

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Faculté des Nouvelles Technologies de
L'information Et de la Communication
Département d'Electronique et Des
Télécommunication



DOMAINE : Sciences et Technologies
FILIERE : Télécommunications
SPECIALITE : Systèmes des
Télécommunications

Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique

Présentée par

✓ MAAMRI MOHAMMED ALI

✓ BRIKI ANIS

Thème

ÉTUDE DES CAPTEURS À CRISTAUX PHOTONIQUES PLANAIRES

Soutenu publiquement le : 14/6/2022

Soutenu devant le jury composé de :

m.Belhedri Abdelkrim

Université kasdi Merbah – Ouargla

Président

m. Otmani Hamza

Université kasdi Merbah – Ouargla

Encadreur

m.Moad Sayah

Université kasdi Merbah – Ouargla

Examineur

Année Universitaire : 2021-2022

Remerciement

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a aidés dans nos études et nous a donné la force, la patience et la volonté d'accomplir ce Modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre gratitude à notre encadreur **Mr. Hamza Otmani** pour ses conseils, son aide et son infinie patience tout au long de la période d'achèvement de ce travail. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions. Nous adressons également nos remerciements à tous nos enseignants pendant nos études et à tous les employés du Département d'Electronique et Des Télécommunication.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude

À celle qui m'a enseigné l'ambition...ma mère. À l'a personne devant laquelle tous les mots de l'univers sont incapables d'exprimer mon amour et mon affection pour elle, à l'être qui m'est le plus cher, à ma chère mère. Mère, si tu savais combien je t'aime.

À mon cher père qui a payé d'amour et de sacrifices le prix de ma façon de penser. Père, je te remercie d'avoir fait de moi un homme.

À mes chers frères et sœurs.

À tous mes amis et mes collègues de promos et tous mes enseignants tout au long de mes études.

À tous ceux qui, de loin ou de près, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Briki Anis

Dédicace

Je veux remercier mon dieu jour et nuit pour son succès. Il m'a donné la patience et le pouvoir et la volonté, pour en arriver ici Aujourd'hui.

Où est-ce que je mets cet humble travail entre vos mains.

Je dédie ce travail simple à ceux qui ont été m'ont fait exister à mon père et ma chère maman, et je suis très content pour se tenir à côté de moi et veiller tard pour réussir mes études, et leur souci d'obtenir un niveau supérieur d'instruction et éducation...mon oncle (AMAR) ou comme on l'appelle (DJAMEL) sans, je n'aurais pas atteint ce niveau, je le dédie aussi à tous mes frères et mes sœurs et ma famille et n'oublie pas mes professeurs qui m'a appris dès la première année à ce jour.

Je soumetts ce travail avec mes sincères à mon collègue qui m'a accompagné et partage le avec moi monsieur "BRIKI ANIS" et toute sa famille, ainsi que tous mes amis, et tous ceux qui ont faveur de près ou de loin, ont participé avec moi.

Maamri Mohammed Ali

SOMMAIRE

SOMMAIRE	I
Liste Des Figures	III
Liste Des Tableaux	VII
Liste des Symboles	VIII
Liste des Acronymes	IX
Introduction générale	1
I-2. Etude sur les Cristaux Photoniques :	3
I-2.1. Les Cristaux Photoniques naturels	4
I-2.2. : Analogie électron-Photon :	7
I-3. Types des Cristaux Photoniques :	8
I-3.1. Les Cristaux Photoniques Unidimensionnels (CPs-1D) :	8
I-3.1.1. Contraste D'indice	9
I-3.1.2. La Période	9
I-3.1.3. Facteur de Remplissage	10
I-3.2. Les Cristaux Photoniques Bidimensionnels (CPs-2D) :	12
I-3.3. Les Cristaux Photoniques Tridimensionnels (CPs-3D) :	15
I-3.3.1. Structure de yablonovite	15
I-3.3.2. Structure tas de bois :	16
I-4. Domaines d'utilisation Cristaux Photoniques	17
I-5. Capteurs à Cristaux Photoniques	18
I-6. Conclusion	19
Références bibliographies du chapitre I	20
II.1. Introduction sur les capteurs	22
II.2. Structure d'un capteur	22
II.2.1. Le corps d'épreuve	22
II.2.2. Transducteur	22
II.3 Cristaux photoniques pour la détection optique	23
II.3.1. Introduction	23
II.3.2. Capteurs à cristaux photoniques planaires	23

II.3.3. Capteurs PhC basés sur l'indice de réfraction (RI).....	24
<i>II.4. Conclusions</i>	43
<i>Références bibliographiques du chapitre II</i>	45
<i>III.1. Introduction</i>	47
<i>III.2. La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)</i>	47
<i>III.3. La méthode des ondes planes (PWE)</i>	47
<i>III.4. Description du logiciel</i>	48
<i>III.5. Structure utilisée</i>	50
<i>III.6. Diagramme des bandes interdites photoniques</i>	51
<i>III.7. Variation de la bande interdite photonique en fonction de l'indice de réfraction</i>	52
III.7.1. Pour la polarisation TE	53
III.7.2. Pour la polarisation TM	54
<i>III.8. Cavités à cristaux photoniques</i>	56
III.8.1. Confinement de la lumière à cavité en cristal photonique 2D.....	57
III.8.2. Variation de confinement de la lumière à cavité en fonction de la polarisation.....	58
III.8.3. Variation de confinement de la lumière à cavité en fonction de l'indice de réfraction « n »	58
III.8.3.1. Pour la polarisation TE :	58
III.8.3.2. Pour la polarisation TM.....	59
III.8.4 Variation de la transmission en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de l'indice de réfraction.....	61
III.8.4.1 Pour la polarisation TE.....	61
III.8.4.2 Pour la polarisation TM.....	62
III.8.5. Utilisation des cavités à cristal photonique pour la détection (capteurs) :.....	63
III.8.5.1 Capteurs basés sur l'indice de réfraction :	63
III.8.5.2 Couplage guides –cavité.....	64
<i>III.9. Conclusion</i>	69
<i>Références bibliographiques du chapitre III</i>	70
<i>Conclusion Générale</i> :	71

Liste Des Figures

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

Figure I.1 : Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D), tridimensionnels (3D) 4

Figure I.2: Une vue microscopique d'une structure de cristal photonique naturel papillons: 5

Figure I.3: Plume de paon. L'encadré de droite est une image prise au microscope électronique à balayage (MEB) de la coupe d'une barbule verte 5

Figure I.4 : Exemples de réalisations naturelles de structures périodiques. Ces structures apparaissent chez certaines espèces animales et minérales comme les souris de mer:..... 6

Figure I.5: Image au microscope électronique d'une opale naturelle constituée d'un réseau quasi-périodique de billes de silice 6

Figure I.6: Schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un empilement de couches d'épaisseurs 8

Figure I.7: Représentation schématique de l'interface des ondes réfléchies par chaque dioptre 9

Figure I.8: (a) Relation de dispersion d'un cristal photonique unidimensionnel (miroir de Bragg) à incidence normale : une bande d'énergie interdite apparaît en bord de zone de Brillouin (b) Incidence oblique 11

Figure I.9: Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée 12

Figure I.10: Image MEB d'un cristal photonique gravé dans une hétéro structure 13

Figure I.11: Représentation (a) d'un réseau carré (b) d'un réseau triangulaire (c) d'un réseau hexagonal 14

Figure I.12 : Structure des cristaux photoniques tridimensionnels 15

Figure I.13 :(a) Structure de yablonovite (b) Image MEB d'une structure Yablonovite en PMMA 16

Figure I.14 : Structure tas de bois..... 16

Figure I.15 : Dispositifs à base de cristaux photoniques 2D. (a) Coupleur directionnel ;(b) Biocapteur ;(c) Diviseur de puissance ;(d) Filtre ;(e) Démultiplexeur ;(e) Double virage.. 17

Figure I.16 : a) vue au microscope électronique à balayage d'une microcavité à cristal photonique intégrée avec deux guides d'ondes ruban, (b) spectres de transmission normalisés de la microcavité, (c) vue au microscope électronique à balayage de guide d'ondes à cristal photonique (PCW) sur SOI, (d) spectres de transmission mesurés pour quatre solutions d'indices différents 17

Chapitre II : Les capteurs à cristaux photoniques

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

Figure II.2 : Structure d'un capteur 22

Figure II.3. a) détection de surface et (b) détection homogène. Les molécules sondes (bleues) sont déposées sur les surfaces des trous et les molécules cibles (rouges) sont capturées par des récepteurs formant une couche adjectice sur la surface du capteur. 25

Figure II.4. Micro cavité PhC (a) réalisée en supprimant sept trous comme défaut de ligne (cavité L7) et section transversale (b). 27

Figure II.5 . Zoom de la région de la cavité de la cavité L7. 27

Figure II.6 : Impact du changement de l'indice de réfraction de l'environnement des tiges sur la longueur d'onde de résonance 28

Figure II.7. Cavité PhC Air-slot avec zoom de fente dans la fente. 29

Figure II.8. Structure schématique du capteur pour la détection d'eau de mer 30

Figure II.9. Coupe transversale (a) et vue de dessus (b) du capteur PhC basé sur la cavité du pont d'air..... 31

Figure II.10. Structure de la cavité H_0 avec le zoom de la disposition des trous 33

Figure II.11. Réseau de cavités résonnantes H_0 34

Figure II.12. Myrocavité à cristaux photoniques 1D..... 35

Figure II.13. Vue de dessus du dispositif PhC avec une sphère de latex dans le défaut central de la microcavité..... 37

<i>Figure II.14. Schéma du capteur d'ADN à base de PhC caractérisé par des guides d'ondes monomodes d'entrée et de sortie de 500 nm de large.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure II.15. Capteur de guide d'onde à cristal photonique avec trous sensibles.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure II.16. a) Haut et (b) vue en coupe du capteur de guide d'ondes à cristal photonique pour la détection de gaz.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure II.17.MZI avec guide d'onde à cristal photonique à fente (a) et vue en coupe transversale (b).....</i>	<i>41</i>
<i>Figure II.18. Schéma d'un appareil MMI 1x4</i>	<i>42</i>

Chapitre III : Résultats de Simulation

<i>Figure III.1. Procédure de simulation dans Opti-FDTD</i>	<i>49</i>
<i>Figure III.2 : plateforme de logicielle Opti-FDTD.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure III.3: la structure de cristal photonique bidimensionnel utilisé</i>	<i>51</i>
<i>Figure III.4 : Diagramme de bande d'un réseau hexagonal, polarisation TE</i>	<i>52</i>
<i>Figure III.5 : Diagramme de bande d'un réseau hexagonal, polarisation TM</i>	<i>52</i>
<i>Figure III.6: Diagramme de bande d'un réseau hexagonal avec $n= 3.4777$, polarisation TE</i>	<i>53</i>
<i>Figure III.7 : Diagramme de bande d'un réseau hexagonal avec $n= 3.4577$, polarisation TE</i>	<i>53</i>
<i>Figure III.8 : Diagramme de bande d'un réseau hexagonal avec $n= 3.4377$, polarisation TE</i>	<i>54</i>
<i>Figure III.9 : Diagramme de bande d'un réseau hexagonal avec $n= 3.4777$, polarisation TM</i>	<i>54</i>
<i>Figure III.10 : Diagramme de bande d'un réseau hexagonal avec $n= 3.4577$, polarisation TM.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure III.11 : Diagramme de bande d'un réseau hexagonal avec $n= 3.4377$, polarisation TM.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure III.12 : Cristal photonique à base de structure hexagonal avec un défaut ponctuel (cavité).....</i>	<i>57</i>

<i>Figure III.13 : Type de cavité (H2)</i>	57
<i>Figure III.14 : a) confinement de la lumière dans la polarisation TE, b) confinement de la lumière dans la polarisation TM</i>	58
<i>Figure III.15 : Confinement de la lumière à cavité, avec $n=3.4777$</i>	58
<i>Figure III.16 : Confinement de la lumière à cavité, avec $n=3.4577$</i>	59
<i>Figure III.17 : Confinement de la lumière à cavité, avec $n=3.4377$</i>	59
<i>Figure III.18 : Confinement de la lumière dans la polarisation TM, avec $n=3.4777$</i>	59
<i>Figure III.19 : Confinement de la lumière dans la polarisation TM, avec $n=3.4577$</i>	60
<i>Figure III.20 : Confinement de la lumière dans la polarisation TM, avec $n=3.4377$</i>	60
<i>Figure III.21: la transmission en fonction de la longueur d'onde avec $n= 3.4777$</i>	61
<i>Figure III.22 : la transmission en fonction de la longueur d'onde avec $n= 3.4577$</i>	61
<i>Figure III.23 : la transmission en fonction de la longueur d'onde avec $n= 0.4377$</i>	61
<i>Figure III.24 : la transmission en fonction de la longueur d'onde avec $n= 3.4777$</i>	62
<i>Figure III.25 : la transmission en fonction de la longueur d'onde avec $n= 3.4577$</i>	62
<i>Figure III.26 : la transmission en fonction de la longueur d'onde avec $n= 3.4377$</i>	62
<i>Figure III.27. Structure de couplage guides cavité</i>	65
<i>Figure III. 28. Propagation de la lumière dans la structure de couplage guides cavité</i>	65
<i>Figure III. 29 : la transmission en fonction de la longueur d'onde à différents points (a),(b),(c),(d)et(e)</i>	67
<i>Figure III. 30 : Différentes points d'observation de la transmission</i>	67
<i>Figure III. 31 : Informations sur la transmission</i>	68

Liste Des Tableaux

Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques

Tableau I : Caractéristiques géométriques principales des réseaux bidimensionnels carré et triangulaire..... 14

Chapitre III : Résultats de Simulation

Tableau III.1 : Les valeurs de largeur de la bande interdite photonique et leur emplacement, pour chaque valeur de l'indice de réfraction avec les deux polarisations TE et TM..... 56

Tableau III.2: variation de la longueur d'onde en fonction des indices de réfraction pour les deux polarisations TE et TM..... 63

Tableau III.3: La sensibilité du capteur pour divers décalages de l'indice de réfraction du milieu entourant les tiges du dispositif 64

Liste des Symboles :

\vec{E} : Champ électrique

\vec{H} : Champ magnétique

V : Potentiel

r : Rayon du cristal photonique

ϵ : Permittivité diélectrique du matériau (ϵ_0 : Permittivité diélectrique du vide)

μ : Perméabilité magnétique du matériau (μ_0 : Perméabilité magnétique du vide)

t : les dépendances temporelles

n : Indice de réfraction

ω : La fréquence radiale

λ : Longueur d'onde

S : Sensibilité

Δ_n : la variation de l'indice de réfraction

L : la longueur du guide d'onde

T : le spectre de transmission

Liste des Acronymes :

CP : Cristal Photonique

PhCs : Les cristaux photoniques

BIP: Bande interdite photonique

PBG: Photonic Band Gap

TM : Transverse Magnétique

TE : Transverse Electrique

FDTD-2D : Méthode des différences finies dans le domaine temporel à deux dimensions

PWE : La méthode de décomposition en onde plane (Plane Wave Expansion)

1D : Unidimensionnelles

2D : Bidimensionnelles

3D : Tridimensionnelles

CMOS : Technologie de fabrication de composants électroniques (Complementary MetalOxide Semiconductor)

MEMS : Microsystème électromécanique (Micro-Electro-Mechanical Systems)

GO : Guide d'onde

RI : Indice de Réfraction

Opti-FDTD : Logiciel de simulation

OSA : analyseur de spectre optique

SPR : Résonance Plasmonique de Surface

RIU : Unité d'Indice de Réfraction (Refractive Index Unit)

SOI: Le silicium sur isolant

UPML: Uniaxial Perfect Matched Layer

PML: Perfect Matched Layer

PD: photodetector

Mid-IR: Moyen infrarouge.



Introduction Générale

Introduction générale :

L'année 1987 a été témoin de la proposition de l'idée des cristaux photoniques par le scientifique E. Yablonovitch et S. John, et quatre ans plus tard, le premier cristal photonique a été fabriqué. Depuis cette époque à ce jour, des travaux ont été réalisés pour développer ces cristaux et des études sont toujours en cours. Afin de les améliorer. Et l'invention d'appareils qui dépendent dans leur travail de ces cristaux, et ce qui a à voir avec eux. Peut-être parmi les plus importantes de ces inventions sont les capteurs à cristaux optiques, ces derniers ont été développés à partir de capteurs électroniques traditionnels qui ne conviennent pas à certains travaux et ne peuvent être présents partout.

Les cristaux photoniques tirent leur nom du fait qu'ils sont similaires aux cristaux ordinaires en termes de structure, car ils alignent périodiquement les atomes en trois dimensions lorsque les cristaux tridimensionnels imposent des restrictions sur la propagation de la lumière et peuvent parfois l'empêcher de se propager. Les électrons sont à l'intérieur, ce sont donc des semi-conducteurs, et cette propriété anti-prolifération est utilisée dans la fabrication de filtres optiques, et la différence de propagation avec une polarisation différente peut être utilisée dans la fabrication de disjoncteurs photoniques. Les cristaux optiques leur ont trouvé une place dans le domaine de l'optique, grâce aux inventions qui en sont issues, comme les séparateurs de faisceau, qui présentent de nombreux avantages, comme diviser la même quantité de lumière du signal reçu en deux, quatre ou huit canaux de sortie avec une perte minimale, et c'est ce qui a beaucoup aidé l'homme par la suite.

L'objet de ce travail est l'étude des capteurs à cristaux photoniques planaires.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre, consacré à généralités sur les cristaux photoniques. En premier lieu, Nous commençons par étudier les cristaux photoniques à partir des définitions et concepts de base, en parlant les CPs naturels et analogie entre l'électron et le photon. Ensuite, nous présentons un aperçu des différents types de cristaux photoniques, puis nous citons les différents domaines d'utilisation des CPs. Enfin, nous parlerons de certains des concepts des capteurs à cristaux photoniques, qui font l'objet de notre étude.

Le deuxième chapitre, nous présentons en détail les capteurs à cristaux photoniques.

Dans le dernier chapitre, nous présentons une définition de deux méthodes de simulation sur lesquelles nous nous appuyons dans notre étude : la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD), la méthode des ondes planes (PWE) respectivement, puis nous fournissons une description sur logiciel de simulation « Opti-FDTD » que nous utilisons dans notre travail. Puis nous présentons les résultats de simulation pour notre travail, qui consiste à concevoir un nouveau type de capteur optique à cristal, à l'aide du logiciel de simulation Opti-FDTD, nous réalisons une cavité dans la structure cristalline et étudions l'effet de la différence d'indice de réfraction RI sur la longueur d'onde de résonance et la sensibilité de notre capteur et étudier la bande interdite photonique de valeurs différentes pour l'indice de réfraction avec les deux polarisation TE et TM. Nous suggérons également une autre structure pour comparer la sensibilité dans différentes structures.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale sur les travaux obtenus.

Chapitre : I

*Généralités sur les
cristaux photoniques*

I-1. Introduction :

Les cristaux photoniques (CP) ou matériaux à bande interdite photonique désignent des structures synthétiques dont la constante diélectrique (indice de réfraction) varie périodiquement sur la gamme de longueur d'onde, cette propriété se traduit par la non-diffusion des photons dans une gamme spectrale spécifique (BIP). Grâce aux propriétés qui distinguent les cristaux photoniques, il a ouvert la porte à de nouveaux domaines de recherche ce qui a conduit au développement de nouveaux capteurs (capteur à cristal photonique) plus rapides, plus précis et plus simples. Contrairement aux capteurs électroniques, ils sont autorisés à fonctionner dans des environnements qui ne peuvent pas être contrôlés ou accessibles.

Ce premier chapitre a pour objet de présenter brièvement les notions de base concernant les cristaux photoniques et des capteurs. Nous allons commencer par étudier sur les cristaux photoniques à travers la présentation d'un ensemble de notions et de définitions, les différents types des cristaux photoniques, Domaines d'utilisation, capteurs à cristaux photoniques.

I-2. Etude sur les Cristaux Photoniques :

La notion de "cristaux photoniques" a été proposée pour la première fois en 1987 [1,2]. Le premier cristal photonique a été réalisé en 1991[3].

Les cristaux photoniques sont des matériaux à nanostructures isolées électriquement dont l'indice de réfraction varie périodiquement sur l'échelle des longueurs d'onde selon une ou plusieurs dimensions de l'espace. Il possède de nombreux phénomènes intéressants, tels que le contrôle de l'auto-émission d'atomes élevés dans les cristaux photoniques, et possède des propriétés submicroniques qui permettent un contrôle sans précédent sur le confinement et la propagation de la lumière. Ces structures artificielles sont classées en unidimensionnelles (1D), bidimensionnelles (2D) et tridimensionnelles (3D), cette dernière étant la plus efficace des trois mais difficile à fabriquer.

La principale propriété des cristaux photoniques est d'interdire à la lumière (photons) de se propager dans une direction et une bande de fréquences spécifiques, appelée la bande interdite photonique (BIP en français, PBG en anglais), cette propriété est similaire à celle que l'on trouve dans les semi-conducteurs, appelée Phénomène d'ouverture de bande interdite électronique.

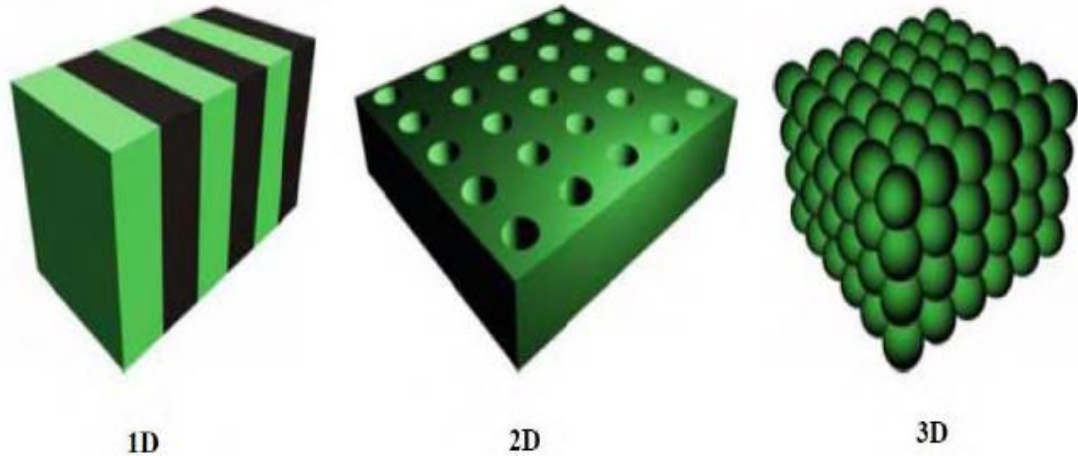


Figure I.1 : *Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D), tridimensionnels (3D)*

I-2.1. Les Cristaux Photoniques naturels :

Les structures photoniques sont apparues dans la nature il y a plusieurs centaines de millions d'années. Dans le monde vivant, la couleur est utilisée pour la communication et cette fonction importante impacte fortement les chances individuelles de survie ainsi que les chances de se reproduire. Cela a une influence statistique sur les populations d'espèces. Par conséquent, parce qu'elles sont impliquées dans l'évolution, les structures génératrices de couleurs naturelles sont – d'un certain point de vue – hautement optimisées. Ces structures cristaux photonique naturelles se trouvent dans les insectes, les araignées, les oiseaux, les poissons, d'autres animaux marins, les plantes, etc. [4]

- **Papillon:**

Ces matériaux naturels peuvent inspirer les physiciens de diverses manières. Dans un premier temps, il pourrait essayer de copier la structure existante telle quelle, voire de l'utiliser directement. Nous verrons que certains verres hydrophobes sont ainsi directement inspirés des propriétés des ailes de papillon **Figure I.2**, tandis qu'une autre aile de papillon fait office de détecteur de vapeur. Les physiciens peuvent également modifier la structure initiale après modélisation pour amplifier le phénomène [5].

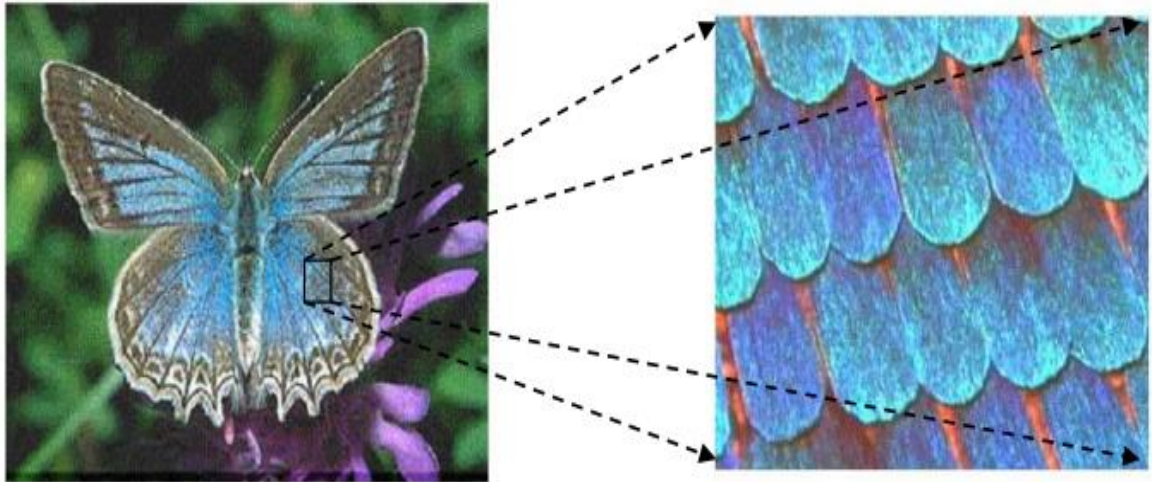


Figure I.2 : Une vue microscopique d'une structure de cristal photonique naturel papillons

▪ **Plumes de paons :**

On note la présence de cristaux photoniques naturels. Les images au microscope électronique sont présentées à la **Figure I.3**. Les couleurs bleue, verte, jaune et brune des plumes de paon sont dérivées de la diffraction d'un cristal photonique bidimensionnel avec un nombre et une longueur de maille variables.

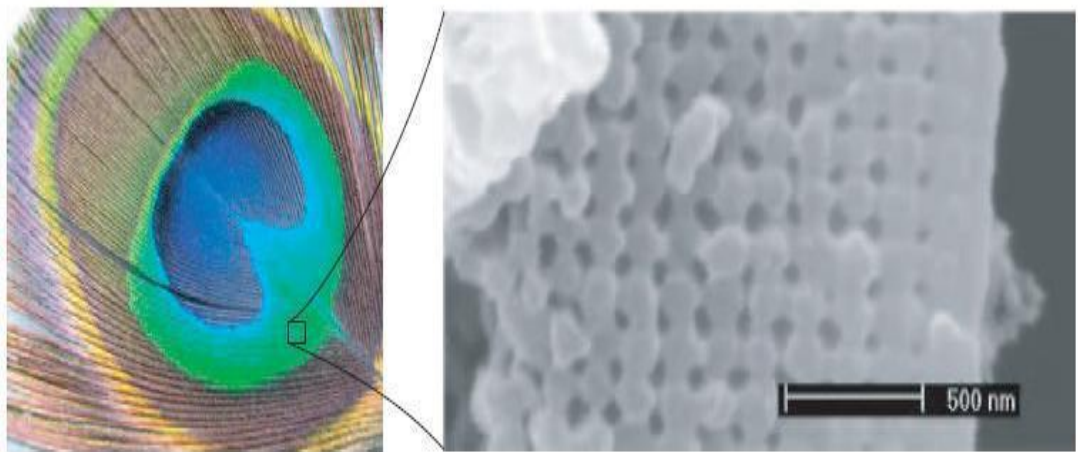


Figure I.3 : Plume de paon. L'encadré de droite est une image prise au microscope électronique à balayage (MEB) de la coupe d'une barbule verte

- **Souris de mer :**

Les plumes de paon ne sont pas le seul exemple de cristaux photoniques naturels. La **Figure I.4** montre un autre exemple de CP naturel. Des biologistes ont découvert un ver dont la coquille est un cristal photonique plus efficace que celui fabriqué actuellement. Cet animal s'appelle une souris de mer [6].

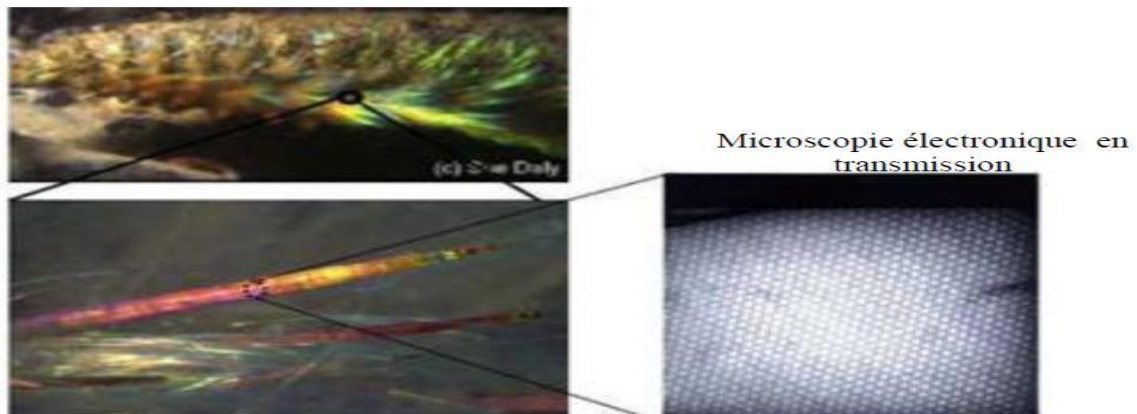


Figure I.4 : Exemples de réalisations naturelles de structures périodiques. Ces structures apparaissent chez certaines espèces animales et minérales comme les souris de mer

- **L'opale :**

La présence de cristaux photoniques naturels peut être observée dans l'opale naturelle, qui consiste en un réseau semi-périodique de billes de silice. Comme le montre la **Figure I.5**, une image au microscope électronique l'opale [7].

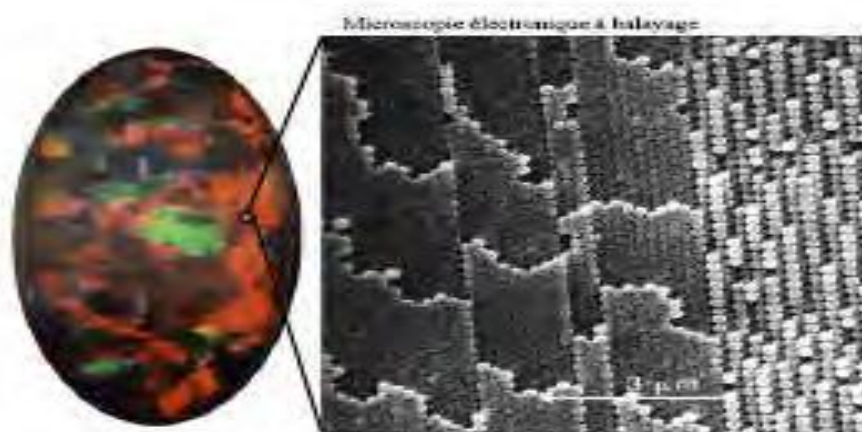


Figure I.5: Image au microscope électronique d'une opale naturelle constituée d'un réseau quasi-périodique de billes de silice

I-2.2. : Analogie électron-Photon :

Un cristal photonique est un matériau dont la constante diélectrique varie périodiquement dans une ou plusieurs directions de l'espace. Cette définition peut sembler simple, mais elle a des significations importantes. En effet, si la période de modulation de la constante diélectrique est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière utilisée, alors cette modulation conduit à l'émergence d'un intervalle d'énergie à densité de mode électromagnétique nulle, c'est-à-dire sans rayonnement lumineux, quelle que soit sa polarisation et sa direction de propagation, peut s'y propager [8].

Les équations de Maxwell sont les équations qui régissent la propagation de la lumière dans les cristaux photoniques. Dans un milieu diélectrique, linéaire, isotrope, non magnétique ($\mu_r=1$), la permittivité est $\varepsilon(\vec{r})$ (le milieu n'absorbe pas), et en l'absence de charge et de courant, les quatre équations de Maxwell se forment comme suit [9] :

$$\vec{\nabla} \times (\varepsilon(\vec{r}))\vec{E}_{(\vec{r},t)} = 0 \quad \text{I.1}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H}_{(\vec{r},t)} = 0 \quad \text{I.2}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}_{(\vec{r},t)} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{H}_{(\vec{r},t)} \quad \text{I.3}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H}_{(\vec{r},t)} = \varepsilon_0 \varepsilon(\vec{r}) \frac{\partial}{\partial t} \vec{E}_{(\vec{r},t)} \quad \text{I.4}$$

\vec{E} et \vec{H} : sont respectivement les champs électriques et magnétiques

ε_0 et μ_0 : sont la permittivité électrique et la perméabilité magnétique du vide.

t et \vec{r} : sont les dépendances temporelles et spatiales respectivement.

Après avoir appliqué un ensemble d'opérations aux équations et les avoir simplifiées, on obtient l'équation suivante :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla \times H_{(r)} \right) = \frac{\omega^2}{c^2} H_{(r)} \quad \text{I.5}$$

L'équation (V) est l'analogie formel de l'équation de Schrödinger décrivant le mouvement des électrons dans le potentiel périodique d'un cristal, $H_{(r)}$ étant l'analogie électromagnétique de la fonction d'onde électronique $\psi_{(r)}$ et $\varepsilon_{(r)}$ l'analogie du potentiel atomique $V_{(r)}$ [10].

I-3. Types des Cristaux Photoniques :

Le terme cristal désigne un matériau dans lequel des motifs sont répétés de manière régulière. Dans le cas de l'optique, par analogie avec les cristaux atomiques, on appelle cristal photonique, une structure dans laquelle les atomes ou molécules sont remplacés par un milieu macroscopique avec différentes constantes diélectriques. Et il a 3 types Mis en exergue Lequel :

I-3.1. Les Cristaux Photoniques Unidimensionnels (CPs-1D) :

- Pour étudier les cristaux photoniques, nous étudions le cas simple d'un milieu dont la constante diélectrique est périodique dans une dimension. Ce support peut être constitué de couches diélectriques alternées. Cette structure est appelée miroir de Bragg [11]. Les réseaux de Bragg ont prouvé leur utilité dans de nombreuses applications :
- Convertisseurs démodes pour fibres optiques.
- Filtres sélectifs de longueur d'onde.
- Multiplexeurs.

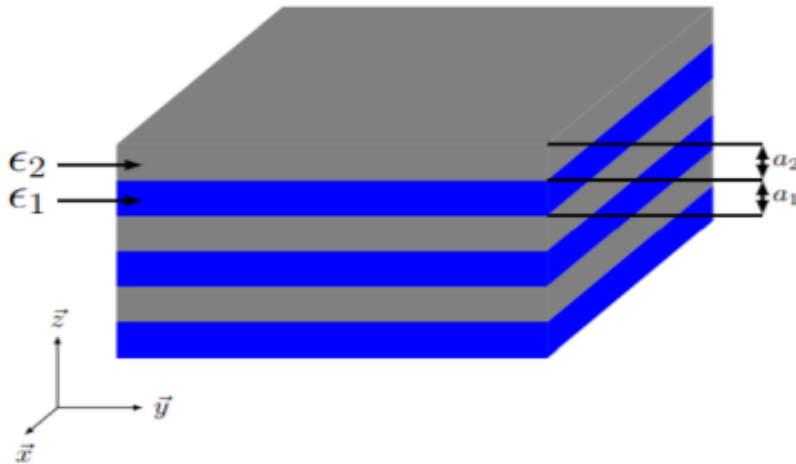


Figure I.6 : Schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un empilement de couches d'épaisseurs

Ils sont généralement formés par empilement de couches d'indices de réfraction différents [6], Un cristal photonique unidimensionnel est souvent utilisé pour réaliser les miroirs de cavités lasers [11]. Le comportement du réflecteur de Bragg est expliqué à partir du processus d'interférences multiples. Comme le montre la **Figure I.7**. Une onde qui se propage dans la succession des couches, subit une réflexion à chaque interface.

Cette réflexion s'accompagne d'un changement de phase π si l'onde va d'un milieu de faible indice vers un milieu de fort indice. Elle s'effectue sans changement de phase dans le cas contraire [10].

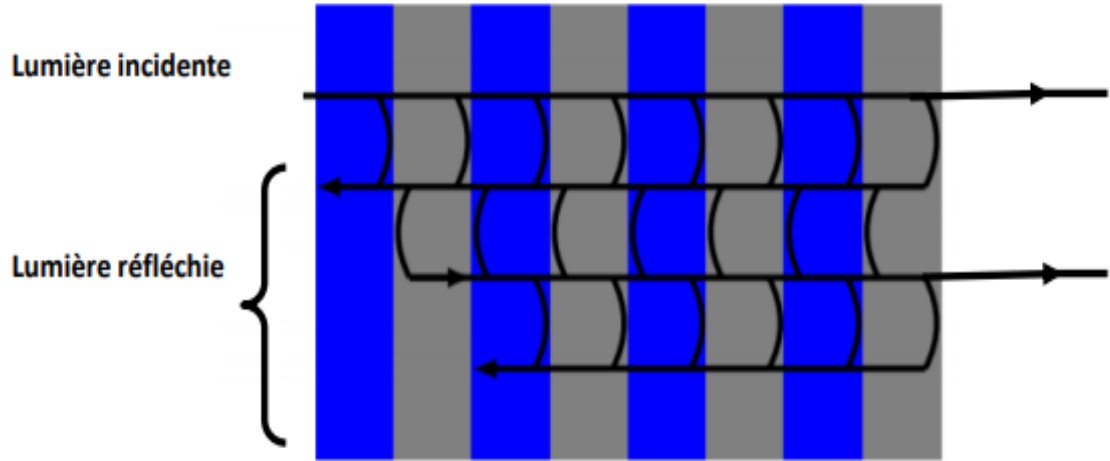


Figure I.7 : Représentation schématique de l'interface des ondes réfléchies par chaque dioptre

Un cristal photonique unidimensionnel (CP-1D) est caractérisé par les différents matériaux qui le composent, le système selon lequel ces matériaux sont organisés et les volumes relatifs qu'ils occupent dans la cellule élémentaire du cristal. Les quantités représentatives de ces différentes propriétés sont :

I-3.1.1. Contraste D'indice : Rapport entre les indices des deux matériaux, qui peut être comparé à la hauteur de la barrière de potentiel de la physique solide

$$\delta = \frac{n_h}{n_1} \quad \mathbf{I.6}$$

Avec $-n_h$: L'indice de réfraction du matériau de haut indice.

$-n_1$: L'indice de réfraction du matériau de bas indice.

I-3.1.2. La Période : Ces paramètres géométriques, choisis en fonction du domaine fréquentiel étudié, affectent les propriétés de la bande interdite photonique. La période $a = (a_1 + a_2)$ avec a_1 l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_1 et a_2 l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_2 , noter que l'indice de réfraction et la permittivité.

Sont reliés par la relation : $n = \sqrt{\varepsilon}$ 1.7

I-3.1.3. Facteur de Remplissage : Peut être comparé à la largeur du potentiel périodique. Si un matériau à indice de réfraction élevé est pris comme exemple, il est défini comme le rapport entre le volume occupé par ce matériau dans la cellule élémentaire du cristal et le volume de cellule de cette dernière [12].

Avec

$$f = \frac{v_i}{\Delta} \quad 1.8$$

L'énergie électromagnétique du mode d'énergie ω_1 est concentrée dans la couche à indice de réfraction élevé, tandis que l'énergie électromagnétique du mode d'énergie ω_2 est concentrée dans la couche à faible indice de réfraction. Par conséquent, les bandes de transmission correspondantes sont appelées respectivement bande air et bande diélectrique.

Lorsque l'onde se propage avec une incidence oblique, elle détecte des milieux de périodes différentes. Lorsque l'angle d'incidence augmente au-delà de l'angle critique α_0 , les bandes interdites ne se recouvrent plus et la propagation des ondes est à nouveau autorisée à la fréquence ω_0 . Le cône d'angle au sommet α_0 définit l'ouverture angulaire de la bande interdite : à l'intérieur de ce cône, aucune onde électromagnétique ne peut se propager à la fréquence ω_0 [12].

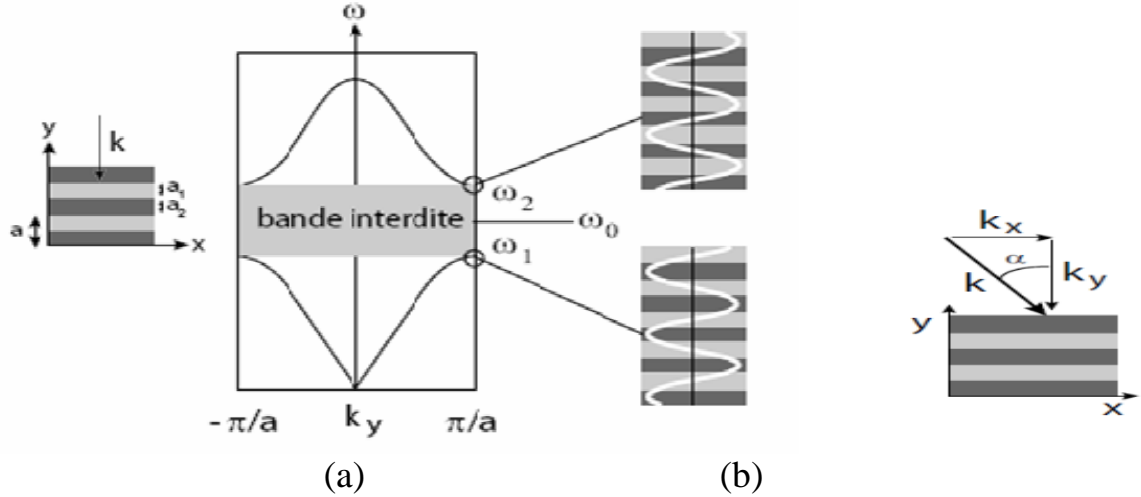


Figure I.8 : (a) Relation de dispersion d'un cristal photonique unidimensionnel (miroir de Bragg) à incidence normale : une bande d'énergie interdite apparaît en bord de zone de Brillouin (b) Incidence oblique

Sans calculs détaillés, il a été montré que lorsque les épaisseurs optiques des différentes couches sont égales, la largeur de cette bande interdite ne dépend que du contraste d'indice de réfraction.

$$\Delta\omega = \frac{4}{\pi} \omega_0 \arcsin \left| \frac{a_1 - a_2}{a_1 + a_2} \right| \quad \mathbf{I.9}$$

Où $a_1 = \sqrt{\varepsilon_1}$ et $a_2 = \sqrt{\varepsilon_2}$ sont les indices de réfraction des deux matériaux diélectriques et la fréquence centrale [13].

Tous les résultats que nous avons énoncés ici sont valables dans le cas d'une onde incidente normale à la structure. Pour une incidence oblique, les fréquences des bandes interdites changent. Ainsi à une longueur d'onde donnée, le miroir de Bragg ne réfléchit que les rayons arrivant dans un certain cône

Pour créer une bande interdite plus complète il faut structurer la permittivité du matériau selon plusieurs dimensions de l'espace [14].

I-3.2. Les Cristaux Photoniques Bidimensionnels (CPs-2D) :

Un cristal photonique bidimensionnel est une structure qui présente une modulation périodique de la permittivité diélectrique ϵ le long de deux directions de l'espace, et homogène dans la troisième.

Ces structures périodiques sont constituées de cylindres diélectriques. Ils ont une relative simplicité géométrique, ce qui facilite les études théoriques et expérimentales [15], Les propriétés optiques des structures bidimensionnelles sont fortement dépendantes de la polarisation de l'onde électromagnétique. La réalisation de ces structures se fait de plusieurs façons **Figure I.9**, Par exemple, On peut placer des tiges diélectriques

Dans l'air (structure déconnecté " $n_1 > n_2$ ") ou encore dans un autre diélectrique (structure connectée " $n_1 < n_2$ "). Afin d'ouvrir des bandes interdites larges, il faut un contraste d'indice (différence entre les indices du milieu et des tiges) suffisamment grand Les réponses optiques de ces structures dépendent de la polarisation de l'onde électromagnétique qui peut être soit de type TE (Transverse Electrique) ou bien TM (Transverse Magnétique) et peuvent ne pas posséder une bande interdite complète [16].

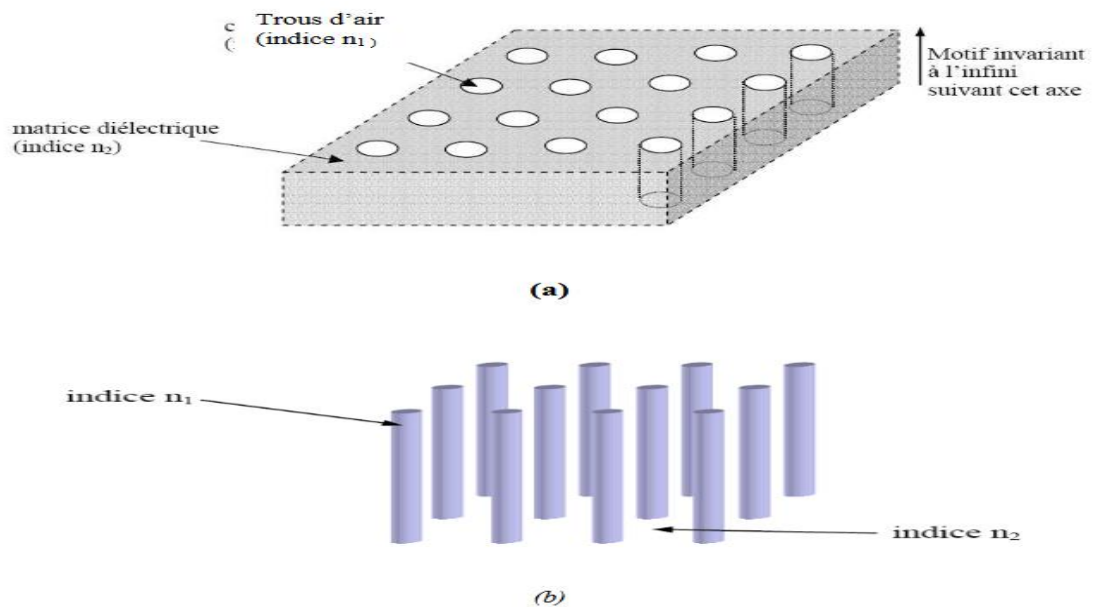


Figure I.9: Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée

Il est possible d'introduire des défauts dans ce type de cristal photonique. Par contre, la lumière sans confinement vertical est gênante pour l'application de ce type de cristal photonique en optique intégrée. Pour pallier ce manque, la lumière peut être confinée verticalement par des guides d'ondes classiques **Figure I.10**. Les guides d'ondes classiques sont constitués d'une couche diélectrique entourée de deux autres couches diélectriques d'indice de réfraction inférieur. Les guides d'ondes conventionnels sont couramment utilisés dans l'optique intégrée et sont facilement fabriqués par des techniques d'épitaxie standard [12].

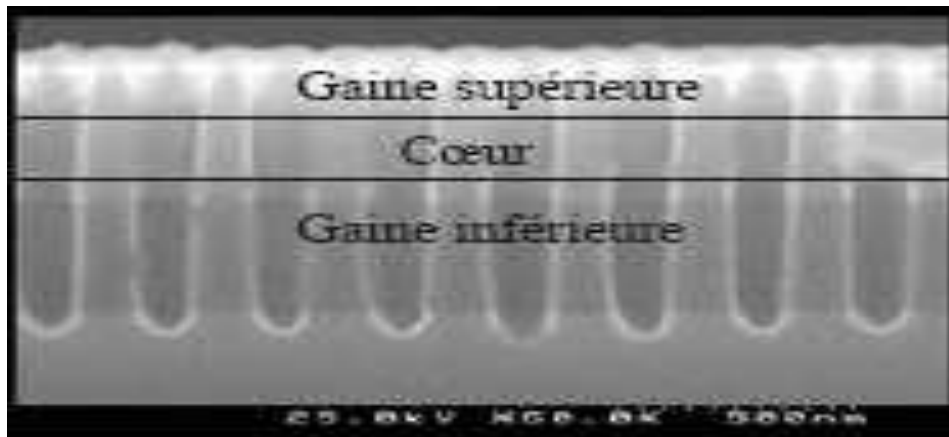


Figure I.10: Image MEB d'un cristal photonique gravé dans une hétéro structure

Les trous du cristal photonique sont gravés dans le guide d'onde classique. Ce type de cristal photonique, connu sous le nom de cristal photonique bidimensionnel planaire, est fabriqué à l'aide de techniques standard de la microélectronique, permettant une grande liberté dans les changements locaux des propriétés du réseau. Ces avantages font de ces structures des candidats prometteurs pour la réalisation de composants optiques intégrés [17], De nombreux théoriciens tentent d'optimiser les dimensions des structures pour obtenir des bandes interdites complètes, même si celles-ci ont des applications.

Selon la forme du réseau, il existe principalement 3 familles de matériaux BIP 2D, comme indiqué ci-dessous [15] :

- **Réseau Carré :** La maille primitive est un carré de côté a . Sa zone de Brillouin est un triangle isocèle rectangle.
- **Réseau Triangulaire :** Ce réseau permet d'ouvrir des bandes interdites les plus large dans le plan. Le réseau est décrit par les vecteurs directs \vec{a}_1 et \vec{a}_2 .

- **Réseau Hexagonal** : En ôtant quelques motifs au réseau précédent, un réseau hexagonal peut être obtenu.

La **Figure I.11** Montre un diagramme des réseaux mentionnés précédemment.

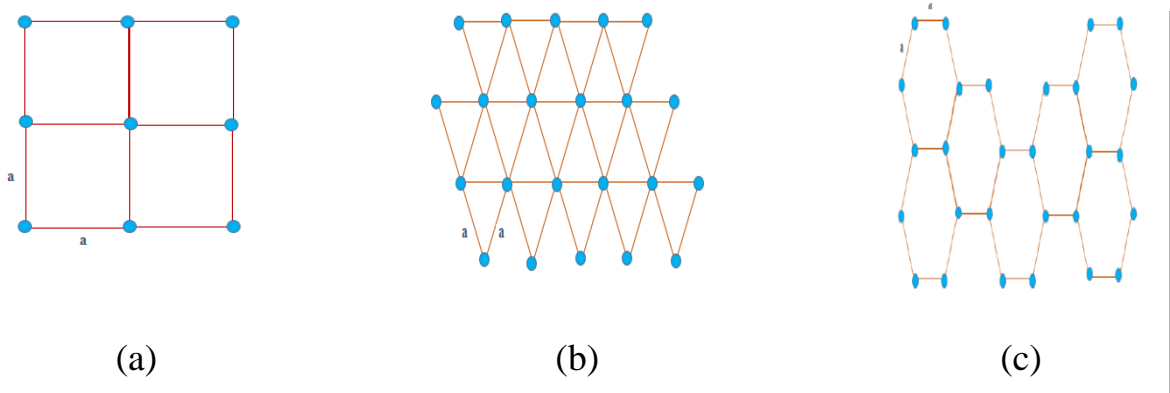


Figure I.11: Représentation (a) d'un réseau carré (b) d'un réseau triangulaire (c) d'un réseau hexagonal

Les propriétés géométriques de base des réseaux bidimensionnels carrés et triangulaires de trous circulaires sont résumées dans le **tableau I**. Le facteur de remplissage d'air f représente le rapport entre la surface occupée par le motif (ici le disque) et la surface des éléments du réseau maillé considérés [12].

Tableau I : Caractéristiques géométriques principales des réseaux bidimensionnels carré et triangulaire

	Réseau carré	Réseau triangulaire
Vecteur direct (a_1, a_2)	$a_1 = a (1,0)$ $a_2 = a (0,1)$	$a_1 = a (1,0)$ $a_2 = a (\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2})$
Vecteur réciproque (a_1, a_2)	$b_1 = \frac{2\pi}{a} (1,0)$ $b_2 = \frac{2\pi}{a} (0,1)$	$b_1 = \frac{2\pi}{a} (1, \frac{\sqrt{3}}{3})$ $b_2 = \frac{2\pi}{a} (0, \frac{2\sqrt{3}}{3})$
Facteur de remplissage en air f	$f = \pi (\frac{r^2}{a^2})$	$f = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} (\frac{r^2}{a^2})$

Dans le cas de réseaux bidimensionnels, il faut considérer deux directions de propagation au lieu d'une seule pour les unidimensionnels.

I-3.3. Les Cristaux Photoniques Tridimensionnels (CPs-3D) :

Les cristaux photoniques tridimensionnels (CPs-3D) suscitent toujours beaucoup d'intérêt. Ce sont des structures tridimensionnelles périodiques qui suivent trois directions dans l'espace.

Les configurations 3D les plus intéressantes sont basées sur des diamants. Il existe deux structures, la première est appelée "hexagone", qui est produite par deux angles de vue différents du diamant, **Figure I.12** et la deuxième dite « en tas de bois » [18].

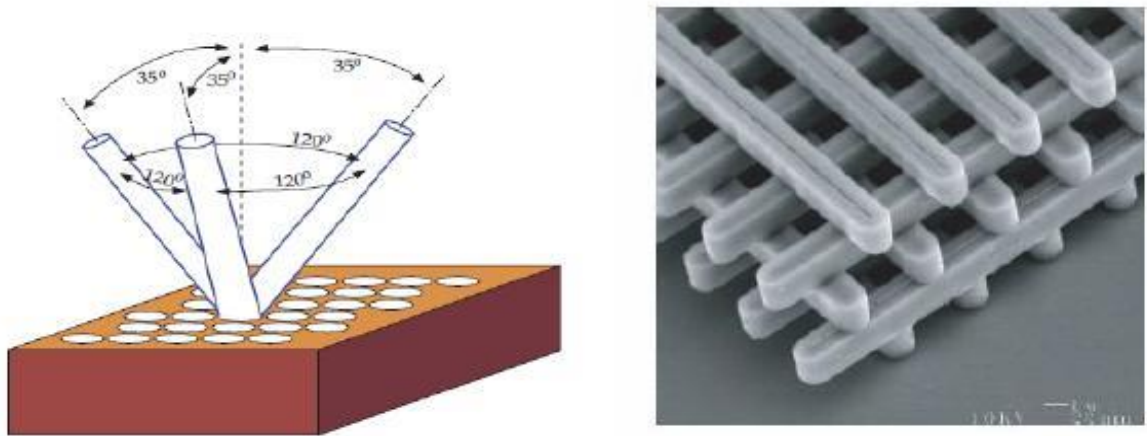


Figure I.12 : *Structure des cristaux photoniques tridimensionnels*

Pour obtenir une bande interdite omnidirectionnelle, un cristal photonique tridimensionnel doit être utilisé. De nombreux travaux portent sur les différentes géométries possibles et leur fabrication. Un certain nombre de procédés ont été proposés pour fabriquer des cristaux photoniques tridimensionnels. Nous pouvons nous référer à la structure Yablonovite et à la structure en bois empilé et à la structure Opale.

I-3.3.1. Structure de yablonovite : C'était le premier cristal photonique 3D à être fabriqué, et il a été nommé Yablonovite après qui l'a conceptualisé. Une pièce de tissu est recouverte d'un masque constitué de trous triangulaires. Chaque trou a été foré 3 fois à un angle de $35,26^\circ$ par rapport à la normale, réparti sur 120 en azimut. Les Vias sous la surface de la dalle produisent une structure FCC tridimensionnelle complète.

Le forage peut être effectué avec de véritables forets pour le travail par micro-ondes, ou par gravure ionique réactive pour créer des structures FCC à des longueurs d'onde optiques. La bande noire à droite représente une déviation totalement interdite.

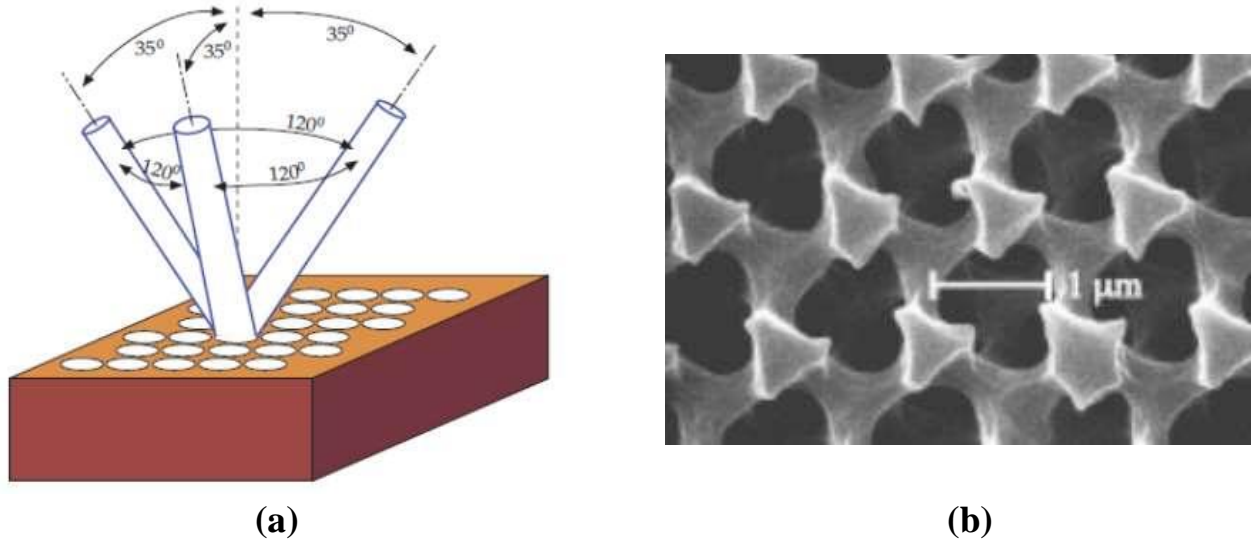


Figure I.13 : (a) Structure de yablonovite (b) Image MEB d'une structure Yablonovite en PMMA

I-3.3.2. Structure tas de bois : La structure périodique de ces cristaux photoniques tridimensionnels est créée en déposant des rubans de poly silicium en couches successives dans des tranches de dioxyde de silicium, qui sont dans le plan. Après la construction de la structure, le dioxyde de silicium est éliminé, ce qui donne un cristal photonique Si/Air 3D avec un contraste d'indice de réfraction suffisant pour ouvrir la bande interdite omnidirectionnelle [19].

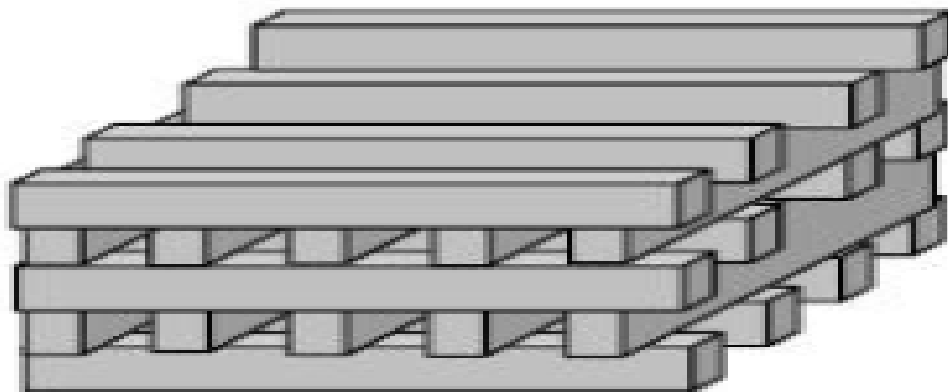


Figure I.14 : Structure tas de bois

I-4. Domaines d'utilisation Cristaux Photoniques :

La structure CP est très prometteuse pour la réalisation de circuits optiques intégrés. Ils ont bénéficié d'avancées technologiques importantes dans l'industrie de la microélectronique, qui ont permis de structurer la matière à l'échelle nanométrique, ouvrant notamment la voie à une intégration dans les circuits CMOS classiques. Basées sur le fort contraste d'indice de réfraction, ces structures peuvent confiner la lumière dans des volumes de l'ordre des longueurs d'onde. Ainsi, des composants passifs tels que des guides courbes et des coupleurs ont été réalisés à des distances réduites dans des guides diélectriques à sections rectangulaires. Mais surtout, leurs fortes propriétés de confinement favorisent les interactions lumière-matière, ce qui leur permet de concevoir et produire des actifs de plus en plus efficaces [20]. Les cristaux photoniques sont couramment utilisés dans les télécommunications et l'informatique, notamment en optique intégrée. En fait, en utilisant des photons au lieu d'électrons, les informations voyageront plus rapidement avec moins de perte.

L'utilisation de la CP dans d'autres applications se développe et différents dispositifs ont été proposés et étudiés dans plusieurs domaines tels que les coupleurs directionnels, les doubles spires, les filtres, les démultiplexeurs, les diviseurs de puissance, les capteurs et les biocapteurs. Ces nouveaux dispositifs reproduisent le fonctionnement des différents composants des circuits intégrés en utilisant des photons au lieu d'électrons comme support d'informations. Nous présenterons brièvement quelques exemples d'utilisation de cristaux photoniques 2D [15] :

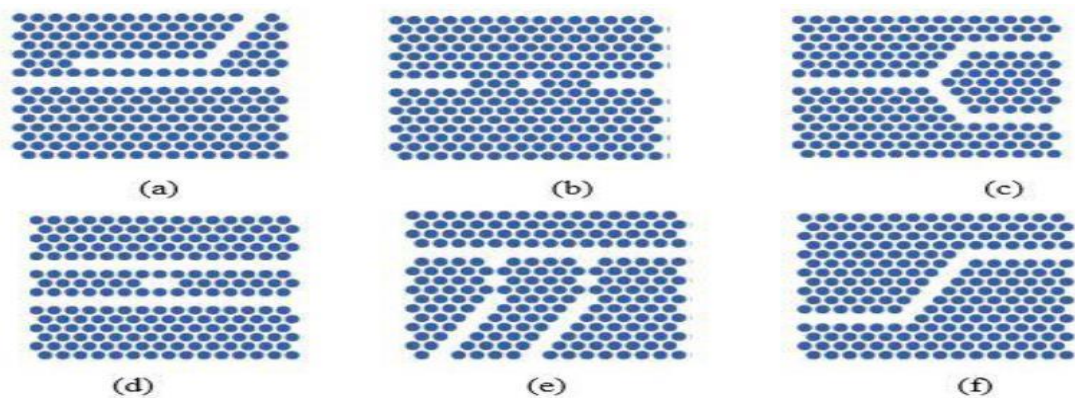


Figure I.15 : Dispositifs à base de cristaux photoniques 2D.

(a) Coupleur directionnel ;(b) Biocapteur ;(c) Diviseur de puissance ;(d) Filtre ;
(e) Démultiplexeur ;(f) Double virage

I-5. Capteurs à Cristaux Photoniques :

Et l'application des cristaux photoniques en tant que capteurs (senseurs) constitue un domaine de recherche qui semble être très prometteur en raison de leur micro-structuration périodique qui permet de piéger les photons et de créer des résonances optiques très sensibles à la présence des molécules à détecter, de leur extrême miniaturisation (0.1 mm^2 de surface de détection), de leur haute sensibilité spectrale, de la préparation minimale de l'échantillon sans marquage par fluorescence, de la sélectivité dans le mécanisme de détection et de la possibilité de les intégrer aux MEMS [6]. Récemment, il y a eu plusieurs travaux de recherche utilisant les cristaux photoniques en tant qu'élément de détection, en raison de leur structure de bande et du confinement de la lumière.

- Le mécanisme de détection de ce type de capteurs repose sur les changements induits sur une longueur d'onde de résonance ou de la localisation spectrale d'une bande dues aux changements d'indice de réfraction.

La **Figure I.16** montre deux dispositifs différents de capteurs à cristaux photoniques basés RI et les résultats de leur caractérisation

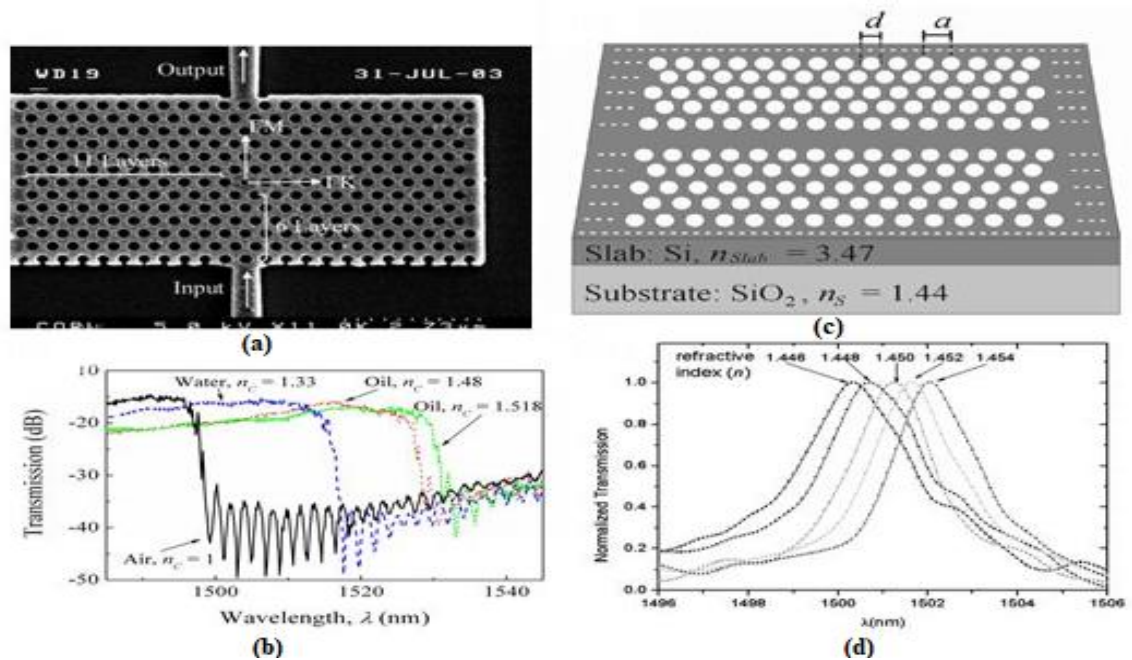


Figure I.16 : a) vue au microscope électronique à balayage d'une microcavité à cristal photonique intégrée avec deux guides d'ondes ruban, (b) spectres de transmission normalisés de la microcavité, (c) vue au microscope électronique à balayage de guide d'ondes à cristal photonique (PCW) sur SOI, (d) spectres de transmission mesurés pour quatre solutions d'indices différents

L'un des principes de fonctionnement de ces capteurs consiste en la mesure d'un changement d'indice de réfraction d'un élément sensible en fonction de la présence d'un analyte (substance à détecter).

La détection est effectuée par une monocouche sensible qui réagit avec l'analyte. La zone de détection est composée d'une structure photonique fonctionnant avec une monocouche sensible.

Cette mono couche réagit avec l'analyte qui induit une variation de l'indice de réfraction, de l'épaisseur de la couche sensible et de son absorption.

Cette structure doit être conçue pour être fortement sensible à la variation de l'indice de réfraction. L'étude de cette dernière consiste à calculer le spectre de transmission qui devrait donner un déplacement en longueur d'onde, d'une valeur bien définie, en présence de l'analyte.

Dans le deuxième chapitre on va détailler ces capteurs à cristaux photoniques.

I-6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons introduit les concepts de base liés aux cristaux photoniques. Parmi celles-ci se trouvent des structures isolées électriquement dont la constante diélectrique change périodiquement sur l'échelle des longueurs d'onde dans une ou plusieurs directions, et cette anisotropie périodique se traduit par de nombreuses propriétés intéressantes, comme l'ouverture d'une bande optique interdite, qui interdit la propagation de la lumière dans la structure. Nous avons également présenté de manière générale les différents types de cristaux photoniques, ainsi que les domaines d'utilisation des cristaux photoniques, et quelques concepts de capteurs à cristaux photoniques qui seront étudié en détail dans le deuxième chapitre.

Références bibliographiques du chapitre I

- [1] E. Yablonovitch, « Physical Review Letters »58(20), 20592062 (1987).
- [2] S. John, « Physical Review Letters » 58, 2059 (1987).
- [3] E. Yablonovitch, T.J. Gmitter, and K.M. Leung. « Physical Review Letters »67(17), 2295–2298
- [4] Physique B : Physique de la Matière Condensée, Volume 407, Numéro 20, p. 4032-4036.
- [5] Dossier Pour la Science N°79 - Avril 2013, « Les paradoxes de la matière »
- [6] BOUDIAF Kenza, SAFER Hadjer, « Etude et conception des capteurs à cristaux Photoniques pour des applications biomédicales », Mémoire de master, Université de Msila, 2018.
- [7] BOUGRIOU FAIDA, « Etude Théorique des matériaux a bandes interdites photoniques bidimensionnels : applications dans le domaine du guidage optique et la détection », Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2013.
- [8] Michael Sarrazin, « Etude de propriétés optiques liées à la transmission de cristaux photoniques bidimensionnels », Thèse de doctorat n° 903, Université de Franche-Comté, 24 avril 2002.
- [9] K. Sakoda, « Optical Properties of Photonic Crystals», Springer, Berlin, Springer Series in Optical Sciences, Vol 80, pp 253, 2001.
- [10] H. Abri Badaoui, « Etude et conception des micros composants à base des cristaux photoniques bidimensionnels », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2012.
- [11] Benoît Lombardet, « Etude et réalisation de cristaux photoniques pour l'optique intégrée », Thèse de Doctorat, école polytechnique fédérale de Lausanne, Thèse n° 3254, (2005)
- [12] Malache Hadjeri, Mahi Amel, « Nouvelles Structures Des Démultiplexeurs En Cristaux Photoniques 2D Pour Les systèmes Très Hauts Débits », Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2019.
- [13] Seri Asmaa, « Propriétés optique des cristaux photoniques unidimensionnels périodiques », Mémoire de Master, Université de Mostaganem, 2018.
- [14] BENDEMAGH Khalissa, « Etude de dimensionnement d'un coupleur à base de cristaux photoniques destiné aux systèmes de communications », Thèse de doctorat, Université de Setif,2019.
- [15] Chalabi Sara, « Amélioration de la sensibilité d'un capteur à base d'un cristal photonique », Mémoire de Master, Université de Bordj Bou Arreridj,2021.

- [16] AIT OUARET Taklit, YOUCEF Meriem, « étude et conception d'un démultiplexeur à base de cavités à cristaux photoniques », Mémoire de master, Université de Bejaïa,2020.
- [17] BOUGRIOU FEIDA, « étude des guides d'ondes à cristaux photoniques bidimensionnels », Mémoire de magister, Université de CONSTANTINE,2008
- [18] Rafraf Asma, « Etude et modélisation d'un Bio-capteur à base de cristaux photoniques », Mémoire de Master, Université de ANNABA ,2019
- [19] BELHASSOS Ahlam, METREF Sofiane, « Etude et simulation des cristaux photoniques », Mémoire de Master, Université de OUARGLA ,2017
- [20] Safia ARAFA, « Étude des composants à base de cristaux photoniques : Application dans le domaine du démultiplexage et de la détection », Thèse de Doctorat, Université de CONSTANTINE, (2018).
- [21] Georges Asch, Les capteurs en instrumentation industrielle, Edition : 4, Publié par Dunod, 1993, 816 pages
- [22] Dallel BENELARBI, « Étude de cristaux photoniques en silicium pour l'application à la biodétection », Thèse de Doctorat, Université de CONSTANTINE, 2018.

Chapitre : II

*Les capteurs à cristaux
photoniques*

II.1. Introduction sur les capteurs :

Un capteur est un dispositif électronique capable de convertir des éléments physiques, chimiques, de la biomasse... (Le mesurande) en une quantité d'électricité utilisable, telle que la tension, la hauteur de mercure, la force ou la déviation de l'aiguille.

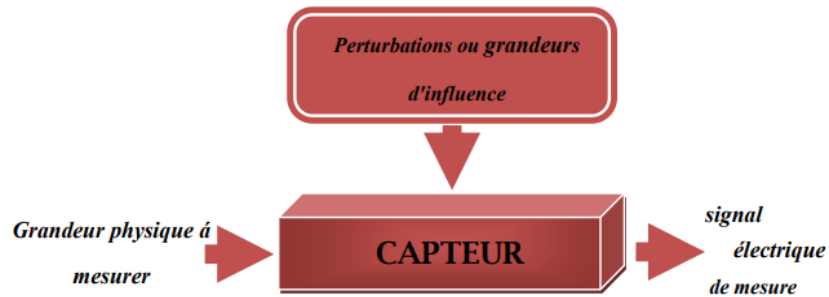


Figure II.1 : Définition d'un capteur

II.2. Structure d'un capteur :

Les différentes parties constitutives d'un capteur sont décrites comme suit (Figure II.2) :

II.2.1. Le corps d'épreuve :

Le corps d'épreuve est un élément sensible qui réagit à la grandeur à mesurer. Il a pour rôle de transformer la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dite mesurable.

II.2.2. Transducteur :

Le transducteur est un élément sensible lié au corps d'épreuve. Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie.

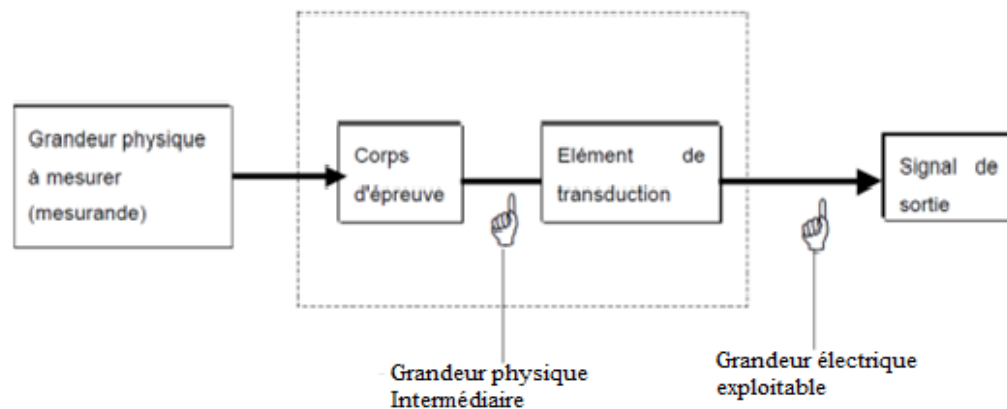


Figure II.2 : Structure d'un capteur

II.3 Cristaux photoniques pour la détection optique :

II.3.1. Introduction :

Les capteurs photoniques ont connu un développement massif en raison de la demande croissante d'applications de détection dans les domaines de la santé, de la défense, de la sécurité, de l'automobile, de l'aérospatiale, de l'environnement, du contrôle de la qualité des alimentsetc.

Dans ce contexte, les cristaux photoniques (PhC) représentent une solution ambitieuse pour atteindre des performances élevées dans les applications de détection. En fait, comme de nombreuses architectures photoniques ont été largement étudiées et utilisées dans la détection photonique (par exemple, un résonateur en anneau, des capteurs basés sur la résonance plasmonique de surface (SPR), des micro disques, des micro sphères etc), les PhC présentent un fort confinement optique de la lumière à un très petit volume, permettant la détection d'espèces chimiques caractérisées par des dimensions nanométriques. De plus, en utilisant des techniques avancées de fonctionnalisation de surface chimique et une intégration avec des systèmes microfluidiques, des performances très élevées peuvent être obtenues dans des puces de capteur ultra compactes. Par exemple, la détection de concentrations d'avidine dissoute aussi faibles que 15nm ou 1 μ m/ml [1]. Des performances ultra élevées ont été démontrées expérimentalement et théoriquement, comme une LOD inférieure à 20 pm pour l'anti-biotine, correspondant à moins de 4,5 fg de matériau lié à la surface du capteur et à moins de 80 molécules dans le volume modal de la microcavité intégrée [2].

Des capteurs à base de PhC ont également été proposés comme capteurs de gaz dans l'infrarouge moyen (IR moyen), car de nombreux gaz (par exemple, CO₂, CH₄, CO) présentent des raies d'absorption dans la région de longueur d'onde de l'IR moyen. D'autres applications rapportées dans la littérature concernent la détection de mesures de température, de pression, de stress et d'humidité etc.

Dans ce chapitre, une revue complète des capteurs planaires basés sur PhC est présentée. En particulier, il sera axé sur le choix des matériaux et les applications de détection. Les principes de détection optique seront décrits en détail.

II.3.2. Capteurs à cristaux photoniques planaires

De nos jours, les capteurs intégrés à base de cristaux photoniques (PhCs) représentent l'une des classes les plus populaires de capteurs photoniques, généralement utilisés pour la détection

physique et chimique/biochimique. Dans ce contexte, les principaux avantages de ces architectures de capteurs photoniques sont le confinement ultra-élevé de la lumière dans de très petits volumes, une sélectivité élevée en longueur d'onde, une sensibilité ultra-élevée et une sélectivité dans le mécanisme de détection.

Les matériaux habituellement utilisés pour détecter les dispositifs planaires PhCs sont des couches hétéroépitaxiales telles que AlGaAs/GaAs, des couches de composé de nitrure III ou des couches diélectriques telles que Si₃N₄, TiO₂, SiO₂ et les tranches SOI bien connues [3]. De plus, les composés organiques et les polymères ont suscité un intérêt croissant ces dernières années. Enfin, des cristaux photoniques de silicium poreux ont également été récemment proposés pour la détection de vapeur organique.

En fin, plusieurs types d'architectures de capteurs basés sur PhC sont présentés dans cette section, en se concentrant sur les principes de détection employés (c'est-à-dire, capteur basé sur l'indice de réfraction (RI), absorption optique, effets opto-mécaniques, non linéaires) et les performances de l'application.

II.3.3. Capteurs PhC basés sur l'indice de réfraction (RI) :

Les capteurs basés sur l'indice de réfraction représentent la classe la plus diffusée de capteurs PhC. En fait, un grand nombre d'architectures avancées (par exemple, des microcavités intégrées et des configurations interférométriques) utilisent la détection d'indice de réfraction pour la détection. Les capteurs PhC basés sur RI présentent de nombreux avantages tels qu'une préparation d'échantillon minimale sans marquage par fluorescence, une détection en temps réel, une sensibilité et une sélectivité élevées. En particulier, le principe de détection consiste à mesurer les changements d'IR d'une solution en vrac (par exemple, de l'eau déminéralisée, $n_{Eau} = 1,33$ ou air, $n_{Air} = 1$ à $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$) en raison de la présence d'analytes chimiques ou de gaz généralement caractérisés par des indices de réfraction plus élevés. Des applications en milieu gazeux et humide ont été étudiées pour détecter des concentrations d'espèces chimiques et biologiques. En fait, en utilisant ces capteurs, il est possible de quantifier la densité de surface ou volumétrique des molécules et des protéines (par exemple, la streptavidine, l'ADN, l'ARNm). Récemment, des capteurs avancés à base de PhC correctement conçus pour la détection d'une seule molécule se sont avérés capables de détecter le nombre de molécules concentrées dans une solution complexe [4].

Dans cette section, deux principes de détection fondamentaux couramment utilisés dans la détection RI photonique sont présentés, c'est-à-dire la détection de surface et la détection homogène.

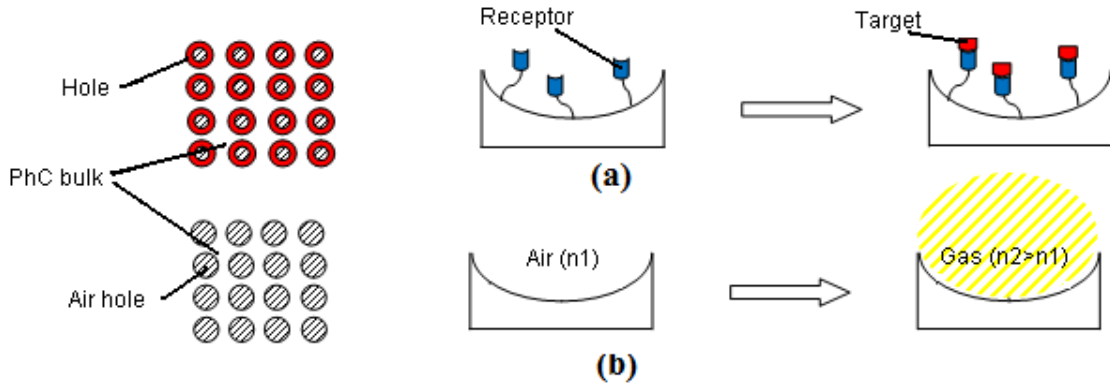


Figure II.3. a) détection de surface et (b) détection homogène. Les molécules sondes (bleues) sont déposées sur les surfaces des trous et les molécules cibles (rouges) sont capturées par des récepteurs formant une couche adjacente sur la surface du capteur.

Sur la **Figure II.3. a)** le principe de détection de surface est tracé. En particulier, les trous PhC sont initialement fonctionnalisés par des molécules réceptrices correctement choisies afin d'adsorber sélectivement les analytes cibles dans une solution complexe. Par conséquent, lorsque le dispositif est exposé à un échantillon chimique, les molécules cibles sont immobilisées par des récepteurs sur les surfaces internes des trous du capteur. La couche adsorbée caractérisée par une épaisseur t_{ad} induit un changement d'indice de réfraction localisé autour de la région du trou. Enfin, une sensibilité de surface S est généralement définie comme suit :

$$S_s = \frac{\partial n_{eff}}{\partial t_{ad}} \quad \text{II.1}$$

Où n_{eff} est l'indice effectif du mode optique se propageant dans le dispositif capteur.

Le mécanisme de détection restant, appelé détection homogène, est schématiquement esquissé sur la **Figure II.3. b)** . Dans ce cas, l'indice effectif du mode optique de propagation change en raison des variations de couverture RI induites par des échantillons de gaz ou de liquide correctement concentrés dans le milieu de couverture, où le capteur photonique est exposé. Par conséquent, une sensibilité homogène S_h peut être définie comme suit :

$$S_h = \frac{\partial n_{eff}}{\partial n_c} \quad \text{II.2}$$

n_c est l'indice de réfraction du couvercle.

Dans ce qui suit, les principales architectures des capteurs basés sur PhC RI sont présentées, en se concentrant sur leurs principes de fonctionnement et leurs performances.

La première classe de capteurs à discuter est celle basée sur des microcavités résonnantes à cristaux photoniques. Ces dispositifs sont fabriqués en introduisant des défauts localisés (c'est-à-dire en supprimant un ou plusieurs trous) dans la distribution périodique des trous. De cette façon, la périodicité parfaite du cristal photonique est compromise et un état défectueux dans la carte de bande interdite est introduit, permettant l'excitation des modes de résonance.

En particulier, les capteurs à base de cavité PhC peuvent être testés selon deux modes distincts. Le premier est le mode de test en longueur d'onde et le second est le mode de test en intensité. Dans la première méthode, la lecture optique consiste à surveiller la longueur d'onde du signal optique à travers un analyseur de spectre optique (OSA), tandis que dans la seconde, il est possible de surveiller les changements d'intensité du signal de sortie en utilisant un photodétecteur (PD). Dans ce contexte, la sensibilité à la longueur d'onde S_λ représente un paramètre fondamental pour quantifier les performances du capteur en cas de schéma d'interrogation en longueur d'onde. S_λ est défini selon l'équation :

$$S_\lambda = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \quad \text{II.3}$$

Comme le rapport entre le décalage de la longueur d'onde de résonance ($\Delta\lambda$) induite par le changement de l'indice de réfraction de fond (Δn). De plus, il est donné en unités de nm/RIU (unité d'indice de réfraction).

La **Figure II.4** illustre un exemple typique de microcavité PhC bidimensionnelle (2D) dans une tranche de silicium sur isolant (SOI) [5]. Comme esquissé sur la **Figure II.4**, les trous d'air sont gravés uniquement dans la couche de silicium supérieure et ils peuvent être réalisés par gravure anisotrope standard. La structure périodique est caractérisée par une cellule hexagonale à constante de réseau $a = 515$ nm. Le rayon r des trous d'air et l'épaisseur de la couche de silicium h sont choisis pour être les rapports $r/a = 0,33$ et $h/a = 0,427$, résultant en $r = 170$ nm et $h = 220$ nm. Comme il est possible de l'observer sur la **Figure II.4**, la microcavité est obtenue en supprimant sept trous d'air au centre de PhC dans la direction ΓK . Une telle microcavité est formellement désignée sous le nom de cavité L7, en raison du nombre de trous supprimés dans la structure périodique de PhC.

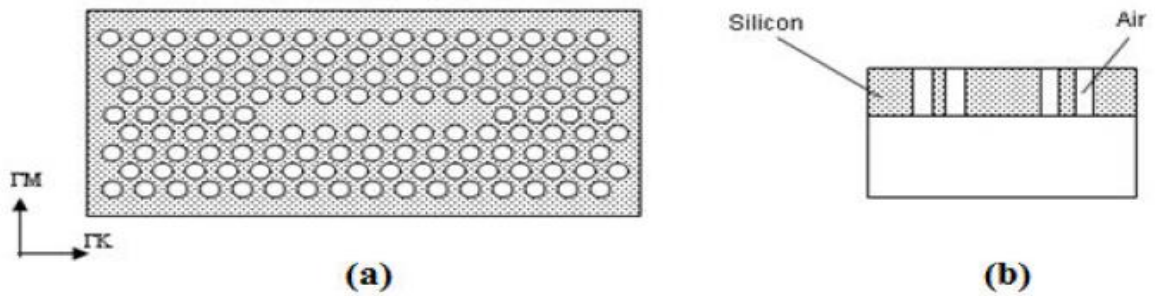


Figure II.4. Micro cavité PhC (a) réalisée en supprimant sept trous comme défaut de ligne (cavité L7) et section transversale (b).

Différentes dispositions de trous d'air près du centre de la cavité améliorent le facteur de Quality Q de la microcavité présentée ci-dessus. En particulier, en décalant trois rangées de trous d'air dans la direction Γ_M espacées du centre de la cavité d'une distance de $0,02a$, $0,014a$ et $0,017a$, il est possible d'obtenir une amélioration de $Q_{facteur} \sim 1\,000$. De plus, en plaçant trois paires de mini-trous dans la région de la cavité, il est possible d'augmenter encore les performances de la cavité résonnante PhC.

L'image de ce nouvel agencement est esquissée sur la **Figure II.5**. En particulier, le couple nommé C a un rayon $r_c = 0,78 r$ et un changement de position vers l'extérieur $d_c = 0,2 a$. Le centre de la deuxième paire (c'est-à-dire B) n'est pas déplacé, mais les rayons de ces trous sont minimisés, ce qui entraîne $d_B = 0$ et $d_B = 0,2r$. Enfin, la paire de trous la plus interne a un déplacement par rapport à la position d'origine $d_A = 0,2 r$ et un rayon légèrement plus grand que la paire précédente pour être $r_A = 0,28r$. Dans ces conditions de conception, en cas d'infiltration d'air, la cavité atteint un Q-facteur de 2600, présentant une longueur d'onde résonnante autour de 1550 nm.

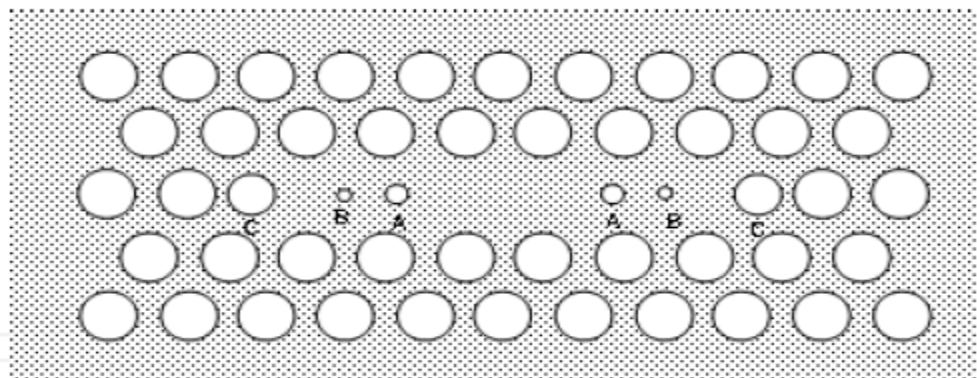


Figure II.5. Zoom de la région de la cavité de la cavité L7.

Les performances du capteur proposé ont été évaluées en cas d'infiltration d'eau ou d'éthanol, dont les indices de réfraction sont estimés à 1,332 et 1,359 à $\lambda \approx 1,55 \mu\text{m}$, respectivement. Le décalage de longueur d'onde de résonance mesuré dans le premier cas est de 22,28 nm et dans le second est égal à 12,65 nm. Enfin, le dispositif décrit jusqu'à présent présente une sensibilité aussi élevée que 460 nm/RIU, supérieure aux sensibilités habituellement atteintes par la cavité L3.

Un capteur intéressant basé sur RI utilisant une microcavité résonnante PhC est caractérisé par une région de cavité dans une fente d'air. Dans ce capteur, l'approche technologique employée pour réaliser la microcavité ne consiste pas à modifier la constante de réseau ou les rayons des trous caractérisant le PhC, mais à introduire un défaut de ligne droite dans lequel une largeur de guide d'onde modifiée agit comme cavité résonnante [6].

Dans le travail de la référence [7], les tiges de CP étaient entourées d'air dont l'indice de réfraction est $n_o = 1$, le système indiquait une longueur d'onde de résonance $\lambda_o = 1.257 \mu\text{m}$, comme il ressort du spectre normalisé de la puissance transmise mesuré à la sortie, comme il est indiqué dans la **Figure II.6** (le point A= 0.39). Le changement de l'indice de réfraction de tiges environnantes affecte la longueur d'onde de résonance du système en la décalant vers des longueurs d'onde plus élevées, comme il est montré dans la **Figure II.6** (le point B= 0.27) de λ_o à λ_1 . Ici, le décalage induit de l'indice de réfraction est ΔN .

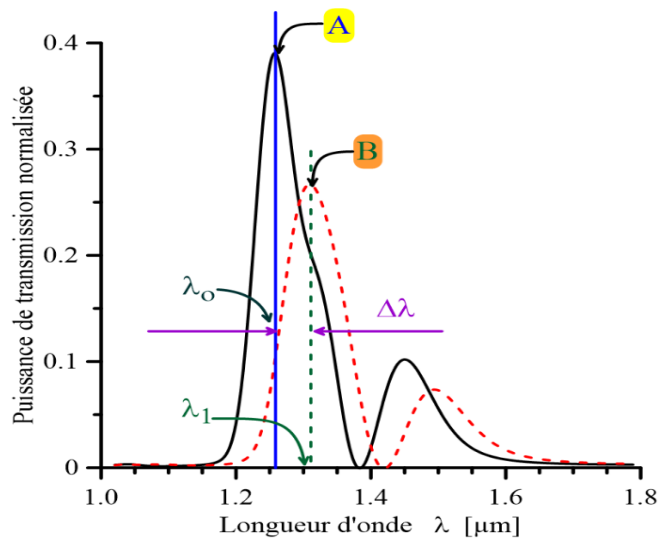


Figure II.6 : Impact du changement de l'indice de réfraction de l'environnement des tiges sur la longueur d'onde de résonance [7].

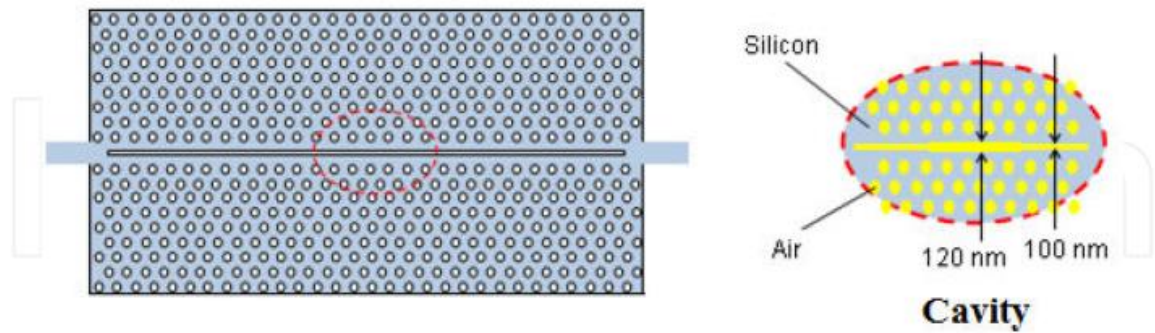


Figure II.7. Cavité PhC Air-slot avec zoom de fente dans la fente.

Comme illustré à la **Figure II.7**, le dispositif consiste en un PhC 2D caractérisé par une cellule hexagonale et une constante de réseau $a = 510 \text{ nm}$. La région de guide d'onde est obtenue en supprimant une rangée de trous d'air au milieu de la structure. Une fente d'air est intégrée dans cette région de défaut de ligne. La largeur de la fente d'air est maintenue constante à 100 nm, sauf au milieu. Une fente est réalisée en augmentant la largeur de la fente d'air de 100 nm à 120 nm, au centre. Cette réduction de largeur de fente se traduit par la formation de barrières réfléchissantes pour le mode défilement, donc dans une cavité résonnante dont la longueur est $L = 3a$.

Le dispositif complet a été traité sur une plaquette SOI de 220 nm d'épaisseur avec une couche d'oxyde enterrée de 2 μm . Le mode de cavité est fortement confiné dans la région de la cavité, le volume de mode effectif est $V_{eff} = 0,05 \mu\text{m}^3$ et le chevauchement spatial entre le mode cavité et la fente d'air est $\Gamma > 0,73$.

Lorsque l'air caractérisé par l'indice de réfraction $n=1$ est infiltré dans les trous PhC, le capteur présente la fréquence de résonance $\lambda_0 = 1570 \text{ nm}$, proche de la fréquence de coupure qui se produit à 1590 nm. Le facteur de qualité a été estimé à $Q = 26\,000$ et la sensibilité $S_\lambda = 570 \text{ nm/RIU}$.

Les performances des capteurs ont été quantifiées expérimentalement en exposant la cavité à différents gaz. Plusieurs gaz ont été utilisés. En particulier, l'air ($n = 1,000265$) comme gaz de référence, l'azote (N_2 , $n = 1,000270$), l'hélium (He , $n = 1,000032$), dioxyde de carbone (CO_2 , $n = 1,000406$), acétylène (C_2H_2 , $n = 1,000579$) et le propane (C_3H_8 , $n = 1,000999$). Tous les indices de réfraction sont donnés à pression atmosphérique à la longueur d'onde de résonance $\lambda_0 = 1570 \text{ nm}$ et la température ambiante, $J = 20^\circ \text{C}$.

Les résultats expérimentaux montrent un décalage vers le bleu pour le gaz He et un décalage vers le rouge pour le CO_2 ou C_3H_8 caractérisé par des RI plus élevés. En fait, il a été démontré que le décalage de la longueur d'onde de résonance dépend linéairement des changements d'indice de réfraction ($n_{\text{gaz}} - 1$) calculé par rapport au gaz de référence, soit l'air ($n = 1$).

Le capteur PhC décrit ci-dessus est limité par le fait que les décalages de longueur d'onde de résonance ne sont pas seulement influencés par les changements d'indice de réfraction du couvercle, mais également par des paramètres externes tels que la température, la pression, l'humidité adsorbée ou l'oxydation progressive de la surface du capteur. Afin de minimiser cet effet, il est nécessaire de tester le capteur avec O_2 gaz libres ou utiliser une architecture de capteur identique servant de référence pour compenser les effets indésirables mentionnés ci-dessus.

Un capteur PhC basé sur une cavité résonnante en anneau a été proposé pour surveiller le niveau de salinité de l'eau de mer entre 0% et 40% [8]. En particulier, un résonateur en anneau est réalisé en enlevant un certain nombre de tiges de silicium dans la structure PhC caractérisée par une distribution périodique de cellules carrées de tiges de silicium dans l'air. L'architecture du capteur est illustrée à la **Figure II.8** ci-dessous.

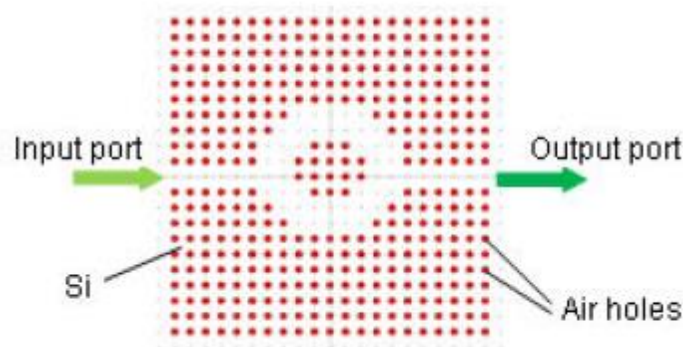


Figure II.8. Structure schématique du capteur pour la détection d'eau de mer.

La constante de réseau est $a = 540$ nm et le rayon des tiges est $r = 0,185 a = 100$ nm. L'indice de réfraction des tiges de silicium est $n = 3,46$ tandis que l'IR de fond est défini comme étant l'IR de l'eau de mer. Des guides d'ondes d'entrée et de sortie sont placés dans la direction horizontale par rapport au centre de la cavité annulaire.

Différents pourcentages de salinité induisent des changements d'IR de fond, entraînant une variation détectable du spectre de transmission du capteur. En particulier, il est possible d'adopter

à la fois un schéma d'interrogation d'intensité et de longueur d'onde, résultant en une lecture optique plus exacte et plus précise. L'efficacité de sortie du capteur diminue de 99% à 80% en augmentant le niveau de sel dans l'eau de 0% à 40%. De plus, dans la plage de salinité 0÷40%, le RI de l'eau augmente de 1,33300 à 1,34031, respectivement. Selon l'équation précédente, les changements de la solution de fond RI produisent des décalages de longueur d'onde résonants. En fait, dans la plage d'intérêt, c'est-à-dire 0÷40 %, la longueur d'onde de résonance passe de 1590,55 nm à 1590,05 nm. Finalement, le $Q_{\text{changements}}$ de facteurs en fonction de la salinité. En effet, en augmentant le taux de sel dans l'eau, Q_{facteur} augmente.

Un capteur PhC basé sur une cavité à pont d'air a été proposé, présentant une bonne sensibilité [9]. Le capteur à cristal photonique est caractérisé par un réseau triangulaire (ou hexagonal) de trous d'air avec une constante de réseau $a = 440\text{nm}$ et rayon $r = 0,29a = 127,5\text{ nm}$. La microcavité a été réalisée en diminuant le rayon du trou central ($r_d = 0,2a = 88\text{nm}$). Le pont aérien est réalisé en retirant une partie du dioxyde de silicium enfoui qui est pris en sandwich entre deux couches de silicium, comme illustré à la **Figure II.9**. La couche supérieure de silicium avec épaisseur $t=0,591 a$ est séparé par $1\ \mu\text{m}$ de SiO_2 de la deuxième couche de silicium sur le fond de la même structure.

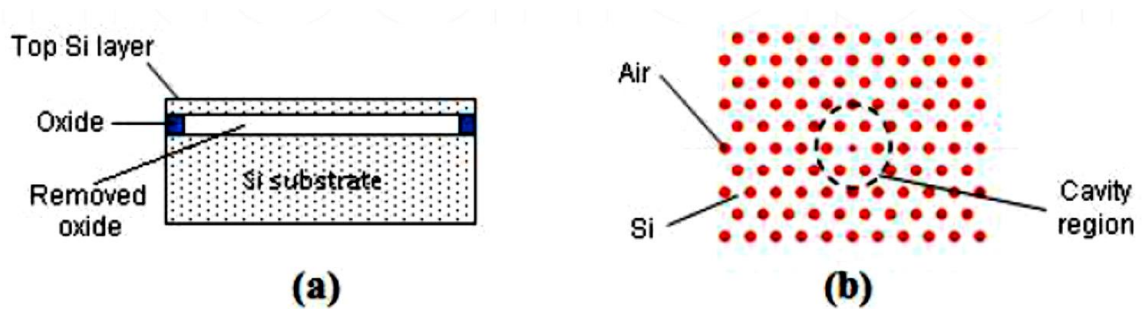


Figure II.9. Coupe transversale (a) et vue de dessus (b) du capteur PhC basé sur la cavité du pont d'air.

La carte de la bande interdite met en évidence une bande interdite photonique uniquement pour le mode polarisé électrique transversal (TE) dans la microcavité. Dans ces conditions, la sensibilité a été estimée à $S= 570\text{nm}/\text{RIU}$, supérieur à la sensibilité évaluée dans un simple capteur à base de SOI PhC caractérisé par les mêmes caractéristiques physiques.

Dans le capteur présenté ci-dessus, la conception du rayon du défaut et de l'épaisseur de la dalle joue un rôle fondamental pour améliorer les performances de détection. En fait, en changeant le rayon du défaut, il est possible d'obtenir différentes cartes de bande interdite. De plus, différents états défectueux, et, par conséquent, différentes conditions de résonance, peuvent être correctement introduits. Par exemple, en augmentant le rayon du trou défectueux, un décalage vers le bleu de la longueur d'onde de résonance se produit, présentant une sensibilité plus élevée. Cet effet est justifié par le fait qu'une plus grande partie du champ localisé est distribuée dans la région de la cavité, ce qui entraîne un chevauchement élevé entre les modes optiques résonnants et les espèces chimiques/biochimiques à détecter.

L'épaisseur de la couche supérieure représente un paramètre clé car elle influence les paramètres de performance, c'est-à-dire S_λ et $Q_{facteur}$. De plus, la distribution du champ et la bande interdite d'énergie sont également sérieusement affectées par l'épaisseur de la couche supérieure. En effet, pour une dalle plus fine S_λ est plus grand et $Q_{facteur}$ est plus petit en raison d'un moindre confinement et d'un plus grand chevauchement entre l'intensité du champ électrique et le fond. Au contraire, la longueur d'onde de résonance se décale vers des longueurs d'onde plus longues en augmentant l'épaisseur de la couche supérieure.

Une solution très intéressante proposée pour améliorer les performances de détection consiste en un capteur PhC basé sur le principe de détection RI et caractérisé par un réseau de microcavités résonnantes.

Le premier dispositif est intégré sur un substrat de silicium monolithique d'épaisseur $t = 0,55a = 232,65$ nm [10]. Le PhC 2D est caractérisé par un réseau triangulaire de trous avec une constante de réseau $a = 423$ nm et rayon du trou d'air $r = 0,32a = 135,36$ nm. Comme représenté sur la [figure 7](#), le dispositif consiste en un guide d'ondes obtenu en supprimant une rangée de trous d'air le long de la direction horizontale. Un tel guide d'onde guide la lumière de l'entrée du capteur vers la sortie. La région de la cavité est adjacente au guide d'onde et elle est réalisée en tirant vers l'extérieur deux trous dans la direction opposée (parallèle au guide d'onde). De plus, les rayons des trous environnants ont été ajustés afin d'optimiser la dimension de la cavité. En particulier, le rayon des trous gauche et droit doit être $r_x = 0,25a$ et le rayon des trous supérieur et inférieur est $r_y = 0,35a$. La géométrie globale est esquissée sur la **Figure II.10**.

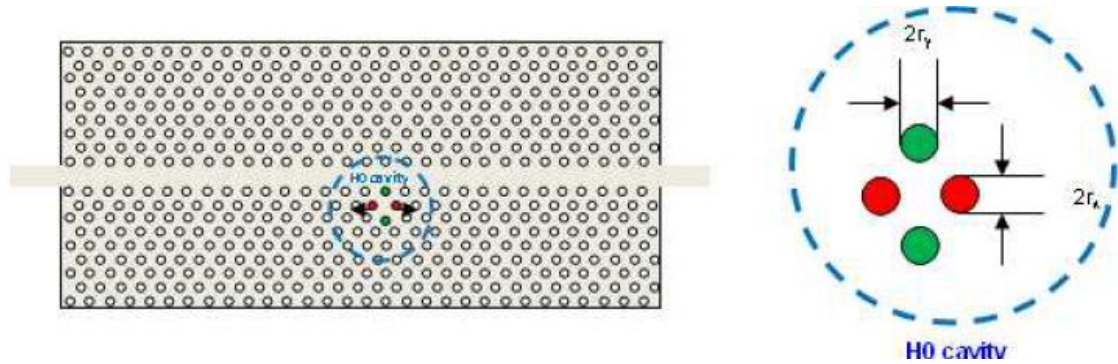


Figure II.10. Structure de la cavité H_0 avec le zoom de la disposition des trous.

Le décalage du trou représente un paramètre de conception stratégique. En fait, en faisant varier le décalage des trous de la cavité, la longueur d'onde de résonance du spectre de transmission se décale, entraînant des changements de la $Q_{facteur}$, aussi. Pour la structure dessinée à la **Figure II.10**, il a été démontré que le décalage optimal est $s_x = 0,2 a$, car le maximum $Q_{facteur}$ est obtenu à cette valeur. De plus, le meilleur jeu de rayons a été défini sur $r_x = 0,32a$ et $r_y = 0,28a$, afin d'obtenir un facteur de qualité aussi élevé que $Q = 2\,761$.

Un autre paramètre de conception fondamental est le nombre de trous fonctionnalisés autour de la région de la cavité pour l'analyse de sensibilité de masse. Initialement, les récepteurs de sonde sont déposés sur les surfaces intérieures des trous près de la région de la cavité. Lorsque les molécules cibles sont infiltrées dans les trous, l'indice de réfraction autour de la zone de la cavité change. Ce phénomène est dû à la liaison entre les molécules sondes et les objets cibles, résultant en une détection de surface.

Il convient d'introduire un nouveau paramètre appelé sensibilité de masse S_m , qui illustre la dépendance du décalage de la longueur d'onde de résonance Δ_λ sur le nombre de trous fonctionnalisés N :

$$S_m = \frac{\Delta_\lambda}{N} \quad \text{II.4}$$

Comme prévu, la sensibilité augmente en diminuant le nombre de trous fonctionnalisés. Les trous les plus sensibles aux changements de RI sont les plus internes dans la direction y . Par conséquent, afin d'optimiser l'événement de détection, il est nécessaire de déposer une couche de molécules sondes uniquement à la surface des trous mentionnés ci-dessus.

De cette façon, les n capteurs sont réalisés en cascade, couplés latéralement avec le même guide d'onde, permettant une détection multiple et parallèle. Comme le montre la **Figure II.11**, chaque cavité H_0 est caractérisée par la même architecture avec différents ensembles de paramètres géométriques. Le spectre de transmission montre différents dips, chacun indépendant des autres. Lorsqu'un événement de liaison se produit, seul le creux de transmission correspondant est affecté par un décalage. Cela permet une détection multiple et simultanée de différentes espèces chimiques.

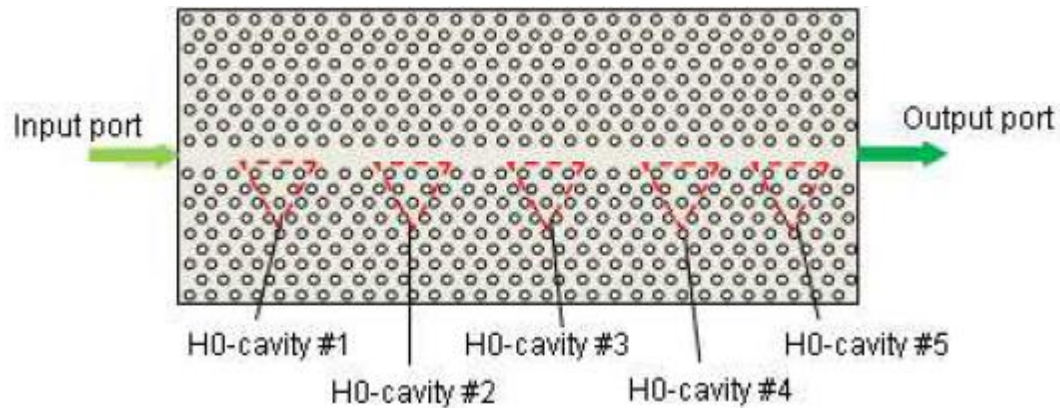


Figure II.11. Réseau de cavités résonnantes H_0 .

En conclusion, ce capteur présente une sensibilité en longueur d'onde de 115,60 nm/RIU. De plus, la sensibilité peut également varier de 84,39 nm/RIU à 161,25 nm/RIU, en ajustant le nombre de trous fonctionnalisés de 2 à 28, respectivement. L'avantage de cette architecture est représenté par la faible masse limite de détection obtenue avec une petite surface fonctionnalisée, résultant en un bon niveau d'intégration optique et un grand degré de détection multiplexée en milieu humide.

Un capteur PhC basé sur RI basé sur la même architecture décrite ci-dessus (c'est-à-dire une série de cavités résonnantes en cascade) a été proposé pour la détection simultanée de différentes espèces dans un environnement aqueux [11]. L'architecture se compose de réseaux de résonateurs PhC unidimensionnels (1D) couplés à un seul guide d'onde de bus. Chaque cavité a une largeur légèrement différente par rapport aux autres, de sorte que chacun peut détecter indépendamment une espèce bio-moléculaire différente en réponse aux changements du milieu environnant RI. Le mécanisme de détection se produit lorsque des biomolécules concentrées dans la cavité du capteur sont capturées par des molécules réceptrices préalablement déposées sur la surface du capteur. Les résonateurs en anneau ont été conçus pour présenter des longueurs d'onde

de résonance différentes et uniques, permettant ainsi une détection multiplexée avec un seul guide d'onde. Lorsque les molécules cibles sont sélectivement capturées par les récepteurs, le creux du spectre de transmission montre un décalage vers le rouge.

La structure se compose d'un guide d'ondes en silicium monomode conçu pour avoir une largeur de 450 nm et une hauteur de 250 nm, tandis que des résonateurs ont été réalisés avec la région de la cavité entourée de 8 trous d'air des deux côtés de 200 nm de diamètre, la constante de réseau 1D étant égale à 390 nm. La zone de cavité du premier capteur a été obtenue en déplaçant vers l'extérieur les trous les plus internes de 39 nm à partir du centre, comme illustré à la **Figure II.12**.

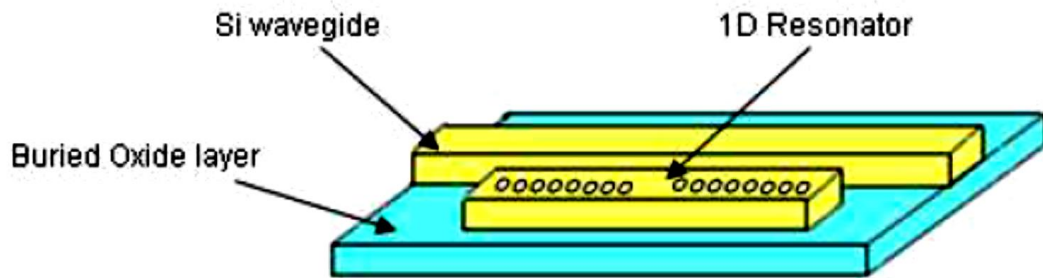


Figure II.12. *Microcavité à cristaux photoniques 1D.*

L'architecture présentée ci-dessus a été adoptée pour détecter différentes bio-molécules. La première configuration est constituée de cinq résonateurs, chacun devant être fonctionnalisé par une sonde différente. En particulier, les résonateurs fonctionnalisés avec du glutaraldéhyde et de la streptavidine servent de contrôle pour l'adsorption d'analyte non spécifique. Les autres résonateurs fonctionnalisés avec des anticorps monoclonaux sont destinés au suivi et à la détection d'in-vivoconcentrations d'interleukines 4,6 et 8 [11]. L'appareil peut détecter des anticorps dans une plage de concentration de 1 $\mu\text{g/ml}$ ÷ 1 mg/ml , adaptée aux applications cliniques et aux diagnostics médicaux, tels que le test VIH et le dépistage des drogues.

La même architecture caractérisée par un agencement analogue de cinq résonateurs près du guide d'onde PhC, a été conçue avec un nombre différent de trous fonctionnalisés plutôt qu'une taille différente de régions de cavité [12]. Chaque résonateur a été fonctionnalisé par une monocouche d'ADN simple brin (DNA_{ss}) de 50 nm d'épaisseur avec indice de réfraction $n_{ADN_{ss}} = 1,456$. Un événement de détection se produit lorsque l'ADN_{ss} complémentaire s'hybride avec les

sondes de capture fonctionnalisées, formant un ADN double brin (DNA_{ds}). De plus, la sensibilité du capteur peut être réglée en modifiant le nombre de trous fonctionnalisés, comme indiqué dans l'expression ci-dessous :

$$S_{\lambda} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta m} = \frac{\Delta n}{\Delta m/A} \times \left[\frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \times \frac{1}{A} \right] \quad \text{II.5}$$

Où Δn est le changement d'indice de réfraction dû à l'événement de liaison, A est la surface fonctionnalisée du capteur, $\Delta\lambda$ est le décalage de longueur d'onde de résonance et Δm est la masse de la cible liée. La sensibilité du capteur augmente en diminuant le nombre de trous fonctionnalisés N, comme déjà démontré pour les architectures de capteurs précédemment analysées. Dans ce cas précis, pour seulement deux trous fonctionnalisés, une sensibilité aussi élevée que 3,5 nm/fg est atteinte, tandis que pour seize trous, la sensibilité chute à 1 nm/fg.

Dans cette revue sur les capteurs intégrés PhC basés sur RI, nous présentons également un capteur innovant capable de détecter les in-vivo, particules simples aussi petites que des virus en milieu aqueux et gazeux [13]. Le capteur PhC est caractérisé par un réseau hexagonal de trous d'air cylindriques intégrés dans une plaquette SOI avec une constante de réseau $a = 400\text{nm}$ et un rayon de trou $r = 120\text{nm}$. Le rayon du trou central est $r_d = 342,5 \text{ nm}$, résultant en une bande interdite allant de 1440 nm à 1590 nm pour les modes TE.

Une sphère en latex avec un indice de réfraction $n = 1,45$ peut être piégé dans le trou central du PhC, caractérisé par un diamètre plus grand par rapport à celui des trous environnants et au diamètre de la même sphère à détecter. De cette manière, il est possible de détecter la présence de la particule unique piégée dans le plus grand trou en observant le décalage de longueur d'onde de résonance dans le spectre de transmission du capteur. En effet, lorsque la sphère est piégée dans la cavité du capteur, le pic de résonance caractérisé par le mode TE d'un $Q_{facteur}$ d'environ 2000, est décalé vers le rouge d'environ 4 nm. De plus, le décalage vers le rouge augmente proportionnellement à mesure que le diamètre de la sphère de latex augmente également. Enfin, le capteur décrit jusqu'à présent représente un outil utile dans les applications médicales et de santé pour la détection de molécules uniques.

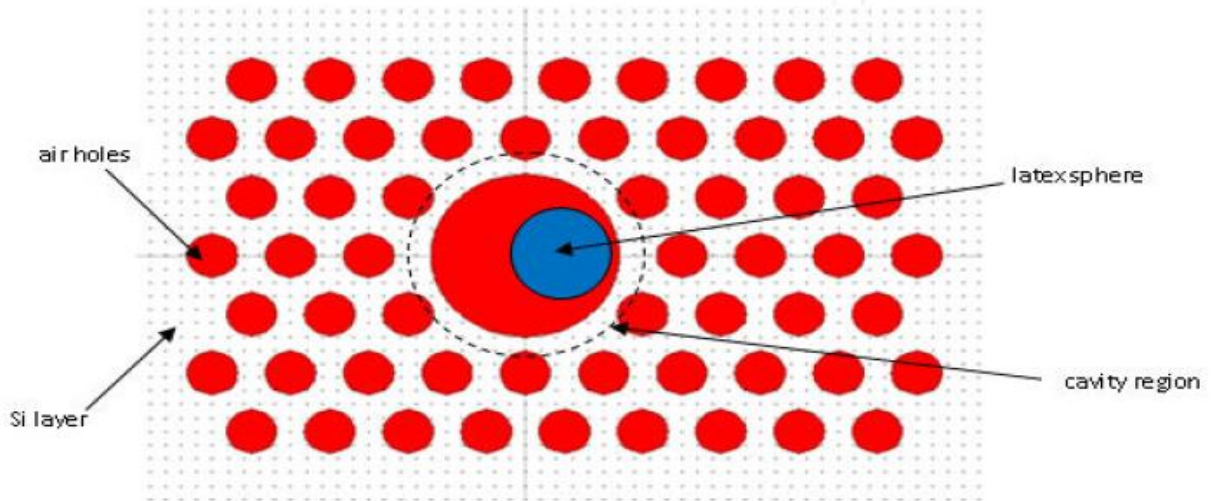


Figure II.13. Vue de dessus du dispositif PhC avec une sphère de latex dans le défaut central de la microcavité.

Dans plusieurs capteurs basés sur RI, le guide d'ondes PhC agit directement comme élément de détection sans concevoir de microcavité intégrée, comme précédemment analysé dans d'autres architectures de capteurs. Comme précédemment, un guide d'onde PhC est généralement réalisé en introduisant un défaut de ligne dans la structure planaire périodique. Dans de telles structures de guides d'ondes, seule la lumière à des longueurs d'onde en dehors de la bande interdite PhC peut être guidée. En particulier, les modes de propagation sont confinés par la réflexion interne totale (TIR) le long de la direction verticale et par la structure périodique latéralement.

Les performances des capteurs basés sur RI peuvent être quantifiées en surveillant les changements de longueur d'onde de coupure (λ_{coupure}) en fonction de la couverture RI. En particulier, λ_{coupure} décrit la longueur d'onde maximale à laquelle le mode optique peut se propager dans le guide d'onde PhC et elle dépend du milieu de couverture RI. Par conséquent, la sensibilité du capteur peut être définie comme le rapport entre les changements de longueur d'onde de coupure et les changements de couverture RI, comme suit :

$$S = \frac{\partial T}{\partial n_c} = \frac{\Delta \lambda_{\text{cutoff}}}{\Delta n_c} \quad \text{II.6}$$

Où T est le spectre de transmission, Δn_c est le changement de l'indice de réfraction (RI) de la couche de cristal photonique et $\Delta \lambda_{\text{cutoff}}$ est le changement de longueur d'onde de coupure.

Un capteur PhC basé sur RI a été proposé pour détecter l'ADNss, présentant une limite de détection de 19,8 nm [14]. Ce capteur, potentiellement capable de détecter de très faibles concentrations d'analytes (par exemple, protéines, bactéries, ADN) est fabriqué dans une tranche de SOI avec une épaisseur de couche de silicium de 250 nm et un dioxyde de silicium enterré de 3 μm d'épaisseur.

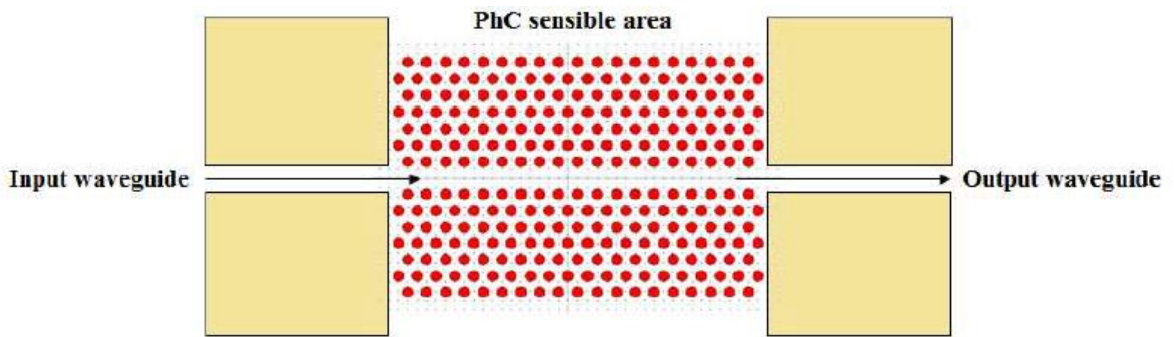


Figure II.14. Schéma du capteur d'ADN à base de PhC caractérisé par des guides d'ondes monomodes d'entrée et de sortie de 500 nm de large.

La constante de réseau PhC est $a = 390 \text{ nm}$ et le rayon du trou est $r = 111 \text{ nm}$. Par conséquent, la structure présente un mode TE guidé avec son bord de bande situé autour de $\lambda = 1550 \text{ nm}$. À l'entrée et à la sortie du guide d'ondes PhC, la lumière est couplée ou collectée par un guide d'ondes monomode de 500 nm de large, comme illustré à la **Figure II.14**.

Le régime opérationnel de détection est effectué par des pics spectraux créés par l'excitation de modes k multiples dans le régime d'ondes lentes près du bord de la bande. En fait, les changements de positions des pics sont surveillés en permanence, définissant ainsi la sensibilité du capteur selon l'équation précédente.

Le capteur a été testé avec une solution DNA complémentaire liée à la sonde ssDNA pré-déposée sur la surface du capteur. Un déplacement maximal de $\Delta \lambda = 47,1 \text{ pm}$ correspond à une concentration d'ADN de $0,5 \mu\text{m}$ dans l'échantillon complexe.

Un paramètre important à concevoir correctement pour augmenter les performances de détection dans un capteur à guide d'ondes PhC à une seule ligne est le rayon des trous localisés des deux côtés du défaut de ligne [15]. Dans ce contexte, un capteur intégré basé sur un guide d'onde PhC a été proposé. L'architecture du capteur est caractérisée par des trous d'air circulaires dans la plaquette de silicium, comme illustré à la **Figure II.15**. La structure de réseau triangulaire a une constante de réseau $a = 370 \text{ nm}$ et rayon du trou $r = 120 \text{ nm}$. Le guide d'ondes est obtenu en

supprimant une rangée entière de trous dans la direction horizontale, ce qui donne un guide d'ondes PhC de $9,5 \mu\text{m}$ de long. De plus, 12 rangées de trous sont périodiquement réparties de chaque côté de la ligne de défaut. Le capteur PhC présente une large bande interdite entre 1230 nm et 1720 nm pour les modes TE et une très petite bande interdite pour la polarisation TM.

La sensibilité de l'appareil a été évaluée en surveillant le décalage de la longueur d'onde de coupure lorsque le capteur, initialement exposé à la couverture d'air ($n_c = 1$), est ensuite recouvert d'une solution aqueuse (c'est-à-dire de l'eau déminéralisée avec $n_c = 1.33$). Par conséquent, le décalage de la longueur d'onde de coupure est estimé à 30 nm, en raison d'un changement de RI de couverture de 0,33 ($1,33-1$).

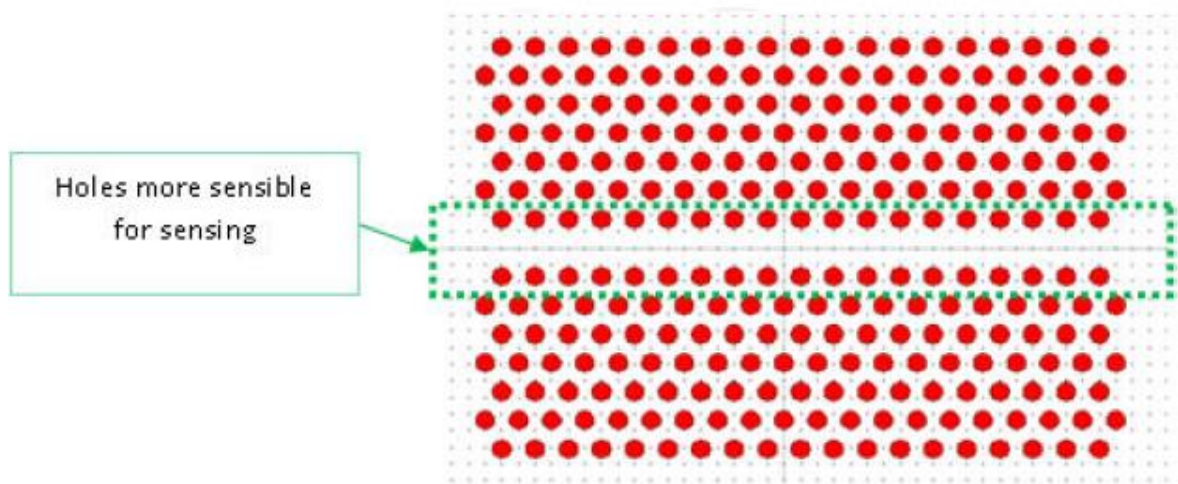


Figure II.15. Capteur de guide d'onde à cristal photonique avec trous sensibles.

La sensibilité du capteur peut être améliorée en infiltrant l'échantillon à analyser uniquement dans les trous adjacents au défaut de ligne. Cette disposition produit un décalage de coupure de 20 nm correspondant à une sensibilité de 60 nm/RIU. Des expériences ont montré que la sensibilité peut être encore augmentée en optimisant la taille des trous près du défaut de ligne, qui sont plus sensibles que les régions périphériques. En fait, en augmentant la taille du trou, un décalage de coupure de longueur d'onde de 80 nm et une sensibilité aussi élevée que $S_\lambda = 240 \text{ nm/RIU}$ peut être atteint, ce qui entraîne une amélioration d'environ 62 % par rapport au capteur d'origine.

Un capteur basé sur RI a également été proposé pour la détection de gaz. En particulier, l'interaction entre le mode de lumière lente se propageant dans la structure et le gaz infiltré dans celle-ci, est transduite par les changements d'indice de réfraction effectif du guide d'onde,

entraînant des changements de longueur d'onde du régime de lumière lente [16]. Ce type de capteur présente l'avantage d'améliorer les performances de détection du fait de l'interaction lumière-matière renforcée. De plus, la sélectivité du capteur est assurée car le spectre de transmission ne change d'amplitude que lorsque le gaz est rempli dans la structure PhC.

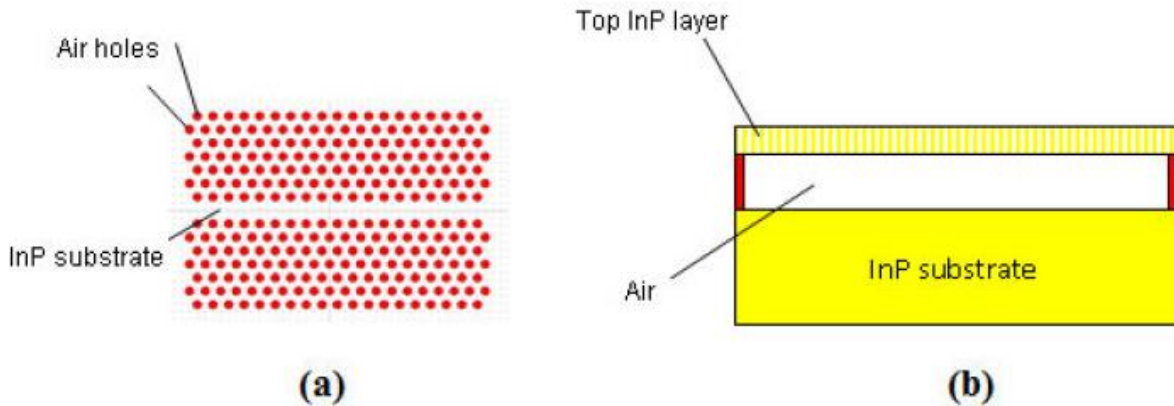


Figure II.16. *a) Haut et (b) vue en coupe du capteur de guide d'ondes à cristal photonique pour la détection de gaz.*

Comme le montre la **Figure II.16**, le capteur consiste en une configuration de membrane à pont d'air InP. En particulier, une couche d'air en bas et en haut de la dalle PhC de 285 nm d'épaisseur assure la symétrie du dispositif. La structure PhC est encadrée dans la dalle InP avec une périodicité triangulaire, une constante de réseau $a = 441$ nm et rayon des trous d'air $r = 0,33a$. Le guide d'onde est obtenu en supprimant toute une rangée de trous d'air.

Les performances de détection ont été estimées en exposant le capteur initialement recouvert d'air, à l'argon ($n = 1,000282$) et Hélium ($n = 1,000035$) gaz, correctement rempli dans le guide d'ondes PhC. En particulier, un décalage de 0,6 nm a été détecté en cas d'Hélium rempli dans le guide d'onde et un décalage de 0,05 nm en cas d'Argon. Le capteur présente une bonne tolérance aux perturbations environnementales et il est capable de détecter tous les gaz caractérisés par des indices de réfraction similaires à ceux de l'argon et de l'hélium, à l'exception de ceux dont les indices de réfraction sont très proches de l'air RI (c'est-à-dire, $n_{Air} = 1$).

En conclusion, les capteurs à base de PhC intégrés dans les architectures d'interféromètres ont été passés en revue. Généralement, le principe de détection caractérisant les architectures d'interféromètres est basé sur la mesure de déphasage. En particulier, si une perturbation ne se produit que sur un bras de l'interféromètre, le signal de sortie diffère du signal d'entrée, montrant

une variation de sa phase ou de son amplitude. Dans la configuration Mach Zehnder, il est possible de quantifier la quantité de déphasage sur le bras actif en suivant l'intensité de sortie du signal. La perturbation mentionnée ci-dessus peut être associée au changement d'indice de réfraction de couverture dans un bras du MZI, en raison de la présence d'analytes dans l'échantillon. Ce phénomène peut être décrit par la relation suivante :

$$\Delta\varphi = \Delta\beta L = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L \quad \text{II.7}$$

Où Δn est la variation de l'indice de réfraction, L est la longueur du guide d'onde et λ est la longueur d'onde.

Comme le montre la **Figure II.17**, un capteur basé sur MZI avec un guide d'onde à fente PhC a été fabriqué et caractérisé expérimentalement [17]. Le capteur est composé de guides d'ondes PhC dans les bras actifs et de référence, de guides d'ondes à nervures pour l'entrée et la sortie du capteur, de jonctions en Y, d'électrodes et de coussinets d'électrodes. En particulier, les guides d'ondes PhC sont réalisés en supprimant une seule rangée de trous d'air dans une plaque de silicium. Le dispositif est fabriqué sur une plaquette SOI, dans laquelle l'épaisseur de la couche centrale de silicium est $t = 215$ nm, le milieu de gaine supérieur est de l'air et la couche inférieure est une couche d'oxyde enterrée de $2 \mu\text{m}$ d'épaisseur. Dans la plaque de silicium, les trous sont disposés par des cellules hexagonales à constante de réseau $a = 400$ nm entraînant le diamètre du trou d'air $d = 0,53 a$.

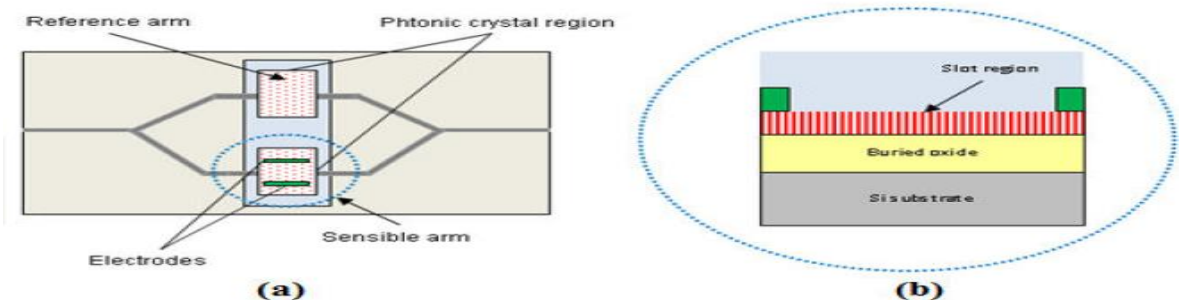


Figure II.17. MZI avec guide d'onde à cristal photonique à fente (a) et vue en coupe transversale (b).

Pour les applications de capteur, il est possible d'induire des changements RI localisés en remplissant la région du guide d'ondes avec des matériaux d'analyte en phase gazeuse ou liquide. De cette manière, l'intensité du signal de sortie peut être modifiée en raison de l'effet de conjonction de la tension d'attaque statique supportée par les électrodes sur les bras du capteur et

les changements de RI du couvercle. Enfin, une comparaison expérimentale montre comment le guide d'ondes PhC à fente en silicium fournit un changement d'indice 30 fois efficace par rapport au guide d'ondes à bande à fentes en silicium conventionnel.

Un capteur qui combine les caractéristiques de séparation de puissance optique du séparateur de puissance d'interférence multimode (MMI) et les caractéristiques de résonance de chute de transmission de plusieurs réseaux de microcavités PhC, a été récemment étudié et proposé [18]. Le dispositif, illustré à la **Figure II.18**, est fabriqué sur une plate-forme SOI et se compose d'un séparateur de puissance optique MMI 1x4 qui divise la lumière d'entrée d'un guide d'ondes à crête en quatre canaux de sortie. Le MMI a une longueur et une largeur de 123 μm et 16 μm , respectivement. Le guide d'onde d'entrée a une largeur de 2,5 μm et les sorties sont séparées de 1,5 μm . Les guides d'ondes PhC sont des défauts de ligne avec une constante de réseau uniforme $a = 400 \text{ nm}$ et diamètre des trous $d = 0,54a$ qui est couvert une plaque de silicium d'épaisseur $t = 0,58a = 232 \text{ nm}$.

Sur les bras #1 à #3, les trous d'air de bord sur l'axe de la microcavité PhC sont décalés vers l'extérieur dans la direction horizontale d'une distance égale à $0,15a$. Sur le bras #4, deux microcavités espacées de 50 μm , sont conçues de type L13. Dans le premier, les trous d'air de bord sont décalés vers l'intérieur de $0,15a$, dans la deuxième microcavité, les trous d'air de bord sont décalés vers l'extérieur de $0,15a$ entraînant une diaphonie (transmission bidirectionnelle) nulle.

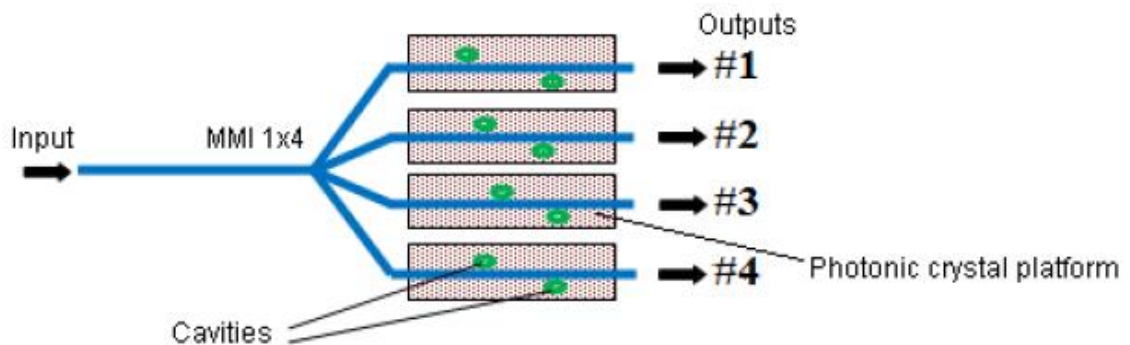


Figure II.18. Schéma d'un appareil MMI 1x4.

Chaque microcavité est recouverte de différentes biomolécules réceptrices, chacune répondant à son conjugué spécifique. En effet, en introduisant dans la zone sensible 60 μl de 600nm d'IgG de chèvre anti-lapin Abs dissous dans du PBS, seul le spectre de transmission du bras #2 change, montrant un décalage de longueur d'onde résonnant. En effet, le bras #2 est imprimé avec un conjugué spécifique lapin anti-chèvre IgG Abs. Le bras n ° 4 fonctionne de manière similaire

tandis que tout décalage est observé dans les bras restants car les bras n° 1 et n° 3 sont imprimés avec de l'IL-10 Abs humain et le bras n° 4 dans la deuxième microcavité est recouvert de BSA. Par conséquent, en changeant la solution d'échantillon, donc en introduisant 60 µl de 600 nm d'Abs anti-IL-10 humaine de rat dissous dans du PBS, un seul décalage de longueur d'onde de résonance est observé dans le bras #1. Enfin, le capteur est insensible aux changements environnementaux et permet une détection multiple, étant très approprié pour le dépistage à haut débit.

II.4. Conclusions :

Dans ce chapitre, l'état de l'art des capteurs basés sur PhC a été examiné en se concentrant sur les principales caractéristiques et avantages des différentes architectures et configurations de mesure présentées dans la littérature.

Dans le cas des capteurs intégrés à base de PhC, le principe physique le plus courant est la détection RI utilisée pour la détection de particules, de gaz, de molécules chimiques et biologiques, de protéines, de virus, de la salinité de l'eau ...etc.

Les architectures interférométriques et les capteurs photoniques basés sur des microcavités résonnantes représentent sans aucun doute les solutions intégrées les plus efficaces pour des performances de détection ultra élevées et des lectures optiques et compatibles CMOS simples. Dans ce contexte, les valeurs typiques des sensibilités aux longueurs d'onde sont de l'ordre de $S_\lambda = 298\text{nm/RIU}$ obtenu par un résonateur en anneau basé sur un guide d'ondes à fente [19] et $S_\lambda = 26\text{nm/RIU}$ présenté par une configuration Mach-Zehnder [20]. En comparaison avec les performances mentionnées ci-dessus, il a été démontré que les cavités résonnantes PhC sont capables d'atteindre des sensibilités de longueur d'onde plus élevées aussi élevées que $S_\lambda = 460\text{nm/RIU}$ et $S_\lambda = 570\text{nm/RIU}$.

Le principal inconvénient caractérisant les capteurs à base de PhC est représenté par le contrôle rigoureux des processus technologiques à exécuter lors de la conception et de la fabrication. Ces exigences sont nécessaires en raison des tailles nanométriques des défauts et des trous dans la structure périodique de PhC et de la très grande sensibilité de fonctionnement du capteur vis-à-vis des changements géométriques et physiques. Quoi qu'il en soit, la plate-forme technologique SOI bien connue identifie une installation standard et bon marché pour la production à grande échelle de capteurs à base de PhC.

Enfin, la technologie des cristaux photoniques représente sûrement un domaine de recherche à approfondir pour son incroyable potentiel dans des applications telles que le traitement du signal optique, les télécommunications et, enfin et surtout, la détection optique avancée [21].

Références bibliographiques du chapitre II

- [1] Scullion, MG ; Di Falco, A. & Krauss, TF (2011). Slotted photonic crystal cavities with integrated microfluidics for biosensing applications. *Biosensors and Bioelectronics*, (juin 2011), 27(1), 101-105.
- [2] Zlatanovic, S.; Mirkarimi, LW; Sigalas, MM; Bynum, MA; Chow, E.; Robotti, KM; Burr, GW; Esener, S. & Grot, A. (2009). Photonic crystal microcavity sensor for ultracompact monitoring of reaction kinetics and protein detection, *Sensors and Actuators B: Chemical*, (août 2009), 141(1), 13-19.
- [3] Biallo, D. ; D'Orazio, A. ; De Sario, M. ; Marrocco, V. & Petruzzelli, V. (2006). Proceedings of 2006 International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), (juin 2006), 2, 44-48.
- [4] Lin, H.; Yi, Z. & Hu, J. (2012). Double resonance 1-D photonic crystal cavities for single molecule mid-infrared photothermal spectroscopy: theory and design. *Optics Letters*, (Avril 2012), 37(8), 1304-1306.
- [5] Liu, Y. & Salemink, HWM (2012). Photonic crystal-based all-optical on-chip sensor. *Optics Express*, (août 2012), 20(18), 19912-19920.
- [6] Jágerská, J.; Zhang, H.; Diao, Z.; En ligne Le Thomas, N. & Houdré, R. (2010). Refractive index sensing with an air-slot photonic crystal nanocavity. *Optics Letters*, (août 2010), 35(15), 2523-2525.
- [7] Bendemagh Khalissa, « Etude de dimensionnement d'un coupleur à base de cristaux photoniques destiné aux systèmes de communications », Thèse De Doctorat, Université Ferhat Abbas – Setif 1, 2019.
- [8] Robinson, S. & Nakkeeran, R. (2012). Photonic Crystal based sensor for sensing the salinity of seawater. *IEEE – International Conference on Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM)*, 978-81-909042-2-3, (mars 2012), 495-499.
- [9] Junhua, L.; Qiang, K.; Chunxia, W.; Baoqing, S.; Yiyang, X. & Hongda, C. (2011). Design of a photonic crystal microcavity for biosensing. *Journal of Semiconductors*, (mars 2011), art. 034008, 32(3).
- [10] Yang, D.; Tian, H. & Ji, Y. (2011a). Nanoscale photonic crystal sensor arrays on monolithic substrates using side-coupled resonant cavity arrays. *Optics Express*, (octobre 2011), 19(21), 20023-20034.
- [11] Mandal, S.; Goddard, JM & Erickson, D. (2009). A multiplexed optofluidic biomolecular sensor for low mass detection. *Lab on a Chip*, (juillet 2009), 9(20), 2924-2932.
- [12] Mandal, S. & Erickson, D. (2008). Nanoscale optofluidic sensor arrays. *Optical Express*, (février 2008), 16(3), 1623-1631.

- [13] Lee, M. ; Miller, BL & Fauchet, PM (2008). Two-dimensional photonic crystal microcavity sensor for single particle detection. *Lasers and Electro-Optics, 2008 and 2008. Conference on Quantum Electronics and Laser Science*, 978-1-55752-859-9, (mai 2008), 1-2.
- [14] García-Rupérez, J.; Toccafondo, V.; Banuls, MJ; Griol, A.; Castelló, JG; Peransi-Llopis, S. & Maquieira, A. (2010). Single strand DNA hybridization sensing using photonic crystal waveguide-based sensor. *7th IEEE International Conference on Group IV Photonics*, 978-1-4244-6346-6, (septembre 2010), 180-182.
- [15] Bougriou, F. ; Bouchemat, T. ; En ligne Bouchemat, M. & Paraire N. (2011). High sensitivity of sensors based on two-dimensional photonic crystal. *Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECPC), 2011 Saudi International*. 978-1-4577-0069-9, (avril 2011), 1-4.
- [16] Awad, H.; Hasan, I.; Mnaymneh, K.; Hall, TJ et Andonovic, I. (2011). Gas sensing using slow light in photonic crystal waveguide. *7th Workshop on Fibre and Optical Passive. Components (WFOPC)*, 978-1-4577-0861-9, (juillet 2011), 1-3.
- [17] Chen, X. & Chen, RT (2008). Sensitivity-enhanced silicon slot photonic crystal waveguides. *5th IEEE International Conference on Group IV Photonics*, 978-1-4244-1768-1, (septembre 2008), 395-397.
- [18] Zou, Y.; Chakravarty, S.; Lai, W.-C.; Lin, C.-Y. & Chen, RT (2012). Methods to array photonic crystal microcavities for high throughput high sensitivity biosensing on a silicon-chip based platform, *Lab Chip*, (juillet 2012), 12(13), 2309-2312.
- [19] Claes, T. ; Molera, JG ; Schacht, E. ; Baets, R. & Bienstman, P. (2009). Label-Free Biosensing with Slot-Waveguide-Based Ring Resonator in Silicon on Insulator. *IEEE Photonics Journal*, (septembre 2009), 1(3), 197-204.
- [20] Lu, P.; Men, L.; Sooley, K. & Chen, Q. (2009). Tapered fiber Mach-Zehnder Interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature. *Applied Physics Letters*, (avril 2009), art. 131110, 94(13).
- [21] Benedetto Troia, Antonia Paolicelli, Francesco De Leonardis and Vittorio M. N. Passaro, "Photonic Crystals for Optical Sensing: A Review", Chapter 11, *Advances in Photonic Crystals*, <http://dx.doi.org/10.5772/53897>.

Chapitre : III

Résultats de Simulation

III.1. Introduction :

Les simulations numériques permettent de reproduire des phénomènes physiques complexes et réels dont les descriptions sont basées sur des modèles mathématiques contenant des équations aux dérivées partielles. Dans ce travail, nous intéressons à la méthode FDTD et la méthode d'expansion d'onde plane (PWE), qui existe dans la base de données OPTI-WAVE. Dans ce chapitre, nous proposons la conception d'un nouveau type de capteur basé sur des cristaux acoustiques 2D. Nous commençons d'abord par définissons les deux méthodes FDTD et PWE, puis décrivons le programme de simulation "Opti-FDTD" utilisé dans notre travail, Et présentons la structure proposée. Après, nous présentons les résultats de simulation obtenus.

III.2. La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) :

La méthode « Finite Difference Time Domain » (FDTD) a été proposée pour la première fois par Kane S. Yee en 1966 et a été largement utilisée dans le calcul électromagnétique. La méthode est basée sur la résolution temporelle, et les équations de Maxwell sont discrétisées dans l'espace et dans le temps. Ensuite, la méthode FDTD a été appliquée aux cristaux photoniques. Le calcul de toutes les composantes du champ permet l'utilisation des transformées de Fourier pour obtenir des informations à tout moment et sur tous les champs calculés, comme le spectre de plusieurs points structuraux, les champs de cartographie électrique ou magnétique à l'intérieur du cristal, etc. Cette méthode est adaptée à l'étude de défauts ou de cavités. Cette méthode permet d'étudier de réseaux de taille finie à l'aide de conditions aux limites absorbantes ou à l'infini à l'aide de réseaux de conditions de parois magnétiques ou électriques. [1]

III.3. La méthode des ondes planes (PWE) :

La méthode des ondes planes (PWE) fait référence à une technique de calcul en électromagnétisme qui résout les équations de Maxwell en formulant des problèmes de valeurs propres à partir des équations. Cette approche est populaire dans la communauté des cristaux photoniques comme moyen de résoudre la structure de bande (relation de dispersion) d'une géométrie de cristal photonique spécifique. PWE remonte à des formulations analytiques qui peuvent être utilisées pour calculer des solutions modales aux équations de Maxwell sur une géométrie inhomogène ou périodique

III.4. Description du logiciel :

Opti-wave est un logiciel de conception pour photonique, Opti-FDTD est un logiciel puissant, hautement intégré et convivial qui permet la conception et la simulation assistées par ordinateur de composants photoniques passifs avancés. Opti-FDTD vous permet de concevoir, d'analyser et de tester des composants photoniques passifs et non linéaires modernes pour la propagation, la diffusion, la réflexion, la diffraction, la polarisation et les phénomènes non linéaires des ondes. Le programme de base d'Opti-FDTD est basé sur un algorithme de domaine temporel à différence finie (FDTD) avec une précision numérique de second ordre et une condition aux limites de pointe - la condition aux limites de la couche uniaxiale parfaitement adaptée (UPML). L'algorithme résout les champs électriques et magnétiques dans les domaines temporel et spatial en utilisant la forme différentielle vectorielle complète des équations de boucle couplée de Maxwell. [2]

Opti-FDTD a 4 applications principales :

- 1. Le concepteur de disposition (Layout Designer) :** ici, nous pouvons définir les paramètres de la structure et de la simulation.
- 2. Concepteur de profil (Profile Designer) :** permet de définir les matériaux et profils utilisés dans la simulation
- 3. Simulateur (Simulator) :** Le programme charge les fichiers du concepteur et effectue des simulations. Le simulateur commence par le concepteur de mise en page.
- 4. Analyseur (Analyzer) :** Ce programme est utilisé pour afficher les résultats et effectuer un post-traitement. Après avoir exécuté la simulation, le simulateur vous demandera si vous souhaitez ouvrir l'analyseur.

La Procédure de simulation <<Opti-FDTD>> est résumée dans l'organigramme de la **Figure III.1**

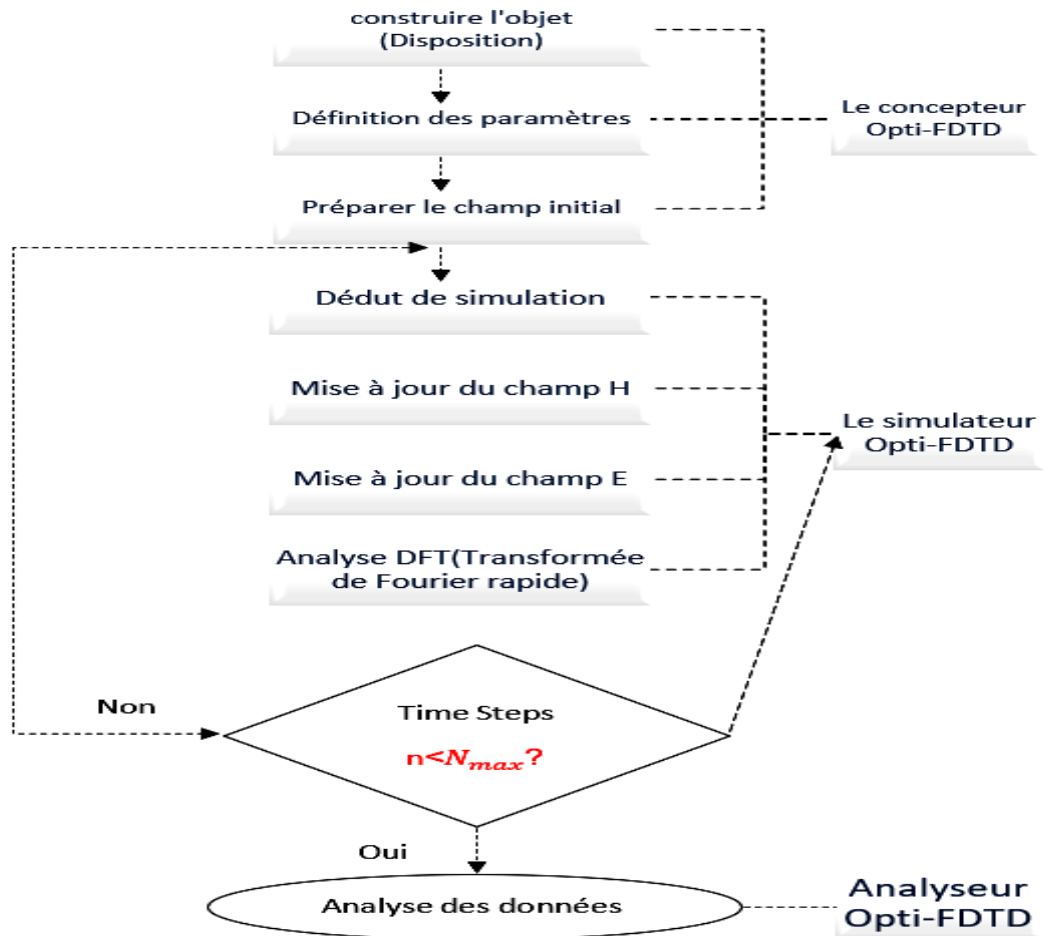


Figure III.1. Procédure de simulation dans Opti-FDTD

L'outil de simulation Opti-FDTD (finite time-Domain simulation design) OPTIWAVE, est un leader émergent dans le développement de logiciels innovants pour la conception et la révision de composants, d'interfaces, de systèmes et de réseaux pour la nanotechnologie, l'optoélectronique, les réseaux optiques et d'autres applications optiques.

Le programme Opti-FDTD comprend un ensemble d'outils et de fichiers qui lui permettent de tracer et d'analyser, le mode solution 2D/3D, la capacité de chargement, la prise en charge de la simulation multiprocesseur et cross-core, les formats de masque de sortie GDSII/DXF.

Opti-FDTD est un environnement de CAO (conception assistée par ordinateur) puissant, hautement intégré et convivial pour la conception et la simulation de dispositifs photoniques passifs et non linéaires avancés. L'image de sa plateforme est montrée dans la **figure III.2**.

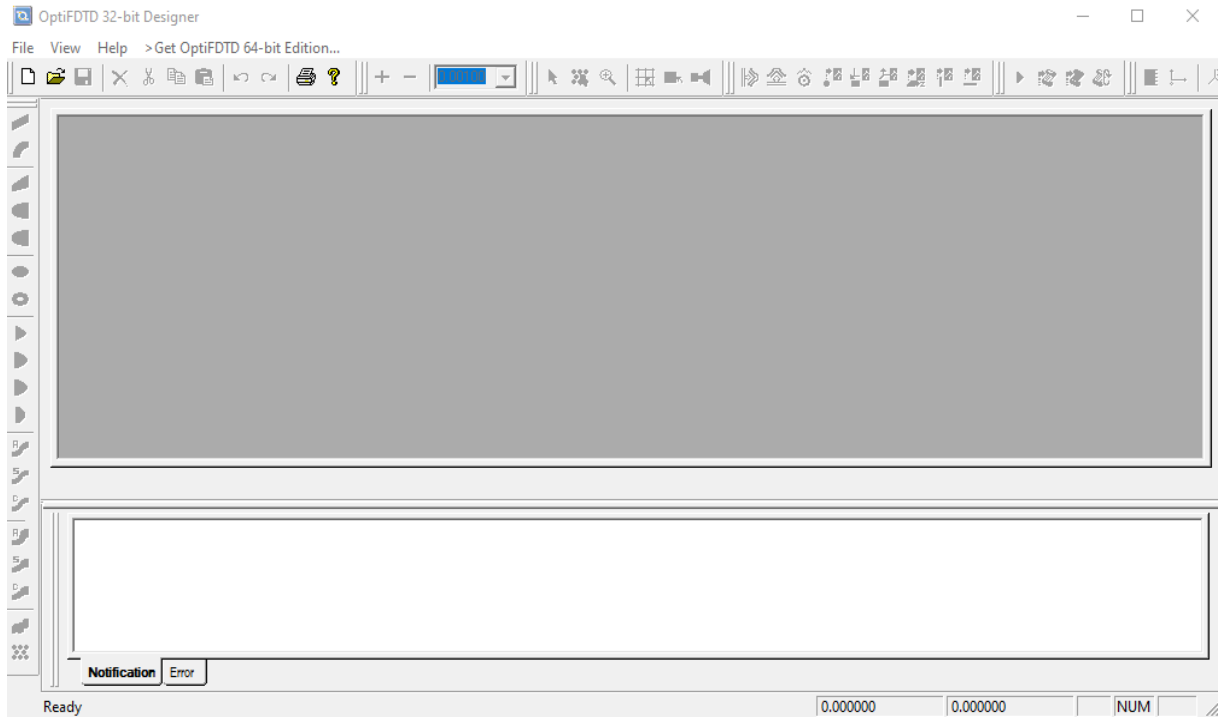


Figure III.2 : plateforme de logicielle Opti-FDTD

III.5. Structure utilisée :

Dans nos simulations, on s'intéresse à la polarisation TE (Transverse Electric) et Polarisation TM (Transverse Magnetic). Notre étude comprend le calcul des spectres de transmission et de bande.

La **figure III.3** montre la structure du cristal photonique bidimensionnel utilisé. Pour le réseau hexagonal, la structure est constituée de tiges de l'indice de réfraction ($n_{Si} = 3.4777$), plongées dans l'air ($n = 1$), Le diamètre des tiges est égal à $0.3a$.

La périodicité de la structure est caractérisée par une cellule hexagonale avec une constante de réseau $a = 515$ nm. Le rayon r des tiges et l'épaisseur de la couche de silicium h sont choisis tels que $r = 0,33a$ et $h = 0,427a$.

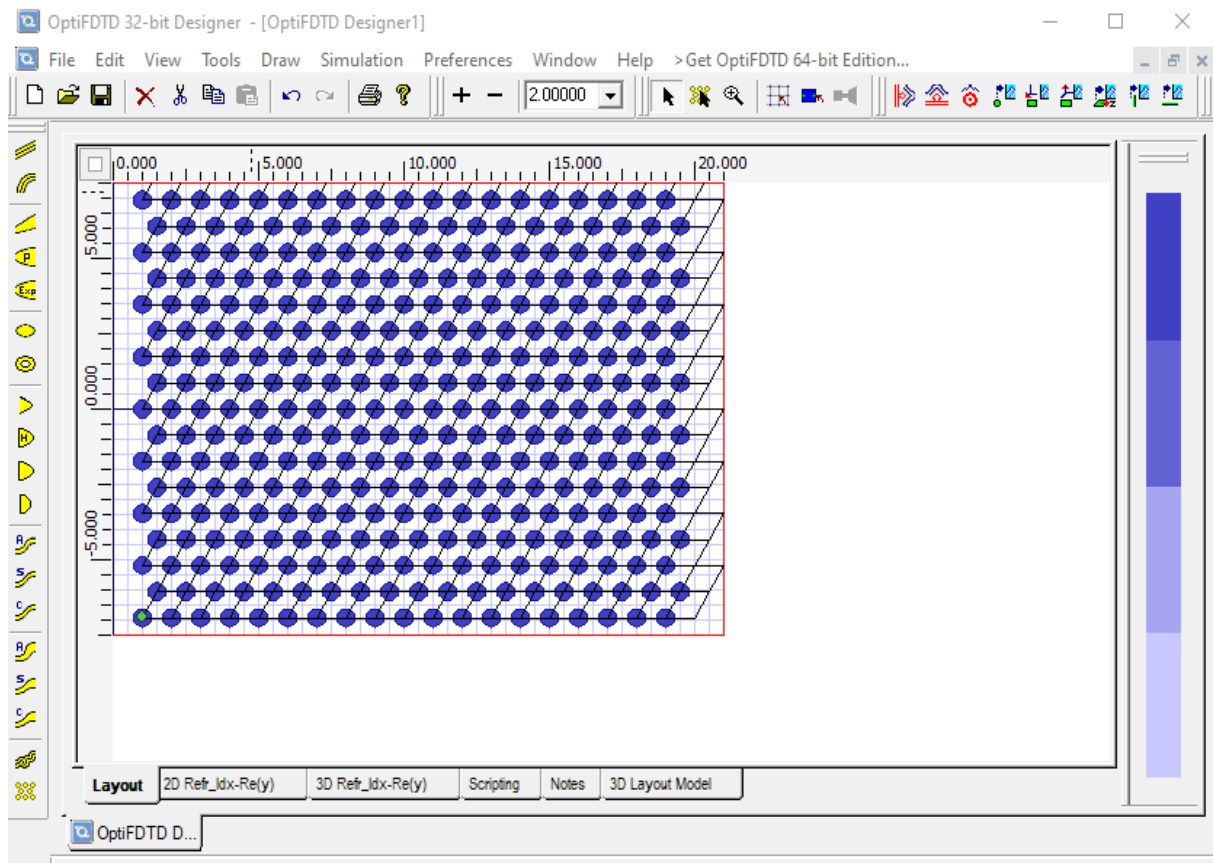


Figure III.3: la structure de cristal photonique bidimensionnel utilisée

III.6. Diagramme des bandes interdites photoniques :

La distribution du diagramme de bande de la configuration de notre dispositif a été analysée à l'aide de la méthode d'extension d'onde plane (PWE). Les **figures III.4** et **III.5** représentent les diagrammes de bandes pour des cristaux photoniques bidimensionnels. Pour le réseau hexagonal, la structure est constituée de tiges de l'indice de réfraction $n = 3.4777$ plongées dans l'air ($n = 1$), Le diamètre des tiges est égal à $0.3a$.

On observe deux larges bandes interdite photonique pour la polarisation TE, par contre pour la polarisation TM, on obtient plusieurs bandes (4 bandes), mais elles sont petites par rapport à la polarisation TE.

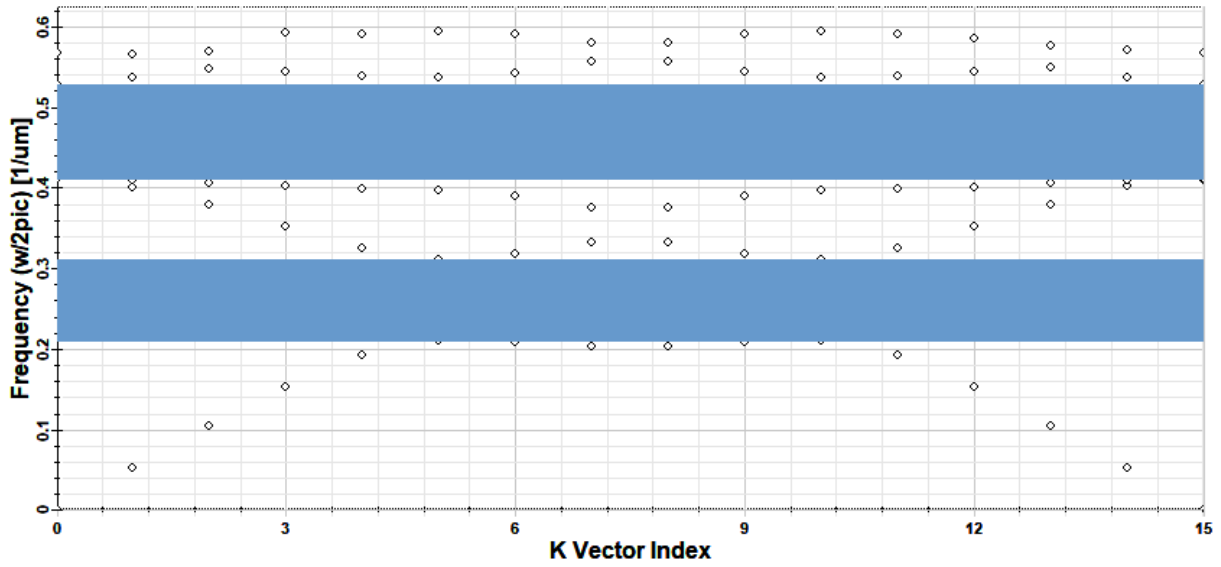


Figure III.4 : Diagramme de bande d'un réseau hexagonal, polarisation TE

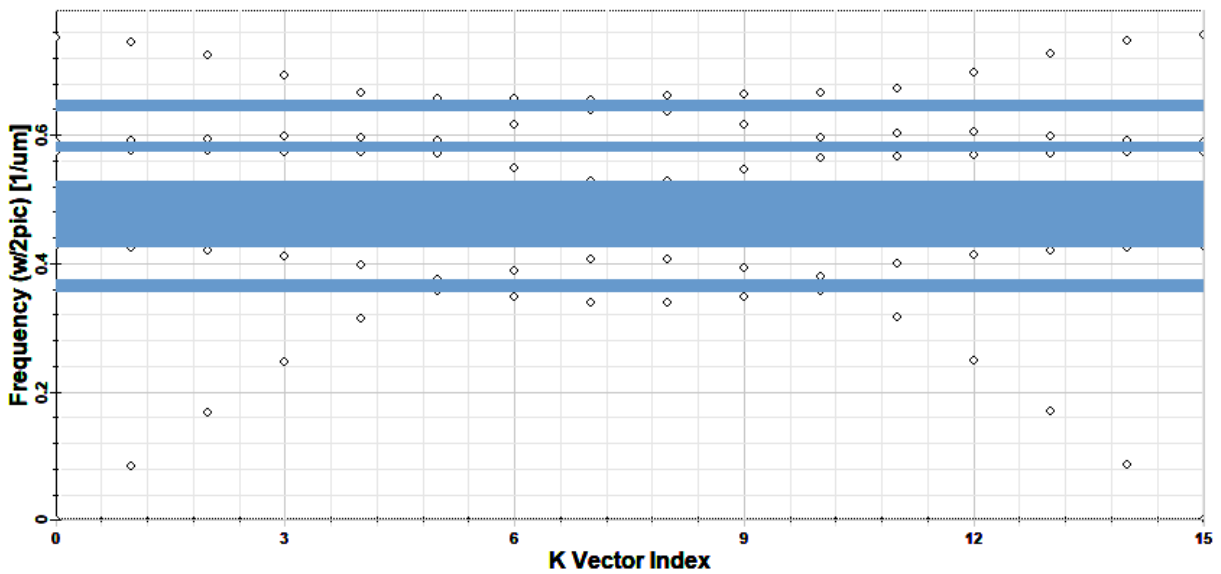


Figure III.5 : Diagramme de bande d'un réseau hexagonal, polarisation TM

III.7. Variation de la bande interdite photonique en fonction de l'indice de réfraction :

Pour voir l'effet de l'indice de réfraction sur la largeur de la bande interdite Pour la photonique, on fait varier l'indice de réfraction de la tige, à partir de $n = 3,4777$ (silicium), la deuxième structure est à $n=3,4577$ et on se retrouve avec $n=3,4377$.

III.7.1. Pour la polarisation TE :

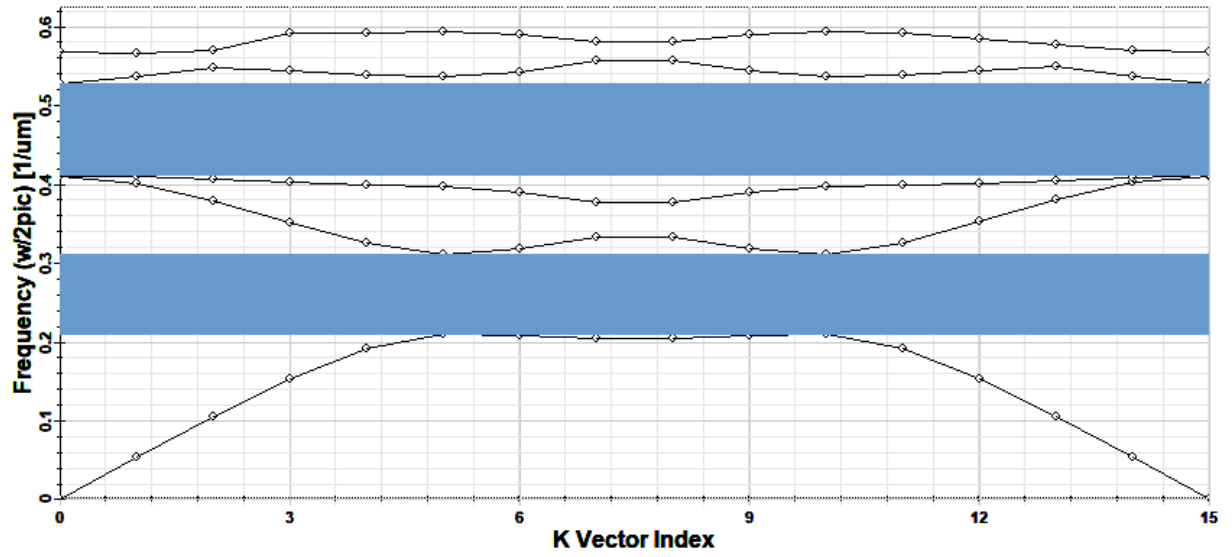


Figure III.6: Diagramme de bande d'un réseau hexagonal avec $n= 3.4777$, polarisation TE

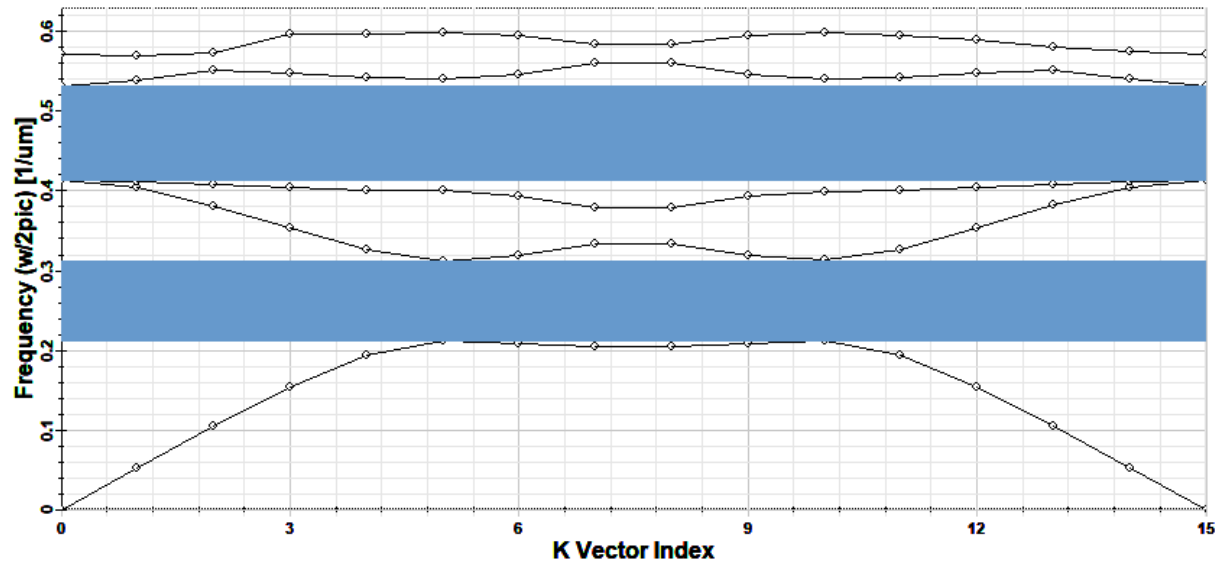


Figure III.7 : Diagramme de bande d'un réseau hexagonal avec $n= 3.4577$, polarisation TE

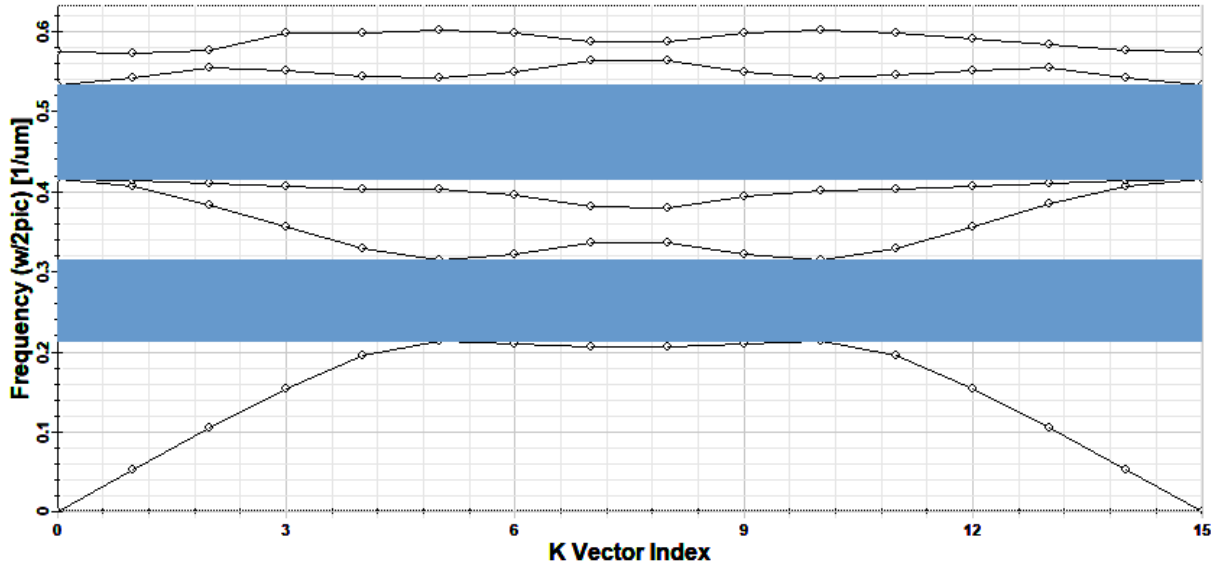


Figure III.8 : Diagramme de bande d'un réseau hexagonal avec $n= 3.4377$, polarisation TE

III.7.2. Pour la polarisation TM :

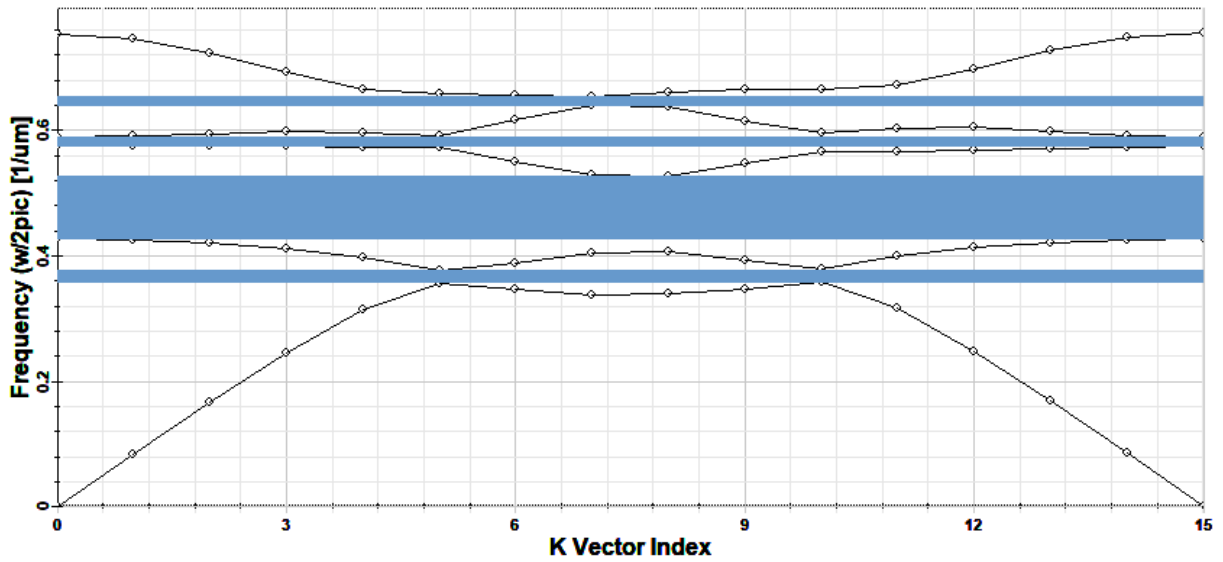


Figure III.9 : Diagramme de bande d'un réseau hexagonal avec $n= 3.4777$, polarisation TM

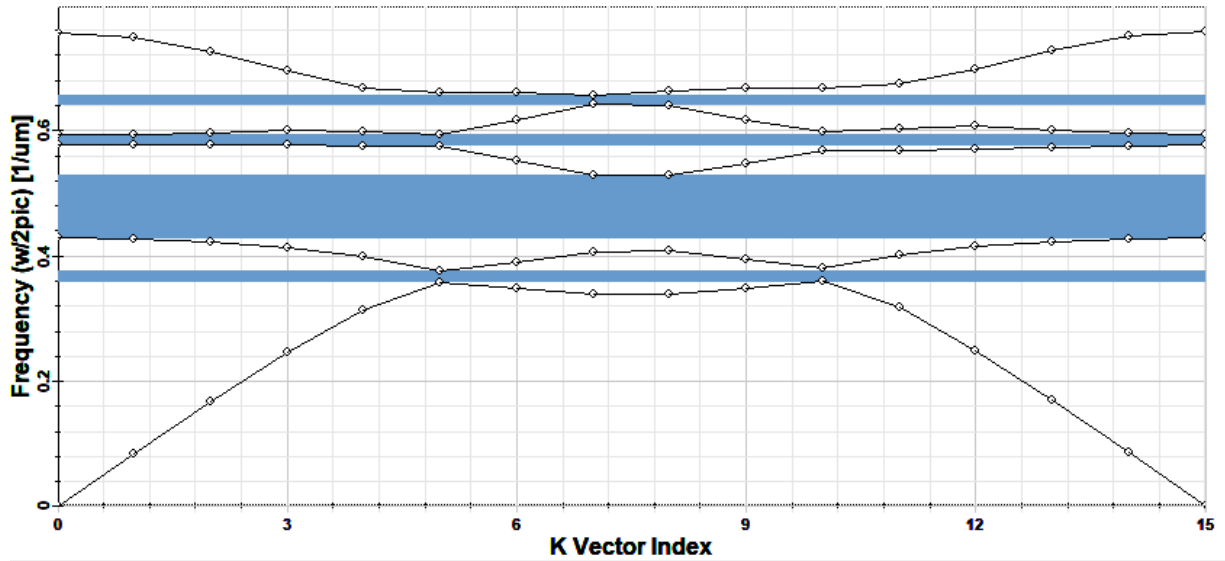


Figure III.10 : Diagramme de bande d'un réseau hexagonal avec $n= 3.4577$, polarisation TM

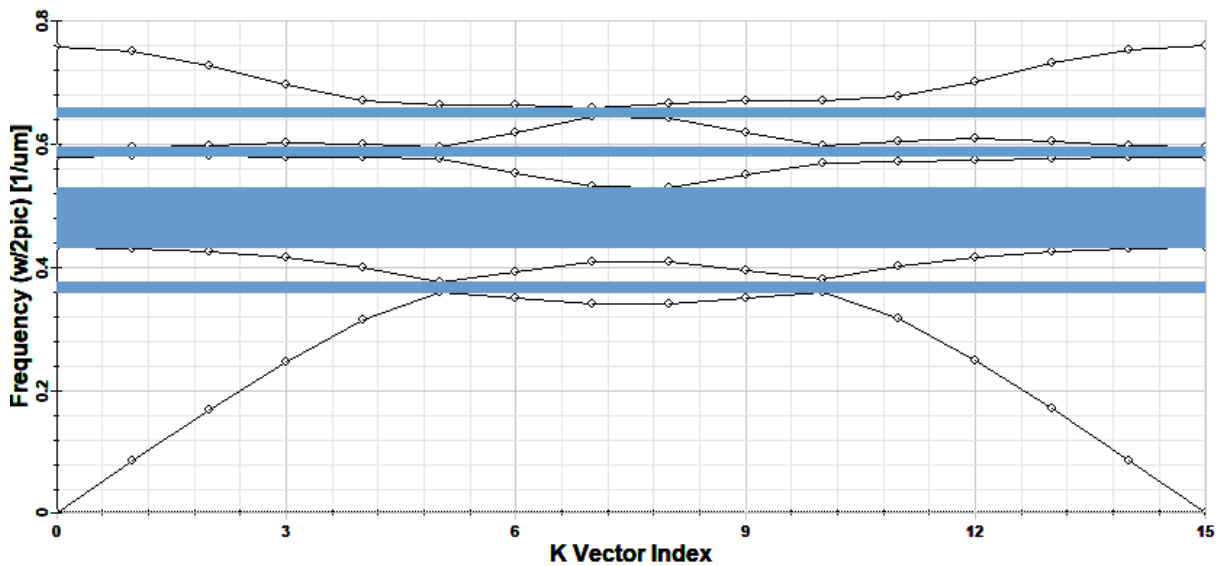


Figure III.11 : Diagramme de bande d'un réseau hexagonal avec $n= 3.4377$, polarisation TM

Dans le tableau ci-dessous, nous donnons les valeurs de largeur de bande interdite photonique et leurs positions pour chaque valeur d'indice de réfraction (3.4777, 3.4577, 3.4377) avec deux polarisations TE et TM.

Tableau III.1 : Les valeurs de largeur de la bande interdite photonique et leur emplacement, pour chaque valeur de l'indice de réfraction avec les deux polarisations TE et TM

	$n=3.4777$	$n=3.4577$	$n=3.4377$
TE	(0.210711,0.311285) gap=0.100574 (0.411393,0.527728) gap=0.116335	(0.211882,0.312787) gap=0.100905 (0.413695, 0.530123) gap=0.116428	(0.213065,0.314301) gap=0.101236 (0.416022, 0.532534) gap=0.116512
TM	(0.357331,0.375765) gap=0.018434 (0.42718, 0.527192) gap=0.100012 (0.575698,0.589855) gap=0.0141566 (0.63968, 0.654516) gap=0.014836	(0.358868,0.37629) gap=0.0174228 (0.429443, 0.528678) gap=0.0992356 (0.578419,0.592523) gap=0.0141049 (0.642289, 0.656971) gap=0.014682	(0.360415,0.376819) gap=0.0164042 (0.43173, 0.530157) gap=0.0984268 (0.581161,0.594424) gap=0.0132633 (0.644909, 0.659479) gap=0.0145704

Il y a deux bandes à chaque valeur de l'indice de réfraction "n" pour la polarisation TE, pour la polarisation TM il y a 4 bandes.

Dans les deux polarisations les bandes interdites photoniques (BIP), si on diminue l'indice de réfraction "n", les bandes diminuent aussi.

III.8. Cavités à cristaux photoniques :

Dans le cas de cristaux bidimensionnels, des défauts sont créés par modification locale de l'indice de réfraction ou par changement de la taille du motif cristallin (défauts de substitution), ou par déplacement d'un de ces motifs (défauts interstitiels). Soit l'un des motifs est manquant (défaut lacunaire), soit même un motif différent (dopant) est inséré. La présence de défauts ponctuels peut entraîner des niveaux d'énergie discrets dans la bande interdite. Dans notre exemple, nous utiliserons des défauts lacunaires.

Sur la **figure III.12**, un exemple typique de microcavité à PhC bidimensionnelle (2D) dans du silicium sur isolant (SOI) est représentée. Comme le montre la figure III.13, les tiges sont gravées uniquement dans la couche supérieure de silicium et ils peuvent être réalisés par gravure anisotrope standard. La microcavité est obtenue en supprimant des tiges au centre de PhC dans la direction ΓK . Une telle microcavité est formellement indiquée comme cavité H₂, en raison du nombre de trous supprimés dans la structure à PhC périodique.

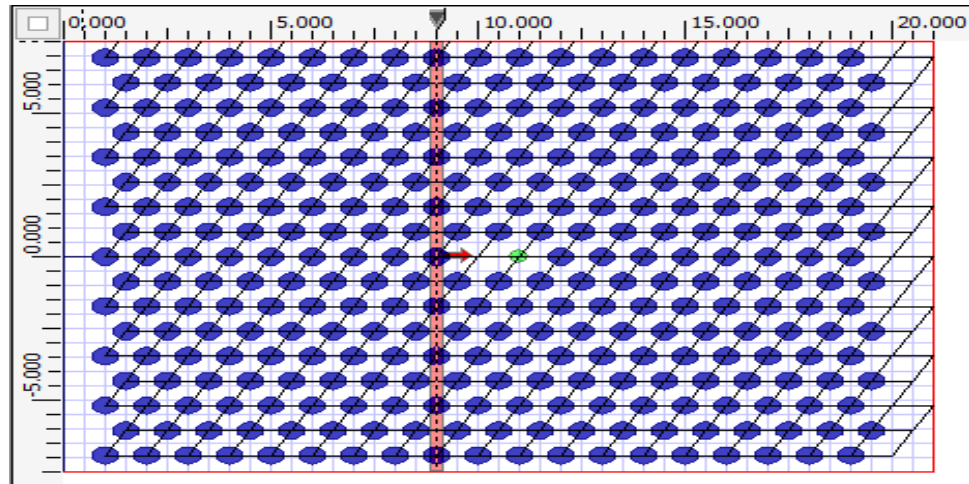


Figure III.12 : *Cristal photonique à base de structure hexagonal avec un défaut ponctuel (cavité).*

III.8.1. Confinement de la lumière à cavité en cristal photonique 2D :

Une manière simple de confiner le champ dans un volume très réduit est de briser localement la périodicité du réseau par l'introduction de défauts. Les modes photoniques ainsi créés, à condition qu'ils se situent dans la bande interdite, concentrent leur énergie dans cette zone de défauts. Le cristal environnant agit comme un miroir, la lumière se reflétant sur les bords du défaut. Les défauts ou microcavités les plus étudiés sont obtenus en omettant un certain nombre de trous dans les réseaux périodiques, notamment dans les réseaux triangulaires, les microcavités hexagonales de type H_n , où (n) est le nombre de rangées. Chaque côté de l'hexagone est manquant. Les dimensions de ces microcavités sont généralement de l'ordre de quelques longueurs d'onde, soit quelques microns. Dans notre cas, la cavité utilisée est de type H_2 , où nous avons omis les 2 trous du réseau périodique [3] (**figure III.13**).

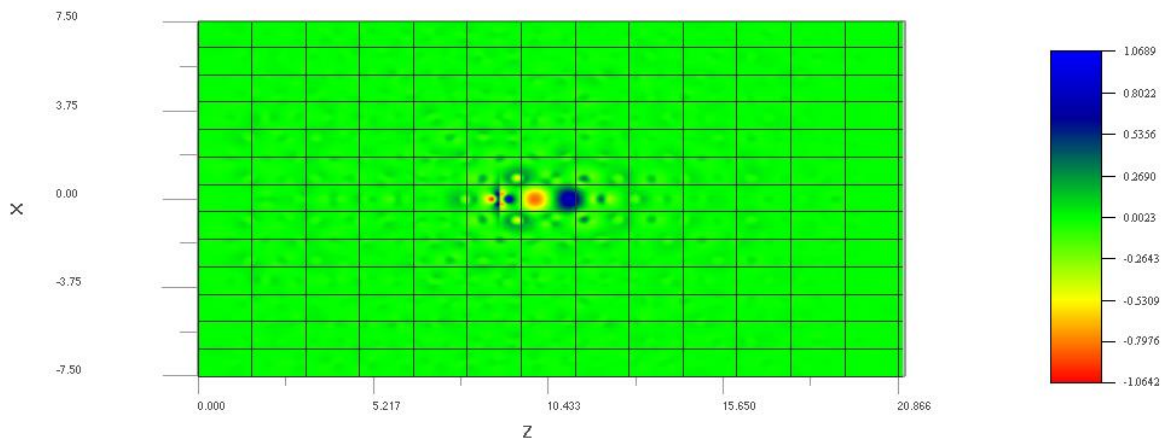


Figure III.13 : *Type de cavité (H_2)*

III.8.2. Variation de confinement de la lumière à cavité en fonction de la polarisation :

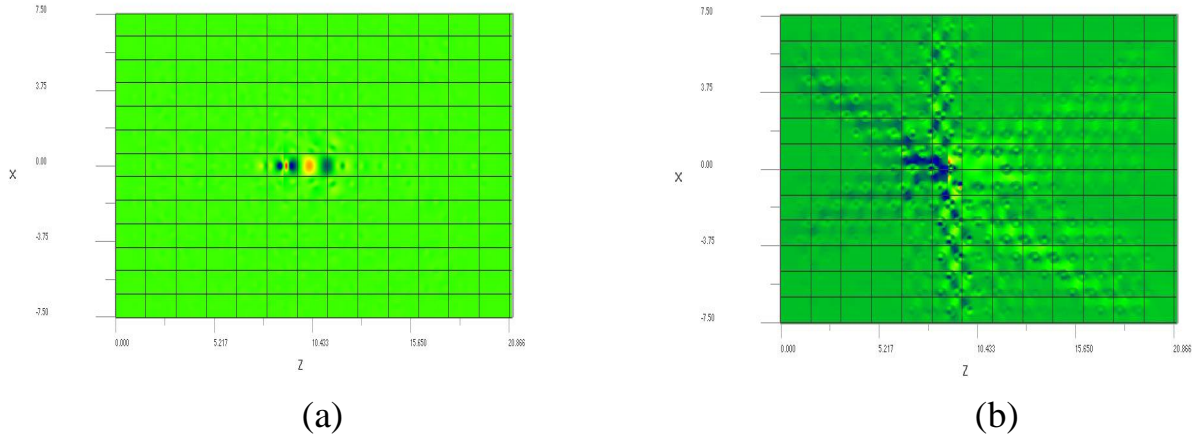


Figure III.14 : *a) confinement de la lumière dans la polarisation TE, b) confinement de la lumière dans la polarisation TM*

III.8.3. Variation de confinement de la lumière à cavité en fonction de l'indice de réfraction « n » :

III.8.3.1. Pour la polarisation TE :

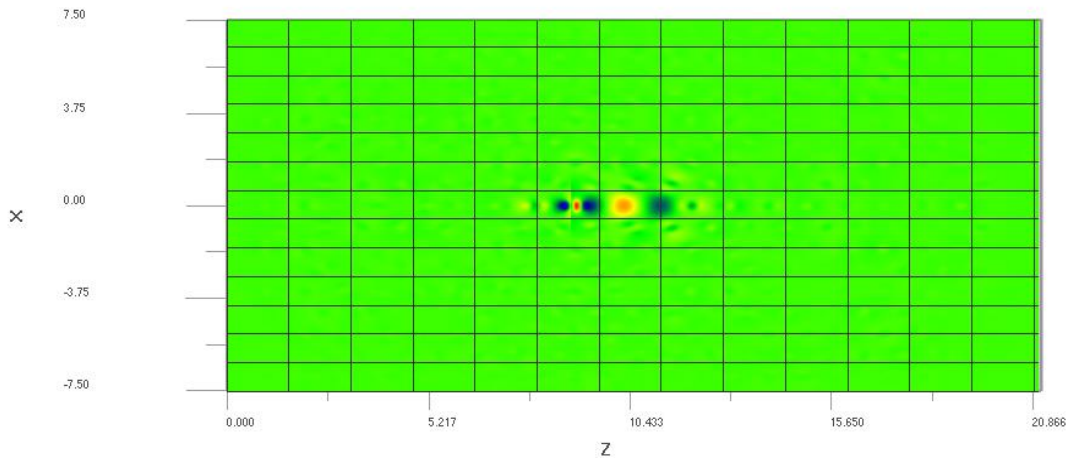


Figure III.15 : *Confinement de la lumière à cavité, avec $n=3.4777$*

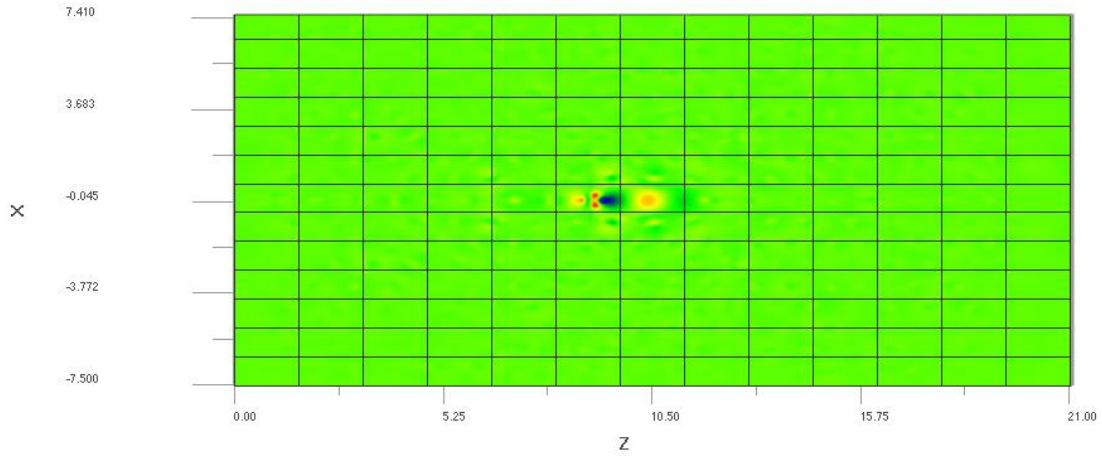


Figure III.16 : *Confinement de la lumière à cavité, avec $n=3.4577$*

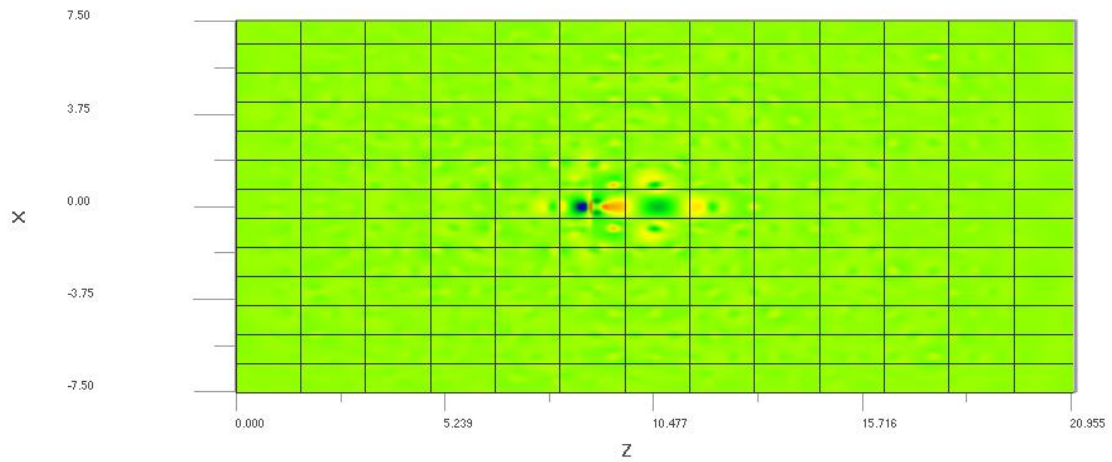


Figure III.17 : *Confinement de la lumière à cavité, avec $n=3.4377$*

III.8.3.2. Pour la polarisation TM :

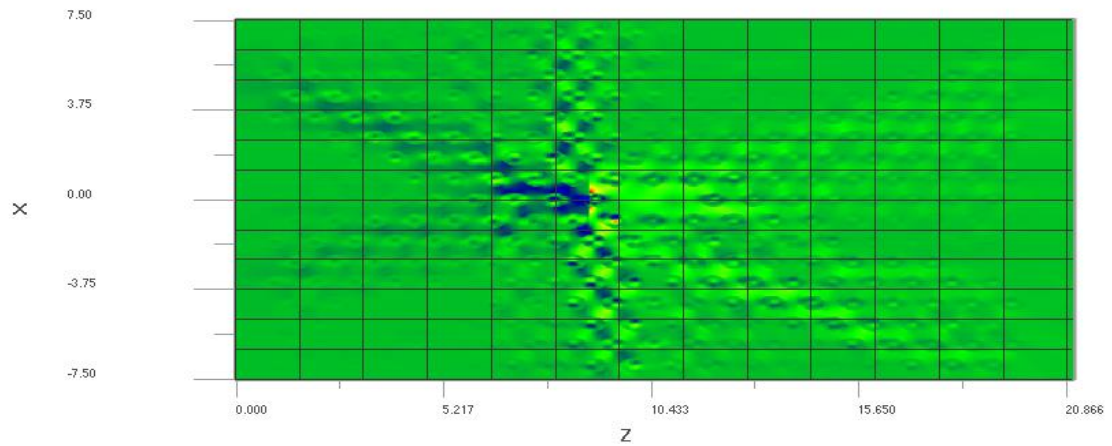


Figure III.18 : *Confinement de la lumière dans la polarisation TM, avec $n=3.4777$*

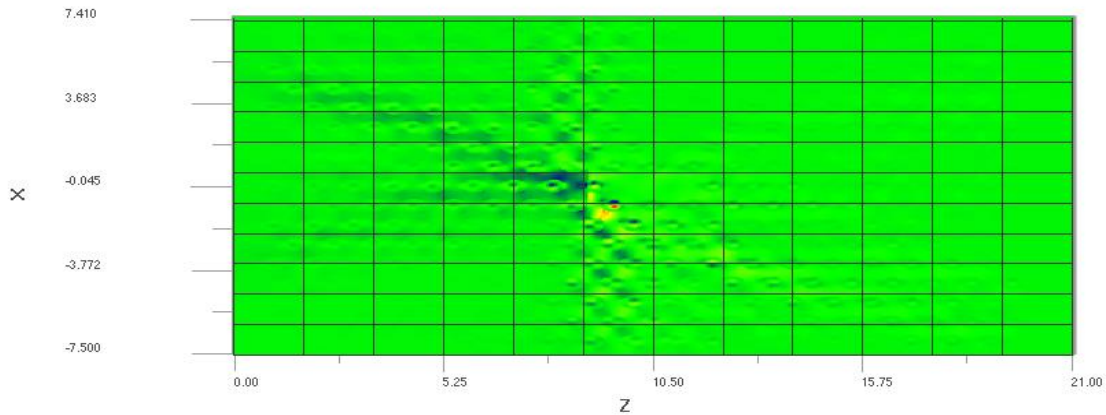


Figure III.19 : Confinement de la lumière dans la polarisation TM, avec $n=3.4577$

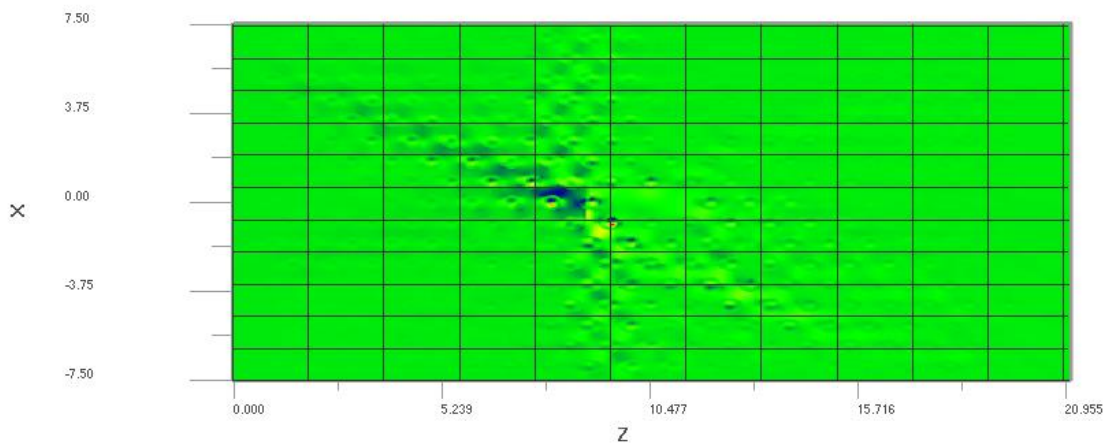


Figure III.20 : Confinement de la lumière dans la polarisation TM, avec $n=3.4377$

De l'observation du confinement pour la lumière polarisée TE et TM, on voit que le confinement sera fort pour la polarisation TE et faible pour la polarisation TM avec tous les indices de réfraction. Par ailleurs le confinement sera fort lorsqu'avec l'augmentation de l'indice de réfraction c.-à-d. l'augmentation de la différence d'indice entre les tiges et la couche de silicium.

III.8.4 Variation de la transmission en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de l'indice de réfraction :

III.8.4.1 Pour la polarisation TE :

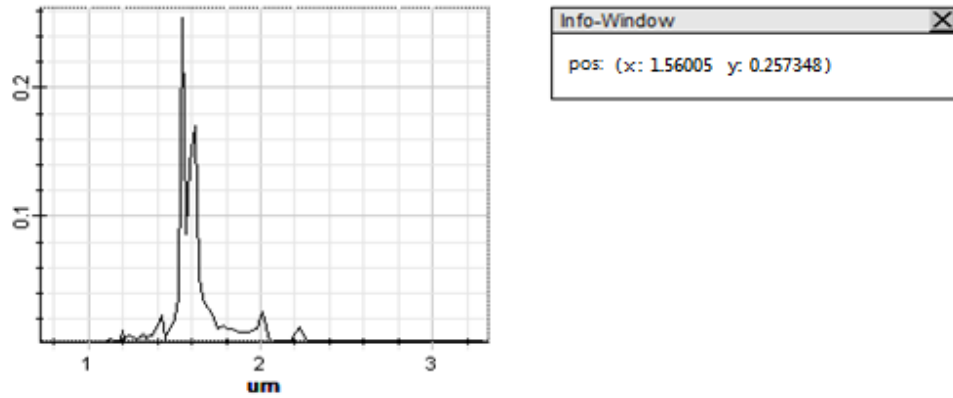


Figure III.21: la transmission en fonction de la longueur d'onde avec $n= 3.4777$

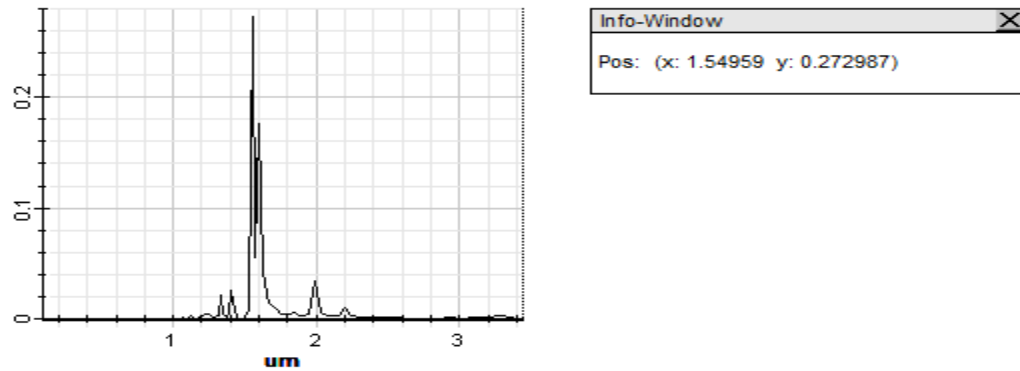


Figure III.22 : la transmission en fonction de la longueur d'onde avec $n= 3.4577$

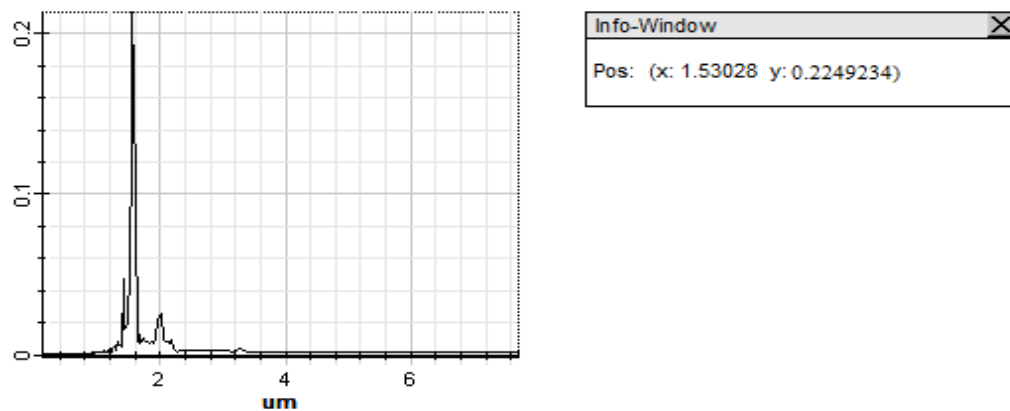


Figure III.23 : la transmission en fonction de la longueur d'onde avec $n= 0.4377$

III.8.4.2 Pour la polarisation TM :

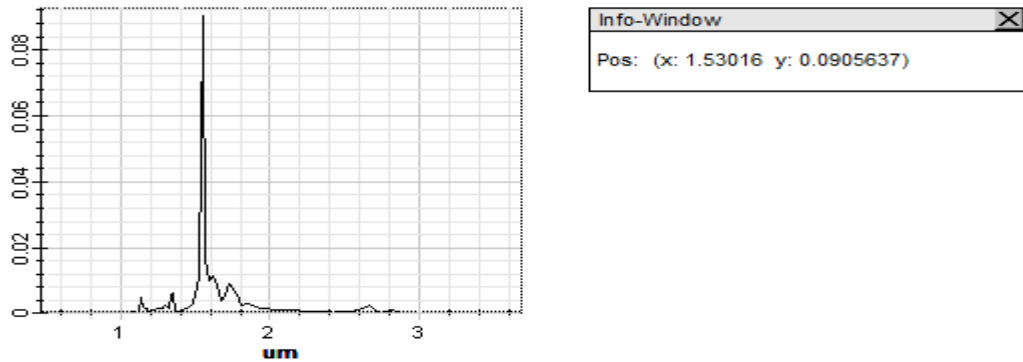


Figure III.24 : la transmission en fonction de la longueur d'onde avec $n= 3.4777$

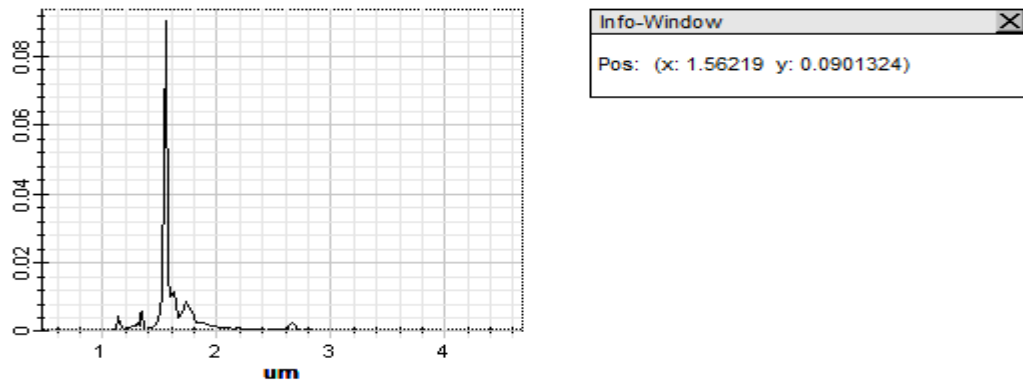


Figure III.25 : la transmission en fonction de la longueur d'onde avec $n= 3.4577$

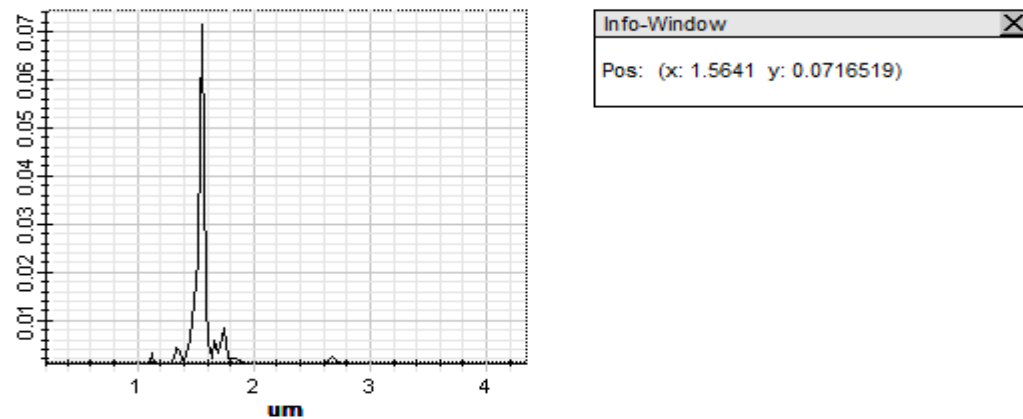


Figure III.26 : la transmission en fonction de la longueur d'onde avec $n= 3.4377$

D'après les **Figures III.21 – III.26** qui représentent les pics de transmission dans une cavité pour différents indices de réfraction avec les deux polarisations TE et TM, on voit que pour la polarisation TE deux pics de transmission est apparu, le premier est grand par rapport au

deuxième, ces deux pics montrent la forme de la cavité H2, comme le nombre de pics lié au nombre de trous qu'on a supprimé, par contre à la polarisation TM on voit qu'un seul pic de transmission.

De plus, les longueurs d'onde de résonance de ces pics varient avec l'indice de réfraction, lorsque l'indice de réfraction diminue, la longueur d'onde de résonance du pic à la polarisation TE diminue, mais pour la polarisation TM il se passe le contraire.

Dans le tableau ci-dessous, nous présentons les valeurs de transmission pour les indices de réfraction (3,4777, 3,4577 et 3,4377) avec les deux polarisations TE et TM.

Tableau III.2: *variation de la longueur d'onde en fonction des indices de réfraction pour les deux polarisations TE et TM*

	n=3.4777	n=3.4577	n=3.4377
TE	1.56005 μm	1.54959 μm	1.53028 μm
TM	1.53016 μm	1.56219 μm	1.5641 μm

III.8.5. Utilisation des cavités à cristal photonique pour la détection (capteurs) :

III.8.5.1 Capteurs basés sur l'indice de réfraction :

Les capteurs basés sur l'indice de réfraction (RI) représentent la classe la plus diffusée de capteurs à PhC. En fait, un grand nombre d'architectures avancées (par exemple, microcavités intégrées) utilise l'indice de réfraction 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 λ_0 de la résonance de la cavité peut servir de référence.

Dans ce contexte, la sensibilité à la longueur d'onde S_λ représente un paramètre fondamental pour quantifier les performances du capteur en cas de schéma d'étude de longueur d'onde. S_λ est défini

selon l'Equation :
$$S_\lambda = \frac{\Delta_\lambda}{\Delta_n} \tag{III.1}$$

Comme le rapport entre le décalage de la longueur d'onde de résonance (Δ_λ) induit par le changement d'indice de réfraction (Δ_n). De plus, il est donné en unités de nm / RIU (indice de réfraction unité).

Dans notre travail le changement dans l'indice de réfraction de l'environnement entourant les tiges de silicium modifie la longueur d'onde de résonance. Les résultats de la simulation sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau III.3: *La sensibilité du capteur pour divers décalages de l'indice de réfraction du milieu entourant les tiges du dispositif*

Polarisation	Δ_n	Δ_λ	<i>S, [nm/RIU]</i>
TE	0.02	50.61nm	2530,5
	0.04	194,87nm	4871,75
TM	0.02	3.76nm	188
	0.04	14,69nm	367,25

Ce tableau représente les valeurs de la sensibilité pour les deux polarisations, pour la polarisation TE on a des valeurs de sensibilité très importantes, comparativement à la polarisation TM.

Alors on conclure que la variation de l'indice de réfraction et le mode de polarisation (TE ou TM) influencent sur la sensibilité de la structure étudiée.

III.8.5.2 Couplage guides –cavité

Afin de comparer la sensibilité trouvée pour différentes structures, nous proposons une autre structure à base toujours d'un cristal photonique, cette structure est représentée par deux guides d'ondes couplées au centre avec une cavité, les deux guides d'ondes sont obtenus en supprimant une rangée de tiges dans la direction x. Ils ont l'habitude de coupler la lumière dans et hors de la cavité PhC.

Les trous aux tours de guides et cavités ont des diamètres de double par rapport aux autres trous de la structure du cristal, pour le réseau hexagonal, la structure est constituée de tiges de l'indice de réfraction $n = 3.4777$ plongées dans l'air ($n = 1$), le diamètre des tiges est égal à $0.3a$, pour la polarisation TE.

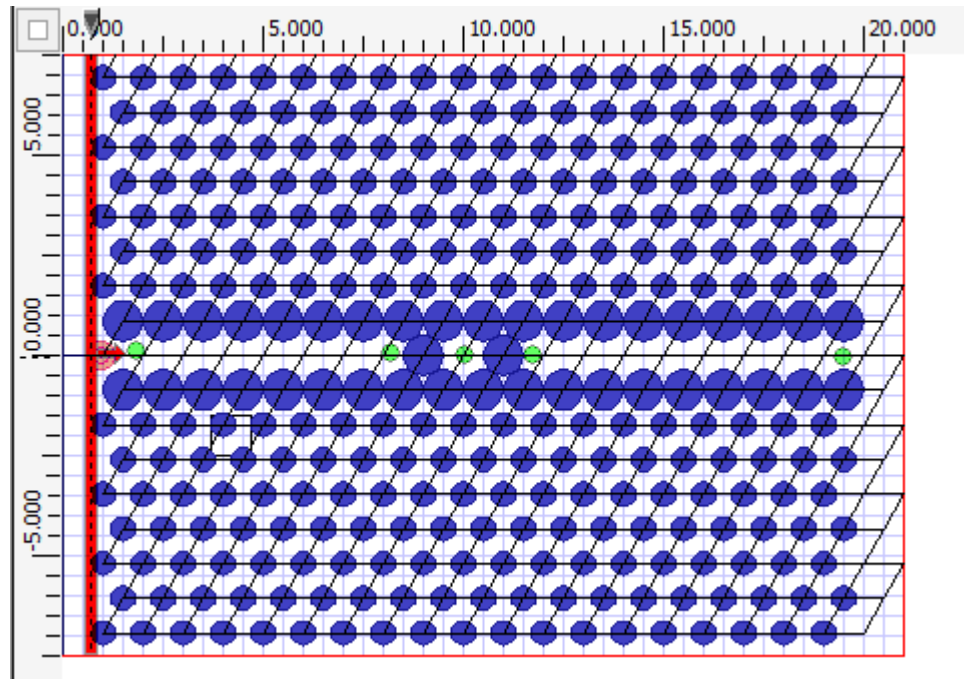


Figure III.27. *Structure de couplage guides cavité*

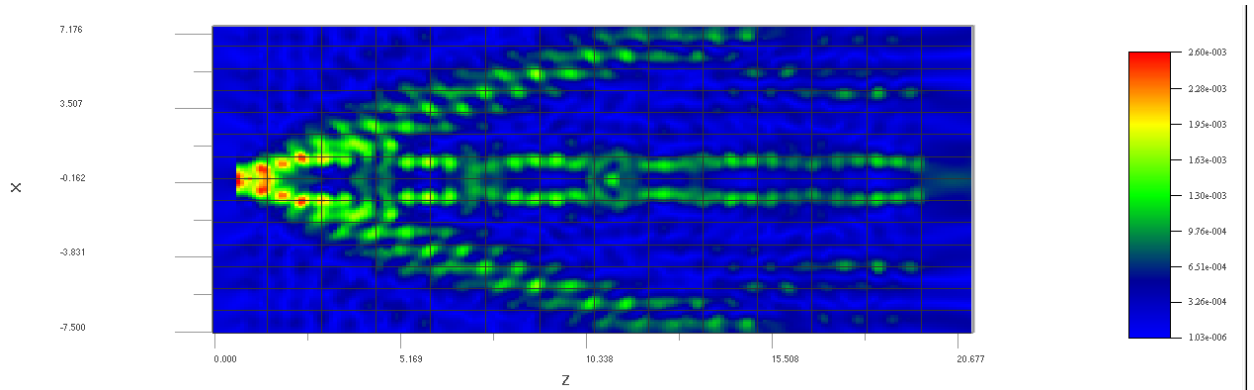
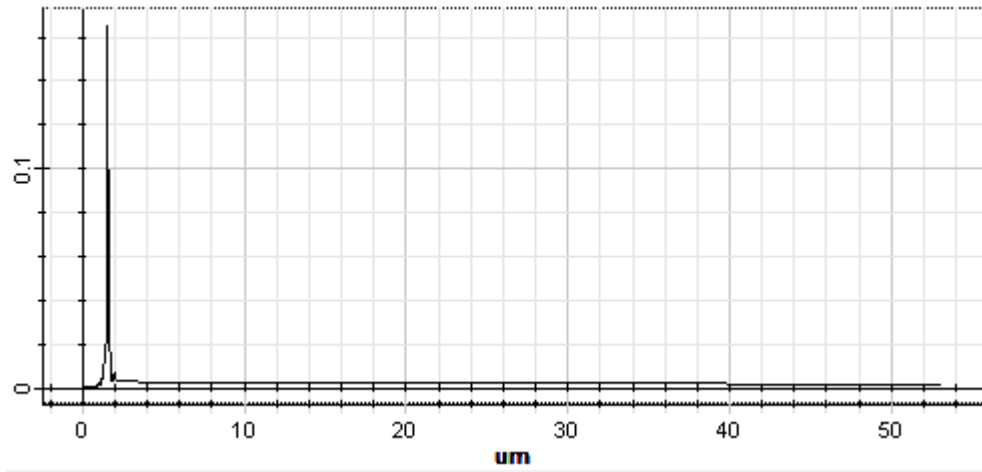
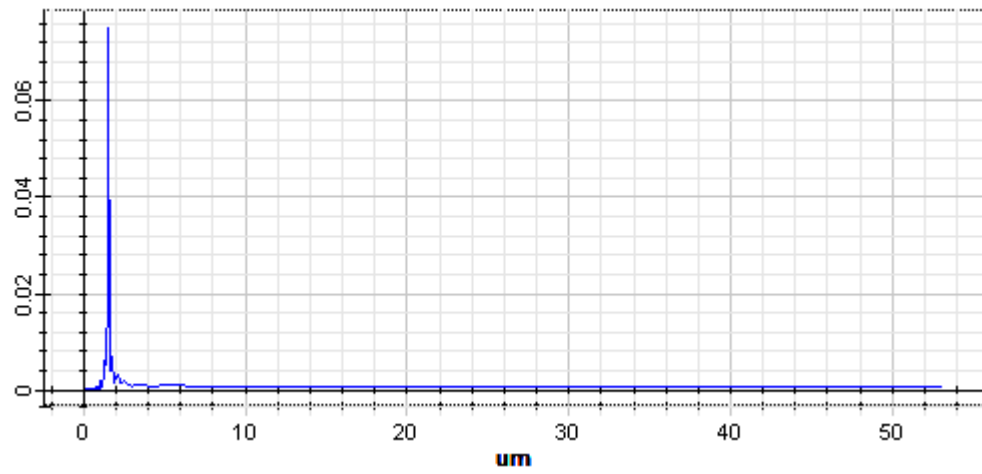


Figure III.28. *Propagation de la lumière dans la structure de couplage guides cavité*

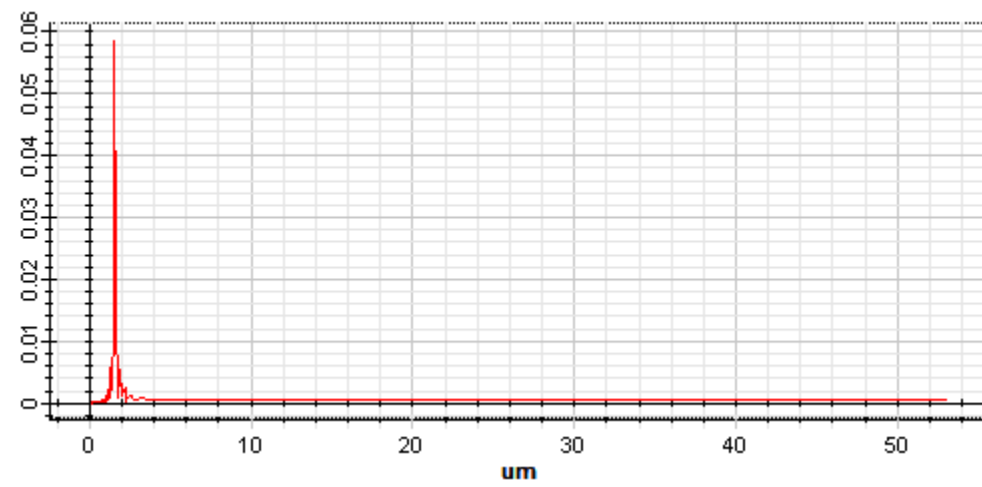
La propagation de la lumière dans la structure est représentée dans la **Figure III.28**, l'effet de la suppression des tiges est apparu par une dispersion d'une partie de lumière dans la structure, par contre une autre partie est confinée dans les guides et la cavité.



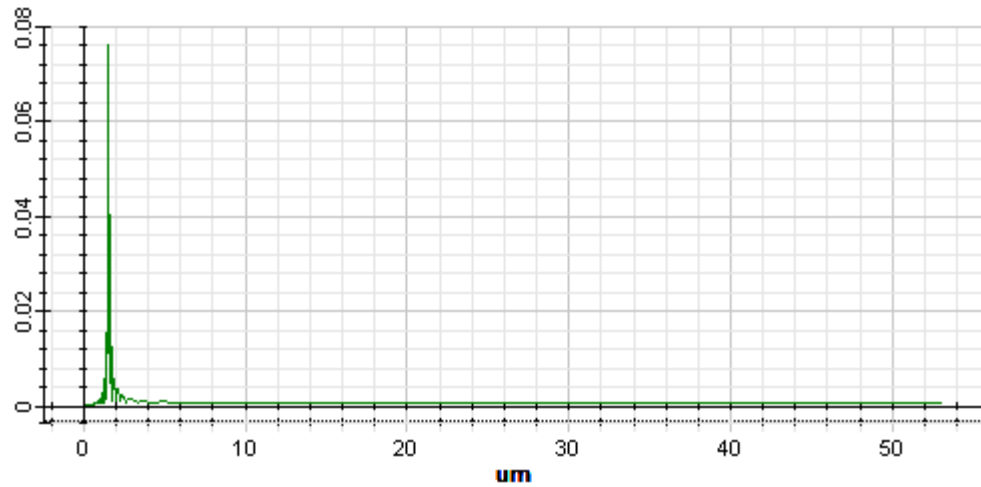
(a)



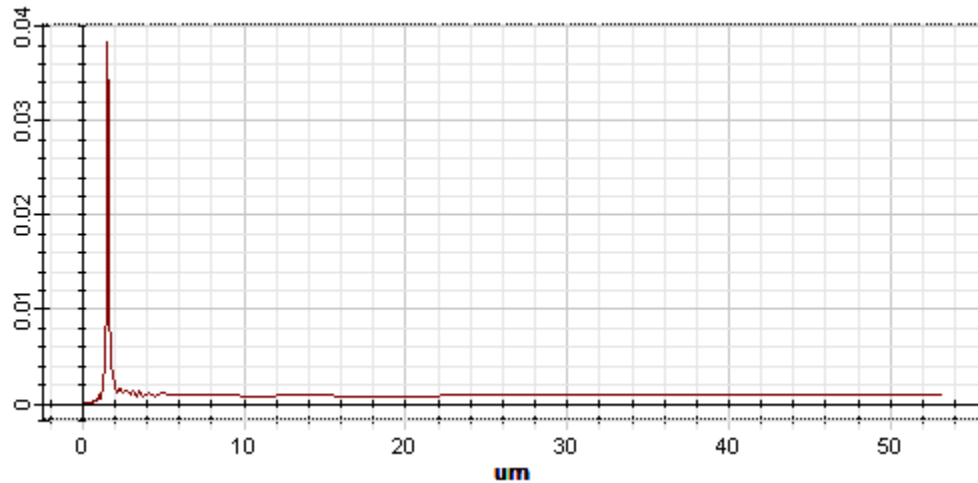
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure III.29 : la transmission en fonction de la longueur d'onde à différents points (a), (b), (c), (d)et(e)

	*	Label	Ex	Ey	Ez	Hx	Hy	Hz	Center Pos (um)	Color
1	■	a		X					(0.10, 0.00, 1.85)	Black
2	■	b		X					(0.05, 0.00, 8.20)	Blue
3	■	c		X					(0.00, 0.00, 10.05)	Red
4	■	d		X					(0.00, 0.00, 11.75)	Green
5	■	e		X					(-0.05, 0.00, 19.50)	Brown

Figure III.30 : Différentes points d'observation de la transmission

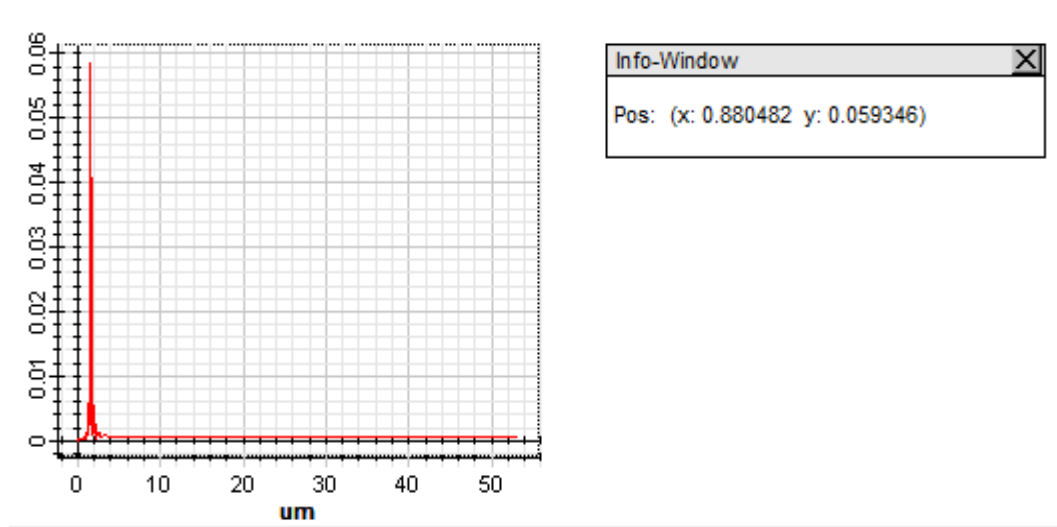


Figure III.31 : *Informations sur la transmission*

D'après les figures ci-dessus (**Figure III.29 (a)** jusqu'à **Figure III.31**), on remarque un pique de transmission dont l'amplitude de ce pique est diminuée d'un point à une autre .si on s'éloigne à la source l'amplitude de la transmission au fur et à mesure va diminuer.

➤ **La sensibilité à cette structure :**

$$S_{\lambda} = \frac{\Delta_{\lambda}}{\Delta_n}$$

III. 2

$$\Delta_{\lambda} = 1.55\mu\text{m} - 0.88\mu\text{m} = 0.67\mu\text{m} = 67\text{nm}$$

$$\Delta_n = 3.4777 - 3.4377 = 0.04$$

$$S_{\lambda} = \frac{\Delta_{\lambda}}{\Delta_n} = 1675[\text{nm/RIU}]$$

Cette sensibilité est calculée en comparant l'indice de réfraction de la structure couplage guides-cavité par celle de cavité, et la longueur de résonance du pique à cette structure avec la longueur de résonance de cavité.

Alors la sensibilité varie en fonction de l'indice de réfraction et en fonction de changement de la structure.

III.9. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié les capteurs à cristaux photoniques, pour cela nous avons travaillé sur une structure de cavité à cristal photonique, cette cavité a été créée par l'omission de deux tiges dans une structure de silicium d'indice de réfraction « $n = 3.477$ », dans le but de voir l'influence de variation de l'indice de réfraction sur la longueur d'onde de résonance de notre cavité (pique de transmission) et alors pratiquement sur la sensibilité de notre capteur, nous avons fait des simulations sur la structure de cristal photonique, en utilisant le logiciel Opti-FDTD, on a commencé par une étude de la bande interdite photonique de notre cristal photonique afin de voir l'existence de cette bande pour différentes valeurs de l'indice de réfraction, on a trouvé des larges bandes pour la polarisation TE, et des petites bandes pour la polarisation TM, après on a simulé le confinement de la lumière dans notre cavité H2 pour les deux polarisations, on remarque que le confinement est fort pour la polarisation TE comparativement à la polarisation TM, après nous avons étudié l'emplacement de pique de transmission pour différentes valeurs de l'indice de réfraction avec les deux polarisations, les résultats obtenus nous permettent de les utiliser pour mesurer la sensibilité de notre capteur, ces résultats sont très importants notamment pour la polarisation TE.

Notre cavité à cristal photonique présente un fort confinement optique de la lumière à un très petit volume, permettant la détection de produits chimiques espèces caractérisées par des dimensions nanométriques.

Afin de comparer la sensibilité trouvée pour différentes structures, nous proposons une autre structure à base toujours d'un cristal photonique, cette structure est représentée par deux guides d'ondes couplés au centre avec une cavité, les deux guides d'ondes sont obtenus en supprimant une rangée de tiges dans la direction x .

Des capteurs à base de cristal photonique ont également été proposés comme capteurs de gaz dans l'infrarouge moyen (IR moyen), depuis de nombreux gaz (par exemple, CO_2 , CH_4 , CO) présentent des raies d'absorption dans la région de longueur d'onde IR moyenne

Références bibliographiques du chapitre III

[1] Thèse DOCTORAT EN SCIENCES EN ELECTRONIQUE, Contribution à l'étude des microcavités à base des cristaux photoniques, AMIROUCHE Amel, 28/09/2017

[2] "OptiFDTD Technical Background and Tutorials" https://optiwave.com/wp-content/uploads/2014/09/OptiFDTD_Getting_Started.pdf

[3] Salim BOUTAMI, « MICROCAVITES OPTIQUES VERTICALES A BASE DE CRISTAUX PHOTONIQUES MEMBRANAIRES », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2007. Français.tel-00341736



Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Les cristaux photoniques sont des matériaux artificiels avec une constante diélectrique périodique selon une, deux ou trois directions de l'espace, où il est devenu concevable d'utiliser des cristaux photoniques pour stocker, localiser, filtrer, voire diriger la lumière, et pour ces fins, nous devons avoir dans le domaine interdit des cristaux La fréquence optique est admissible, et pour cela il faut introduire des défauts dans cette structure périodique. En l'absence de défauts, la lumière dans une gamme de fréquences spécifique semble incapable de se propager pour eux. Ces propriétés rendent les cristaux photoniques intrigants car ils rendent possible le contrôle de la lumière de manière plus répandue et répandue pour de nombreuses applications en optique intégrée.

Dans ce mémoire, nous avons proposé un modèle de capteur à cristal optique et pour simuler un tel dispositif il est nécessaire d'utiliser un logiciel spécialisé tel que Optiwave et ses accessoires notamment Opti-FDTD qui est le logiciel appliqué dans cette note. Il est considéré comme le pionnier dans le domaine de l'optique et le plus célèbre. Pour compléter la simulation, la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) et la méthode des ondes planes (PWE) doivent être utilisées, qui sont bien adaptées à l'étude des structures à base de cristaux photoniques.

Pour atteindre l'objectif, nous avons divisé le travail, comme indiqué précédemment, en trois chapitres. Dans le premier, nous avons présenté les concepts de base des cristaux photoniques, leurs définitions, les différents types de cristaux photoniques, leurs principes de fonctionnement et leurs domaines d'utilisation, et nous avons également présenté quelques concepts et exemples de capteurs à cristaux photonique. - Dans le deuxième chapitre, nous avons faire une étude théorique sur les capteurs à cristaux photoniques.

Nous avons conclu avec le troisième chapitre de ce mémoire, dans lequel nous avons discuté de la présentation des résultats de simulation pour une structure cristalline dans laquelle nous avons créé une cavité cristalline de type H2. En fin, nous avons atteint plusieurs résultats représentés dans l'effet de l'indice de réfraction sur la largeur de la bande interdite, et pour les bandes optiques, il s'agissait de larges bandes de polarisation pour TE et de petites bandes de polarisation pour TM. Les résultats des valeurs de transmission avec des indices de réfraction avec des polarisations TE et TM nous permettent de les utiliser pour calculer la sensibilité de notre

capteur, et la propagation de la lumière n'était que dans notre cavité, c'est-à-dire que la cavité fournissait un fort confinement à lumière, permettant de détecter des espèces chimiques caractérisées par des dimensions nanométriques.

Dans ce travail, nous avons traité le sujet des capteurs à cristaux photoniques planaires afin de l'étudier, en essayant de nous essayer de créer de nouveaux horizons pour ce type de capteurs afin de résoudre d'autres problèmes et difficultés de cette vie, et également de faire la lumière sur les cristaux photoniques et préciser leur rôle, leurs caractéristiques et leurs types, et le vaste champ de recherche que ces cristaux ouvraient aux scientifiques.

Résumé :

Les cristaux photoniques (PC) ou les matériaux à bandes interdites photoniques (BIP) sont des structures artificielles avec une structure à l'échelle nanométrique caractérisée par une constante diélectrique (indice de réfraction) qui change périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde dans plusieurs directions de l'espace. Ces propriétés le rendent intéressant pour de nombreuses applications en optique. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est d'étudier les capteurs à cristaux photoniques, et pour y parvenir, Basé sur la méthode de différence finie dans le domaine temporel (FDTD) et la méthode d'onde plane (PWE) en utilisant du logiciel OptiFDTD, nous avons étudié les bandes interdites photoniques d'une structure hexagonale. Nous avons réalisé une cavité cristalline optique en retirant deux tiges de silicium remplis d'air, puis nous avons étudié le confinement de la lumière et la position du pique de transmission pour la polarisation TE et TM. Le travail effectué a conduit à la réalisation d'un capteur à base de cristaux photonique qui permet la détection de produits chimiques espèces caractérisées par des dimensions nanométriques. Nous proposons également une autre structure d'un cristal photonique afin de comparer la sensibilité d'une autre structure, et cette structure représente deux guides d'ondes couplés au centre avec une cavité. La sensibilité de cette structure est calculée en comparant l'indice de réfraction avec l'indice de réfraction de la cavité, et la longueur de résonance du pic au niveau de cette structure avec la longueur de la cavité résonnante. Les capteurs basés sur l'indice de réfraction sont la classe la plus courante de capteurs PhC.

Mots clés : Cristaux photoniques, capteurs, FDTD, PWE, Opti-FDTD, TE, TM.

Title: Study of planar photonic crystal sensors

Abstract:

Photonic crystals (PCs) or photonic band gap materials (PBMs) are artificial structures with a nanoscale structure characterized by a dielectric constant (refractive index) that changes periodically on the wavelength scale in several directions in space. These properties make it interesting for many applications in optics. In this context, the objective of this work is to study photonic crystal sensors, and to do so, based on the finite difference time domain (FDTD) and plane wave (PWE) methods using OptiFDTD software, we have studied the photonic band gaps of a hexagonal structure. We realized an optical crystal cavity by removing two silicon rods filled with air, then we studied the confinement of the light and the position of the transmission peak for TE and TM polarization. The work carried out led to the realization of a sensor based on photonic crystals which allows the detection of chemical species characterized by nanometric dimensions. We also propose another structure of a photonic crystal in order to compare the sensitivity of another structure, and this structure represents two waveguides coupled at the center with a cavity. The sensitivity of this structure is calculated by comparing the refractive index with the refractive index of the cavity, and the resonant length of the peak at this structure with the length of the resonant cavity. Refractive index-based sensors are the most common class of PhC sensors.

Keywords: Photonic crystals, sensors, FDTD, PWE, Opti-FDTD, TE, TM.

العنوان: دراسة مستشعرات البلورات الضوئية المستوية

المخلص:

البلورات الضوئية (PC) أو مواد فجوة النطاق الضوئية (BIP) هي هياكل اصطناعية ذات بنية نانوية تتميز بثابت عازل (معامل الانكسار) يتغير بشكل دوري على مقياس الطول الموجي في عدة اتجاهات في الفضاء. هذه الخصائص تجعلها مثيرة للاهتمام للعديد من التطبيقات في مجال البصريات. في هذا السياق، الهدف من هذا العمل هو دراسة المستشعرات البلورية الضوئية، ولتحقيق ذلك، استنادًا إلى المجال الزمني للفرق المحدود (FDTD) وطريقة الموجة المستوية (PWE) باستخدام برنامج OptiFDTD درسنا نطاقات الفوتونات الضوئية لهيكل سداسي. قمنا بعمل تجويف بلوري ضوئي عن طريق إزالة قضيبين من السيليكون مملوءين بالهواء، ثم درسنا حصر الضوء وموقع ذروات الإرسال لاستقطابين TE وTM، وأدت الأعمال المنجزة لتحقيق كاشف يعتمد على البلورات الضوئية يسمح باكتشاف الأنواع الكيميائية التي تتميز بأبعاد نانوية. أيضا نقترح بنية أخرى لبلورة فوتونية من أجل مقارنة حساسية بنية أخرى، ويمثل هذا الهيكل دليلين موجيين مقترنين في المركز بتجويف. يتم حساب حساسية هذه البنية بمقارنة معامل الانكسار مع معامل الانكسار الخاص بالتجويف، وطول الرنين للذروة عند هذا الهيكل مع طول التجويف الرنيني. تمثل المستشعرات القائمة على مؤشر الانكسار أكثر فئات مجسات PhC شيوعًا.

الكلمات الرئيسية: البلورات الضوئية، أجهزة الاستشعار، FDTD، PWE، Opti-FDTD، TE، TM.