



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE: DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :

LARGOT Zohra OPTION : Microélectronique

ROUINA Siham OPTION : Instrumentation

DOMAINE : Sciences et Technologie

FILIERE : Electronique

Thème

Etude et modélisation de cristaux photoniques en silicium(Si) : application au capteurs de température

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
HAMDI Abdelwahab	MAA	Président
SELMANE Naceur	MCA	Examinateur
LIDJICI Hamza	Prof	Encadreur

Promotion : 2022/2023

REMERCIEMENTS

Nous remercions ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous aimerons tout d'abord exprimer nos remerciements les plus vifs à notre encadreur de mémoire Monsieur LIDJICI hamza, professeur à l'Université de Laghouat. On lui exprime particulièrement toute nos reconnaissances pour nous avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, de ses qualités humaines et de sa constante disponibilité.

Nous exprimons nos sincères remerciements à Mr GHAZAL Aboutaleb, Doctorant LMD à l'Université de Laghouat, d'avoir co-encadré ce travail.

Nous remercions également Monsieur HAMDI Abdelwahab, MMA à l'Université de Laghouat d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire, et Monsieur SELMANE Naceur Maître de conférences-A à l'université de Laghouat, pour avoir bien voulu considérer et examiner ce travail.

Nos remerciements les plus vifs à toutes les personnes ayant pris part de près ou de loin à notre formation, à tous ceux qui nous ont un jour donné un conseil et à tous ceux qui nous ont guidé sur la voie du savoir.

Dédicaces

Je dédie ce travail à la vieille analphabète qui m'a soutenu jusqu'au bout c'est la moudjahida ma mère que je remercie infiniment

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation. À toi mon père Largot Omar

À tous mes frères et mes sœurs : Hicham ,Mohammed ,Djamila

Et À toute ma famille Largot

*Mes amies de par le monde qui n'ont cessé de m'encourager Solaf ,
Soltana*

Zohra Largot

اهداء

الى من سهرت وتعبت وتحملت وخافت غيابي
الى امي الرائعة وابي الحنون
الى اخوتي واصدقائي وكل من ساعدني بشكل مباشر او
غير مباشر قولاً او فعلاً
الى اساتذتي وكل من علمني
اهدي لكم هذا العمل
واطلب من الله ان يحفظكم ويمتعكم بصحتكم

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

ROVINA Siham

TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures	V
Liste des tableaux	VIII
Liste des acronymes:	III
Introduction générale.....	2
Références:	4
I.1.Introduction.....	6
I.2.Historique.....	6
I.3.Concept des cristaux photoniques.....	6
I.4.Analogie entre l'électron et le photon.....	9
I.5.Différents types de cristaux photoniques suivant leurs géométries :	9
I.5.1. Le cristal photonique unidimensionnel :	9
I.5.2. Le cristal photonique bidimensionnel :	10
I.5.3. Cristaux photoniques tridimensionnels :	12
I.6.Caractéristiques géométrique et physique des cristaux photoniques :	13
I.7.La bande interdite photonique :	14
I.7.1. Structures de bande interdite en général :	14
I.7.2. Le Diagramme de bandes :	16
I.7.3. Zone du Brillouin :	17
I.8.Les défauts :	18
I.9.Cavités :	20
I.10.Méthode de modélisation numérique :	21
Références :	24
II.1. Introduction :	25
II.2. Généralités sur capteur :	26
II.2.1. Définition :	26
II.2.2. Classification des capteurs	26
- Apport énergétique.....	26
- Type de sortie.....	27
II.2.3. Structure d'un capteur.....	27
II.2.4. Rôle du capteur	28
II.2.5. Caractéristiques d'un capteur	28
1. Etalonnage	28
2. Linéarité.....	29
3. Sensibilité (s) :	29

4. Temps de réponse ou rapidité :	29
5. Résolution (Précision) :	29
II.3. Capteurs optiques	29
II.4. Capteurs à base de cristaux photoniques :	30
II.4.1. Capteur de pression à base de cristaux photoniques :	30
Exemple de capteur réalisés	31
b. Deuxième application	32
II.4.2. Capteur de déplacement à base cristaux photoniques	34
Exemple de réalisation.....	35
II.4.3. Capteur biomédical.....	37
II.4.4.1. Etude d'un capteur de température.....	39
II.4.4.2. Principe de détection des capteurs de température.....	40
II.4.4.3. Bande interdite photonique (PBG)	43
II.4.4.4. Exemple d'application Capteur de température [35].....	44
III .1. Introduction :	51
III .2. Représentation du logiciel R SOFT CAD	51
A. Environnement de CAD	51
B. Le simulateur « BandSOLVE » :	51
C. Le simulateur « FULL WAVE » :	52
D. Fenêtre de programme de CAD :	52
E. Générer la structure de réseau :	53
F. Présentation des autres applications :	53
III .3.1. L'effet de la modification du rayon sur la largeur des bandes interdites	56
III.3.2. Effet de l'indice de réfraction Sur les bandes d'énergie interdites en mode TM et TE :	59
III.3.3. Effet du facteur de forme sur la bande interdite en mode TM et TE :	62
III.4. Concept d'un capteur optique de température :	65
III.4.2. Effet de certains facteurs géométriques sur le guide d'ondes:	68
III.5. Conclusion :	75

Liste des figures

Numéro	Titre	Page
Figure I.1	Image d'un cristal d'opale	7
Figure I.2	Panneau de gauche : Souris de mer (vue générale) ; image au microscope électronique à balayage de la coupe transversale de ses cheveux	8
Figure I.3	Schéma d'un cristal photonique	9
Figure I.4	Représentation schématique de l'interférence des ondes réfléchies par chaque dioptré	10
Figure I.5	Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée	11
Figure I.6	Structure 2D : (a) Structure carrée, (b) triangulaire et (c) hexagonale.	11
Figure I.7	Deux exemples célèbres de cristaux photoniques tridimensionnels	12
Figure I.8	Un cristal photonique unidimensionnel	13
Figure I.9	Diagramme de bandes d'un cristal photonique (a) polarisation TE ; (b) polarisation TM	17
Figure I.10	Illustration des six premières régions de Brillouin, (a) : Réseau réciproque carré 2-D. (b) : Réseau alternatif hexagonal 2-D	18
Figure I.11	Différents types de défaut ponctuel dans les cristaux : (a) lacune, (b) atome étranger interstitiel, (b') auto-interstitiel et (c) atome étranger en substitution	19
Figure I.12	Illustration de la propagation du champ dans un cristal à défaut linéaire	19
Figure I.13	a) Représentation schématique de l'arrangement des atomes au niveau d'un joint de grain dans un échantillon polycristallin b) Défaut d'empilement produit par l'absence d'un plan C dans la séquence ...ABC	20
Figure II.1	Principe d'un capteur	26
Figure II.2	Structure d'un capteur	27
Figure II.3	Courbe d'étalonnage d'un capteur	28
Figure II.4	Structure finale du capteur de pression adoptée	32
Figure II.5	La structure finale du capteur de pression proposée	33
Figure II.6	Réponse de capteur pour différentes valeurs de pression	34
Figure II.7	Capteur de déplacement proposé par saeed Olyaei Morteza AZIZI [26]	36
Figure II.8	Capteur de déplacement proposé Par P. Rani et al [27]	37
Figure II.9	Transmission du biocapteur conçu en fonction des changements de l'indice de réfraction correspondant aux sept états	38

	d'infiltration des concentrations de glucose.	
Figure II.10	Structure du dispositif proposé. Disposition (a), et vue en 3-D (b)	40
Figure II.11	Décalage de la longueur d'onde résonnante du capteur à base de CP à la température appliquée dans la plage de 0 °C à 640°C.	41
Figure II.12	Longueur d'onde de résonnance du capteur en fonction du changement de la température	42
Figure II.13	Relation linéaire entre la largeur du PBG et la température [34]	43
Figure II.14	Transmission du capteur de température (structure couplée avec 3 trous autre de la cavité, et $r'=0.2$) pour différents RI de 1.323 à 1.333 correspond 0 une variation de température de 90°C à 20°C respectivement	44
Figure II.15	Longueur d'onde de résonance λ_0 du capteur de température en fonction de la température	45
Figure III.1	La fenêtre de programme de R Soft CAD, montrant la barre de menus au dessus, les barres des outils supérieurs et gauches, et la ligne d'état au fond.	52
Figure III.2	a) Arrangements de disposition de la rangée XZ. b) Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD.	53
Figure III.3	La matrice proposée est des tiges de silicium dans l'air	56
Figure III.4	a) La matrice propose est des tiges de silicium dans l'air, b) Diagramme de dispersion des bandes interdites du mode TE.	57
Figure III.5	a) La matrice propose est des tiges de silicium dans l'air, b) Diagramme de dispersion des bande interdite du mode TE.	58
Figure III.6	a) La matrice propose est des tiges de silicium dans l'air, b) Diagramme de dispersion des bande interdite du mode TE et en mode TM.	59
Figure III.7	L'image représente l'évolution de la largeur des bandes d'énergie interdites en mode TM et en mode TE en termes d'indice de réfraction n.	60
Figure III.8	L'image représente le changement de la valeur minimale de la bande interdite en mode TM et TE en termes d'indice de réfraction.	61

Figure III.9	L'image représente l'évolution de la valeur maximale des bandes d'énergie interdites en mode TM et en mode TE en termes d'indice de réfraction n .	62
Figure III.10	Variation de la largeur de bande interdite d'un matériau silicium en fonction du facteur de forme FF.	63
Figure III.11	L'image représente le changement de la valeur minimale de la bande interdit en mode TM et TE pour le silicium en fonction du facteur de forme FF.	64
Figure III.12	L'image représente l'évolution de la valeur maximale des bandes d'énergie interdites en mode TM et en mode TE pour le silicium en fonction du facteur de forme.	65
Figure III.13	Structure 2D avec un défaut de ligne (guide d'onde)	66
Figure III.14	Spectre de transmission guide droit référence W1 en mode TM	67
Figure III.15	Distribution du champ électrique en 2D du capteur de température.	68
Figure III.16	Structure 2D avec un défaut de ligne (guide d'onde)	69
Figure III.17	a) : Le spectre de transmission de la structure pour différents le rayon du trou $r = 0.3 \cdot P$ (normal) ; $r = 0.25 \cdot P$; $r = 0.20 \cdot P$, b) : Le spectre de transmission de la structure en fonction différents longueur de l'émetteur ; launch = 1 nm ; launch = $P \cdot 1.1$ nm ; launch = $P \cdot 1.2$; launch = $P \cdot 1.3$ nm ; c) : Le spectre de transmission de la structure en fonction de changement de position de l'émetteur tel que PX4 ; PX4.1 ; PX4.2 ; PX4.3 nm	70
Figure III.18	Structure proposée d'un capteur de température à base d'une cavité résonant.	71
Figure III.19	Les spectres de résonance de la cavité CP optimisée lorsque l'indice de réfraction de.	73
Figure III.20	Le décalage de longueur d'onde de résonance du capteur dépendant de CP à la température appliquée est dans la plage de 300°K à 400°K.	74

Liste des tableaux

Numéro	Titre	Page
Tableau II.1	Sensibilité du capteur proposé par zhenfeng Xu et dans chaque segment de déplacement considéré	35
Tableau II.2	Sensibilité du capteur biomédicale	39
Tableau II.3	Caractérisation des paramètres obtenus de la conception du capteur de température sur la plage de température (0 °C à 640°C)	42
Tableau III. 1	Variation de la valeur de la largeur de la bande interdite en mode TE en mode TM en fonction de l'indice de réfraction n.	60
Tableau III.2	Variation d'une valeur de bande interdite minimale en mode TM et en mode TE en fonction de l'indice de réfraction n	61
Tableau III.3	Variation d'une valeur maximale de la bande interdite en mode TM et en mode TE en fonction de l'indice de réfraction n	61
Tableau III.4	Variation de largeur de bande interdite en mode TM et en mode TE en fonction du facteur de forme	63
Tableau III.5	Divergence d'une valeur de bande interdite minimale en mode TM et en mode TE en fonction d facteur de forme FF	64
Tableau III.6	Variation d'une valeur maximale de bande interdite en mode TM et en mode TE en fonction du facteur de forme FF	64
Tableau III.7	Sensibilité (S) Longueur d'onde (λ) en fonction du changement d'indice de réfraction des trous n	72
Tableau III. 8	Lndice de réfraction(n), longueur d'onde (λ) en fonction du changement de température	73

Liste des acronymes:

Δn	contraste d'indice.
λ	Longueur d'onde.
a	Période du cristal photonique.
r	Rayon du cristal photonique.
r/a (FF)	Facteur de forme.
n	Indice de réfraction.
ϵ	Permittivité diélectrique.
BIP	Bande Interdite Photonique.
BPG	Photonique Band Gap.
CEM	Compatibilité électromagnétique.
CP	Cristal Photonique.
E	le champ électrique.
EMI	Electromagnétique Interférence.
F	Facteur de remplissage.
FDTD	Finité Différence Time Domain.
H	le champ électrique.
PhC	Photonique Crystal.
PWE	Plane Wave Expansion.
Si	Silicium.
TE	Transverse Electric.
TM	Transverse Magnétique.
1D, 2D, 3D	Un, Deux, Trois dimensions.
Q	facteur de qualité
S	sensibilité du capteur
ΔV	signal électrique de sortie

$\Delta\Psi$	la grandeur physique d'entrée
Rc	Rayon des trous de la microcavité
n_{eff}	Indice de réfraction effectif
c	Célérité de la lumière dans le vide
SOI	Silicon On Insulator (silicium déposé sur isolant)
K°	degré Kelvin
C°	degré Celsius
RIU	Réfractive Index Unit, unité de l'indice de réfraction
ΔT	la variation de la transmission
Δx	le déplacement

Introduction générale

Introduction générale

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

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

Les cristaux photoniques offrent la possibilité de contrôler la propagation de la lumière et ceci, sur une dimension de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde dans le matériau. C'est notamment cette propriété qui les rend intéressants pour de nombreuses applications[1][2].

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

L'objectif de cette étude est la conception d'un capteur de température à base des cristaux photoniques 2D en silicium (Si) à l'aide du logiciel RSOFT CAD.

La réalisation et les étapes de recherche de ce travail seront étalées sur trois chapitres.

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

Dans un deuxième chapitre, on présente les capteurs optiques à base de cristaux photoniques, leur principe de fonctionnement, leur classification et leurs caractéristiques.

Le troisième chapitre est consacré à la conception de structures d'un capteur à base de cristaux photoniques pour la détection de la température. Les différents résultats de simulation obtenus seront présentés et discutés.

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

Références:

- [1] Yunlong Wang, Siyue Chen, Pingping Wen, Song Liu, Shuangying Zhong. Omnidirectional absorption properties of a terahertz one-dimensional ternary magnetized plasma photonic crystal based on a tunable structure. *Results in Physics* 18 (2020) 103298.
- [2] Yablonovitch E, Gmitter T, Leung K-M. Photonic band structure The face-centered cubic case employing nonspherical atoms. *Phys Rev Lett* 1991;67(17):2295.
- [3] John S. Strong. localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys Rev Lett* 1987; 58(23):2486.

Chapitre I :

Généralités sur les cristaux photoniques

I.1.Introduction

La recherche sur les cristaux photoniques (pc) a considérablement évolué au cours de ces dernières années, tant au niveau fondamental qu'appliqué. Ces structures périodiques à fort contraste d'indice influencent radicalement la propagation des photons. Des structures à Bandes Interdites Photoniques (BIP), qui interdisent la propagation des photons dans certaines plages de fréquence, peuvent ainsi être réalisées [1].

Ce chapitre est une introduction générale aux cristaux photoniques. Nous commençons par la définition des cristaux photoniques, ensuite nous procédons à la présentation des différents types de cristaux photoniques et de leurs propriétés, ainsi que du principe des défauts existant dans le plan des cristaux photoniques.

I.2.Historique

A priori, contrôler la lumière comme contrôler les électrons dans les appareils électroniques semble être une tâche très difficile. Pourtant, c'est la performance que les cristaux photoniques peuvent atteindre. Ces substances ont été découvertes par Eli Yablonovitch à la fin des années 1980[2]. La propriété 'gap' ou 'band gap' a été démontrée à l'origine par Lord Rayleigh 1887, la structure en miroir de Bragg. Une généralisation du concept à deux et troisième dimension a été créée en 1987 par Zengerle, Yablonovitch et John[3]. Dans le but de contrôler l'émission spontanée de lumière. Le premier cristal photonique a été fabriqué en 1991[4].

Il existe des structures naturelles ayant les mêmes propriétés que les cristaux photoniques artificiels. En effet, les couleurs vives de certaines espèces comme les papillons et les oiseaux peuvent être attribuées à la présence de structures périodiques très complexes.

I.3.Concept des cristaux photoniques

En fait, ces structures ressemblent à des cristaux réguliers dans lesquels les atomes ou les molécules sont disposés périodiquement dans une, deux ou trois dimensions, d'où le nom de cristaux. Cette périodicité impose des limites à la propagation de la lumière, et la prévention de la propagation dans certaines directions peut être obtenue si sa fréquence se situe dans une

certaine plage de fréquences. Entravant le mouvement des électrons à l'intérieur, formant un isolant ou un semi-conducteur, il se comporte comme un cristal normal. On appelle cristaux photoniques car ils fonctionnent avec la lumière et ses photons. Ils sont parfois appelés matériaux photoniques à bande interdite.

En effet, les photons et les électrons ont des caractéristiques communes (dualité onde-corpuscule). Il existe une analogie formelle entre l'équation de Schrödinger pour l'électron et l'équation d'Helmoltz pour le photon[5]. Une comparaison entre les deux équations montre bien que la permittivité diélectrique relative joue un rôle analogue au potentiel électrique. Sa variation pourra ainsi conduire à l'apparition de bandes interdites pour les photons. Ces bandes interdisent la propagation du photon dans le cristal photonique, raisonnement déjà connu pour les bandes interdites électroniques dans les semi-conducteurs. L'énergie de l'électron ne peut être incluse dans ces bandes d'énergie interdites.

Récemment, il a été prouvé que certaines pierres précieuses et créatures ont des structures cristallines légères, notamment les opales, les souris de mer, les papillons bleus royal, etc. Ce qui leur donne des couleurs magnifiques et vibrantes, et l'agate contient une cellule unitaire rétinienne plus grande que celles trouvées. Dans d'autres cristaux solides bien qu'ils se comportent également dans les gammes de fréquences visibles et infrarouges comme un milieu continu, ils deviennent des cristaux photoniques dans la lumière ultraviolette[6].



Figure I.1 :Image d'un cristal d'opale

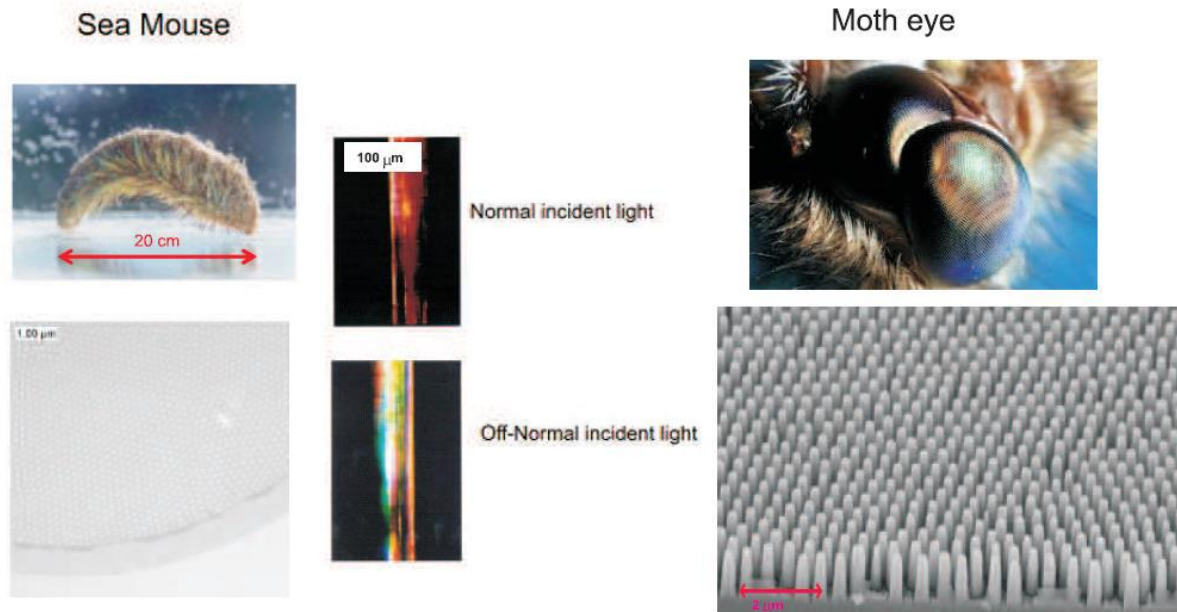


Figure I.2 :Panneau de gauche : Souris de mer (vue générale) ; image au microscope électronique à balayage de la coupe transversale de ses cheveux ; ses cheveux sous une lumière incidente normale (en haut) et oblique (en bas).
Panneau de droite : Month eye (vue générale) et sa nanostructure, obtenue par microscopie électronique à transmission

I.4. Analogie entre l'électron et le photon

Comme les électrons dans les semi-conducteurs, les photons sont répartis dans des bandes de transmission séparées par des bandes interdites.

Les équations qui régissent la propagation de la lumière dans les cristaux photoniques sont les quatre équations de Maxwell.

$$\vec{\nabla} \cdot (\epsilon(\vec{r}) \vec{E}(\vec{r}, t)) = 0 \dots \dots \dots (I.1)$$

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

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{H}(\vec{r}, t) \dots \dots \dots (I.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \epsilon(\vec{r}) \frac{\partial}{\partial t} \vec{E}(\vec{r}, t) \dots \dots \dots (I.4)$$

Après simplification des équations et en appliquant un ensemble d'opérations. On obtient

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\epsilon(\vec{r})} \vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}) \right) = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{H}(\vec{r}) \dots \dots \dots (I.5)$$

L'équation (I.5) est l'analogie formelle de l'équation de Schrödinger décrivant le mouvement des électrons dans le potentiel périodique d'un cristal.

$H(\vec{r})$ Étant l'analogue électromagnétique de la fonction d'onde électronique $\varphi(\vec{r})$ et $\epsilon(\vec{r})$ l'analogie de potentiel atomique $V(\vec{r})$ [7].

I.5. Différents types de cristaux photoniques suivant leurs géométries :

I.5.1. Le cristal photonique unidimensionnel

Les cristaux photoniques unidimensionnels (1D) sont constitués d'alternances périodiques. Direction spatiale unique de deux milieux diélectriques avec permittivité ϵ_1 et ϵ_2 . Un miroir de Bragg est constitué d'un empilement séquentiel de couches. Deux indices de réfraction différents forment un cristal photonique unidimensionnel.



Figure I.3 : Schéma d'un cristal photonique [8]

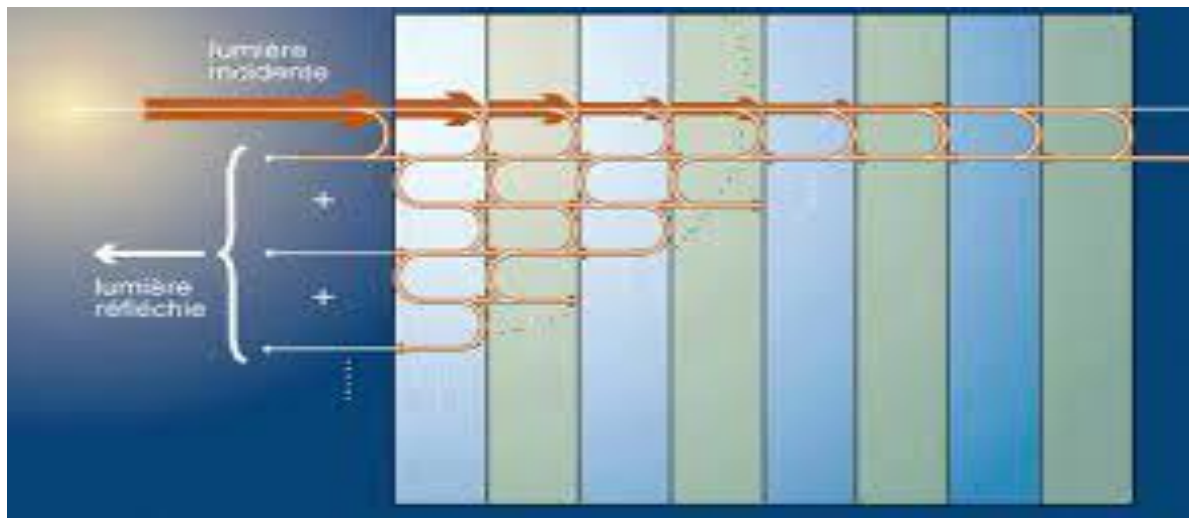


Figure I.4 : Représentation schématisée de l'interférence des ondes réfléchies par chaque dioptre

I.5.2. Le cristal photonique bidimensionnel

Les cristaux photoniques tridimensionnels posent encore de nombreux problèmes de fabrication. Pour cette raison, nous nous intéressons aux cristaux photoniques bidimensionnels qui peuvent être facilement fabriqués.

Il existe plusieurs façons de réaliser ces structures bidimensionnelles. Par exemple, un jonc diélectrique peut être placé dans l'air ou dans un autre isolateur comme cela peut être réalisé par des trous d'air

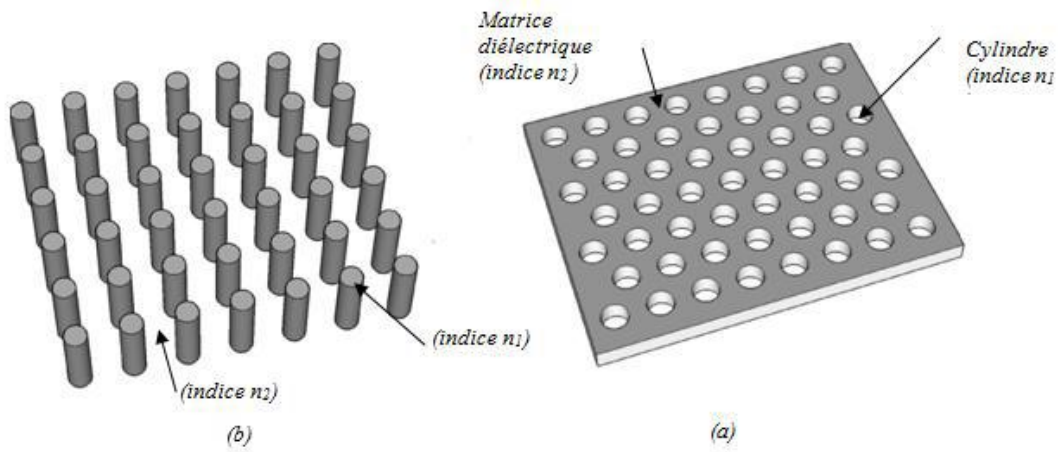


Figure I.5 : Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée[10]

percés dans l'isolateur (Figure I.5). Un cristal photonique bidimensionnel est une structure qui présente une modulation périodique de la permittivité diélectrique suivant deux directions de l'espace, et homogène dans la troisième. Un BIP 2D peut également consister en une série de trous percés dans un diélectrique. La réponse optique de ces structures dépend de la polarisation et peut ne pas avoir une bande interdite parfaite. Une bande interdite parfaite est lorsque la structure interdit la propagation dans toutes les directions du plan périodique, quelle que soit la polarisation. Les structures 2D sont principalement classées en trois familles : grilles carrées, triangulaires et hexagonales (voir Figure I.6)[9].

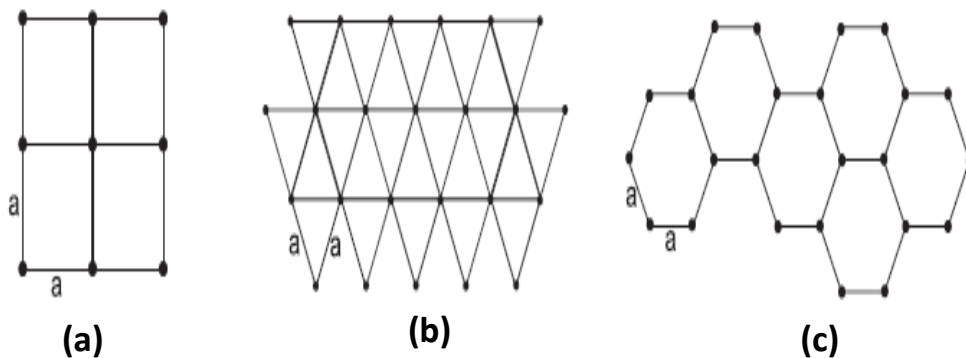


Figure I.6 : Structure 2D : (a) Structure carrée, (b) triangulaire et (c) hexagonale.

I.5.3. Cristaux photoniques tridimensionnels

Une structure tridimensionnelle, comme son nom l'indique, est une structure dans laquelle les constantes diélectriques sont disposées périodiquement dans trois directions. Le premier cristal photonique 3D a été découvert en 1990 par K.M Ho et al. [11]. Il se compose de sphères de silicium disposées dans une structure en diamant. Mais l'histoire conserve généralement le fameux Yablonovitch, une structure micro-onde 3D créée par E. Yablonovitch en 1993.

Cette structure est fabriquée en perçant mécaniquement des trous le long des trois axes d'un réseau en forme de diamant.

Les cristaux photoniques 3D font l'objet de nombreuses recherches car ils permettent d'obtenir des bandes interdites dans les trois directions, mais ils ne sont pas faciles à travailler. Les cristaux photoniques 3D sont difficiles à former des défauts, c'est pourquoi les cristaux photoniques 2D sont actuellement les plus utilisés.

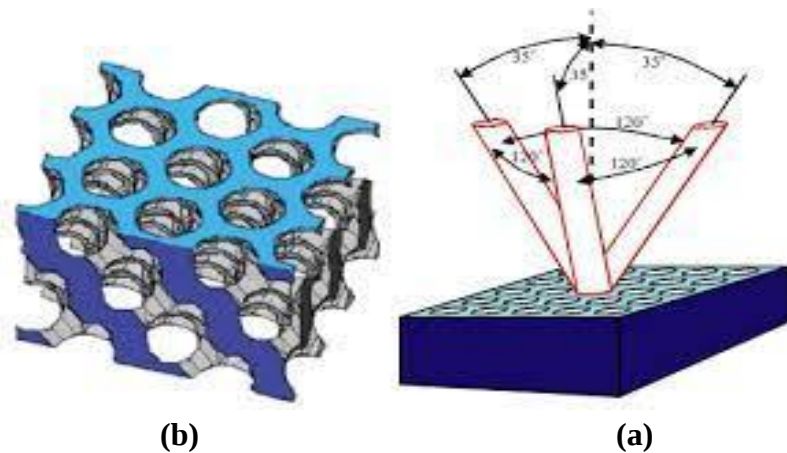


Figure 1.7: Deux exemples célèbres de cristaux photoniques tridimensionnels. . a) Structure « Tas de bois » obtenue en déposant par couches successives des rubans de silicium poly cristallin dans des tranchées de silice. Après avoir bâti la structure, la silice est retirée pour obtenir un cristal photonique 3D Si/air[13]. b) schéma de la yablonovite, structure 3D pour les micro-ondes fabriquée en perçant des trous dans du plexiglas selon trois angles azimutaux séparés de 120° et faisant un angle de 35° par rapport à la normale[12]

I.6.Caractéristiques géométrique et physique des cristaux photoniques

Les caractéristiques des cristaux photoniques sont les suivantes:

a) Périodes :

Les trois directions périodiques qui caractérisent les cristaux photoniques sont une première caractéristique qui caractérise les cristaux photoniques. Ces coefficients géométriques choisis en fonction du domaine fréquentiel étudié affectent les propriétés de la bande interdite optique ouverte.

Prenons l'exemple d'un cristal photonique unidimensionnel, la période $a = (a_1 + a_2)$ avec a_1 l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_1 et a_2 l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_2 .

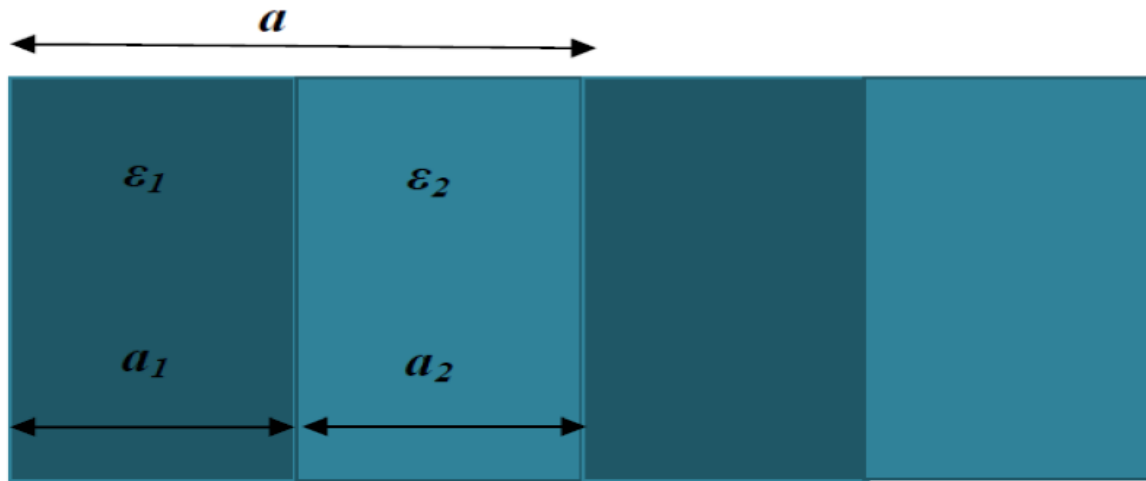


Figure I.8 : Un cristal photonique unidimensionnel.

b) Le contraste d'indice Δn :

Le contraste de l'indice de réfraction (Δn) est la différence des indices de réfraction de deux matériaux n_1 et n_2 . Donnée par la formule suivante :

$$\delta = \frac{n_H}{n_L} \dots\dots\dots (I.6)$$

Avec :

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

n_L : l'indice de réfraction du matériau de faible indice.

a) Le facteur de remplissage f :

Pour un cristal photonique bidimensionnel plan constitué de trous d'air percés dans la matrice diélectrique, le facteur de remplissage f est considéré comme le rapport entre la surface de l'échantillon et l'aire de la cellule unitaire de la grille considérée[14].

$$f = \frac{A_{\text{motif}}}{A_{\text{maille élémentaire}}} \dots\dots\dots (I.7)$$

Pour un motif circulaire de rayon r dans un cristal carré de période a , le facteur de remplissage dans l'air peut être défini comme :

$$f = \pi \left(\frac{r}{a} \right)^2 \dots\dots\dots (I.8)$$

Pour un motif circulaire de rayon r de cristaux triangulaires de période a , la formule du facteur de remplissage dans l'air est :

$$f = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{r}{a} \right)^2 \dots\dots\dots (I.9)$$

I.7. La bande interdite photonique

Le terme bande interdite (ou band gap), a été introduit par lord Rayleigh en 1887 pour expliquer pourquoi la structure se produit. Comme le miroir de Bragg[15].

I.7.1. Structures de bande interdite en général

Parce que les cristaux photoniques sont informatifs, une étude de la structure de la bande est essentielle. En effet, cela nous permet de savoir la répartition du champ électromagnétique dans le cristal, les états permis dans le cristal photonique, 'les modes de Bloch', les positions et les largeurs des bandes interdites, les densités d'états associés aux modes de Bloch.

La terminologie des cristaux photoniques est principalement empruntée à la physique du solide, car il existe des similitudes entre la théorie des ondes électromagnétiques dans les cristaux photoniques et la théorie des ondes électroniques dans les semi-conducteurs cristallins, la physique du solide a été développée plus tôt et une distinction est faite entre la bande interdite complète et la bande interdite directionnelle. Dans la bande interdite parfaite, la propagation est interdite pour toutes les directions et toutes les polarisations. Un émetteur optique intégré dans

un cristal photonique tridimensionnel ne peut pas émettre de photons à des fréquences comprises dans la totalité de la bande interdite. Par conséquent, la bande interdite complète est parfois appelée bande interdite photonique. Lorsque la propagation est interdite dans un sens et autorisée dans l'autre, la bande de fréquence correspondante est appelée bande interdite directionnelle.

Pour les cristaux photoniques unidimensionnels, la direction de propagation pertinente est généralement fixée dans la direction normale aux couches, et on ne distingue pas les bandes interdites complètes et directionnelles. Pour les cristaux photoniques bidimensionnels- réseaux d'inclusions cylindriques parallèles à un certain axe, la bande interdite complète implique en règle générale une propagation interdite dans le plan perpendiculaire à l'axe. Les exceptions sont les fibres dites à cristaux photoniques dans lesquelles seule la propagation le long des axes des cylindres est autorisée (ces cylindres sont pratiquement des vides d'air dans la fibre de verre). Ainsi, non seulement la propagation à travers la fibre mais également la propagation oblique doivent être interdites.

Des cristaux photoniques bidimensionnels composés de tiges métalliques à l'intérieur d'un hôte diélectrique sont également connus et utilisés dans certaines applications. Ils sont pratiquement plus importants en régime basse fréquence qu'en régime cristal photonique. Dans le régime des basses fréquences- c'est-à-dire lorsque la période est beaucoup plus petite que la longueur d'onde-ces réseaux sont appelés supports filaires.

La plupart des cristaux photoniques tridimensionnels n'ont que des bandes interdites directionnelles. Des bandes interdites complètes sont possibles dans les réseaux de type diamant et dans les réseaux dits opales inversés. Quant aux réseaux simples, tels que les réseaux cubiques ou orthorhombiques, une bande interdite complète est possible si les inclusions sont résonnantes. Dans le domaine optique, il peut s'agir par exemple de nanoparticules métalliques. Même les nanoparticules de forme simple telles que les nanosphères de certains métaux subissent les résonances dites de plasmon dans la gamme de la lumière visible. Du point de vue applications, les structures plasmoniques présentent les inconvénients de pertes par dissipation plus importantes. Ici, nous ne considérons pas les cristaux photoniques formés par des inclusions résonnantes. Nous nous concentrons sur les cristaux photoniques de constituants non résonnants.

L'analogie entre les cristaux photoniques et les cristaux naturels n'est simple que pour les cristaux naturels n'est simple que pour les cristaux photoniques 3D. En effet, les cristaux naturels sont un grand milieu d'atomes (ions).

I.7.2. Le Diagramme de bandes

Le calcul du diagramme de bandes d'énergie d'un cristal photonique nous renseigne sur les propriétés (position et largeur) des bandes optiques rédhibitoires pour chaque polarisation.

Dans le cas des réseaux bidimensionnels, il faut considérer deux directions de propagation au lieu d'une seule pour les unidimensionnels. Il existe deux types de polarisations possibles pour les ondes électromagnétiques. La polarisation Transverse Electrique (TE) lorsque le champ magnétique est parallèle à l'axe des trous (des tiges), ou Transverse Magnétique (TM) lorsque le champ électrique est parallèle à l'axe des trous (des tiges).

Les cristaux photoniques sont caractérisés par des diagrammes de bandes. Ces chiffres ont été calculés en utilisant la méthode de décomposition en onde plane. Le facteur de remplissage est $f = 0,30$ et le réseau cristallin photonique est triangulaire. Une bande interdite est observée dans la polarisation TE entre $u = a/\lambda = 0,21-0,27$ (figure I.9(a)). Par contre, la bande interdite ne s'ouvre pas en polarisation TM (Fig1.9 (b)). En effet, il est plus préférable d'ouvrir la bande interdite photonique TE lorsque des zones à haut indice sont associées. Sinon, l'ouverture de la bande interdite pour la lumière polarisée TM est préférée lorsque des zones à faible indice sont connectées (telles que des colonnes diélectriques dans l'air) [17]

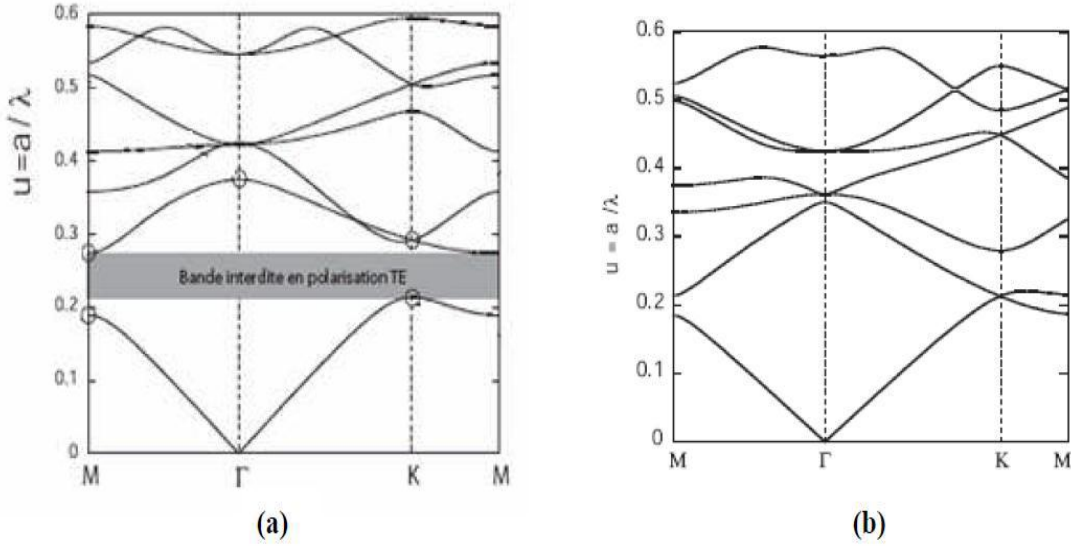


Figure I.9 : Diagramme de bandes d'un cristal photonique (réseau triangulaire) gravé dans un milieu diélectrique de l'indice de réfraction $\epsilon_{\text{substrat}} = 11.4$ avec un facteur de remplissage de $f = 0,30$: (a) polarisation TE ; (b) polarisation TM [18]

I.7.3. Zone du Brillouin

Les vecteurs de base de réseau réciproques couvrent un espace vectoriel qui est communément appelé espace réciproque, ou souvent dans le contexte de la mécanique quantique, espace k . Cette section traite de la construction des zones Brillouin en deux dimensions [19]. La zone de Brillouin est un concept très important en physique du solide. Il joue un rôle clé dans la compréhension théorique des idées initiales des bandes d'énergie électroniques. La première région de Brillouin est définie comme la cellule primitive de Wigner-Seitz du réseau réciproque. Ainsi, l'ensemble des points dans l'espace réciproque est plus proche de $K=0$ que tout autre point du réseau réciproque. Les plans de Bragg divisent les lignes reliant 0 (l'origine) aux points du réseau réciproque. Ainsi, nous pouvons également définir la première région de Brillouin comme un ensemble de points pouvant être atteints à partir de 0 sans traverser aucun des plans de Bragg. Ici, les points communs à la surface de deux régions ou plus ne sont pas pris en compte. La deuxième zone de Brillouin est l'ensemble des points accessibles depuis la première zone de Brillouin en traversant un seul plan. De même, la n ième zone de Brillouin peut être définie comme l'ensemble des points que l'on peut atteindre en traversant $n-1$ avions de Bragg. Nous décrirons d'abord les zones de Brillouin de réseaux unidimensionnels et bidimensionnels (carrés)

pour expliquer les méthodes fondamentales d'obtention des zones de Brillouin avant de décrire les zones de Brillouin de quelques réseaux importants [20].

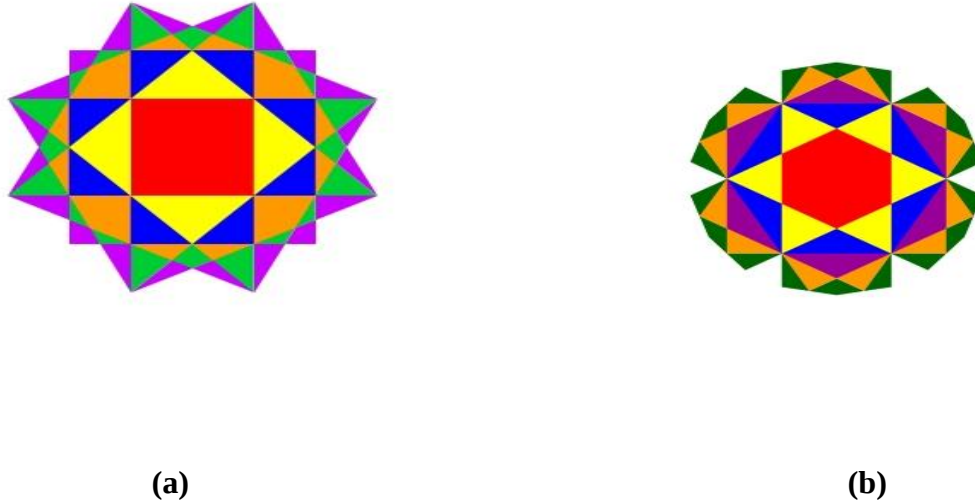


Figure I.10 : Illustration des six premières régions de Brillouin, **(a)** : Réseau réciproque carré 2-D. **(b)** : Réseau alternatif hexagonal 2-D. [21]

I.8. Les défauts

Les écarts par rapport à la structure périodique du cristal représentent des défauts[22]. Certaines propriétés des matériaux sont affectées, telles que les propriétés optiques, électriques et mécaniques lors de la formation des défauts.

Les défauts cristallins sont répartis selon leurs dimensions avec 4 types : défaut ponctuel, défauts linéaire, défaut planaire et défaut volumique.

a. Défauts ponctuels :

Ce sont des défauts sans dimension de l'ordre de la distance interatomique. Il existe trois types d'erreurs ponctuelles : vides, interstitiels et atomes de substitution, comme illustré dans la (figure I.11) ci-dessous. La présence de défauts ponctuels entraîne une distorsion locale du réseau cristallin, créant un champ de contraintes élastiques dans le volume du cristal plus grand que le défaut lui-même [23].

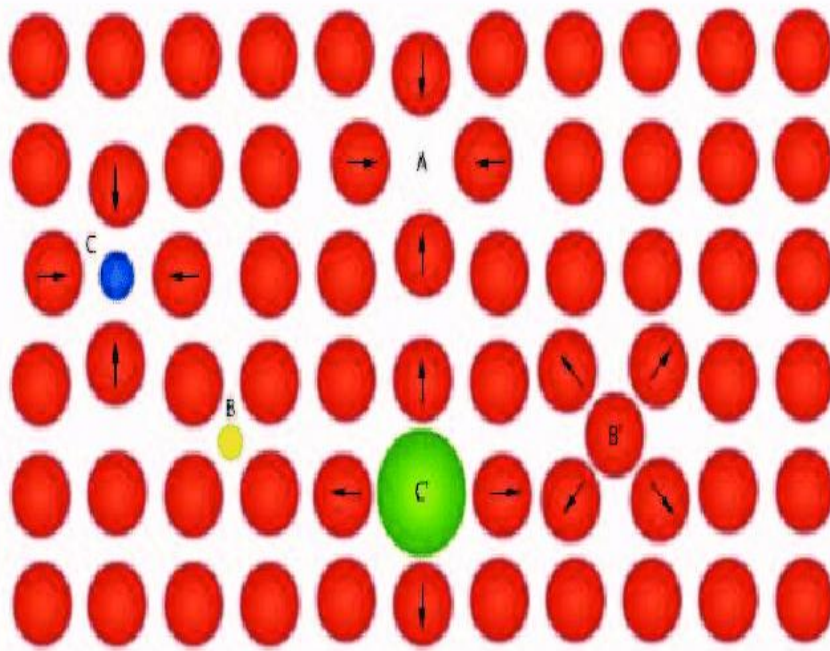


Figure I.11 : Différents types de défaut ponctuel dans les cristaux : (a) lacune, (b) atome étranger interstitiel, (b') auto-interstitiel et (c) atome étranger en substitution

b. Défauts linéaires :

Le principal type de défaut 1D sont les luxations. La théorie décrivant le champ élastique des défauts linéaires a été développée pour la première fois par Vito Volterra en 1907[24].

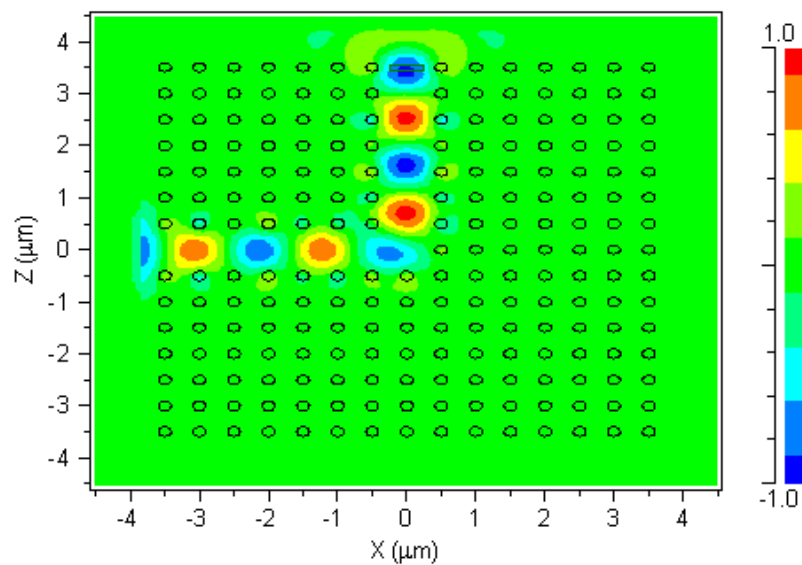


Figure I.12 : Illustration de la propagation du champ dans un cristal à défaut linéaire.

Il existe deux types de dislocations droites : les dislocations coin et les dislocations vis. En pratique, les dislocations présentent souvent, en proportion donnée, la caractère coin et le caractère vis : on parle alors de dislocations mixtes. Ces dislocations sont courbes (ou gauches) et en chaque point on peut les décomposer en un composant coin et une composante vis[25].

c. Défauts planaires :

Les défauts plans correspondent à des régions désordonnées du cristal dont le volume est comparable à celui des plans atomiques. Des exemples de défauts plans sont de vrais échantillons de cristal ou des surfaces libres entourant les joints de grains, surfaces frontières entre les cristallites constituant les échantillons polycristallins. Les défauts d'empilement sont également courants dans les structures compactes formées par les métaux[26].

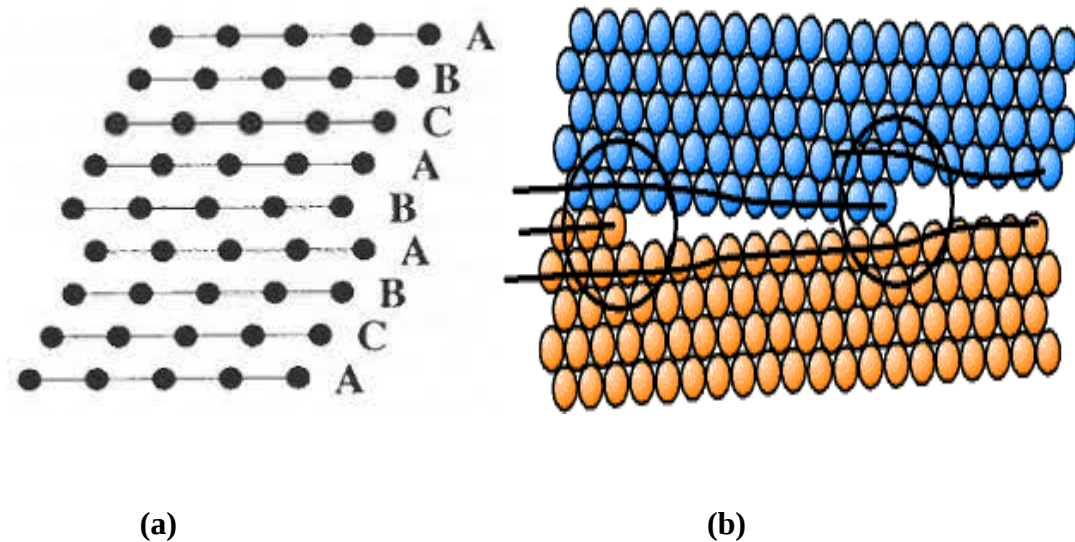


Figure I.13: a) Représentation schématisée de l'arrangement des atomes au niveau d'un joint de grain dans un échantillon polycristallin b) Défaut d'empilement produit par l'absence d'un plan C dans la séquence ...ABC

d. Défauts volumiques :

Les défauts volumiques les plus courants sont les précipités, formés par l'inclus phase cristalline au sein d'une autre[26].

I.9.Cavités

En 1996, les premières cavités dans des cristaux photoniques bidimensionnels ont été réalisées. Une cavité optique est un dispositif dans lequel certains rayons lumineux sont

susceptibles de rester confinés grâce à des miroirs sur lesquels ils se réfléchissent. En fonction de la forme de la cavité, seules quelques longueurs d'ondes, correspondant à des modes de résonance, y sont présents. Pour contrôler la lumière à l'échelle nanométrique, les chercheurs développent des nano-cavités optiques à base de cristaux photoniques. Ces nanostructures périodiques affectent la propagation des ondes électromagnétiques et aident ainsi à manipuler et stocker les photons dans de tous petits volumes. Leur fabrication imposant des techniques à la pointe des nanotechnologies, les cristaux photoniques présentent souvent de légers «défauts de fabrication » impactant plus ou moins fortement les propriétés optiques des nano-cavités réelles, et les éloignant ainsi légèrement des prédictions théoriques : la longueur d'onde de résonance des nano-cavités à cristaux photoniques observée est par exemple souvent décalée légèrement vers le bleu ou vers le rouge par rapport à ce qui est prédit théoriquement. Accorder de manière très précise et réversible ces nano-cavités est l'un des défis actuels de la nano-photonique[27].

I.10.Méthode de modélisation numérique

Dans cette section, nous présentons des méthodes de simulation utiles pour la conception de structures à cristaux photoniques. Parmi ces méthodes, il en existe de nombreuses. On présentera deux méthodes principales. Il existe la méthode des ondes planes pour calculer le modèle de bande et la méthode FDTD, qui est la plus couramment utilisée pour calculer la réponse spectrale de l'appareil.

a. La méthode des ondes planes :

La méthode *plane Wave Expansion* (PWE) est une technique numérique populaire pour résoudre les problèmes électromagnétiques périodiques. Cette technique est basée sur la décomposition du champ électromagnétique en une superposition d'ondes planes. Les équations de Maxwell sont exprimées dans le domaine fréquentiel et transformées en un problème aux valeurs propres. La solution de ce problème aux valeurs propres donne le champ électromagnétique et la fréquence correspondant à chaque sur de plan[28].

Cette méthode été utilisée par certains auteurs pour déterminer les bandes photonique interdite des structures triangulaires 2D [29].Elle permet obtenir la carte de champ dans la structure et donc la polarisation et la symétrie modes de structure photonique. Il est également possible de rechercher des choses spécifiques avec la méthode PWM structures aperiodes telles que les

conducteurs à cristaux photoniques ou les cristaux photoniques ou les cristaux photonique planaire avec technologie « super cellule ».

b. La méthode FDTD (finite difference time domain) :

La méthode du domaine temporel des différences finies (FDTD) est un outil rigoureux et puissant pour modéliser des dispositifs optiques à l'échelle nanométrique. Elle a été proposée pour la première fois par K. S. Yee en 1966[30]. La méthode FDTD résout les équations de Maxwell directement sans utiliser d'approximations physiques. La taille maximale du problème n'est limitée que par la quantité de puissance de calcul disponible. Son originalité réside dans la résolution du système d'équations directement dans le domaine temporel plutôt que dans le domaine fréquentiel, permettant de visualiser la propagation des ondes électromagnétiques dans les cristaux photoniques. Cette méthode est particulièrement intéressante pour connaître la sensibilité spectrale du système et pour calculer la distribution du champ électrique dans des structures de dimension finie [31].

1. Les applications de la méthode FDTD :

- Fuite électromagnétique et conception de l'antenne
- Conception CEM/EMI
- Simulation du problème de la propagation des ondes
- Résoudre l'équation aux dérivées partielles
- Analyse du guide d'ondes
- Analyse strip-line et microstripline.....etc.

2. Limites de la méthode FDTD :

- L'espacement de la grille doit être $\lambda/10$
- Selon la condition de stabilité de courant, le pas de temps ΔT devient petit lorsque le pas de grille FDTD devient petit.
- En 3D simulation, les échelles de temps de simulation sont N^4 et les échelles de taille de mémoire requises sont N^3
- L'application est limitée de taille relativement petite

3. Inconvénients du FDTD :

Les champs sont calculés à n'importe quel point de la structure et à chaque pas de temps, il est donc très lent et nécessite de grandes ressources de calcul. De plus, le temps de calcul T peut être

long pour les structures de résonance et les résultats peuvent dépendre de la source et du milieu utilisés.

Références :

- [1] S. Asmaa, “Propriétés optique des cristaux photoniques unidimensionnels périodiques.” Mémoire de Master, Université de Mostaganem, 2018.
- [2] E. Yablonovitch, “Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics,” *phys. Rev. Lett.*, vol. 58, pp. 2059, 1987.
- [3] R. Zengerle, “light propagation in singly and doubly periodic planar Waveguides.” *journal of Modern optics*, vol. 34, p. 1589-1987.
- [4] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, and K. M. Leung, “photonic band structure: the face-centered-cubic case employing nonspherical atoms”, *phys. Rev. Lett.*, vol. 67, N° 17, 2295-2298, 1991.
- [5] D. W. Prather, A. Sharkawy, S. Shi, J. Murakowski, G. Schneider, “Photonic crystals, theory, applications and fabrication,” John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [6] Nixon, M.R.; Orr, A.G.; Vukusic, P. Subtle design changes control the difference in color reflection from the dorsal and ventral wing-membrane surfaces of the damselfly *Matronoides cyaneipennis*. *Optics Express* (2013) , 21(2), 1479–. doi:10.1364/OE.21.001479,
- [7] H. Abri Badaoui, “ Etude et conception des micros composants à base des cristaux photoniques bidimensionnels ”, Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2012.
- [8] F. Kiheli, K. Djebrit, “ Conception des diviseurs de puissance optique 1x2, 1x3 et 1x4 à base des cristaux photoniques ”, Mémoire Pour l'obtention du Diplôme de Master Académique, Université Kasdi Merbah OUARGLA, 23/10/2020
- [9] A. Benmerkhi, “Optimisation du confinement de la lumière dans des cavités a cristaux photoniques.” thèse de Doctorat, Université Mentouri-Constantine, 20/05/2012.
- [10] Y. Merle, “ Etude de la dispersion électronique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels ”, Thèse de doctorat n° 47-2003, Université de Limoges, Novembre 2003.
- [11] M. Notomi, A. Shinya, K. Yamada, J. Takahashi, C. Takahashi, I. Yokohama, “Single mode transmission within photonic bandgap of width-varied single-line-defect photonic crystal waveguides on SOI substrates. ” *Electronics letters*, 2001, vol 37, n° 5, p 293-295.
- [12] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, R. D. Meade, A. M. Rappe, K. D. Brommer, and J. Joannopoulos. Donor and acceptor modes in photonic band structure. *Phys. Rev. Lett.*, 67 :3380–3383, 1991
- [13] S. Y. Lin, J. G. Fleming, D. L. Hetherington, B. K. Smith, R. Biswas, K. M. Ho, M. M.

- Sigalas, W. Zubrzycki, S.R. Kurtz, and J. Bur. A three-dimensional photonic crystal operating at infrared wavelengths. *Nature*, 394(6690) :251–253, 1998.
- [14] BOUGRIOU Fiada, “ Etude des guides d'ondes à cristaux photoniques bidimensionnels , ” These de Magister université de Constantine, 2008.
- [15] E. Youssra, M. Thomas, “Fabrication de cristaux photoniques 3D: « BANDE INTERDITE ».” Rapport de projet tuteuré, Université nice Sophia Antipolis”
- [16] <https://precisionmmw.com/understanding-tem-te-and-tm-waveguide-modes/> (18/03/2023)
- [17] “ J.D. Joannopoulos, R.D. Meade, and J.N. Winn « Photonic Crystals, Molding the Flow of Light », Princeton University Press, 1995.”
- [18] Barbara WILD “ Etude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photoniques bidimensionnels et de leur accordabilité ”, Thèse de doctorat n° 3573, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2006
- [19]https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/TLP_Library_I/08%3A_Brillouin_Zones/8.03%3A_Section (20/03/2023)
- [20] <https://www.sciencedirect.com/topics/mathematics/brillouin-zone> (21/03/2023)
- [21] https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/brillouin_zones/zone_construction.php (23/03/2023)
- [22] R. E. Reed-Hill, *Physical Metallurgy Principles*, 2009, 1994 Cengage Learning.
- [23] <https://nte.mines-albi.fr/SciMat/fr/co/SM3uc1.html> (27/03/2023)
- [24] Vito Volterra (1907) "Sur l'équilibre des corps élastiques multiplement connexes", *Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure*, Vol. 24, p. 401–517
- [25]<https://nte.mines-albi.fr/SciMat/fr/co/SM3uc2-2.html> (28/03/2023)
- [26]https://www.academia.edu/35047190/L3_Physique_et_Applications_Structure_de_la_mati%C3%A8re_Chapitre_VI_Défauts_dans_les_cristaux (25/03/2023)
- [27]techno-science.net/actualite/accorder-nano-cavites-optiques-base-cristaux-photoniques-N15005.html(02/04/2023)
- [28]“B. Kenza, S. Hajer,“Etude et conception des capteurs à cristaux Photoniques pour des applications biomédicales. ”, Thèse de Master, Université Mohamed Boudiaf - M’sila, 17/6/2023.
- [29]M. Plihal and A. Maradudin, “Photonic Band Structure of Two-Dimensional Systems.”, *Phys. Rev. B*, Vol. 44, n° 16, pp. 8565-8571, 1991.

[30] K. S. Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media.”, IEEE Trans. Antennas and Propagation, 14,p. 302–307, 1966.

Chapitre II :

Capteurs optiques à base cristaux photoniques

II.1. Introduction

Le développement des capteurs miniaturisés, biocompatibles avec une réponse en temps réel et une simple utilisation est devenu un enjeu majeur pour répondre aux besoins actuels dans des domaines aussi variés que la médecine, la métrologie, la sécurité, l'agroalimentaire et le contrôle qualité ... etc.

Parmi les dispositifs divers basés sur les Cristaux Photoniques on trouve les capteurs. En particulier, Cristaux Photoniques sont très attrayants en tant que plateforme de détection optofluidique parce qu'ils possèdent des vides naturels qui permettent l'infiltration de fluide

Actuellement les capteurs optiques représentent les dispositifs les plus attrayants quant à la détection biomoléculaire sensible, et sont maintenant adoptés et exploités dans tous les domaines de la vie courante (qualité de l'eau et de quelques produits de l'agroalimentaire, analyses biologiques, dépollution, ...)

Les capteurs optiques présentent de nombreux avantages pour répondre aux différents besoins, Ils sont relativement faciles, peu coûteux à fabriquer facilement, transportables et peuvent être utilisés pour une grande variété de fluides et d'environnements. Récemment, il y a eu plusieurs travaux de recherches utilisant les cristaux photoniques en tant qu'élément de détection en raison de leur structure de bande et du confinement de la lumière. Le principe de détection de ces capteurs consiste à la mesure de la variation de la longueur d'onde lorsque l'indice de réfraction est modifié. Les paramètres liés à leurs performances sont illustrés par la sensibilité, la sélectivité, la spécificité et la durabilité.

Dans ce chapitre on commencera par quelques notions où on donnera d'abord un aperçu complet des capteurs, et on portera une attention particulière à la description des capteurs optiques et des capteurs à base de cristaux photoniques. On étudiera ensuite les différents types de capteurs à cristaux photoniques, tels que les capteurs de pression, les capteurs de température, les capteurs biomédicaux, et les capteurs de déplacement avec des exemples de leurs applications.

II.2. Généralités sur capteur

II.2.1. Définition

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs...), on a besoin de contrôler des paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité...). Le capteur est l'élément indispensable à la détection de ces grandeurs physiques. Un capteur est un organe de prélèvement d'informations qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande... [1]



Figure II. 1 : Principe d'un capteur [2]

II.2.2. Classification des capteurs [3]

Les capteurs ont plusieurs modes de classification :

- **Apport énergétique**

1. Capteurs passifs:

Ils n'ont pas besoin d'apport d'énergie extérieure pour fonctionner. Ce sont des capteurs modélisables par une impédance. Une variation du phénomène physique étudié (mesuré) engendre une variation de l'impédance.

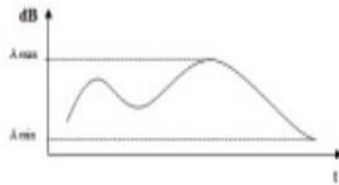
2. Capteurs actifs:

Ils sont constitués d'un ensemble de transducteurs alimentés. Ce sont des capteurs que l'on pourrait modéliser par des générateurs comme les systèmes photovoltaïques et électromagnétiques. Ainsi ils génèrent soit un courant, soit une tension en fonction de l'intensité du phénomène physique mesuré.

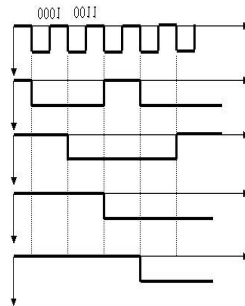
- **Type de sortie**

Les capteurs peuvent aussi faire l'objet d'une classification par type de sortie : [4]

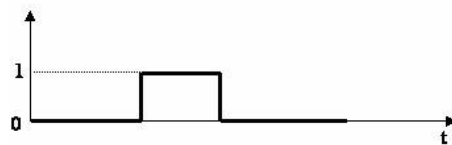
1. Les capteurs analogiques



2. Les capteurs numériques



3. Les capteurs TOR



II.2.3. Structure d'un capteur [4]

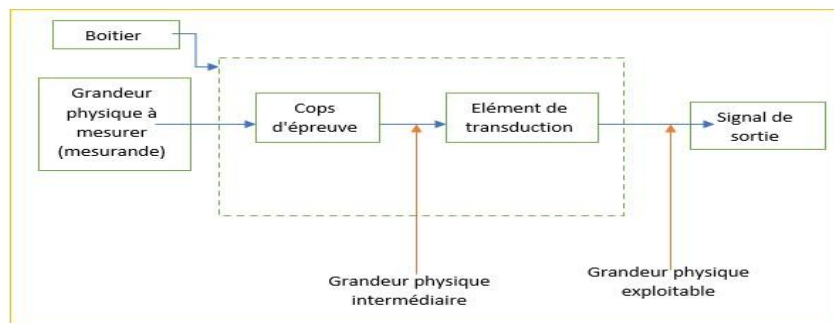


Figure II.2: Structure d'un capteur

II.2.4. Rôle du capteur

Parmi les informations de toutes natures issues de notre environnement, on distingue les grandeurs physiques associées à des événements climatiques, géométriques ou encore lumineux ou temporels. Le rôle du capteur est de rendre exploitable ces différentes grandeurs physiques en vue de leur traitement ultérieur. [5]

- Mesure de présence : indique la présence d'un " objet" à proximité immédiate ;
- Mesure de position, de déplacement ou de niveau : indique la position courante d'un objet animé d'un mouvement de rotation ou translation ;
- Mesure de vitesse : indique la vitesse linéaire ou angulaire d'un "objet" ;
- Mesure d'accélération, de vibration ou de chocs ;
- Mesure de débit, de force, de pressions ;
- Mesure de température, d'humidité ;

II.2.5. Caractéristiques d'un capteur

Certains paramètres sont communs à tous les capteurs. Ils caractérisent les contraintes de mise en œuvre et permettent le choix d'un capteur : [6]

1. Etalonnage

L'étalonnage du capteur comprend l'ensemble des opérations qui permettent d'explicitier, sous forme graphique ou algébrique, la relation entre les valeurs du mesurande et celle des grandeurs électriques de sortie:

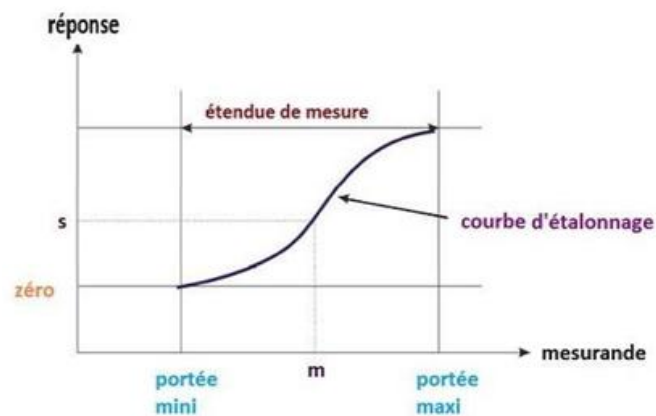


Figure II.3: Courbe d'étalonnage d'un capteur

2. Linéarité

Cette notion caractérise la proximité entre la caractéristique réelle d'un capteur et une droite fictive qui serait celle approchant le mieux la relation réelle entre le signal de sortie et grandeur mesurée sur l'ensemble de l'étendue de mesure [7].

3. Sensibilité (s) :

Ce paramètre caractérise la capacité du capteur à détecter la plus petite variation de la grandeur à mesurer. C'est le rapport entre la variation ΔV du signal électrique de sortie pour une variation donnée $\Delta \Psi$ de la grandeur physique d'entrée : [6]

$$S = \Delta V / \Delta \Psi \dots\dots\dots (II.1)$$

4. Temps de réponse ou rapidité :

C'est le temps de réaction d'un capteur entre la variation de la grandeur physique qu'il mesure et l'instant où l'information est prise en compte par la partie commande [6].

5. Résolution (Précision) :

La précision caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des indications proches de la valeur vraie de la grandeur mesurée [7].

II.3. Capteurs optiques

Depuis ces dernières années, le développement des capteurs électriques a donné naissance à des dispositifs très performants exploitables dans différents domaines résultants des exigences accrues en matière de miniaturisation, temps de traitement de l'information, diminution des pertes et réduction de la pollution.

Les capteurs optiques sont des dispositifs capables de détecter l'intensité lumineuse et de la transformer en une grandeur mesurable. Ils sont performants pour détecter la chaleur, la couleur ou encore la présence de certains gaz ou composants chimiques [6] [8]. Les capteurs optiques à base de fibres optiques, de plasmons de surface, de guides d'ondes planaires ou de cristaux photoniques sont privilégiés pour leur haute sensibilité et leur analyse non destructive. Il existe plusieurs types de capteurs optiques, tels que les capteurs de température, de pression, d'humidité, de déplacement et les biocapteurs. Diverses techniques de détection liées à ces

capteurs sont basées sur des changements dans l'information qui caractérise les ondes lumineuses. [5]

II.4. Capteurs à base de cristaux photoniques

Quand les indices de réfraction sont modifiés, la longueur d'onde des chutes ou les crêtes sont décelables. Des capteurs photoniques à base de cristaux photoniques bidimensionnels [9] ont démontré leur capacité, à la fois théoriquement et expérimentalement à détecter des éléments biochimiques en raison du mécanisme du confinement de la lumière fournie par la bande interdite photonique [10]. Le principe de fonctionnement de ces capteurs repose sur la variation de leurs propriétés optiques lorsque l'indice de réfraction des substances à analyser change en mesurant le décalage de la longueur d'onde de résonance dans le spectre de transmission en fonction de l'indice de réfraction du liquide. Différents types de cristaux photoniques sont utilisés comme capteurs à cause de leur haute sensibilité aux variations d'indices de réfraction, par exemple :

1. Capteur de pression, capteur de température, capteur biomédical et déplacement à base de cristaux photoniques
2. Des lasers à base de cristaux photoniques qui ont été utilisés comme biocapteurs par la surveillance des changements du spectre de sortie du laser dus aux changements de l'indice de réfraction du matériau de sa cavité, ce qui permet la détection d'infime variation d'indice de réfraction à l'intérieur des échantillons de volumes femto-litres [11]
3. Les fibres à cristaux photoniques, qui peuvent guider la lumière par effets de bandes interdites photoniques, non pas par réflexion totale interne, ont été utilisés dans la bio détection [12] [13].
4. Hdphotoniques colloïdales ont été également des candidats dans la bio détection [14] [15].
5. D'autres chercheurs utilisent les pores des cristaux photoniques comme des micros canaux: le fluide passe à travers le cristal photonique et la variation de l'indice de réfraction est détectée [16].

II.4.1. Capteur de pression à base de cristaux photoniques

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 [7] 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.

Certains capteurs 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 [17]

Exemple de capteur réalises

Comme un exemple de capteur de pression à base de cristaux photonique nous allons citons quelques designs [18].

a. Première application

a.1. Structure du capteur

Le désigne de T. ZOUACHE et de A. HOCINI. Le guide d'onde les deux portions de guides d'ondes qu'utilise la structure sont réalisés de la même face que pour le désigne précédent c'est à dire en éliminant des demi-rangée de trous diélectriques.

Sur un substrat en SiO₂ d'indice de réfraction de 1.45 on fait croître un slab de silicium d'indice de réfraction n de 3,5 [19] dans lequel on réalise par la suite des trous d'air d'indice de réfraction n de 1 en forme de réseau hexagonal. La figure II.4, donne la structure finale du capteur. Cette structure est caractérisée par les paramètres suivants :

- 1 Une bande interdite optique pour les longueurs d'ondes situées entre 1.2818 μ m et 1.70016 μ m
- 2 Un rayon r de 0.3a

3 Un
cavité de

rayon de
0.36a.

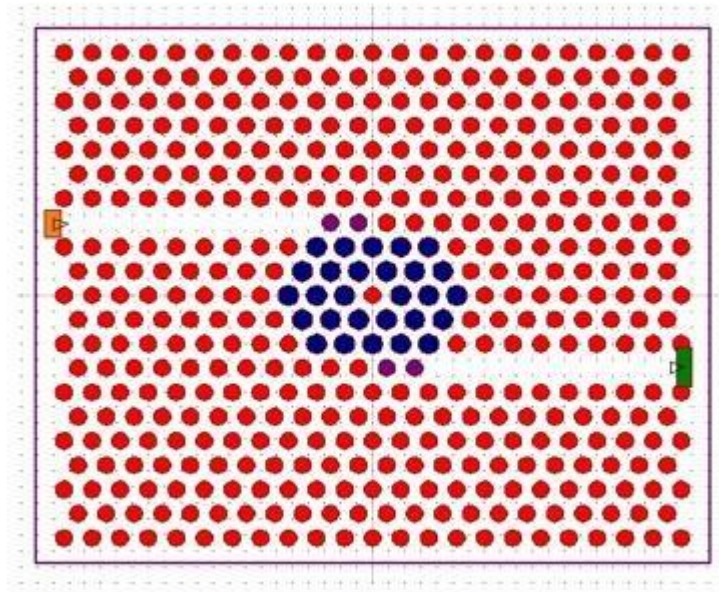


Figure II.4 : Structure finale du capteur de pression adoptée [19]

a.2. Résultats

Cette structure et après sa réalisation et son optimisation, a pu fournir sensibilité RI de **393.7 nm/URI** et un facteur de qualité **Q** de **673.3**, ce qui la rendre un très bon support pour la réalisation d'un capteur à pression. En effet avec ce design, les auteurs de ce travail ont pu réaliser un capteur de pression de sensibilité pouvant atteindre **15.7 nm/GPa**. Cette sensibilité était très importante et en la comparant avec la littérature du domaine, elle a présenté une valeur très compétitive [19]

b. Deuxième application

b.1. Structure du capteur

Deuxièmement le désigne de Saeed OLYAEE and Ali Asghar DEHGHANI (voire figure II.5). 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 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 [17].

Le résonateur conçu par la nano-cavité à cristaux photonique possède un facteur de qualité (Q) élevé et peut être utilisé dans de nombreuses applications. Ce facteur de qualité Q 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 II.5 donne la structure finale du capteur.

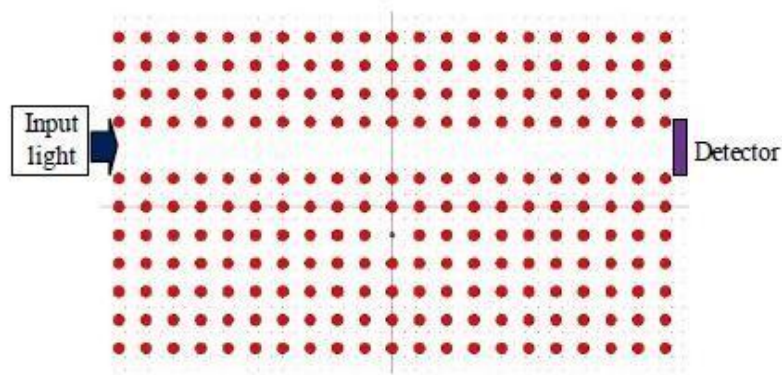


Figure II.5 : La structure finale du capteur de pression proposée [17]

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 [17].

b.2. Résultats

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, une étude approfondie a été effectuée.

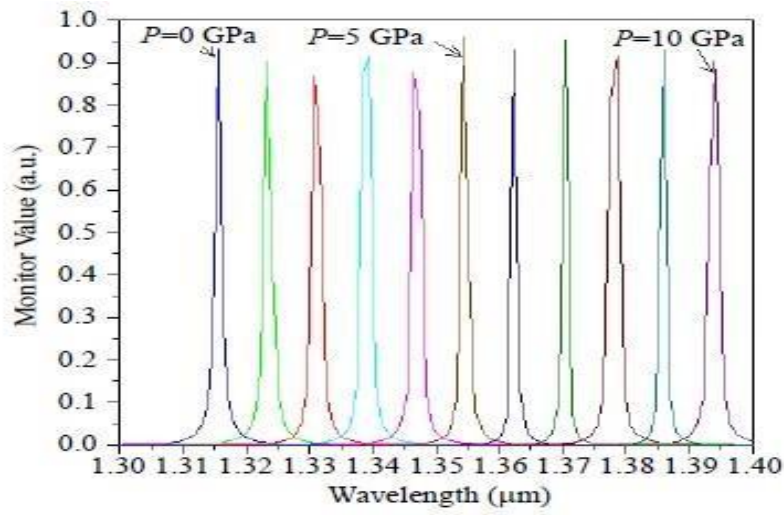


Figure II.6 : réponse de capteur pour différentes valeurs de pression [17]

Les simulations ont été réalisées pour différentes valeurs des pressions de 0 à 10 GPa par incrément de 1 GPa à chaque étape [17].

Les courbes de la Figure II.6 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'une valeur dépendante de la pression hydrostatique appliquée [17].

II.4.2. Capteur de déplacement à base cristaux photoniques

De nombreux efforts scientifiques ont été consacrés dans le but de faire des mesures de micro et nano déplacements avec grande précision en utilisant des capteurs à base de cristaux photoniques et des interféromètres laser [20][21], en raison de leurs précisions de mesure des micro-déplacements tout en ayant des tailles ultracompactes. En outre, les capteurs de micro-déplacements pourraient également être potentiellement important pour des applications telles que les systèmes NEMS optique (nouveau type de capteur nano- électromécanique), la microscopie à force atomique et la détection biochimique méritant ainsi une place d'éléments clés de la mesure dans les systèmes nano-électromécaniques (NEMS) [22][23].

Exemple de réalisation

Les premières conceptions ultrasensibles qui ont été proposés par O. Levy et al [24]. Pour la détection de déplacement, ils ont utilisé des guides d'ondes à cristaux photoniques. Ces auteurs dans leurs temps, avaient démontré que de tels dispositifs pouvaient fournir une sensibilité de proche de $1\mu\text{m}^{-1}$ avec une source lumineuse de $9,02\text{ }\mu\text{m}$.

Tableau II.1. Sensibilité du capteur proposé par zhenfeng Xu et dans chaque segment de déplacement considéré [24]		
déplacement (a)	Fréquence de travail ($2\pi c/a$)	Sensibilité(a^{-1})
-0.55 à -0.4	0.343	1.9
-0.4 à -0.2	0.341	1.62
-0.2 à 0	0.339	1.46
0 à 0.2	0.332	1.15
0.2 à 0.4	0.330	1.01
0.4 à 0.6	0.328	0.781

Puis Z. Xu et al [25], ont présenté un capteur de micro déplacement utilisant un cristal photonique bidimensionnels déconnecté (le matériau utilisé avait un indice de réfraction de 3.4) de réseau carré muni d'un défaut sous forme de cavité résonante linéique. Le cristal photonique formant le capteur a été divisé en deux segments, un segment fixe et l'autre mobile. Ce capteur pouvait mesurer le déplacement dans une plage de $-0,55a$ à $0,60a$. Pour l'étude du comportement de ce capteur cette plage a été segmentée en 6 sous-plages et chaque plage de déplacement ayant sa propre longueur d'onde d'excitation et les Résultats obtenus par Zhenfeng Xu et al sont regroupé dans le Tableau II.1

En 2014, s. Olyee et al [26], ont levé le rideau sur une autre structure de capteur doté de haute sensibilité par rapport à la littérature précédente. Ce capteur été réalisé avec un matériau d'indice de réfraction $n = 3.4$ dans le quel est creusée une matrice de trous d'air suivant un réseau carré comme le montre figure suivante (Figure II.7).

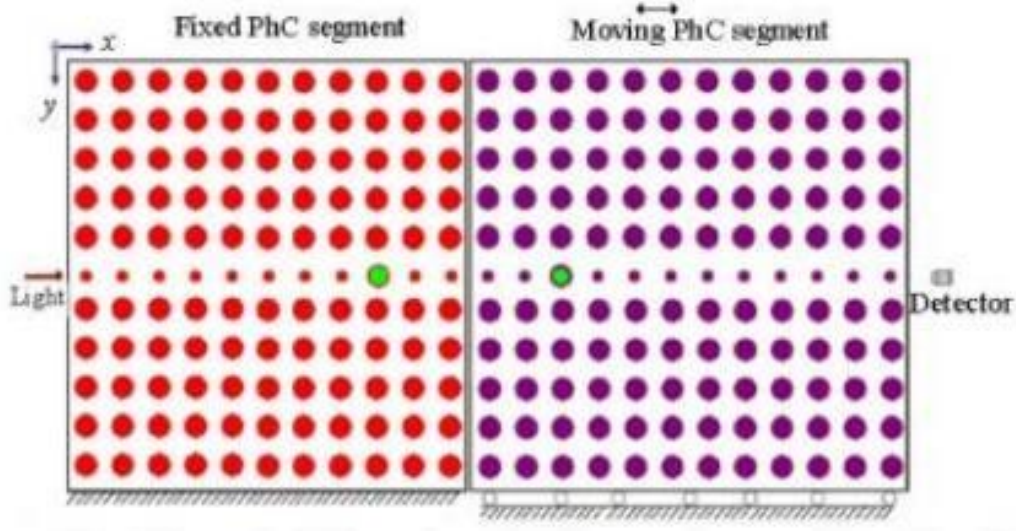


Figure II.7: Capteur de déplacement proposé par saeed OLyae Morteza AZIZI [26]

En choisissant une longueur d'onde convenable de $2.7 \mu\text{m}$, la sensibilité qu'ils ont pu avoir est de $3.6\mu\text{m}^{-1}$ - $3.8 \mu\text{m}^{-1}$ selon le rayon des trous choisi (en choisissant un rayon de trous entre $0.49 \mu\text{m}$ et $0.51 \mu\text{m}$, la sensibilité et la régression ont des valeurs optimales) avec un facteur de qualité proche de 180. La linéarité de ce capteur est assurée dans l'intervalle de $0.0 \mu\text{m}$ à $0.5 \mu\text{m}$.

Dans la même année P. Rani et al [27], ont proposés un capteur de nano-déplacement utilisant un réseau de trous de forme hexagonale creusés dans un slab en silicium (Si) divisé en deux segments l'une fixe et l'autre (voire figure en bas). Un guide d'ondes est réalisé dans les deux segments en enlevant la rangée de trous centrale complète de chaque côté. La structure est conçue de façon à ce que le segment mobile ait deux degrés de libertés, cela veut dire qu'il peut se déplacer dans la direction horizontale ou verticale comme présentée en Figure II.8

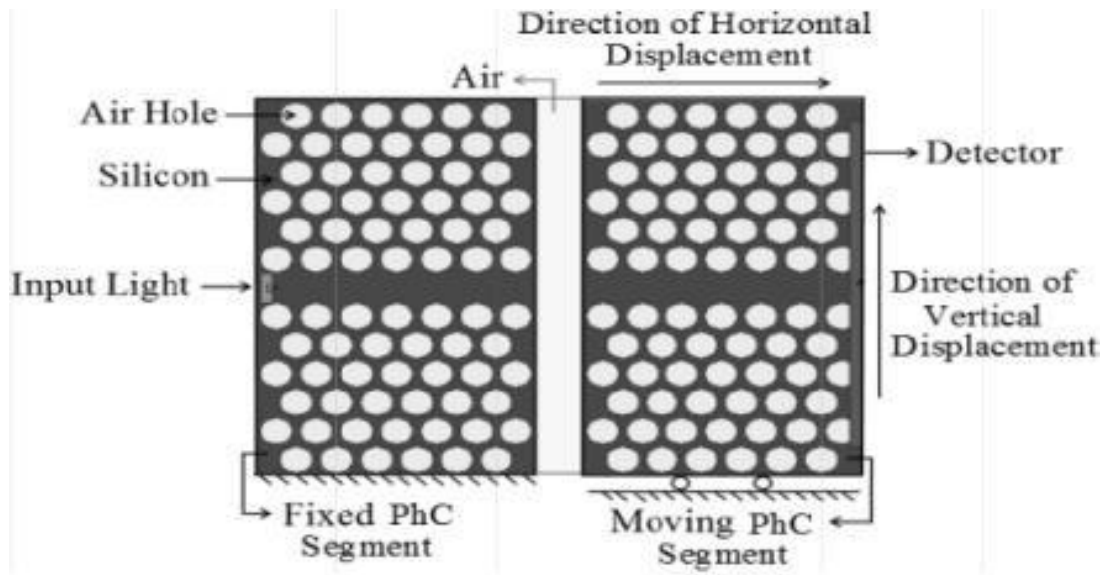


Figure II.8: Capteur de déplacement proposé Par P. Rani et al [27]

Cette structure a fourni une grande sensibilité de $0,00461 \text{ nm}^{-1}$ pour un déplacement horizontal du guide d'onde en mouvement de 40 nm à 120 nm. Pour le déplacement vertical du guide d'onde de la partie en mouvement, la structure est très sensible dans la région 150 nm à 200 nm avec une sensibilité de $0,00684 \text{ nm}^{-1}$ pour un déplacement horizontal nul, de 130 nm à 200 nm avec une sensibilité de $0,00523 \text{ nm}^{-1}$ pour un déplacement horizontal de 10 nm, de 130 nm à 200 nm avec une sensibilité de $0,00418 \text{ nm}^{-1}$ pour un déplacement horizontal de 20 nm, 130 nm à 200 nm avec une sensibilité de $0,00461 \text{ nm}^{-1}$ pour un déplacement horizontal de 30 nm, 100 nm-130 nm avec une sensibilité de $0,00466 \text{ nm}^{-1}$ pour un déplacement horizontal de 40 nm. D'après les résultats qu'ils ont obtenus grâce à ce design, ils ont conclu que cette structure peut être utilisée comme capteur de Nano-Déplacement pour les déplacements horizontaux et verticaux.

II.4.3. Capteur biomédical

Comme exemple d'application de la dernière structure optimisée, il a été démontré théoriquement que cette structure peut être bien utilisée comme le capteur biomédical pour la mesure de la concentration de glucose [28].

Par conséquent, pour étudier la relation entre la sensibilité à l'indice de réfraction et la concentration de glucose, une plage d'indice de réfraction a été sélectionnée pour correspondre aux échantillons de concentration de glucose allant de 0 à 60 g / l.

La solution de RI de glucose peut être calculée par la relation suivante [29] :

$$n = 0.00011889C + 1.33230545 \dots \dots \dots (II.2)$$

Où C est la concentration en glucose (g / L) et n est la solution de glucose RI.

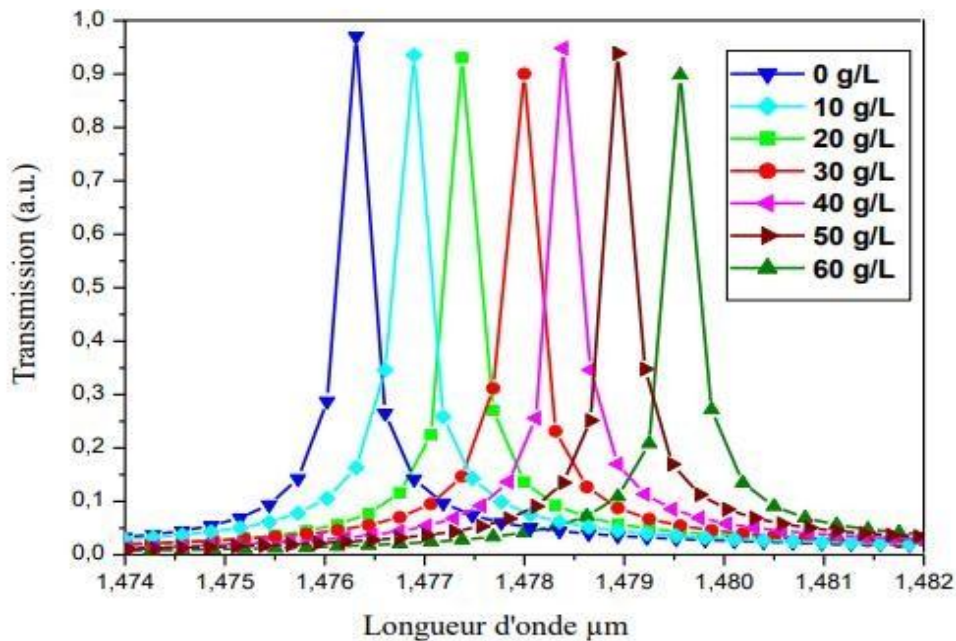


Figure II.9: Transmission du biocapteur conçu en fonction des changements de l'indice de réfraction correspondant aux sept états d'infiltration des concentrations de glucose.

Le spectre de transmission, de la cavité en fonction des changements d'indice de réfraction correspondant aux sept états d'infiltration des concentrations de glucose est montré sur la Figure II.9. Le pic de résonance est située à 1476.3 nm ($a / \lambda = 0,2370$) et a été identifié comme mode de référence cela correspond à 0 g / L de concentration en glucose.

▪ La sensibilité de ce capteur

Tableau II.2. Sensibilité du capteur biomédicale

C (g/L)	Indice de refraction	λ (nm)	Sensibilité (nm/RIU)
0	1.33230545	1476.3	504.66
10	1.33349435	1476.9	504.66
20	1.33468325	1477.4	420.55
30	1.33587215	1478.0	504.66
40	1.33706105	1478.4	336.44
50	1.33824995	1478.9	420.55
60	1.33943885	1479.6	588.77

▪ Les résultats

Les résultats de simulation sont illustrés dans le tableau II.2. On peut voir clairement que les changements de longueurs d'onde de résonance ont été obtenus même pour le moindre changement de l'échantillon RI, donc différentes concentrations de glucose dans l'échantillon infiltré ont pu être bien détectées. Par conséquent, nous pouvons conclure que la cavité CP à base de biocapteur de glucose est très sensible aux variations de la solution RI. Ce capteur a une grande sensibilité qui varie de $S=336.44$ jusqu'à $S = 588.77$ (nm / RIU).

II.4.4. Capteur de température

II.4.4.1. Etude d'un capteur de température

La structure de la Figure II.10 a été utilisée pour simuler un capteur de température. Le choix de la structure 2D-PCR (Two-dimensional polymerase chain reaction) a été décidé pour sa haute sensibilité, sa large PBG et sa transmission fortement normalisée. Cette mesure est particulièrement recherchée pour sa précision dans les environnements difficiles. Les valeurs de température sont mesurées avec précision par un capteur optique qui détecte les variations de l'indice de réfraction dues aux variations de température sur une plage de 0 °C à 360 °C.

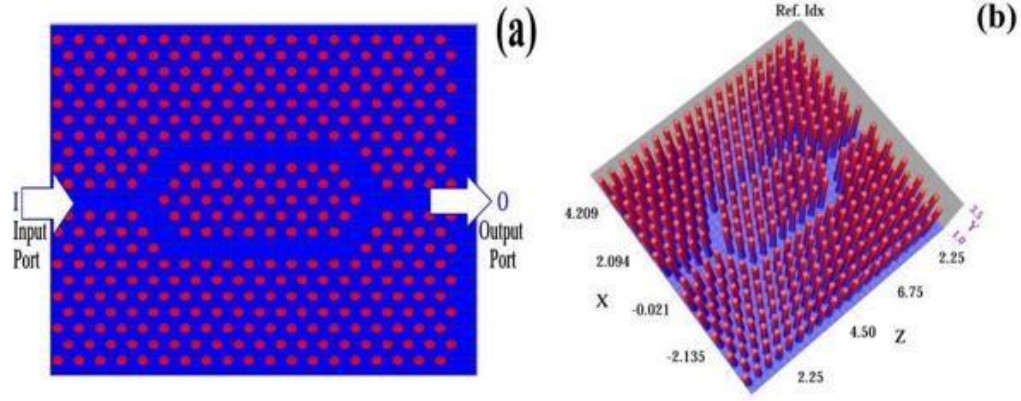


Figure II.10 : Structure du dispositif proposé. Disposition (a), et vue en 3-D (b)

II.4.4.2. Principe de détection des capteurs de température

Pour simuler l'onde électromagnétique, dans un espace ouvert, la couche parfaitement adaptée de Berenger a été utilisée comme conditions limites d'absorption [30]. Pour un meilleur calcul bidimensionnel, la condition suivante doit être satisfaite.

$$\Delta t \leq \frac{1}{c\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \dots \dots \dots (II.3)$$

Où c représente la vitesse de la lumière dans le vide, et Δx et Δy sont, respectivement, les pas spatiaux dans les directions x et y . La structure simulée est attaquée par une impulsion gaussienne, qui est exprimée par [31] :

$$E(t) = -\cos(\omega t) e^{\left[-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2} \right]} \dots \dots \dots (II.4)$$

$$\xi = \alpha \Delta \dots \dots \dots (II.5)$$

Où α est le coefficient thermo-optique du Si, et ΔT est le changement de température. La relation entre la température appliquée et l'indice de réfraction est donnée par :

$$n(T) = n_0 + \alpha \Delta T \dots \dots \dots (II.6)$$

n_0 Correspond à la température zéro du capteur. Le coefficient thermo-optique α du silicium est d'environ $2,4 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$, ΔT représente la différence de température entre la température zéro et la température souhaitée [32].

Le concept fondamental de tous les capteurs optiques basés sur des CP s'articule autour du décalage de la longueur d'onde de résonance à la sortie du capteur. Dans le cas du capteur de

température, la variation de température appliquée au capteur induit la variation de l'indice de réfraction du matériau (Si) par effet thermo-optique.

La sensibilité est calculée comme le rapport entre le changement de longueur d'onde et le changement de température. Elle est représentée par 'ST' et obtenue par la relation [33] :

$$ST = \frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \frac{\Delta n}{\Delta T} \dots \dots \dots (II.7)$$

$\Delta\lambda$ représente la différence de longueur d'onde de résonance,

ΔT est la différence de température et Δn représente la différence d'indice de réfraction.

L'unité de la sensibilité S est le pm/°C

- Cette mesure est particulièrement recherchée pour sa précision dans les environnements difficiles sur une plage de 0 °C à 640 °C.

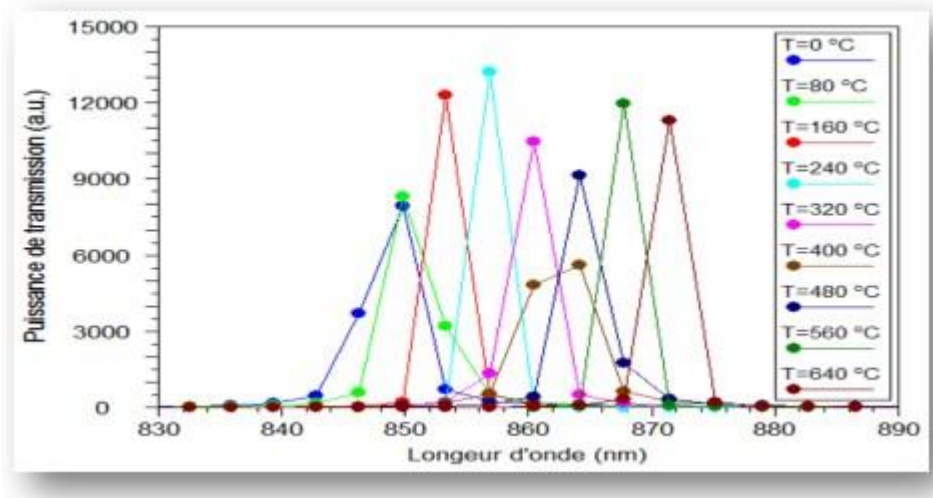


Figure II.11: Décalage de la longueur d'onde résonnante du capteur à base de CP à la température appliquée dans la plage de 0 °C à 640°C.

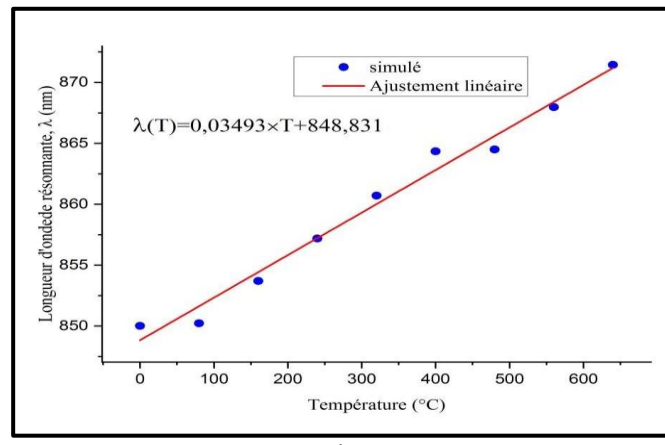
Nous notons à travers la Figure II.11 que la température appliquée sur le capteur entraîne des changements de l'indice de réfraction selon l'équation (II.5), ainsi que du PBG ce qui entraîne des modifications de la longueur d'onde de résonance, de la forme et la puissance des pics de transmission qui restent élevées dans la majeure partie de la gamme.

Tableau II.3. Sensibilité du capteur biomédicale

Températures Appliqués (°C)	Indice de refraction	Longueur d'onde de résonnance λ_0 (nm)	Puissance transmise (a.u)	Sensibilité pm/°C	Facteur de qualité
0	3.37	850.02	7814.4	Référence	151.0124
80	3.3892	850.22	8173.7	2.5	187.6865
160	3.4084	853.7	12126	46	231.983
240	3.4276	857.19	13174	89.625	238.771
320	3.4468	860.71	10778	133.625	204.0071
400	3.466	864.34	5868.3	179	116.4878
480	3.4852	864.5	9580.8	181	233.01180
560	3.5044	867.97	12455	218.5	242.4497
640	3.5236	871.44	11617	267.75	226.9375

Le tableau II.3 présente les résultats obtenus sur l'effet de la modification de la température appliquée sur des paramètres tels que l'indice de réfraction, la transmission de puissance, le décalage de la longueur d'onde de résonance par rapport à la référence, la sensibilité calculée et le facteur de qualité. Le facteur de qualité est donnée par :

$$Q = \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} \dots \dots \dots (II.8)$$


Figure II.12: Longueur d'onde de résonance du capteur en fonction du changement de la température [4]

La Figure II.12 montre que la longueur d'onde de résonance du capteur augmente de 850.02 nm à 871.44 nm lorsque la température croît de 0 °C à 640 °C. De plus, la relation entre ces deux paramètres est presque linéaire donnée par l'équation suivante :

$$\lambda(T) = 0.0349 \times T + 848.831 \dots\dots\dots(II.9)$$

Avec:

- λ représente la longueur d'onde de résonance en nm.
- T la temperature en °C.

On peut conclure qu'il existe une bonne corrélation entre les longueurs d'ondes de résonance calculée par le simulateur et l'ajustement linéaire d'une ligne droite, comme indiquée le coefficient de corrélation "r"=0.988.

II.4.4.3. Bande interdite photonique (PBG)

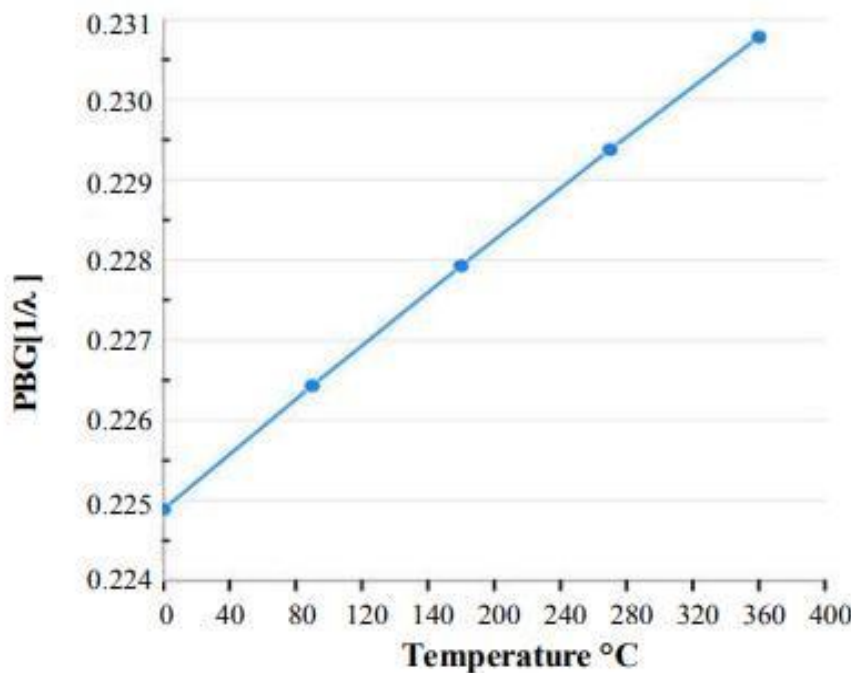


Figure II.13: Relation linéaire entre la largeur du PBG et la température [34]

La dernière partie de notre étude nous a conduit à étudier la relation entre la largeur du PBG et la variation de température. Comme le montre la Figure II.13, la largeur du PBG dépend linéairement de la variation de température [34].

II.4.4.4. Exemple d'application Capteur de température [35].

La sensibilité du capteur est estimée, en infiltrant des liquides de différents RI, et le changement d'indice de la membrane Si est due à la variation de température. Par conséquent, le procédé consiste à déterminer le spectre de transmission du capteur correspondant à l'infiltration d'eau distillée à différentes températures ($n = 1,323$ à $1,333$ correspond au changement de température de $T = 90^\circ\text{C}$ à 20°C [36]), tout en considérant les effets de dilatation thermique, les effets thermiques et la constante du réseau. Le RI de la membrane Si est isotrope, et sa variation avec la température est donné par la relation suivante [37] :

$$n(t) = 3.38(1 + 10^{-5}T) \dots \dots \dots (II.10)$$

avec : $77 < T < 400$ (Ten Kelvin)

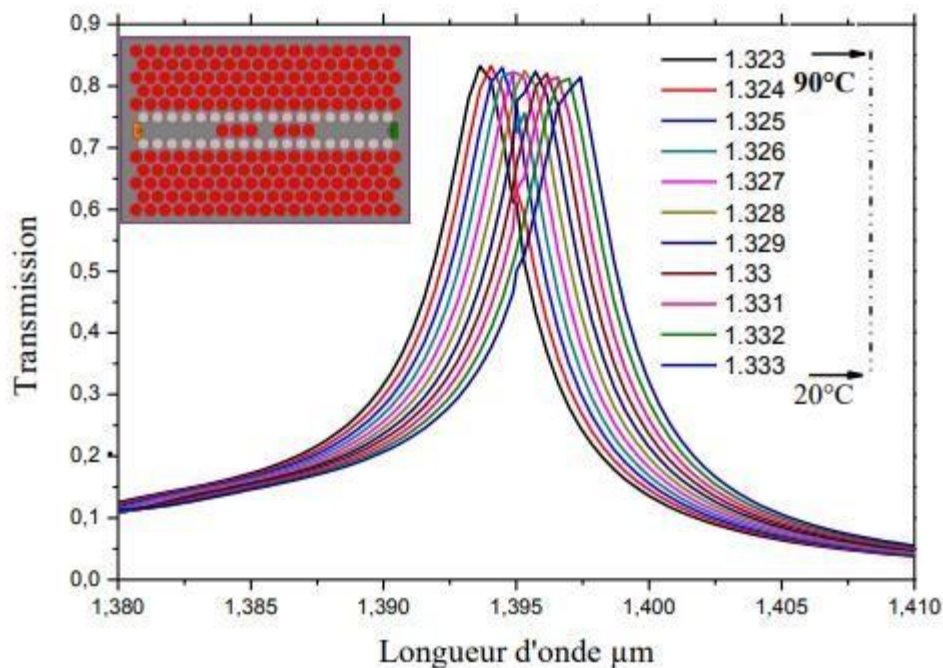


Figure II.14: Transmission du capteur de température (structure couplée avec 3 trous autre de la cavité, et $r'=0.2$) pour différents RI de 1.323 à 1.333 correspond à une variation de température de 90°C à 20°C respectivement [35].

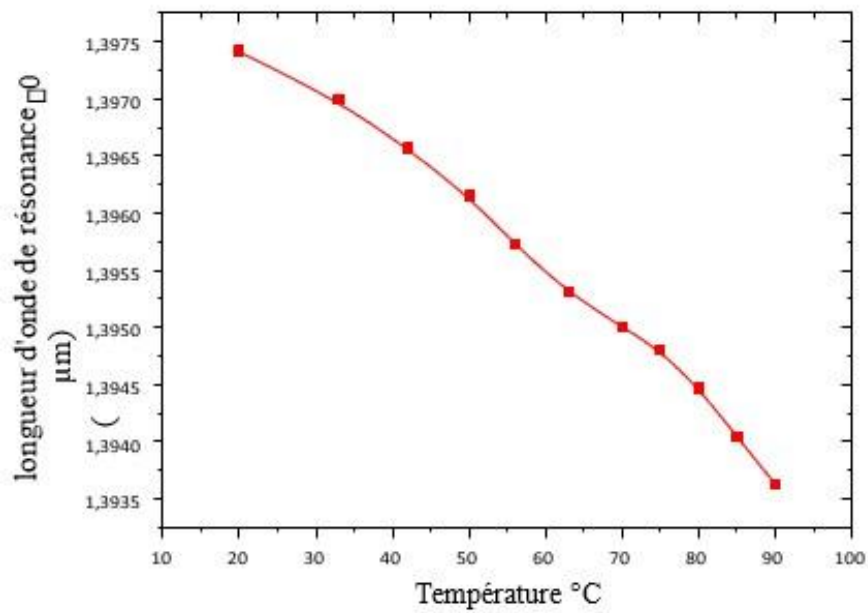


Figure II.15: Longueur d'onde de résonance λ_0 du capteur de température en fonction de la température [35].

La Figure II.15 montre le spectre de transmission du capteur de température, la longueur d'onde de résonance de ce capteur se déplace en raison de la variation de RI lorsque la température de l'eau distillée change. Ce capteur donne une sensibilité de $84 \text{ pm}^{\circ}\text{C}$ sur un intervalle qui varie de 20° à 90°C .

Références :

- [1] "wikipedia," https://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal, 22 mai 2023. [Online]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur>.
- [2] "Sciences et Technologie," (24/03/2023) [Online]. Available: <https://ent2d.ac-bordeaux.fr/disciplines/sti-college/wp-content/uploads/sites/63/2019/05/MSOST-1-6-C2-D-Principe-de-fonctionnement-d%E2%80%99un-capteur.pdf>.
- [3] "Capteur - Définition," (17/03/2023) [Online]. Available: <https://www.techno-science.net/definition/3690.html>.
- [4] A. Abir and. H, Izdihar "" Etude et conception des capteurs à base de cristaux photoniques pour la détection de la temperature," Soutenu publiquement, OUARGLA, 2022.
- [5] W. F and . F. B, "Étude et conception d'un capteur de température à base des cristaux photoniques," Promotion 2022.
- [6] "GENERALITES SUR LES CAPTEURS," Technologue pro, p. 8.
- [7] "Les Capteurs . Généralités sur les capteurs," (23/03/2023) [Online]. Available: https://elearning.enporan.dz/moodle/pluginfile.php/12437/mod_resource/content/0/Les%20Capteurs.pdf.
- [8] "Les capteurs optiques," (08/04/2023). [Online]. Available:<https://www.asrc.fr/fr/les-capteursoptiques/#:~:text=Les%20capteurs%20optiques%20sont%20des,certains%20gaz%20ou%20composants%20chimiques>.
- [9] A. H and . V. J, "Polarization control and sensing with tow –dimensional coupled photonic crystal micro cavity arrays," Opt. Lett, no. 30, p. 982, 2005.
- [10] J.D. Giannopoulos, S. G. Johnson, J.N. Winn, R. D. Meade, "«photonic Crystals Molding the Flow of light," Princeton University Press, 2008.
- [11] S. M and K. A. V, "Photon crystal waveguide-based surface Plasmon resonance biosensor," Applied Physics Letters, no. 90, p. 143518, 2006.

- [12] M. Mouna , "Développement et optimisation de biocapteurs`a base de biomolécules et de micro-organismes sur micro électrodes interdigitées," THESE Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2006.
- [13] C. N. and B. A, "Biocapteur : rêve ou réalité industrielle," Biofutur, no. 171, 10 1997.
- [14] P. J. E, "Handbook of Biological Confocal Microscopy," USA, 1995.
- [15] S. Wonjoo, Y. M. F, S. Olav and F. Shanhui , "Applied Physics Letters," pp 1999- 2001- 2003, vol. 82, no. 13, 2003.
- [16] Buswell, S. C., Wright, V. A., Buriak, J. M., Van, V., & Evoy, S"Specific detection of proteins using photonic crystal waveguides," Optics Express, vol. 20, no. 16, pp. 15949- 15957, 2008.
- [17] O. s and A. A, " High Resolution and Wide Dynamic Range Pressure Sensor Based on Two-Dimensional Photonic Crystal.," Photonic Sensors, vol. 2, no. 1, p. 92–96, 2012.
- [18] . Mohankumar and , Mrs.I. Bahaddur, "NANOCAVITY BASED OPTICAL PRESSURE SENSOR," International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) e- ISSN, vol. 02, no. 03, pp. : 2395-0056, June 2015.
- [19] TarekZouache, AbdesselamHocini and AhlamHarhouza, "High Sensitivity Pressure Sensor using Two Dimensional Photonic Crystal Cavity," International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control, no. 8, pp. 1-8, 2018.
- [20] O. Levy, B. Z. Steinberg, M. Nathan, and A. Boag, "Ultrasensitive displacement sensing using photonic crystal waveguides," Applied Physics Letters, vol. 10, no. 86, pp. 104102- 104104, 2005.
- [21] S. Olyaei and S. M. Nejad, "Design and simulation of velocity and displacement," The Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 32(2C), no. 32, p. 89 99, 2007.
- [22] C. Lee, R. Radhakrishnan, C. C. Chen, J. Li, J. Thillaigovindan and N. Balasubramanian, "Design and modeling of a Nano mechanical Sensor using silicon photonic crystals," Journal of Light wave Technology, no. 26, pp. 839-846, 2008.

- [23] . L. C and T. J, "Optical nanomechanical sensor using a silicon photonic crystal cantilever embedded with a nanocavity resonator," *Applied Optics*, no. 48, pp. 1797-1803, 2009.
- [24] O. S, H. S and D. Z, "Design of electronic sections for nano -displacement measuring system," *Frontiers of Optoelectronics in China*, vol. 4, no. 3, pp. 381 -376, 2010.
- [25] Z. Xu, L. Cao, C. Gu, Q. He and . J. G, "Micro-displacement sensor based online defect resonant cavity in photonic crystal," *Optics Express*, vol. 1, no. 14, p. 298 305, 2006.
- [26] O. Saeed and A. Morteza , "Micro-Displacement Sensor Based on High Sensitivity Photonic CrystaL," *Photonic Sensors*, 2014.
- [27] Preeti Rani, Yogita Kalra, Venus Dillu and R. K. Sinha, "Photonic crystal based nano displacement sensor. Photonic Fiber and Crystal Devices," *Advances in Materials and Innovations*, 2014.
- [28] A. S, B. M, B. T, B. A and H. A, "Infiltrated photonic crystal cavity as a highly sensitive platform for glucose concentration detection," *Optics Communications*, vol. (2017), no. 384, p. 93–100, 10 2016.
- [29] Y.L. Yeh, Real "Real time measurement of glucose concentration and average refractive index using a laser interferometer," *Opt. Lasers Eng*, no. 46, p. 667–670, 2008.
- [30] H. Lu and e. AL, ""Integrated temperature sensor based on an enhanced pyroelectric photonic crystal.,"" *Optics express*, vol. 14, no. 21, pp. 16311-16318. , 2013.
- [31] J.-H. Lu and L. Yu-Yi , "Planar compact triple-band monopole antenna for IEEE 802.16 m WiMAX application.," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 10, no. 27, pp. 1206-1219, 2013.
- [32] Rajasekar, R., and S. Robinson, "Nano-pressure and temperature sensor based on hexagonal photonic crystal ring resonator," *Plasmonics*, vol. 1, no. 14, pp. 3-15, 2019.
- [33] Tao, Shangbin, et al, "A high sensitivity pressure sensor based on two-dimensional photonic crystal.," *Photonic Sensors*, vol. 2, no. 6, pp. 137-142, 2016.

- [34] Z. RAMI, "Etude, conception et modélisation de capteurs à base de cristaux Photoniques pour les systèmes à régulation autonome," Pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT, Soutenue , SETIF , 2021.
- [35] A. Hocini and A. Harhouz, "Modeling and analysis of the temperature sensitivity in two-dimensional photonic crystal microcavity," J. Nanophoton., vol. 016007, no. 10(1), 2016.
- [36] H. J. B and A. R.W, "Temperature coefficient of the refractive index of water," J. Opt. Soc. Am., vol. 09, no. 38, p. 804–806, 1948.
- [37] D. K. Schroder, R. N. Thomos, and J. C. Swartz, " Free carrier absorption in silicon," IEEETrans. Electron Devices, vol. 2, no. 25, p. 254–261, 1978.

Chapitre III : Résultats et interprétations

III .1. Introduction :

Les cristaux photoniques jouent une grande importance dans divers domaines, parmi eux les capteurs optiques, et cela à cause de leur structure organisée qui contient de deux métaux avec un indice de réfraction différent [1] [2].

On va procéder dans ce chapitre à la conception d'un capteur de température à travers une simulation par le simulateur RSOFT. Parmi les avantages de ce programme, qu'il est possédé une interface CAO facile à utiliser qui permet une définition précise d'un profil arbitraire associée à une approximation grossière des résultats améliorés peuvent être trouvés rapidement. Nous avons choisi du silicium métal et de l'eau. Nous posons un défaut, on modifie le rayon, la longueur de l'émetteur et sa position, et on analyse les résultats pour obtenir un capteur précis. Nous commençons d'abord par fournir une définition du programme RSOFT et comment l'utiliser.

III .2. Représentation du logiciel R SOFT CAD

A. Environnement de CAD

Le RSoft CAD est un programme de base de R Soft photonique, il permet aux chercheurs et ingénieurs de créer des systèmes pour la conception des dispositifs de guide d'onde, des circuits optiques et d'autres dispositifs photoniques. Dans le Rsoft, il existe plusieurs modules intégrés, chaque module assure une fonction bien précise, parmi ces modules se trouve :

B. Le simulateur « BandSOLVE » :

Le logiciel que nous avons exploité pour modéliser les structures par la méthode des ondes planes s'appelle « BandSOLVE » développé par Rsoft. BandSOLVE est un logiciel de simulation des structures de bandes photoniques. Il est basé sur la méthode des ondes planes optimisée pour les structures périodiques, idéal pour produire des diagrammes de bande des structures à bandes interdites photoniques classiques tels que 2D et 3D et les guides à cristaux photoniques en utilisant une méthode super cellule type onde plane. A deux dimensions, il est nécessaire de considérer deux directions de propagation différente : TE (avec le champ E perpendiculaire à l'axe des trous) et TM (où E est parallèle à l'axe des trous). Ces deux

polarisations sont découplées et donnent lieu à deux diagrammes de bandes indépendants. Il n'existe pas forcément une bande interdite dans les deux cas. En outre, il peut être appliqué à des structures comme les fibres à cristaux photoniques, qui sont complexes pour les autres techniques de simulation.

BandSOLVE est particulièrement utile pour optimiser les propriétés des structures à cristaux photoniques. Il est destiné pour fonctionner avec les autres modules de simulation de Rsoft tels que BeamPROP et FullWAVE, il partage le même outil de CAD avec ces modules. En particulier, le BandSOLVE est spécialement utile pour optimiser les propriétés des cristaux photoniques.

C. Le simulateur « FULL WAVE » :

L'objectif de FullWAVE est de fournir un ensemble de simulations pour calculer la propagation de la lumière dans les guides d'ondes de géométries arbitraires. La simulation est basée sur la technique de la FDTD (Finité Différence Time Domain). La FDTD est une méthode de résolution directe des équations de Maxwell dans le domaine temporel ; elle utilise l'outil numérique des différences finies. On peut obtenir les réponses en champs TE et TM simultanément.

D. Fenêtre de programme de CAD :

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.

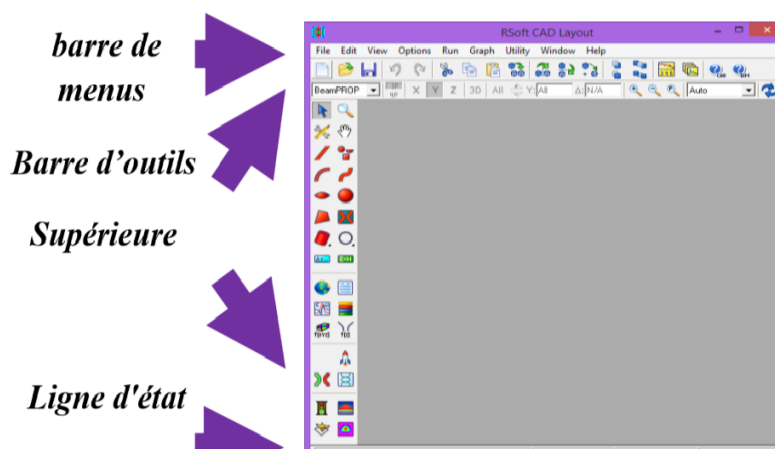
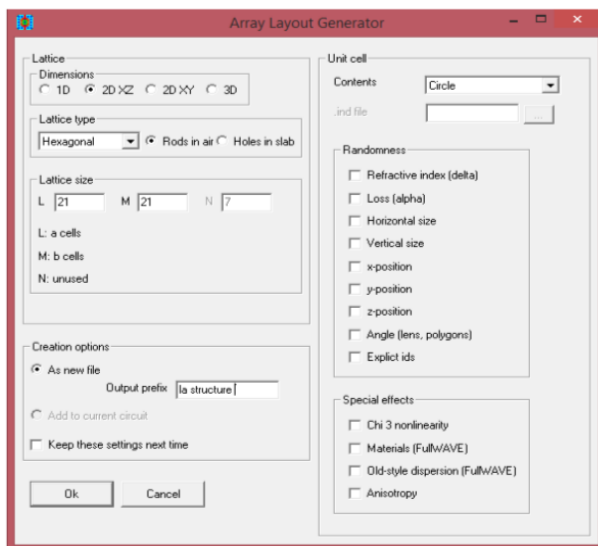


Figure-III1 : La fenêtre de programme de R Soft CAD, montrant la barre de menus au dessus, les barres des outils supérieurs et gauches, et la ligne d'état au fond.

E. 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. Cependant, la manière la plus facile est d'employer un des multiples utilités de disposition qui sont incluse avec Full WAVE afin d'expédier la création de ce réseau en utilisant Array Layout (figureIII.2 (a)). Après l'introduction des différentes données (type de réseau, forme de motif, le nombre de rangés et le nom du circuit) on clique sur le bouton OK pour obtenir la structure du cristal photonique qui apparaît sur la (figureIII.2 (b)).

(a)



(b)

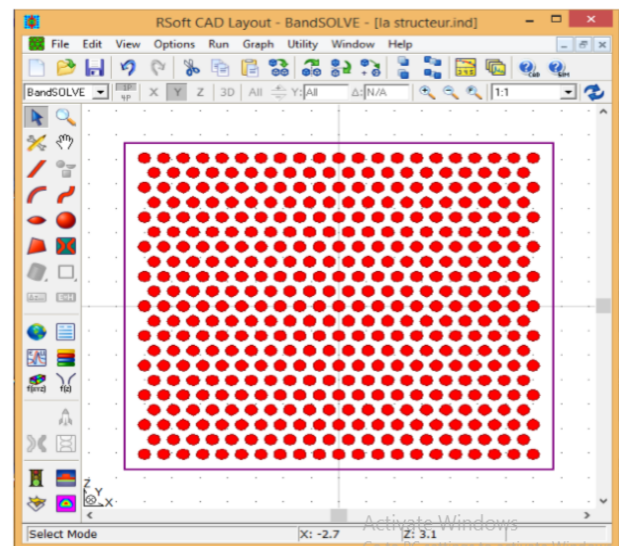


Figure - III2 : a) Arrangements de disposition de la rangée XZ. b) Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD.

F. Présentation des autres applications :



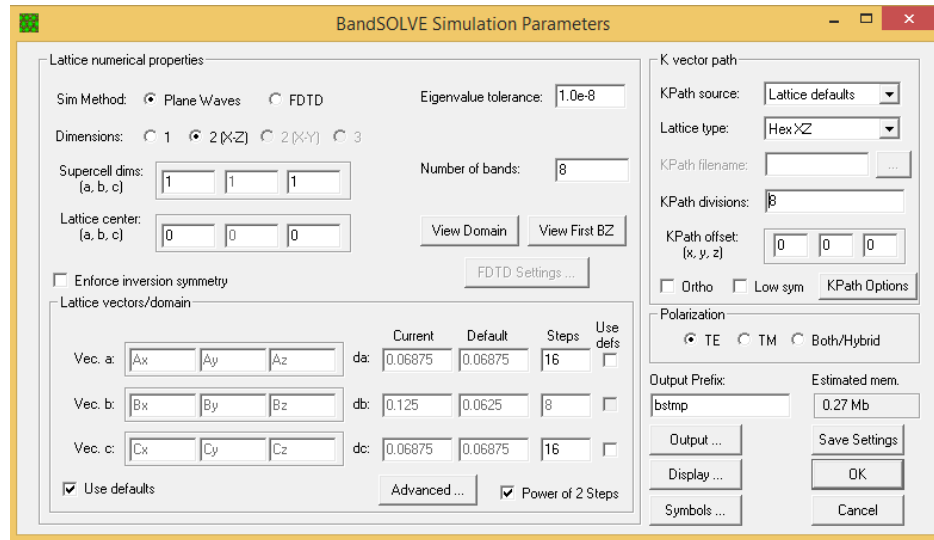
.EDIT LAUNCH FIELD (Editer le champ du guide) où l'utilisateur peut indiquer le champ initial pour une simulation.



.EDIT LAYER TABLE (Editer le tableau du guide) : Cette option ouvre le tableau éditeur des guides, il est utilisé pour définir les structures 3D.



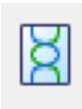
.PERFORME SIMULATION (Effectuer La simulation) : Cette option ouvre la boîte de dialogue du paramètre de simulation (simulation paramètres) où l'utilisateur peut indiquer des paramètres de simulations avant de l'effectuer.



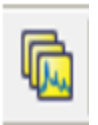
.COMPUTE FUNDAMENTAL MODE (mode fondamentale de calcul) : Cette option permet à l'utilisateur de calculer le mode fondamental du circuit. Noté que des modes d'ordre plus supérieur peuvent être calculés par l'intermédiaire de l'option de menu Run.



.EDITE PATHWAYS (Editer les voies) : Cette option permet à l'utilisateur de définir des voies qui sont utilisées pour définir des positions de lancement pour l'analyse.



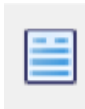
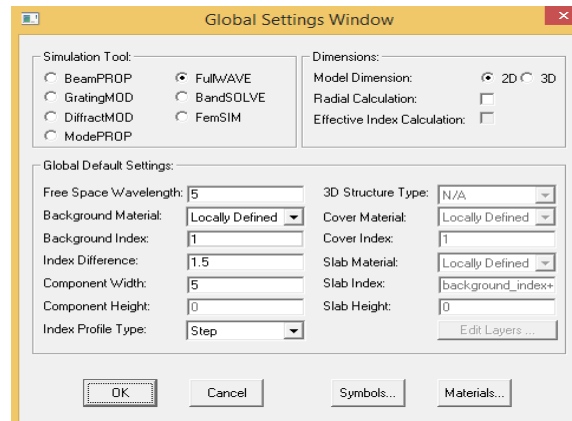
.EDITE MONITERS (Editer les moniteurs) : Cette option permet à l'utilisateur de créer et modifier des moniteurs de Beam PROP. Un moniteur permet à l'utilisateur de mesurer une quantité, telle que la puissance du guide d'onde, pendant une simulation.



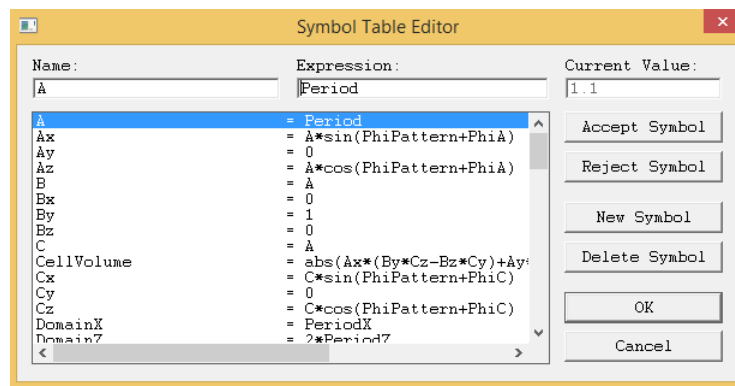
.LAUNCH DATA BROWSER : Cette option ouvre le RSOFT data browser.



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



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



. COMPUTE INDEX PROFILE (Profil d'indice de calcul) : Cette option ouvre la zone de dialogue de profil d'indice de calcul ou l'utilisateur peut calculer un profil d'indice de circuit.

III .3. Influence des paramètres physique et géométrique sur la largeur des bandes interdite :

III .3.1. L'effet de la modification du rayon sur la largeur des bandes interdites

La structure que nous avons proposée est matrice 21*21 de bâtonnets de silicium placés dans l'air (c'est-à-dire, indice de réfraction 1) avec une période $a=0.4 \mu\text{m}$ et un rayon de $r=0.09 \cdot P \mu\text{m}$ (voir Figure III.3 et Figure-III.4. a.). Le diagramme de bande interdite de cette structure est illustré à la (Figure-III.4.b). A partir de cette figure on peut voir qu'il y a deux bande interdite optique uniquement pour le mode de propagation TE (transverse électrique) et entre ces deux bandes, la bande la plus appropriée avec une largeur comprise $0,445a/\lambda$ et $0,585 a/\lambda$, ce qui fournit une bande interdite optique pour les longueurs d'ondes situées entre 898nm et 683nm. Le calcul des bandes interdites est réalisé par le module BandSolve de l'environnement RSoft.

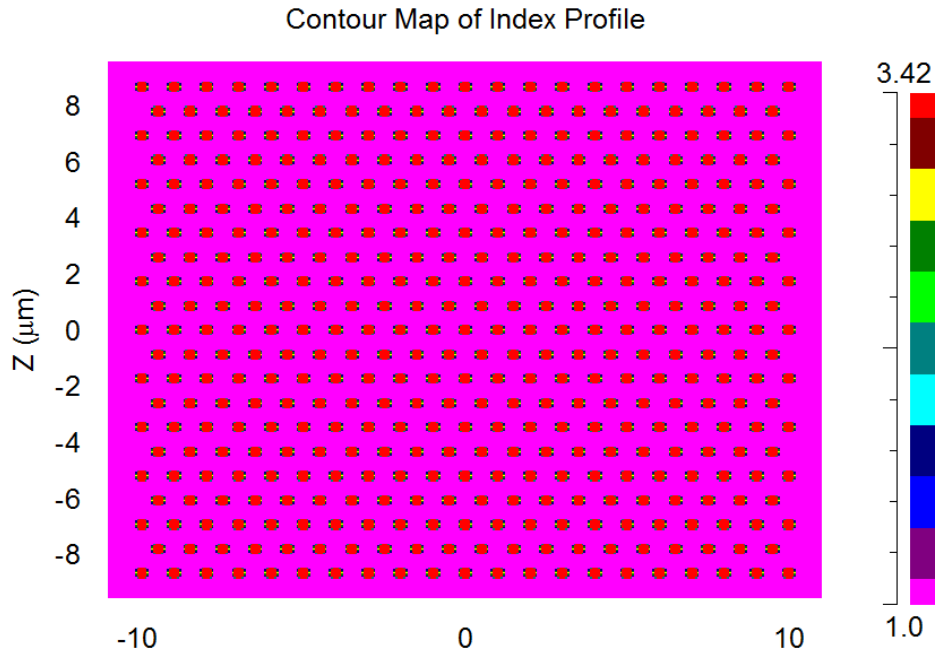
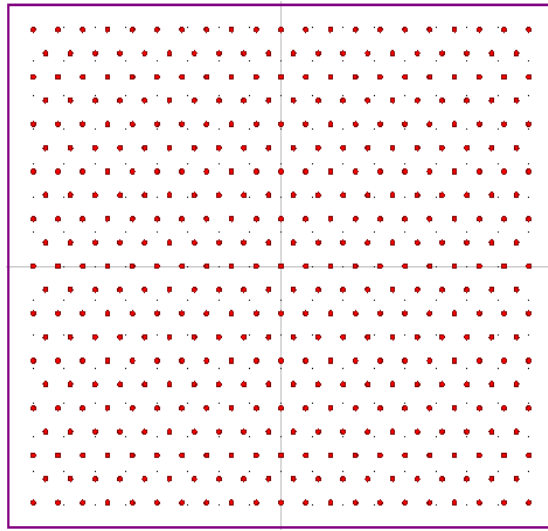
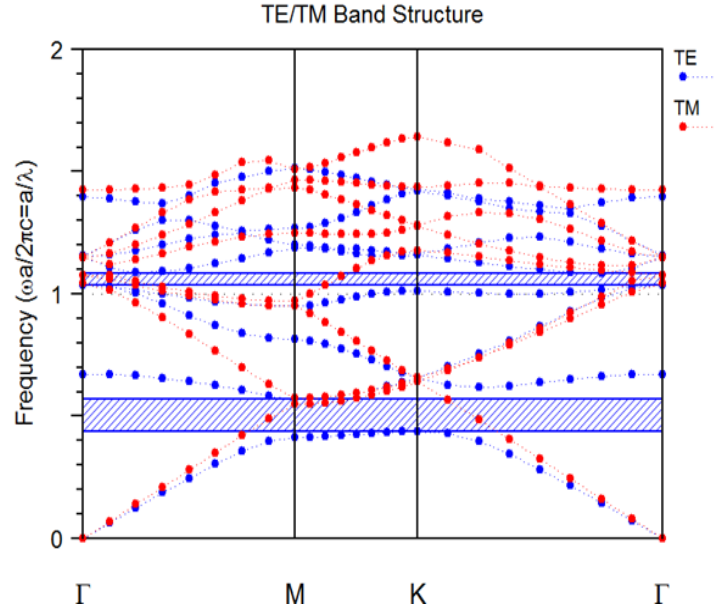


Figure III3. La matrice proposée est des tiges de silicium dans l'air



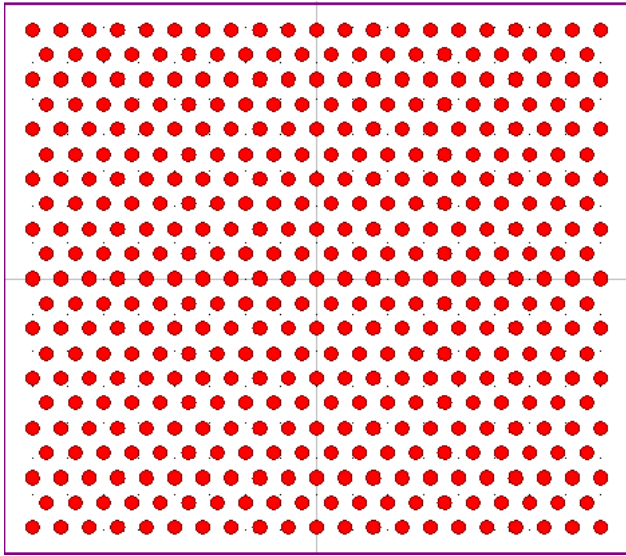
(a)



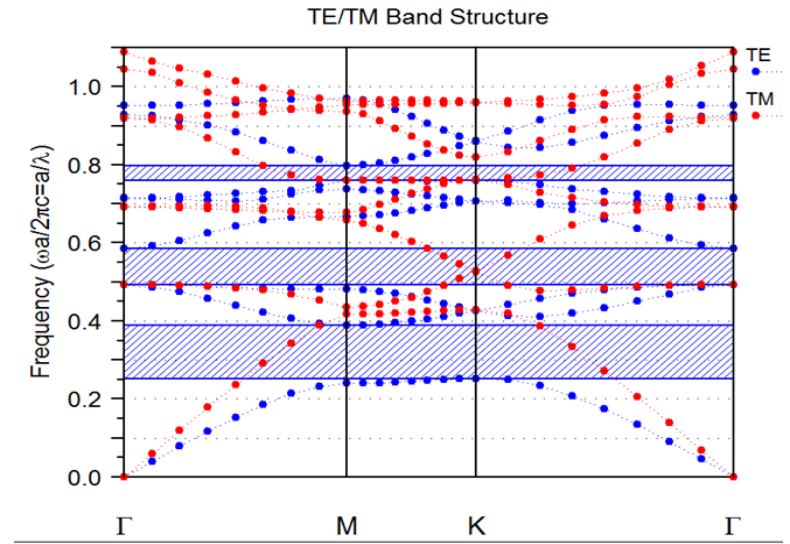
(b)

Figure III.4. a) La matrice propose est des tiges de silicium dans l'air, b) Diagramme de dispersion des bandes interdites du mode TE

La deuxième structure que nous avons proposée est un réseau 21×21 de tiges de silicium placées dans l'air (c'est-à-dire l'indice de réfraction 1) avec une période $0.4 \mu\text{m}$ et un rayon de $r = 0.3 \cdot p \mu\text{m}$ (voir Figure-III. 5.a). Le diagramme de bande interdite de cette structure est illustré dans (Figure-III.5. b). A partir de cette figure on peut voir qu'il y a deux bande interdite optique uniquement du mode TE (transverse électriques) et entre ces deux bandes, la bande la plus appropriée avec une largeur comprise entre $0.25a/\lambda$ et $0.385a/\lambda$, ce qui fournit une bande interdite optique pour les longueurs d'ondes situées entre 1600nm et 1038nm . Le calcul des bandes interdites est réalisé par le module BandSolve de l'environnement RSoft.



(a)



(b)

Figure -III.5. a) La matrice propose est des tiges de silicium dans l'air, b) Diagramme de dispersion des bande interdite du mode TE.

La troisième que nous avons proposée est un réseau 21×21 de tiges de silicium placées dans l'air (c'est-à-dire, indice de réfraction 1) avec une période de $a = 0.4 \mu\text{m}$ et $r = 0.42 \cdot a$ (voir figure-III 6.a). Le diagramme de bande interdite de cette structure est illustré à la (Figure-III 6.b). A partir de cette figure, on peut voir qu'il existe deux bandes interdites optiques uniquement pour le mode de propagation TE (transversal électrique) et un autre pour le mode de propagation TM (transversal magnétique), ni l'un ni l'autre ne pouvant être choisis car ils ne sont pas dans un champ approprié.

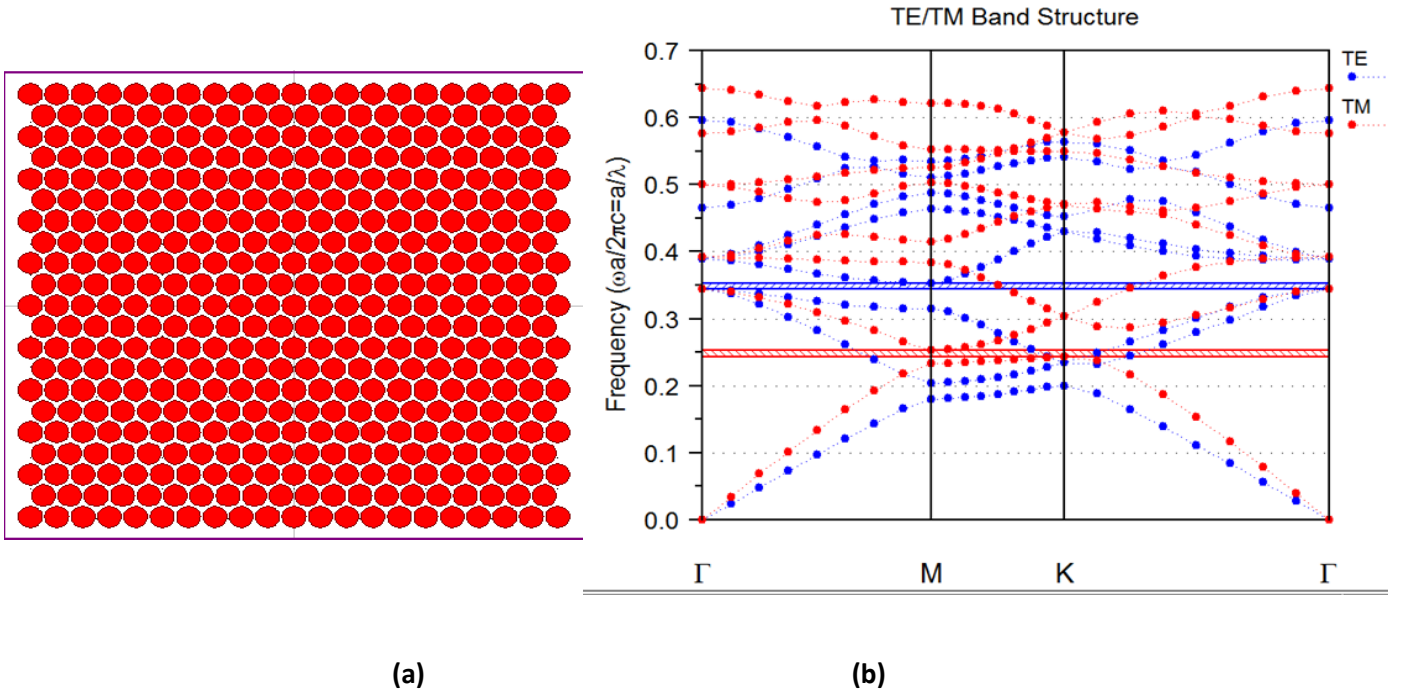


Figure -III.6. a) La matrice proposée est des tiges de silicium dans l'air, b) Diagramme de dispersion des bande interdite du mode TE et en mode TM.

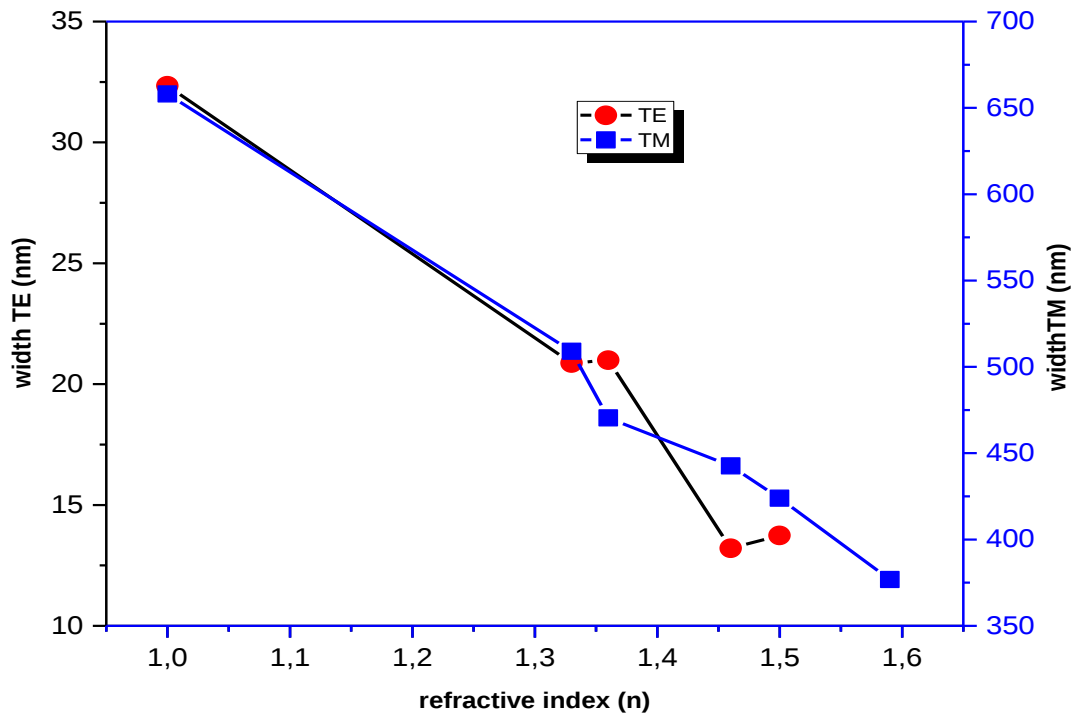
Avec les trois structures proposées, on voit que le changement de rayon a un effet sur la largeur de la bande interdite. La figure 4 montre qu'il n'est pas possible en prenant une valeur de rayon de $r = 0.09 \cdot p \text{ } \mu\text{m}$ ou moins parce que ce dernier ne donne pas une bande interdite souhaitable, à une valeur de rayon de $r = 0.42 \cdot p \text{ } \mu\text{m}$, la conception est devenue inacceptable car les tiges sont devenues contiguës (voir figure-III. 6.a) et la bande interdite a presque disparu en mode TE et en mode TM (voir figure -III.6.b). La plus grande bande interdite est observée au rayon $r = 0.3 \cdot p \text{ } \mu\text{m}$ à des longueurs d'onde comprises entre 1600nm et 1038nm en mode TM uniquement. Le rayon ne doit donc pas être inférieur à $0.09 \cdot p \text{ } \mu\text{m}$ ni supérieur à $0.42 \cdot p \text{ } \mu\text{m}$.

III.3.2. Effet de l'indice de réfraction Sur les bandes d'énergie interdites en mode TM et TE :

Dans la figure -III.7, nous avons étudié l'effet de l'indice de réfraction sur la largeur de la bande interdite, et nous avons trouvé la meilleure bande interdite, qui atteignait 650nm en mode TM et 32nm en mode TE à un indice de réfraction 1(voir tableau III.1). Nous prenons une bande interdite en mode TM parce que la largeur de bande interdite en mode TE est très petite.

Tableau III. 1. Variation de la valeur de la largeur de la bande interdite en mode TE en mode TM en fonction de l'indice de réfraction n .

$n(X)$	1	1.33	1.36	1.46	1.5	1.59
WidthTE(nm)	32.34	20.87	20.99	13.21	13.74	
WidthTM(nm)	658	509	470.38	442.67	423.94	376.77

**Figure -III.7.** L'image représente l'évolution de la largeur des bandes d'énergie interdites en mode TM et en mode TE en termes d'indice de réfraction n .

La figure III. 8 et la figure III. 9 montrent la valeur de bande interdite minimale et maximale pour le silicium en fonction de l'indice de réfraction (voir tableau III.2 et III.3). Afin de nous aider à trouver la valeur moyenne d'un écart de gamme.

Tableau.III.2. Variation d'une valeur de bande interdite minimale en mode TM et en mode TE en fonction de l'indice de réfraction n .						
$n(x)$	1	1.33	1.36	1.46	1.5	1.59
MIN TE(nm)	616.85	637.76	639.24	651.99	658.56	
MIN TM(nm)	1073	1249	1296.18	1333.9	1354.66	1413.23

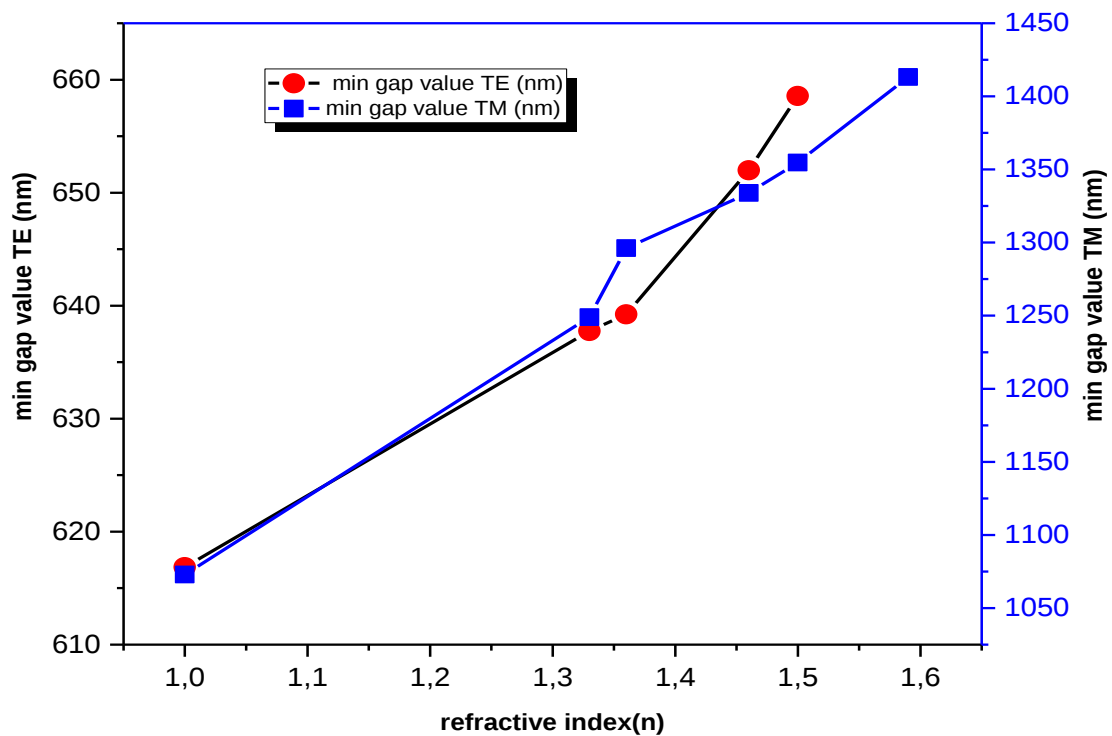


Figure -III.8. L'image représente le changement de la valeur minimale de la bande interdite en mode TM et TE en termes d'indice de réfraction.

Tableau III.3. Variation d'une valeur maximale de la bande interdite en mode TM et en mode TE en fonction de l'indice de réfraction n .						
$n(x)$	1	1.33	1.36	1.46	1.5	1.59
max(nm)	649.16	658.63	660.23	665.26	672.3	
min(nm)	1731	1758	1766.56	1776.57	1778.6	1790

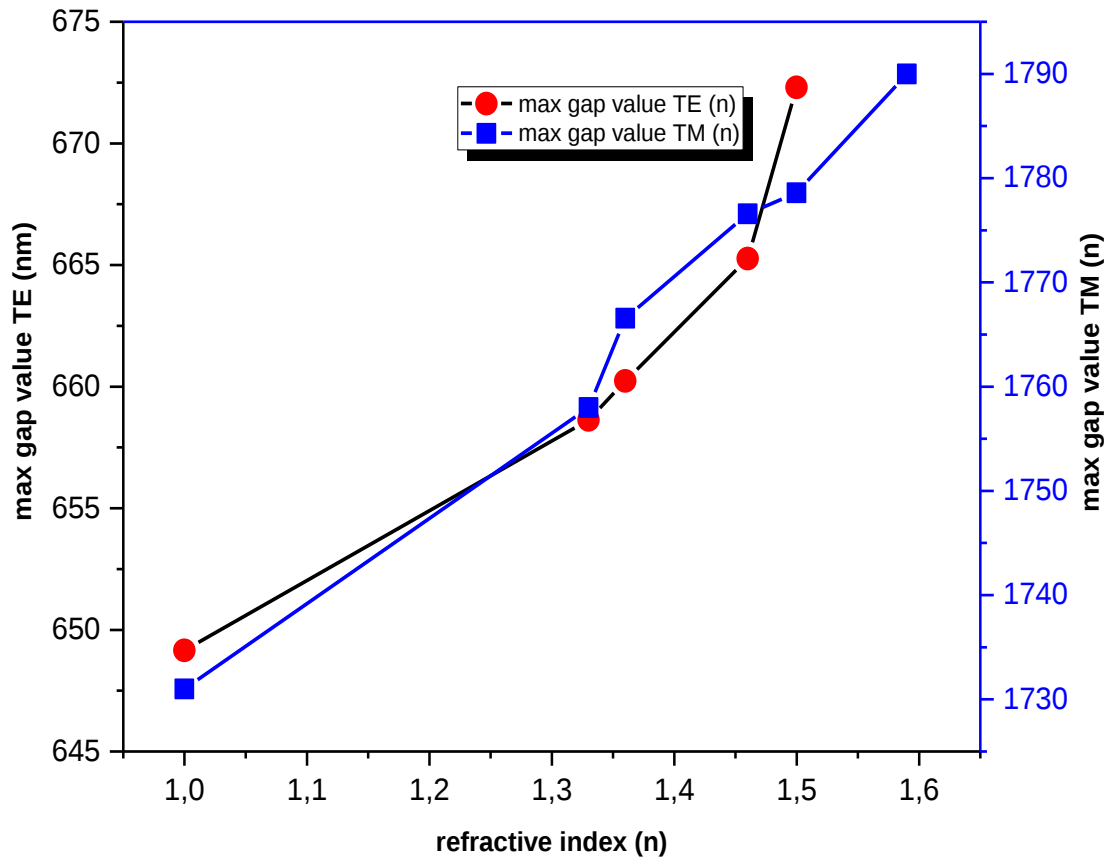


Figure -III.9. L'image représente l'évolution de la valeur maximale des bandes d'énergie interdites en mode TM et en mode TE en termes d'indice de réfraction n .

III.3.3. Effet du facteur de forme sur la bande interdite en mode TM et TE :

La figure -III. 10 représente la largeur de la bande interdite d'un matériau silicium en fonction du facteur de forme (voir tableau III.4). On remarque d'après les résultats obtenus à partir de la figure III.10 que la variation du facteur de forme (c'est le pourcentage qui est la valeur du rayon divisant le période r/a) affecte la largeur de la bande interdite. La meilleure valeur obtenue est de 650nm en mode TM et 32nm en mode TE au facteur de forme $FF=0.4nm$

Tableau. III.4. Variation de largeur de bande interdite en mode TM et en mode TE en fonction du facteur de forme.									
FF(x)	0.21	0.24	0.27	0.3	0.33	0.36	0.39	0.42	0.45
WidthTE(nm)			26.48	32.5	26.26	13.24	30.9	13.82	10.08
WidthTM(nm)	183.428	278.66	386	496.24	565.05	630.81	658.39	621.9	525.19

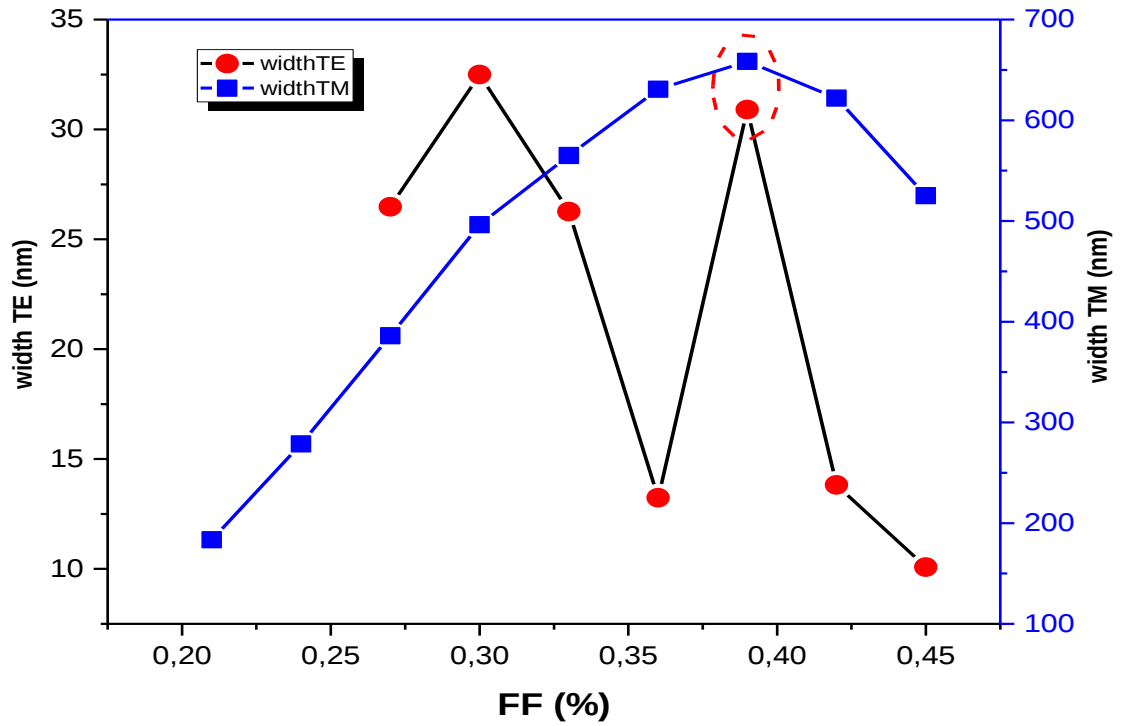
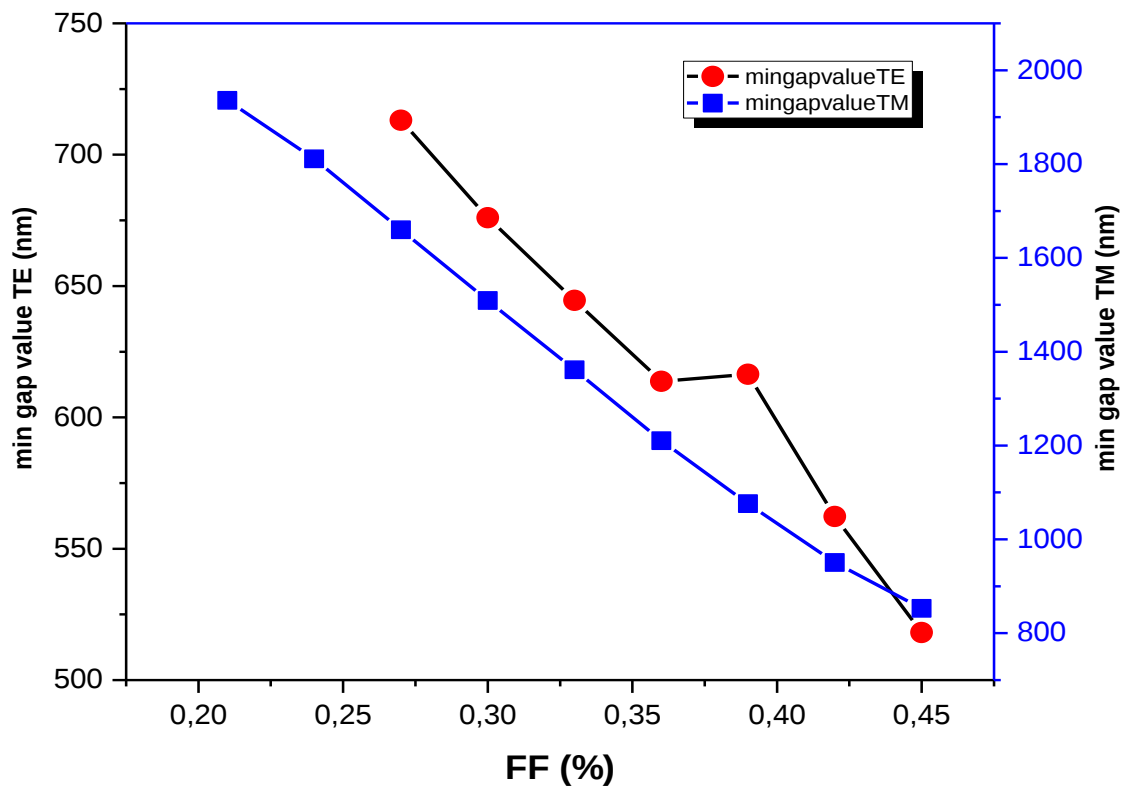


Figure -III.10: Variation de la largeur de bande interdite d'un matériau silicium en fonction du facteur de forme FF.

Les figures III.11 et III.12 montrent la valeur minimale et maximale de la bande interdite pour le silicium en fonction du facteur de forme (voir tableau III.5 et III.6) . Pour nous aider à trouver la valeur moyenne de l'écart de portée.

Tableau. III.5. Divergence d'une valeur de bande interdite minimale en mode TM et en mode TE en fonction d facteur de forme FF.

FF(x)	0.21	0.24	0.27	0.3	0.33	0.36	0.39	0.42	0.45
Min TE(nm)			713.12	676.01	644.57	613.73	616.44	562.25	518.1
Min TM(nm)	1935.75	1810.89	1660	1509.1	1361.32	1210.4	1075.92	950.72	852.67

**Figure -III.11.** L'image représente le changement de la valeur minimale de la bande interdite en mode TM et TE pour le silicium en fonction du facteur de forme FF.**Tableau. III.6.** Variation d'une valeur maximale de bande interdite en mode TM et en mode TE en fonction du facteur de forme FF

FF(X)	0.21	0.24	0.27	0.3	0.33	0.36	0.39	0.42	0.45
Max TE(nm)			739.6	676.01	670.83	626.97	647.34	592.51	528.18
Max TM(nm)	219.178	2089.55	2046	2005.34	1926.87	1841.21	1734.31	1572.62	1377.86

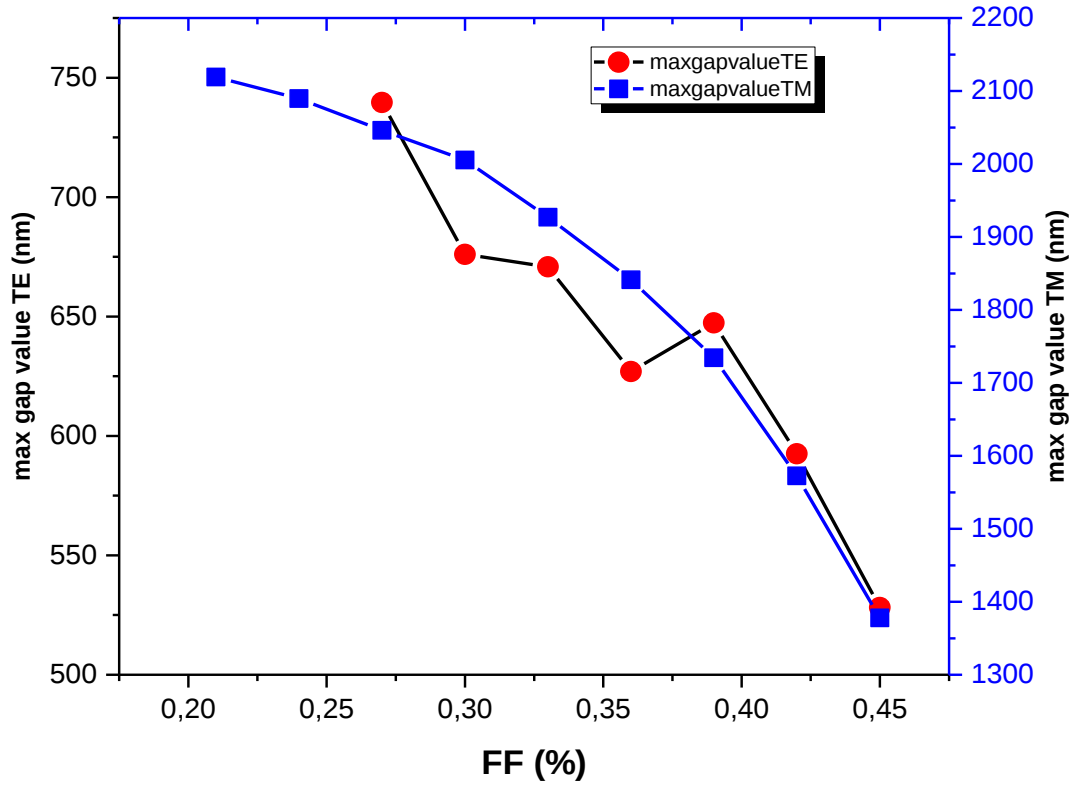


Figure -III.12 . L'image représente l'évolution de la valeur maximale des bandes d'énergie interdites en mode TM et en mode TE pour le silicium en fonction du facteur de forme.

III.4. Concept d'un capteur optique de température :

La sélection du réseau implique une structuration périodique sur l'échelle de longueur d'onde optique du matériau dans deux directions de l'espace, et une solution courante consiste à faire des trous d'air dans la membrane de silicium. Ensuite, il y a la possibilité de choisir le motif de base de ce réseau périodique de trous. Pour des raisons de symétrie, c'est le réseau triangulaire de trous d'air qui a la plus grande bande interdite optique pour un facteur de remplissage donné (r/a) dans l'air. Ci-dessous, nous étudierons le cas de cristaux membranaires bidimensionnels avec un réseau de trous d'air (21x21) dans un diélectrique à haut indice ($n(\text{Si}) = 3,48$).

III.4.1. Guidage de la lumière sans cavité :

Nous considérons dans cette section un guide d'ondes avec des cristaux photoniques W1, ce guide d'ondes est formé en supprimant une rangée de trous W au centre du réseau triangulaire comme tracé sur la Figure (III.13). Le cristal photonique est un réseau triangulaire de trous d'air de périodicité $p = 0,4\mu\text{m}$, gravé dans une membrane Si d'indice $n(\text{Si}) = 3,48$ et de rayon de trou $r = p \cdot 0,3$

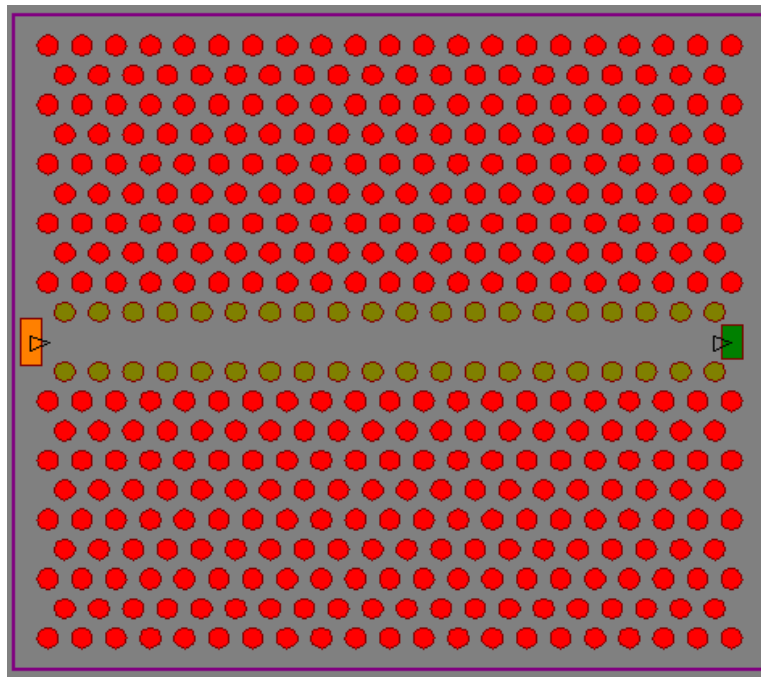


Figure -III.13. Structure 2D avec un défaut de ligne (guide d'onde)

Les calculs FDTD à l'aide du logiciel FullWave de RSoft permettent d'afficher les spectres de transmission. D'après la déclaration (Figure -III.14), nous remarquons que la bande de transmission change de 1450nm à 1890 nm .

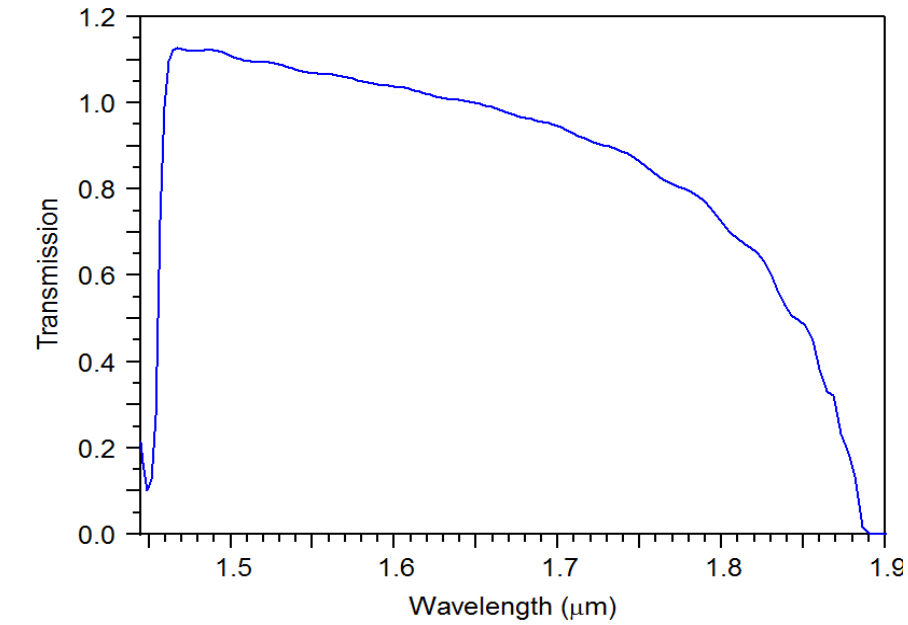


Figure -III.14 : Spectre de transmission guide droit référence W1 en mode TM

La Figure -III.15 montre la distribution spatiale de l'excitation continue (CW) à une longueur d'onde pour la polarisation TM du conducteur W1 à droite. Et la forme de la distribution indique bien l'existence du phénomène de guidage de la lumière le long du guide W1.

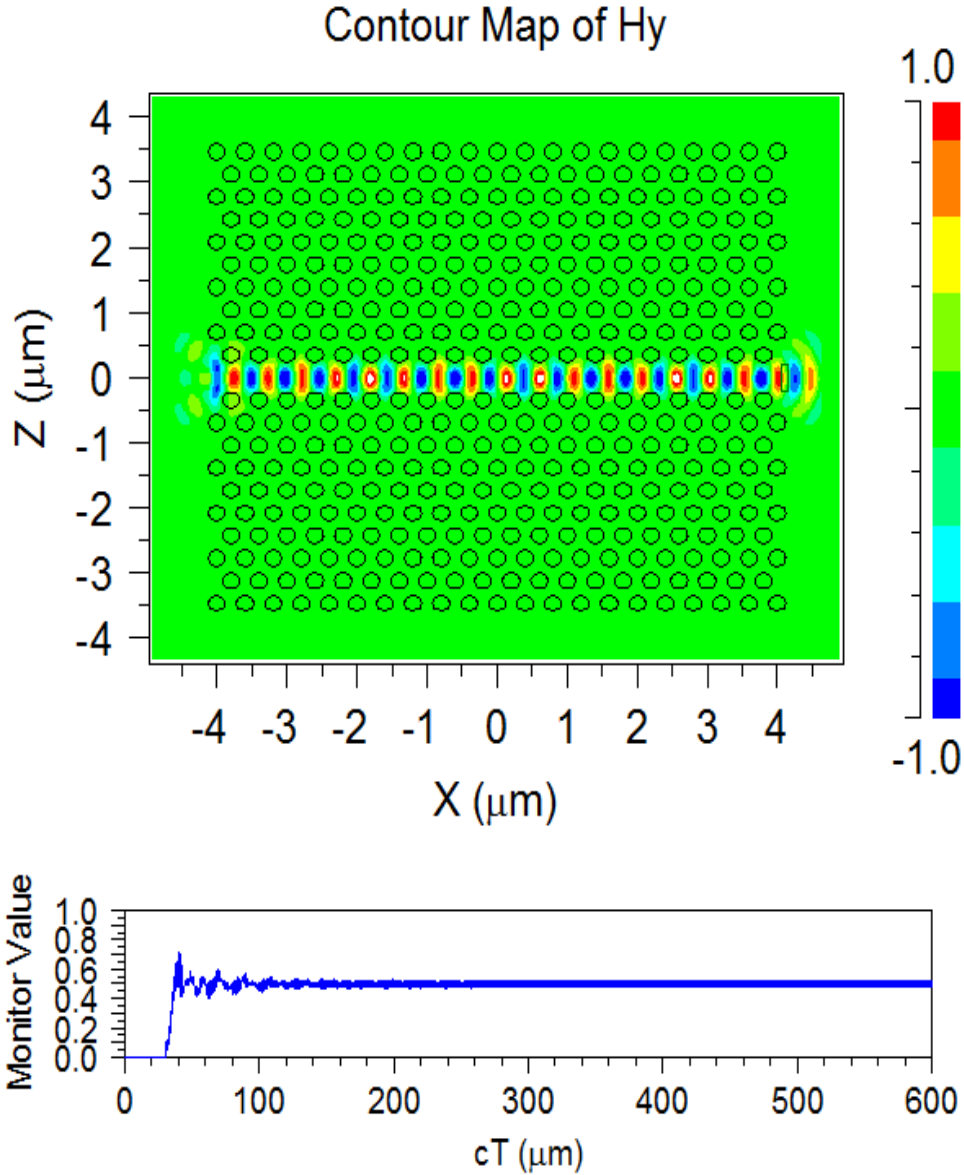


Figure - III.15 : Distribution du champ électrique en 2D du capteur de température.

III.4.2. Effet de certains facteurs géométriques sur le guide d'ondes:

Nous avons ajusté le rayon d'ouverture résonnant des deux rangées parallèles au guide d'ondes (parallèle à la rangée omise des deux côtés du défaut) la rangée supérieure et inférieure trois fois $r = 0.3 \cdot P$ (normal) ; $r = 0.25 \cdot P$; $r = 0.20 \cdot P$

Tout en maintenant la même période au cours de notre étude, comme le montre la Figure -III.16, et nous avons enregistré le résultat dans la figure suivante (Figure -III.17 (a)) où on remarque un décalage de la bande de transmission vers le haut lorsque le rayon r est réduit.

Quant à (Figure -III.17 (b, c)), il montre les résultats obtenus après avoir modifié la longueur de l'émetteur :

launch = period nm

launch = period*1.1 nm

launch = period*1.2 nm

launch = period*1.3 nm

Et la position : (PX4 ; PX4.1 ; PX4.2 ; PX4.3 nm) de l'émetteur pour voir son effet sur la transmission.

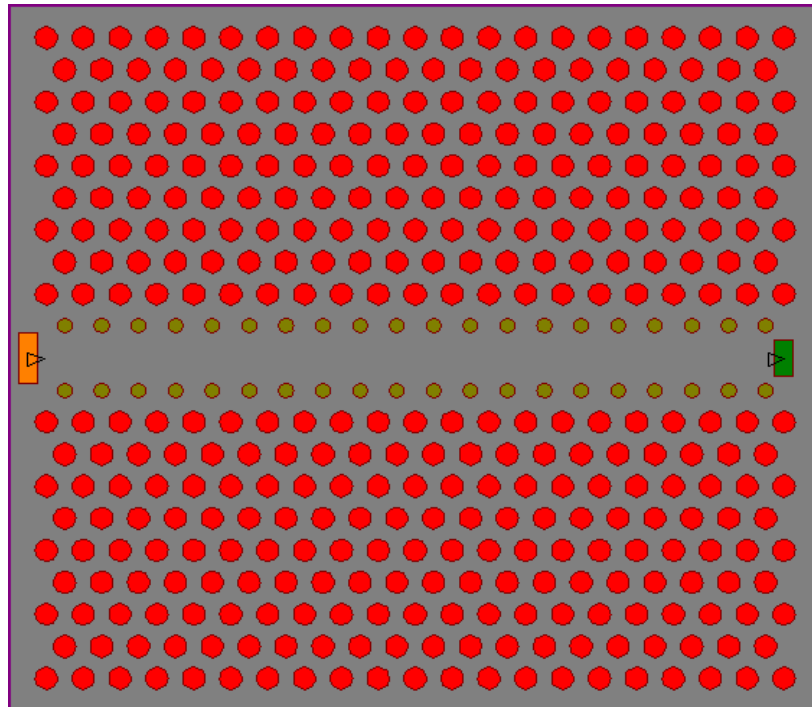


Figure -III.16 : Structure 2D avec un défaut de ligne (guide d'onde)

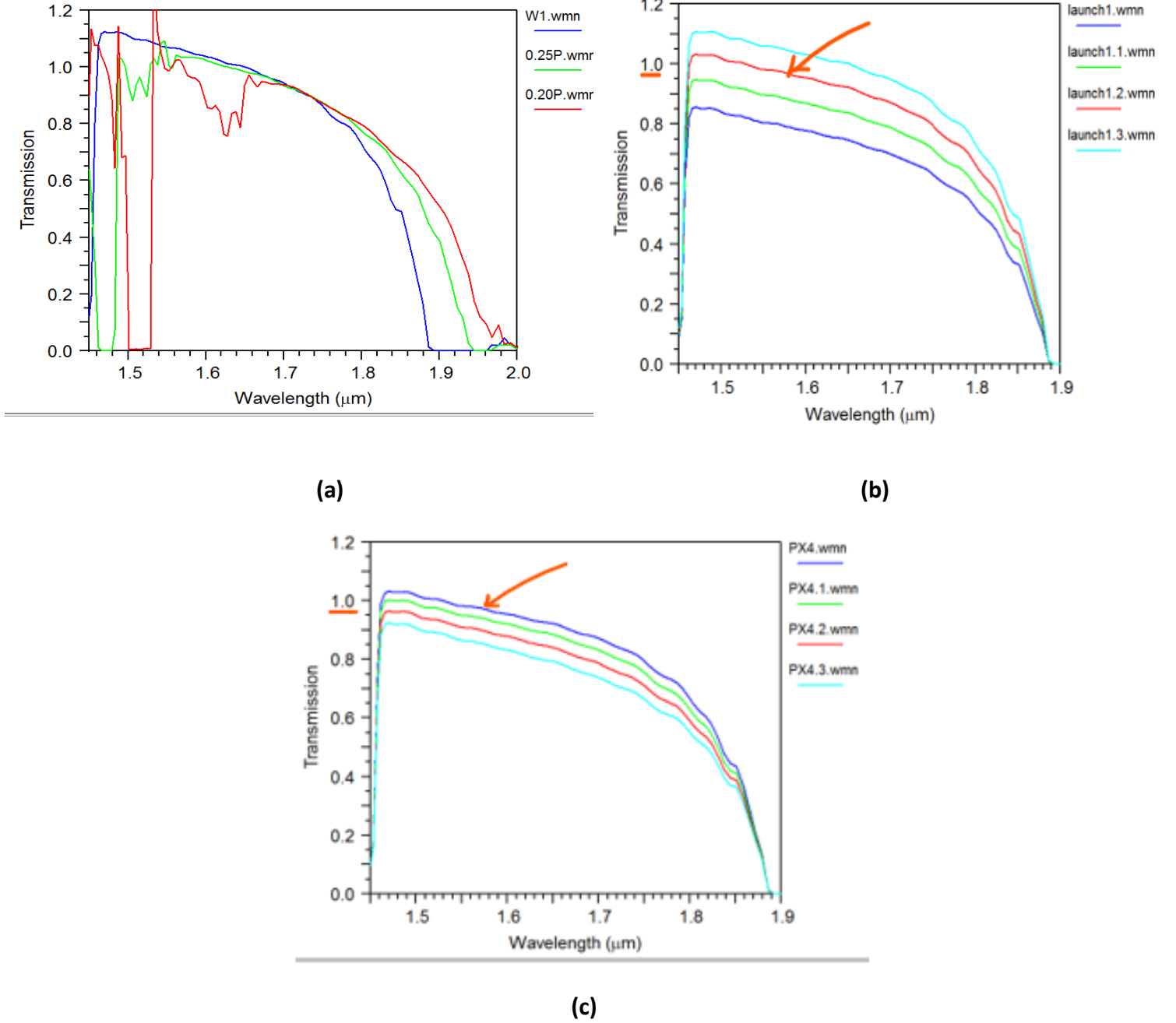


Figure -III17. a) : Le spectre de transmission de la structure pour différents le rayon du trou $r = 0.3 \cdot P$ (normal) ; $r = 0.25 \cdot P$; $r = 0.20 \cdot P$, b) : Le spectre de transmission de la structure en fonction différents longueur de l'émetteur ; launch = 1 nm ; launch = $P \cdot 1.1$ nm ; launch = $P \cdot 1.2$; launch = $P \cdot 1.3$ nm ; c) : Le spectre de transmission de la structure en fonction de changement de position de l'émetteur tel que PX4 ; PX4.1 ; PX4.2 ; PX4.3 nm

Nous remarquons que lorsque nous modifions la géométrie et les dimensions du corps du capteur, comme la suppression d'une rangée de trous et la modification du rayon ou de la position et de la longueur de l'émetteur, le rapport de transmission change. Nous concluons qu'il

existe une relation entre la structure du capteur et sa réponse. Aussi, selon notre étude précédente, la meilleure longueur d'émetteur est ($\text{launch} = 1.2$) et sa meilleure position est (PX4) car dans ces deux cas l'émission se rapproche de 1. Lorsque le rayon des trous devient plus petit (vert), la bande de transmission se décale vers le haut (Figure -III.17. a)

III.4.3. Guide d'onde avec cavité:

La structure de référence pour le capteur thermique est une grille triangulaire de période $a=0.4\mu\text{m}$ et rayon $r=0.33\mu\text{m}$. La structure consiste en un réseau de 21×21 trous percés dans du silicium d'indice de réfraction $n=3.48$. L'indice de réfraction d'un trou varie de 1.3 à 1.4 avec un pas de 0.02 (selon le matériau placé dans le trou). La structure se compose d'un semi-guide d'ondes dans le sens horizontal dans la ligne avec un rayon de $r=0.29\mu\text{m}$, et il y a une cavité résonnante en deux couleurs, bleue, avec un rayon de $r=0.35\mu\text{m}$ et verte, avec un rayon de $r=0.23\mu\text{m}$. (voir figure 18)

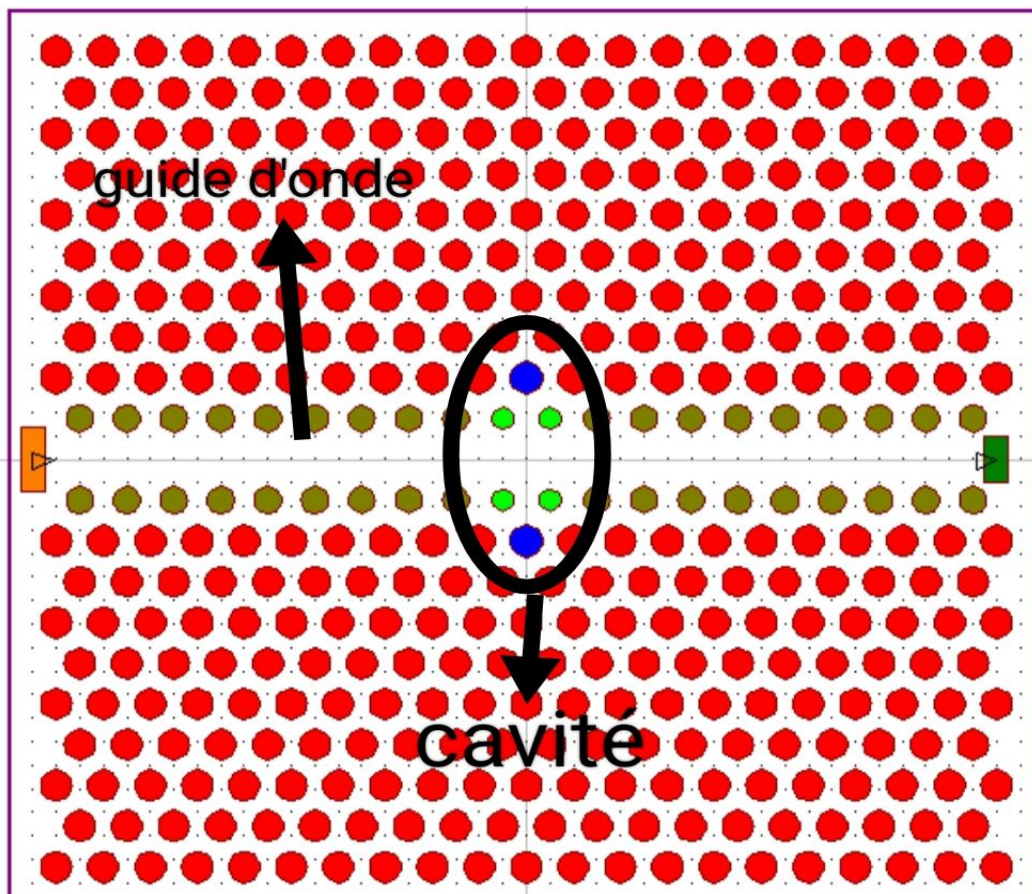


Figure. III.18. structure proposée d'un capteur de température à base d'une cavité résonant.

En simulant les spectres de transmission d'un CP où l'indice de réfraction des trous passe de 1.3 à 1.4 avec un incrément de 0.02, on observe un biais vers le haut en longueur d'onde, si on définit la sensibilité de cette manière $S=\Delta\lambda/\Delta n$ et les résultats sont présentés dans le tableau III. 7.

Tableau. .III7. Sensibilité (S) Longueur d'onde (λ) en fonction du changement d'indice de réfraction des trous n				
Réfractive index n1	Réfractive index n2	$\lambda1(\mu m)$	$\lambda2(\mu m)$	Sensitivity (nm/RIU)
N=1.3	N=1.32	1.5622	1.5663	205
N=1.32	N=1.34	1.5663	1.5704	205
N=1.34	N=1.36	1.5704	1.5746	210
N=1.36	N=1.38	1.5746	1.5787	205
N=1.38	N=1.40	1.5787	1.583	215

La figure 19 montre les spectres de résonance correspondants de la cavité CP optimisée pour différents indices de réfraction n des trous infiltrés.

Il s'avère que chaque spectre de résonance se comporte comme une courbe. Lorsque n passe de 1.3 à 1.4 avec un incrément de 0.02, la longueur d'onde de résonance de la cavité CP passe à une longueur d'onde plus grande avec une sensibilité de $S=210\text{nm/RIU}$.

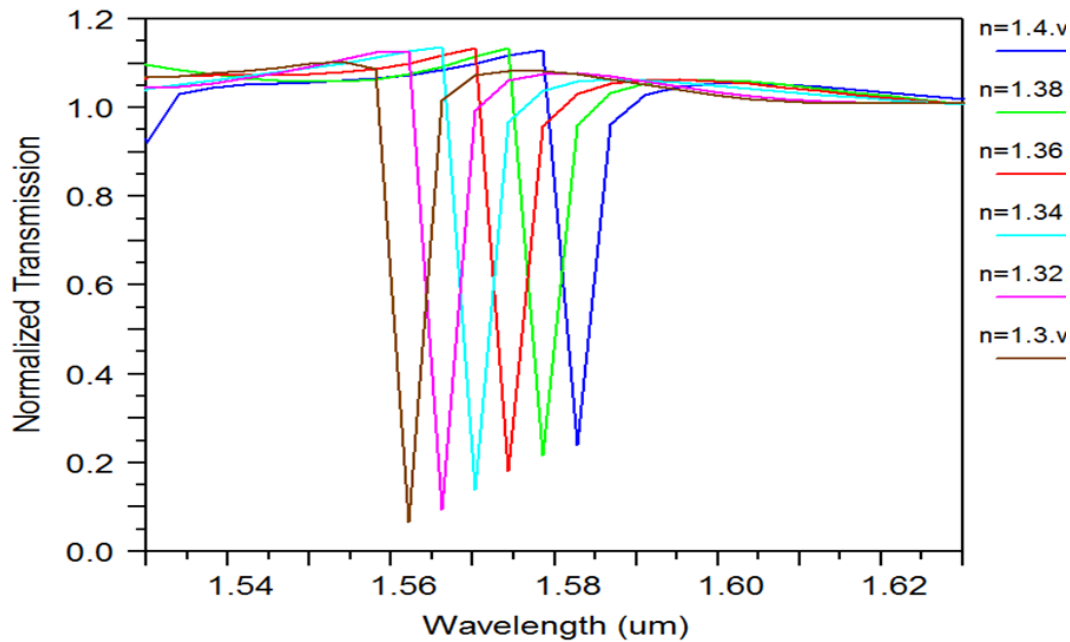


Figure III.19 : Les spectres de résonance de la cavité CP optimisée lorsque l'indice de réfraction de.

Sous l'influence de la dilatation thermique, la constante de réseau (et donc l'indice) de réfraction du silicium change. La relation qui relie l'indice de réfraction du silicium au changement de température est la suivante: [3] [4]

$$n(T) = n_0 + \alpha \times \Delta T \dots \dots \dots (III.1)$$

$$n = 3.38 \times (1 + 3.9 \times 10^{-5} \times T) \dots \dots \dots (III.2)$$

L'un des paramètres les plus importants dans l'évaluation d'un capteur de température est la sensibilité (s) définie comme le rapport entre le décalage de la longueur d'onde de résonance et sa différence d'indice de réfraction, nm/RIU, qui peut être exprimée par l'équation suivante :

$$S = \Delta \lambda / \Delta n \dots \dots \dots (III.3)$$

Tableau. III 8. Lndice de réfraction(n), longueur d'onde (λ) en fonction du changement de température.			
T kelvin (K)	T degre (C)	RI (n)	Longeur d'onde(um)
300	26.85	3.383539367	1.4738
350	76.85	3.390130367	1.4776
400	126.85	3.396721367	1.4812

Le tableau III.8 présente les résultats obtenus concernant l'effet de la modulation de température sur les paramètres appliqués tels que l'indice de réfraction, l'écart de longueur. La valeur de sensibilité du capteur de température est trouvée selon l'équation 3 autour de 576nm/RIU.

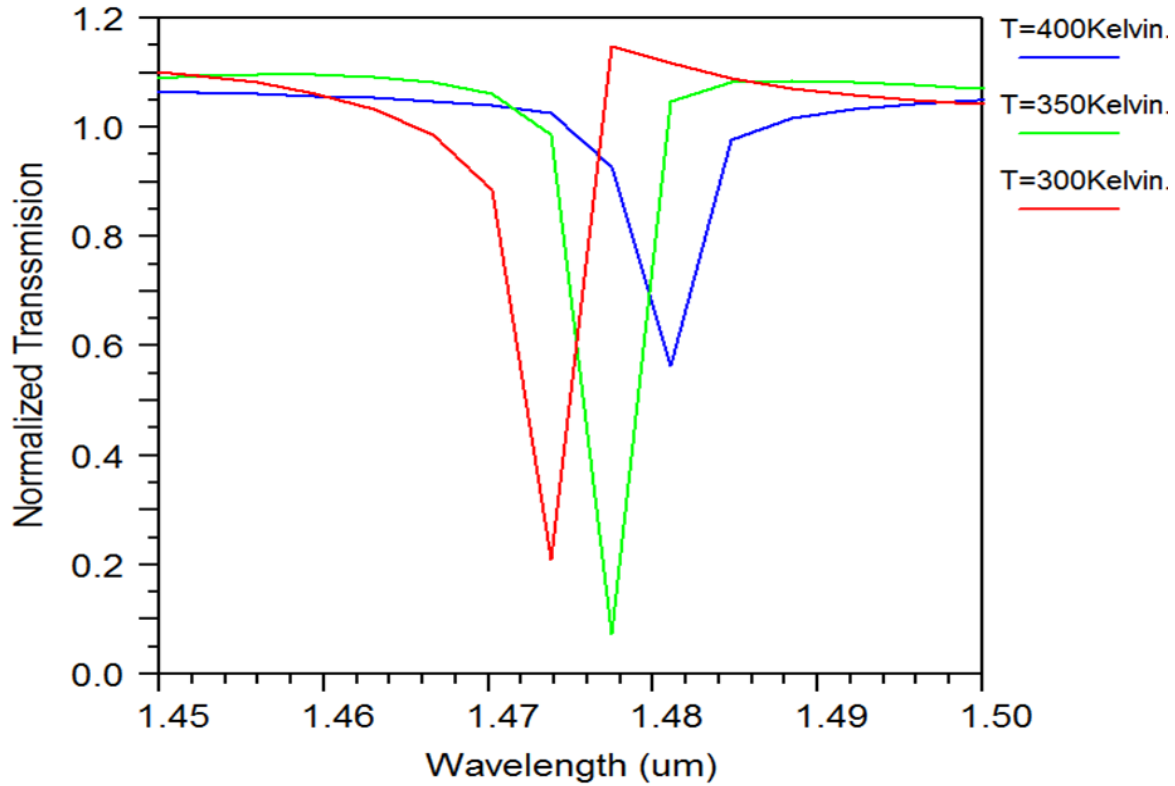


Figure III.20 : Le décalage de longueur d'onde de résonance du capteur dépendant de CP à la température appliquée est dans la plage de 300°K à 400°K.

La figure III.20 illustre l'effet d'une modification de la température appliquée sur la structure du capteur (300°K à 400°K) sur le décalage de la longueur d'onde résonante qui révèle l'existence d'une relation entre ces deux paramètres.

III.5. Conclusion :

Le but de notre étude est de découvrir l'effet de facteurs géométriques et physiques (rayon r , indice de réfraction n , facteur de forme, position et longueur de l'émetteur) sur les propriétés du cristal photonique afin de trouver les valeurs appropriées pour obtenir des structures photoniques de haute qualité. Ceci est dans le but de fabriquer un capteur de température optique très sensible

. A un rayon de $0.3 \cdot p$, la valeur de la bande interdite était de 562nm en mode TE, et la plus grande bande interdite a été observée pour le facteur de réfraction $n=1$ et le facteur de forme $FF=0.4$ en mode TM.

Lorsqu'une rangée de trous est supprimée ou que leur rayon ou la position et la longueur de l'émetteur sont modifiés, le rapport de transmission change.

Notre étude indique que les structures proposées sont très sensibles au changement d'indice de réfraction des trous, une sensibilité jusqu'à $S=210\text{nm/RIU}$ est observée.

Dans une plage dynamique de 300K à 400K, nous avons trouvé une sensibilité très élevée d'environ 576nm/RIU.

Références

- [1] S.Asmaa, “Propriétés optique des cristaux photoniques unidimensionnels périodiques.”Mémoire de Master, Université de Mostaganem,2018.
- [2] Barbara WILD “ Etude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photoniques bidimensionnels et de leur accordabilité ”, Thèse de doctorat n° 3573, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2006
- [3] Fu HW, Zhao H, Qiao XG, Li Y (2011) D. Z. Zhao and Z. Yong. Study on a novel photonic crystal temperature sensor. Optoelectron Lett 7(6):419–422
- [4] Tinker MT, Lee JB (2005) , « Thermal and optical simulation of a photonic crystal light modulator based on the thermo-optic shift of the cut-off frequency. OptExpress »13(18):7174–7188.

Conclusion générale

Conclusion générale

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

Le capteur à base de cristaux photoniques est une excellente solution de par les nombreux avantages qu'il offre par rapport aux capteurs électriques classiques, car il offre une sensibilité satisfaisante avec une plage de fréquence plus large.

L'objectif de cette étude est la conception d'un capteur de température à base des cristaux photoniques 2D en silicium (Si) à l'aide du logiciel RSOFT CAD.

Nous avons divisé cette étude en trois chapitres, le premier chapitre parle donc des cristaux photoniques, de leur définition, de leurs propriétés, de leurs types, etc. Pour le deuxième chapitre, nous avons vu un aperçu des capteurs, puis nous avons approfondi la description des capteurs basés sur les cristaux photoniques qui sont à la base de notre étude. Nous en avons cité 4 types dont le plus important est le capteur de température à base de cristaux photoniques que nous avons conçu et détaillé plus loin. Dans le troisième chapitre , nous avons procédé à l'étude de l'effet de facteurs géométriques et physiques (rayon r , indice de réfraction n , facteur de forme, position et longueur de l'émetteur) sur les propriétés du cristal photonique afin de trouver les valeurs appropriées pour obtenir des structures photoniques de haute qualité. Ceci est dans le but de fabriquer un capteur de température optique très sensible.

A un rayon de $0.3 \cdot p$, la valeur de la bande interdite était de 562nm en mode TE, et la plus grande bande interdite a été observée pour le facteur de réfraction $n=1$ et le facteur de forme $FF=0.4$ en mode TM.

Lorsqu'une rangée de trous est supprimée ou que leur rayon ou la position et la longueur de l'émetteur sont modifiés, le rapport de transmission change.

Nos calculs indiquent que les structures proposées sont très sensibles au changement d'indice de réfraction des trous, une sensibilité jusqu'à $S=210\text{nm}/\text{RIU}$ est Observée. Dans une plage dynamique de 300K à 400K, nous avons trouvé une sensibilité très élevée d'environ $576\text{nm}/\text{RIU}$.

Résumé

L'objectif de cette étude est la conception d'un capteur de température à base des cristaux photonique en silicium (Si) à l'aide du logiciel RSOF CAD. Le principe de détection est basé sur la variance d'indice de réfraction du Si due au changement de temperature. Nos calculs indiquent que les structures proposées sont très sensibles au changement d'indice de réfraction des trous, une sensibilité jusqu'à $S=210\text{nm/RIU}$ est Observée. Dans une plage dynamique de 300K à 400K, nous avons trouvé une sensibilité très élevée d'environ 576nm/RIU.

Mots Clés: Capteurs de température, Cristaux photoniques (2D), Bande Interdite Photonique.

Abstract

The objective of this study is the design of a temperature sensor based on silicon (Si) photonic crystals using RSOF CAD software. The detection principle is based on the refractive index variation of Si due to temperature changes. Our calculations indicate that the proposed structures are highly sensitive to the refractive index change of the holes, with a sensitivity of up to $S=210\text{nm/RIU}$ observed. In a dynamic range from 300K to 400K, we found a very high sensitivity of approximately 576nm/RIU.

Keywords: Temperature sensors, Photonic crystals (2D), Photonic Bandgap.

الملخص

هدف هذه الدراسة هو تصميم مستشعر حرارة بناءً على بلورات الفوتونيات السيليكونية (Si) باستخدام برنامج RSOF CAD. يستند مبدأ الكشف على تغير معامل الانكسار في السيليكون نتيجة لتغير درجة الحرارة. تشير حساباتنا إلى أن الهياكل المقترحة حساسة جداً لتغير معامل الانكسار في الثقوب، مع وجود حساسية تصل إلى $S = 210$ نانومتر /RIU. في نطاق ديناميكي يتراوح بين 300K و 400K ، وجدنا حساسية عالية جداً بحوالي 576 نانومتر /RIU.

الكلمات الرئيسية: مستشعرات الحرارة، بلورات فوتونيات (2D) ، فجوة الفوتونات.