande photoniques. , il permet de calculer le digramme des bandes (BIP) pour les cristaux photonique, Il est basé sur la méthode des ondes planes optimisée pour les structures périodiques, idéal pour obtenir des diagrammes de bande des structures à bandes interdites photoniques classiques tels que 2D et 3D et les guides à cristaux photoniques. A deux dimensions, il est nécessaire de considérer deux directions de propagation différente : TE (avec le champ E perpendiculaire à l'axe des trous) et TM (où E est parallèle à l'axe des trous). Ces deux polarisations sont découplées et donnent lieu à deux diagrammes de bandes indépendants. Il n'existe pas forcément une bande interdite dans les deux cas. En outre, il peut être appliqué à des structures comme les fibres à cristaux photoniques, qui sont complexes pour les autres techniques de simulation. BandSOLVE est particulièrement utile pour optimiser les propriétés des structures à cristaux photoniques. Il est destiné pour fonctionner avec les autres modules de simulation de Rsoft tels que BeamPROP et FullWAVE, il partage le même outil de CAD avec ces modules. En particulier, ce logiciel est spécialement utile pour optimiser les propriétés des cristaux photoniques.[38]

III.3.2. Le simulateur fullwave :

Le simulateur Fullwave est un module de suite de logiciels développée par l'entreprise RSoft.il est basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). L'objectif de FullWAVE est d'obtenir un ensemble de simulations pour calculer la propagation de la lumière dans les guides d'ondes de géométries arbitraires. Ce logiciel est bien adapté à nos simulations puisqu'il permet la conception de structures photoniques complexes. Fullwave est idéal pour étudier la propagation de la lumière pour une grande variété de structures photoniques. Il est entièrement intégré dans l'environnement Rsoft CAD qui permet à l'utilisateur de définir les propriétés des matériaux et la géométrie de la structure d'un dispositif photonique. Fullwave peut modéliser avec précision des matériaux diélectriques et magnétiques, aussi bien que les matériaux anisotropes, dispersifs, et non linéaires.

III.3.3. Fenêtre de programme de CAD :

La figure III.1 montre la fenêtre de l'interface graphique pour logiciel Rsof, cette fenêtre a une barre de menus en haut de la fenêtre, et une barre des outils qui contient plusieurs icônes, Les menus permettent l'accès au divers dossiers standards et les opérations

d'édition. La ligne d'état donne des informations sur le mode courant de disposition, avec l'affichage du même rang pendant le dessin.

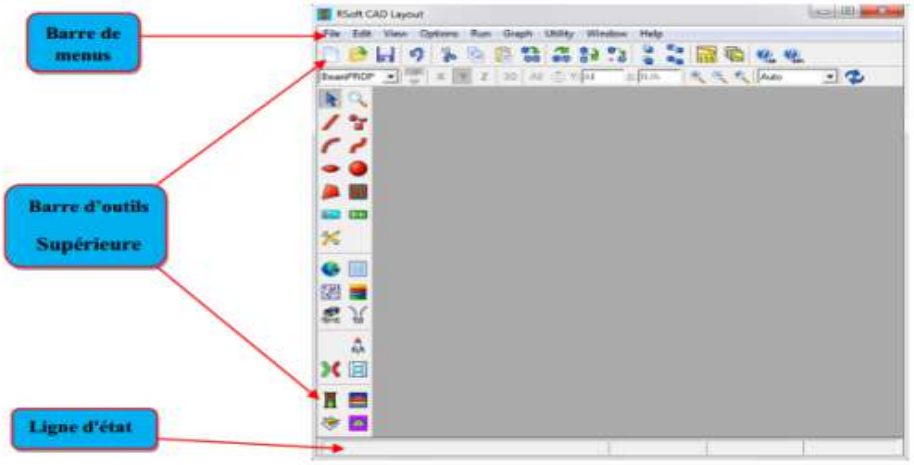


Figure III.1 : Interface graphique du logiciel Rsoft.

III.3.4. Générer la structure de réseau :

Dans cette partie nous allons parler de la méthode de création d'un réseau en cristaux photoniques dans l'interface de CAD. En général, il y a plusieurs manières pour créer une structure de réseau dans l'interface de CAD. La manière la plus facile est d'utiliser une des multiples utilités de disposition qui sont incluses avec Full WAVE afin d'expédier la création de ce réseau en utilisant Array Layout (figure III.2.a). Après l'introduction des différentes données (type de réseau, forme de motif, le nombre de rangés et le nom du circuit) on clique sur le bouton OK pour obtenir la structure du cristal photonique qui apparaît sur la (figure III.2.b).

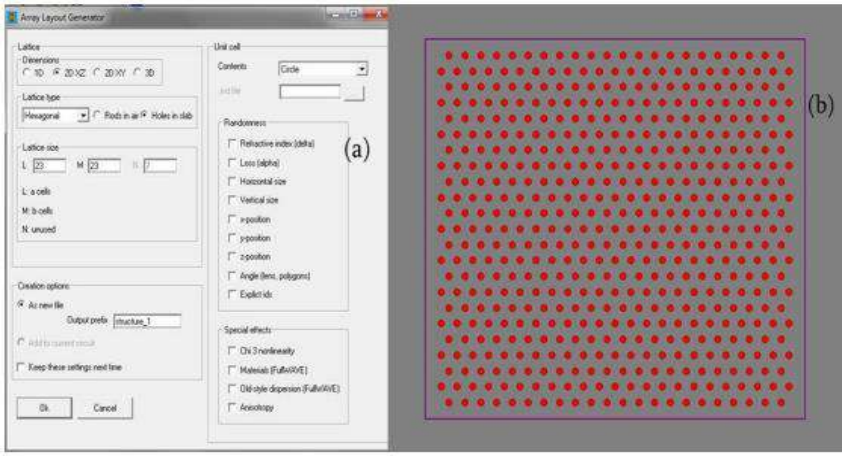


Figure III.2 : (a) Arrangements de disposition de la rangée XZ. (b) Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD)

III.4. Présentation de la structure de base :

Avant la conception du biocapteur, on commence d'abord l'étude de la structure de base, afin de déterminer le diagramme de bandes interdites photoniques. La structure d'étude est à base de cristaux bidimensionnels membranaires à réseau de trous d'air (17 × 17) (figure III.3) dans un diélectrique à fort indice (n_{si}=3.45) (figure III.4), il s'agit d'un réseau à maille hexagonal.

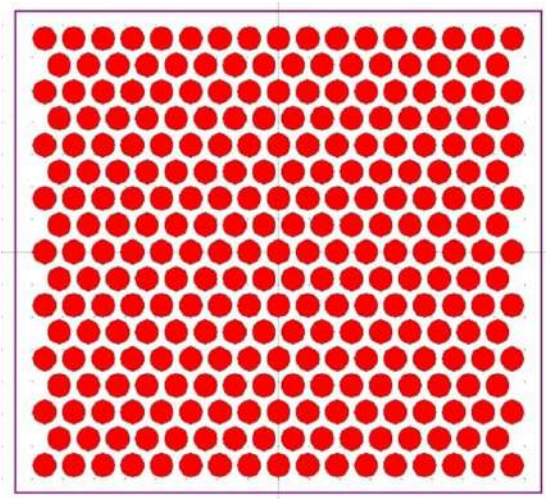


Figure III.3 : Structure du cristal photonique formé par un réseau Hexagonal 17×17

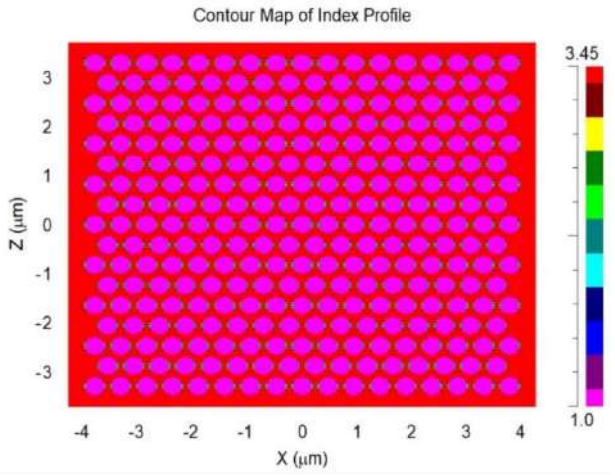


Figure III.4: Distribution de l'indice de réfraction d'un cristal photonique hexagonal

III.4.1.Paramètres de la structure étudiée :

La figure III.5 représenter la carte de la bande interdit, premièrement, Nous avons utilisé le logiciel de simulation (BandSOLVE de RSoft basé sur la méthode des ondes planes PWE) pour optimiser les premières bandes interdites (TE et TM) en fonction du rayon de trous R.

Nous examinons un réseau hexagonal de trous d'air dans une membrane de Silicium (n=3.45 et a la période du réseau est de 0.475µm)

Théoriquement ce rayon R peut varier de 0 à 0.2375µm. La valeur de disparition des bandes interdites R = a/2=0.2375µm. Pour de faibles facteurs de remplissage en air, il n'y a pas de bande interdite, il faut atteindre R = 0.08 µm pour voir apparaître la bande interdite TM. La plus large bande interdite est centrée autour d'une fréquence normalisée de 0,450 avec un rayon R = 0.231µm figure III.5

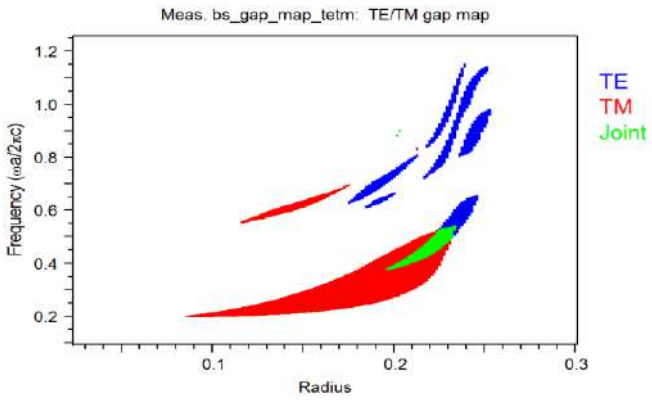


Figure III.5 : carte des bandes interdites pour les deux polarisations dans le cas d'un cristal photonique de trous d'air dans une matrice de constante dans une matrice de constante diélectrique $\varepsilon = 11.7$ d'un réseau hexagonal

Si le facteur de remplissage est élevé, il peut y avoir des problèmes techniques : en réalité, plus le facteur de remplissage est élevé, en tenant compte de la production imprécise de composants de ces tailles, plus la possibilité de chevauchement de motifs est grande. Le choix optimal du rayon R est donc fixé à 0,185µm pour un facteur de remplissage f=39%.

III.4.2.Choix de la polarisation :

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 magnétique H (respectivement électrique E) 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.

Les paramètres du réseau hexagonal de trous d'air sont choisis pour ouvrir une bande interdite à travers de la gamme de la longueur d'onde souhaitée. Typiquement, nous désirons ouvrir une bande interdite pour le mode TM autours des fréquences d'intérêts. Pour cela, nous allons prendre un cristal de facteur de remplissage en air de 39% pour obtenir une bande

interdite 2D allant de 1223 nm à 1974 nm. Un calcul basé sur la PWE fait par le logiciel BandSolve de RSoft, permet de tracer le diagramme de bande (figure III.6 (a)) et un autre calcul FDTD fait par le logiciel FullWave de RSoft, permet de tracer le spectre de transmission (figure III.6 (b)).

(a) (b)

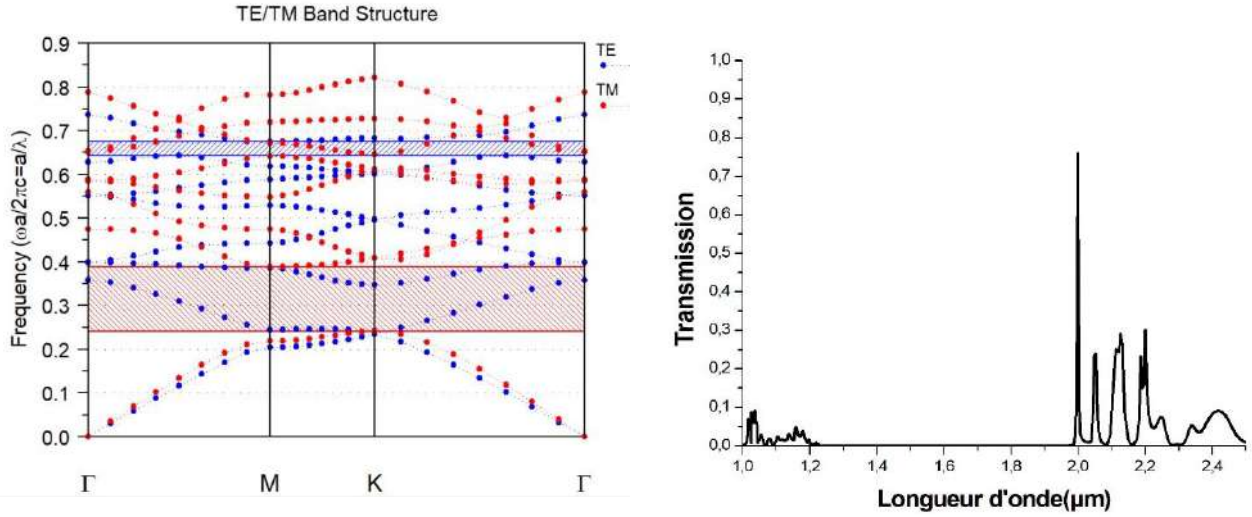


Figure III.6. (a) Diagramme de dispersion du CP-2D dans le membrane si un réseau hexagonal de trous d'air ; a=0.475,r=0.185,f=39%.calculé par la PWE ; (b) la présentation du spectre de transmission calculé par la FDTD-2D

III.5. Guide d'onde sans cavité :

La création d'un défaut dans un cristal photonique est causée par la rupture de la périodicité diélectrique. Cette rupture est raison de produire l'ouverture d'une bande de fréquence autorisée à l'intérieur de la bande interdite photonique. 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.

Nous considérons dans cette section un guide d'onde à cristaux photoniques W1, Le guide d'onde est formé en enlevant une rangée de trous W 1^Kdans la direction ΓK du réseau hexagonal comme c'est schématisé sur la figure III.7. Le cristal photonique est un réseau hexagonal de trous d'air de périodicité a = 0.475µm, percés dans une membrane de Si d'indice n = 3.45 et de rayon des trous r = 0.185µm

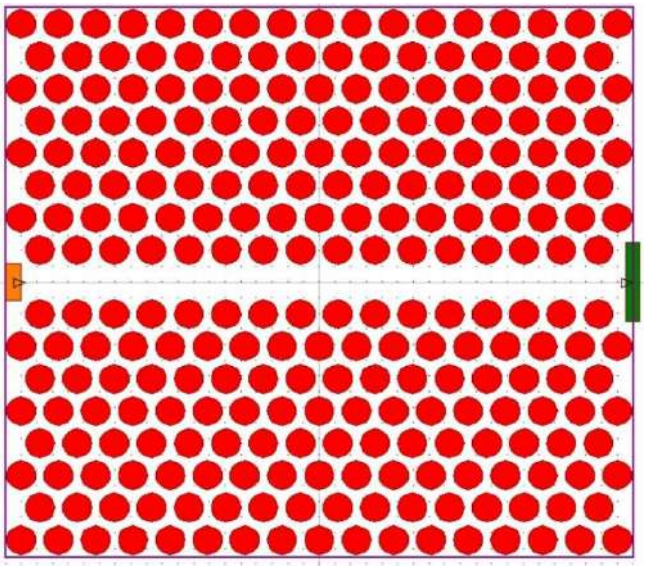


Figure III.7.Structure 2D avec un défaut de ligne (guide d'onde))

Le calcul FDTD fait par le logiciel FullWave de RSoft, permet de tracer le spectre de transmission (figure III.8. (a)), on remarque une large transmission du guide droit W1 est qui s'étale sur plus de 600 nm. On s'est limité dans ce cas, à la région spectrale de la bande interdite du cristal 2D calculée précédemment (BIP entre 1223 nm à 1974nm). A l'aide du calcul FDTD, (figure III.8. (b)) cela a montré la distribution spatiale d'une excitation de type continue (CW) à une longueur d'onde de 1.55µm (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)

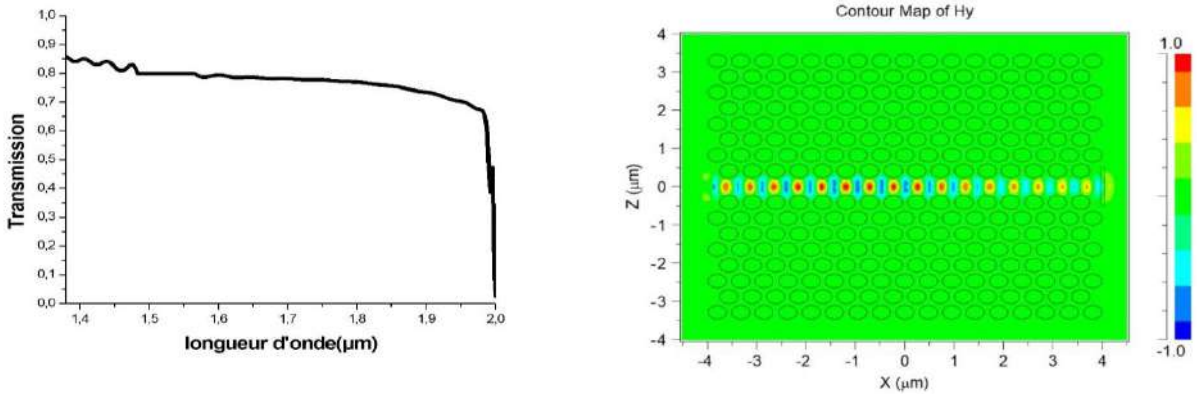


Figure III.8. (a) spectre de transmission guide droit référence W1 en mode TM

(b)Distribution spatial du champ à la suite d'une simulation de type FDTD et une excitation de type CW du guide droit référence W1 pour une polarisation TM à 1. 55µm

III.6 Guide d'onde avec cavité

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

Les structures des cavités à modulation locale de la largeur du défaut linéique, ont été proposées initialement par Kuramochi en 2006 [39]. 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 crée une cavité qui est formé d'un guide d'onde d'entrée, un résonateur et un guide d'onde de sortie.

La cavité est obtenue par l'omission des 9 trous dans le centre de façon à former un losange, comme le montre la figure ci-dessous (figure III.9).

La figure III.9 représenté la structure couplée :

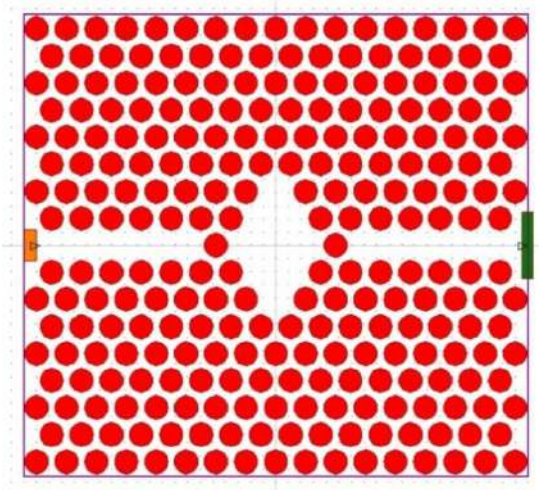


Figure III.9.structure d'un couplage cavité/guide (1er structure))

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

La figure III.10 représente le spectre de transmission du système couplé guide /cavité (lorsque l'air est sélectionné comme matériau de sous-détection à l'intérieur des trous) et la distribution du champ magnétique calculé par la méthode FDTD du logiciel Fullwave de la structure (1). Comme on peut le voir sur la figure III.10. (a), lorsque la cavité est en état de résonance, deux pics de transmission sont observés aux longueurs d'onde de résonance de 1.543 et 1.569 µm, correspondant aux premier et deuxième modes de résonance du structure (1).

Dans la figure III.10 (b) il est clair que la lumière incidente avec la longueur d'onde de 1,543 µm, est couplée au résonateur à cavité et interdite ainsi de passer à travers le guide d'onde. Cela rend la cavité sensible aux changements d'indice de réfraction en raison de la forte interaction lumière-matière.

(a) (b)

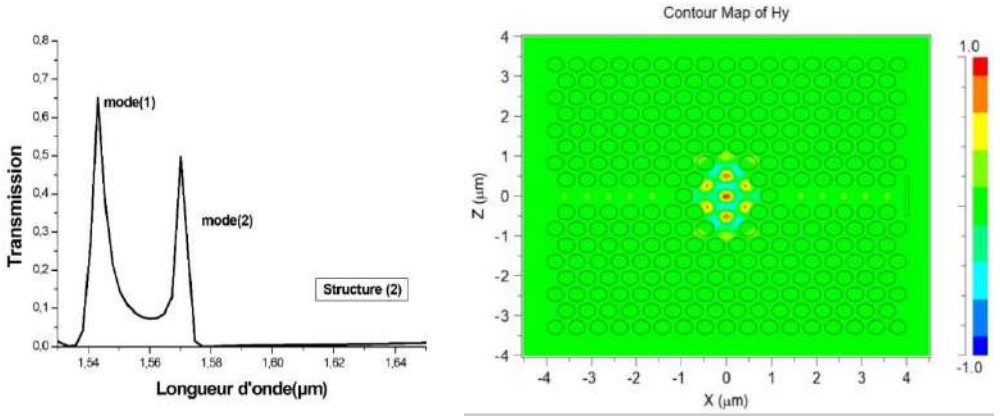


Figure III.10 : (spectre de transmission de la structure couplage $\frac{\text{cavité}}{\text{guide}}$ pour n=2,(b) :la Distribution du champ magnétique dans la cavité dans le plan x-z a résonance = 1.534 µm.

Notre étude consiste à calculer le spectre de transmission avec la présence d'un liquide dans les trous d'air (élément à analyser), ces spectres sont calculés pour différent indices de réfraction (n=1 jusqu'à n=1.15 avec un pas d'indices de 0.05).

(a) (b)

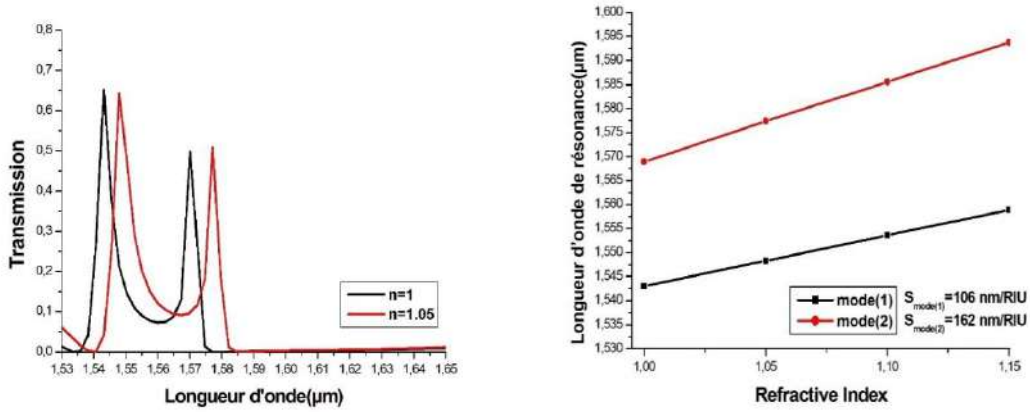


Figure III.11 : (a) le spectre de transmission de la structure pour différents indices de réfraction n a R=185nm et a =475nm,(b) la langueur d'onde de résonance en fonction de l'indice réfraction n du matériau à détecter

La figure III.11(a) illustre les spectres de transmission de la structure proposée pour différents indices de réfraction variant de 1 à 1,05 par pas de 0,05. 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. La figure III.11 (b) représente la relation de linéarité maintenue entre les longueurs d'onde de résonance et les indices de réfraction pour le premier et deuxième mode.

La sensibilité (S), est un aspect important dans la conception et l'analyse des capteurs RI à base de cristaux photoniques, elle peut être calculée comme S = Δλ / Δn (nanomètre par indice de réfraction (nm / RIU)), où Δλ désigne le décalage de la longueur d'onde de pic de résonance de la transmittance, et Δn représente la variation de l'indice de réfraction dans la structure du capteur photonique. En gardant les autres paramètres existants fixes, et en augmentant l'indice de réfraction entre n = 1 et n = 1,15, la sensibilité pour le premier mode est d'environ 106 nm / RIU et pour le second mode est d'environ 162 nm / RIU.

III.7 Guide d'onde avec couplage cavité en configuration anneau

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

Pour une meilleure caractérisation des performances d'un capteur RI à base de cristaux photoniques, la sensibilité (S) et la figure de mérite (FOM = S / $\Delta\lambda_{FWHM}$) avec FWHM est la largeur à mi-hauteur du pic de résonance, sont considérées comme les paramètres les plus importants, et doivent être, de préférence, aussi élevées que possible pour un capteur plus performant [40].

Dans le but d'amélioration des performances de notre biocapteur et l'augmentation de ses capacités à détecter les petites concentrations d'analyte et les variations dans ce dernier, nous présentons la conception et la modélisation d'un biocapteur à CPh basé sur une cavité à configuration anneaux. Cette dernière, fournit une excellente amélioration pour la sensibilité et le facteur de qualité. La structure proposée est composée d'un système d'un guide d'onde couplés à une cavité à configuration anneaux, Les paramètres des trous en forme d'anneau sont définis par leurs rayons internes et externes r_{in} = 0.085 µm (couleur jaune) et R = 0.185 µm (couleur rouge) respectivement (figure III.12).

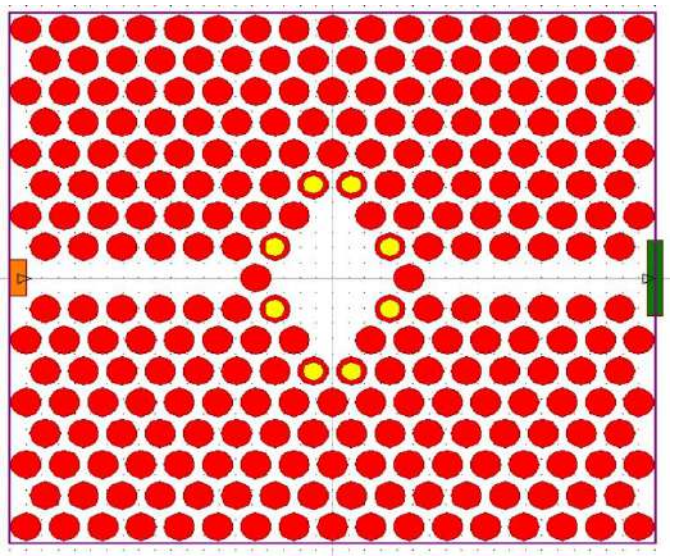


Figure III.12 : structure d'un couplage cavité en configuration anneaux/guide (2eme structure)

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

La figure III.13 représente le spectre de transmission du système couplé guide /cavité (lorsque l'air est sélectionné comme matériau de sous-détection à l'intérieur des trous) et la distribution du champ magnétique calculé par la méthode FDTD du logiciel Fullwave de la structure (2). Comme on peut le voir sur la figure III.13 (a), lorsque la cavité est en état de résonance, deux pics de transmission sont observés aux longueurs d'onde de résonance de 1.5523 et 1.5819 µm, correspondant aux premiers et deuxièmes modes de résonance du structure (2).

(a) (b)

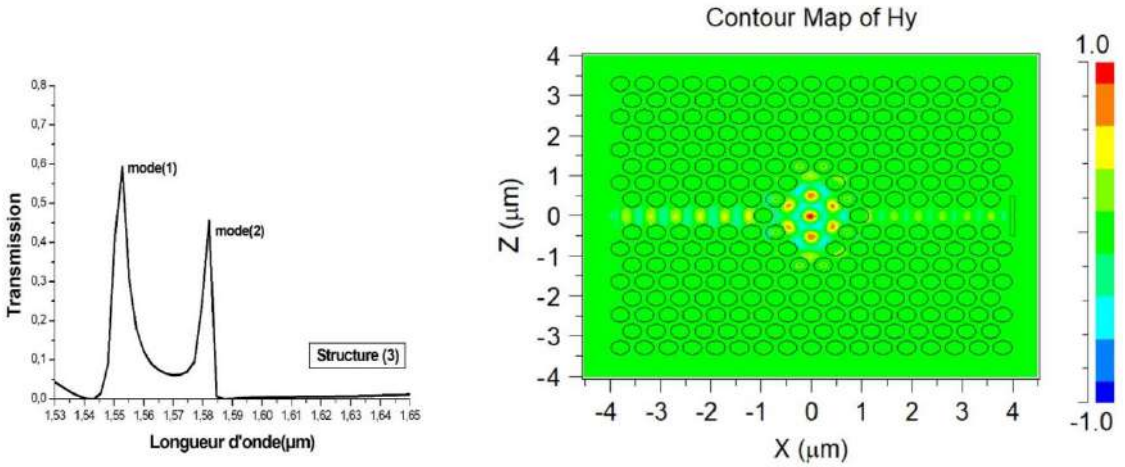


Figure III.13 :(a) spectre de transmission de la structure (3) couplage cavité/guide pour n=1, (b) la distribution du champ magnétique dans la cavité dans le plan x-z a $r_{ésonnance}$=1.5523µm

Dans la figure III.13 (b) il est clair que la lumière incidente avec la longueur d'onde de 1,59 µm, est couplée au résonateur à cavité et interdite ainsi de passer à travers le guide d'onde, sur cette figure on peut clairement voir que le champ est fortement confiné dans la zone annulaire de la cavité et il est plus renforcé que la première structure. Cela rend la cavité très sensible aux changements d'indice de réfraction en raison de la forte interaction lumière-matière.

(a) (b)

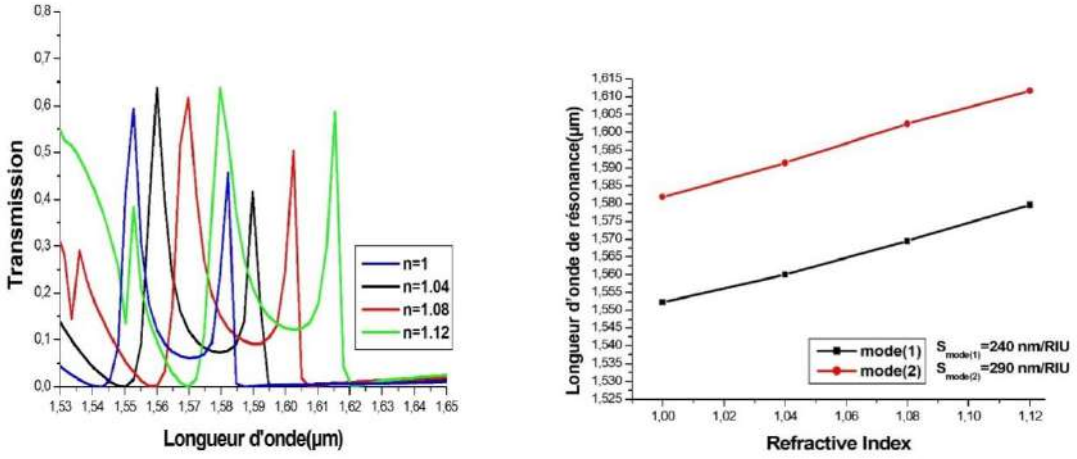


Figure III.14 : (a) le spectre de transmission de la structure pour différents indices de réfraction n a R=185nm, a=475nm et r_{in} =85nm, (b) la longueur d'onde de résonances en fonction de l'indice de réfraction n du matériau a détecter

La figure III.14(a) illustre les spectres de transmission de la structure (2) proposée pour différents indices de réfraction variant de 1 à 1,12 par pas de 0,04. 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. La figure III.14 (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 1,12 ; la sensibilité pour le premier mode est d'environ 240 nm / RIU et pour le deuxième mode est d'environ 290 nm / RIU.

III.7.3. Influence d'un rayon intérieur de l'anneau (r_{in}) sur la sensibilité du biocapteur

Ensuite, nous avons analysé l'impact de différentes valeurs de r_{in} sur les propriétés du biocapteur RI à base de cristaux photoniques, R est fixé avec la valeur de 185 nm pour la

prochaine analyse. Des spectres de transmission d'indice 1 pour des valeurs de r_{in} variant de 65 à 125 nm par pas de 20 nm sont présenté sur la figure III.15(a), l'augmentation de la valeur r_{in} est associée à une augmentation de la longueur d'onde de résonance. Cela signifie que la valeur de r_{in} provoque un décalage de la longueur d'onde de résonance, et le décalage pour le *mode 2* est plus grand que celui pour le *mode 1* en raison de pertes plus importantes.

Lorsque le rayon intérieur de l'anneau (r_{in}) augmente (Figure III.15 (b), nous observons une augmentation de la longueur d'onde de résonance.

(a) (b)

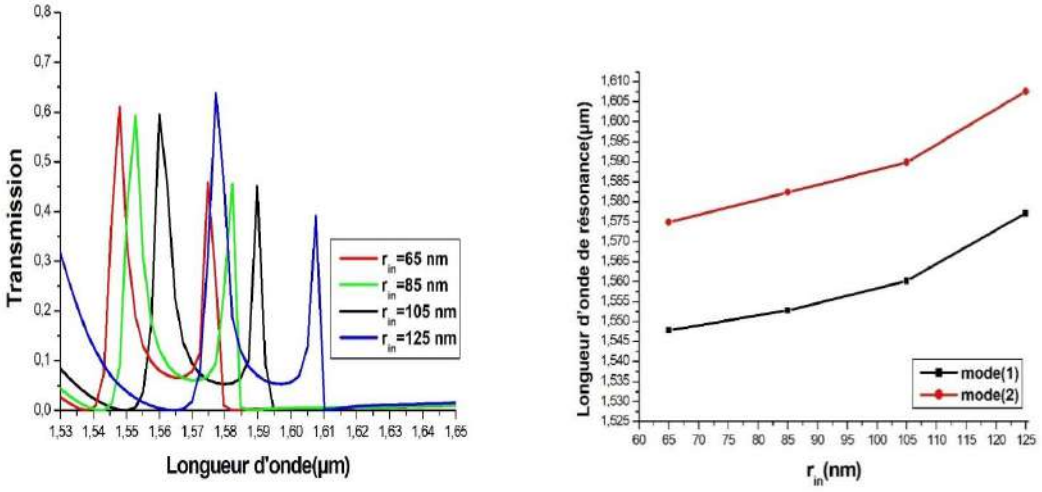


Figure III.15 : (a) les spectres de transmission de l'indice de réfraction 1 en fonction de r_{in}., (b) les longueurs d'onde de résonances en fonction de r_{in}.

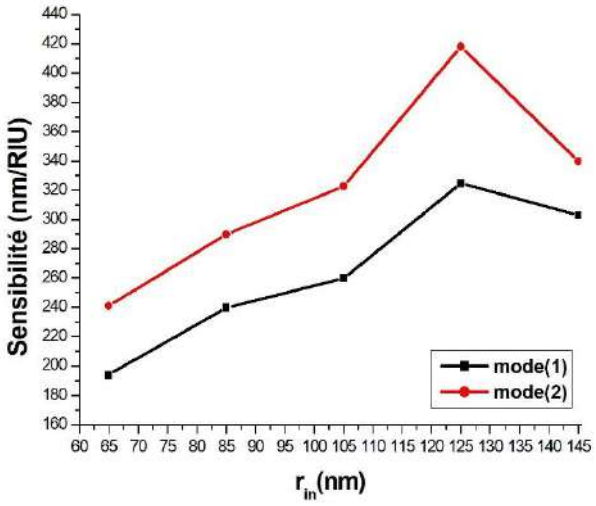


Figure III.16 : la sensibilité en fonction d'un rayon intérieur de l'anneau r_{in}.

Sur la figure III.16, il est clairement montré que plus la valeur de r_{in} est élevée (65-125 nm), meilleures sont les performances du capteur. De plus, une amélioration de la sensibilité du biocapteur est obtenue en augmentant la valeur de r_{in}, pour le *mode 1* la sensibilité est de 325 nm / RIU alors que dans le cas du *mode 2*, la sensibilité était de 418 nm / RIU, correspondant à la valeur de r_{in} = 145 nm, par rapport à la sensibilité de 194 nm / RIU pour le *mode 1* et 241 nm / RIU pour le *mode 2* où la valeur de r_{in} était 65 nm.

III.8. Exemple d'application : biocapteur de glucose

Comme exemple d'application de la dernière structure optimisée (2eme structure), nous étudierons, le biocapteur optofluidique pour la détection de la concentration en glucose [50] dans une solution aqueuse.

Pour simuler les conditions réalistes du biocapteur proposé, l'indice de réfraction de la solution de glucose est décrit comme [50] :

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

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

Pour analyser la relation entre le spectre de transmission et la concentration de glucose, un échantillon avec une concentration à la plage de 0 à 100 g/L est pris en compte dans la structure proposée du biocapteur. Le changement de l'indice de réfraction de la solution de glucose dans la structure du biocapteur modifie la longueur d'onde de résonance du spectre. Les résultats obtenus donnent des informations utiles concernant l'analyte pour l'analyse du capteur. Ici, l'indice de réfraction de l'échantillon est changé dans la plage 1,33230545– 1,34419445.

La figure III.17(a) montre un changement du spectre de la transmission du biocapteur pour le glucose dans la plage de concentration 0 à 100 g/L. Selon la figure III.17 (a), un décalage de (0.00125 μm (mode 1) et 0.0014 μm (mode 2)) dans le pic de résonance de sortie est calculé pour 25 g/L augmentation de la concentration de glucose. Les résultats de cette simulation montrent également que la sensibilité du biocapteur pour l'échantillon avec une concentration de glucose comprise entre 0 et 100 g/L est égal à $S_{mode\ 1}$ = 332 nm/ RIU et $S_{mode\ 2}$ = 429 nm/ RIU, ce qui est conforme à la plage d'indice de réfraction de l'échantillon : 1,33230545– 1,34419445.

Selon la figure III.17 (b), ce biocapteur a également une relation linéaire avec une augmentation de la concentration de glucose (gamme 0 - 100 g/L), qui peut être utilisé comme un capteur auto-étalonnage pour déterminer différentes concentrations de glucose.

(a) (b)

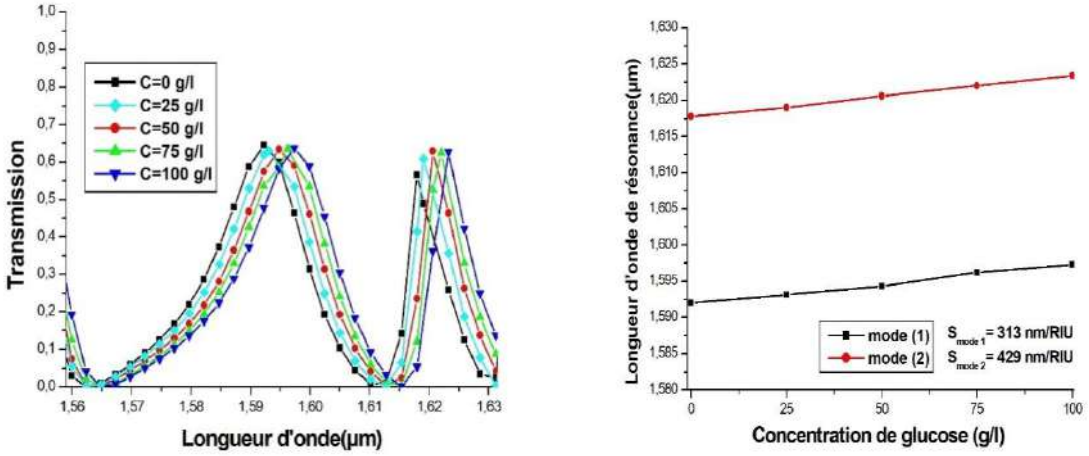


Figure III.17 : (a) spectre de transmission correspondant à la variation de la longueur d'onde de résonance en fonction des différents cas de concentration en glucose,(b) les longueur d'onde de résonances du bi capture en fonction de la concentration du glucose

IV.6. Comparaison du biocapteur RI proposé avec différents designs à bases CPs :

Références	Sensibilité (nm/RIU)	l'année
[41]	293	2012
[36]	260	2015
[38]	510	2021
Dans ce travail	429	2022

III.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons proposé une structure à cristaux photonique à base d'indice de réfraction (IR) pour la réalisation d'un biocapteur. Dans la première partie nous avons présenté la structure générale de notre biocapteur en utilisant un réseau de trous d'air hexagonal percés dans une membrane Silicium, le principe d'ouverture de bandes interdites photoniques et la carte des bandes qui permet de sélectionner les paramètres du cristal et le type de structure à étudier dans le cadre de ce mémoire. Ensuite Nous avons introduit un défaut linéaire dans un cristal photonique bidimensionnel et a partir des simulations PWE et FDTD nous avons observé clairement le guidage de la lumière dans le long du défaut W1 réalisée suivant la direction ΓK

Dans la deuxième partie nous avons introduit une structure du biocapteur, basée sur couplage guide et une cavité. A base de simulateur fullwave nous avons clairement vu que le champ est fortement confiné dans la zone annulaire de la cavité. Une étude a été faite pour le changement de la longueur d'onde et la sensibilité *S* en fonction de du changement du l'indice de réfraction, ensuite nous avons trouvé que cette structure a permis d'obtenir sensibilité acceptable (106 nm / RIU pour mode1 et 162 nm / RIU pour mode 2). Afin d'améliorer la sensibilité du notre biocapteur ; nous avons proposé une nouvelle conception à base de cavité en configuration anneaux, Cette structure a permis d'augmenter la sensibilité à 325 nm / RIU pour mode1 et 418 nm / RIU pour mode 2. Enfin nous avons montré que ce dispositif peut être destiné à la détection de faible concentration de glucose dans une solution aqueuse avec une sensibilité très prometteuse (332 nm / RIU pour mode1 et 429 nm / RIU pour mode 2).

Conclusion

Conclusion générale :

Les cristaux photoniques ont prouvé, Ces dernières années ; leur utilité dans le domaine de télécommunications et des capteurs. Les cristaux photoniques sont des structures où l'indice de réfraction varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde dans une, deux ou trois directions de l'espace. Le développement de détecteurs et bio-détecteurs optiques a connu un grand progrès. Bien que les recherches en soient encore à un stade précoce ; l'intérêt que présentent ces structures photoniques pour une telle application peut se révéler très avantageux. De ce fait, différentes techniques et configurations sont constamment développées et optimisées afin d'augmenter les performances de détection.

L'objectif de cette étude est la conception d'un capteur de la concentration en glucose à base des cristaux photoniques bidimensionnels (CPs-2D) pour des applications biomédicales ayant une haute sensibilité. Pour atteindre cet objectif, nous avons suivi les étapes suivantes :

Dans la première étape, nous avons parlé sur les caractéristiques générales des cristaux photoniques, leurs définitions, leurs différents types, leurs principes de fonctionnement et leurs applications.

Dans une seconde étape, nous avons fait une étude des caractéristiques générales et des principes de fonctionnement des différents types de capteurs. Puis on s'est focalisés sur l'étude des capteurs d'indice de réfraction (RI) à base de CPhs.

La dernière étape a été consacrée pour les résultats obtenus au cours de notre travail. Au début, nous avons parlé des principales techniques utilisées (la FDTD et la PWE). Ainsi que l'outil de simulation RSoft et ses modules Fullwave et BandSOLVE. . Ensuite, nous avons proposé une structure, avec définition de ses caractéristiques (période, rayon de trous r, forme de la cavité et des formes des guides d'ondes inclus) et son GAP optique afin de définir la plage de longueur d'onde dans laquelle, elle doit être exploitée. Après, 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, ce qui forme un guide d'onde permettant de traiter toute l'information sous forme lumineuse. 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 (106 nm / RIU pour mode1 et 162 nm / RIU pour mode 2). Afin d'améliorer la

sensibilité du notre capteur biomédicale, nous avons proposé une nouvelle conception basée sur le couplage cavité/guide (la cavité ici a une configuration anneaux) Cette structure a permis d'augmenter la sensibilité à 325 nm / RIU pour mode1 et 418 nm / RIU pour mode2.

Enfin, nous avons déterminé notre travail par la présentation d'un exemple pratique bien utilisé dans le domaine biomédical représenté par le biocapteur de glucose qui calcule la concentration de glucose dans une solution aqueuse. Nous avons obtenu des résultats très satisfaisants (S_{mode1} =332 nm / RIU et S_{mode2}= 429 nm / RIU).

En perspective, nous incitons les PFEs des promotions à venir, à découvrir d'autres designs pour ce capteur et/ou de faire d'autres processus d'optimisation comme celle des dispositions et des longueurs des guides d'ondes d'entré et de sortie, afin de garantir un meilleur couplage entre la source et la cavité et aussi avoir un meilleur facteur de qualité.

Bibliographie:

[1] E. Yablonovitch, “Inhibited spontaneous émission in solide state physics and electronics’’, Physical Review Letters 58(20), 2059-2062 (1987).

[2]S. John, ‘Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics’ Physical Review Letters 58, 2059 (1987).

[3]E. Yablonovitch, T.J. Gmitter, and K.M. Leung. “Physical Review Letters 67(17), 2295–2298 ”.

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

[5] C.J.M. Smith t al, “Coupled guide and cavity in a two-dimensional photonic crystal”. Applied physics letters (2001).

[6] ABRI née BADAOUI Hadjira, “Etude et Conception des Micro - composants à Base des Cristaux Photonique Bidimensionnels”, Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Décembre 2012.

[7] Ahlem.BENMERKHI<>, thèse de doctorat, université mentouri – Constantine, mai 2012.

[8] BOUGRIOU F, Etude théorique des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels: applications dans le domaine de guidage optique et la détection, université de Constantine, 2013

[9] Azzedine Boudrio, Optique intégrée théorie et applications, Hermes sciences.

[10] rafraf asma, Etude et modélisation d’un Biocapteur à base de cristaux photoniques ; UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA ; 2019

[11] F. BOUGRIOU, Etude théorique des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels: applications dans le domaine de guidage optique et la détection, université de Constantine, 2013.

[12] M. Banihashemi, V. Ahmadi, Nonlinear réponse of high efficient in-plane channel drop filter in Si heterostructure photonic crystal slab, J. Mod. Opt. 58 (7) (2011) 587–592.

[13] A. Harhouz, A. Hocini, Design of high-sensitive biosensor based on cavity-waveguides coupling in 2D photonic crystal, J. Electromagn. Waves Appl. 29 (5) (2015) 659–667.

[14] M. Koshiba, S. Membre, and A. Abstract, "Wavelength Division Multiplexing and Demultiplexing With Photonic Crystal Waveguide," vol. 19, no. 12, pp. 1970–1975, 2001.

[15] M. Berggren, A. Dodabalapur, R.E. Slusher, Z. Bao, A. Timko et O. Nalamasu"Organic Lasers Based on Lithographically Defined Photonic-Bandgap Resonators," Europhys. Lett., vol.34 pp.90, 1998.

[16] B. Temelkuran, M. Bayindir, E. Ozbay, R. Bizwas, M. M. Sigalas, G. Tuttleet K. M. Ho, "Photoniques Crystal-Based Resonant Antenna with a Very High Directivity", J. Appl. Phys, vol.87, pp. 603, 2000

[17] 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.

[18] Hervé RIGNEAULT « la nano photonique » GET et Lavoisier, Paris, 2005.

[19]. [20] MALACHE. H. MAHI.A Nouvelles Structures Des Démultiplexeurs En Cristaux Photoniques 2D Pour Les systèmes Très Hauts Débits, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen.

[21] N, Susumu, "TDM TWO-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL OPTICAL MULTIPLEXER/DEMULTIPLEXER," JAPAN SCIENCE AND TECHNOLOGY AGENCY, Octobre 1997.

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

[23**]** N. Jaffrezic-R.C. Martelet. P. Clechet. « Capteurs chimiques et biochimiques ». In Techniques de l'Ingénieur, Vol. R 420. Paris : Techniques de l'Ingénieur, Pp R 420-14,2001.

[24] Georges Asch, Bernard poussery « les Capteurs en instrumentation industriels 8eme édition», DUNOD 2017.

[25] BougriouFeida, « Etude theorique des materiaux a bandes Interdites photoniques bidimensionnels : Applications dans le domaine du guidage Optique et la détection », thèse de doctorat Universite Constantine 1,16 décembre 2013.

[26] Yacouba Sanogo « conception et fabrication de capteur et de leur technique dinterogation pour des applications dons les domaines de la santé et de l'enivrement » thèse de doctorat, 26 May 2014, P16.

[27] P.Poulichet «Cours sur l'électronique de conditionnement du capteur» GROUBE ESIEE PARIS Novembre 2006.

[28] 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.

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

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

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

[32] 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.

[33] 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.

[34] Chakravarty, Swapnajit, et al. "Multiplexed specific label-free detection of NCI-H358 lung cancer cell line lysates with silicon based photonic crystal microcavity biosensors." Biosensors and Bioelectronics 43 (2013) : 50-55.

[35] ABRI née BADAOUI Hadjira, "Etude et Conception des Micro - composants à Base des Cristaux Photonique Bidimensionnels", Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Décembre 2012

[36] HARHOUZ Ahlam, '' Contribution à l'étude et la conception des capteurs à base de cristaux photoniques, Thèse de Doctorat, Université de Mohamed Boudiaf - M'sila, avril, 2017

[37] Ahlem.BENMERKHI<>, thèse de doctorat, université mentouri – Constantine, mai 2012.

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

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

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

[41] F. Hosseinibalam, S. Hassanzadeh, A. Ebnali-Heidari, C. Karnutsch, "Design of an optofluidic biosensor using the slow-light effect in photonic crystal structure", Appl. Opt, vol.51, pp.568–576, 2012.

الملخص:
.البلورات الفوتونية هي بنية مركبة تتميز بمعامل انكسار دوري في اتجاه واحد، اتجاهين او ثلاث اتجاهات من الفضاء، دورية معامل الانكسار تؤدّي الى ظهور مجالات ضوئية ممنوعة التي لا يمكن للضوء أن ينتشر خلالها بغض النظر عن استقطابه و جهة انتشاره. كان للبلورات الفوتونية اهتماما كبيرا في البحث العلمي الذي أدى إلى اكتشاف سريع جدا لعدد كبير من مجالات تطبيقها، من بينها ؛ مجال القياس . في الواقع وفي الوقت الحاضر، تستعمل البلورات الضوئية في تركيبة مجموعة واسعة من أجهزة الاستشعار، ومسح جميع القيم الفيزيائية القابلة للقياس تقريبا، وبالأخص الضغط والظواهر الفيزيائية، ويدخل عملنا في هذا الإطار.
في هذا العمل تطرقنا إلى دراسة و تصميم استشعار حيوي لتركيز الغلوكوز على أساس البلورات الضوئية
الكلمات المفتاحية :البلورات الفوتونية ثنائية الابعاد -اجهزة الاستشعار -موجه الموجة في البلورات الفوتونية –الحساسية.

Résumé :
Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice diélectrique varie périodiquement selon une ou plusieurs directions de l'espace. Cette variation périodique de l'indice optique entraîne l'apparition de bandes interdites photoniques : gammes de fréquences pour lesquelles la lumière ne peut pas se propager dans la structure, quelle que soit sa polarisation et sa direction de propagation. Les cristaux photoniques ont suscité un grand intérêt dans la recherche scientifique qui a conduit à la découverte très rapide d'un grand nombre de leurs domaines d'application, notamment ; champ de mesure. En effet, à l'heure actuelle, les cristaux optiques entrent dans la composition d'une large gamme de capteurs, balayant la quasi-totalité des grandeurs physiques mesurables, notamment la pression et les phénomènes physiques, et nos travaux s'inscrivent dans ce cadre.
Dans ce travail nous avons discuté de l'étude et de la conception d'un biocapteur de la concentration en glucose à base des cristaux photonique.
Mots clés : cristaux photoniques bidimensionnels – les capteurs - guide d'ondes à CP.

Abstract:
Photonic crystals are a complex structure characterized by a periodic refractive index in one, two or three directions of space. The periodicity of the refractive index leads to the emergence of forbidden light fields through which light cannot propagate, regardless of its polarization and direction of propagation. Photonic crystals have had a great interest in scientific research which has led to a very rapid discovery of a large number of their application fields, including; measurement field. In fact, at present, optical crystals are used in the composition of a wide range of sensors, scanning almost all measurable physical values, especially pressure and physical phenomena, and our work falls within this framework

In this work, we dealt with the study and design of a biosensor for glucose concentration on the basis of photonic crystals.
Keywords: two-dimensional photonic crystals - sensors - CP waveguide-sensitivity