

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE : TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE**

**N° : 2017/ IMI02/97/482**



**DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE**

**FILIERE : ELECTRONIQUE**

**OPTION : INSTRUMENTATION ET  
MAINTENANCE INDUSTRIELLE**

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par: \* Kaddour Nassiba**

**\* Tahmi chahrazad**

**Intitulé :**

**Design de capteur de pression haute sensibilité à base de  
cristaux photoniques 2D sur substrat en silicium**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Me OUDIRA Houcine

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Président

Me ZOUACHE Tarek

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Rapporteur

Me KAHLOUCHE Ahmed

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Examineur

**Année universitaire : 2016 / 2017**

# Remerciements

*On aimerait en premier lieu remercier notre dieu Allah qui nous a donné la volonté le courage pour la réalisation de ce travail.*

*Nous tenons à remercier tout d'abord notre encadreur **Dr . T. Zouache** à l'université de M'sila de nous avoir proposé ce sujet de recherche : **design de capteur de pression haute sensibilité à base de cristaux photoniques 2D sur substrat en silicium** de son rapport montrant à quel point il s'est investi dans ce travail, Nous exprimant nos profonds remerciements à monsieur le président d'être la tête de ce jury. Nous remercions également tous les membres de jury, qui nous ont fait l'honneur d'être présents ce jour.*

*Nous remercions tous les **enseignants** de département d'Électronique et les personnels administratifs et techniques, qui ont contribué de près ou de loin à notre formation durant ces cinq années.*

# Dédicace

*Nous dédions ce mémoire a nos chers  
parents pour leurs amour,  
encouragement et sacrifices  
a nos chères mères  
a nos chers pères*

*Et enfin a toutes mes amies et toutes  
personnes qu'ont contribuées à la  
réalisation de ce travail.*

# Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Capteurs- Généralité et Caractéristiques fondamentales</b>	
I-1- Introduction	4
I-2- Généralités sur les capteurs	4
I-2-1- Définition	4
I-2-2- Les grandeurs d'influence	5
I-2- Structure d'un capteur	5
I-2-1- Le corps d'épreuve	5
I-2-2- Transducteur (le capteur)	6
I-2-3- Le boîtier	6
I-3- caractéristiques des capteurs [5]	6
I-3-1- Etalonnage	6
I-3-2- Domaine de linéarité	7
I-3-3- Sensibilité	7
I-3-4- Temps de réponse ou rapidité	7
I-3-5- Résolution (Précision)	8
I-3-6- Fidélité	8
I-3-7- Répétabilité	8
I-3-8- Sélectivité	8
I-4- Différents types de capteurs	8
I-4-1- Biocapteurs	9
I-4-2- Capteurs chimique	9
I-4-3- Capteurs physiques	10
I-4-4- Capteurs de pressions	10
I-4-4-a- Description d'un capteur de pression	10
I-4-4-b- Evolution des principes de détection	10

I-4-4-c-	Les corps d'épreuve	10
I-4-4-d-	Les capteurs de pression existant sur le marché	11
	• Le transducteur	12
	• Le module électronique	12
I-4-5-	Les capteurs de pression différentiels	12
	a. Capteurs résistifs	12
	b. Capteurs capacitifs	13
I-4-6-	Capteur de pression à base de cristaux photoniques-principe de la détection	14
I-5-	Conclusion	15

## Chapitre II : Les cristaux photoniques

II-1-	Introduction	16
II-2-	Historique	16
II-3-	Définition	16
II-3-1-	Cristaux photoniques naturelles	17
II-3-2-	Structures de bandes photoniques	18
II-4-	Déférentes types de cristaux photoniques	18
II-4-1-	Cristaux photoniques à une dimension (réseau de Bragg)	18
	a. Le contraste d'indice $\delta$	19
	b. Les périodes	19
	c. Le facteur de remplissage $f$	20
II-4-2	Cristaux photoniques bidimensionnels	20
II-4-2-a	Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels	22
II-4-2-b	Structure de Bande Photonique	24
II-4-3	Les cristaux photoniques tridimensionnels	25
II-4-3-a	Structures "tas de bois"	25
II-4-3-b	Les opales	26
II-5-	Matériaux BIP à défaut	27

II-5-1-	Défauts ponctuels	27
II-5-2-	Les défauts linéaires	28
II-5-3-	Guides d'onde dans les cristaux photoniques	29
II-6-	Les différents types de cavités	30
II-6-1-	Cavité hexagonale	30
II-6-2-	Cavité carré	30
II-6-3-	Cavité triangulaire	31
II-6-4-	Cavité rectangulaire	31
II-7-	Conclusion	32

## Chapitre III : Utilisation des cristaux photoniques dans la détection et la réalisation des capteurs

III-1-	Introduction	33
III- 2-	Type de capteurs exploitant le concept des cristaux photoniques	33
III-2-	Les biocapteurs à base de cristaux photoniques	33
III-2-1 -	Bio capteurs à cristaux photoniques à quatre canaux utilisant les nano résonateurs à cavité	33
	a. Conception du biocapteur multicanal	33
	b. Évaluation des caractéristiques de la biosensibilité	34
III-2-2-	Biocapteur à base de cristal photonique pour la détection de la concentration du glucose dans l'urine	35
	a. Conception du biocapteur	35
	b. Résultats	36
III-3-	Les capteurs de gaz à base de cristaux photoniques	37
	a. Structure du capteur	37
	b. Résultats	38
III-4-	Les capteurs de pression à base de cristaux photoniques	39
III-4-1-	Première application	39
	a. Structure du capteur	39

	b. Résultats	40
III-4-2-	Deuxième application	41
	a. Structure du capteur	41
	b. Résultat	42
III-5-	Conclusion	43

## Chapitre IV : Design d'un capteur de pression par cristaux photoniques

IV-1-	Introduction	44
IV-2-	Structure de base du capteur	44
IV-2-1-	Structure originale	44
IV-2-2-	Structure proposé	44
IV-3-	Optimisation de la structure en fonction de $R_c$	46
IV-3-1-	Optimisation de la structure en fonction de $R_c$	46
IV-3-2-	Résultats de l'optimisation	46
	a- Réponse de la structure en fonction de $R_c$	46
	b- Optimisation de la valeur de $R_c$	49
	• Tracé du facteur de qualité et de la sensibilité	50
	• Tracé de la transmission et de la sensibilité	50
	• Structure finale du capteur de pression	51
IV-4-	Etude de la réponse de la structure optimisée pour différentes pression	52
IV-4-1-	Tracé de la longueur d'onde de résonance en fonction de la pression	54
IV-4-2-	Tracé du facteur des qualités des réponses du capteur	54
IV-4-3-	Calcul des sensibilités du capteur	55
	a- La sensibilité à la variation de l'indice de réfraction	55
	b- La sensibilité à la variation de pression hydrostatique	56
	c- Tracé des sensibilités du capteur	57
IV-5-	Conclusion	59

## Liste des symboles et abréviation

---

### Liste des symboles et abréviation

$\Delta s_{out}$  : la variation du signal de sorti

$\Delta m$  : la variation du mesurande

S : Sensibilité

m: mesurande

PhCs : Les cristaux photoniques

BIP : bandes interdites photoniques

PBG : Photonic Band Gap

MEB : micro scope électronique a balayage

$\lambda$  : la longueur d'onde guidée

$\epsilon$  : permittivité

a : La période

$\delta$  :Le contraste d'indice

n : L'indice de réfraction du matériau

f: Le facteur de remplissage

$v_i$ : Volume occupé par le matériau de permittivité  $\epsilon_i$

$\Lambda$  : Volume de la cellule

FCC :un réseau cubique à faces centrées

E : le champ électrique

H : le champ magnétique

$\Gamma K$  : la direction du réseau réciproque correspond à la direction des premiers voisins du réseau réel.

$\Gamma M$  :la direction correspond à la direction des seconds voisin

## Liste des symboles et abréviation

---

TM : transverse électrique, la polarisation magnétique

TE : transverse magnétique, la polarisation électrique

RIU : unité de l'indice de réfraction.

RI : indice de réfraction.

Q : facteur de qualité.

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

$n_L$  : L'indice de réfraction du matériau de bas indice.

# Liste Des Figures

## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Figure I-1</b>	Définition d'un capteur	4
<b>Figure I-2</b>	structure d'un capteur	6
<b>Figure I.3</b>	Etalonnage d'un capteur	6
<b>Figure I.4</b>	Réponse non linéaire d'un capteur à semi-conducteur [6]	7
<b>Figure I-5</b>	Schéma synoptique d'un capteur de pression.[6]	10
<b>Figure I-6</b>	capteur résistif	13
<b>Figure I-7</b>	capteur capacitif	14

### Chapitre II

<b>Figure II-1</b>	Représentation schématique de cristaux photoniques uni- dimensionnels(1D),bidimensionnels(2D) et tridimensionnels (3D).[3]	17
<b>Figure II-2</b>	la figure (b) présente l'agrandissement d'une aile de papillon (a)	18
<b>Figure II-3</b>	schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un milieu diélectrique périodique fini.[12]	19
<b>Figure II-4</b>	Période d'un cristal photonique unidimensionnel :	20
<b>Figure II-5</b>	Structures bidimensionnelles [15]	21
<b>Figure II-6</b>	Cristal photonique bidimensionnel	21
<b>Figure II-7-</b>	Structure périodique 2D connectée[ :	22
<b>Figure II-8</b>	Structure périodique 2D déconnectée	22
<b>Figure II-9</b>	Le réseau carré :	23
<b>FigureII-10</b>	Le réseau triangulaire	23
<b>Figure II-11</b>	Structure graphite	24
<b>FigureII-12</b>	différentes types de polarisation de la lumière	25
<b>Figure II-13</b>	La première structure BIP 3D la yablonovite	25
<b>Figure II-14</b>	b) Image MEB d'une structure Yablonovite en PMMA [Cuisin 2000] et c) Image MEB d'une structure tas de bois en silicium	26
<b>Figure II-15</b>	Fabrication des opales inversées sur substrat par auto organisation[6]	27
<b>Figure II-16</b>	Différents types de défauts	28
<b>Figure II-17</b>	Exemple de guide W1 à cristal photonique triangulaire de trous d'air	29

## Liste Des Figures

---

	sur un substrat de silicium sur isolant	
<b>Figure II-18</b>	les deux formes de guide d'onde	29
<b>Figure II-19</b>	Les différents types de cavités	30
<b>Figure II-20</b>	Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique carré avec un paramètre de maille 600nm	30
<b>Figure II-21</b>	Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm	31
<b>Figure II-25</b>	Exemple de cavité rectangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 560nm	31

### Chapitre III

<b>Figure III-1</b>	structure du capteur multi canal	34
<b>Figure III-2</b>	Diagramme de bande de la structure pour le mode TE	.34
<b>Figure III-3</b>	structure du bio capteur de glucose	35
<b>Figure III-4</b>	Les gaps optiques de la structure proposée	36
<b>Figure III-5</b>	courbes de réponse du capteur en fonction de la concentration de glucose dans l'urine	37
<b>Figure III-6</b>	Structure du capteur de gaz	38
<b>Figure III-7</b>	Courbes de réponse du capteur en fonction de la concentration du CH <sub>4</sub> dans l'air	39
<b>Figure III-8</b>	Courbes de réponse du capteur en fonction de la concentration du CH <sub>4</sub> dans l'air	39
<b>Figure III-9</b>	Structure du premier capteur de pression	40
<b>Figure III-10</b>	Déplacement des spectres de sortie (pour 1nm à 10nm) en fonction de la pression appliquée	41
<b>Figure III-11</b>	Variation de la fréquence des impulsions de sortie de sortie en fonction de la pression	41
<b>Figure III-12</b>	La structure finale du capteur de pression proposée	42
<b>Figure III-13</b>	Réponse de capteur pour différentes valeurs de pression	43

### Chapitre IV

<b>Figure IV-1</b>	Structure originale de Zhan	44
<b>Figure IV-2-a</b>	la matrice de trous d'air dans le substrat du silicium proposée	45

## Liste Des Figures

---

<b>Figure IV-2-b</b>	Diagramme de dispersion des bandes interdites du mode TM	45
<b>Figure IV-3-a</b>	La première structure considérée	45
<b>Figure IV-3-b</b>	La seconde structure considérée	45
<b>Figure IV-4-a</b>	Réponse en fonction de $R_c$ pour $n = 3.48$	47
<b>Figure IV-4-b</b>	Réponse en fonction de $R_c$ pour $n = 3.51985$	47
<b>Figure IV-4-c</b>	Réponse de la structure en fonction de $R_c$ pour les indices de réfraction $n_1$ et $n_2$ considérés	48
<b>Figure IV-4-d</b>	Réponse de la structure pour $R_c = 0.35a$ et pour les indices de réfraction $n_1$ et $n_2$ considérés	48
<b>Figure IV-5-a</b>	Tracé de la sensibilité en pression et du facteur de qualité en fonction de $R_c$ pour $n = 3.48$	49
<b>Figure IV-5-b</b>	Tracé de la sensibilité en pression et du facteur de qualité en fonction de $R_c$ pour $n = 3.51985$	49
<b>Figure IV-6-a</b>	Tracé de la sensibilité en pression et de la Transmission en fonction de $R_c$ pour $n = 3.48$	50
<b>Figure IV-6-b</b>	Tracé de la sensibilité en pression et de la Transmission en fonction de $R_c$ pour $n = 3.51985$	50
<b>Figure IV-7</b>	Structure finale du capteur de pression adoptée	51
<b>Figure IV-8</b>	Indice de réfraction du silicium en fonction de la pression	52
<b>Figure IV-9</b>	Réponse finales du capteur pour des pressions situées entre 0 GPa et 7 GPa	53
<b>Figure IV-10</b>	Longueurs d'onde de résonances correspondantes aux pressions situées entre 0 et 7 GPa	54
<b>Figure IV-11</b>	Facteurs de qualités des peaks de résonances correspondants aux pressions situées entre 0 et 7 GPa	55
<b>Figure IV-12</b>	Figure montrant le décalage $\Delta\lambda$ des peak pour deux valeurs successives de la pression 0GPa et 1GPa	57
<b>Figure IV-13</b>	Les sensibilités $S_{RI}$ et $S_P$ du capteur finale tracées pour les pressions considérés	58

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux

<b>Tableau III-1</b>	Grandeurs de sortie du capteur en fonction de la Concentration de glucose dans l'urine	37
<b>Tableau IV-1-a</b>	Caractéristiques principales de la structure en fonction de $R_c$ pour $n = 3.48$	47
<b>Tableau IV-1-b</b>	Caractéristiques principales de la structure en fonction de $R_c$ pour $n = 3.51985$	48
<b>Tableau IV-2</b>	Indice de réfraction du silicium en fonction de la pression	52
<b>Tableau IV-3</b>	Grandeurs caractérisant la réponse du capteur en fonction de la pression	53
<b>Tableau IV-4</b>	Sensibilité $S_{RI}$ et $S_P$ calculée pour ce capteur	57

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

## **Introduction général :**

La notion de "cristaux photoniques" a été proposée pour la première fois en 1987 [1] et le premier cristal photonique a été réalisé en 1991 [2]. Les cristaux photoniques (PhCs) sont des structures dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans une, deux ou trois dimensions et cette périodicité du milieu produit sur la lumière qui se propage dans le cristal photonique un effet analogue à celui du potentiel périodique sur les électrons dans un cristal. De même qu'il existe pour les électrons des bandes d'énergie permises et des bandes interdites, il existe des bandes photoniques d'états permises et des bandes photoniques interdites. Une bande photonique correspond à un mode qui se propage dans le cristal photonique et une bande interdite photonique (BIP) correspond à un intervalle d'énergie où la propagation de la lumière est interdite dans certaines directions de ce cristal.

Les cristaux photoniques (PhCs) offrent la possibilité de contrôler la propagation de la lumière et ceci, sur des dimensions de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde dans le cristal matériau. C'est notamment cette propriété qui les rend intéressants pour de nombreuses applications. L'adaptation des cristaux photoniques à l'optoélectronique permet d'envisager de nouvelles perspectives telles que la réalisation de composants pour l'optique intégrée de dimensions réduites et l'intégration de plusieurs fonctions sur un même substrat.

Les applications potentielles des BIP 2D sont différentes et multiples et entre autre on trouve, réalisation de cavités résonantes de taille très réduite, de guides d'ondes, de virages, de filtres sélectifs, de multiplexeurs - démultiplexeurs et de fibres optiques. Ces matériaux ont donné jour à de nouveaux composants optoélectroniques plus performants et compacts que ceux classiques que nous connaissons actuellement.

La réalisation de cavités par l'inclusion de défauts ponctuels dans un cristal photonique, ne sont apparues qu'en 1998 et les excellentes propriétés de réflexion de lumières dans ce cristal environnant, permettent d'avoir des facteurs de qualités élevés pour les modes résonnants créés par ces défauts dans sa BIP [2]. Se sont ces modes résonnants qui représentent le point de départ de l'utilisation des PhCs dans les domaines ; de la détection, de la mesure et de la capture des grandeurs physiques connues. En effet, de nos jours les capteurs les plus performants qu'on trouve sur le marché quelque soit leurs types utilisent au moins une cavité résonnante implanté dans une structure à cristaux photoniques. Ces dernières sont à la base de réalisation de

# Introduction générale

---

capteurs à usage domestique comme les capteurs biologiques, les capteurs mécaniques, les capteurs chimiques et/ou de gaz ou à usage spécial comme dans les domaines militaires ou spatiaux.

Parmi les grandeurs physiques les plus contrôlées et mesurées on trouve la pression. La mesure de pression peut dans certains cas être vitales si on parle par exemple d'environnement aquatique, ou spatial, pour cette raison sa mesure avec précision été toujours un souci pour la technologie. L'apparition des cristaux photoniques a résolue ce problème. En effet on trouve maintenant des capteurs de pression très précis et à temps de réponse très faible puisque qu'ils utilisent les propriétés fantastiques de la lumière (ce dernier élément ne dépendra maintenant que de l'électronique associée à la structure PhCs). La sensibilité du capteur elle aussi est très importante et constitue de nos jours un domaine de recherche parmi les plus compétitifs. Différentes publications ont été réalisées ayant tous comme but d'améliorer la sensibilité et la limite de détection des capteurs de pression à base de cristaux photonique, notre travail entre dans ce contexte.

Dans le présent travail nous allons faire le design et la simulation d'un capteur de pression à haute sensibilité. La structure que nous allons utiliser représente un design amélioré de la structure proposée par [3]. La réalisation de notre travail sera étalée en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les capteurs. Dans ce contexte, nous avons donné les caractéristiques générales communes aux différents. Puis nous avons donné différents types de capteurs, leurs structures et leurs principes de fonctionnement. Puis nous allons aborder précisément les capteurs de pression et en particulier ceux à base de cristaux photoniques.

Dans le deuxième chapitre, nous passerons en revue les notions de cristaux photoniques et les définitions de bases relatives à ces structures. Dans ce contexte nous montrerons leurs caractéristiques très importantes et leurs capacités à fournir une bande interdite photonique (BIP) qui représente le support essentiel pour la réalisation de différents types de capteurs utilisant ce type de structure.

Le troisième chapitre sera en totalité consacré à l'étude de quelques applications importantes des systèmes à cristaux photoniques. Entre autre on donnera dans ce chapitre des exemples de réalisation de capteurs biologiques, de capteurs chimiques et des capteurs de grandeurs mécaniques comme la pression.

## Introduction générale

---

Dans le quatrième chapitre nous allons proposer une structure à cristaux photoniques qu'on utilisera à la suite pour la conception d'un capteur de pression. La structure proposée doit être en premier lieu optimisée de façon à produire un maximum de sensibilité, cela par l'optimisation de ces paramètres géométriques. Ensuite et après l'obtention de la structure optimale, cette dernière sera utilisée pour la mesure de pression avec une très bonne sensibilité.

# **CHAPITRE I**

## **Capteurs- Généralité et Caractéristiques fondamentales**

## I-1- Introduction

Dans un grand nombre de domaines, il est nécessaire d'avoir accès à une grandeur physique. Cette connaissance permet de connaître l'état physique d'un système et de pouvoir prendre des décisions quand à la conduite de celui-ci. Les décisions peuvent être automatiques c'est à dire prise par un ordinateur ou prise par un opérateur humain via une interface homme machine. Dans les deux cas, l'état physique du système doit être connu sous la forme d'une grandeur électrique : tension ou courant car les systèmes de traitement n'utilisent que ces grandeurs. L'opération qui permet de transformer une grandeur physique en une grandeur électrique est réalisée par un capteur [4].

Les capteurs chimiques, physiques et les biocapteurs développés depuis quelques dizaines d'années sont maintenant adoptés et largement utilisés dans tous les domaines de la vie courante (qualité de l'eau et de quelques produits de l'agroalimentaire, analyses biologiques, dépollution,.....). La sensibilité, la sélectivité, la spécificité et la durabilité des capteurs ont toujours été des paramètres essentiels dans leur conception [5].

Dans ce premier chapitre nous présentons les notions de base sur des capteurs, définition, leurs caractéristiques et les différents types de capteurs.

## I-2- Généralités sur les capteurs :

### I-2-1- Définition :

Un capteur est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable, telle qu'une tension électrique, une fréquence, une hauteur de mesure, une intensité ou la déviation d'une aiguille. On peut dire qu'un capteur est un dispositif qui sous l'effet d'une grandeur physique que l'on souhaite connaître et caractériser, délivre une grandeur physique exploitable on parle ainsi d'un transducteur [6].

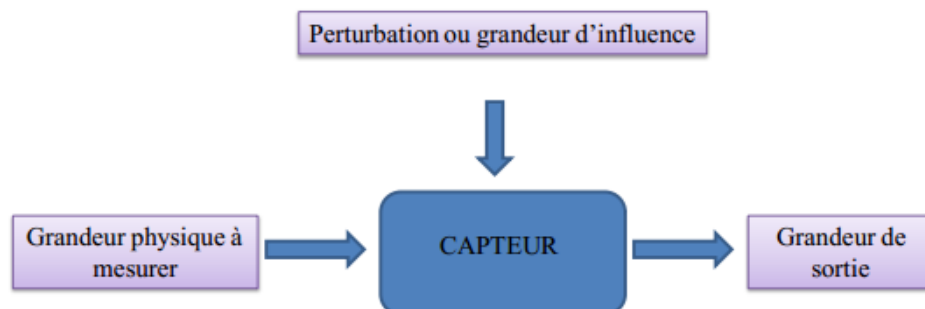


Figure I-1 : Définition d'un capteur [6].

### I-2-2- Les grandeurs d'influence

Le capteur, de par ses conditions d'emploi, peut se trouver soumis non seulement au mesurande mais à d'autres grandeurs physiques dont les variations sont susceptibles d'entraîner un changement de la grandeur électrique de sortie qu'il n'est pas possible de distinguer de l'action du mesurande. Ces grandeurs physiques " parasites" auxquelles la réponse du capteur peut, être sensible sont les grandeurs d'influence [7]. On retrouve les grandeurs de type mécanique (variations de pression, les forces qui provoquent des déformations...) ou thermique (variation de température qui engendre la dilatation des corps et la modification des propriétés électriques tels que le changement de conductibilité et de caractéristiques diélectriques) mais aussi des grandeurs électriques (paramètres électriques, tels que courant, tension, fréquence, des circuits d'alimentation du capteur)[8].

Les principales grandeurs d'influence sont :

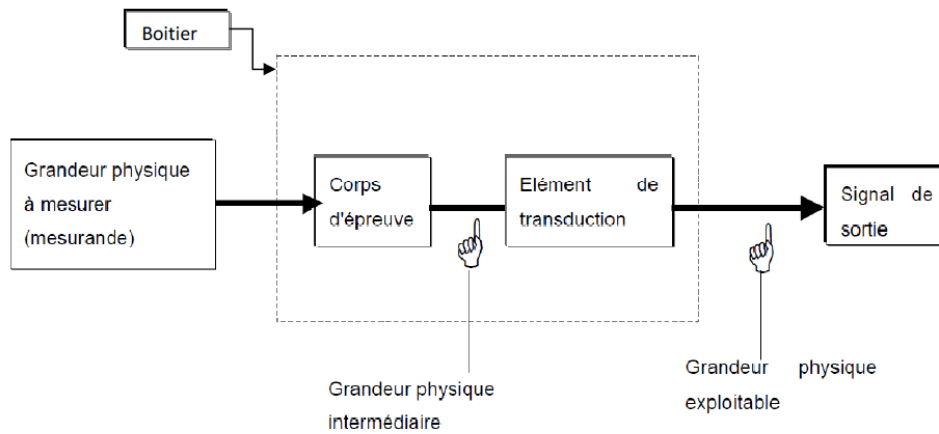
- la température qui modifie les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur ; la pression, l'accélération et les vibrations susceptibles de créer dans certains éléments constitutifs du capteur des déformations et des contraintes qui altèrent la réponse ;
- l'humidité à laquelle certaines propriétés électriques comme la constante diélectrique ou la résistivité peuvent être sensibles et qui risque de dégrader l'isolation électrique entre composants du capteur ou entre le capteur et son environnement ;
- les champs magnétiques variables ou statiques ; les premiers créent des f.é.m. d'induction qui se superposent au signal utile, les seconds peuvent modifier une propriété électrique, comme la résistivité lorsque le capteur utilise un matériau magnéto-résistant ;
- la tension d'alimentation - amplitude et fréquence - lorsque, comme pour le transformateur différentiel, la grandeur électrique de sortie en dépend de par le principe même du capteur [7].

### I-2- Structure d'un capteur

La structure générale d'un capteur est représenté en figure I-2. Dans cette structure on trouve[5].

#### I-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 [5].



**Figure I-2 :** structure d'un capteur [5].

### I-2-2- Transducteur (le capteur)

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 [5].

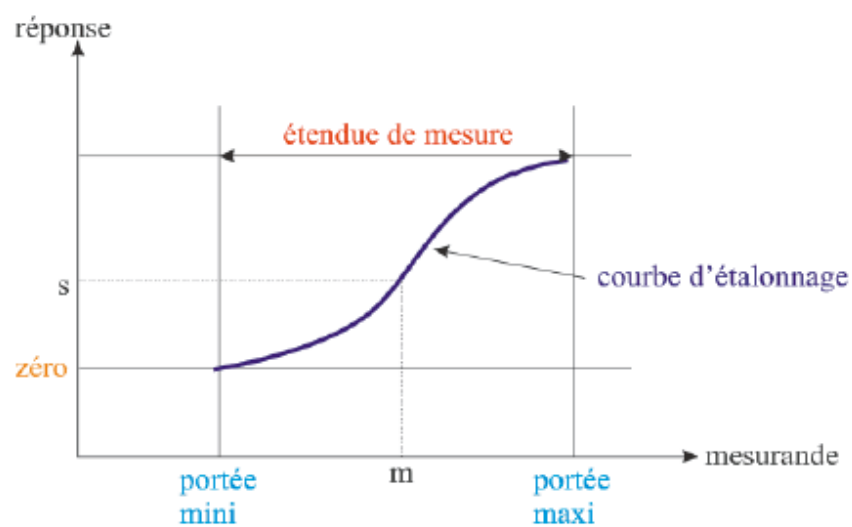
### I-2-3- Le boîtier

Le boîtier est un élément mécanique de protection, de maintien et de fixation du capteur[5].

## I-3-caractéristiques des capteurs :

### I-3-1- Etalonnage

L'étalonnage permet d'ajuster et de déterminer, sous forme graphique, la relation entre le mesurande et la grandeur électrique de sortie [5].



**Figure I.4:** Etalonnage d'un capteur [6]

### I-3-2- Domaine de linéarité

Dans ce domaine de linéarité, la variation de la grandeur de sortie est proportionnelle à la variation du mesurande [5].

### I-3-3- Sensibilité (s)

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

$$S = \frac{\Delta s_{out}}{\Delta m} \dots \dots \dots I.1$$

Plus un capteur est sensible plus la mesure pourra être précise. C'est une caractéristique importante pour l'exploitation et l'interprétation des mesures[5].

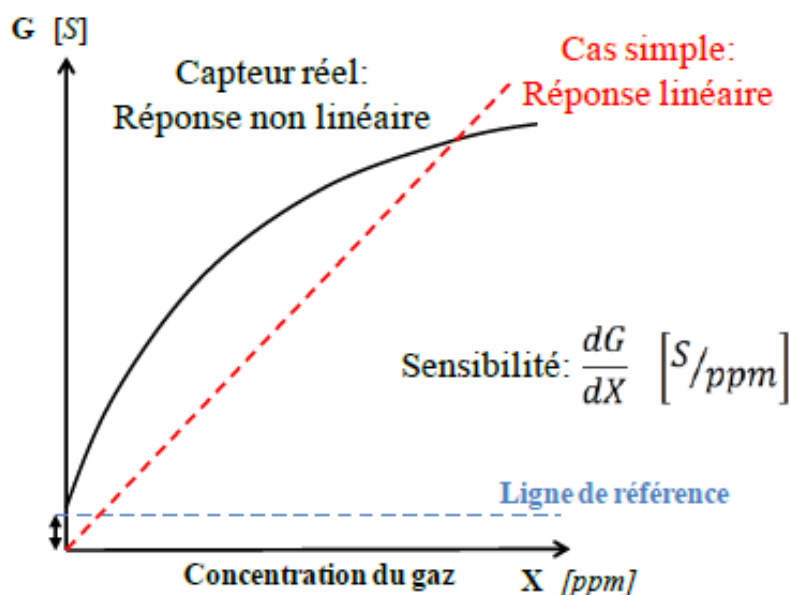


Figure I.5: Réponse non linéaire d'un capteur à semi-conducteur [8].

### I-3-4- Temps de réponse ou rapidité

La rapidité est caractérisée par le temps que met le capteur à réagir à une variation brusque du mesurande. Cependant la valeur finale étant le plus souvent atteinte de manière asymptotique, elle correspond au temps nécessaire pour que le capteur délivre une certaine portion  $\alpha$  de la pleine amplitude du signal. Le temps de réponse noté  $t_\alpha$  est tel que  $\alpha$  vaut généralement 90%.

La connaissance du temps de réponse d'un capteur est un élément essentiel lors de la réalisation de mesures [5].

### I-3-5- Résolution (Précision)

C'est le plus petit incrément de la valeur mesurée qui puisse être significativement mesuré par le capteur [5].

### I-3-6- Fidélité

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

$$\langle m \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n} \dots\dots\dots I.2$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - \langle m \rangle)^2}}{n-1} \dots\dots\dots I.3$$

$m_i$  : est la valeur de  $m$  à la  $i^{\text{ème}}$  mesure.

Parmi les écarts de fidélité on distingue : la répétabilité [5].

### I-3-7- Répétabilité

La répétabilité correspond à la variation aléatoire des résultats d'une série de mesures successives d'une même grandeur physique  $m$ , effectuée dans les mêmes conditions de mesure pendant un court intervalle de temps. Ces conditions sont appelées conditions de répétabilité et elles concernent le même mode opératoire de mesure, même observateur, même équipement de mesure, même lieu de mesure [5].

### I-3-8- Sélectivité

Un capteur est dit sélectif, si la variation du signal de sortie est due uniquement à la seule grandeur (physique, chimique, biologique...) qu'on veut mesurer. C'est la capacité du capteur à ne mesurer qu'une seule grandeur dans le milieu où il est utilisé ou en d'autres termes, d'être le plus insensible aux grandeurs d'influence, grandeurs qui ne font pas l'objet de la mesure, mais influent sur la sortie du capteur [5].

## I-4- Différents types de capteurs :

Il existe plusieurs classifications des capteurs. La plus répandue se réfère à la nature des mesurandes ou à la transduction, de façon indépendante de l'utilisation [2].

### I-4-1- Biocapteurs

Par définition un biocapteur est un système analytique qui exploite la capacité de détection biologique pour une molécule cible, en conjonction avec un transducteur physicochimique qui transforme la reconnaissance biologique en un signal physiquement mesurable. Trois principaux éléments composent un biocapteur : une couche biologique sensible, un transducteur et un signal de sortie. La couche biologique contient un biorécepteur, qui reconnaît l'espèce biologique souhaitée et qui est immobilisé sur le transducteur. Ce dernier assure la conversion de la réponse biologique en un phénomène physique. Au plus haut niveau, le signal de sortie permet la mesure du phénomène physique élaboré par le transducteur. Ce niveau contient souvent des étapes d'amplification et d'affichage, de manière appropriée et interprétable par l'utilisateur [5].

### I-4-2- Capteurs chimique

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

Un capteur chimique en lui-même est composé de deux parties essentielles :

La première concerne la réception. Il s'agit de la partie qui transforme l'information chimique en une forme de signal ou d'énergie mesurable. Cette réception peut être soit physique (ce sont typiquement les capteurs basés sur les mesures d'absorbance, de l'indice de réfraction, de la modification de masse, ...), soit chimique (systèmes où il y a une réaction chimique avec l'échantillon à analyser qui donne naissance à un signal) [8].

La deuxième partie est la transduction. C'est la partie qui concerne la transformation du signal ou de l'énergie obtenue précédemment en un signal exploitable. Les différents principes de la transduction d'un capteur chimique sont très nombreux : optique, électrochimique, électrique, massique, thermoélectrique [8].

### I-4-3- Capteurs physiques

Ce sont des dispositifs sensibles à des phénomènes physiques, les mesurandes étant notamment la température, la masse, la force, la vitesse, le débit et de pression (ces dernier seront détaillés dans le paragraphe suivant) etc.....[8].

La sensibilité est assurée par divers phénomènes physique, comme la piézoélectricité l'effet hall, des variations d'impédance, la photosensibilité...etc [8]. Dans ce qui suit nous allons abordés en détail les capteurs de pressions SANS

#### 1-4-4- Les capteurs de pressions

##### 1-4-4-a- Description d'un capteur de pression

La pression, comme chacun sait, constitue une variable essentielle pour l'étude métrologique d'un milieu environnant qui peut-être soit un gaz soit un fluide. La mesure de cette variable est réalisée à l'aide d'un capteur de pression, dispositif capable d'associer à la grandeur mesurée, un signal électrique reconnaissable appelé « réponse » [9]. Un capteur de pression peut donc être représenté par le schéma de la Fig. I-5

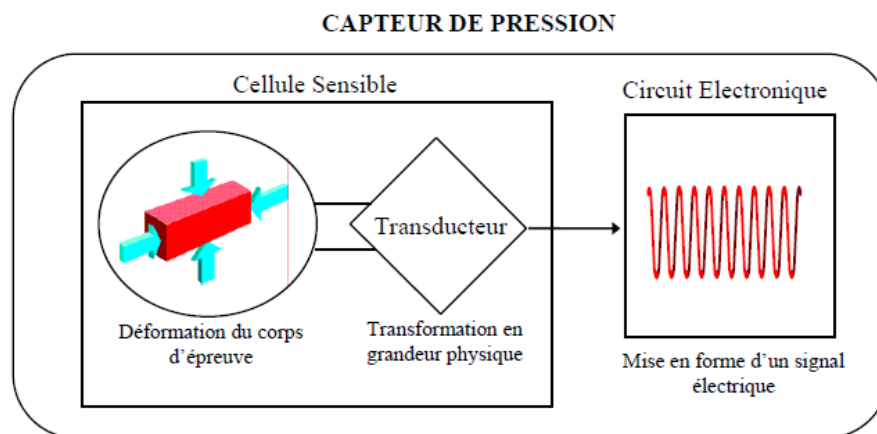


Figure 1-16: Schéma synoptique d'un capteur de pression [10].

##### 1-4-4-b- Evolution des principes de détection

La conception d'un capteur de pression passe par des choix techniques et technologiques lesquels sont généralement guidés par l'application même du capteur. Aussi, la diversification des applications a conduit à une évolution des techniques utilisées [9].

##### 1-4-4-c- Les corps d'épreuve

C'est l'élément mécanique qui, soumis aux variations de la grandeur à mesurer (mesurande), a pour rôle de la transformer en une grandeur physique mesurable. Pour les

capteurs de pression cette grandeur est généralement une déformation. Les corps d'épreuve les plus utilisés sont les plaques, les poutres et les membranes.

A partir des années 70, les nouveaux capteurs sont basés soit sur la déformation d'un substrat, soit sur celle d'une membrane de silicium qui, de nos jours, est le corps d'épreuve le plus répandu [9].

#### **1-4-4-d- Les capteurs de pression existant sur le marché**

- **Avant les années 70**

Pour la plupart des capteurs existants sur le marché dans cette période, la partie détection faisait appel à l'électromécanique et utilisait des techniques dont les performances étaient relativement modestes mais acceptables par rapport à l'application qui leur était destinée. Parmi ces techniques on peut citer :

- le tube de Bourdon,
- le tube vrillé,
- le tube borgne,
- la capsule manométrique,
- les pistons,
- les membranes encastrées et les membranes ondulées,
- ou encore différents soufflets .

Il faut noter que ces techniques sont encore utilisées de nos jours, malgré leur grande taille et leur coût unitaire élevé [10].

- **A partir des années 70**

Suivant les domaines d'applications, des impératifs de taille et de production de masse à faible coût ont induit une évolution de l'électromécanique vers la microélectronique.

Cette filière a apporté des avantages autant techniques qu'économiques en permettant la fabrication collective de dispositifs de détection de petite taille, de bonne stabilité, et ayant la possibilité d'avoir le traitement de signal associé .

Les « nouveaux » capteurs sont donc principalement basés soit sur la déformation d'un substrat (capteurs GaAlAs soit sur celle d'une membrane de silicium qui, de nos jours, est le corps d'épreuve le plus répandu [10].

Récemment de nouvelles technologie utilisant la lumière et des microstructures ont été inventé et fleurisse déjà a cause de leur tres grandes sensibilité.

- **Le transducteur :**

C'est l'élément sensible qui, lié au corps d'épreuve, traduit les réactions de ce dernier en signal électrique. Pour effectuer la mesure de la pression, on a vu qu'il fallait convertir la déformation du corps d'épreuve en une grandeur physique. Il existe plusieurs techniques pour mesurer un déplacement, une déformation ou une force. La plupart des grandeurs de sortie sont d'ailleurs de type électrique [9].

Depuis des années 80, la majeure partie des nouvelles cellules sensibles disponibles sur le marché, est basée sur le principe de détection de type piézorésistif. Cela signifie que la détection de la pression se fait par la mesure d'une variation de résistance. Ces composants sont extrêmement sensibles à la température et nécessitent un circuit de compensation spécifique. C'est pourquoi, des efforts de recherche ont été effectués sur des structures capacitatives dont les avantages potentiels sont une grande sensibilité à la pression et une faible sensibilité à la température. Le principe de détection de ces structures capacitatives est basé sur la variation d'une capacité [9].

- **Le module électronique**

C'est le module de traitement du signal en vue d'une éventuelle exploitation. Comme nous l'avons vu dans la définition d'un capteur, le circuit de traitement sert à mettre en forme un signal électrique transportant l'information donnée par le transducteur. Autrement dit, ce signal doit être l'image de la déformation du corps d'épreuve et par suite, de la pression.

Le capteur est construit pour exploiter une propriété de la matière, décrite par une loi physique, permettant de connaître la correspondance entre la grandeur électrique à la sortie du capteur et la grandeur physique à mesurer. Par exemple, pour mesurer une pression, une loi physique permet de calculer la pression à partir de la mesure de la résistance du capteur.

Le capteur doit avoir les caractéristiques suivantes:

- Une bonne linéarité.
- Une grande étendue de mesure.
- Une très bonne sensibilité au mesurande.
- Une insensibilité aux grandeurs d'influence [9].

#### **I-4-5- Les capteurs de pression différentiels :**

##### **a- Capteur de pression résistif**

La piste résistive est placée sur la partie fixe du capteur et le mouvement mécanique mesurer est accouplé à un curseur qui se déplace sur celle-ci, ainsi la résistance entre un point fixe et la partie mobile du potentiomètre est fonction de la position à mesurer. L'élément sensible est constitué d'un support sur lequel est déposée une pate résistive qui incorpore un

liant plastique et du carbone (cas des capteurs à piste résistive) ou un bobinage résistif (cas des capteurs à fil résistif). L'élément sensible ainsi obtenu peut être apporté [11].

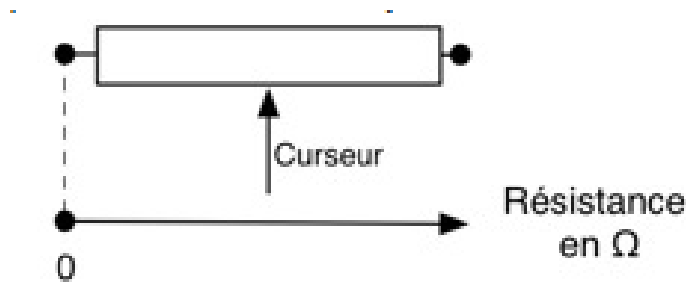


Figure –I-6 : capteur résistif [11]

- ✓ Soit à l'intérieur d'une forme cylindrique pour constituer un potentiomètre rotatif.
- ✓ Soit fixé sur un support plat pour réaliser un capteur de déplacement rectiligne.

#### b- Capteur de pression capacitif

Une solution élégante imaginée par certains constructeurs a été de transformer la déformation de la membrane sous l'effet d'une pression (ou d'une force) en une variation de capacité plutôt qu'une variation de résistance. En effet, il suffit de placer l'une des armatures d'un condensateur sur la membrane qui se déforme et l'autre sur une pièce solidaire du corps d'épreuve, mais non soumise à la déformation, comme le montre le schéma ci-dessous, pour réaliser un condensateur plan dont la capacité est en relation directe avec la pression appliquée [11].

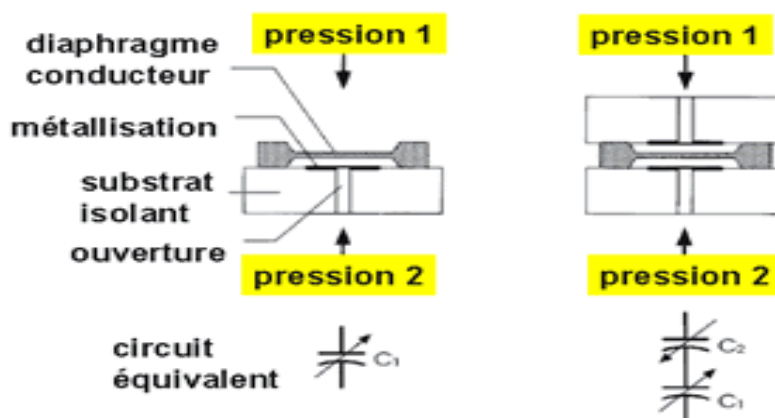


Figure –I- 7:capteur capacitif [11]

Il est clair qu'on peut imaginer des géométries d'armatures permettant d'obtenir la meilleure linéarité possible entre variation de capacité et variation de pression, que l'on peut mettre en œuvre simultanément plusieurs condensateurs et donc faire un montage en pont peu sensible

aux contraintes thermiques. L'intérêt habituel du montage capacitif se retrouve évidemment dans cette application, à savoir qu'on intégrera généralement ce condensateur variable dans un circuit oscillant et qu'en conséquence la mesure de pression se ramènera à une mesure de fréquence et l'opportunité de disposer de deux oscillateurs semblables. L'un de fréquence fixe et l'autre variant avec la pression, dont on exploite via un mélangeur la différence des fréquences permet évidemment une très grande précision puisqu'on réduit ainsi par soustraction l'importance des dérives éventuelle de chaque oscillateur pris séparément [11].

#### **I-4-6- Capteur de pression à base de cristaux photoniques - Principe de la détection:**

Les cristaux photoniques (PhCs) sont l'un des domaines de recherche les populaires en nano-optoélectronique et photonique de nos jours. Chaque jour, de nouvelles applications des PhCs sont découvertes. Parmi les applications connus on trouve ; les guides d'ondes à cristaux photoniques, les fibres optique à cristaux photoniques, les lasers à faible seuil,...etc.

L'application des PhCs dans le domaine des capteurs est un domaine de recherche d'actualité, en effet les PhCs ont un potentiel de détection très important des paramètres physiques (Température et pression hydrostatique) avec une très haute résolution et sensibilité. Ces microstructures sont de nos jours utilisés pour détecter les gaz, l'humidité, Mesures et détection chimique et biologique [12] et aussi la détection des grandeurs mécaniques et en particulier la pression.

L'effet de la pression hydrostatique sur les paramètres électroniques et optique des matériaux tels que l'écart énergétique et l'indice de réfraction peuvent être considérés comme un bon support pour le phénomène de détection de pression. En effet, en appliquant une pression au PhC, l'indice de réfraction du matériau, sa géométrie changent et ce changement sera lié étroitement à la juste valeur de la pression mis en cause.

Certain capteur de pression utilisent des guides d'onde à PhC et d'autres utilisent des guides d'onde couplés à une /ou plusieurs nano-cavités. Dans le premier cas, le spectre du guide d'onde se trouve décalé par rapport à sa position d'origine (position du repos du capteur). Dans le second cas, la longueur d'onde de résonance de la nano-cavité elle aussi se décale de sa position de repos d'une distance qui dépend de la pression appliquée[13].

**I-5- Conclusion**

Dans ce premier chapitre nous avons abordé les capteurs en terme générale, leurs caractéristiques, leurs types et leurs principes de fonctionnement. Puis nous parlés des cristaux photoniques et de leurs utilisations dans le domaine de la détection des différents phénomènes mesurable que ce soit physique, chimique, biologique ou autres.

A la fin de ce chapitre nous avons abordés les capteurs de pression et en particulier ceux à base de cristaux photonique et dans ce contexte nous avons situés quelques type de ces capteurs ainsi que le principe de détection qu'ils utilisent pour la mesure de pression.

## **CHAPITRE II**

# **LES CRISTAUX PHOTONIQUES**

### II-1-Introduction

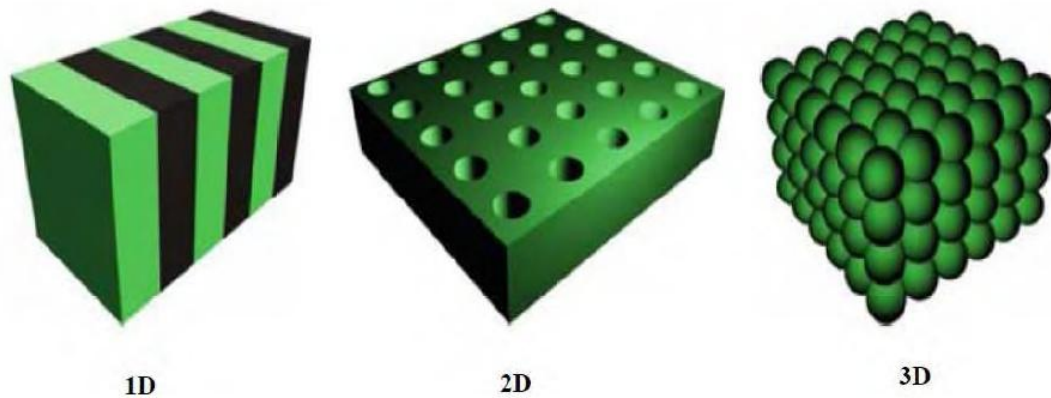
Dans le milieu des années 90, les avancées en nano-technologies ont rendu possible l'élaboration de matériaux artificiels dont le comportement vis-à-vis des ondes électromagnétiques est tout à fait surprenant, ils sont appelés parfois cristaux photoniques., [14]les cristaux photoniques (CPs), également connus sous le nom de structures à bandes interdites photoniques avec abréviation BIP (en anglais, Photonic Band Gap, PBG) [2]. Les matériaux à bandes interdites photoniques ont été définis comme des structures artificielles qui présentent une modulation périodique de la constante diélectrique dans une ou plusieurs directions. Selon le nombre de directions[5].

### II-2-Historique :

La "date de naissance" des cristaux photoniques artificiels serait donc 1987 [15], ce qui en ferait une idée assez neuve. Pourtant, les matériaux dont l'indice varie périodiquement sont connus et utilisés depuis longtemps sous le nom de miroirs de Bragg qui sont des cristaux photoniques à une dimension. C'est Lord Rayleigh en 1887, le premier qui a montré que l'on pouvait ainsi produire un « gap » ou bande interdite. Mais la force de l'article de Yablonovitch était d'étendre cette idée, de faire des miroirs de Bragg un concept général en s'appuyant pour cela sur les idées développées en physique du solide. C'est en cela que Yablonovitch peut être considéré comme le "père" des cristaux photoniques.[15]. En 1991, A. Genack et al ont montré expérimentalement l'existence de l'effet de localisation de la lumière dans les structures périodiques. En même temps Yablonovich et al ont démontré expérimentalement la possibilité de réaliser une structure diélectrique capable de réfléchir la totalité d'un rayonnement électromagnétique, quelle que soit la direction incidente et dans le domaine des micro-ondes. Depuis, de nombreuses voies de recherches ont été ouvertes. Tous les domaines de longueur d'onde sont concernés, des micro-ondes jusqu'à l'optique [5].

### II-3-Définition :

Les cristaux photoniques sont l'analogie des semi-conducteurs pour le contrôle des photons,[16] Les cristaux photoniques sont des matériaux dont la constante diélectrique est modulée de façon périodique. La périodicité peut être unidimensionnelle (miroir de Bragg), bidimensionnelle ou encore tridimensionnelle [17]. Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice de réfraction est modulé de façon périodique, cette modulation périodique sur une ou plusieurs directions de l'espace permet de créer une bande interdite photonique où la lumière ne peut plus se propager [18].



**Figure II-1-** Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D) [5].

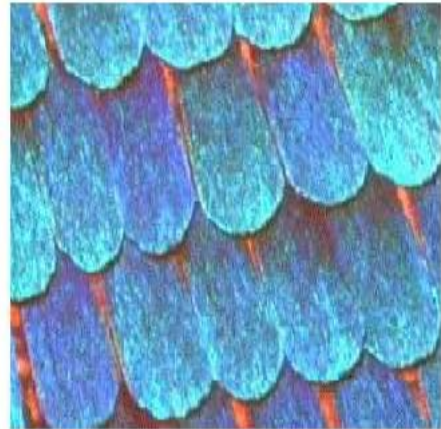
### II-3-1- : Cristaux photoniques naturelles :

Les cristaux photoniques existent dans la nature à l'état minéral et biologique. Les opales sont des minéraux composés d'arrangements de sphères de silice hydratée. Leurs feux sont dus à la diffraction de la lumière par leur structure de cristal photonique tridimensionnel. L'origine de la coloration de nombreuses espèces animales et végétales provient aussi de motifs périodiques. La coloration bleue des ailes de papillons morpho et des feuilles de certaines variétés de Sélaginelle en sont des exemples. Les couleurs bleu, vert, jaune et marron des plumes de paons proviennent de la diffraction par des cristaux photoniques 2D à nombre et longueur de maille variables [19].

Cependant, toutes les couleurs rencontrées ne doivent pas leur présence à un phénomène aussi simple qu'est l'absorption. En effet, des études ont montré que des structures naturelles pouvaient avoir exactement les mêmes caractéristiques que les cristaux photoniques artificiels. Les colorations vives et très caractéristiques (et souvent très directionnelles) de certaines espèces sont parfois dues à la présence de structures relativement complexes présentant un arrangement périodique. Elles participent notamment à la communication interspécifique (entre mâle et femelle) ou interspécifique (couleurs avertissantes) [20].



(a)



(b)

**Figure II-2 :** la figure (b) présente l'agrandissement d'une aile de papillon (a)[20,22].

### II-3-2- Structures de bandes photoniques

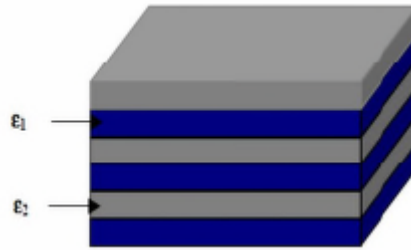
Un cristal est un arrangement périodique d'atomes ou de molécules. Par conséquent, un cristal permet une propagation d'électrons, et en particulier, sa structure périodique peut introduire des valences dans la structure de bande d'énergie du cristal, de telle sorte que les électrons ne peuvent se propager qu'avec certaines énergies.

En effet, un matériau dont l'indice de réfraction varie périodiquement suivant les différentes directions de l'espace pourra présenter des bandes d'énergie interdite pour les photons. Ainsi, dans certaines gammes de longueurs d'onde de l'ordre de la période de la structure, la lumière ne pourra se propager dans le matériau et sera réfléchi quelle que soit son incidence. Cette gamme de longueurs d'onde est appelée bande interdite photonique (BIP ou Photonic Band Gap (PBG)) et est à la base du concept de cristaux photoniques [21].

### II-4- Différents types de cristaux photoniques :

#### II-4-1- Cristaux photoniques à une dimension (réseau de Bragg) :

Ces structures sont couramment utilisées sous le nom de réseau de Bragg (Figure II.3). Elles sont généralement réalisées par un empilement de couches d'indice de réfraction différent et d'épaisseur optique  $\lambda/4$ ,  $\lambda$  étant la longueur d'onde guidée autour de laquelle le matériau doit interdire la propagation des ondes électromagnétiques sous incidence normale. Les réseaux de Bragg ont prouvé leur utilité dans de nombreuses applications : convertisseurs de modes pour fibres optiques, filtres sélectifs de longueur d'onde, multiplexeurs, lasers spéciaux à bande étroite[22].



**Figure II-3** : schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un milieu diélectrique périodique fini [23].

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

**a- Le contraste d'indice  $\delta$ :**

Rapport entre les indices des deux matériaux, qui peut être comparé à la hauteur de la barrière de potentiel de la physique solide [22].

$$\delta = n_h / n_l \dots \dots \dots \text{II-1}$$

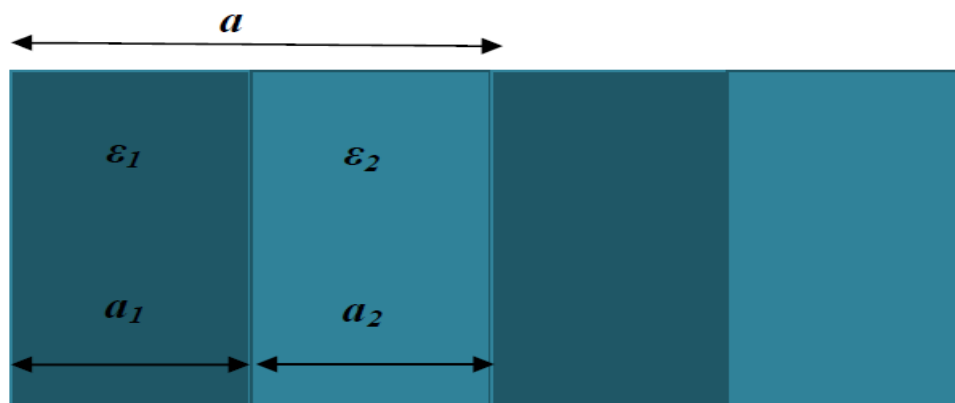
Avec :

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

$n_l$  : L'indice de réfraction du matériau de bas indice.

**b- Les périodes :**

Ces paramètres géométriques, choisis selon le domaine de fréquence étudié, influent sur les caractéristiques de la bande interdite photonique. La période  $a$  est :  $a = (a_1 + a_2)$  avec  $a_1$  l'épaisseur de la couche de permittivité  $\epsilon_1$  et  $a_2$  l'épaisseur de la couche de permittivité  $\epsilon_2$  (figure II.4) [22].



**Figure II-4-** Période d'un cristal photonique unidimensionnel [22].

### c- Le facteur de remplissage $f$ :

Le facteur de remplissage  $f$  peut être comparé au largeur du potentiel périodique de la physique du solide. S'il est pris pour le matériau de haut indice par 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 [22].

$$f = \frac{v_i}{\Lambda} \dots\dots\dots \text{II-2.}$$

Avec :

$v_i$ : Volume occupé par le matériau de permittivité  $\varepsilon_i$  .

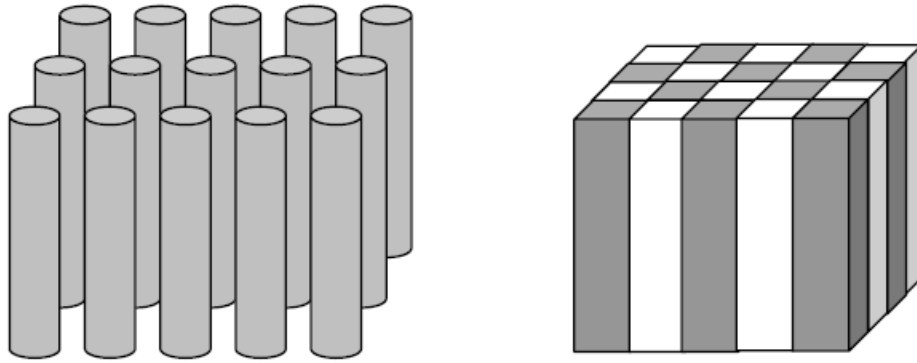
$\Lambda$  : Volume de la cellule.

### II-4-2-Cristaux photoniques bidimensionnels

Les matériaux à Bande Interdite Photonique unidimensionnelle (BIP 1D) ou encore réseau de Bragg, ne contrôlent les radiations lumineuses que dans une certaine ouverture angulaire autour de la normale. Pour permettre le contrôle de la propagation des ondes électromagnétiques avec des angles d'incidences variables, on utilise des matériaux à BIP 2D (figure.II.5) voire à BIP 3D. Notre choix s'oriente vers des BIP bidimensionnelles qui ne sont pas aussi performantes que leur analogue tridimensionnelle mais qui sont plus faciles à réaliser [25] .

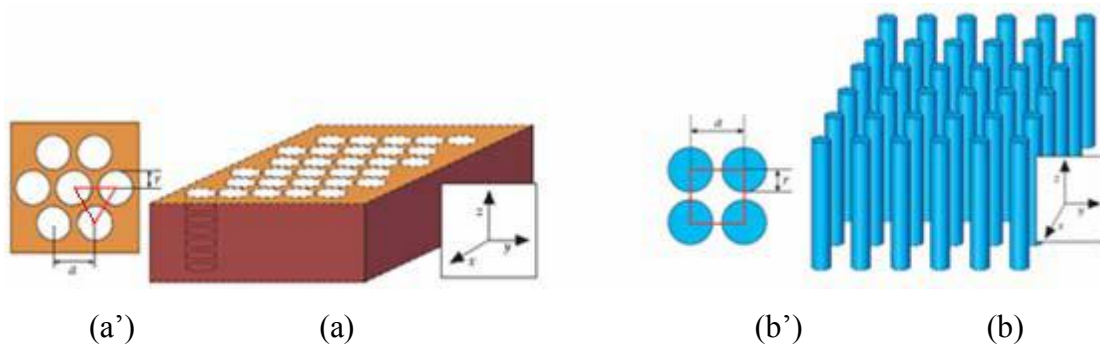
Les structures périodiques bidimensionnelles, sont périodiques suivant deux directions de l'espace et infinis suivant la troisième.

Ces structures périodiques sont composées de cylindres diélectriques. Elles présentent une relative simplicité géométrique qui facilitent les études théoriques et expérimentales [17,18].



**Figure II-5 :** Structures bidimensionnelles [25]

Les deux réseaux les plus courants pour l'organisation des piliers (ou des trous) sont le réseau carré et le réseau triangulaire (figure II.6) [8].



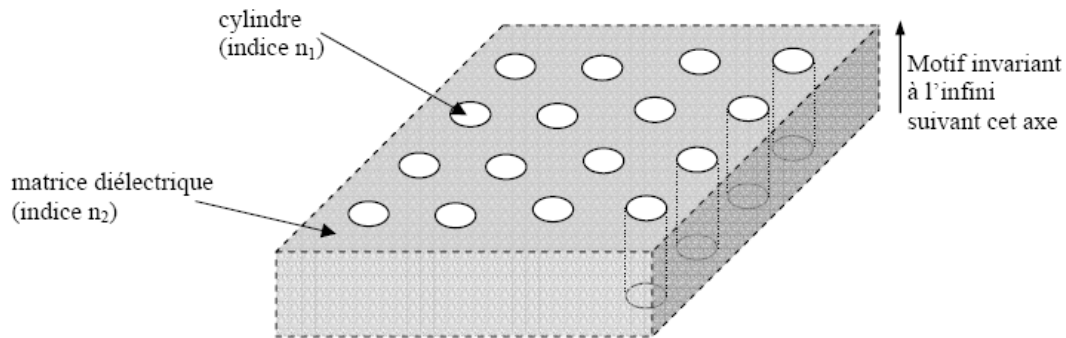
**Figure II-6 :** Cristal photonique bidimensionnel de, (a) réseau triangulaire de trous d'air, (b) réseau carré de tiges diélectriques. [8].

$a$  est le pas du réseau.  $r$  est le rayon des trous et des tiges dans (a) et (b) respectivement. La cellule élémentaire est représentée en rouge. La structure est homogène selon  $z$  et périodique suivant  $x$  et  $y$  [8].

Dans ces structures 2D, il existe deux polarisations possibles pour les ondes électromagnétiques. La polarisation électrique correspond au cas où le champ électrique  $E$  est parallèle aux barreaux de la structure considérés de longueur infinie et la polarisation magnétique correspond lorsque le champ magnétique  $H$  est parallèle aux cylindres infinis.

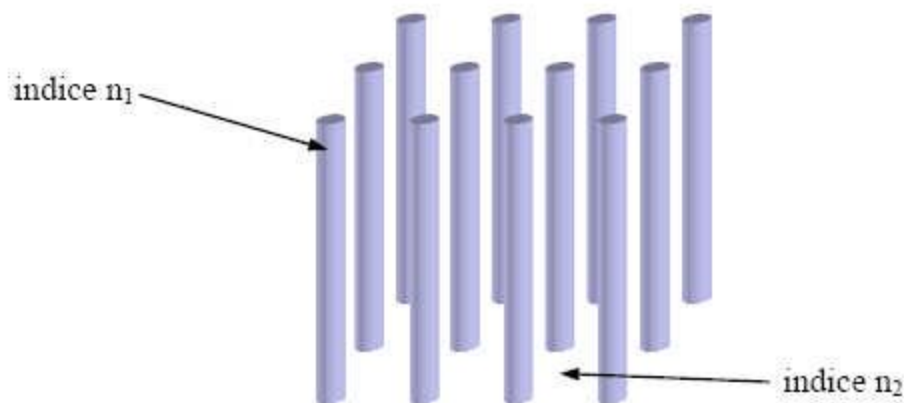
Il existe deux types de structures périodiques diélectriques :

- Les structures dites « connectées » (figure II-7) : les motifs élémentaires sont d'indice  $n_1$  inférieur à l'indice  $n_2$  de la matrice diélectrique [26].



**Figure II-7** : Structure périodique 2D connectée [26]

- Les structures dites « déconnectées » (figure II-8) : les motifs élémentaires sont d'indice  $n_1$  supérieur à l'indice  $n_2$  de l'espace inter motifs. Elles sont constituées de tiges diélectriques ou métalliques alignées périodiquement dans l'air ou de la mousse [26].



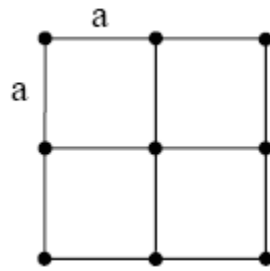
**Figure II-8** : Structure périodique 2D déconnectée [26]

#### II-4-2-a : Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels

Les réseaux périodiques à deux dimensions se regroupent principalement suivant trois familles [26]

- **Le réseau carré**

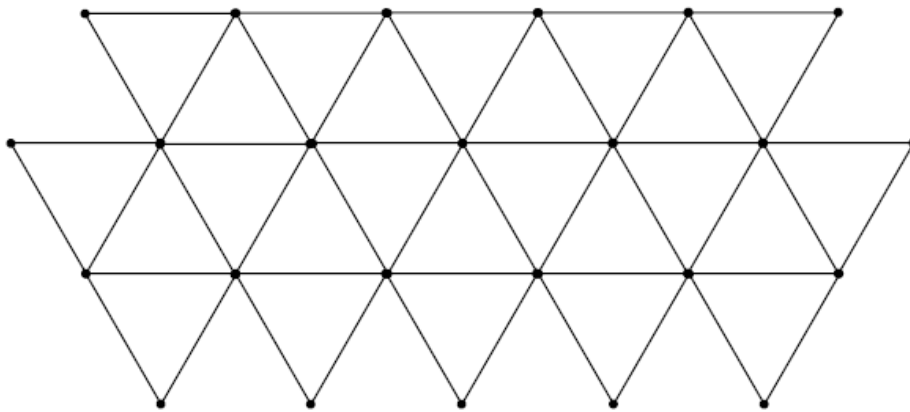
Les nœuds du réseau sont situés sur un carré de côté «  $a$  » (Figure II-9). Il a été montré que ce type de réseau est très sensible à l'angle d'incidence et à la polarisation de l'onde électromagnétique. Il est ainsi difficile d'obtenir une bande interdite totale, c'est-à-dire une bande interdite qui empêche la propagation quelle que soit la polarisation. [26].



**Figure II-9** : Le réseau carré [26].

- **Le réseau triangulaire**

Chaque nœud du réseau est espacé de son proche voisin d'une même distance «  $a$  » (Figure II-10). Cette structure est moins sensible à l'angle d'incidence que le réseau carré mais la bande interdite complète reste difficile à obtenir [26].

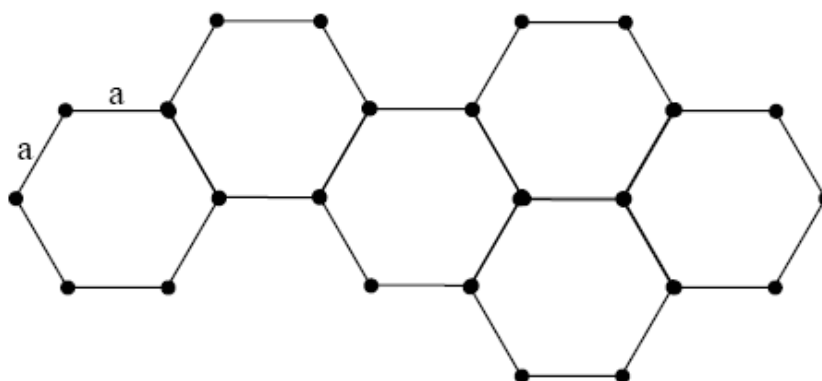


**Figure II-10** : Le réseau triangulaire [26].

- **Le réseau hexagonal**

- **La structure graphite :**

Sur un réseau hexagonal, si tous les nœuds sont identiques et espacés de «  $a$  », alors on appelle cette structure « graphite » car elle est similaire à la structure cristalline du graphite (Figure II-11) [26].

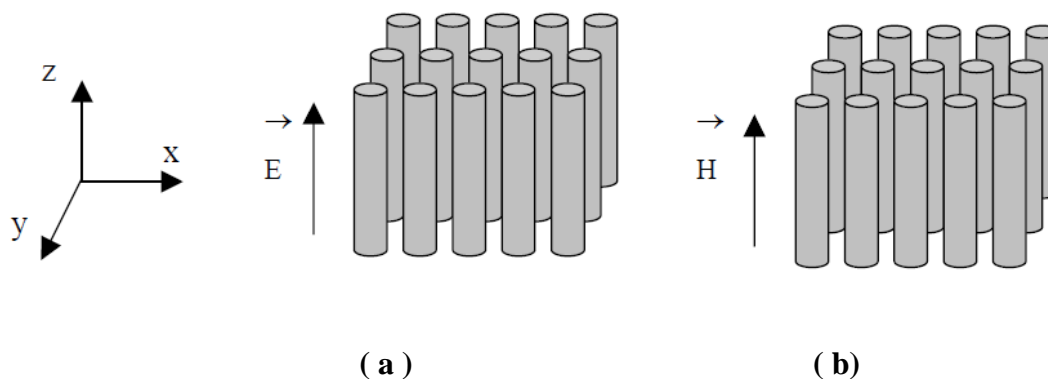


**Figure II-11** : Structure graphite [26].

#### II-4-2-b Structure de Bande Photonique

Généralement, la densité d'états d'une structure à bande interdite photonique est représentée sous forme de structure de bandes qui illustre les modes permis en fonction des points de symétrie de la zone de Brillouin. Dans le cas de réseaux bidimensionnels, il faut considérer deux directions de propagation au lieu d'une seule pour les unidimensionnels. La polarisation TM (respectivement TE) est définie lorsque le vecteur champ électrique (respectivement champ magnétique) est perpendiculaire aux deux axes de symétries ( $x$  et  $y$ ) du réseau considéré (figure II.12).

Suivant la polarisation des ondes, les caractéristiques électromagnétiques d'une structure à BIP seront différentes. Il existe donc une bande interdite TE et une bande interdite TM. La bande interdite absolue sera la zone commune aux deux bandes interdites [25].



**Figure II-12** : différents types de polarisation de la lumière [24].

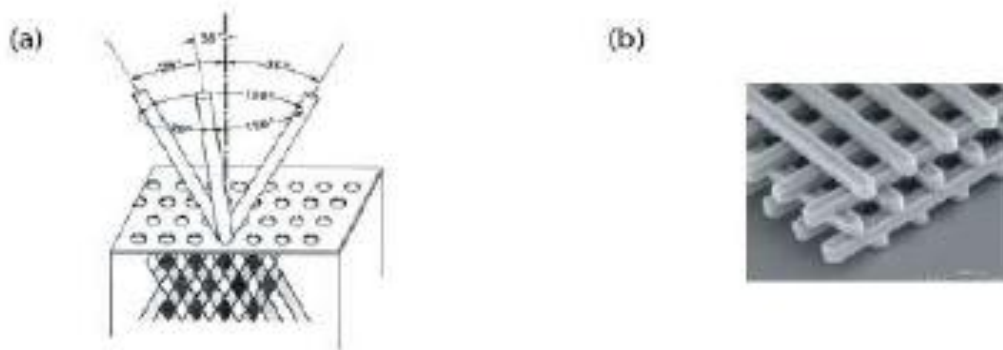
a) polarisation TM, b) polarisation TE

### II-4-3 Les cristaux photoniques tridimensionnels

L'utilisation de cristaux photoniques tridimensionnels est nécessaire pour obtenir une bande interdite dans toutes les directions de l'espace. Un nombre conséquent de travaux ont été réalisés sur les différentes structures géométriques possibles et leur fabrication [8]. Le premier cristal photonique tridimensionnel a été fabriqué par K.M. Ho et al. Il était formé de sphères de silicium arrangées selon une structure diamant.

En 1993 E. Yablonovite fabriquait un cristal photonique en perçant des trous dans un bloc de plexiglas selon trois directions qui simulent les directions cristallines  $\langle 110 \rangle$  d'un cristal diamant.

Ce cristal photonique s'appelle d'après son inventeur "la Yablonovite" (Figure II-13-a). Avec ce cristal photonique, le concept de la bande interdite photonique a été démontré expérimentalement pour la première fois [6]



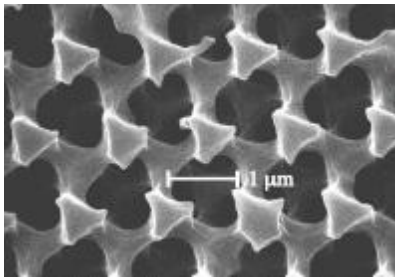
**Figure II-13** : La première structure BIP 3D: la yablonovite [17].

Ce cristal présentait une bande interdite pour les microondes, les dimensions de la structure étant centimétriques, pour aujourd'hui aboutir à des cristaux photoniques présentant une bande interdite dans le proche infrarouge et le visible (Figure II-13-b). D'autres structures autorisent l'apparition d'une bande interdite totale, notamment la structure dite en "**tas de bois**" [24].

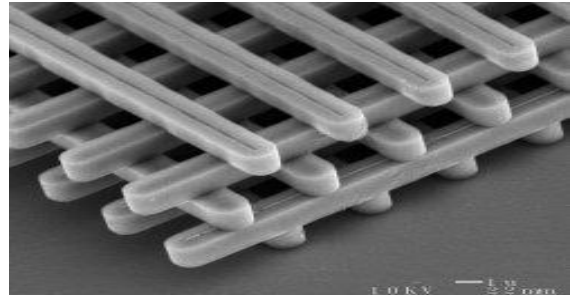
#### II-4-3-a Structures "tas de bois"

Il consiste à empiler des réseaux 1D, en tournant de  $90^\circ$  et en décalant d'une demie période deux réseaux consécutifs (Figure II-14-c) [24]. La structure périodique de ces cristaux photoniques tridimensionnels est bâtie en déposant par couches successives des rubans de silicium polycristallin dans des tranchées de silice. Cette fabrication, de très longue durée, se fait plan sur plan. Après avoir construit la structure, la silice est retirée pour obtenir un cristal

photonique tridimensionnel Si/air dont le contraste d'indice est suffisant pour ouvrir une bande d'énergie interdite omnidirectionnelle [17].



(b)

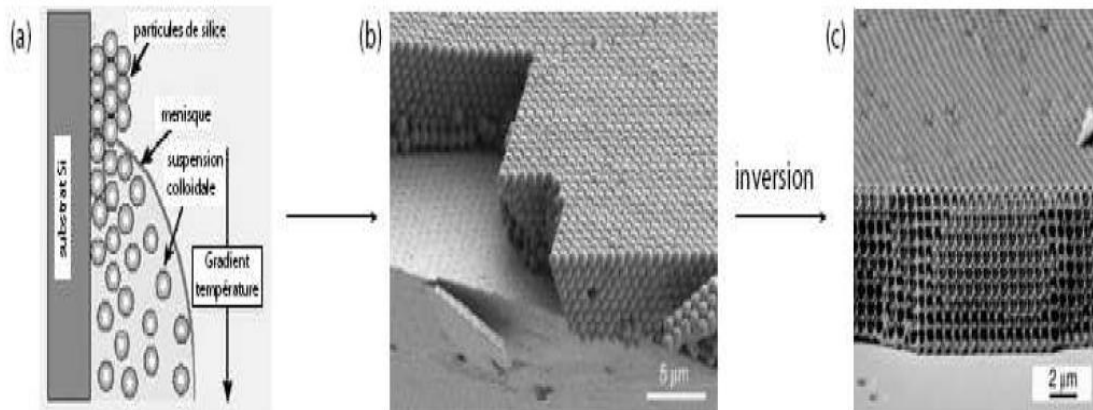


(c)

**Figure II-14 :** b) Image MEB d'une structure Yablonovite en PMMA [Cuisin 2000] et  
c) Image MEB d'une structure tas de bois en silicium [24]

#### II-4-3-b Les opales

Des opales sont obtenues chimiquement par auto-organisation. La première opale a été obtenue par sédimentation de sphères de silice en solution: par sédimentation, ces sphères s'arrangent selon un réseau cubique à faces centrées (FCC). Le nombre important de défauts dans les premières opales a été fortement réduit grâce à des techniques de croissance auto-organisées proposées par Y.A. Vlasov (Figure II-15). La plupart de ces cristaux ne présentent pas de bandes d'énergie interdites, à cause du faible contraste d'indice. Cependant, ces structures servent d'empreinte pour la réalisation d'opales inversées à partir de l'infiltration d'un matériau de haut indice dans les interstices qui séparent les sphères. Ces dernières sont ensuite dissoutes chimiquement pour aboutir à la structure finale de sphères d'air dans une matrice de haut indice. De nombreuses techniques de fabrication existent encore comme la lithographie par holographie par rayons X, l'auto-clonage. Elles souffrent encore toutes d'une mise en œuvre laborieuse et délicate, et souvent ne permettent pas l'insertion déterministe de défauts[17].



**Figure II-15:** Fabrication des opales inversées sur substrat par auto organisation.

- (a) Les sphères de SiO<sub>2</sub> sont forcées de s'ordonner à la surface d'un substrat de silicium.  
 (b) Les sphères sont assemblées directement sur le substrat de Si pour former l'opale.  
 (c) La structure opale est infiltrée avec du silicium puis les sphères de SiO<sub>2</sub> sont enlevées par gravure humide [17].

### II-5- Matériaux BIP à défaut

Dans un cristal photonique, la création d'un défaut est causée par la rupture de la périodicité diélectrique  $\epsilon$ . Cette rupture va engendrer l'ouverture d'une bande de fréquence autorisée à l'intérieur de la bande interdite photonique. La largeur et la position de cette bande autorisée sont gérées par les caractéristiques du défaut [26].

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. Ceci a pour effet de créer des niveaux d'énergie discrets supplémentaires dans la structure de bandes. 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 se comporte comme un miroir et la lumière est réfléchiée par les bords du défaut [27].

il existe deux principaux types de défauts : les défauts ponctuels et les défauts étendus :

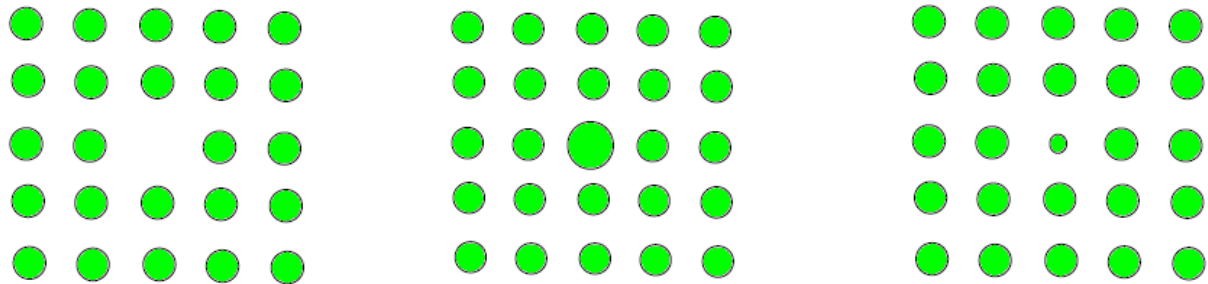
Les deux façons les plus faciles à perturber la périodicité du réseau sont :

1. ajouter du matériau diélectrique en plus : un défaut diélectrique
2. supprimer du matériau diélectrique : un défaut d'air [12]

#### II-5- 1-Défauts ponctuels

Les défauts ponctuels sont créés en modifiant les caractéristiques d'une cellule du réseau. Pour les cristaux photoniques composés de cylindres diélectriques, le constant

diélectrique d'un cylindre peut être changé. Le cylindre peut être enlevé, ce qui crée une lacune dans le cristal. Cela correspond à une microcavité à l'intérieur du cristal photonique. Pour les cristaux photoniques constitués de trous dans un matériau diélectrique, ces trous peuvent être modifiés géométriquement [12].



(a) les défauts ponctuels

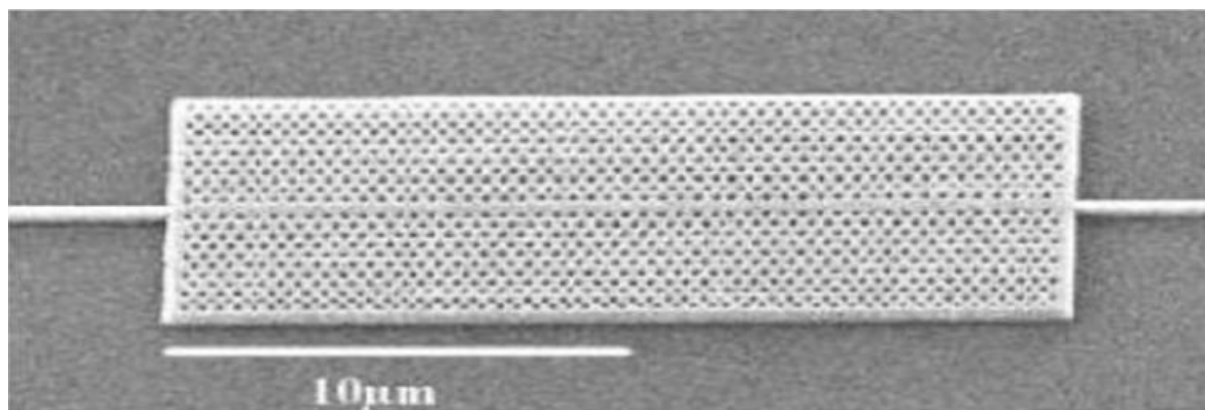
(b) défauts lacunaire

(c) défauts de substitution.

**Figure II-16** : Différents types de défauts [5].

### II-5- 2- Les défauts linéaires

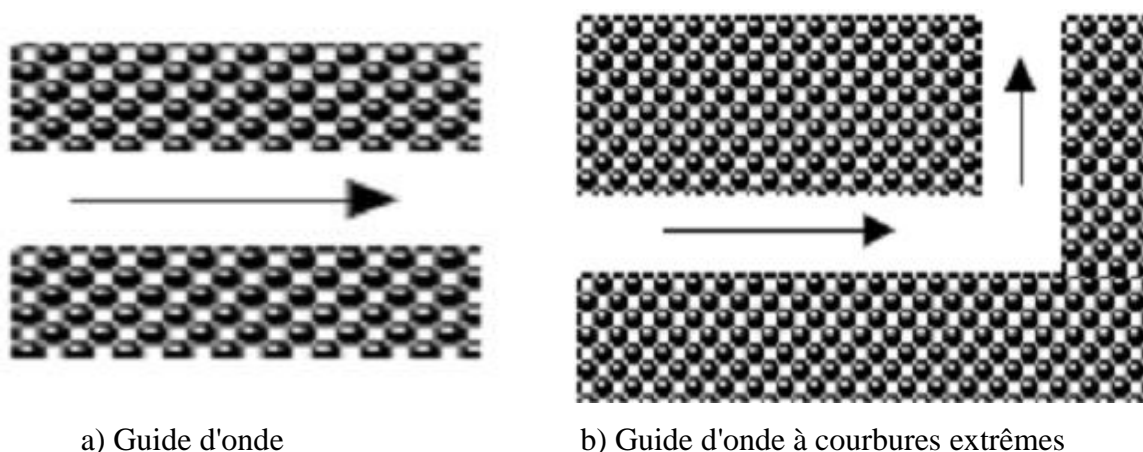
Ces défauts permettent de réaliser un guidage diffractif des ondes appelé aussi défauts étendus, de dimension 1,2 ou 3, ne peuvent évidemment être obtenus que dans les cristaux de dimension au moins équivalente. Parmi ces défauts, les défauts 1D (**W1**) (Figure II.17), sont certainement ceux qui ont suscité le plus grand nombre d'études car ils ont vocation à être utilisés comme guides de lumière au sein d'un cristal donné. On peut d'ailleurs imaginer des défauts 2D (**W2**) ou 3D (**W3**) constitués d'une suite de guides W1, mis bout à bout et orientés dans les directions différentes, de façon à véhiculer la lumière sur tous les chemins possibles à l'intérieur du cristal. L'exemple de base est celui du guide d'onde linéaire W1 dans un cristal photonique 2D. Une façon de réaliser un tel guide consiste à placer des défauts ponctuels, couplés et régulièrement espacés, dans une direction du cristal 2D. Le couplage entre une infinité de résonateurs conduit à une bande de propagation permise dans la direction de l'alignement. Ce type de guide à résonateurs couplés a été proposé en 1999 [23].



**Figure II-17:** Exemple de guide W1 à cristal photonique triangulaire de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant. [23].

### II-5-3- Guides d'onde dans les cristaux photoniques

En introduisant un défaut linéaire (omission d'une ou plusieurs rangées de motifs élémentaires), il est possible de guider la lumière selon une direction choisie. La lumière va se propager le long de ce guide avec une fréquence appartenant à la bande interdite photonique du cristal (figure II-18-a). Des guides d'ondes classiques à base de matériaux diélectriques sont réalisés depuis longtemps. L'onde se propage dans le diélectrique d'indice fort et se réfléchit totalement sur les bords qui sont constitués d'un diélectrique d'indice plus faible. L'intérêt des guides d'ondes BIP par rapport à ceux traditionnels c'est qu'ils présentent de faibles pertes au niveau des courbures (figure II-18-b). Le fait de recourber l'un de ces guides sur lui-même permet d'obtenir un anneau et seuls quelques modes peuvent rester dans cet anneau [14].



a) Guide d'onde

b) Guide d'onde à courbures extrêmes

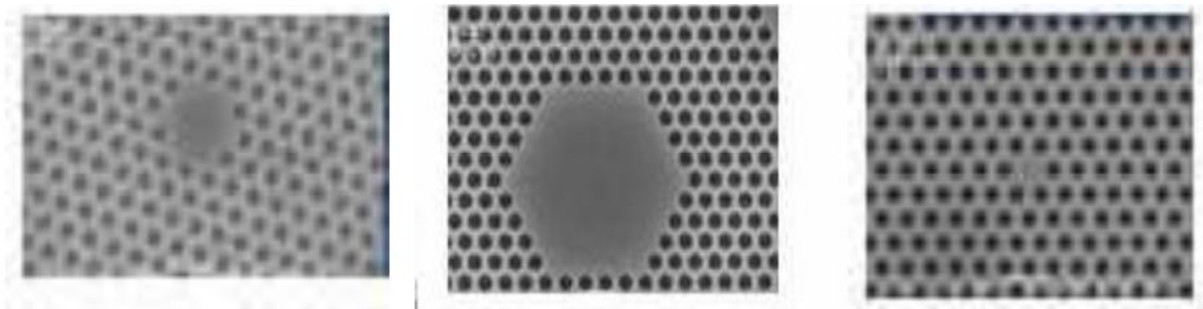
**Figure II-18 :** Formes des guides d'ondes

### II-6- Les différents types de cavités :

Il existe plusieurs types de cavités, elles dépendent de la forme de réseau (triangulaire, hexagonale ou carré), et de nombre de défauts (omission d'un ou plusieurs tiges); parmi Ces cavités nous citons [28].

#### II-6-1- Cavité hexagonale :

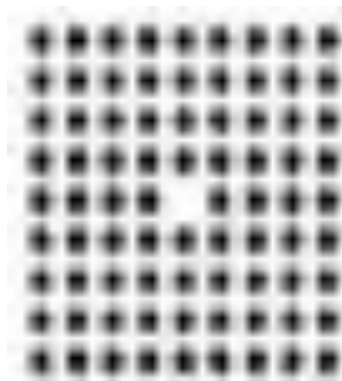
Dans un cristal triangulaire, les cavités hexagonales, dont les côtés sont les rangées denses, constituent une série de cavités canoniques. Il est commode de les nommer par le nombre de périodes le long de chaque côté. Ainsi, un seul trou manquant correspondra à H1, sept trous manquants à H2, etc. (figure II -19). Les cavités de type Hn, de forme hexagonale, n'étant le nombre de rangées manquantes par côté de l'hexagone sont les plus étudiées [28].



**Figure II-19 :** Les différents types de cavités. [28]

#### II-6-2- Cavité carré :

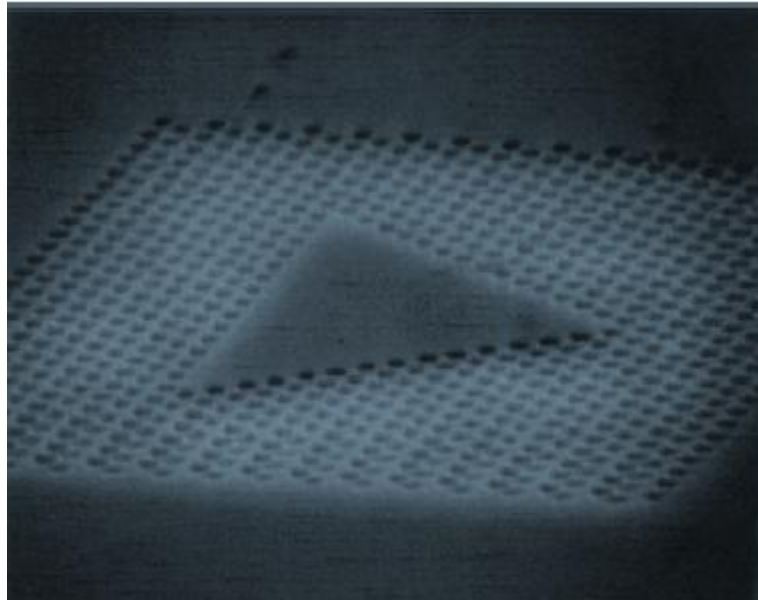
Dans un réseau bidimensionnel carré, les cavités sont de type Sn, de forme carrée, n'étant le nombre de lignes et de ranges manquantes du carré. Par exemple la cavité S1 est constituée en omettant une ligne et une rangé [28].



**Figure II-20 :** Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique carré avec un paramètre de maille 600nm [28] .

### II-6-3- Cavité triangulaire

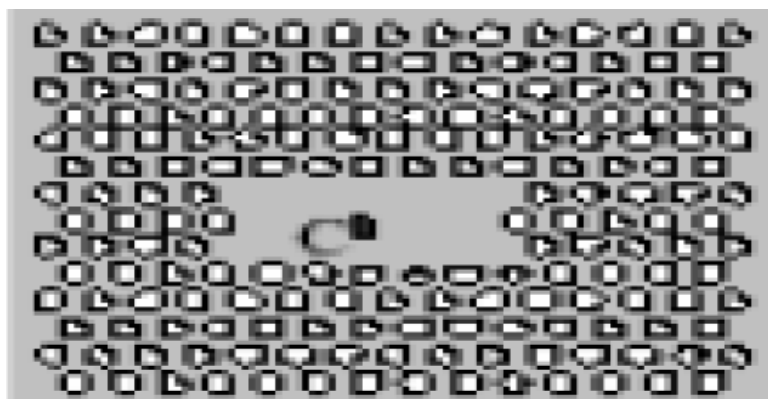
La Figure II-21 représente la cavité triangulaire, cette cavité est obtenue en omettant plusieurs trous dans un réseau triangulaire de trous d'air de section circulaire ( $r = 200 \text{ nm}$ ) plonge dans une matrice diélectrique ( $\epsilon=8.12$ ) [28].



**Figure II-21:** Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm[28].

### II-6-4- Cavité rectangulaire

Le réseau CP2D triangulaire est défini par les paramètres suivant : paramètre de maille  $a=560\text{nm}$ , La figure( II-22) représente une cavité rectangulaire correspondant à l'omission de 3 rangées finies de trous dans le CP [28].



**Figure II-22 :** Exemple de cavité rectangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 560nm [28].

**II-9-Conclusion**

Ce chapitre été consacré en totalité à l'étude de la notion de cristaux photoniques. En effet dans ce chapitre nous avons donnés les definitions de bases relatives aux structures à cristaux photoniques, telque la periodicité du changement de leurs constantes dielectiques, la forme du réseau et des éléments le constituant (forme des trous pour les réseaux connectés et des tiges pour les réseaux déconnectés) . En suite nous avons donnés une caractéristique très importante des structures à cristaux photoniques qui est leurs capacité à fournir une bande interdite photonique (GAP optique) qui exclue la propagation de la lumiere dans les longueurs d'onde sont situé entre ses limites.

Pour pouvoir beneficier de leurs avantages (c-à-d de leurs GAP photonique), ces structures doivent imperativement contenir des defauts introduit par romper la periodicité de leurs réseaux originals (création de cavités de differentes formes, des guides d'ondes, etc), cela été aussi traité dans ce chapitre.

A la fin du chapitre nous avons donnés differentes formes de cavités et de guides d'ondes qu'on peut réalisés sur les cristaux photoniques et qui peuvent être à la suite exploités pour la réalisation de differentes application comme nous le verrons dans les chapitres qui suivent.

## **CHAPITRE III**

### **Utilisation des cristaux photoniques dans la détection et la réalisation des capteurs**

### III-1 Introduction

Les cristaux photoniques sont de nos jours utilisés dans tous les domaines de la microélectronique que ce soit, celle destinée à l'usage quotidien comme les systèmes de détections (détection de gaz, détection de déplacements et de pressions), les systèmes de télécommunication (la fibre optique à cristaux photoniques, les filtre), ou même dans les systèmes à de conversion d'énergie (système à énergie renouvelable).

Le présent chapitre est consacré à l'étude de quelques applications importantes des systèmes à cristaux photoniques dans la vie quotidienne. Dans ce contexte, nous allons étudiés des capteurs biologiques, des capteurs mécaniques (mesurant la pression) ainsi que des capteurs chimiques.

### III- 2- Type de capteurs exploitant le concept des cristaux photoniques :

La cristaux photonies a envahie tous les domaines de contrôles et de surveillances quand trouve devant nous tous les jours. Dans cette partie nous donnerons des exemples de capteurs qu'on a recueillis de la vaste littérature du domaine.

#### III-2- Les biocapteurs à base de cristaux photoniques :

##### III-2-1- Bio capteurs à cristaux photoniques à quatre canaux utilisant les nano résonateurs à cavité :

###### a- Conception du biocapteur multicanal :

Selon la Fig. III-1, le biocapteur est construit en modifiant trois parties de la structure originale.

- Le premier: en supprimant une rangée de trous d'air pour créer le guide d'onde principal appelé le guide d'onde de bus. Ce guide d'onde sera à la suite utilisé pour appliquer la pulsation gaussienne et les modes résonnants d'action de toutes les nano-cavités.
- La seconde, quatre nano-cavités qui sont remplies d'indices de réfractions différentes  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  et  $n_4$  respectivement, sont utilisées pour piéger la longueur d'onde spéciale en fonction de la biomolécules injectée, comme le montre la Figure III- 1[29].

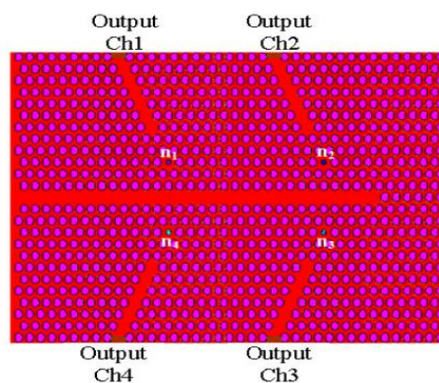
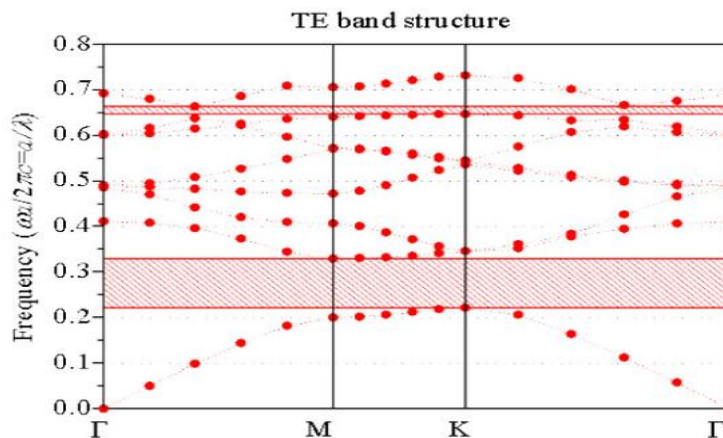


Figure III-1 : structure du capteur multi canal [29]

La troisième, quatre guides d'ondes appelés guides d'onde de chute sont formés afin de détecter les modes de résonance piégés dans les quarts nano-cavité. Le biocapteur est monté autour d'un réseau hexagonal de trous d'air avec la constante de réseau de  $a$  de 400 nm et le rayon de 140 nm avec un indice de réfraction des trous de 1 (indice de réfraction de l'air) dans un substrat de silicium d'indice de réfraction  $n$  de 3,45. Les tailles de nano-cavités sont optimisées pour atteindre de bon facteur qualité, de bonnes efficacités de transmission, et une sensibilité raisonnable. Cette structure a présenté une bande interdite photonique pour le TE situé entre  $0,22054 a/\lambda$ , et  $0,32550 a/\lambda$  (un gap optique situé entre  $1,22\mu\text{m}$  et  $1,81\mu\text{m}$ ), comme le montre la Figure III- 2[29].



**figure III-2** : Diagramme de bande de la structure pour le mode TE [29]

### b- Évaluation des caractéristiques de la biosensibilité :

L'optimisation de cette structure effectuée par [ ], l'a conduit à un rayon de cavité  $R_c = 84$  nm (les trous colorés en vert), car pour ce rayon des résultats optimale ont été atteints c-à-d un facteur de qualité élevé ( $Q$  de 1976,71, 1999,86, 3549,8, 4793,6 pour les canaux 1, 2, 3 et 4 respectivement), une bonne efficacité de transmission (efficacités de transmissions obtenues de 76,59%, 61,27%, 59,53%, 62,13% pour les canaux 1, 2, 3 et 4 respectivement) et une sensibilité raisonnable de sensibilité de 65,7 nm/URI (sensibilité calculée pour quarts canaux les canaux) qui pourrait rendre la détection de bio-produits chimiques facile et possible. La longueur d'onde de résonnante des nano-cavités lorsque l'on n'a pas rempli l'analyte dans les trous été de  $1,3724 \mu\text{m}$  et cette longueur d'onde correspond à l'état de repos du biocapteur [29].

### III-2-2- Biocapteur à base de cristal photonique pour la détection de la concentration du glucose dans l'urine :

#### a- Conception du biocapteur :

Le capteur de glucose à base de PC proposé est utilisé pour détecter la concentration de glucose, d'albumine, de bilirubine et d'urée dans l'urine et le sang. Le biocapteur est Conçu en utilisant les cristaux photonique 2D avec des tiges circulaires dans un réseau carré. Les PC contrôlent le flux de lumière à l'intérieur de la structure à l'aide de défauts (point / ligne) qui peuvent être utilisés pour les applications de la détection . La structure du bio capteur est conçue de  $21 \times 21$  tiges monté en réseau carré. La distance entre les deux tiges les plus proches est de 540 nm (la période du réseau  $a$ ), et le rayon de chaque tige est de 100 nm. C'est tiges sont à base de silicium d'indice de réfraction de 3,46 (voire figure III-3) [30].

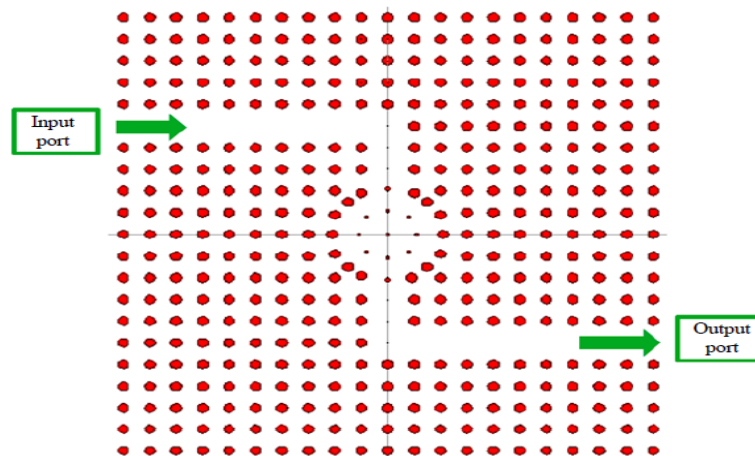
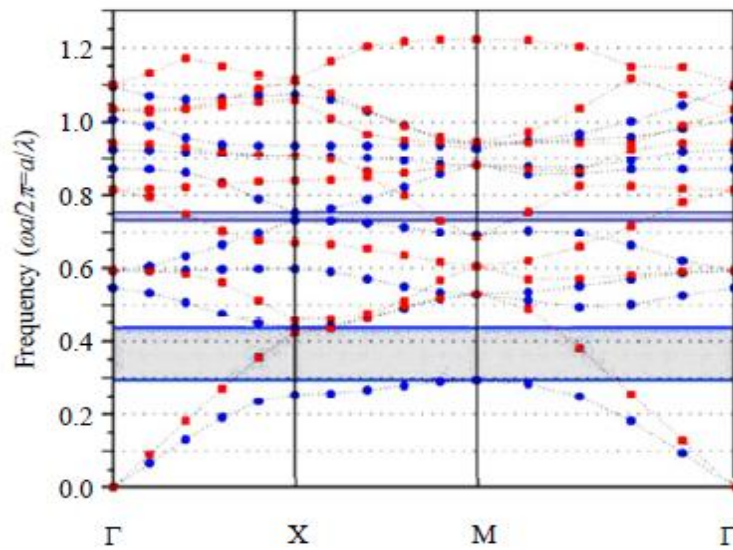


Figure III-3 : structure du bio capteur de glucose [30]

Le capteur proposé se compose de deux guides d'ondes "L" inversés et d'un résonateur à anneau. Les rayons de la tige intérieure et de la tige externe sont respectivement de 50 nm et 100 nm. Cependant, le rayon de la tige qui est positionné en haut et en bas du résonateur à anneau est de 86 nm afin d'obtenir une transmission de sortie plus élevée.

La figure III-4, donne le diagramme de bande de la structure sans défauts, ce qui donne généralement la gamme de la bande interdite photonique (PBG) transversale électrique / transversale et magnétique (TE / TM) et les modes de propagation à l'intérieur de la structure périodique. La fréquence normalisée du premier PBG TM réduit est observée de  $0,435 a / \lambda$  à  $0,295 a / \lambda$  et donc et une gamme de longueur d'onde correspondante variant de 1241 nm à 1830 nm et pour le deuxième PBG la fréquence normalisée est de  $0,754 a / \lambda$  à  $0,732 a / \lambda$  d'où un gap de longueurs d'ondes correspondantes s'étalant de 716 nm à 737 nm.

De ce fait, c'est le premier PBG TM qui sera utilisée pour la conception du biocapteur car il couvre les deuxièmes et troisièmes fenêtres de la région optique [30].



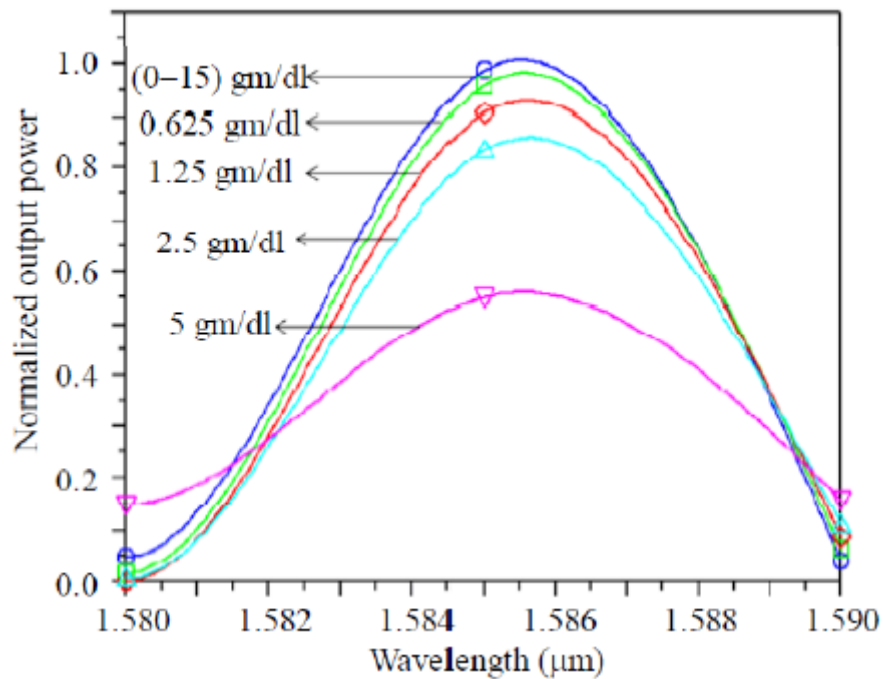
**Figure III-4** : Les gaps optiques de la structure proposée [30]

#### b- Résultats :

L'indice de réfraction varie avec la variation de la concentration de glucose présente dans l'urine. Cette variation induit le décalage des longueurs d'ondes des impulsions de sorties au niveau du moniteur. La réponse du capteur en fonction de la concentration de glucose est présentée dans le tableau III-1.

Concentration de glucose dans l'urine	indice de réfraction	l'longueur d'onde (nm)	Transmission Normalisée	facteur de qualité
Normal (0mg/dl-15mg/dl)	1.335±0.001	1585	1	264
0.625mg/dl	1.336±0.001	1585	0.96	269
1.25mg/dl	1.337±0.001	1585	0.92	260
2.5mg/dl	1.338±0.001	1585	0.85	252
5mg/dl	1.341±0.001	1585	0.55	217

**Tableau III-1** : Grandeurs de sortie du capteur en fonction de la Concentration de glucose dans l'urine [30]



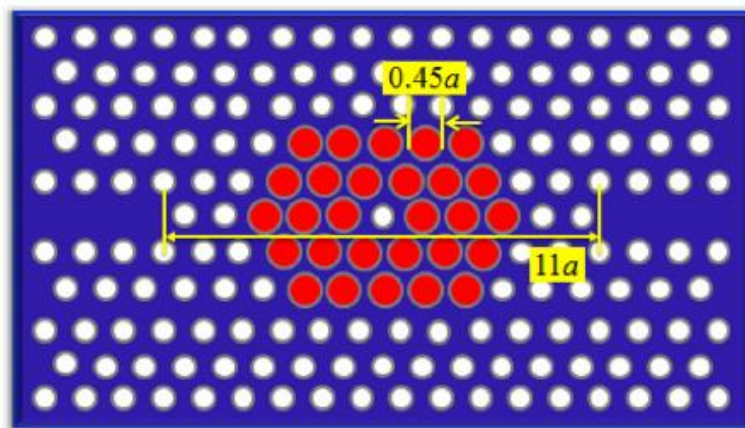
**Figure III-5** : courbes de réponse du capteur en fonction de la concentration de glucose dans l'urine [30]

### III-3- Les capteurs de gaz à base de cristaux photoniques :

Comme exemple de capteur de gaz nous avons pris la structure proposée par [3,32], cette structure est celle que nous allons tentés d'améliorer dans le chapitre 4. Le capteur objet d'étude est destiné à mesurer la concentration de méthane ( $\text{CH}_4$ ) dans l'air et il trouve son intérêt dans la prévention en cas de présence d'un excès de concentration de ce gaz toxique [3].

#### a- Structure du capteur :

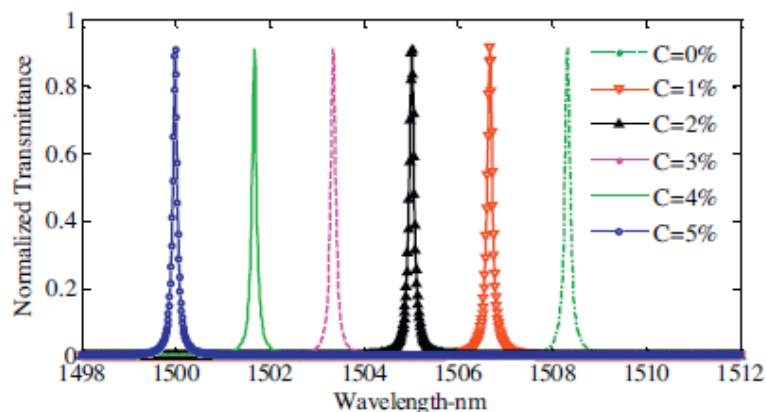
Le capteur proposé par [3,32], est représenté en figure III-6. Il consiste en une matrice de trous d'air dans un substrat en silicium d'indice de réfraction  $n = 3.48$ . La période  $a$  du réseau hexagonal considérés par l'auteur est de 351 nm et le rayon  $r$  des trous est de  $0.3 \times a$ . L'optimisation de la structure par l'auteur l'a conduit à un rayon  $R_c$  de trous de la cavité de  $0.45a$  avec un nombre de 28 trous et 11 trous dans l'axe central de part et d'autre du trou situé au coordonnées (0,0). Le principe de détection de ce capteur est basé sur l'emploi d'une molécule dite 'Cryptophane E' très sensible à la présence du  $\text{CH}_4$ . Cette molécule est infiltrée dans les trous de la cavité optimisée [3,32].



**Figure III-6** : Structure du capteur de gaz[3,32]

### b- Résultats :

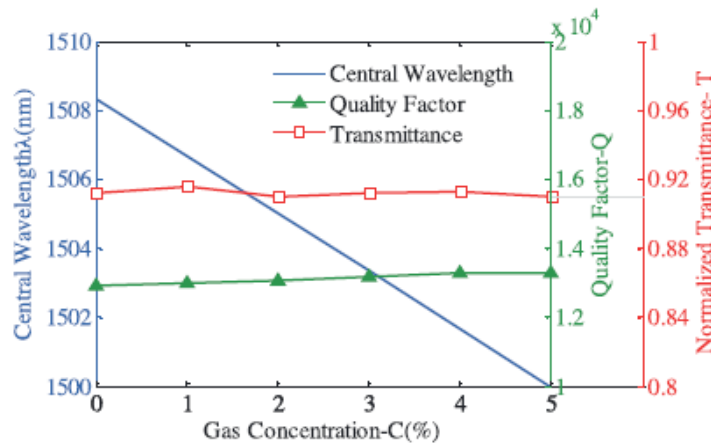
Les courbes de réponse du capteur en fonction de la concentration du  $\text{CH}_4$  est donnée en figure III-7.



**Figure III-7** : Courbes de réponse du capteur en fonction de la concentration du  $\text{CH}_4$  dans l'air [3,32]

De cette figure on remarque bien que le capteur réagit à la variation de concentration de  $\text{CH}_4$  et cette réaction se traduit par un décalage des impulsions de sortie par rapport celle correspondante à son état de repos [3,32].

La figure III-8, donne les principales caractéristiques du capteur. De cette figure, on voit clairement que la réponse du capteur est linéaire (les longueurs d'ondes de résonances varient linéairement avec la concentration du  $\text{CH}_4$ ), il présente aussi une transmission normalisée moyenne de 0.91%, un facteur de qualité presque constant de 12923, une sensibilité RI de 363.7 nm/URI et finalement une limite de détection du gaz de  $3.2 \cdot 10^{-4}$  RIU [3,32].



**Figure III-8** : Courbes de réponse du capteur en fonction de la concentration du  $\text{CH}_4$  dans l'air [3,32]

#### III-4- Les capteurs de pression à base de cristaux photoniques :

Comme un exemple de capteur de pression à base de cristaux photonique nous allons citer quelques désign. Premièrement le désign de **Mohankumar et Mrs. Indira Bahaddur**.

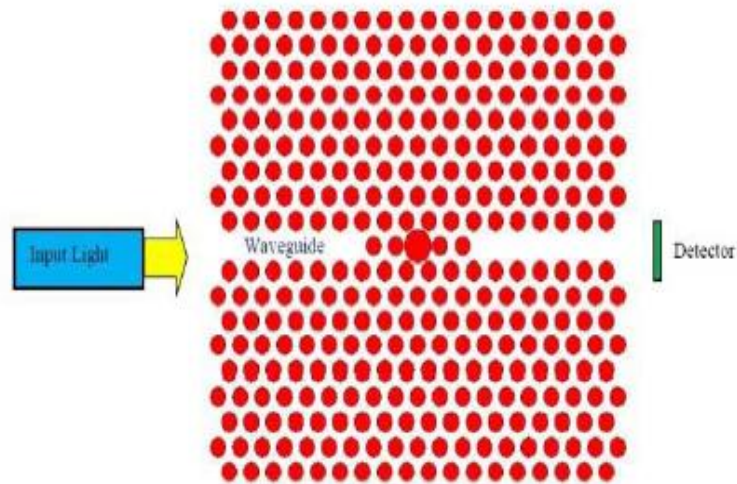
Dans cet article, les auteurs proposent un capteur de pression nanométrique avec des résonateurs à nano cavités à cristaux photoniques bidimensionnels. Lorsque la pression est appliquée, la contrainte est répartie sur la structure cristalline et l'indice de réfraction est modifié [31].

##### III-4-1- Première application :

###### a- Structure du capteur :

La structure proposée par les auteurs est une structure déconnectée formée de tige silicium. Des défauts linéaires sont créés au centre de la structure, par la suppression de tiges comme montré en figure III-9. Pour créer une cavité résonante, ils ont placés une seule tige au milieu du réseau avec un plus grand rayon et aussi à ces alentours des autres tiges de rayons différents. L'excitation lumineuse est appliquée dans une extrémité du premier guide d'onde et les signaux de sorties (les longueurs d'onde de sortie) sont obtenues au niveau du détecteur.

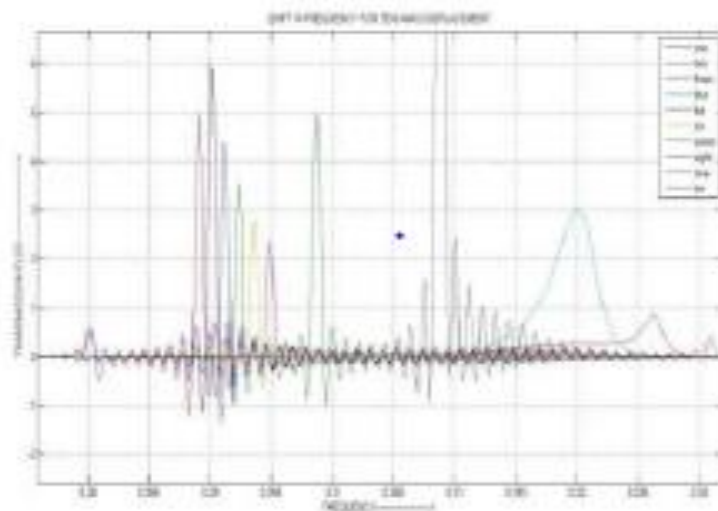
Lorsque la pression est nulle, le déplacement de la longueur d'onde de résonance de la cavité est 1 [31].



**Figure III-9:** Structure du premier capteur de pression [31].

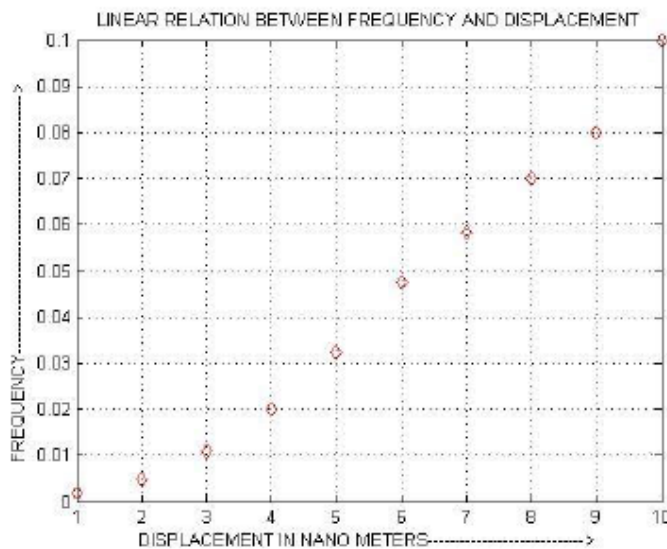
### b- Résultats

Quand la pression est appliquée sur la cavité résonante, la propagation de la lumière par et l'indice de réfraction changent [31]. La figure ci-dessous montre déplacement du spectre de sortie (de 1nm à 10nm) en fonction de la pression appliquée de. En analysant la courbe de la figure III-10, on constat que la fréquence de coupure correspondante à chaque pression se décale d'une grandeur  $\Delta\lambda$  par rapport a l'état de repos.



**Figure III-10 :** Déplacement des spectres de sortie (pour 1nm à 10nm) en fonction de la pression appliquée [31]

La figure III-11 montre la dépendance linéaire de la fréquence de résonance en fonction de la pression appliquée.



**Figure III-11** : Variation de la fréquence des impulsions de sortie de sortie en fonction de la pression [31]

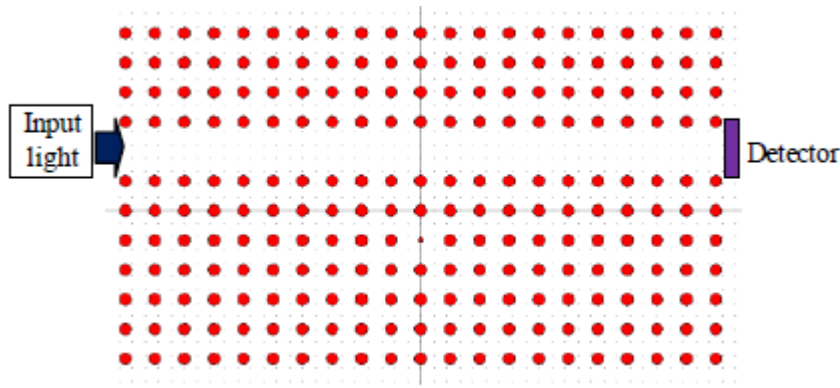
### III-4-2- Deuxième application :

#### a- Structure du capteur :

Deuxièmement le désigne de Saeed OLYAEE and Ali Asghar DEGHANI (voire figure III-7). Le guide d'onde peut être réalisé par la suppression d'une rangée de trous d'air ou en éliminant une rangée de tiges diélectriques. L'onde se propage dans le Silicium pour le premier cas et se propage dans l'air pour le second Cas, et par conséquent, la perte peut être ignorée. Sur un substrat en  $\text{SiO}_2$  d'indice de réfraction de 1.45 on fait croître des tiges de silicium Si d'indice de réfraction  $n$  de 3,5 [32].

Le résonateur conçue par la nano-cavité à cristaux photonique possède un facteur de qualité ( $Q$ ) élevé et peut être utilisé dans de nombreux applications. Ce facteur de qualité  $Q$  de la peut être amélioré en modifiant le nombre de périodes de cristaux entre la nano-cavité et le guide d'onde.

La structure du capteur proposée ici se compose d'un réseau carré de tiges de Si (avec  $n_{\text{Si}} = 3,5$ ) entouré par l'air avec ( $n_{\text{Air}} = 1$ ). Dans ce réseau de tige, la constante de réseau «  $a$  » et le rayon  $r$  des tiges sont respectivement considérées de 450 nm et  $0,2 \times a$ . Cette structure possède un GAP photonique de longueurs d'onde situé entre 1083 nm et 1610 nm. La figure III-12 donne la structure finale du capteur.



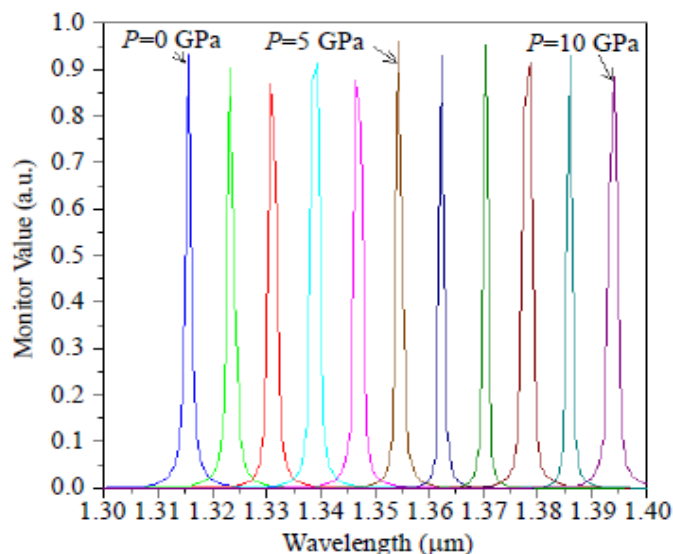
**Figure III-12** : La structure finale du capteur de pression proposée [32]

Ce capteur est conçu pour travailler dans la gamme de l'infrarouge c-à-d pour des longueurs d'ondes situées entre 1300 nm à 1400 nm. L'optimisation de la structure a conduit les auteurs de ce travail à un rayon  $R_c$  de la nano-cavité de  $0,077 \times a$ . Finalement, la présence des deux rangs de tiges entre le guide d'onde et la nano-cavité a produit un bon facteur de qualité [32].

### b- Résultat

En l'absence de pression la nano cavité montre une longueur d'onde résonnante située à  $\lambda = 1316$  nm et facteur de qualité correspondant de  $Q = 1470$ . Pour étudier l'effet de la pression sur la structure, nous avons effectué une étude approfondie. Les simulations ont été réalisées pour différentes valeurs des pressions de 0 à 10 GPa par incrément de 1 GPa à chaque étape [32].

Les courbes de la Figure III-13, donnent les impulsions de sorties correspondantes à chaque pression. De ces courbes on voit bien que la pression appliquée influe sur l'abscisse de ces impulsions et ces dernières se trouvent décalée d'un  $\Delta\lambda$  de valeur dépendante de la pression hydrostatique appliquée [32].



**Figure III-13** : réponse de capteur pour différentes valeurs de pression [32]

### **III-5- Conclusion**

L'utilisation des cristaux photoniques comme capteur est le sujet d'actualité des recherches en nano-optoélectronique et photonique. Dans ce chapitre nous avons données différents exemples d'applications des cristaux photoniques dans le domaine des capteurs, entres autres des capteurs chimiques (capteur de gaz...), biocapteur et des capteur physique (capteur de pression).

Pour toutes les applications que nous avons choisies de la très vaste littérature du domaine, nous avons donnés, leurs structures, leurs principes de détection et/ou de mesure et enfin leurs caractéristiques (sensibilité, transmission, facteur de qualité...).

## **CHAPITRE IV**

### **Conception d'un capteur de pression par cristaux photoniques**

## IV-1- Introduction

Après le tour d'horizon que nous avons fait au chapitre précédent sur l'emploi des structures à cristaux photonique dans le domaine des capteurs, dans le présent chapitre nous allons focaliser notre étude sur leurs utilisations pour la réalisation de capteur de pression. Les simulations effectuées dans ce chapitre ont été réalisées grâce au logiciel professionnel RSoft de Rsoft photonique, ce dernier est un logiciel spécialisé dans le design et la caractérisation des structures à cristaux photonique.

## IV-2- Structure de base du capteur :

### IV-2-1- Structure Originale :

La structure que nous allons proposer par la suite est inspirée de celle proposée par [3] ; cette dernière étant représentée en figure IV-1. Dans sa structure, [3] a considérée une matrice de trous d'air creusés dans une couche active de silicium de période  $a$  de  $0.351 \mu\text{m}$  et de rayon des trous est de  $0.3a$ . La cavité originale est formée de 28 trous de rayon  $R_c = 0.45a$  située aux alentours du trou centrale (le nombre 28 et le rayon  $R_c$ , étant tous les deux obtenus par [3] suite à un processus d'optimisation qu'il a effectué). On trouve aussi deux portions de guide d'onde situés à gauche et à droite des trous limitant la cavité. Dans sa structure [3] a trouvé une sensibilité RI maximale de  $363.7 \text{ nm/URI}$ , nous, en se basant sur son travail nous avons proposés une structure améliorée.

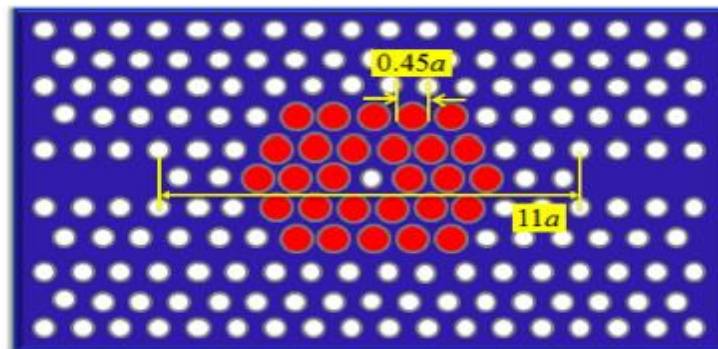
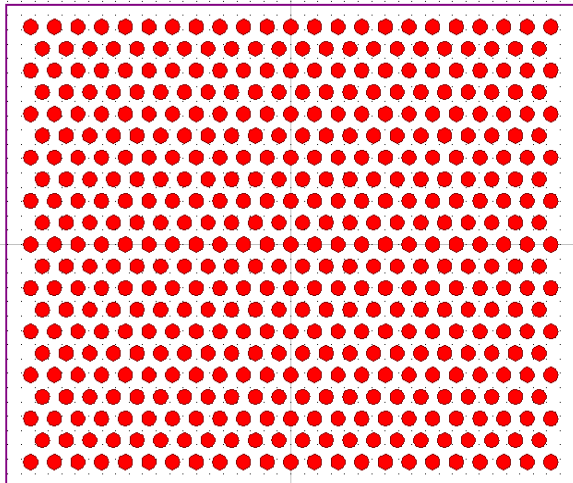


Figure IV-1: Structure originale de Zhan [3]

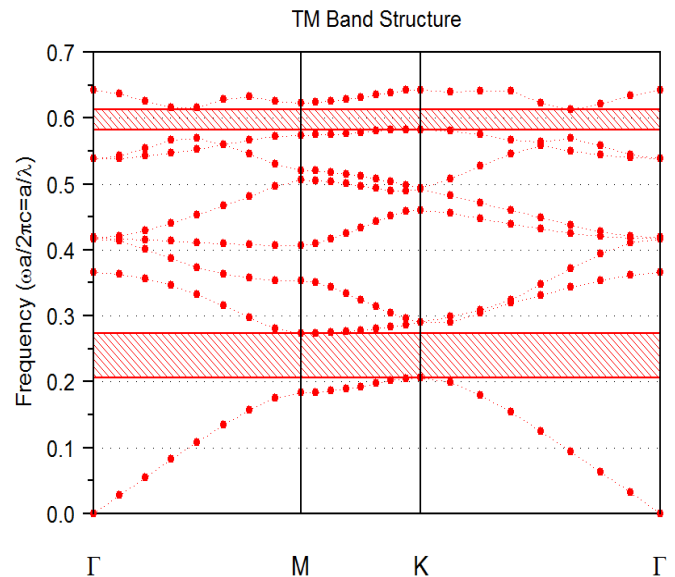
### IV-2-2- Structure proposé :

Dans la structure que nous avons proposés, nous avons considérés une matrice initiale  $21 \times 23$  de trous d'air creusées dans une couche active en silicium (ayant un indice de réfraction de 3.48) avec une période  $a$  de  $0.351 \mu\text{m}$  et un rayon de trous  $r = 0.3a$  semblables à ceux de la structure originale (voire figure IV-2-a). Le diagramme de bande interdite de cette structure est représenté en figure IV-2-b, de cette figure on constate l'existence de deux bande interdite

optique seulement pour le mode de propagation TM (Transverse magnétique) et entre ces deux bandes, c'est la plus grande qui sera exploitée. De la figure IV-2-b, on peut aisément voir que le plus grand gap optique est situé entre  $0.20647 a/\lambda$  et  $0.27374 a/\lambda$ , ce qui fournit une bande interdite optique pour les longueurs d'ondes situées entre  $1.2818\mu\text{m}$  et  $1.70016\mu\text{m}$ . Le calcul des bandes interdites est réalisé par le module **BandSolve** de l'environnement RSoft.

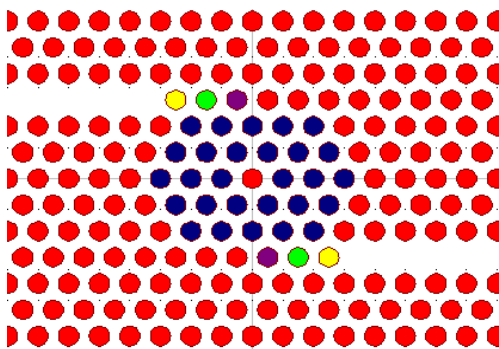


**Figure IV-2-a** : la matrice de trous d'air dans le substrat du silicium proposée

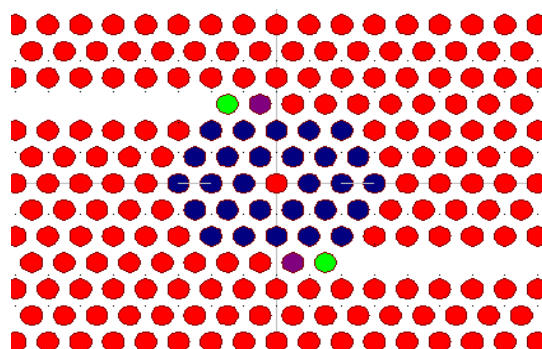


**Figure IV-2-b** : Diagramme de dispersion des bandes interdites du mode TM

La structure que nous avons proposée est représentée en figure IV-3. En effet, nous avons déplacé les guides d'onde dans les positions L3, gardés le nombre 28 des trous de la cavité, le trou central étant resté intacte (sans changement).



**Figure IV-3-a** : La première structure considérée



**Figure IV-3-b** : La seconde structure considérée

### **IV-3- Optimisation des paramètres de la structure :**

#### **IV-3-1- Optimisation de la structure en fonction de $R_c$ :**

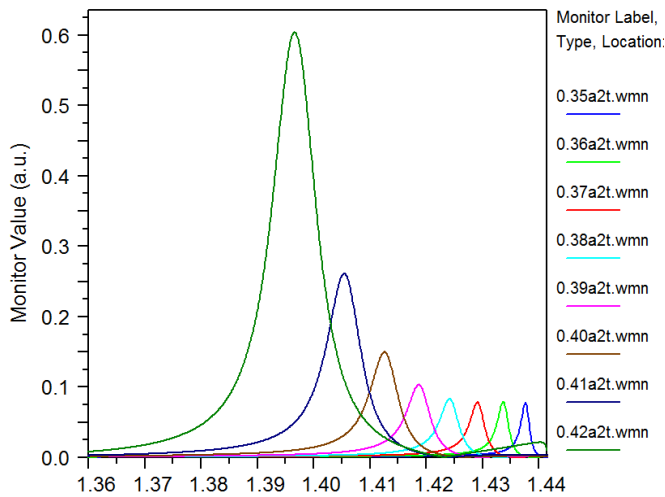
Le changement que nous avons fait sur la structure originale exige un nouveau processus d'optimisation. En effet, faire varier l'emplacement de l'excitation et le moniteur influe sans aucun doute sur les positions des longueurs d'onde de résonances et sur la transmission du signal reçu à cause du faible couplage probable entre le guide d'onde d'entrée et celui de la sortie. Par conséquent nous allons dans ce qui suit ré-optimiser le rayon  $R_c$  des trous de la cavité de façon à avoir les mêmes performances (sensibilité, facteur de qualité..etc) que ceux obtenus par [3] voire même mieux.

Dans les deux guides d'onde considérées, nous avons en premier lieu laissés trois trous de part et d'autre de la ligne verticale centrale (les trous jaune-vert et violets), mais cette forme ne nous a donné aucun résultat au niveau du récepteur (figure IV-3-a). Alors nous avons enlevé un trou pour ne garder que deux trous (voir figure IV-3-b) et cette dernière structure a fourni de bons résultats comme nous verrons à la suite. En suite nous avons fait varier le rayon des trous de la cavité  $R_c$  entre  $0.35a$  et  $0.48a$  avec un pas de  $0.01a$  pour deux différentes valeurs de l'indice de réfraction  $n = 3.48$  et  $n = 3.51985$ , et nous avons tracés, la sensibilité, le facteur de qualité et la transmission ; dans le but de trouver un optimum de  $R_c$  garantissant un bon compromis entre ces différents paramètres. La simulation étant réalisée par le module **Full Wave** de l'environnement RSoft et comme excitation nous avons choisi une longueur d'onde d'entrée de  $1.55 \mu\text{m}$  du fait qu'elle est très utilisée dans ce domaine. Les résultats que nous avons obtenus sont représentés dans la partie qui suit.

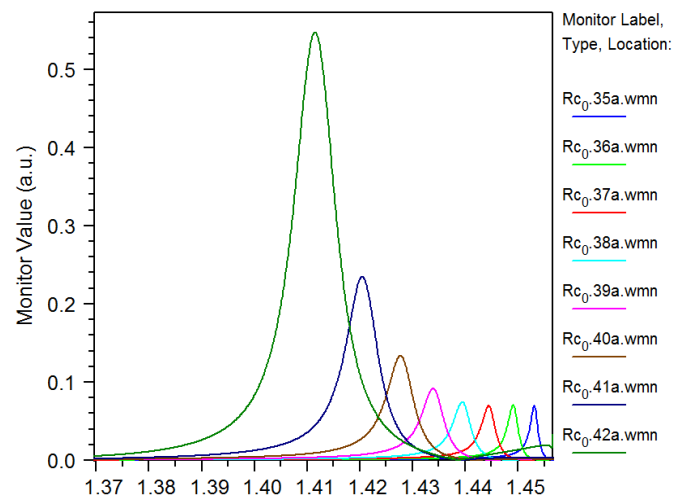
#### **IV-3-2- Résultats de l'optimisation :**

##### **a- Réponse de la structure en fonction de $R_c$ :**

Sur les figures IV-4-a,b sont représentées les transmissions des signaux obtenus au niveau du moniteur en fonction de  $R_c$  pour  $n = 3.48$  et  $n = 3.51985$  respectivement. De ces figures on voit clairement que les amplitudes des signaux croissent avec l'accroissement  $R_c$  (et vice versa) en démarrant de  $0.07733$  pour  $R_c = 0.35a$  à  $0.6031$  pour  $R_c = 0.42a$  cela pour  $n = 3.48$  et de  $0,06937$  pour  $R_c = 0.35a$  à  $0,54297$  pour  $R_c = 0.42a$  et cela pour  $n = 3.51985$ .



**Figure IV-4-a :** Réponse en fonction de Rc pour n= 3.48



**Figure IV-4-b :** Réponse en fonction de Rc pour n= 3.51985

En ce qui concerne les longueurs d’ondes de résonance c’est tout à fait le contraire, en effet à partir des ces deux mêmes figures on constate que ces longueurs d’ondes de résonances (les abscisses les peaks des signaux sur l’axe des longueurs d’ondes) décroissent avec l’augmentation de Rc pour les deux indices de réfraction considérés (voir figure IV-4-a,b).

Il est à noter ici qu’au-delà de 0.42a, la réponse de la structure est nulle et complètement inutilisable pour  $n_1$  et aussi pour  $n_2$ .

Les résultats numériques que nous avons obtenus sont regroupés dans les tableaux IV-1-a et IV-1-b, le premier tableau étant calculer pour  $n = 3.48$  et le second pour  $n = 3.51985$ .

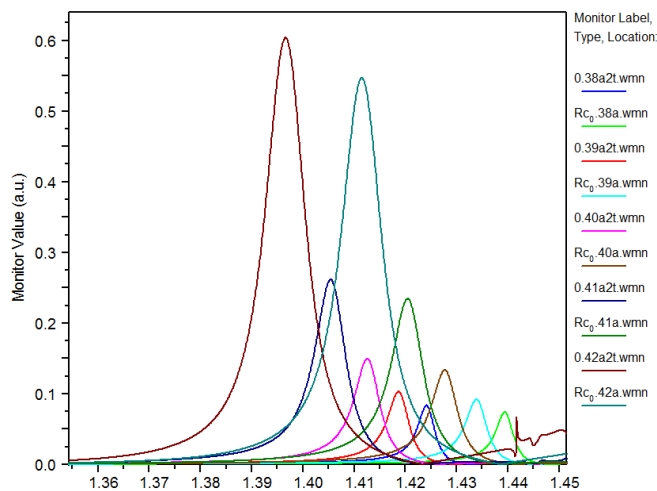
Rc	0.35a	0.36a	0.37a	0.38a	0.39a	0.40a	0.41a	0.42a
T	0.07733	0.07955	0.077907	0.083045	0.10244	0.14858	0.2609	0.6031
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	1.4376	1.4337	1.4291	1.4242	1.4186	1.4126	1.4054	1.3966
Q	804.24	582.24	433.03	352.63	273.85	226.01	187.51	158.20

**Tableau IV-1-a :** Caractéristiques principales de la structure en fonction de Rc pour  $n = 3.48$

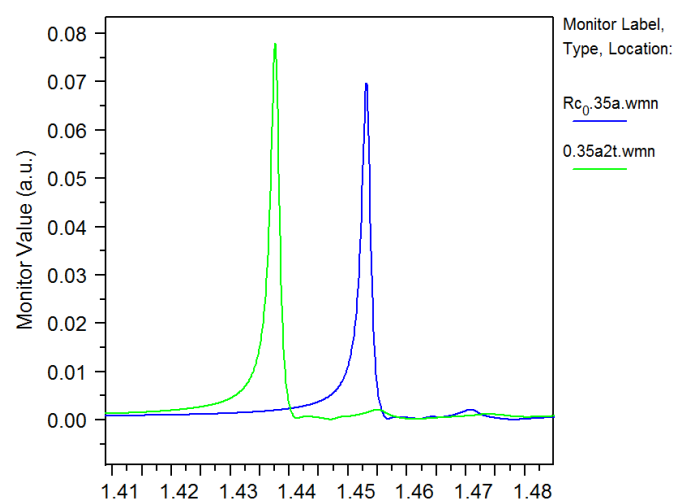
Rc	0.35a	0.36a	0.37a	0.38a	0.39a	0.40a	0.41a	0.42a
T	0.06937	0.070566	0.069103	0.074154	0.090773	0.1327	0.23304	0.54297
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	1.4531	1.4491	1.4445	1.4395	1.4339	1.4278	1.4205	1.4115
Q	820.90	589.82	441.21	343.57	275.17	229.78	192.50	289.59

**Tableau IV-1-b :** Caractéristiques principales de la structure en fonction de Rc pour  $n = 3.51985$

La figure IV-4-c présente la combinaison des deux figures précédentes. Nous avons tracé cette figure pour regrouper d'une part les résultats précédents et aussi pour montrer un autre résultat très important qui est la différence entre les longueurs d'ondes de résonance pour une même valeur de Rc mais pour les deux indices de réfraction considérés. De cette figure on peut remarquer que le décalage des longueurs d'ondes de résonances correspondant à  $n_1$  et  $n_2$  pour chaque valeur de Rc est assez important ce qui donnera certainement naissance à de fortes sensibilités comme nous montrerons plus loin. La figure IV-4-d, représente un cas isolé de la figure IV-4-c correspondant à  $Rc = 0.35a$ .



**Figure IV-4-c :** Réponse de la structure en fonction de Rc pour les indices de réfraction  $n_1$  et  $n_2$  considérés



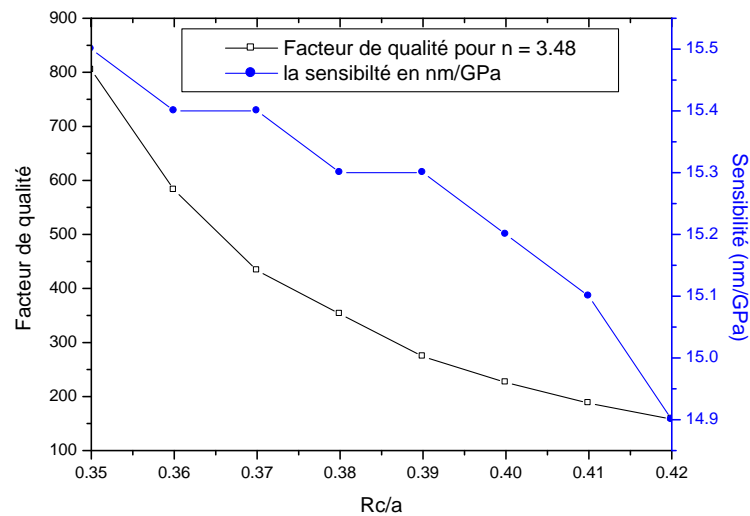
**Figure IV-4-d :** Réponse de la structure pour  $Rc = 0.35a$  et pour les indices de réfraction  $n_1$  et  $n_2$  considérés

### b- Optimisation de la valeur de $R_c$ :

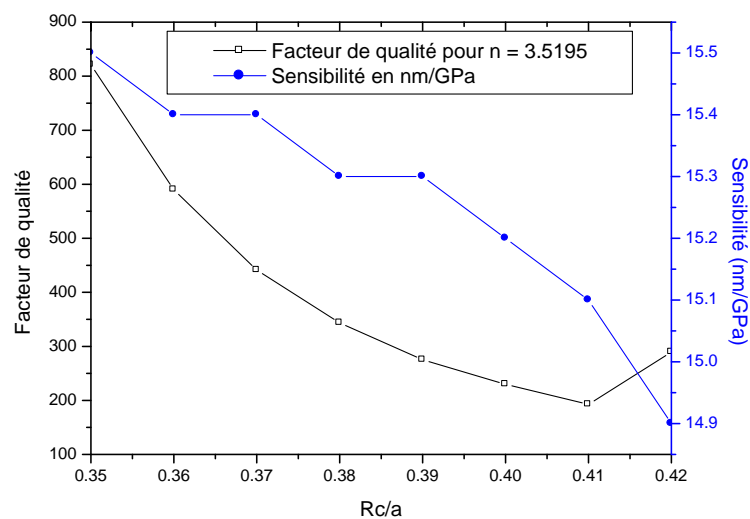
Dans cette étape nous allons tenté de chercher une valeur de  $R_c$  réalisant un bon compromis entre les caractéristiques importantes des capteurs qui sont, la sensibilité, le facteur de qualité et la transmission.

- **Tracé du facteur de qualité et de la sensibilité**

Les figures IV-5-a et b donnent les résultats que nous avons obtenus.



**Figure IV-5-a** : Tracé de la sensibilité en pression et du facteur de qualité en fonction de  $R_c$  pour  $n = 3.48$

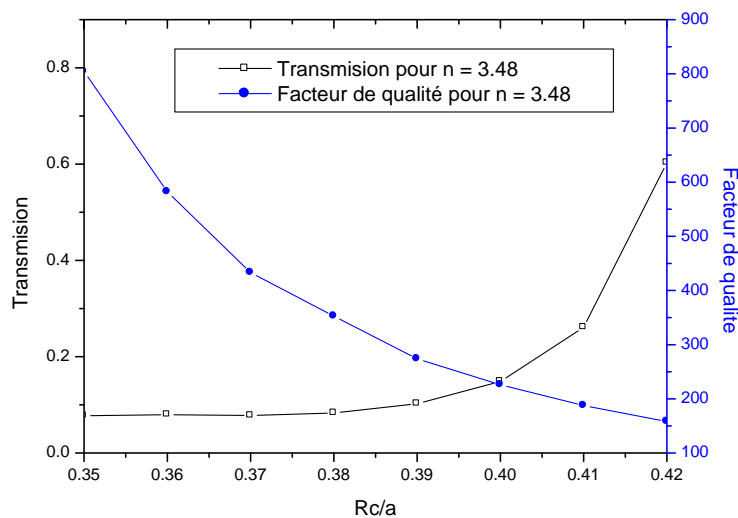


**Figure IV-5-b**: Tracé de la sensibilité en pression et du facteur de qualité en fonction de  $R_c$  pour  $n = 3.51985$

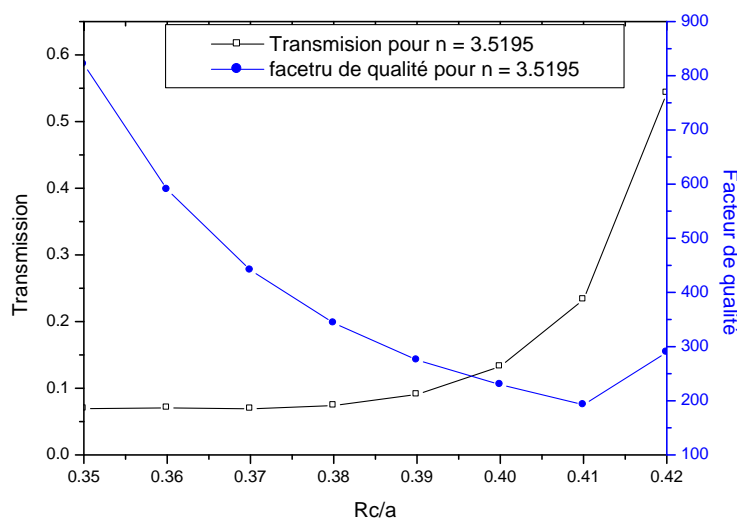
De ces deux figures on constate que pour  $n_1$  et  $n_2$  la sensibilité et le facteur de qualité décroissent tous les deux d'une valeur maximale vers un minimum. Il est à noter ici que la courbes de sensibilité dans les deux figures IV-5-a,b est la même du faite qu'elle est calculée à partir des deux valeurs de  $n_1$  et  $n_2$  au même temps ce qui n'est pas le cas du facteur de qualité.

- **Tracé de la transmission et de la sensibilité**

Pour ce qui est de la transmission, elle aussi est un paramètre très important (car elle caractérise le rendement du circuit) qui influe considérablement aussi sur le choix de l'optimum de  $R_c$ , cette dernière est tracé sur les figures IV-6 a et b (pour  $n_1$  et  $n_2$  respectivement) avec le facteur de qualité  $Q$ .



**Figure IV-6-a :** Tracé de la sensibilité en pression et de la Transmission en fonction de  $R_c$  pour  $n = 3.48$



**Figure IV-6-b :** Tracé de la sensibilité en pression et de la Transmission en fonction de  $R_c$  pour  $n = 3.51985$

De ces deux figures on peut clairement voir que les transmissions pour les deux cas croissent à partir d'un minimum correspondant à  $R_c = 0.35a$  vers un maximum qui correspond à  $R_c = 0.42a$ . Aussi on remarque que la transmission  $T$  évolue d'une façon inverse en la comparant par rapport à la sensibilité et au facteur de qualité.

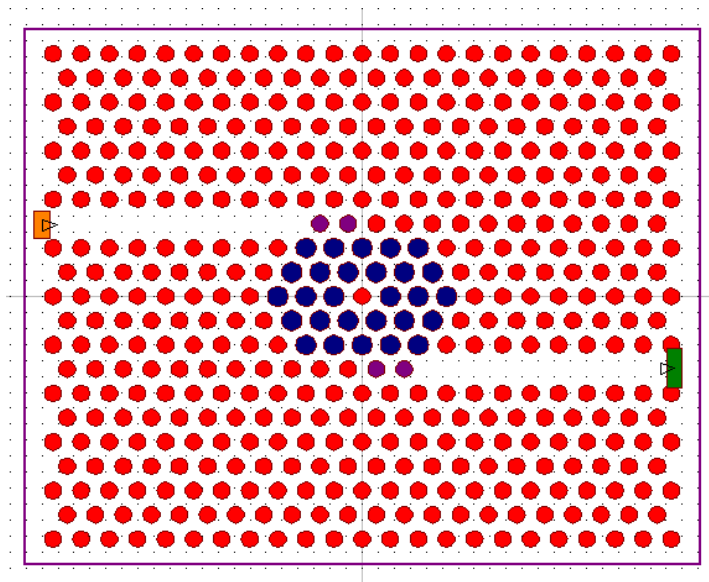
- **Structure finale du capteur de pression :**

En comparant les résultats obtenus plus haut, on peut aisément constater que  $R_c = 0.36a$  est la valeur optimale cherchée puisqu'elle correspond à une sensibilité élevée de 15.4, un bon facteur de qualité de 582.24 pour  $n_1$ , 589.82 pour  $n_2$  et une transmission acceptable de 0.07955 pour  $n_1$  et de 0.070566 pour  $n_2$ .

Cette valeur sera utilisée dans la seconde partie du travail, pour déterminer la réponse proprement dite du capteur de pression. Dans la suite du travail nous allons considérer la structure finale représentée en figure IV-7.

Cette structure est caractérisée par les paramètres suivant :

- Une matrice de  $21 \times 23$  trous d'air dans le substrat de silicium.
- Une période de  $0.351 \mu\text{m}$
- Un rayon  $r$  de  $0.3a$
- Un rayon de cavité de  $0.36a$ .



**Figure IV-7 :** Structure finale du capteur de pression adoptée

#### IV-4- Etude de la réponse de la structure optimisée pour différentes pression :

Une fois la structures est optimisée l'étape prochaine dans notre étude est son emploi dans la mesure de pression hydrostatique.

Une pression hydrostatique est caractérisée par son caractère à influencer sur la surface sensible sur laquelle elle appliquée de la même façon dans toutes les directions. Le capteur que nous avons conçu est destiné à mesuré les pressions d'ordre du giga pascal (GPa).

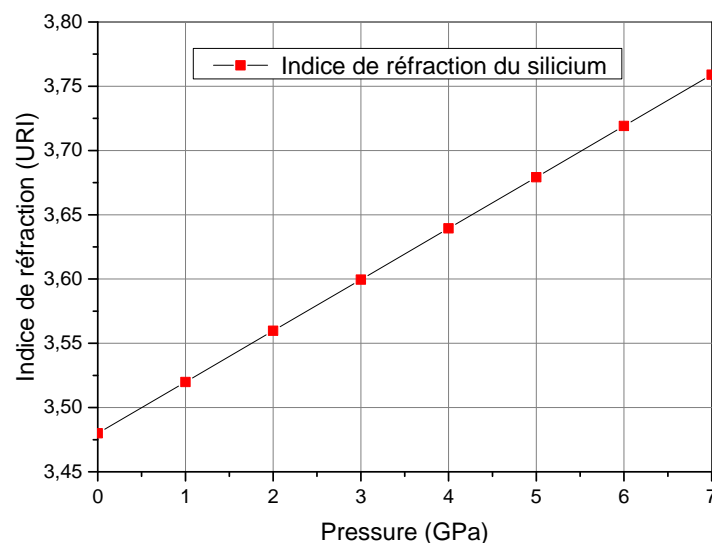
Dans notre travail nous avons considéré un intervalle de pression de 0 à 7 Gpa. Les limites de cet intervalle sont imposées par le model fournissant les indices de réfracions du silicium.

On sait que selon [ 3 ,33], l'indice de réfraction du silicium varie linéairement par pas de 0.0385 pour chaque 1GPa. Le **tableau IV-2**, donne les valeurs de l'indice de réfraction n du silicium en fonction de la pression P (en GPa)

P(GPa)	0	1	2	3	4	5	6	7
n (UIR)	2,8	2,8398	2,8797	2,9195	2,9594	2,9993	3,0391	3,0789

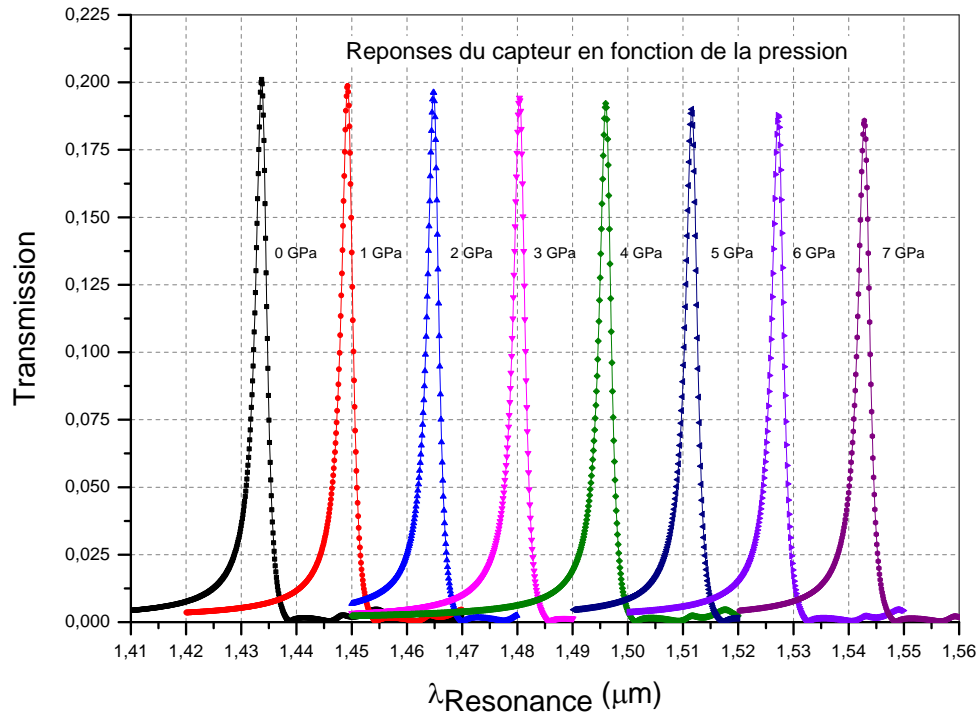
**Tableau IV-2 :** Indice de réfraction du silicium en fonction de la pression.

C'est même valeur sont représentés en figure IV-8



**Figure IV-8 :** Indice de réfraction du silicium en fonction de la pression.

Les réponses du capteur pour les différentes pressions sont données en figure IV-9



**Figure IV-9 :** Réponse finale du capteur pour des pressions situées entre 0 GPa et 7 GPa

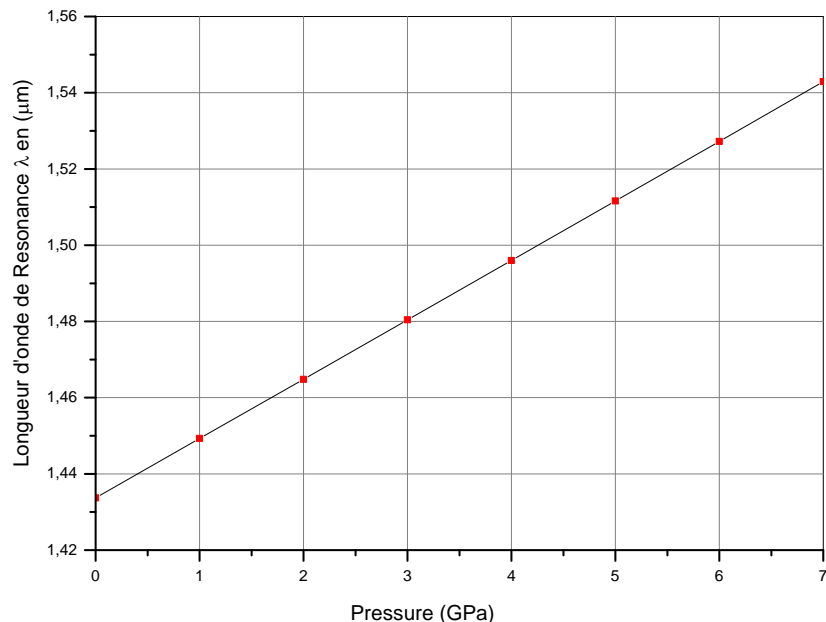
et le tableau IV-3 résume ces résultats.

	0	1	2	3	4	5	6	7
<b>Indice (UIR)</b>	3,48	3,51985	3,5597	3,59955	3,6394	3,67925	3,7191	3,75895
<b>λ<sub>résonance</sub>(μm)</b>	1,4337	1,4493	1,4648	1,4804	1,496	1,5116	1,5272	1,5429
<b>Transmission</b>	0,20107	0,19874	0,19627	0,19428	0,19216	0,18999	0,18779	0,18581
<b>Facteur de qualité Q</b>	600,16	600,97	602,25	602,92	673,6	604,58	605,03	605,54

**Tableau IV-3 :** Grandeurs caractérisant la réponse du capteur en fonction de la pression

#### IV-4-1- Tracé de la longueur d'onde de résonance en fonction de la pression :

A partir du tableau IV-3 on trace la variation des longueurs d'onde de résonance en fonction de la pression. La figure IV-10 présente cette variation.



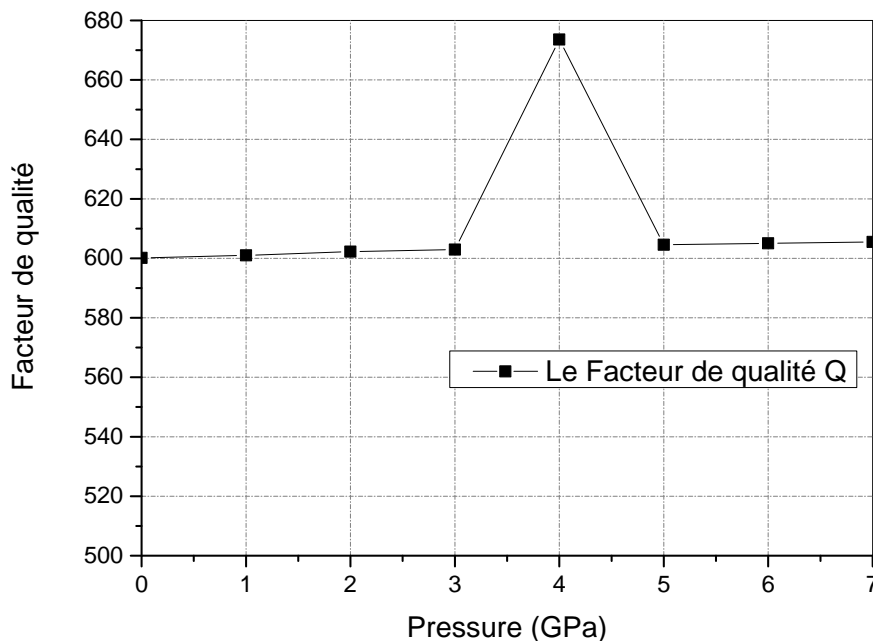
**Figure IV-10 :** Longueurs d'onde de résonances correspondantes aux pressions situées entre 0 GPa et 7 GPa

Cette figure montre que des longueurs d'ondes de résonance du capteur varient linéairement avec la pression hydrostatique appliquée. Cette forme de variation offre un grand atout en ce qui concerne la prédiction du comportement du capteur (par le calcul des longueurs d'ondes de résonance) pour des pressions autres que ceux du tableau IV-3.

#### IV-4-2- Tracé des facteurs de qualités des réponses du capteur :

Le facteur de qualité est un paramètre très important dans la conception et le design des capteurs, car il représente leurs caractères à minimiser le chevauchement des peaks de leurs réponses en fonction de la pression. En effet, un faible facteur de qualité implique une forme étalé des impulsions décrivant les réponses du capteur ce qui mène par fois à leurs chevauchements. Dans le cas contraire et pour des forts facteurs de qualités, les impulsions de sortie seront naturellement séparée et bien distincte les unes des autres ce qui minimise la probabilité de leurs chevauchements et ainsi l'erronément des mesures.

Dans notre cas nous avons trouvés des facteurs pouvant atteindre le 673.6 pour une pression de 4GPa et varie entre 600 et 605 pour les autres pressions. C'est valeurs sont très bonnes et elles sont compétitives avec la littérature du domaine.



**Figure IV-11** : Facteurs de qualités des peaks de résonances correspondants aux pressions situées entre 0 GPa et 7 GPa

#### IV-4-3- Calcul des sensibilités du capteur :

La sensibilité peut être définie comme étant le caractère du capteur à détecter et mesuré avec précision les pressions hydrostatiques qui lui sont appliquées. Les mesures sont de plus en plus proches de la réalité, si la sensibilité du capteur est bonne et/ou excellente et aussi constante. On peut dire alors que la sensibilité est un paramètre décisif quant au design des structures de capteurs. On trouve deux types de sensibilité relative aux structures à cristaux photoniques :

##### a- La sensibilité à la variation de l'indice de réfraction :

Noté  $S_{RI}$ , cette sensibilité exprime le caractère du capteur à modifier la longueur d'onde du flux de lumière entrant à sa sortie (le décalage de la longueur d'onde de résonance) pour chaque changement d'indice de réfraction (le changement d'indice de réfraction dans ce cas de sensibilité peut être issu de différent facteur entre autre, a cause de facteurs biologique (come sang et ADN), présence de gaz, présence de substance chimique, effort mécanique comme la pression, le déplacement..etc).

Cette sensibilité est calculée à partir de la relation :

$$S_{RI} = 1000 \times \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}, \text{ en nm/URI} \dots \dots \dots \text{IV-1}$$

De cette expression on conclut que  $S_{RI}$  est de plus en plus importante quand le décalage  $\Delta\lambda$  sera important pour les faibles changements d'indice de réfractifs.

**b- La sensibilité à la variation de pression hydrostatique :**

Noté  $S_p$ , elle est définie comme étant la capacité du capteur à modifier (à décaler) la longueur d'onde de résonance du flux de lumière entrant à sa sortie suite à l'application d'un seul facteur qui est la pression mécanique. Cette sensibilité est calculée à partir de la relation :

$$S_p = \frac{\Delta\lambda}{\Delta P} \dots \dots \dots \text{IV-2}$$

$$S_p = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \times \frac{\Delta n}{\Delta P}$$

$$S_p = S_{RI} \times \frac{\Delta n}{\Delta P}, \text{ en nm/GPa} \dots \dots \dots \text{IV-3}$$

On peut dire que la sensibilité est d'autant plus élevée que le capteur présente un grand décalage  $\Delta\lambda$  pour un léger changement de pression  $\Delta P$ .

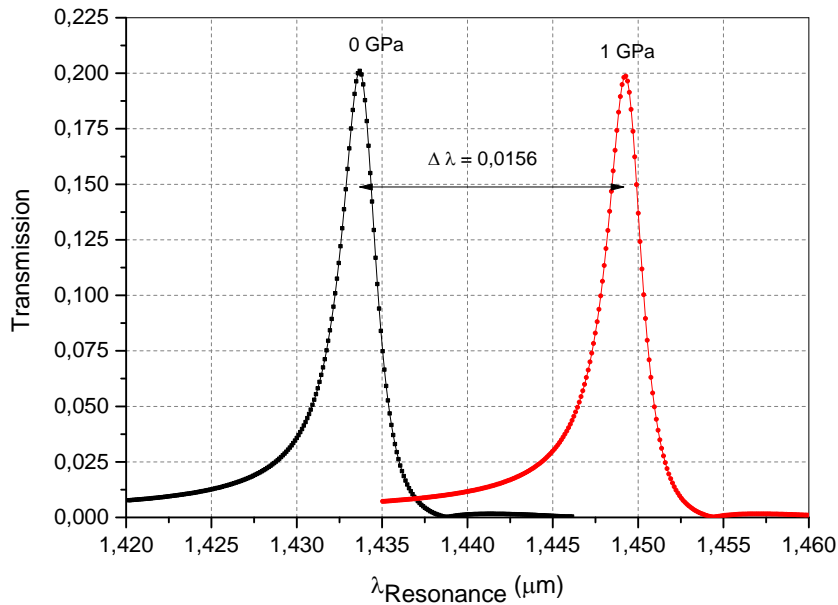
Le tableau IV-4, donne les sensibilités  $S_{RI}$  et  $S_p$  calculer à partir des données du tableau IV-3 et des relations données plus haut.

Pression (GPa)	0	1	2	3	4	5	6	7
Indice (UIR)	3,48	3,51985	3,5597	3,59955	3,6394	3,67925	3,7191	3,75895
SRI		391,46800	388,95859	391,46800	391,46800	391,468005	391,468005	393,977415 3
S		15,6	15,5	15,6	15,6	15,6	15,6	15,7

**Tableau IV-4 :** Sensibilité  $S_{RI}$  et  $S_p$  calculée pour ce capteur

La figure IV-12 donne un exemple de deux signaux isolés de l'ensemble des courbes de réponses du capteur de la figure IV-9. Cette figure correspond aux pressions 0GPa et 1GPa et

elle montre le décalage en longueur d'onde entre les deux peak ( $\Delta\lambda$ ), dans ce cas qui vaut  $0.0156 \mu\text{m}$ . Ce décalage est dû à la variation de l'indice de réfraction  $n$  du silicium qui passe à  $3.51985$  pour une pression appliquée de  $1\text{GPa}$  ( $0\text{GPa}$  correspond à l'état de repos du capteur et à un indice  $n$  de  $3.48$ ).

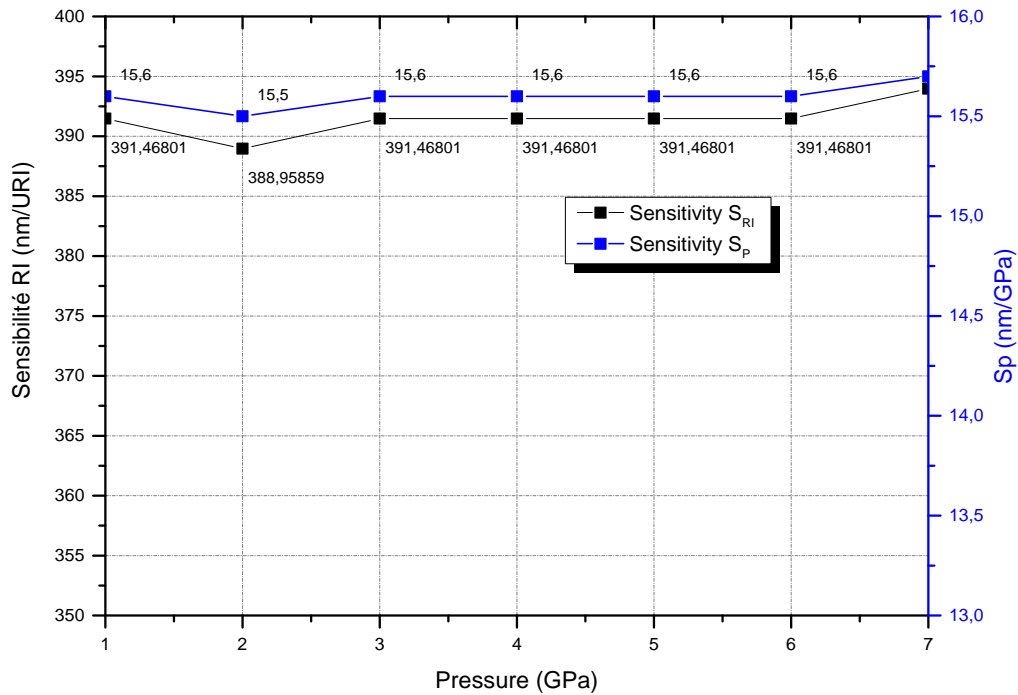


**Figure IV-12 :** Figure montrant le décalage  $\Delta\lambda$  des pics pour deux valeurs successives de la pression  $0\text{GPa}$  et  $1\text{GPa}$

### c-Tracé des sensibilités du capteur :

A partir du tableau 3-5 on trace les sensibilités  $S_{\text{RI}}$  et  $S_{\text{P}}$ , les sensibilités à l'indice de réfraction

et à la pression respectivement sur la même figure mais avec deux axes d'ordonnées différents en fonction de la pression hydrostatique appliquée (voir figure IV-13).



**Figure IV-13** : Les sensibilités  $S_{RI}$  et  $S_P$  du capteur finale tracées pour les pressions considérés.

De cette figure on peut constater aisément que :

- c- La sensibilité  $S_{RI}$  atteint une valeur maximale de **393,977** nm/URI pour des pression au voisinage de 7 GPa et une valeurs minimale de **388,958** nm/Uri pour les pressions voisines de 2GPa et reste constante à un niveau de **391,468** nm/URI au voisinage de 1 GPa et aussi pour une large gamme de pression de 3 à 6 GPa. Ces résultat sont très bons et constituent une vrais amélioration de la sensibilité du design originale de [3 ] qui été de **363,7**.
- d- Maintenant pour la sensibilité à la pression, on peut dire que notre design travail avec une haute sensibilité qui atteint **15,7** nm/GPa au voisinage de 7 GPa et produit une sensibilité stable de **15,6** nm/GPa dans la gamme de pression de 0 à 6GPa ce résultats étant très bon et même excellent.

#### IV-5- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé une structure de capteur RI qui représente une version amélioré d'une structure existante en littérature. Pour cette structure et après sa réalisation et son optimisation, nous avons constaté qu'elle a pu faire grimper la sensibilité RI de **363.7 nm/URI** à **393.7 nm/URI**, ce qui la rend un très bon support pour la réalisation d'un capteur à pression. En effet avec ce design, nous avons réalisé un capteur de pression de sensibilité pouvant atteindre **15.7 nm/GPa**. Cette sensibilité est très importante et en la comparant avec la littérature du domaine on a constaté qu'elle présente une valeur très compétitif (une sensibilité de **13.7 nm/GPa** a été obtenu par [ 33]).

# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion général et perspective:

Au début de ce travail nous avons fixé un but qui été la réalisation d'un capteur de pression à base de structure à cristaux photonique ayant une haute sensibilité. Et pour aboutir à ce but nous avons suivies les étapes suivantes :

- La première étape été de faire une étude des caractéristiques générales et des principes de fonctionnement de différents type de capteur. Puis on s'est focalisés sur l'étude des capteurs de pressions.
- Dans une seconde étape, nous avons parlés des cristaux photoniques en temps que théorie et concept, puis on s'est penchés sur l'utilisation de telles structures pour la fabrication de détecteur et de capteurs de différents types couvrants ainsi, presque la totalité des besoins industriels en capteurs de hautes performances.
- La dernière étape de notre travail été de proposer une structure, de définir ses caractéristiques (période  $a$ , rayon de trous  $r$ , forme de la cavité et des formes des guides d'ondes inclus) et son GAP optique à fin de définir la plage de longueur d'onde dans laquelle elle doit être exploité. En suite cette structure est optimisée afin d'obtenir une sensibilité maximale et de bon facteurs de qualité.

En effet, les résultats que nous avons obtenus avec notre structure sont très satisfaisants du faite qu'ils montrent une grande amélioration de la sensibilité par rapport à celle trouvé par [33] avec sa structure originale. De nos résultats on peut constater que la sensibilité RI a grimpé de **363.7nm/URI** à **393.7 nm/URI**, ce qui la rendue un très bon support pour la réalisation de notre capteur à pression.

Avec le design que nous avons proposé, nous avons pus obtenir une sensibilité en pression pouvant atteindre **15.8 nm/GPa**. Cette sensibilité est très importante et en la comparant avec la littérature du domaine on a constatés qu'elle présente une valeur très compétitive.

En perspective, nous incitons les PFEs des promotions à venir, à effectuer d'autre types d'optimisation de cette structure comme par exemple optimiser les dispositions et les longueurs des guides d'ondes d'entré et de sortie, afin de garantir un meilleur couplage entre la source et la cavité, cela d'une part. D'autre part, tenter d'améliorer le rendement de capture de la cavité résonante que nous avons utilisés (amélioré son facteur de qualité et de sa sensibilité).

### Bibliographies

- [1] E. Yablonovitch, "Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics", Phys. Rev. Lett., 58, 2059-2062, 1987.
- [2] Benmerkhi Ahlem, « influence des paramètres géométriques sur la cavité à cristaux photoniques bidimensionnelle » Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine, 2008.
- [3] Y. Zhang, Y. Zhao, Q. Wang « Measurement of methane concentration with cryptophane E infiltrated photonic crystal microcavity », Sensors and Actuators B 209, 431–437, 2015.
- [4] Philippe Meyne, « Généralité sur les capteurs », université Paris 12 Val de Marne, 2009.
- [5] Bougriou Feida, « Etude théorique des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnelles: applications dans le domaine du guidage optique et la détection », thèse doctorat, université Constantine 1, 2013.
- [6] Samira Amoudache, « Cristaux photoniques accordables ; application au domaine des capteurs », thèse de doctorat, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015
- [7] Georges ASCH et Coll, « Les capteurs en instrumentation industrielle » 7<sup>e</sup> édition, Dunod 2010.
- [8] Karoun Fares, « Etude du comportement de la polyaniline exposée aux gaz polluants », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Setif 1, 2014.
- [9] Bendjelloul Rahima « Etude du couplage dans les guides d'onde à cristaux photoniques », mémoire de magister, université Mentouri Constantine, 2009.
- [10] Philippe Menini. « Faisabilité d'un capteur de pression capacitif miniature sur silicium », Thèse doctorat de l'université P. Sabatier Toulouse. 1998.
- [11] Babaci Sofian, Berroua Benzina Mohammed, « Etude et réalisation d'un capteur de pression différentielle à inductance variable », mémoire de Master 2, université Aboubekr Belkaid, Tlemcen 2012.
- [12] S. Olyaei and A. Asghar Dehghani, « Nano-pressure sensor using high Quality photonic crystal cavity resonator », conference paper, July 2012.

- [13] S.Olyae and A. Asghar Dehghani, « High Resolution and Wide Dynamic Range Pressure Sensor Based on Two-Dimensional Photonic Crystal. », *Photonic Sensors* Vol. 2, No. 1, 92–96, 2012.
- [14] Melle Benaissa Fatima, «Etude et Simulation de la Propagation des Ondes Electromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres optiques» mémoire de magister, Université de abou-bakr belkaïd – tlemcen,2013.
- [15] Melle Boukerzaza Lounba, «Influence des paramètres physiques sur la bande interdite photonique d'un cristal photonique bidimensionnel », mémoire magistère, universite mentouri Constantine 2008.
- [16] Robert Michaël Farha, « Etude d'une structure à cristal photonique « LOM » gravée dans un guide Ti:linbo3 dopé erbium pour l'émission de la lumière à  $1,55\mu\text{m}$  », thèse doctorat, Université Pierre et Marie Curie ,2010.
- [17] Bougriou Feida, «Etude des guides d'ondes a cristaux Photoniques bidimensionnels», mémoire de magister, université mentouri Constantine, 2008.
- [18] Hamza Otmani, « Etude théorique des propriétés magnéto-optiques de cristaux magnéto photoniques à structure ferrite grenat de bismuth (BIG) », thèse doctorat, universite constantine 1,2014.
- [19] Damien Bernier, « Propriétés de superprisme des cristaux photoniques sur substrats SOI pour le démultiplexage en longueur d'onde », thèse de doctorat, 2008.
- [20] Fabian gauffillet ,« Cristaux photoniques \_a gradient : dispositifs et applications », thèse de doctorat, université Paris Sud 11, 2014.
- [21] Frederic Lacour « Propagation de la lumière dans les nanostructures et Cristaux photoniques planaires associes aux guides d'onde : fabrication et caractérisation », thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2014.
- [22] Melle. Saidani Asma, « Application des méthodes stochastiques pour l'optimisation des filtres passe-bande à base des cristaux photoniques unidimensionnels », mémoire master, Université de abou-bakr belkaïd ,tlemcen,2014.
- [23] Driss Imad-Eddine , « Simulation et optimisation d'un diviseur 1x8 à base De cristaux photoniques bidimensionnels. Modélisation par la méthode fdtd 2d», mémoire master , Université de abou-bakr belkaïd , tlemcen,2014.

- [24] Delphine Neel, « Etude en champ proche optique de guides à cristaux photoniques sur SOI », Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2006.
- [25] Sandrine Massy, « Contribution à la réalisation de fonctions optiques à base de cristaux photoniques sur LiNbO<sub>3</sub> », thèse de doctorat, université de Limoges, 2004.
- [26] Merle Yannick « Etude de la dispersion électromagnétique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels. », thèse de doctorat, université de Limoges, 2003.
- [27] Elisa Guillermain « Dispositifs nanophotoniques à ondes de surface en silicium poreux : Technologie et application à la bio-détection », thèse de doctorat, Lyon, 2007
- [28] Hadjer Naceri « optimisation du facteur de qualité dans les cavités à cristaux photoniques bidimensionnels », mémoire de master, université de M'sila, 2015.
- [29] S.Olyae, S. najafgholinezhad, and H. Alipour banaei, « Four-Channel Label-Free Photonic Crystal Biosensor Using Nanocavity Resonators », Photonic Sensors (2013) Vol. 3, No. 3: 231–236, 2013.
- [30] S. Robinson and N.Dhanlaksmi, « Photonic Crystal Based Biosensor for the Detection of Glucose Concentration in Urine », PHOTONIC SENSORS, Vol. 7, No. 1, 11–19, 2017.
- [31] Mohankumar, Mrs.I. Bahaddur, « NANOCAVITY BASED OPTICAL PRESSURE SENSOR », International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) e-ISSN: 2395-0056 Volume: 02 Issue: 03, June-2015
- [32] S. Olyae and A. Asghar Dehghani, « High Resolution and Wide Dynamic Range Pressure Sensor Based on Two-Dimensional Photonic Crystal », Photonic Sensors Vol. 2, No. 1, 92–96, 2012.
- [33] S.Tao, D.Chen, G.Wang, J.Qiao and Y.Duan. « A high sensitivity pressure sensor based on two-dimensional photonic crystal. Photonic sensor », vol.6, No.2, 137-142, 2016.
- [34] Mezhoud Mouad, « Etude théorique de l'influence des paramètres de fabrication sur la biréfringence dans les guides d'ondes magnéto-optique », mémoire magister, Université de M'sila 2010.

## Annexe

### Présentation de l'environnement de simulation RSoft

RSoft CAD est un logiciel de base qui permet aux chercheurs de visualiser les différents phénomènes mis en cause dans l'optique intégrée et de créer des systèmes pour la conception des dispositifs de guide d'onde, des circuits optiques et d'autres dispositifs photoniques par l'application des méthodes numériques. Ce logiciel possède plusieurs modules de simulation qui sont autorisés séparément de RSoft. Ces modules de simulation, avec des applications typiques, sont : BeamPROP, BandSOLVE, FullWAVE, GratingMOD et DiffractMOD [34] et chaque module est conçu pour une tâche bien définie.

Parmi ces modules de simulation, nous présentons le BandSOLVE et FullWAVE.

#### 1- Simulateur Bandsolve :

«Bandsolve » est un logiciel de simulation qui permet de générer et d'analyser les diagrammes de bandes photoniques. Le calcul des diagrammes est basé sur une méthode de décomposition des champs électromagnétiques en ondes planes pour les structures périodiques. Les structures dont nous voulons calculer les diagrammes de bandes sont toutes des structures qui se répètent périodiquement. [5]

#### 2- Présentation de FullWave:

Ce logiciel peut simuler des structures (limitées, infinies ou périodiques), formées par différents matériaux qui peuvent être métalliques ou diélectriques. L'utilisation de Fullwave nécessite de définir les matériaux qui composent la structure à l'aide de la permittivité électrique. Il faut aussi définir l'environnement de la structure et donc les conditions aux limites. Pour cela il faut disposer de conditions absorbantes aux abords du domaine de discrétisation (calcul) qui permet d'éviter les réflexions parasites engendrées aux bords de la fenêtre du calcul FDTD afin de simuler un milieu ouvert [5].

#### 3- Signification des icônes de l'interface graphique du logiciel RSoft :



New Circuit : Cette option crée un nouveau circuit



Open Circuit : Cette option ouvre un circuit existant.



Save Circuit : Cette option sauvegarde le circuit courant.



Edit Global Settings : Cette option ouvre la zone de dialogue d'arrangements globale par défaut. Elle est équivalente à la nouvelle zone de dialogue de circuit.



Edit Symbol Table : Cette option ouvre la table des symboles où l'utilisateur crée de nouvelles variables pour modifier des variables existantes.



Edit Launch Field : Cette option ouvre la zone de dialogue pour le lancement des paramètres où l'utilisateur peut spécifier le champ initial pour une simulation.



Perform Simulation : Cette option ouvre la zone de dialogue de paramètres de simulation où l'utilisateur peut spécifier ces paramètres pour effectuer une simulation.



Compute Index Profile : Cette option ouvre la zone de dialogue de profil d'indice de calcul où l'utilisateur peut calculer un profil d'indice du circuit.

#### 4-Les étapes de simulation :

La fenêtre de programme de Rsoft CAD comporte une barre de menus en haut de la fenêtre, une barre des outils qui porte plusieurs icônes et la ligne d'état

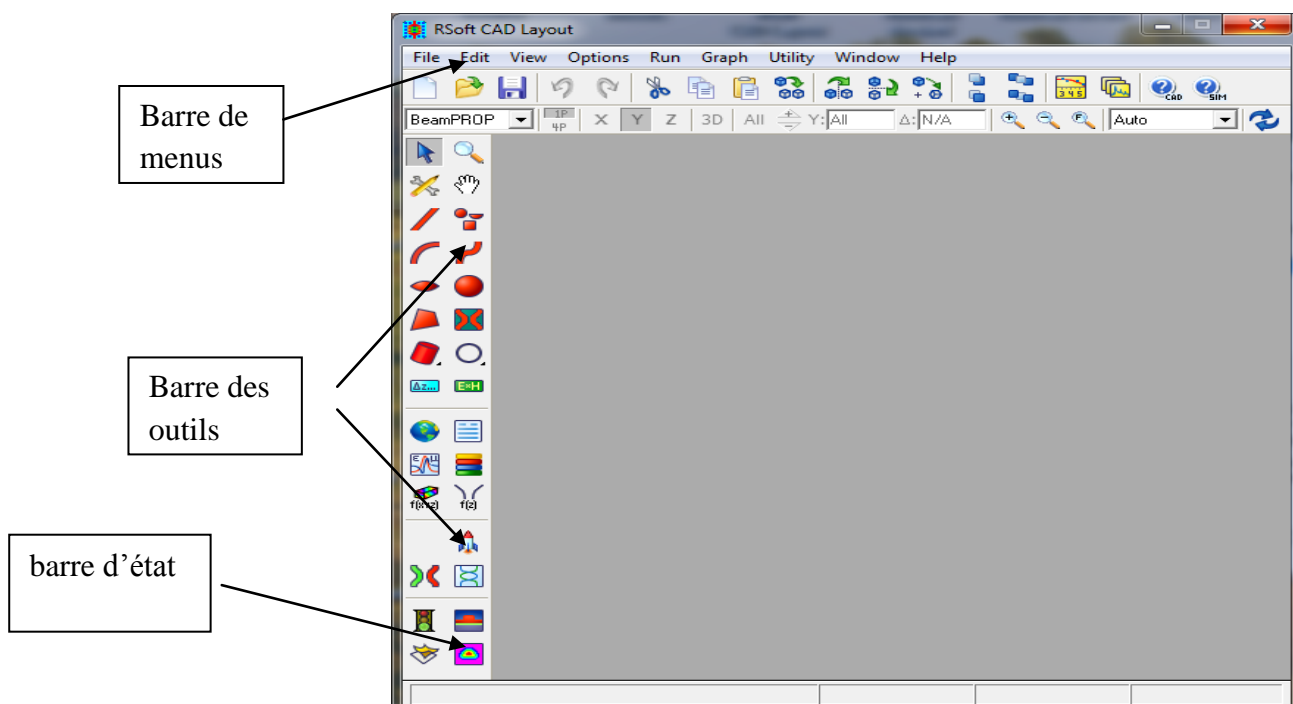



Figure 1: Fenêtre principale du programme CAD

#### 4-1-Créer un nouveau circuit :

Pour créer un nouveau circuit on va cliquer sur l'icône  dans la barre d'outils supérieure, ou nous allons choisir File / new de la barre du menu. Le dialogue de démarrage de la figure 2 va apparaître.

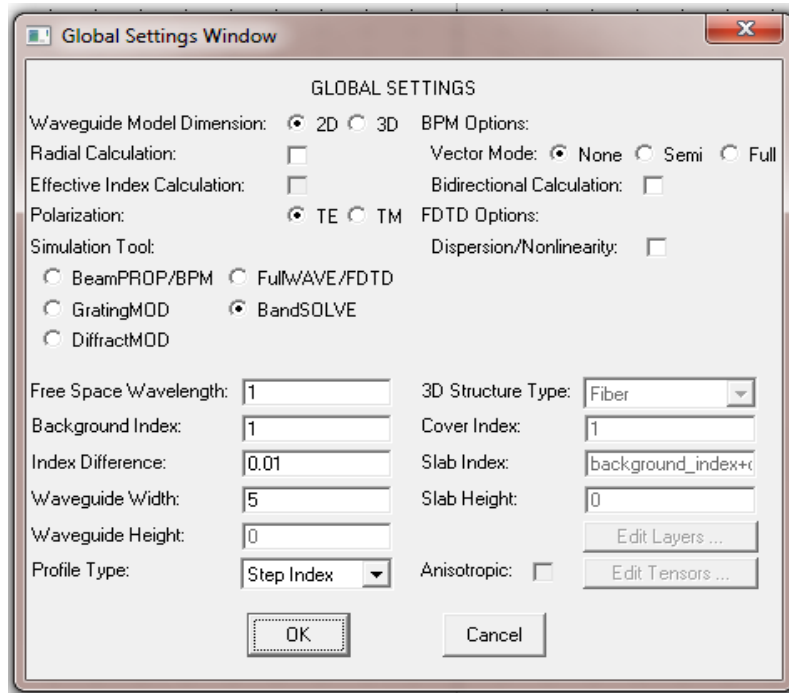
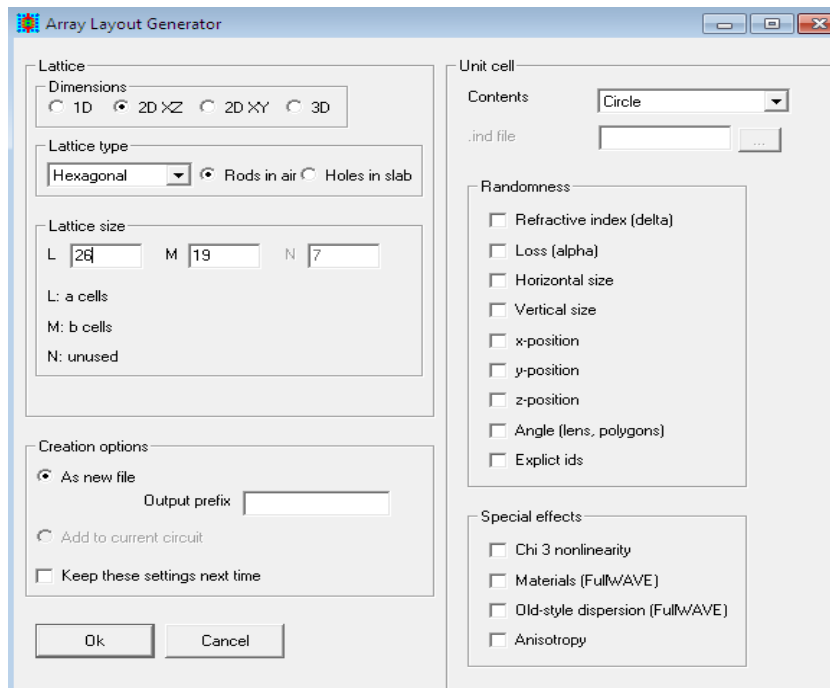


Figure 2 : Fenêtre de démarrage

#### 4-2- Générer la structure de réseau :

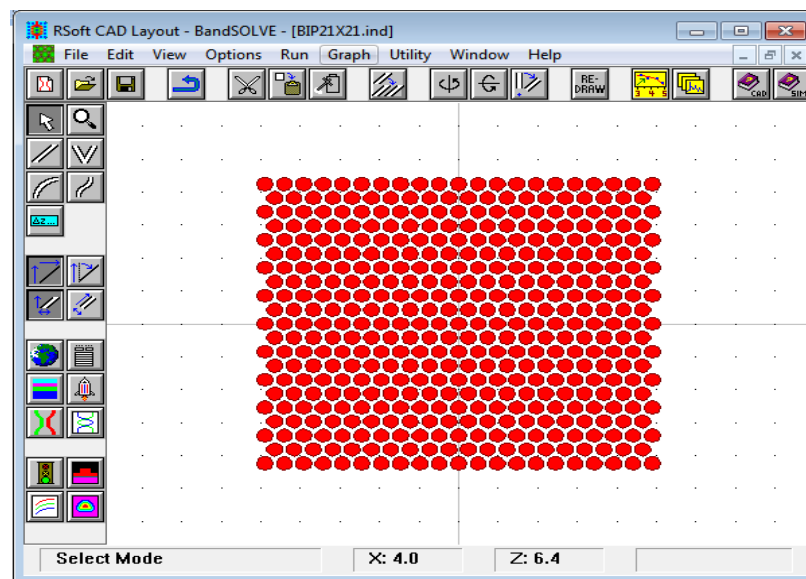
Dans cette partie on va montrer comment créer un réseau en cristaux photoniques dans l'interface de CAD. Généralement, il existe plusieurs manières pour créer une structure de réseau dans l'interface de CAD. La manière que nous avons utilisée est la suivante :

nous allons choisir Utility / Array Layout. Le dialogue de démarrage de la figure 3 va apparaître.



**Figure 3:** Arrangements de disposition de la rangée XZ

Après l'introduction des différentes données (type de réseau, forme de motif, le nombre de rangés et le nom du circuit) on clique sur le bouton **OK** pour obtenir la structure du cristal photonique qui apparaît sur la figure 4.



**Figure 4:**Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD.

## Résumé :

Les cristaux photoniques sont des structures présentant une modulation périodique de leurs indices de réfractons. Cette modulation d'indice conduit à l'apparition d'une bande interdite photonique (GAP) empêchant les longueurs d'onde situées entre ses limites à se propagé au sein de ces structure. Ces structures ont eux un grand intérêt dans la recherche scientifique ce qui a mené à une multiplication très rapide de leurs domaines d'applications, en entres autres ; la mesure des grandeurs physiques et les capteurs. En effet, de nos jours les cristaux photoniques sont à base de la réalisation d'une vaste gamme de capteurs, balayant presque toutes les grandeurs physiques mesurables et en particulier la pression, notre travail entre dans ce cadre,

En effet, dans ce travail nous avons proposés une structure de capteur de pression opérant à des pressions de l'ordre du giga pascal, réalisée dans une structure à cristaux photonique à 2D. Ensuite une optimisation de cette structure est faite dans le but d'avoir une meilleure sensibilité et facteur de qualité possible.

**Mots clés :** Cristaux photoniques 2D, GAP photonique, capteur de pression, optimisation, sensibilité RI, sensibilité à la pression, facteur de qualité.

## Abstract:

The photonic crystals are structures exhibiting a periodic modulation of their refractive indices. This modulation of the index leads to the appearance of a photonic band gap (GAP) preventing the wavelengths situated between its limits from propagating within these structures. These structures have a great interest in scientific research which has led to a very rapid multiplication of their fields of application, among others; The measurement of physical quantities and sensors. Indeed, nowadays photonic crystals are based on the realization of a wide range of sensors, sweeping almost all the measurable physical magnitudes and in particular the pressure, our work enters into this framework. Indeed, in this work we proposed a pressure sensor structure operating at pressures of the order of the pascal giga, made in a structure with 2D photonic crystals. Then an optimization of this structure is done in order to have a better sensitivity and quality factor possible.

**Keywords:** 2D photonic crystals, photonic GAP, pressure sensor, optimization, RI sensitivity, pressure sensitivity, quality factor.

## المخلص :

البلورات الفوتونية هي عبارة عن بنيات دورية الهدف منها هو لتعديل مؤشرات الانكسار للضوء فيها. هذا التعديل في المؤشر يؤدي إلى ظهور عصابة ضوئية (GAP) ممنوعة تمنع الموجات الواقعة بين حدودها من الانتشار و العبور داخل هدة البنية. والاهتمام الكبير بهذه البنيات في مجال البحث العلمي أدى إلى الزيادة السريعة جدا من مجال تطبيقها ، من بين الأمور الأخرى قياس المقادير الفيزيائية وأجهزة الاستشعار. في الواقع، تستخدم البلورات الفوتونية في الوقت الحاضر في مجموعة واسعة من أجهزة الاستشعار التي تجتاح تقريبا كل الميادين و المقادير الفيزيائية التي يمكن قياسها ولا سيما الضغط و يدخل عملنا في هذا الإطار.

في هذا العمل اقترحنا بنية لقياس الضغط العالي ( جيغا باسكال )، حيث استعملنا البلورات الفوتونية ثنائية البعد 2D ثم قمنا بإجراء تحسين في البنية من أجل الحصول على أفضل حساسية وعامل جودة ممكنة. **الكلمات المفتاحية :** البلورات الفوتونية 2D ،العصابة الضوئية الممنوعة (GAP) ، استشعار الضغط ، التحسين ، الحساسية RI ، حساسية الضغط ، عامل الجودة.