



# *Dédicace*

## **Merci Allah**

de m'avoir donné la capacité d'écrire et de terminer ce mémoire,

Je dédie ce travail

**À** mes parents pour leurs encouragements et leur soutien  
matériel et moral tout au long de ma vie.

**À** ceux qui ont partagé la vie avec moi dans tout  
ses détails :

**À** mes frères et mes sœurs: **Chames Eddine, Abd El Samed,**

**Sabah et Anfel**

**À** mes amies et collègues surtout ma binôme:

**IZDIHAR**

Et un merci spécial à mon cher amie **AKILA**

Et à toute la famille : **AMOUMENE**

**À** tous ceux qui m'en ont aidé de près ou de loin  
à réaliser ce travail.

***Amoumene Abir***



# *Dédicace*

## **Merci Allah**

de m'avoir donné la capacité d'écrire et de terminer ce mémoire,

Je dédie ce travail

À mes parents pour leurs encouragements et leur soutien  
matériel et moral tout au long de ma vie.

À ceux qui ont partagé la vie avec moi dans tout ses  
détail : A mes frères et mes sœurs:

**AFAF , KHALED, RIHAB, KUSAY, ALAA EDDINE.**

À mes amies et collègues: **ABIR, KHALTHOUM,**

**FATEN, IKHLAS**

Surtout: **M.SABER NOUARI**

À mes professeurs: **M.MOHAMED BOULESBAA**

Et à toute la famille : **HALASSA**

À tous ceux qui m'en aider de près ou de loin  
à réaliser ce travail.

*Izdihar Halassa*



# ***REMERCIEMENT***

*Nous remercions **Dieu** tout puissant de nous avoir accordé la force et le courage afin de pouvoir accomplir ce travail.*

*Nous remercions notre encadreur le **Dr. Mohammed BOULESBAA** maitre de conférences (A) au département d'électronique et des télécommunications, pour ses efforts, ses conseils et ses idées, son soutien constant et sa disponibilité.*

*Nos remerciements vont aussi au président de jury*

***M<sup>eme</sup>. BENKRINAH Sabra** maitre de conférences (B) et à l'examineur **M<sup>eme</sup>. GAMOUH Samia** maitre de conférences (B) au département d'électronique et des télécommunications pour avoir accepté d'examiner et de juger ce modeste travail.*

*Nos remerciements sont adressés également aux enseignants de notre département d'électronique et des télécommunications pour leurs contributions à notre formation.*

*Enfin, nous remercions nos familles, nos amies et tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.*

# Résumé

Les cristaux photoniques sont des matériaux diélectriques dont l'indice de réfraction varie périodiquement sur l'échelle des longueurs d'onde dans une ou plusieurs directions de l'espace. Cette différence provoque l'apparition de bandes interdites afin que la lumière ne se diffuse pas à travers la structure. Cette étude vise à concevoir des capteurs bidimensionnels (CP-2D) à cristal photonique à détection de température (CP-2D) afin d'obtenir une sensibilité maximale et un bon facteur de qualité. Le principe de détection est basé sur la variance d'indice de réfraction du Si due au changement de température qui modifie la position des pics de transport pour cela, nous étudions les bandes optiques interdites, puis simulons la transmission lumineuse pour différentes températures à l'aide d'un simulateur Rsoft basé sur (PWE) et (FDTD-2D) . Les résultats obtenus ont montré une sensibilité élevée,  $S = 267,75 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$  et un facteur de qualité supérieur,  $Q = 242,4497$  pour la première structure et pour la seconde une sensibilité très élevée  $444,444 \text{ m}/^{\circ}\text{C}$ , le facteur de qualité maximum étant de 52,8.

**Mots clés:** capteurs de température , cristaux photoniques (2D) , bande interdite photonique, facteur de qualité , Sensibilité , FDTD, PWE .

## ملخص

البلورات الضوئية عبارة عن مواد عازلة يختلف معامل انكسارها بشكل دوري على مقياس الطول الموجي في اتجاه واحد أو أكثر في الفضاء. يتسبب هذا التكرار في ظهور فجوات النطاق الممنوعة بحيث لا يمكن للضوء الانتشار في الهيكل. تهدف هذه الدراسة إلى تصميم مستشعرات تعتمد على البلورات الضوئية ثنائية الأبعاد CP-2D للكشف عن درجة الحرارة من أجل الحصول على أقصى قدر من الحساسية وعامل جودة جيد لها. الهياكل المقترحة قائمة على شبكة سداسية من قضبان السيليكون Si محاطة بالهواء. يعتمد مبدأ الكشف على تباين معامل الانكسار لـ Si بسبب التغير في درجة الحرارة التي يعدل موضع قمم النقل. يتم إنشاء الإزاحة التي سيتم استخدامها لحساب المعلم مثل الحساسية وعامل الجودة. لهذا درسنا الفجوات الضوئية المحظورة ثم محاكاة نقل الضوء لدرجات حرارة مختلفة باستخدام محاكي (Rsoft) القائم على أساس (PWE) و (FDTD-2D). أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها حساسية عالية تقدر بـ  $S = 267.7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  وعامل جودة أعلى درجة مئوية  $S = 444.444 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  للهيكل الأول وللهيكل الثاني حساسية عالية جداً  $Q = 242.4497$  الجودة القصوى هو 52.8.

الكلمات المفتاحية : حساسات درجة الحرارة ، البلورات الضوئية (D2) ، فجوة الحزمة الضوئية ، عامل الجودة ، الحساسية ، FDTD ، PWE.

# Abstract

Photonic crystals are dielectric materials whose refractive index varies periodically on the wavelength scale in one or more directions in space. This variation creates band gaps so that light can not pass through the structure. This study proposes to design two-dimensional photonic crystal (CP-2D) sensors to detect temperature in order to obtain maximum sensibility and a good quality factor. The proposed structures are based on a hexagonal array of silicon (Si) rods enclosed in air. The detection principle is based on the variation of the refractive index of Si caused by the temperature change which modified the position of the transmission peaks. An shift is created which will be used to calculate parameters such as the sensitivity and the quality factor. For this purpose, we studied the photonic band gaps and then simulated the light transmittance for different temperatures using the Rsoft simulator based on the (PWE) and (FDTD-2D) methods. The results obtained showed a high sensibility,  $S = 267.75 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  and a high quality factor,  $Q = 242.4497$  for the first structure and for the second one a very high sensibility,  $S=444.444 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , the maximum quality factor is 52.8.

**Keywords:** temperature sensors, photonic crystals (2D), bandgap photonics, quality factor, Sensitivity, FDTD, PWE.

## *Liste des abréviations*

BIP	Bande interdite photonique
CFC	Cubique à Face Centrée
CPs	Cristaux Photoniques
DBR	Distributed Bragg Reflector
FDTD	Finite Difference in the Time Domain
FWHM	Full width half maximum
Hn	Hexagonale
LD	Limite de la détection.
Ln	Linéaire
n, IR	Indice de réfraction
PBG	Photonique band gap
Pm	Picomètre
PWE	Plane Wave Expansion
r	Rayon de tige
Rm	Résolution instrumentale.
Si	Silicium
T	Température
TE	Transverse Electrique
TM	Transverse Magnétique
WDM	Wavelength Division Multiplexing
1D , 2D, 3D	Un, deux ,trios dimensions



## *Liste des symbols*

$\lambda$	Longueur d'onde
$\epsilon_r$	Permittivités
$\delta$	Contraste d'indice de réfraction
a	Periode
$\omega_0$	Fréquence de résonance
Q	Facteur de qualité
S	Sensibilité
$\alpha$	Coefficient thermo-optique
°C	Degré Celsius

## *Liste des figures*

<i>Chapitre I</i>	
Figure I.1	Représentation nanostructure d'un cristal photonique à une dimension .....4
Figure I.2	Miroir de Bragg.....4
Figure I.3	Structure connectée.....5
Figure I.4	Structure déconnectée.....5
Figure I.5	Décomposition du champ électromagnétique suivant ses deux polarisations TE et TM.....6
Figure I.6	Structure carrée.....7
Figure I.7	Structure triangulaire.....7
Figure I.8	Structure hexagonal.....8
Figure I.9	Structure nitrure de Bore.....8

Figure I.10	Structure « La Yablonovitch ».....9
Figure I.11	Structure « tas de bois ».....9
Figure I.12	Périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.....11
Figure I.13	Diagramme de bandes d'un cristal photonique (polarisation TE, réseau triangulaire).....12
Figure I.14	Diagramme de bandes d'un cristal photonique (polarisation TM, réseau triangulaire).....12
Figure I.15	( a) Défaut lacunaire ;(b) Défaut de substitution.....13
Figure I.16	( a) Défaut lacunaire ; (b) et (c) Défauts de substitutions.....13
Figure I.17	Défaut de dimension du motif élémentaire.....14
Figure I.18	Défaut de distance entre motifs élémentaires.....14
Figure I.19	Défaut sur la permittivité relative $\epsilon$ .....14
Figure I.20	Défaut par vacuité (C'est le défaut le plus utilisé).....15
Figure I.21	Différents composants à base de défauts linéaires, a) guide droit, b) virage à 120° et c) jonction Y.....15
Figure I.22	Le diviseur à cristaux photoniques en Y (1x2).....16
<b>Chapitre II</b>	
Figure II.1	Principe d'un capteur.....19
Figure II.2	Exemples de cavités de types Hn : (a) cavité H0, (b) cavité H1, cavité H4.....23
Figure II.3	Exemples de cavités de types Ln : (a) cavité L3, (b) cavité L5, (c)cavité L7.....24

Figure II.4	Cavité de type kuramochi.....24
Figure II.5	structure du capteur à base d'une cavité à hétéro-structures .....25
Figure II.6	Représentation fréquentielle de l'intensité Lorentzienne d'un mode dans la cavité centré à la fréquence $\omega_0$ .....27
<b>Chapitre III</b>	
Figure III.1	Capteur de température : (a) à base d'une cavité ponctuelle.....28  (b) à base d'une cavité résonante.....28
Figure III.2	Configuration schématique d'un capteur optique à base d'une cavité ponctuelle pour la détection de la température.....29
Figure III.3	Configuration schématique d'un capteur optique à base d'une cavité résonnante pour la détection de la température .....29
Figure III.4	Structures initiale à CPs utilisées pour concevoir les capteurs de température.....30
Figure III.5	Diagramme de bande interdite photonique de la structure de réseau en CP.....32
Figure III.6	Distribution du champ électrique en 2D du capteur de température...33
Figure III.7	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.....34
Figure III.8	Longueur d'onde de résonance du capteur en fonction du changement de la température.....36
Figure III.9	Décalage de la longueur d'onde de résonance du capteur en fonction de l'indice de réfraction des tiges de silicium.....37
Figure III.10	La sensibilité et le facteur de qualité du capteur en fonction de la

	variation de la température.....38
Figure III.11	Diagramme de la bande interdite photonique (BIP) de la structure de réseau en CP pour les modes TE et TM.....39
Figure III.12	Structure proposée d'un capteur de température à base d'une cavité résonante.....40
Figure III.13	Distribution du champ électrique en 2D du capteur de température à base d'une cavité résonante.....41
Figure III.14	Décalage de la longueur d'onde résonnante du capteur à base de CP à la température appliquée dans la plage de 0 C° à 630°C.....41
Figure III.15	Longueur d'onde de résonnante du capteur en fonction du changement de la température.....43
Figure III.16	Décalage de la longueur d'onde de résonnance du capteur en fonction de l'indice de réfraction.....44
Figure III.17	La sensibilité et le facteur de qualité du capteur en fonction de la variation de la température.....44

## *Liste des tableaux*

<b><i>Chapitre II</i></b>	
Tableau II.1	Exemples des capteurs passifs.....20
Tableau II.2	Exemples des capteurs actifs.....21
<b><i>Chapitre III</i></b>	
Tableau III.1	Paramètres des capteurs de température utilisés.....31
Tableau III.2	Plages des bandes interdites.....33
Tableau III.3	Caractérisation des paramètres obtenus de la conception du capteur de

	température sur la plage de température (0 °C à 640°C) .....35
Tableau III.4	Plages des bandes interdites en fréquences et en longueurs d'ondes.....39
Tableau III.5	Paramètres fonctionnels du capteur de la température à différents niveaux de température.....42
Tableau III.6	Valeurs de la sensibilité les plus élevées rapportées par rapport aux systèmes de capteurs de température existants.....45

---

---

# *TABLE DES MATIÈRES*

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I Notions de base sur les cristaux photonique</b>	<b>3</b>
1. Introduction.....	3
2. Cristaux photoniques.....	3
2.1 Définition.....	3
2.2 Différents types de cristaux photoniques.....	3
A. cristaux photoniques unidimensionnels (1D).....	3
B. cristaux photoniques bidimensionnels (2D).....	4
C. cristaux photoniques tridimensionnels (3D).....	8
2.3 Caractéristiques géométrique et physique des cristaux photonique.....	10
2.3.1 Symétrie .....	10
2.3.2 Paramètre de réseau.....	10
2.3.3 Facteur de remplissage.....	10
2.3.4 Contraste d'indice de réfraction.....	10
2.3.5 Périodes .....	11
2.4 Bande interdite photonique .....	11
2.5 Défaut dans un cristal photonique .....	12
2.5.1 Défauts ponctuels .....	13
2.5.2 Défauts étendus.....	13
2.6 Applications des cristaux photoniques .....	15
2.6.1 Guides d'onde à cristaux photoniques.....	15
2.6.2 Diviseur de puissance .....	16
2.6.3 Capteur.....	16

3. Conclusion.....	16
<b>Chapitre II      Capteurs à cristaux photoniques</b>	<b>18</b>
1. Introduction .....	18
2. Définition.....	18
3. Principe de fonctionnement .....	19
4. Classifications des capteurs.....	19
4.1 Capteurs passifs.....	19
4.2 Capteurs actifs.....	20
5. Caractéristiques des capteurs.....	21
5.1 Sensibilité.....	21
5.2 Reproductibilité.....	22
5.3 Exactitude.....	22
5.4 Limite de détection.....	22
6. Cavité résonante.....	22
6. 1 Cavités à défauts ponctuels.....	23
a . Cavité Hn .....	23
b . Cavité Ln.....	23
6.2 Cavités à défaut couplés .....	24
a . Cavité de type « kuramochi » .....	24
b . Cavité à hétéro-structrues .....	25
c . Cavité à modulation de largeur de défaut linéique.....	25
7. Conclusion.....	27
<b>Chapitre III      <i>Conception et simulation des capteurs de température à base de CPs</i></b>	<b>28</b>
1. Introduction.....	28
2. Principe de détection de la température par les capteurs à cristaux photoniques	28
2.1 Structure.....	28
3. Schéma fonctionnel pour la détecter de la température.....	29
4. Structures de base des capteurs de température .....	30
4.1 Capteur à base d'une cavité ponctuelle .....	30

4.2 Capteur à base d'une cavité résonnante .....	30
5. Résultats et discussions .....	31
5.1 Capteurs de température à base d'une cavité ponctuelle.....	31
5.2 Capteur de température à base d'un capteur à cavité résonnante.....	38
6. Conclusion.....	45
Conclusion générale.....	47
Bibliographie.....	49
Annexe.....	A



---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

# Introduction générale

Au cours de ces dernières années, l'accroissement des besoins industriels dans les différents domaines requérant les technologies de pointe et notamment les télécommunications optiques (filtres [1], démultiplexeurs [2] et fibres à cristaux photoniques), l'optoélectronique (lasers, photo-détecteurs, interconnexions optiques), sécurité, capteurs, biomédical, ..., oriente les recherches vers le développement et la conception des circuits photoniques intégrés. Dans ce contexte l'émergence de nouvelles technologies, pour satisfaire ces besoins, ont été proposées et particulièrement dans le domaine de la photonique. Cette dernière représente un domaine de recherche exaltant pour le développement des dispositifs destinés à l'optique intégrée [3].

Le cristal photonique est apparu pour la première fois en 1987 [4,5] et le premier cristal photonique a été fabriqué en 1991 [6]. Les structures à cristaux photoniques (CPs) consistent en un empilement de matériaux dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans une, deux ou trois dimensions. Cette périodicité du milieu induit la lumière qui se propage dans ce cristal, un effet similaire à celui de la tension périodique sur les électrons dans le cristal. Tout comme il existe des énergies autorisées et des bandes interdites pour les électrons il existe des bandes photoniques d'états permises et des bandes photoniques interdites [7].

Les applications potentielles des bandes interdites photoniques (BIP) 2D sont diverses et multiples, et on trouve entre autres la réalisation de très petites cavités résonnantes, de guides d'ondes. Ces matériaux ont conduit à l'émergence de nouveaux composants optoélectroniques plus performants et compacts par rapport aux composants conventionnels connus actuellement [8].

L'objectif de ce mémoire est le développement et la conception des capteurs à base des cristaux photonique pour la détection de la température, avec de bonnes performances en termes d'intensité de transmission, de réflexion, la meilleure sensibilité et le facteur de qualité le plus élevé à l'aide du logiciel RSOFT CAD.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter un rappel sur les cristaux photoniques. Ensuite, les différents types de cristaux photoniques, leurs caractéristiques, et les principaux défauts existant aux niveaux des cristaux photoniques seront également exposés.

Enfin, une présentation de quelques applications des cristaux photoniques dans le domaine des communications optique sera abordée.

Dans le deuxième chapitre, nous intéresserons en particulier par les capteurs optiques à base de CPs, nous citerons une définition des capteurs et leur principe de fonctionnement, classification des capteurs. Ensuite, les caractéristiques des capteurs seront présentés. Enfin, nous terminerons ce chapitre pour les principaux types de cavités.

La troisième chapitre est consacré au développement, étude et conception de deux structures d'un capteur à base de cristaux photoniques bidimensionnels pour la détection de la température. La conception de ces capteurs est basée sur deux cavités différentes ponctuelle et résonnante en utilisant la méthode FDTD, PWE en 2D. Enfin, les différents résultats de simulation obtenus seront présentés et discutés en détail. Nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale résumera l'essentiel des travaux élaborés et des perspectives.

---

# CHAPITRE I

## *Notions de base sur les cristaux photoniques*

---

---

# Notions de base sur les cristaux photoniques

## 1 Introduction :

Ces dernières années, de nombreuses recherches se sont concentrées sur le développement de micro et nano dispositifs photonique en utilisant des cristaux photonique (CP) grâce à ses pouvoirs de contrôler la propagation de la lumière [9]. Ce chapitre est une introduction générale sur les cristaux photoniques. Nous débutons par une définition des cristaux photoniques, nous continuerons par une présentation des différents types de cristaux photoniques et les caractéristiques de cristaux photoniques, ainsi une présentation les principes des défauts qui existent aux niveaux des cristaux photoniques. Nous terminons ce premier chapitre par quelque application dans les domaines optique et télécommunication.

## 2 Cristaux photoniques :

### 2.1 Définition :

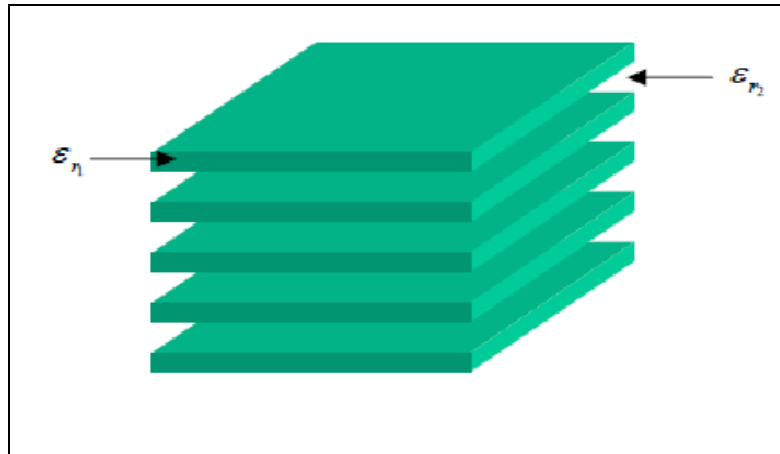
Les cristaux photoniques (CPs) sont des matériaux diélectriques nano-structurés dont l'indice de réfraction varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde dans une ou plusieurs directions de l'espace [10]. Ils produisent une certaine région de fréquence, où la propagation des ondes électromagnétiques est interdite, ce qu'on appelle la bande interdite photonique (BIP) (en anglais photonique band gap PBG). Cette propriété intéressante offre aux cristaux photoniques la possibilité de contrôler la propagation sans absorption des ondes électromagnétiques et permet ainsi des perspectives nouvelles pour la manipulation de la lumière [11].

### 2.2 Différents types de cristaux photoniques :

Le nombre de directions de la périodicité de l'indice de réfraction (IR) indique le type de cristal photonique, donc il existe les trois types suivants [12] :

#### A. Cristaux photoniques unidimensionnels (1D) :

Le cristal photonique le plus simple consiste en une structure dont le constant diélectrique est périodique suivant une seule dimension. Ce milieu est constitué d'une alternance de couches diélectriques de permittivités différentes  $\epsilon_{r1}$  et  $\epsilon_{r2}$ , comme il est montré sur la figure (I.1). Cette structure porte le nom de miroir de Bragg [13].



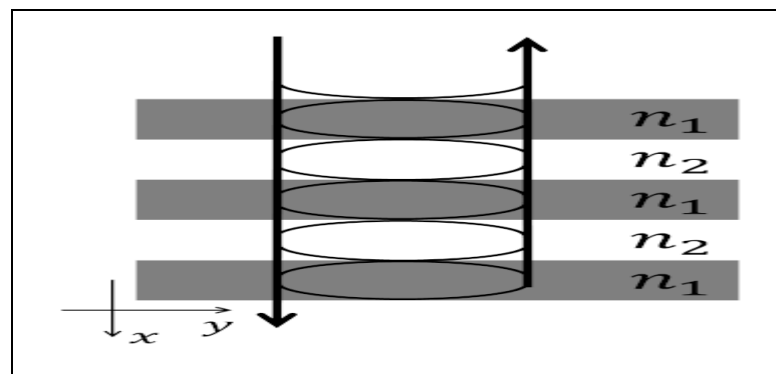
**Figure I.1:** Représentation nanostructure d'un cristal photonique à une dimension [9].

- **Miroir de Bragg** : DBR (Distributed Bragg Reflector), constitué d'une alternance de couches de deux matériaux d'indice  $n_1$  et  $n_2$ . La paire  $(n_1, n_2)$  étant répétée  $N$  fois et toutes les couches ont respectivement des épaisseurs physiques égales :

$$\text{Indice } n_1 = \lambda_{\text{Bragg}}/4n_1 \quad (\text{I.1})$$

$$\text{Indice } n_2 = \lambda_{\text{Bragg}}/4n_2 \quad (\text{I.2})$$

Avec,  $\lambda_{\text{Bragg}}$  : la longueur d'onde de Bragg pour laquelle le maximum de réflectivité est obtenu [14].



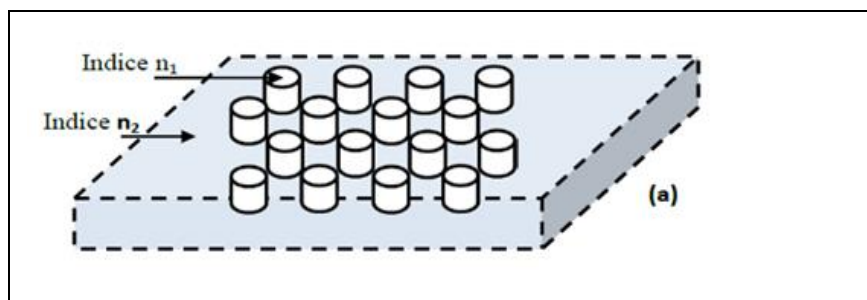
**Figure I.2:** Miroir de Bragg.

### B. Cristaux photoniques bidimensionnels (2D) :

Un cristal photonique bidimensionnel est une structure qui présente une modulation périodique de la permittivité diélectrique suivant deux directions de l'espace, et reste invariante dans la troisième. Beaucoup d'études se sont portées sur les structures bidimensionnelles, plus faciles à fabriquer, et qui peuvent présenter des gaps photoniques

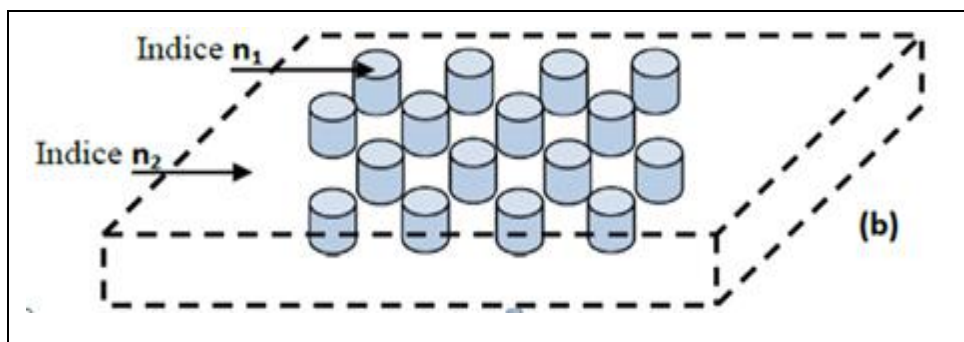
complets sur un plan. Les cristaux photoniques bidimensionnels sont d'un intérêt très important que les cristaux photoniques 1D du point de vue de contrôle de la lumière. Les cristaux photoniques 2D peuvent présenter une bande interdite photonique pour toutes les directions de propagation situées dans le plan de périodicité et permettent donc à priori un meilleur contrôle spatial des photons dans ce plan. De ce fait, ces derniers offrent une plus grande souplesse en termes de confinement optique, il existe deux types de ces structures périodiques 2D :

- Les structures dites « connectées » (figure I.3): le motif élémentaire a un indice  $n_1$  inférieur à l'indice  $n_2$  de la matrice diélectrique [15].



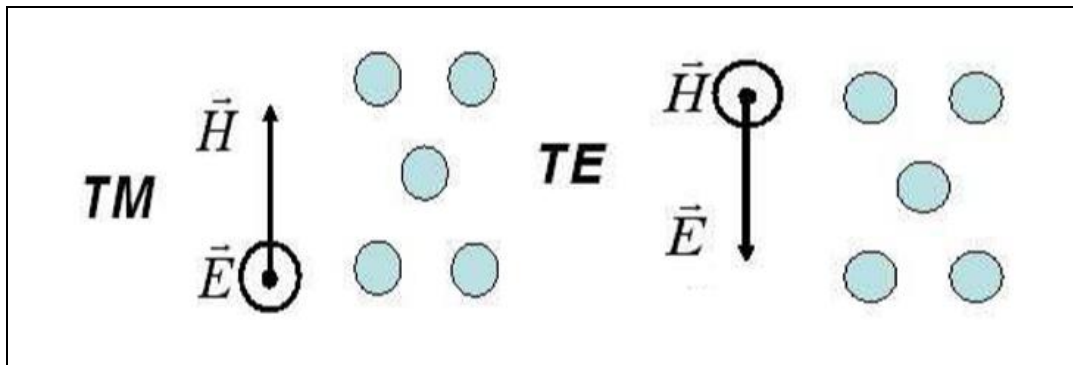
**Figure I.3 :** Structure connectée [16].

- Les structures dites « déconnectées » (Figure I.4): le motif élémentaire a un indice  $n_1$  supérieur à l'indice  $n_2$  de l'espace inter motifs. Elles sont constituées de tiges diélectriques alignées périodiquement dans l'air [15].



**Figure I.4 :** Structure déconnectée [16].

## - Décomposition du champ électromagnétique :



**Figure I.5:** Décomposition du champ électromagnétique suivant ses deux polarisations TE et TM [16].

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) (figure I.5), les bandes énergétiques permises ou interdites seront différentes. Il existe donc une bande interdite TE et une bande interdite TM lorsque les bandes interdites photoniques pour les polarisations TE et TM se recouvrent, on parle alors de bande interdite complète. Un cristal photonique peut également présenter une bande interdite pour l'une des polarisations mais pas pour l'autre [16].

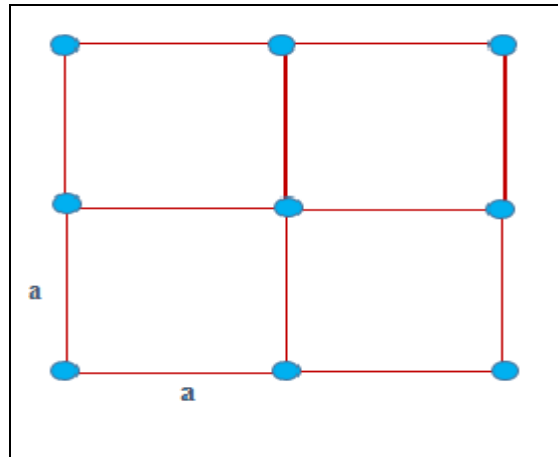
- **Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels :**

De nombreux théoriciens ont cherché à optimiser les dimensions des structures pour obtenir des bandes interdites complètes même si celles-ci possèdent peu d'application. On distingue 3 principales familles de matériaux à BIP bidimensionnelle selon la forme du réseau [17].

**a. Réseau carré :**

Les nœuds du réseau sont situés sur un carré de côté « a » (Figure I.6). Il a été montré que ce type de réseau est très sensible à l'angle d'incidence et à la polarisation de l'onde électromagnétique. Il est ainsi difficile d'obtenir une bande interdite totale, c'est-à-dire une bande interdite qui empêche la propagation quelle que soit la polarisation [17].

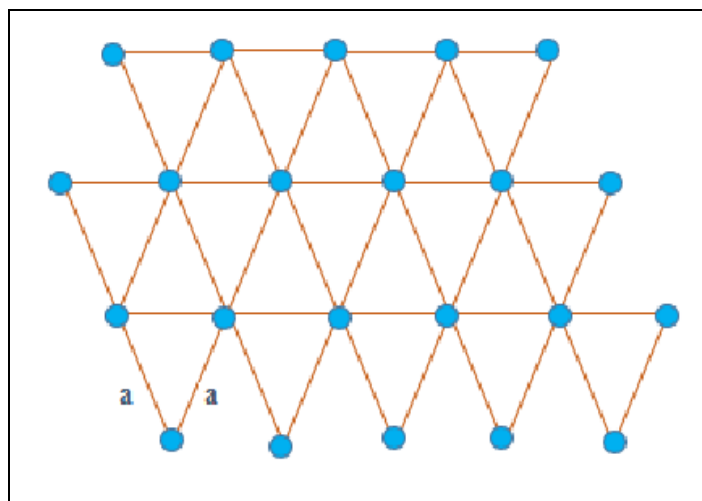




**Figure I.6 :** Structure carrée [16].

**b. Réseau triangulaire :**

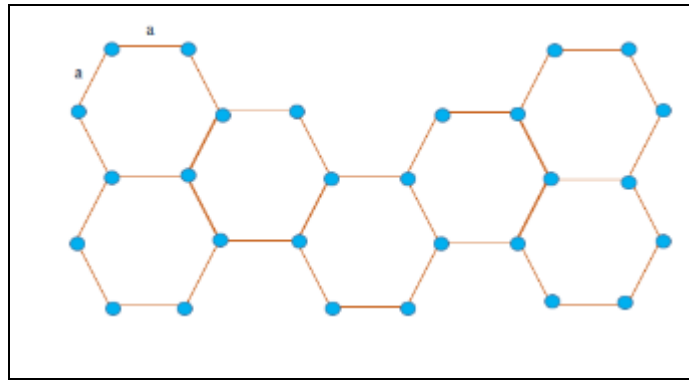
Le réseau triangulaire est le réseau 2D de plus haute symétrie dès lors que l'on se limite à un seul « atome » par maille. La zone de Brillouin est un hexagone. Chaque nœud du réseau est espacé de son proche voisin d'une même distance «  $a$  » (figure I.7). Cette structure est moins sensible à l'angle d'incidence que le réseau carré mais la bande interdite complète reste difficile à obtenir [17].



**Figure I.7 :** Structure triangulaire [16].

**c. Réseau hexagonal :**

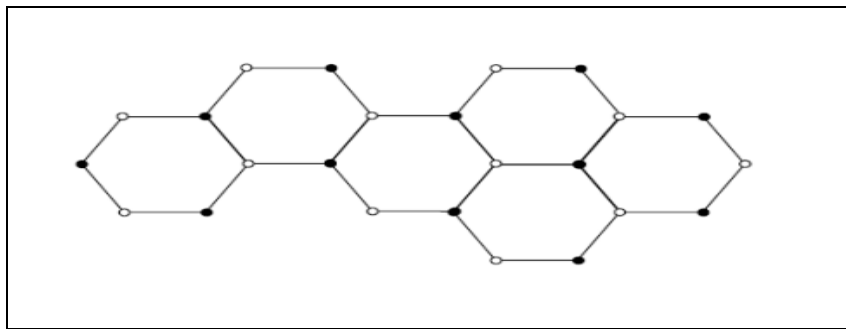
Sur un réseau hexagonal, si tous les nœuds sont identiques et espacés de «  $a$  », figure I.8), alors on appelle cette structure « graphite » car elle est similaire à la structure cristalline du graphite [9].



**Figure I.8 :** Structure hexagonal [16].

#### **d. Structure nitrure de Bore :**

Si un nœud diffère de son suivant par sa nature ou sa dimension, on obtient ainsi la structure cristalline du Nitrure de Bore (figure 1.9). Celle-ci permet d'obtenir de larges bandes interdites [11].



**Figure I.9:** Structure nitrure de Bore [11].

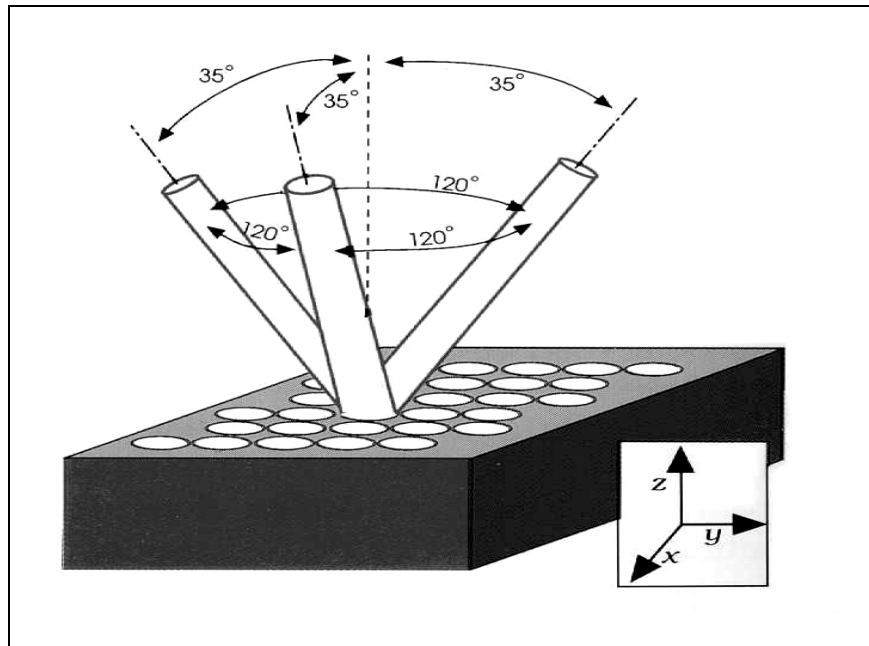
#### **C. Cristaux photoniques tridimensionnels (3D) :**

Les cristaux photoniques 3D constituent la seule structure qui permet d'obtenir une bande d'énergie interdite dans toutes les directions de l'espace. Le premier cristal photonique tridimensionnel a été fabriqué par K.M. Ho et al [18]. Il était formé de sphères de silicium arrangées sur une structure diamant. Mais l'histoire retient généralement la célèbre Yablonovite, structure 3D pour les micro-ondes fabriquée en 1993 par E. Yablonovitch [18]. En perçant des trous dans du plexiglas selon trois angles azimutaux séparés de  $120^\circ$ . De nombreuses méthodes de fabrication des cristaux photoniques tridimensionnels ont été proposées. Les deux suivantes ont attiré le plus d'efforts de recherche :

##### **❖ Yablonovitch :**

C'est premiers cristaux photoniques tridimensionnels a été construite en 1993 par E. Yablonovitch en perçant des trous dans un bloc de plexiglas selon trois angles azimutaux

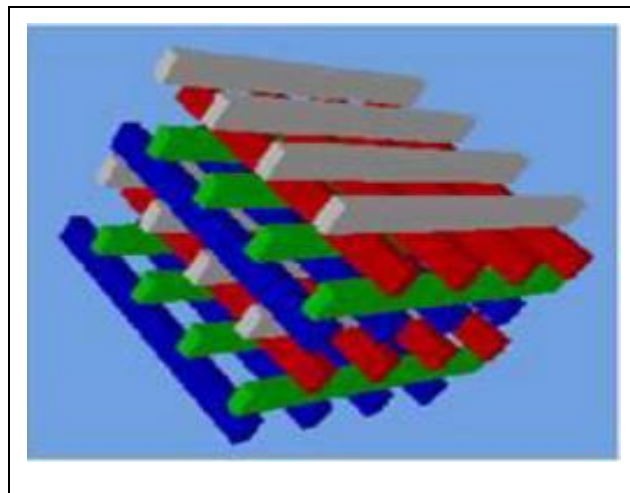
séparés de  $120^\circ$  et faisant un angle de  $35^\circ$  par rapport la normale (figure I.10). La structure est très proche d'une structure Diamant [18].



**Figure I.10** : Structure « La Yablonovitch » [9].

❖ **Structure tas de bois :**

Est une structure à bande interdite complète simple à réaliser. Elle peut être construite en optique. Elle est obtenue en déposant par couches successives des rubans de silicium polycristallin sans des tranchées de silice. Après avoir bâti la structure, la silice est gravée pour obtenir un cristal photonique 3D de silicium dans de l'air (figure I.11) [18].



**Figure I.11**: Structure « tas de bois » [12].

## 2.3 Caractéristiques géométriques et physiques des cristaux photoniques :

Un cristal photonique est caractérisé par: les différents matériaux qui le composent, le système cristallin selon lequel ces matériaux sont organisés et les volumes relatifs qu'ils occupent dans la cellule élémentaire du cristal. Les quantités représentatives de ces différentes caractéristiques [15] sont :

### 2.3.1 Symétrie :

La position des briques d'un CPh détermine la symétrie du réseau. Par exemple, pour un CPh 3D de particules sphériques une symétrie cubique, hexagonale compacte (HE) ou cubique à face centrée (CFC) peut être obtenue [12].

### 2. 3.2 paramètre du réseau :

C'est la distance fondamentale entre deux briques constitutives. Il détermine la région spectrale où le CPh interagit avec l'onde électromagnétique [12].

### 2.3.3 Facteur de remplissage :

Le facteur de remplissage  $f$  peut être comparé à la largeur du potentiel périodique de la physique du solide. S'il est pris pour le matériau de haut indice par exemple, il est défini comme le rapport entre le volume occupé par ce matériau dans la cellule élémentaire du cristal et le volume de cellule de cette dernière. L'influence de ces différents paramètres sur le comportement d'une structure photonique peut être comprise par analogie avec un potentiel périodique induit par l'arrangement des atomes dans un semi-conducteur [9].

### 2.3.4 Contraste d'indice de réfraction :

Le rapport entre l'indice de réfraction de la matrice diélectrique et l'indice de réfraction des motifs constituant le réseau, s'appelle le contraste d'indice. Pour une structure unidimensionnelle, le contraste d'indice est donné par :

$$\delta = n_H / n_L \quad (I.3)$$

Avec :

$n_H$ : L'indice de réfraction de la couche diélectrique de haut indice.

$n_L$ : L'indice de réfraction de la couche diélectrique de bas indice. Pour une structure bidimensionnelle, le contraste d'indice est la différence entre les indices du milieu et des motifs [16].

### 2.3.5 Périodes :

Ces paramètres géométriques, choisis selon le domaine de fréquence étudié, influent sur les caractéristiques de la bande interdite photonique. Par exemple pour un cristal photonique unidimensionnel, la période  $a = (a_1 + a_2)$  avec  $a_1$  l'épaisseur de la couche de permittivité  $\epsilon_1$  et  $a_2$  l'épaisseur de la couche de permittivité  $\epsilon_2$  [17].

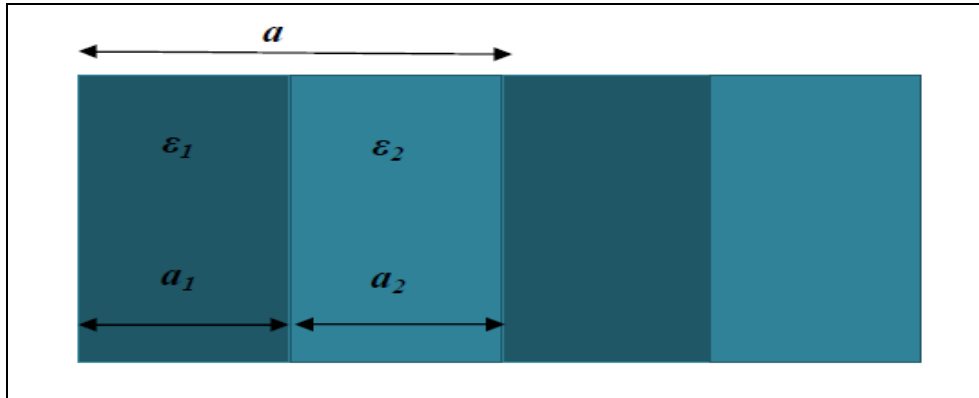


Figure I.12: périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.

### 2.4 Bande interdite photonique :

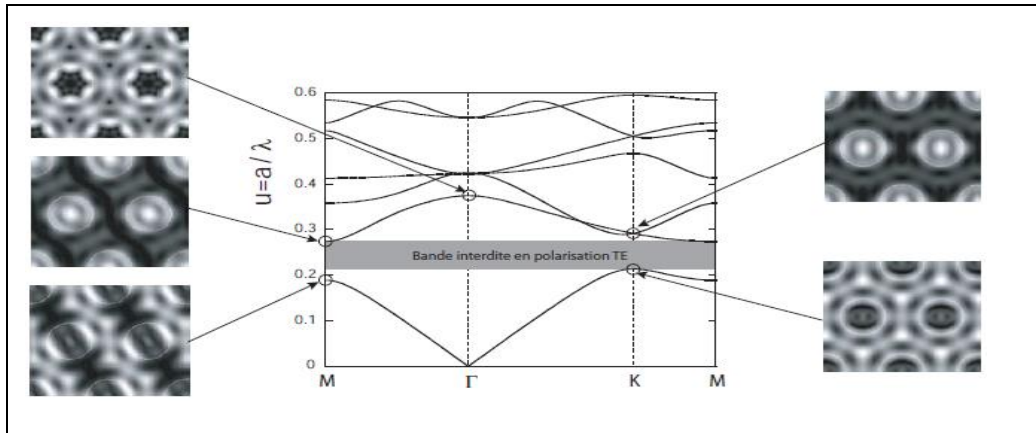
Dans un semi-conducteur la variation périodique du potentiel d'interaction entre électron et atomes fait que les électrons n'ont accès qu'à certains niveaux d'énergies, des bandes d'énergie permises, séparées entre elles par des bandes d'énergie interdites.

Une bande interdite photonique d'un cristal est dite complète(ou totale) lorsque, pour le domaine de fréquences considéré, le cristal ne supporte aucune mode électromagnétique de propagation ; c'est à-dire qu'une onde dont la fréquence est dans la bande interdite total ne peut pas se propager dans le cristal quelques soient sa polarisation et sa direction de propagation [19].

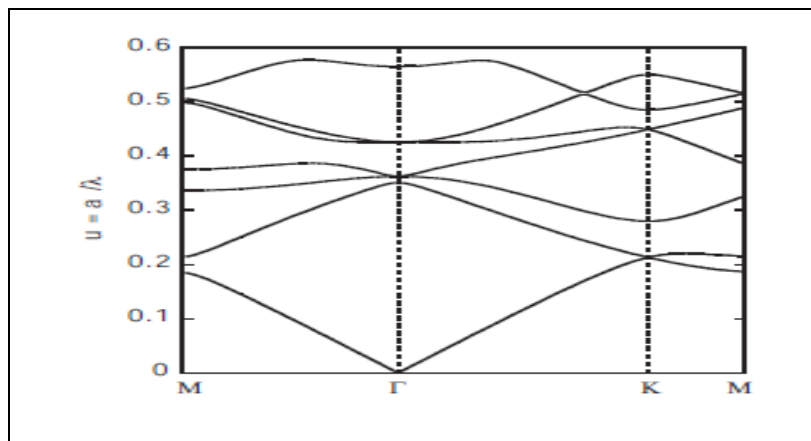
#### • Diagramme de bande :

Un cristal photonique est caractérisé par son diagramme de bandes qui est montré dans les figures (I.13) et (I.14) gravé dans une hétéro structure sur substrat GaAs ( $substrat = 11.4$  et  $trou = 1$ ) respectivement en polarisation TE et TM. Ces diagrammes ont été calculés par la méthode de décomposition en ondes planes. Le facteur de remplissage est  $f = 0.30$  et le réseau du cristal photonique est triangulaire. Une bande interdite est observée pour la polarisation TE entre  $0.21 < u = a/\lambda < 0.27$  (figure I.13). Par contre, pour la polarisation TM, aucune bande interdite ne s'ouvre (figure I.14). En effet, l'ouverture de bandes interdites photoniques TE est plus favorisée si des zones de fort indice de réfraction sont connectées. Dans le cas

contraire, si les zones de faible indice de réfraction sont connectées (par exemple, des piliers diélectriques dans l'air), c'est l'ouverture d'une bande interdite en polarisation TM qui est favorisée [13].



**Figure I.13:** Diagramme de bandes d'un cristal photonique (polarisation TE, réseau triangulaire).



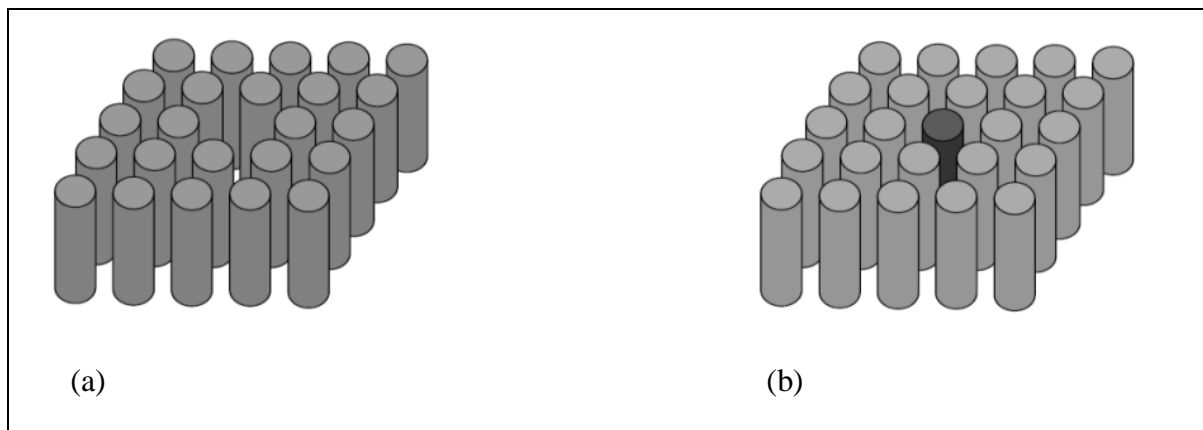
**Figure I.14:** Diagramme de bandes d'un cristal photonique (polarisation TM, réseau triangulaire).

## 2.5 Défaut dans un cristal photonique :

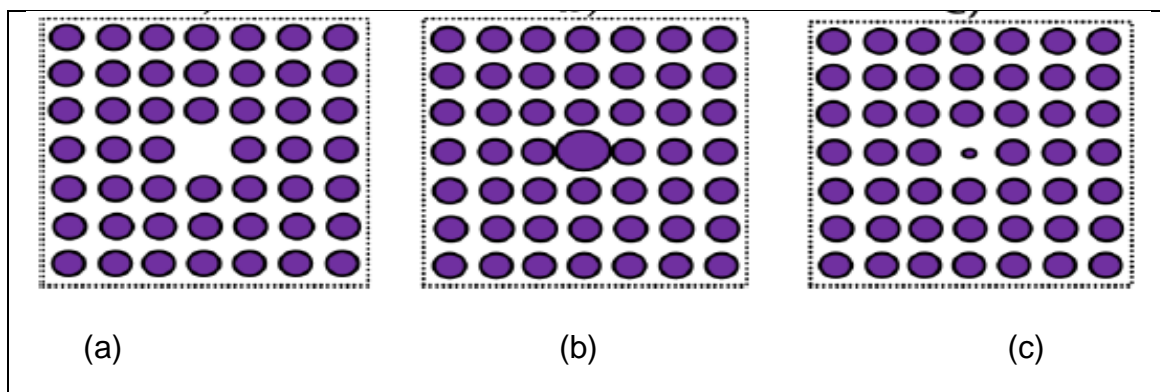
Il existe deux principaux types de défauts : les défauts ponctuels et les défauts étendus. Les premiers, associés à une rupture locale de périodicité, se traduisent par la présence de modes électromagnétiques à des fréquences discrètes, analogues aux défauts électroniques. Les seconds, que l'on peut considérer comme analogues aux dislocations, peuvent donner lieu à des bandes permises de propagation, là où se trouve une bande interdite dans le cristal idéal [17].

### 2.5.1 Défauts ponctuels :

Les défauts ponctuels sont créés en modifiant les caractéristiques d'une cellule du réseau. Il existe plusieurs manières de créer des défauts ponctuels dans les cristaux photoniques. On peut procéder au retrait, à l'ajout ou à la modification d'un ou plusieurs motifs du cristal. Ce qui correspond à des défauts lacunaires ou de substitution (figure I.15) et (figure I.16). Dans tous les cas, on crée des cavités optiques dont les modes de résonances vont venir se positionner en énergie au sein des bandes interdites du cristal [17].



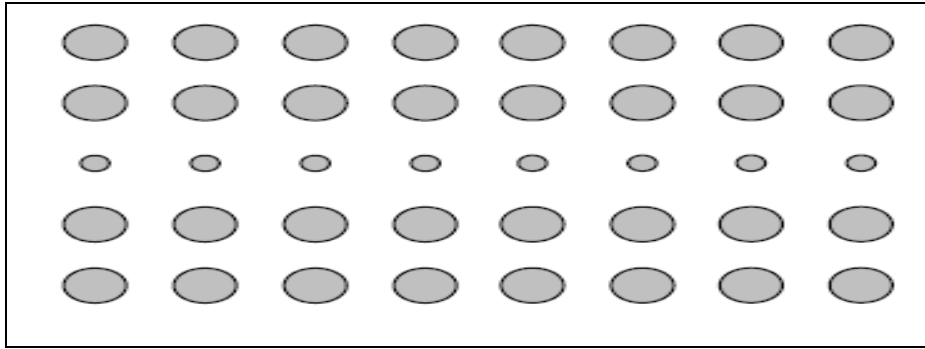
**Figure I.15:** (a) Défaut lacunaire ; (b) Défaut de substitution.



**Figure I.16 :** (a) Défaut lacunaire ; (b) et (c) Défauts de substitutions.

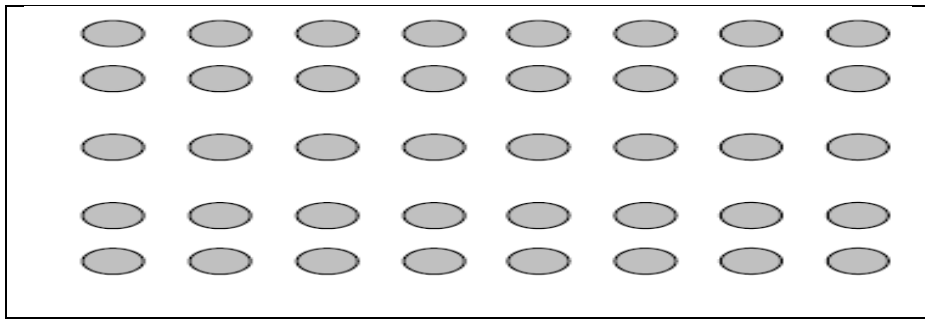
### 2.5.2 Défauts étendus :

- **Dimensions des motifs élémentaires :** Pour rompre la périodicité d'une structure BIP, on peut modifier la taille du motif élémentaire qui compose le cristal photonique [8].



**Figure I.17:** Défaut de dimension du motif élémentaire.

- **Distance entre motifs élémentaires :** On peut aussi jouer sur l'espace qui existe entre les motifs élémentaires des réseaux cristallins [9].

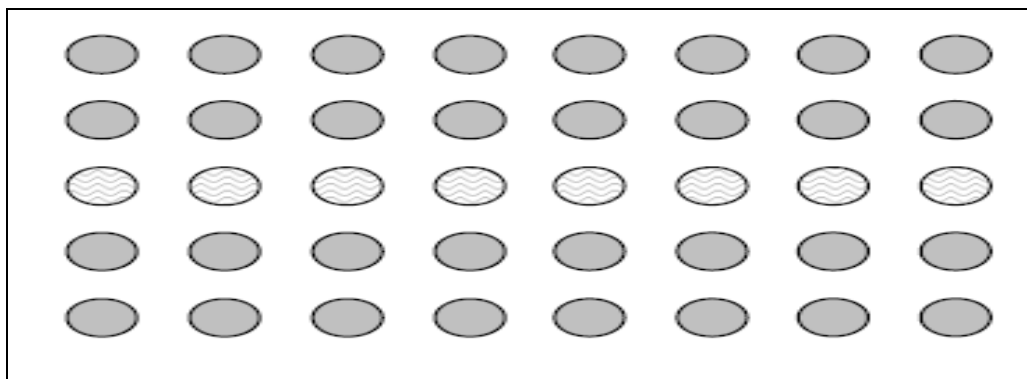


**Figure I.18:** Défaut de distance entre motifs élémentaires.

Sur la (figure I.18) l'écart entre la deuxième et la troisième rangée et l'écart entre la troisième et la quatrième rangée ont été augmentés pour former le défaut.

- **Valeur de la permittivité relative des motifs élémentaires :**

Il est possible de modifier localement la nature du matériau et plus concrètement en agissant sur la valeur de la permittivité relative [9].



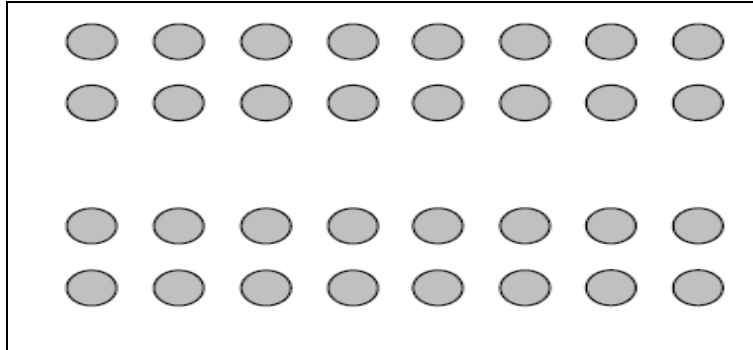
**Figure I.19:** Défaut sur la permittivité relative  $\epsilon$ .

Sur cette figure, la permittivité des motifs élémentaires de la rangée du milieu a été changée.



### • Défaut par vacuité :

Le défaut par vacuité correspond à l'élimination de motifs élémentaires qui se trouvent remplacés par la permittivité du substrat [9].



**Figure I.20:** Défaut par vacuité (C'est le défaut le plus utilisé).

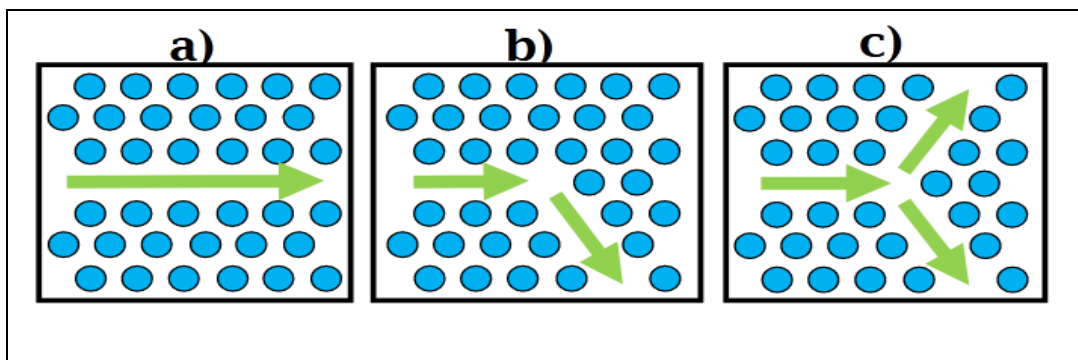
- Les motifs élémentaires de la rangée du milieu ont été enlevés.
- On réalise ainsi aisément une très grande variété de défauts concevables donnant lieu à toutes sortes d'applications potentielles.

## 2.6 Application des cristaux photonique :

### 2.6.1 Guides d'onde à cristaux photoniques :

En introduisant un défaut linéaire (omission d'une ou de plusieurs rangées de trous) dans le cristal photonique, il est possible de guider la lumière selon une direction choisie.

Un photon restera confiné dans le guide si son énergie est située à l'intérieur de la bande interdite. Des composants divers sont réalisables à partir de défauts linéaires (figure I.21). La transmission au travers de ces dispositifs peut être optimisée en modifiant la taille ou la forme des trous au niveau du virage ou de la jonction, afin de minimiser le couplage entre le mode guidé et les modes rayonnés au niveau de la courbure [17].

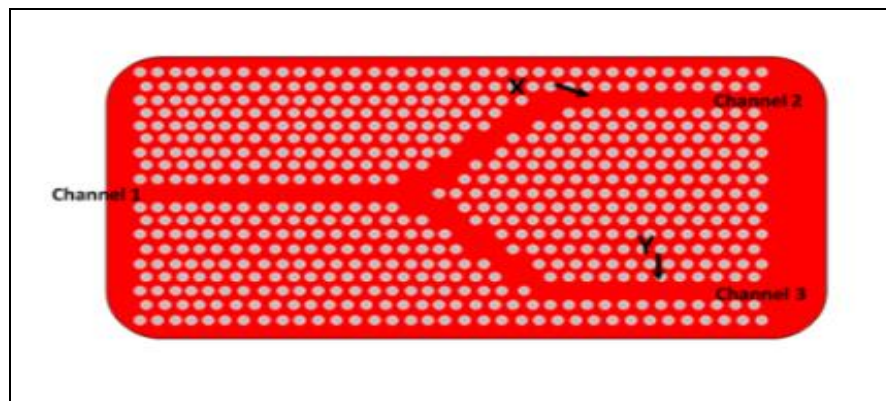


**Figure I.21:** Différents composants à base de défauts linéaires, a) guide droit, b) virage à  $120^\circ$  et c) jonction Y.

### 2.6.2 Diviseur de puissance :

Le diviseur à cristaux photonique permet de séparer et de distribuer simultanément la lumière dans les différentes parties du circuit optique. Tout d'abord, le diviseur de type jonction Y a été étudié comprenant un guide d'entrée, une portion de jonction Y et deux ou quatre guides de sortie. On obtient le nombre des sorties que l'on veut en les cascasant.

Ce type de composant présente l'avantage d'offrir une réponse spectrale plate pour une gamme de longueur d'onde très étendue, et l'analyse théorique portant sur des paramètres de conception a été menée par Fukazawa. Ce composant est donc capable de diviser un signal d'un seul guide d'onde vers plusieurs guides de sorti [9].



**Figure I.22 :** Le diviseur à cristaux photoniques en Y (1x2) [9].

### 2.6.3 Capteur :

L'utilisation de composants optiques a conduit à s'affranchir des perturbations électromagnétiques basses fréquences et à limiter les pertes optiques par propagation. Cette limitation a donc permis à mieux étudier le comportement des dispositifs optiques vis-à-vis des perturbations environnementales. Ainsi, le développement de capteurs optiques performants est rendu possible en s'intéressant aux différents mécanismes d'interactions physiques extérieurs que l'on souhaite caractériser. Il existe actuellement plusieurs capteurs optiques comme les capteurs : de pression, de température, de vitesse, de position, d'humidité, mais aussi biologiques [20].

## 3. Conclusion :

Ce chapitre rappelle brièvement les concepts généraux des cristaux photoniques. Nous décrivons les différents types de cristaux photoniques, parmi lesquels nous avons vu que la

propagation d'ondes à travers un matériau aux propriétés changeant périodiquement peut conduire à la formation de bandes. Ensuite, nous avons mentionné leurs caractéristiques physiques et techniques. L'étude des défauts reste un sujet très riche lors de la réalisation de fonctions photoniques à base de cristaux photoniques. La création d'un défaut dans les structures périodiques, qu'il soit linéaire ou local, va modifier les performances du matériau à cette fréquence où un seul mode peut se propager. Ces cristaux photoniques ont un large éventail d'applications dans plusieurs domaines, et nous allons nous familiariser avec les plus importants d'entre eux, tels que les capteurs à cristaux photoniques, qui seront étudiés en détail dans le chapitre suivant.

---

# CHAPITRE II

## *Capteurs à cristaux photoniques*

---

# Capteurs à cristaux photoniques

## 1. Introduction :

L'application des cristaux photoniques comme capteurs constitue un domaine de recherche très prometteur en raison de leur microstructure périodique qui permet de piéger les photons et de créer des résonances optiques très sensibles à la présence des molécules à détecter. Les cristaux photoniques ont une large plage de détection, ce qui les rend applicables dans une large gamme de mesures.

Récemment, de nombreuses recherches ont été menées en utilisant des cristaux photoniques, comme élément de détection, en raison de leur structure de bande et de leur confinement de la lumière [17].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les classifications et caractéristiques générales de ce type de capteur, leurs structures et principes de fonctionnement, ainsi que les différents types de cavités.

## 2. Définition :

Un capteur est un dispositif qui permet de sonder, caractériser, quantifier une grandeur physique et de la convertir en une grandeur facilement exploitable pour l'utilisateur (souvent, il s'agit d'un signal électrique, optique ou acoustique). On peut dire qu'un capteur est un dispositif qui, sous l'effet d'une grandeur physique que l'on souhaite caractériser, délivre une grandeur physique exploitable, on parle ainsi d'un transducteur (figure II.1). Les grandeurs d'influence sont des grandeurs extérieures qui, selon leur nature et leur importance, provoquent des perturbations sur le capteur. Parmi les principales grandeurs d'influence : température, pression, humidité, concentration chimique, ....

Un capteur est capable de prélever et de sélectionner une grandeur abstraite, appelée information, qui sélectionne un événement particulier parmi un ensemble d'événements possibles. Pour pouvoir être traitée, cette information est portée par un support physique, appelé donc un signal. D'une façon générale le capteur est composé de trois éléments principaux : un élément sensible, un transducteur, et une interface de commande entre le signal et l'utilisateur [21].

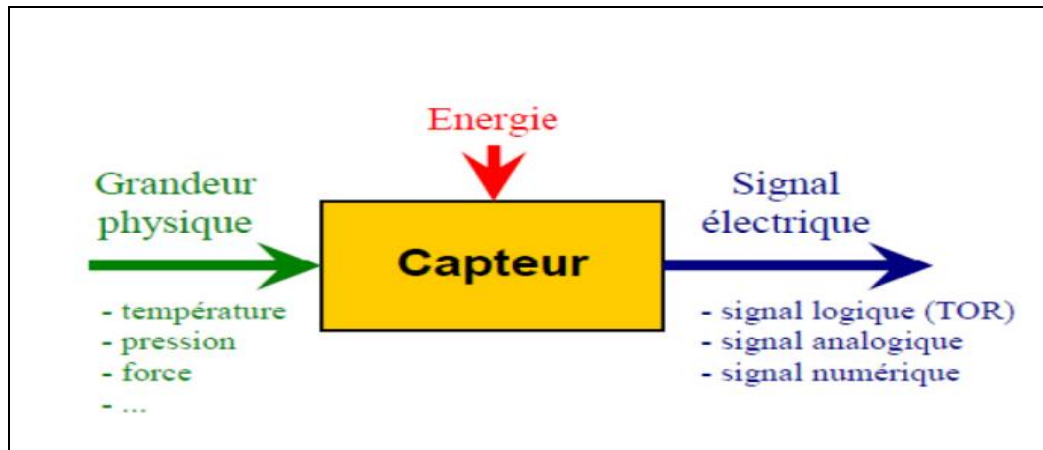


Figure II.1: Principe d'un capteur [22].

### 3. Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement consiste en la mesure d'un changement d'indice de réfraction d'un élément sensible en fonction de la présence d'analyte (substance à détecter). Selon le mode de fonctionnement, on peut distinguer plusieurs types des capteurs à base de CPs [22] :

- Capteur à indice de réfraction (RI) à base de CPs.
- Capteur à gaz à base de CPs.
- Capteurs opto-mécaniques à base de CPs.
- Capteurs à cristaux photoniques intégrés basés sur un effet non linéaire.
- Capteurs à base de cristaux photoniques à fibres optiques, etc....

### 4. Classifications des capteurs :

On classe les capteurs en deux grandes familles en fonction de la caractéristique électrique de la grandeur de sortie. Cette classification influe sur le conditionneur qui lui est associé [23].

#### 4.1 Capteurs passifs

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

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

- d'une part à sa géométrie et à ses dimensions ; perméabilité  $\rho$ .
- d'autre part aux propriétés électriques des matériaux : résistivité  $\epsilon$ , Magnétique  $\mu$ , constante diélectrique.

La variation d'impédance peut donc être due à l'action du mesurant.

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

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

**Tableau II.1 :** Exemples des capteurs passifs [23] :

Mesurande	Grandeur de sortie	Matériaux
Température	Résistivité	Platine, nickel, cuivre
Très basse température	Constante diélectrique	Semi-conducteur Verre
Flux optique	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité Perméabilité magnétique	Alliages nickel Alliages ferromagnétique
Position	Résistivité	Magnétorésistances
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

## 4.2 Capteurs actifs

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

Le nombre des lois physiques permettant une telle transformation est évidemment limité, on peut donc recenser facilement les capteurs actifs (dont le nombre est fini). Toutefois, les domaines d'application sont eux très étendus [23].

**Tableau II.2:** Exemples des capteurs actifs.

Mesurande	Grandeur de sortie
Température	Tension
Flux optique	Courant
Force, Pression, accélération	Charge
Position	Tension
Vitesse	Tension

## 5. Caractéristiques des capteurs :

### 5.1 Sensibilité :

Ce paramètre caractérise l'aptitude du capteur à détecter la plus petite variation de la grandeur à mesurer. C'est une caractéristique importante pour l'exploitation et l'interprétation des mesures. Elle est définie comme étant la variation du signal de sortie ( $S_{out}$ ) par rapport à la variation du mesurande  $\Delta m$  (pente de la parti linéaire de la courbe d'étalonnage) et s'écrit par la formule suivante [17]:

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

Avec :

- $S$  : représente la sensibilité.
- $S_{out}$ : représente la variation du signal de sortie.
- $\Delta m$ : représente la variation du mesurande.



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

### 5.2 Reproductibilité :

C'est parmi les paramètres les plus importants. Il indique la capacité du biocapteur à donner des réponses très voisines pour des mesures répétées de la même quantité de la grandeur à mesurer [24].

### 5.3 Exactitude :

C'est l'accord entre le résultat de la mesure et la valeur vraie de la grandeur mesurée et l'écart est appelé erreur absolue [17].

### 5.4 Limite de détection :

La limite de détection est la capacité d'un capteur à détecter la plus petite variation de la grandeur physique. Elle est séparée de la sensibilité qui évalue uniquement la performance du capteur, parce qu'elle dépend à la fois de la sensibilité et de la résolution instrumentale  $R_m$  liée aux équipements utilisés pour la mesure du signal. A partir de la définition de la sensibilité du capteur, on déduit l'expression de la limite de détection [22] :

$$LD = \frac{R_m}{S} \quad (II.2)$$

Avec :

- $LD$  : représente la limite de la détection.
- $R_m$  : représente la résolution instrumentale.
- $S$  : représente la sensibilité.

A partir de son expression on peut déduire que, plus la limite de détection est faible plus le capteur est sensible.

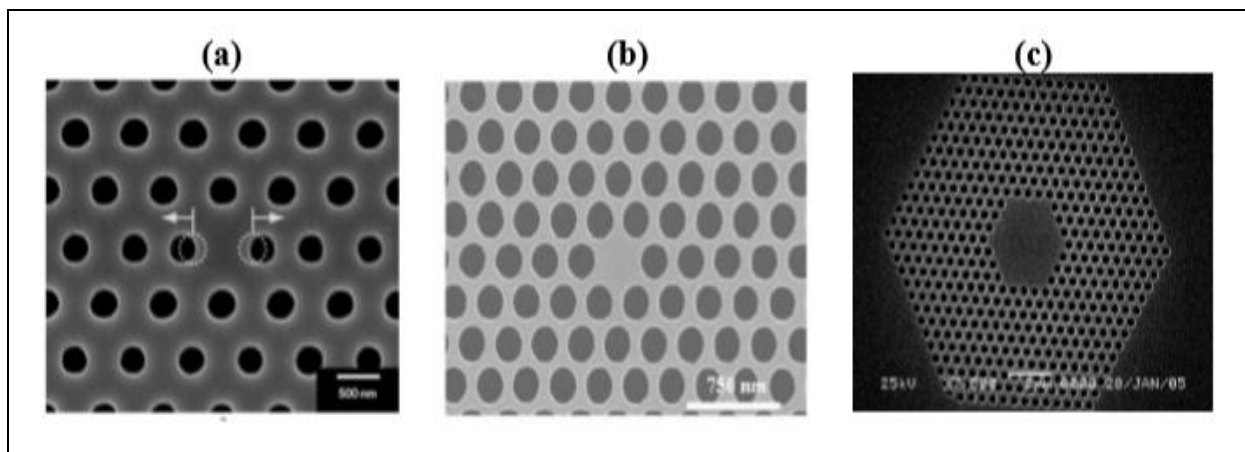
## 6. Cavité résonante :

Depuis quelques années, dans le cas des cristaux photoniques bidimensionnels, il existe plusieurs types de cavités à cristaux photoniques qui intéressent de nombreux chercheurs. Concernant leur structure, on peut globalement classer ces cavités en plusieurs types. Ces grands types de cavités ont permis d'obtenir des facteurs de qualité très élevés à des volumes typiques faibles.

## 6.1 Cavités à défauts ponctuels :

### a. Les cavités Hn :

Les cavités Hn correspondent à l'omission d'un hexagone de n trous de côté, comme il est représenté dans la Figure 2.3, Les cavités connues sous le nom H0 et H1 sont des structures intéressantes car elles ne présentent qu'une seule fréquence de résonance correspondant à deux modes dégénérés. Les méthodes d'optimisation du facteur de qualité pour ces deux types de cavité sont similaires. En déplaçant les trous au bord de la cavité à une distance appropriée, on peut obtenir un facteur de qualité plus élevé qu'avec la structure originale. De nombreuses études ont été consacrées à son comportement. Plusieurs groupes de chercheurs ont également traité les cavités Hn à cristaux photoniques depuis une dizaine d'années, le but est l'optimisation du facteur de qualité de ces cavités. Nomura et al démontrent qu'un facteur de qualité, à 33 000 a été obtenu par la cavité H0 . Une version optimisée de la cavité H1 a atteint un facteur de qualité 66 000 par le groupe de Kreuzer et al . Le meilleur facteur de qualité obtenu dans ce type de cavité était de  $1.23 \times 10^6$  [15].

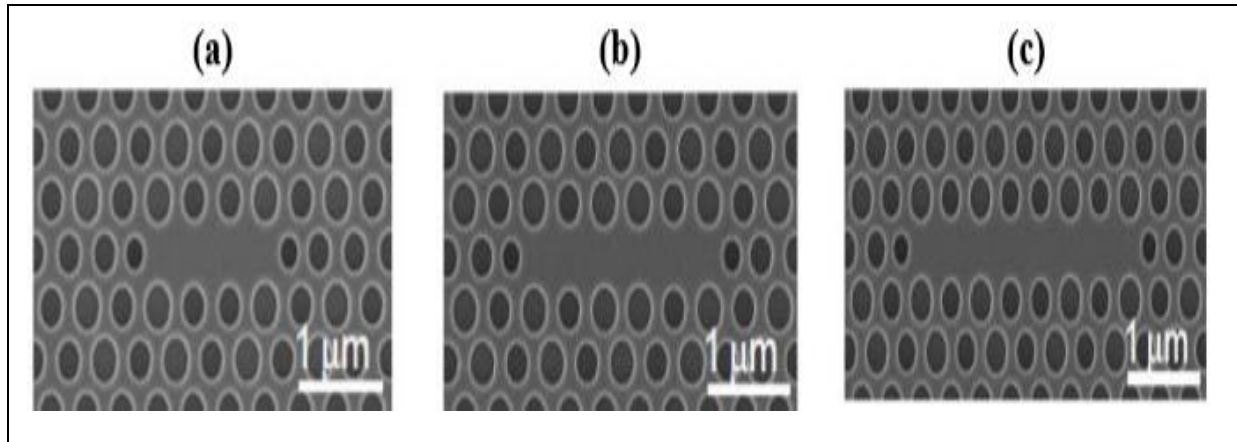


**Figure II.2:** Exemples de cavités de types Hn : (a) cavité H0, (b) cavité H1, (c) cavité H4 [15].

### b. Les cavités Ln :

Les cavités Ln sont linéiques et consistent en l'omission de n trous alignés sur la même rangée dans la direction  $\Gamma K$ . La figure suivante présente quelques exemples de cavité Ln à cristaux photoniques 2D. Les cavités de types L3 ont des modes dont les facteurs de qualité ne dépassé pas quelques milliers. Toutefois il est possible d'obtenir de forts facteurs de qualité avec ce type de cavités, surtout depuis les travaux d'Akabane et al qui ont démontré l'importance d'un confinement progressif de la lumière grâce à l'optimisation de la position des trous aux extrémités de la cavité. Grâce à cela ils ont également exploré la piste des

cavités linéiques modifiées, qui permettent de multiplier par 9 le facteur de qualité par rapport aux cavités linéiques simples (45 000 par rapport à 5000) [16].

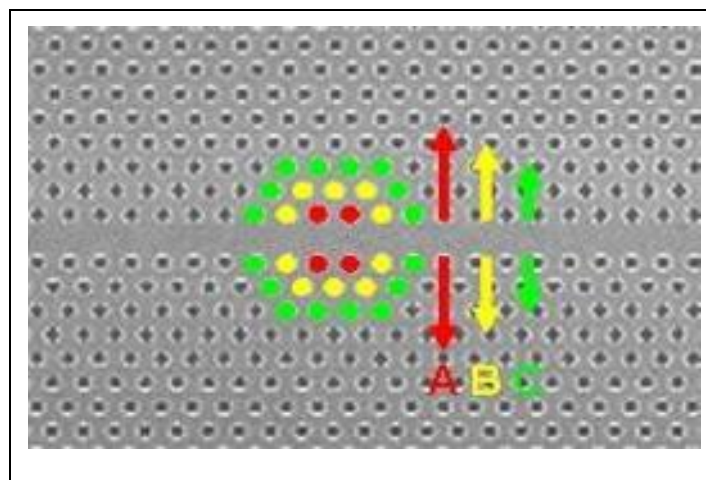


**Figure II.3 :** Exemples de cavités de types  $L_n$  : (a) cavité L3, (b) cavité L5, (c) cavité L7

## 6.2 Cavités à défaut couplés :

### a . Cavité de type « kuramochi » :

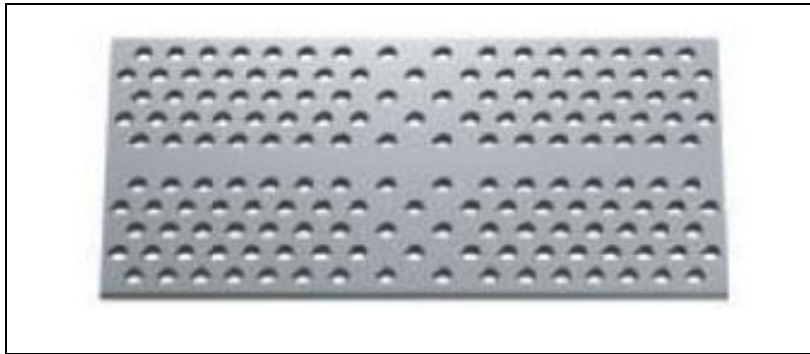
Les cavités de type kuramochi ou les cavités à modulation locale de largeur de défaut linéique sont réalisées par modulation d'un guide. Elles consistent à déplacer perpendiculairement une série de plusieurs trous au centre du guide. Cette géométrie a été proposée initialement par Kuramochi en 2006. Un exemple de ce type de cavité est présenté sur (la Figure.2.1). Le facteur de qualité de cette cavité a atteint expérimentalement 800 000 pour le silicium et 700000 pour le GaAs, et permet théoriquement d'atteindre des valeurs de plus de  $7.10^7$ . Actuellement, ces cavités ayant des facteurs de qualité supérieure à 106 dans le silicium [15].



**Figure II.4:** Cavité de type kuramochi. Les trous colorés en rouge, jaune et vert ont été déplacés de 9, 6 et 3 nm respectivement [15].

### b. Cavité à hétéro-structures :

Les cavités à hétéro-structures ont été initialement proposées par le groupe de S. Noda. Ces structures sont basées sur la modulation progressive de la période du cristal photonique, ce qui va former un puits de potentiel pour le mode optique, une modification de la période du cristal photonique agissant localement sur la structure de bande du cristal, le défaut généré se retrouvant dans la bande interdite. La modulation de la période étant très faible ( $3.106$ ) et sur SOI ( $2.106$ ), et le facteur de qualité théorique est d'environ  $109$  [25].



**Figure II.5:** structure du capteur à base d'une cavité à hétéro-structures .

### c. Cavité à modulation de largeur de défaut linéique :

Les cavités à modulation locale de largeur de défaut linéique ont été proposées par l'équipe de M. Notomi. La structure de base de la cavité est un simple guide d'onde à cristaux photoniques avec une rangée manquante. L'idée est d'éloigner légèrement certains trous entourant le guide d'onde d'une distance particulière. Le guide non modifié servant de barrière et le décalage étant faible (environ  $10$  nm), le confinement de la lumière est très graduel, ce qui donne un facteur de qualité élevé. Le facteur de qualité de ce genre de cavité a atteint expérimentalement  $8.105$  pour le silicium et  $7.105$  pour le GaAs [26].

#### • Le facteur de qualité (Q) :

Il permet de mesurer la capacité d'un résonateur à conserver l'énergie. Le confinement d'un mode à la fréquence  $\omega_0$  est déterminé par le taux de perte de la cavité. Donc, le facteur de qualité  $Q$  d'un mode résonant de fréquence  $\omega_0$  est défini comme le rapport de l'énergie emmagasinée dans le résonateur moyennée dans le temps sur l'énergie dissipée par cycle soit Le facteur de qualité (Q) [21].

$$Q = \frac{\text{Energie emmagasinée}}{\text{Energie dissipée par cycle}} = \omega_0 \frac{U}{P} \quad (\text{II.3})$$

Où  $U$  est l'énergie emmagasinée dans le résonateur et  $P$  la puissance dissipée. Par conservation de l'énergie, la puissance dissipée moyennée sur un cycle est égale à l'opposé de la variation de l'énergie emmagasinée  $U$ . D'après la relation on a :

$$P = -\frac{dU}{dt} = -\omega_0 \frac{U}{Q} \quad (\text{II.4})$$

La solution de cette équation différentielle du premier ordre a pour solution :

$$U(t) = U_0 e^{-\omega_0 t / Q} \quad (\text{II.5})$$

La dépendance temporelle de l'énergie emmagasinée implique que les oscillations du champ à l'intérieur de la cavité s'atténuent comme suit :

$$E(t) = E_0 e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}} e^{j\omega_0 t} \quad (\text{II.6})$$

Le confinement modal peut être caractérisé soit dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel. La transformée de Fourier de l'équation permet de passer de l'un à l'autre et d'obtenir ainsi l'expression du champ électrique dans l'espace fréquentiel comme suit :

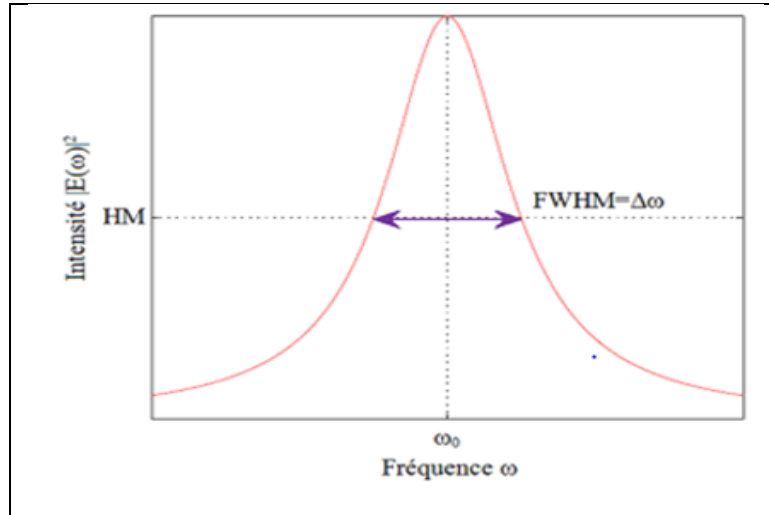
$$E(\omega) = E_0 \frac{1}{j(\omega - \omega_0) + \frac{\omega_0}{2Q}} \quad (\text{II.7})$$

Cette équation montre que le spectre fréquentiel du champ se présente sous la forme d'une fonction laurentienne centrée à la fréquence de résonance  $\omega_0$  avec une largeur à mi-hauteur (FWHM)  $\Delta\omega$ . On déduit de la condition une autre expression du facteur de qualité.

$$\left( E\left(\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}\right) \right)^2 = \frac{1}{2} (E(\omega_0))^2 \Rightarrow \Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} \quad (\text{II.8})$$

Cette expression peut aussi être interprétée comme le rapport entre le temps de vie du photon à l'intérieur de la cavité  $\tau_{ph}$ , et la période  $T$  :

$$Q = 2\pi \frac{\tau_{ph}}{T} \quad (\text{II.9})$$



**Figure II.6:** Représentation fréquentielle de l'intensité Lorentzienne d'un mode dans la cavité centré à la fréquence  $\omega_0$  [15].

## 7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les capteurs en général, leurs caractéristiques, types et principes de fonctionnement. Ensuite, nous avons parlé des cristaux optiques et de leurs utilisations dans le domaine de la détection de divers phénomènes mesurables. À la fin de ce chapitre, nous avons le type de cavité que nous pouvons utiliser à base de cristaux photoniques, ces capteurs à base de cristaux photoniques et il est conçu et simulés par plusieurs méthodes utilisées, à savoir les méthodes FDTD et PWE.

---

# CHAPITRE III

## *Conception et simulation des capteurs de température à base de CPs*

---

# Conception et simulation des capteurs de température à base de CPs

## 1. Introduction :

Ces dernières années, les cristaux photoniques (CPs) ont attiré beaucoup d'attention en raison de leurs importantes propriétés de contrôle et de manipulation de la lumière à travers le cristal. Sur la base de cette caractéristique, de nombreux scientifiques trouvent des conceptions et des applications pour divers dispositifs optiques, tels que les décodeurs optiques, les portes logiques, les capteurs...etc [27]. Les capteurs optiques ont été utilisés efficacement dans de nombreuses applications pour détecter différents paramètres tels que la mesure de la température qui est très importante et utilisée dans de nombreux domaines. Dans ce chapitre, nous allons proposer deux nouvelles conceptions d'un capteur de température basée sur les cristaux photoniques bidimensionnelle (2D) afin de déterminer la longueur d'onde de résonance, d'obtenir une sensibilité maximale et un bon facteur de qualité. La simulation a été effectuée en utilisant les deux méthodes FDTD en 2-D et PWE.

## 2. Principe de détection de la température par les capteurs à cristaux photoniques :

**2.1. Structure :** Un capteur de température simulé à base de cristaux photoniques 2D utilise deux structures hexagonales constituées de tiges circulaires de silicium placées sur un fond d'air. Des barres circulaires sont utilisées pour réduire les pertes de diffusion et surveiller efficacement la propagation en mode électrique transversal (TE).

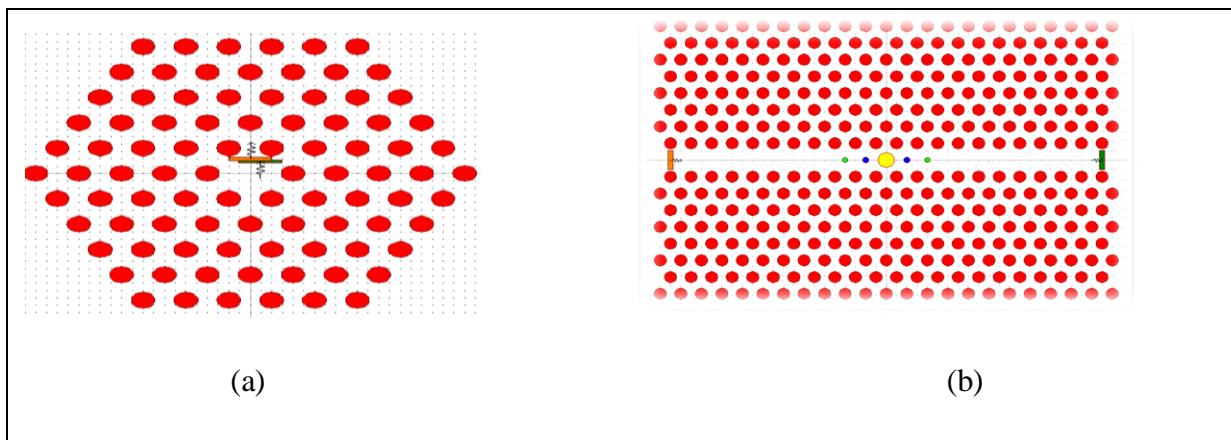


Figure III.1 : Capteur de température : (a) à base d'une cavité ponctuelle.

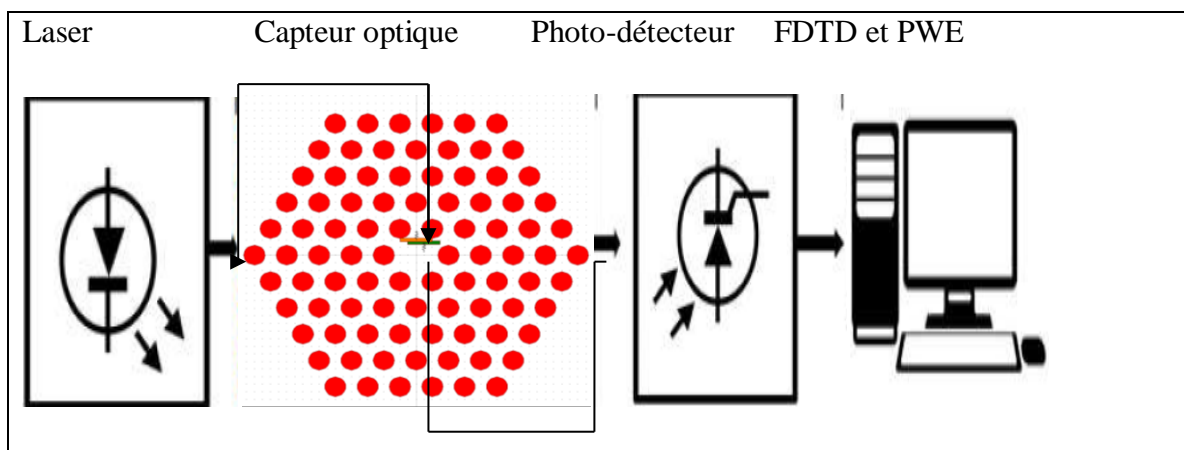
(b) à base d'une cavité résonante.



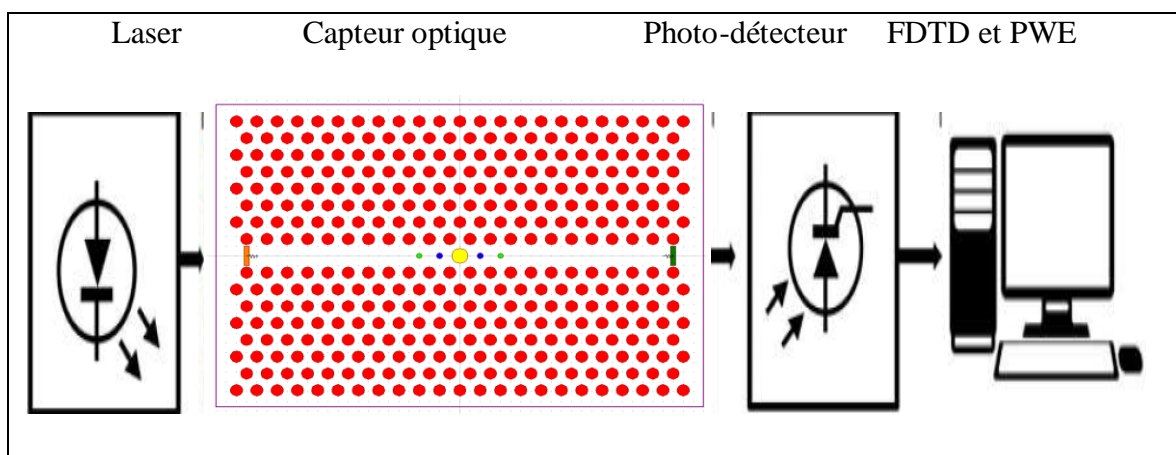
La première structure du capteur de température est basée sur une cavité ponctuelle et la deuxième structure est basée sur une cavité résonnante [27], représentées respectivement sur les figures (IV.1(a)) et (IV.1(b)). Les deux structures sont conçues pour détecter la température dans des conditions environnementales extrêmement difficiles.

### 3. Schéma fonctionnel pour la détection de la température :

Les figures (III.2) et (III.3) illustrent le schéma fonctionnel permettant de détecter la température à l'aide du CPs 2D. La source optique émet une onde lumineuse gaussienne continue qui traverse le capteur optique basé sur le CP. La lumière confinée et propager dans la cavité est affectée suite à l'application d'une température qui provoque une variation de l'indice de réfraction et donc un déplacement de la fréquence de résonance. La lumière de sortie est détectée par un photo-détecteur. Les outils de simulation utilisés dans ces travaux sont les deux méthodes PWE et FDTD.



**Figure III.2 :**(a) Configuration schématique d'un capteur optique à base d'une cavité ponctuelle pour la détection de la température.



**Figure III.3 :** (b) Configuration schématique d'un capteur à base d'une cavité résonnante pour la détection de la température.

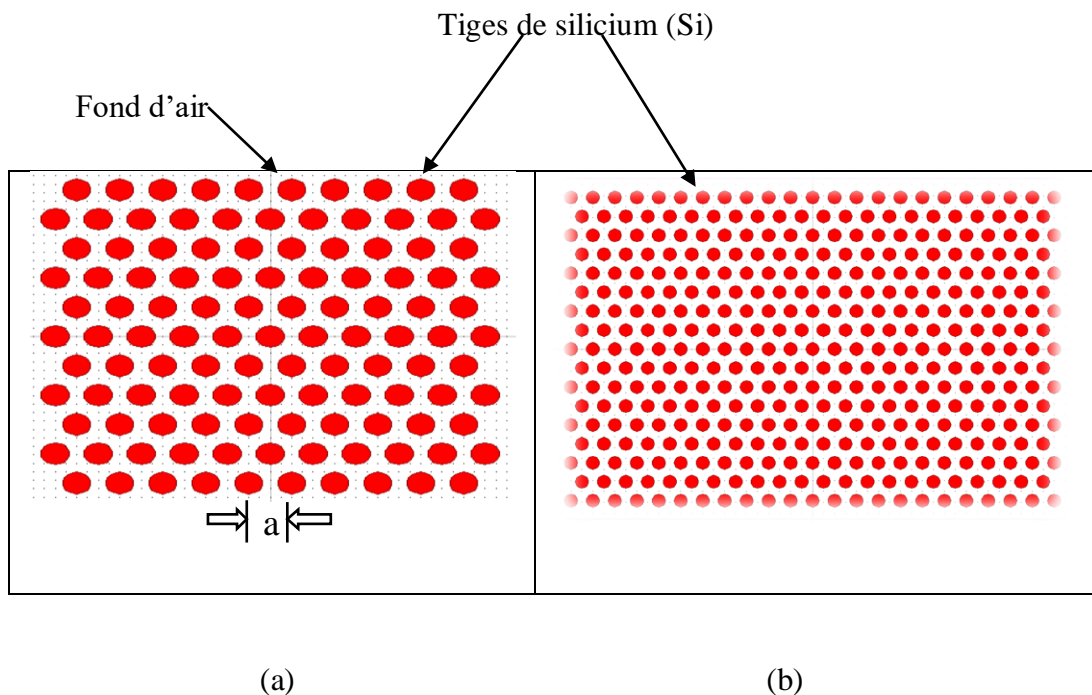
## 4. Structures de base des capteurs de température :

### 4.1. Capteur à base d'une cavité ponctuelle :

Le dispositif 2D-CP se compose de tiges de silicium avec un indice de réfraction,  $n_1=3.37$  placées dans un fond d'air d'indice de réfraction  $n_0=1$ , avec le nombre de tiges dans les directions X et Z est de  $11 \times 11$  comme illustré à la figure (III.4 (a)). La distance entre le centre de deux barres adjacentes est de 400 nm, qui est appelée constante de réseau et indiquée par 'a'. Le rayon de la barre est de 130nm. Les paramètres d'intérêt utilisés dans ce réseaux sont tirés d'un article de logiciel Rsoft CAD Fullwave (Totutorial 4).

### 4.2. Capteur à base d'une cavité résonante :

Dans cette partie, nous avons proposé une structure de capteur de température basée sur un PhC 2D, avec un réseau hexagonal de tiges circulaires en silicium dont l'indice de réfraction est égal à  $n_0=3,42$  suspendu dans l'air  $n_1=1$ . Le nombre de tiges dans les directions x et z sont respectivement de 23 et 17 et le rapport entre le rayon " r " et la constante de réseau " a " est de 0,3 nm comme illustrée dans la figure (III.4 (b)).



**Figure III.4:**Structures initiale à CPs utilisées pour concevoir les capteurs de température

(a) à base d'une cavité ponctuelle, (b) à base d'une cavité résonante.

**Tableau III.1** : Paramètres des capteurs de température utilisés dans notre travail.

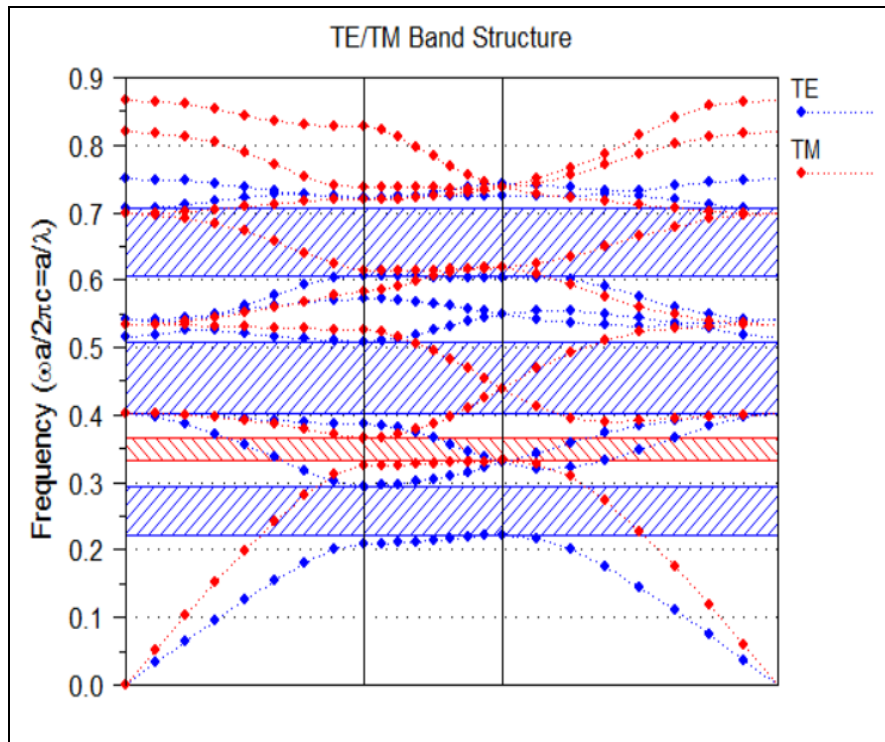
Paramètres	Valeurs	
	Capteur à base d'une cavité ponctuelle	Capteur à base d'une cavité résonante
Rayon de la tige (r)	130 nm	300 nm
Constante de réseau (a)	400 nm	1000 nm
Indice de réfraction des tiges (Si)	3.37	3.42
Indice de réfraction du fond (Air)	1	1
Dimensions de la plateforme	11 × 11	23 × 17

## 5. Résultats et discussions :

### 5.1 Capteurs de température à base d'une cavité ponctuelle :

#### 5.1.1 Calcul de la bande interdite photonique (PBG) :

La bande interdite est calculée à l'aide de la méthode d'expansion d'onde planaire (solution de bande PWE) pour diverses polarisations transversales électriques (TE) et magnétiques (TM). Dans les cristaux photoniques, la lumière ne peut pas se propager librement dans la bande interdite optique. Les paramètres utilisés dans la simulation du capteur sont ceux indiqués dans le tableau III.1. La bande interdite photonique de la structure étudiée est présentée sur la figure (III.5).



**Figure III.5 :** Diagramme de bande interdite photonique de la structure de réseau en CP.

Cette figure montre le diagramme de bande interdite photonique pour les deux modes TM /TE. Pour la polarisation TE, nous avons obtenu trois larges bandes. La première PBG se situe entre 0.22464 et 0.29341, sa longueur d'onde varie entre 1363nm à 1780 nm. Ce qui couvre la troisième fenêtre de transmission optique à savoir  $\lambda = 1550$ nm. La deuxième PBG est comprise entre 0.3988 et 0.50888, sa longueur d'onde varie de 786 nm et 1003 nm, ce qui correspond à la première fenêtre de transmission optique à savoir  $\lambda = 850$  nm, les deux PBG sont adaptées à la conception des capteurs utilisés dans le domaine des télécommunications. La troisième PBG est comprise entre 0.60745 et 0.70372, sa longueur d'onde varie entre 568 nm et 658 nm qui ne couvrent aucune des fenêtres de transmission optique connues. Dans notre travail, on s'intéresse par les deux premières bandes PBG pour concevoir des capteurs avec des performances souhaitées en particulier en longueur d'onde de résonance.

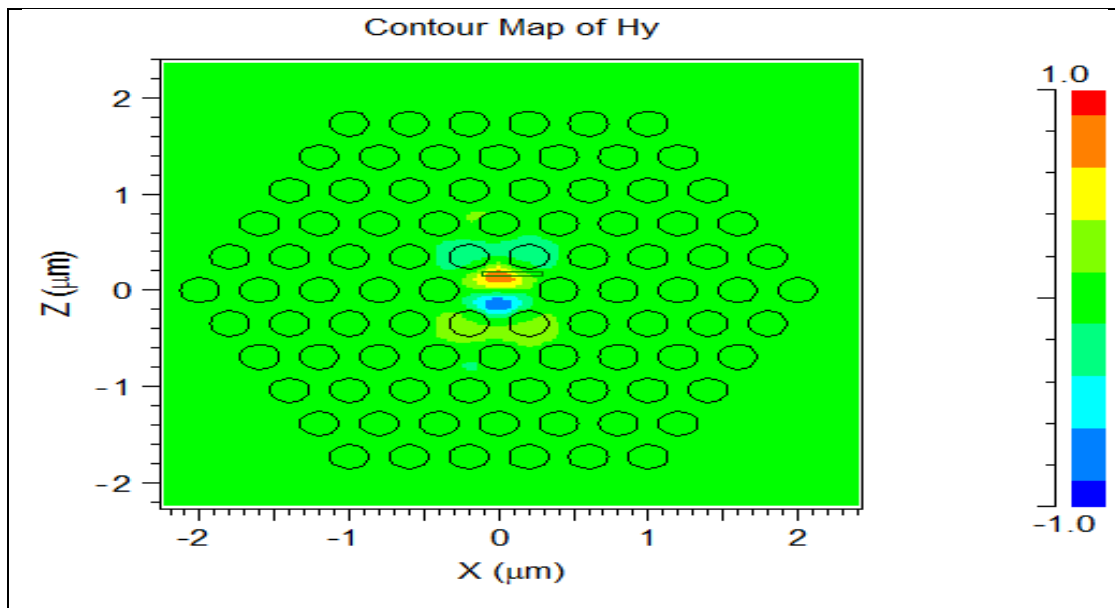
La polarisation TM montre l'apparition d'une seule bande interdite photonique PBG étroite obtenue est située entre 0.33266 et 0.36619, sa longueur d'onde varie entre 1202.4 nm et 1092.32 nm.

**Tableau III.2** : Plages des bandes interdites :

Bandes interdites		Plage de fréquences	Plage de Longueur d'onde (nm)
TE	Bande1	$0.22464 \leq (a / \lambda) \leq 0.29341$	$1363.28 \leq \lambda \leq 1780.62$
	Bande2	$0.3988 \leq (a / \lambda) \leq 0.50888$	$786 \leq \lambda \leq 1003$
	Bande3	$0.60745 \leq (a / \lambda) \leq 0.70372$	$568.40 \leq \lambda \leq 658.49$
TM	Bande4	$0.33266 \leq (a / \lambda) \leq 0.36619$	$1202.4 \leq \lambda \leq 1092.32$

### 5.1.2 Distribution du champ:

La distribution du champ électrique (TE) en 2D de la structure étudiée ( $n_{Si} = 3.37$  ;  $\lambda_0 = 1550$  nm) est présentée à la figure (III.6). Cette figure montre bien que la lumière est propagée et confinée dans la cavité ponctuelle et un peu de perte de lumière à l'extérieur de la cavité.

**Figure III.6:** Distribution du champ électrique en 2D du capteur de température.

### 5.1.3 Principe de détection de la température par un capteur à base de CP :

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 la température appliquée au capteur induit la variation de l'indice de réfraction du matériau silicium (Si) par l'effet thermo-optique. La variation de l'indice  $n$  en fonction de la température est donnée par la formule suivante [28]:

$$n(T) = n_0 + \alpha \Delta T \quad (\text{III.1})$$

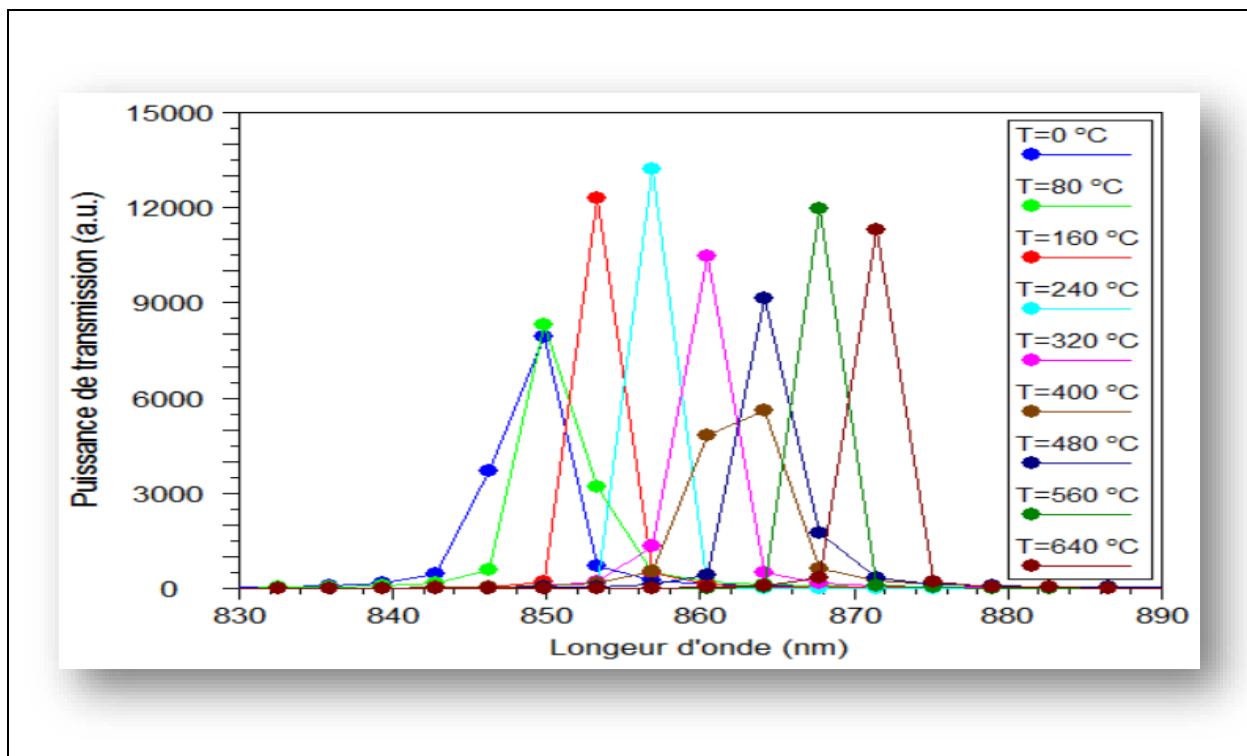
Avec :

- $n_0$  est l'indice de réfraction du milieu à température nulle ( $0^\circ\text{C}$ ),
- $\alpha$  est le coefficient thermo-optique donné par la valeur  $2,4 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$  pour le silicium [29].
- $\Delta T$  est la différence de température en  $^\circ\text{C}$ .

Un paramètre fondamental dans l'évaluation des performances du capteur de température (T) est la sensibilité (S) déterminée comme le rapport entre le décalage de la longueur d'onde de résonance et la différence de température appliquée. Son unité de mesure est le  $\text{pm}/^\circ\text{C}$ , qui peut être exprimée par l'équation suivante :

$$S = \Delta\lambda / \Delta T \quad (\text{III.2})$$

Cette mesure est particulièrement recherchée pour sa précision dans les environnements difficiles sur une plage de  $0^\circ\text{C}$  à  $640^\circ\text{C}$ .



**Figure III.7:** Décalage de la longueur d'onde résonnante du capteur à base de CP à la température appliquée dans la plage de  $0^\circ\text{C}$  à  $640^\circ\text{C}$ .

La figure (III.7) illustre l'effet d'une modification de la température appliquée sur la structure du capteur de 0 °C à 640 °C sur le décalage de la longueur d'onde résonante qui révèle l'existence d'une relation entre ces deux paramètres.

Nous notons que la température appliquée sur le capteur entraîne des changements de l'indice de réfraction selon l'équation (III.1), 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 III.3** : Caractérisation des paramètres obtenus de la conception du capteur de température sur la plage de température (0 °C à 640°C)

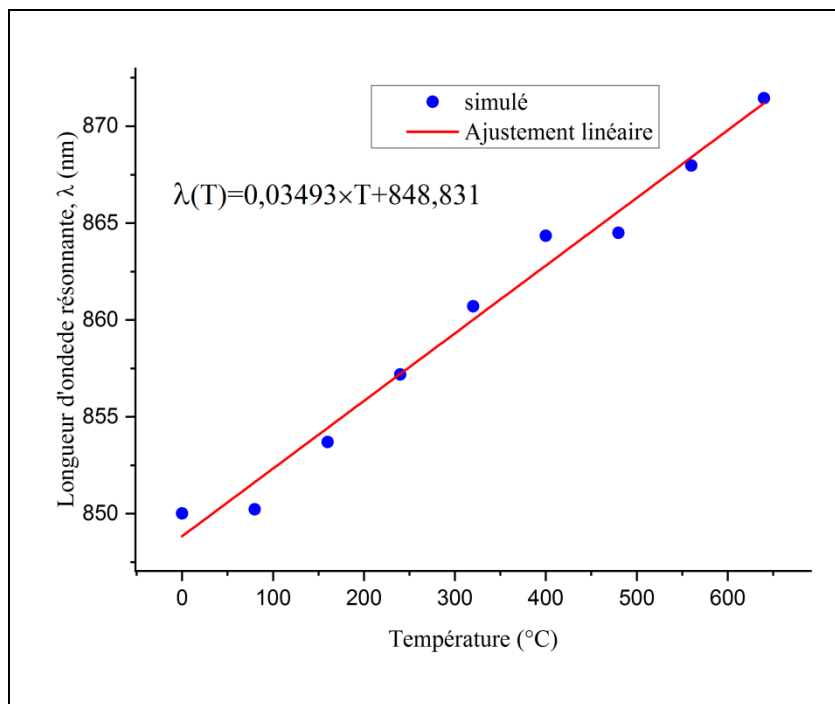
Température Appliqués (°C)	Indice de réfraction	Longueur d'onde de résonance $\lambda_0$ (nm)	Décalage $\Delta\lambda$ (pm)	Puissance transmise (a.u)	Sensibilité pm/°C	Facteur de qualité
0	3.37	850.02	Référence	7814.4	Référence	151.0124
80	3.3892	850.22	200	8173.7	2.5	187.6865
160	3.4084	853.7	3680	12126	46	231.983
240	3.4276	857.19	7170	13174	89.625	238.771
320	3.4468	860.71	10690	10778	133.625	204.0071
400	3.466	864.34	14320	5868.3	179	116.4878
480	3.4852	864.5	14480	9580.8	181	233.01180
560	3.5044	867.97	17480	12455	218.5	242.4497
640	3.5236	871.44	21420	11617	267.75	226.9375

Le tableau (III.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.

La sensibilité du capteur de température à base des cristaux photoniques est déterminée selon l'équation (III.2), dans laquelle la différence est estimée par rapport à la référence, c'est-à-dire aucune température n'est appliqué, et le facteur de qualité est donnée par l'équation suivante :

$$Q = \lambda_0 / \Delta\lambda \quad (\text{III. 3})$$



**Figure III.8:** Longueur d'onde de résonance du capteur en fonction du changement de la température.

La figure(III.8) montre que la longueur d'onde de résonance du capteur augmente de 850.02 nm à 871.44 nm lorsque la température croit de 0 °C à 640 °C. De plus, la relation entre ces deux paramètres est presque linéaire donnée par l'équation suivante :

$$\lambda(T) = 0.0349 \times T + 848.831 \quad (\text{III. 4})$$

Avec :

- $\lambda$  représente la longueur d'onde de résonance en nm.
- T la température en °C.



Nous concluons 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.

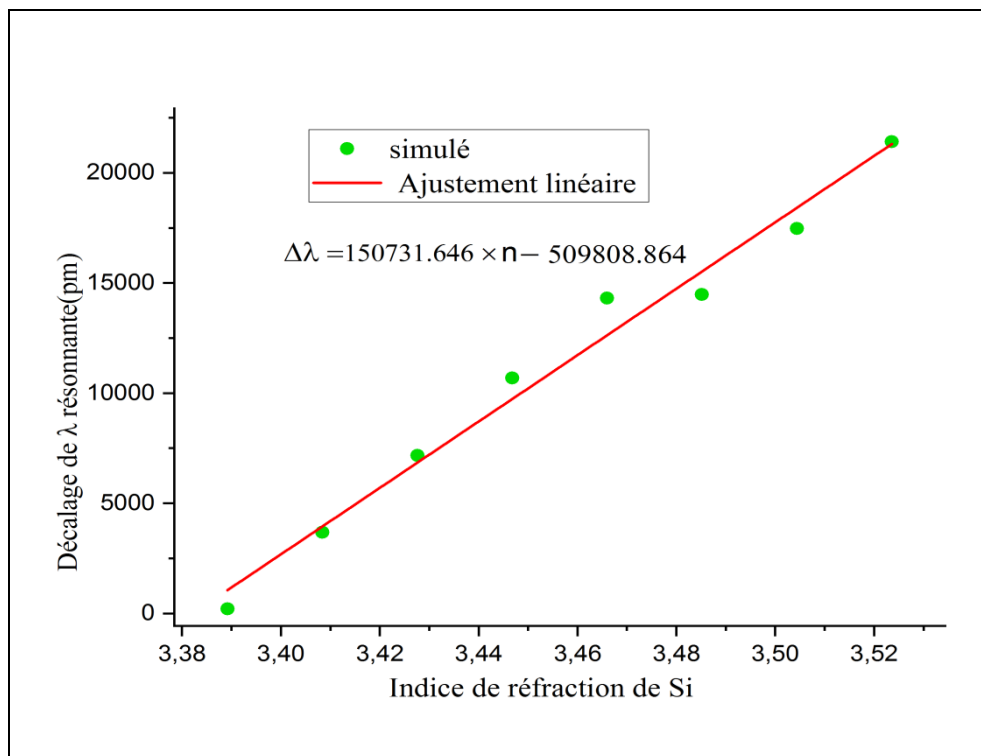
- La figure(III.9) montre qu'il existe une relation linéaire entre le décalage de la longueur d'onde de résonance du capteur et le changement de l'indice de réfraction de silicium. Cette relation peut être exprimée par la formule suivante :

$$\Delta\lambda(n)=150731.647 \times n - 509808.86$$

Avec :

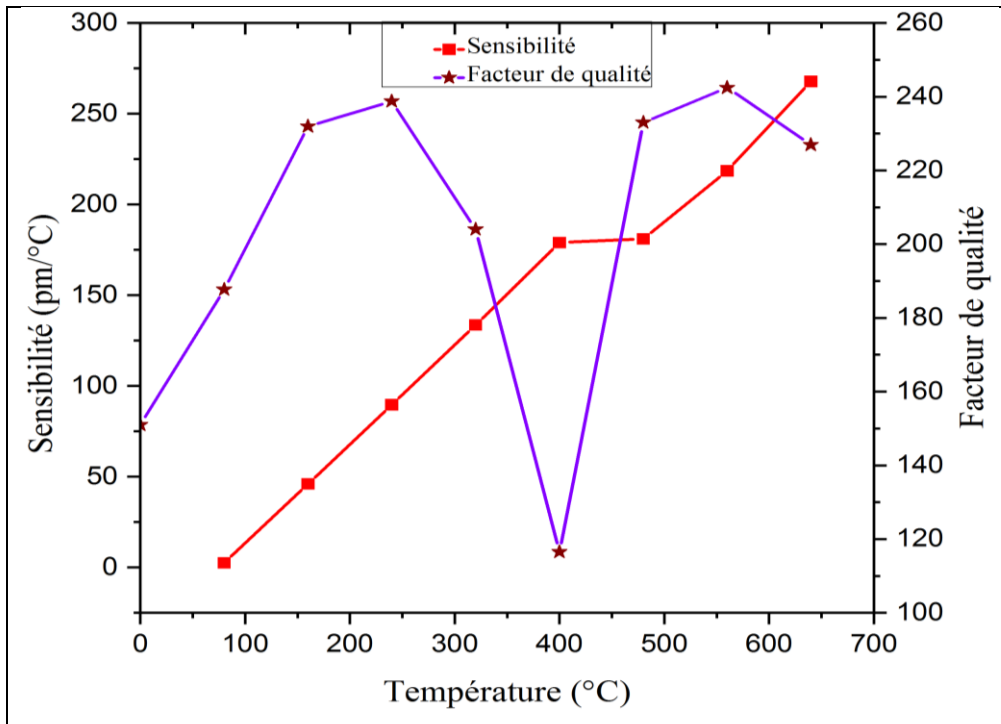
- $\Delta\lambda$  représente le décalage de la longueur d'onde de résonance en pm.
- $n$  est l'indice de réfraction des tiges de silicium.

Donc, il existe une bonne corrélation entre le décalage de longueurs d'ondes de résonance calculée et l'ajustement linéaire d'une ligne droite, comme indiquée le coefficient de corrélation " $r$ "=0.99067.



**Figure III.9:**Décalage de la longueur d'onde de résonance du capteur en fonction de l'indice de réfraction des tiges de silicium.

La figure (III.10) illustre l'évolution de la sensibilité et du facteur de qualité du capteur en fonction de la température.



**Figure III.10** : La sensibilité et le facteur de qualité du capteur en fonction de la variation de la température.

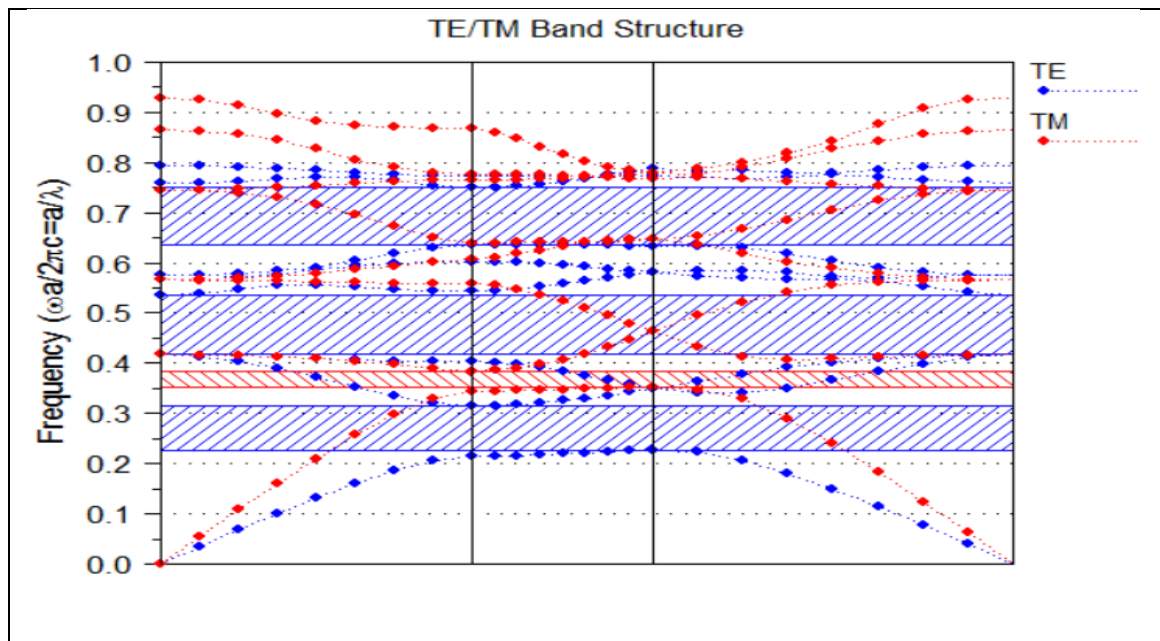
Cette figure montre que la sensibilité augmente graduellement avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre sa valeur maximale à  $267.75 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , ce qui correspond à une température de  $640^\circ\text{C}$ .

Aux températures de  $160^\circ\text{C}$  à  $320^\circ\text{C}$  et de  $480^\circ\text{C}$  à  $640^\circ\text{C}$ , on obtient un bon facteur de qualité. D'autre part, pour une température de  $400^\circ\text{C}$  un mauvais facteur de qualité est obtenu alentour de 116.4878 (voir le tableau III.3).

## 5.2 Capteur de température à base d'un capteur à cavité résonante :

### 5.2.1 Bande interdite photonique (PBG) :

Le diagramme de la bande interdite photonique (BIP) calculée par la méthode des ondes planes (PWE), comme montre la figure (III.11).



**Figure III.11:** Diagramme de la bande interdite photonique (BIP) de la structure de réseau en CP pour les modes TE et TM.

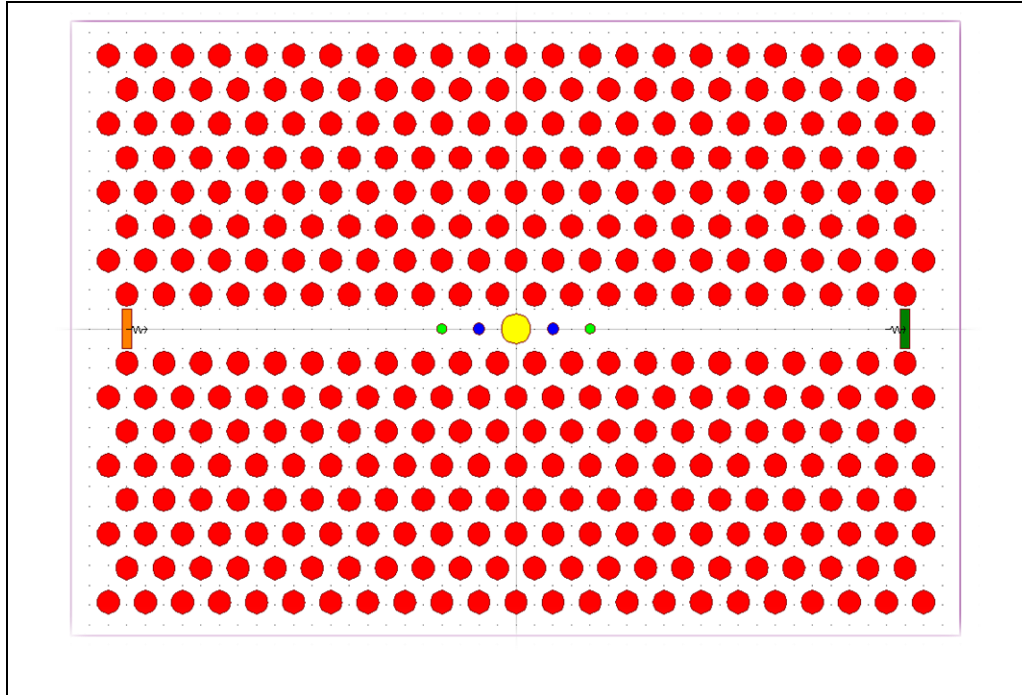
Pour la polarisation TM, il existe une seule bande interdite étroite et pour la polarisation TE, nous avons obtenu trois larges bandes interdites. La première et les deuxièmes bandes ne couvrent aucune des fenêtres de transmission optique connue et quant à la troisième bande couvre la troisième fenêtre de transmission à savoir  $\lambda = 1550\text{nm}$ .

**Tableau III.4 :** Plages des bandes interdites en fréquences et en longueurs d’ondes.

Bandes interdites		Plage de fréquences	Plage de Longueur d’onde(nm)
TE	Bande1	$0.22636 \leq (a / \lambda) \leq 0.31519$	$3172.68 \leq \lambda \leq 4417.7$
	Bande2	$0.41834 \leq (a / \lambda) \leq 0.53295$	$1876.3 \leq \lambda \leq 2390.4$
	Bande3	$0.63324 \leq (a / \lambda) \leq 0.75072$	$1332 \leq \lambda \leq 1579.18$
TM	Bande4	$0.34957 \leq (a / \lambda) \leq 0.38109$	$2624 \leq \lambda \leq 2860.65$

La structure du capteur de température de la forme hexagonale 2D est composée de deux quasi-guides d'ondes dans le sens horizontal en ligne et une cavité résonante est située entre eux. Cette nouvelle structure est montrée dans la figure (III.12).

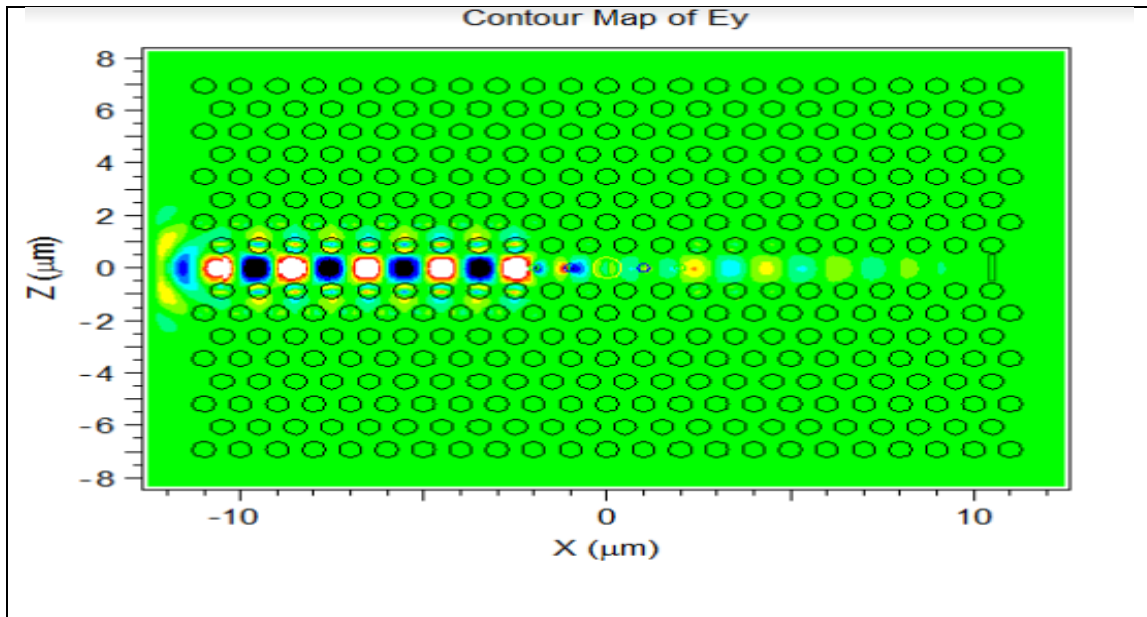
Les quasi-guides d'ondes en ligne sont créés en enlevant neuf tiges de silicium pour les deux côtés comme entrée et sortie. La cavité résonante est créée par l'optimisation des rayons de certains des tiges internes tels que le tige jaune ( $r^*1,3$ ), les tiges bleues ( $r^*0,5$ ) et les tiges vertes ( $r^*0,45$ ) placées dans le réseau hexagonal. La longueur d'onde de résonance est observée à l'aide du moniteur placé à la sortie du capteur.



**Figure III.12 :** Structure proposée d'un capteur de température à base d'une cavité résonante.

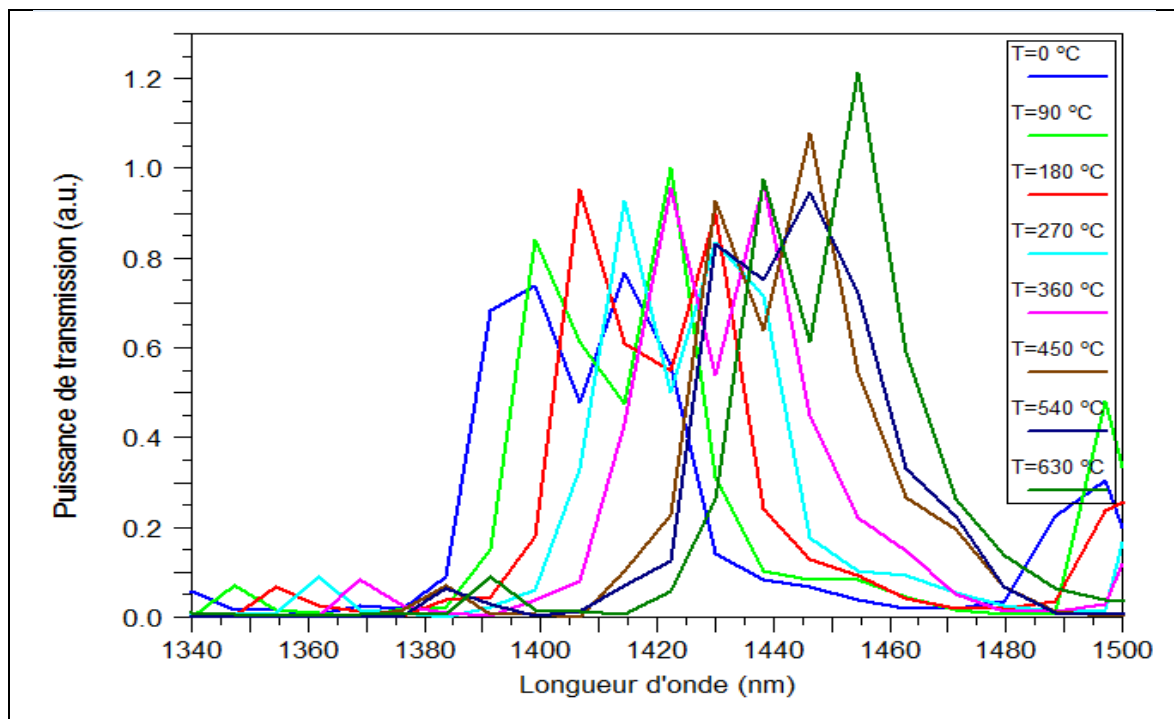
### 5.2.2 Distribution du champ électrique:

Cette partie représente les résultats de la détection optique obtenus pour la structure de capteur proposée. La figure (III.13) montre la distribution du champ électrique de la cavité résonante de notre dispositif proposé dans la gamme de température de  $0^{\circ}\text{C}$  à  $630^{\circ}\text{C}$  avec un pas de  $90^{\circ}\text{C}$ . Les résultats sont obtenus par l'utilisation de la méthode FDTD.



**Figure III.13:** Distribution du champ électrique en 2D du capteur de température à base d'une cavité résonante.

### 5.2.3 Propriétés de la structure conçue pour la détection de la température :



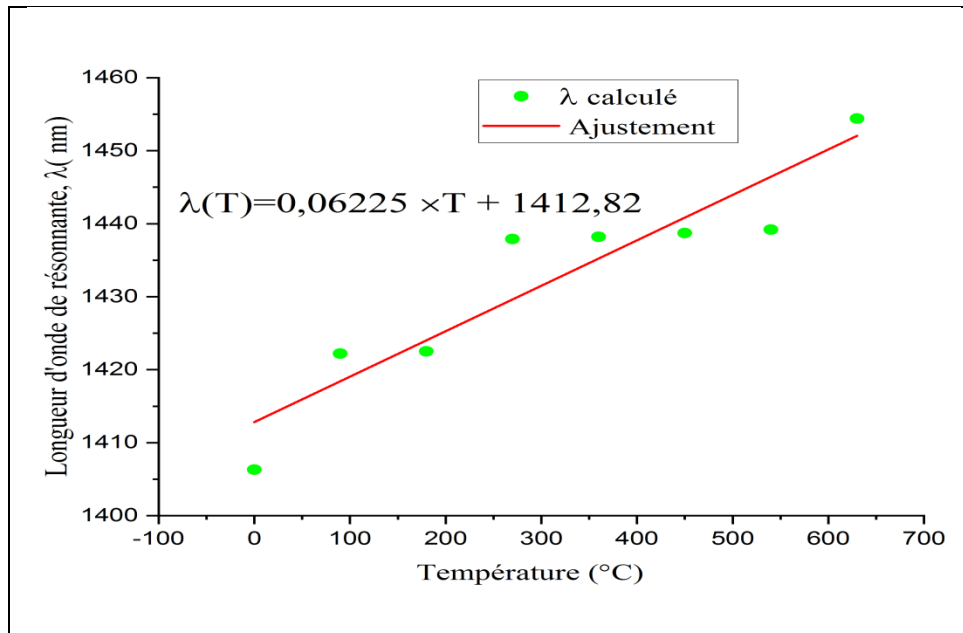
**Figure III.14:** Décalage de la longueur d'onde résonnante du capteur à base de CP à la température appliquée dans la plage de 0 °C à 630°C.

La figure (III.14) illustre l'effet du changement de la température appliqué à la structure du capteur de 0°C à 630°C sur le décalage de la longueur d'onde de résonance, qui s'explique par le décalage de la bande interdite photonique vers les régions les plus élevées de la longueur

d'onde, ce qui signifie un décalage de fréquence et ça dû à la variation des valeurs de l'indice de réfraction avec la température.

**Tableau III.5:** Paramètres fonctionnels du capteur de la température à différents niveaux de température.

Temperature Appliqués (°C)	Indice de réfraction	Longueur d'onde de résonance $\lambda_0$ (nm)	Décalage $\Delta\lambda$ (pm)	Puissance transmise (a.u)	Sensibilité pm/°C	Facteur de qualité
0	3.42	1414.8	Référence	0.76074	Référence	35.1940
90	3.4416	1422.4	7600	0.99543	84.44444	43.09
180	3.4632	1430.5	15500	0.89954	172.2222	42.82
270	3.4848	1430.9	16100	0.83562	178.8888	41.47
360	3.5064	1438.1	23300	0.96804	258.8888	44.66
450	3.528	1446.8	32100	1.0727	356.666	52.80
540	3.5496	1446.8	32100	0.93636	356.666	42.80
630	3.5712	1454.8	40000	1.2136	444.444	51.77

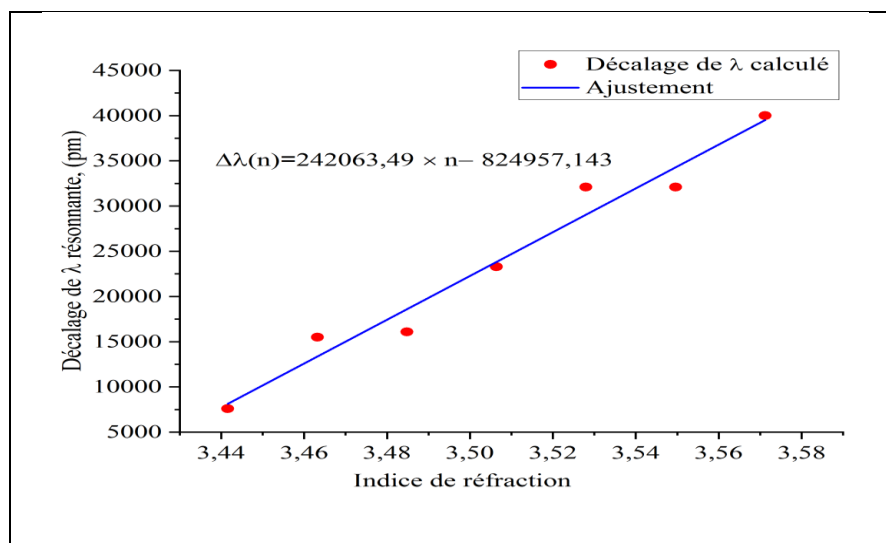


**Figure III.15 :** Longueur d'onde de résonance du capteur en fonction du changement de la température.

Figure (III.15) représente l'augmentation de la longueur d'onde de résonance du capteur avec le changement de température. De plus, la relation entre ces deux paramètres est donné par:

$$\lambda(T) = 0.06225 \times T + 1412.82 \quad (\text{III. 4})$$

Nous concluons qu'il existe une mauvaise corrélation entre les longueurs d'ondes calculées et l'ajustement de ligne droite, comme indiquée le coefficient de corrélation "r" = 0.93217.

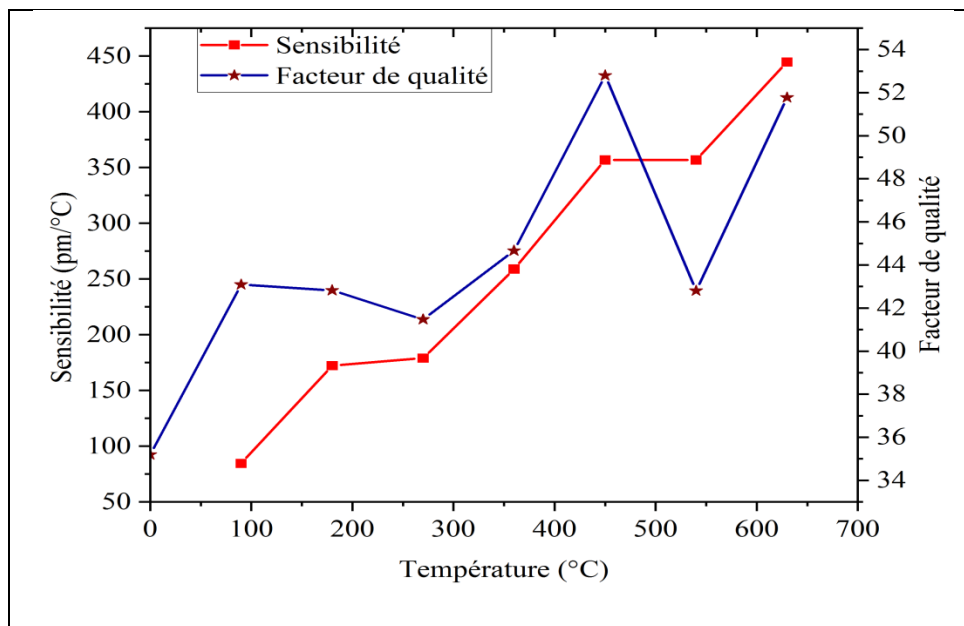


**Figure III.16 :** Décalage de la longueur d'onde de résonance du capteur en fonction de l'indice de réfraction.

Figure (III.16) représente l'augmentation de la longueur d'onde de résonance du capteur avec le changement de température. De plus, la relation entre ces deux paramètres est donné par:

$$\Delta\lambda(n) = 242063 \times n - 824957.143 \quad (\text{III. 5})$$

Nous concluons qu'il existe une bonne corrélation entre les longueurs d'ondes calculée et l'ajustement de ligne droite, comme indiquée le coefficient de corrélation "r"=0.98367.



**Figure III.17 :** La sensibilité et le facteur de qualité du capteur en fonction de la variation de la température.

Comme l'illustre le tableau (III.5) et la figure (III.17), la bonne sensibilité et le facteur de qualité le plus élevé sont de 444.444(pm/°C) et de 52.80 pour les valeurs de température de 630°C et 450°C, respectivement.



**Tableau III.6:** Valeurs de la sensibilité les plus élevées rapportées par rapport aux systèmes de capteurs de température existants:

Référence	Gamme dynamique (°C)		La plus grande sensibilité (Pm/°C)	Année
[29]	0 à 100		6.60	2011
[30]	15 à 55		35.9	2013
[31]	20 à 90		84	2016
[32]	30 à 150		61	2018
[33]	5 à 540		66.66	2018
[34]	0 à 360		92.3	2021
[35]	0 à 80		93.61	2020
[30]	0 à 500		109.8	/
Notre capteur	Structure1	0 à 640	267,75	2022
	Structure 2	0 à 630	444.444	2022

Le tableau (III.6) résume les résultats obtenus dans les précédentes études de la conception des capteurs de température à base des cristaux photoniques. Il est clair que les performances de notre capteur de température ont de meilleures performances. Par rapport aux autres capteurs de température utilisant les CP et nos capteurs proposé sont les plus grandes sensibilités.

## 6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux structures hexagonales bidimensionnelles basées sur une cavité ponctuelle et l'autre sur une cavité résonante.

Pour des applications de détection de température. La présence de l'effet thermo-optique du matériau "Si" joue un rôle très important dans le capteur de température tout optique. Les résultats de la simulation ont montré que la longueur d'onde de résonance est déplacée vers

une autre longueur plus élevée en augmentant la température. L'étude de toutes les caractéristiques fonctionnelles de nos capteurs proposés, est réalisée en utilisant les méthodes PWE et FDTD.

Pour la structure de la cavité ponctuelle, nous avons trouvé un facteur de qualité maximum de 242.4497 et une très haute sensibilité d'environ 267.75 pm/°C, une gamme dynamique de 0°C à 640°C.

Pour la structure de la cavité résonante, nous avons obtenu un facteur de qualité maximum de 52.80 et une très haute sensibilité d'environ 444.444pm/°C, une gamme dynamique de 0°C à 630°C.

Il s'agit donc des conceptions simples et adaptées à diverses applications en optique intégrée.

---

# CONCLUSION GÉNÉRALE

---

## Conclusion générale

Ce mémoire met en relief l'intérêt de l'utilisation des cristaux photoniques pour l'optique guidé. Ces matériaux permettent de réaliser un grand nombre des différentes fonctions optiques, telles que: les capteurs optiques, diviseurs de puissance optiques, les filtres optiques, les coupleurs et les multi/démultiplexeurs en longueurs d'ondes...etc. Dans le domaine de la communication optique, la technologie de détection photonique permet d'étendre des paramètres physiques comme la détection de la température à une large gamme d'applications. La structure de base d'un capteur de température consiste à confiner la lumière par sa propagation dans la cavité où elle est affectée par la température appliquée au capteur, qui provoque une variation de l'indice de réfraction et donc un décalage de la fréquence de résonance.

Le but de nos travaux est d'étudier et de conception des capteurs à base de cristaux photoniques 2D pour la détection de température afin d'obtenir une sensibilité maximale et un bon facteur de qualité pour ces capteurs.

Pour effectuer notre simulation, nous avons utilisé deux modules de simulation RSOFT, dont le premier module est appelé BandSolve qui basé sur la méthode des ondes planes (PWE), et le second appelé Fullwave basée sur la méthode de différences finies dans le domaine temporel à deux dimensions (FDTD-2D). Les résultats obtenus ont montré que ces capteurs proposés sont très sensibles aux températures appliqués.

La première structure était consacrée à l'étude et la simulation d'un capteur de température à base d'une cavité ponctuelle avec un changement de température allant de 0°C à 640°C. Donc, on obtient un capteur qui peut détecter la température avec une grande sensibilité de 267.75 pm/°C et un facteur de qualité plus élevée 242.4497.

La deuxième structure est un capteur à base d'une cavité résonnante, le facteur de qualité maximal est de 52,80 et la très haute sensibilité est d'environ 444.444 pm/°C, et une plage dynamique de 0°C à 630°C.

Nous concluons que les capteurs proposés ont un avantage très important qu'ils sont capables de fonctionner dans des conditions environnementales difficiles, en particulier à des températures élevées, avec une sensibilité améliorée.

Pour améliorer ce travail, nous proposons les perspectives suivantes :

- Conception des capteurs à base des cristaux photoniques pour la détection d'autres paramètres tels que le gaz, l'humidité, la pression et en chimie.
- Développement des nouvelles structure des capteurs à cristaux photoniques pour applications en biomédicale.

## *Bibliographie*

- [1] **M. Qiu** et **B. Jaskorzynska**, « Design of a channel drop filter in a two- dimensional triangular photonic crystal », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, p. 1074, 2003.
- [2] **Y. Akahane**, **M. Mochizuki**, **T. Asano**, **Y. Tanaka** et **S. Noda**, « Design of a channel drop filter by using a donor-type cavity with high-quality factor in a two-dimensional photonic crystal slab », *App. Phys. Lett.* , vol.82, N°9, p.1341-1343, 2003.
- [3] **C. MOSBAH**, « Étude théorique d'un capteur à base d'une structure originale en cristaux photoniques », UNIVERSITÉ FRÈRES MENTOURI, CONSTANTINE 1, 10/12 /2020.
- [4] **E. YABLONOVITCH**, « INHIBITED SPONTANEOUS EMISSION IN SOLID-STATE PHYSICS AND ELECTRONICS » ,*PHYS. REV.LETT*, VOL.58, P.2059-2062,1987.
- [5] **S. John**, « Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices », *Phys. Rev. Lett.*, vol.58, p. 2486-2489, 1987.
- [6] **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.
- [7] **A. Benmerkh**, « Optimisation du confinement de la lumière dans des cavités à cristaux photoniques » , Université Mentouri – Constantine, 20 /05 / 2012.
- [8] **S. Saoucha** , **M. BENDJOUDI** « Cristaux photoniques pour la réalisation de capteur de basse pression » , UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF M'SILA, 2017/2018
- [9] **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
- [10] **A. Ouaret**, **Y. Taklit** , **M. Bendjelloul**, « Etude et conception d'un demultiplexeur à base de cavités à cristaux photoniques » , Université Abderrahmane Mira-Béjaia, 2020.
- [11] **S. Chalabi**, « Amélioration de la sensibilité d'un capteur à base d'un cristal photonique », Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj 15/09/2021

- [12] **A. Belhassos , S. Metref** , « Etude et simulation des cristaux photoniques » Université Kasdi Merbah OUARGLA, 20-Jun-2017.
- [13] **W. Barbara**, « étude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photoniques bidimensionnels et de leur accordabilité », pour l'obtention du grade de docteur et sciences ,école polytechnique fédérale de lausanne ,13 juillet 2006
- [14] **H. Rigneault, J.-M. Lourtioz**, C. Delalande, « La nanophotonique » , 2005.
- [15] **R. Moukhtari**, Contribution à L'étude et La Conception Des Cavités à Cristaux Magneto Photoniques, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 14/05/2018 .
- [16] **M. Filali**, Etude et Conception d'un démultiplexeur 8 canaux à cristaux photoniques bidimensionnels, universite mohamed boudiaf - m'sila, 17 / 06 / 2018.
- [17] **K. Boudiaf, SAFER Hadjer** « Thème Etude et conception des capteurs à cristaux Photoniques pour des applications biomédicales »17/06/2018.
- [18] **A. Benmerkhi**,« thème influence des paramètres géométriques sur la cavité à cristaux photoniques bidimensionnels »
- [19] **A. Dekhira**, « Etude théorique et simulation des cristaux photoniques et leurs applications en chimie et biochimie» ,10/01/2011.
- [20] **KH. Bendemagh**,« Etude de dimensionnement d'un coupleur à base de cristaux photoniques destiné aux systèmes de communications » , thèse pour l'obtention du diplôme de doctorat, université ferhat abbas – setif 1, 03/10/2019.
- [21] **S. Arafa**,«Étude des composants à base de cristaux photoniques : Application dans le domaine du démultiplexage et de la détection»,Université frères mentouri ,constantine , 2018.
- [22] **C. Mosbah**, Étude théorique d'un capteur à base d'une structure originale en cristaux photoniques, université frères mentouri, constantine 1, 10/12 /2020.
- [23] **F. BOUGRIOU**,« Etude theorique des materiaux a bandes interdites photoniques bidimensionnels : applications dans le domaine du guidage optique et la detection », universite constantine 1, 16 décembre 2013.
- [24] **B.Hamidat , Y. Abdelli** , « Etude et conception des capteurs à cristaux Photoniques pour des applications biomédicales », universite mohamed boudiaf - m'sila, 2016 / 2017.
- [25] **M. Benslma, T. Bouchemat** , Étude de cristaux photoniques en silicium pour l'application à la biodétection , Université freres mentouri constantine,13/05/2018.

- [26] **D. Benelarbi**, Étude de cristaux photoniques en silicium pour l'application à la biodétection, UNIVERSITÉ FRÈRES MENTOURI, CONSTANTINE, 13/05/2018
- [27] **E. Kouddad , R. Naoum ,L. Dekkiche** , High Sensitivity And Ultra-High Quality Factor For An All-Optical Temperature Sensor Based On Photonic Crystal Technology"
- [28] 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
- [29] **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.
- [30] **G .Yufu, et al** « A compact four-wave mixing-based temperature Fiber sensor with partially filled photonic crystal Fiber » IEEE Sensors Journal 19.8 (2018): 2956-2961.
- [31] **R. Rajasekar, and S. Robinson** , « Nano-pressure and temperature sensor based on hexagonal photonic crystal ring resonator. », Plasmonics 14.1 (2019): 3-15.
- [32] **R. ZEGADI**, « Etude, conception et modélisation de capteurs à base de cristaux Photoniques pour les systèmes à régulation autonome », thèse doctorat , université ferhat abbas – setif 1, 2021
- [33] **F. Bounaas , A. Labbani**, « High Sensitivity Temperature Sensor Based on Photonic Crystal Resonant Cavity » , Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 90, 85–90, 2020.
- [34] **O. Halassa ,K.Messaoudi**, Étude et Simulation de la Propagation des Ondes Électromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques, université kasdi merbah ouargla, 24/06/2018.



## **Annexe:**

# **Outil de simulation RSOFTE CAD et Méthodes numériques PWE et FDTD**

### **A.1 Introduction :**

La modélisation électromagnétique des propriétés des cristaux photoniques nécessite en général un gros investissement en programmation et en analyse numérique et constitue une activité exigeante en compétence et en temps. On peut distinguer les modèles théoriques traitant les cristaux photoniques comme la méthode des ondes planes PWE et la méthode des différences finies dans le domaine du temps FDTD. Dans ce chapitre nous allons bien détailler cette dernière méthode et aussi présenter le logiciel Rsoft CAD avec une explication des lignes de base du principe de fonctionnement de ce logiciel et détailler le module de BandSolve et FullWAV [ 8].

### **A.2 Méthodes de modélisation des structures périodiques :**

#### **A.2.1 Méthode des ondes planes (PWE) :**

La méthode des ondes planes est la méthode privilégiée pour le calcul des diagrammes de dispersion dans les CP [Joanno poulos 1995]. Comme son nom l'indique, elle repose sur la décomposition en ondes planes du champ électrique ou magnétique C'est une méthode de résolution dans le domaine fréquentiel des équations de Maxwell, Elle est basée sur la décomposition en ondes planes du problème électromagnétique. Cette méthode est essentiellement utilisée pour analyser les propriétés dispersives des matériaux à bandes interdites photoniques et permet de déterminer la fréquence, la polarisation, la symétrie et la distribution du champ pour les modes d'une structure photonique. La technique PWE consiste à résoudre, dans l'espace fréquentiel, l'équation d'onde linéaire en développant le champ électromagnétique sur une base d'ondes planes. La méthode de décomposition en ondes planes est très efficace pour calculer les diagrammes de bandes des cristaux photoniques parfaitement périodiques. Dans ce travail, nous utilisons la méthode PWE pour étudier la bande interdite de la structure photonique [34].

#### **A. 2.2 Méthode de FDTD :**

La méthode FDTD a été initialement proposée par Kane S. Yee en 1966. Cette méthode de calcul effectuée dans le domaine temporel permet de visualiser la propagation de l'onde

dans des milieux structurés tels que les cristaux photoniques. Cette méthode permet à l'utilisateur de développer une compréhension plus intuitive des processus de propagation. Elle permet aussi d'obtenir de nombreuses informations sur la propagation de l'onde dans la structure [8].

• **Avantages de la méthode FDTD sont :**

1) C'est une méthode simple : elle met en jeu, en effet, des concepts et des outils de résolutions élémentaires (équations de Maxwell, différences nies).

2) Elle permet l'obtention en une seule simulation des informations temporelles et spectrales sur une structure. Elle apporte aussi des éléments de Compréhension sur l'établissement du champ électromagnétique dans la structure en orant la possibilité d'obtenir la distribution du champ à différents temps.

3) Cette méthode permet l'évaluation en fonction de temps de nombreuses autres grandeurs comme le vecteur de Poynting ou l'énergie électromagnétique stockée.

En revanche, elle peut requérir des moyens de calcul et des mémoires informatiques importants, dépendant de la taille de l'espace de travail. Pour diminuer les temps d'exécution, les espaces de travail doivent être choisis assez réduits [8].

**A. 3 Définition du Simulateur Rsoft CAD :**

Le Rsoft est un programme de base de RSoft photonique, il permet aux chercheurs et ingénieurs de crée des systèmes pour la conception des dispositifs de guide d'onde, des circuits optique et d'autres dispositifs photoniques. Il agit en tant que programme de gestion pour les modules passifs de simulation du dispositif de R Soft : Beam PROP, Full WAVE, Band SOLVE, Grating MOD et Diffract MOD .Dans le Rsoft, il existe plusieurs modules intégrés, chaque module assure une fonction bien précise [13].

**A.3.1 BANDSOLVE :**

Le logiciel que nous avons exploité pour modéliser les structures par la méthode des ondes planes s'appelle BandSOLVE développé par Rsoft CAD. BandSOLVE est un logiciel de simulation des structures de bande photoniques. Il est basé sur la méthode des ondes planes optimisée pour les structures périodiques, idéal pour produit 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 dimension, il est nécessaire de considérer deux directions de propagation différente : TE (avec le champ E perpendiculaire à l'axe des trous) et TM (ou E est parallèle à l'axe des trous). Ces deux

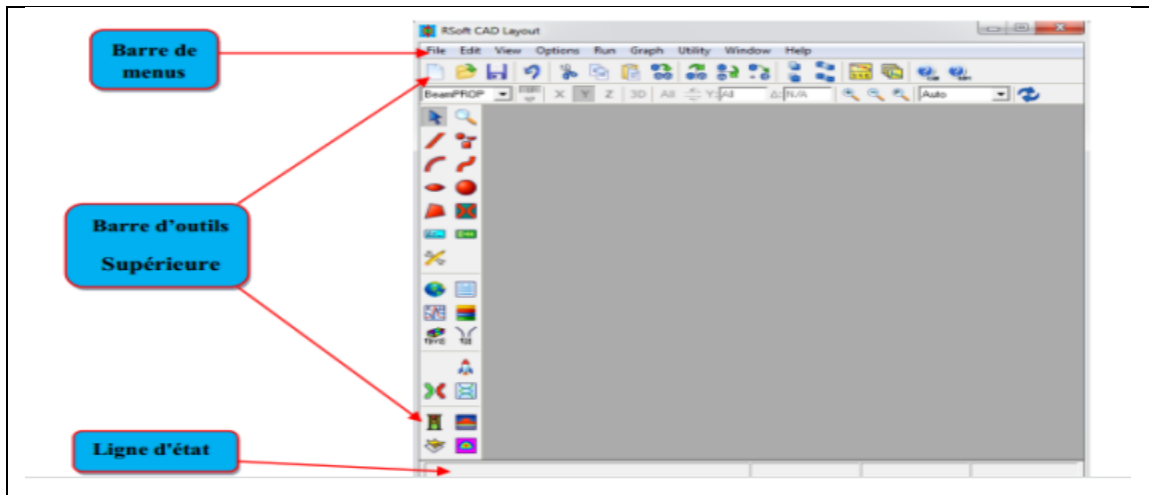
polarisations sont découplées et donnent lieu à deux diagrammes de bandes indépendants. Il n'existe pas forcément une bande interdite dans les deux cas. BandSOLVE est destiné pour fonctionner avec les autres modules de simulation de Rsoft CAD tels que BeamPROP et FullWAVE, il partage le même outil de Rsoft CAD avec ces modules. En particulier, le BandSOLVE est spécialement utile pour optimiser les propriétés des cristaux photoniques [8].

### **A.3.2 Simulateur FullWave :**

L'objectif de FullWAVE est de fournir un ensemble de simulations pour calculer la propagation de la lumière dans les guides d'ondes de géométries arbitraires. La simulation est basée sur la technique de la FDTD (Finite Difference Time Domain). 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, On peut ainsi obtenir les cartographies du champ EM à n'importe quel endroit et n'importe quel moment. La connaissance de l'évolution du champ en fonction du temps permet également d'obtenir des informations sur la réponse spectrale de la structure. La méthode FDTD est largement utilisée dans les études relatives à la mécanique des matériaux ainsi qu'à la propagation des ondes. Dans le domaine de la photonique, elle se rapproche plus de la réalité car elle offre la possibilité de générer une excitation (source) dans un CP et de suivre dans le temps le comportement de l'onde et son interaction avec le CP, ce qui permet d'y étudier sa transmission. Ainsi, elle a été appliquée en 2000 par Si galas et Garcia pour déterminer le coefficient de transmission dans une structure photonique tridimensionnelle [12].

### **A.3.3 Fenêtre de programme de Rsoft CAD :**

La fenêtre de programme de Rsoft CAD comporte une barre de menus en haut de la fenêtre, d'une barre des outils qui porte plusieurs icônes et la ligne d'état (figure 1). Les menus permettent l'accès au divers dossier standard et les opérations d'édition. La ligne d'état fournit des informations sur le mode courant de disposition, avec l'affichage du même rang pendant le dessin [19].

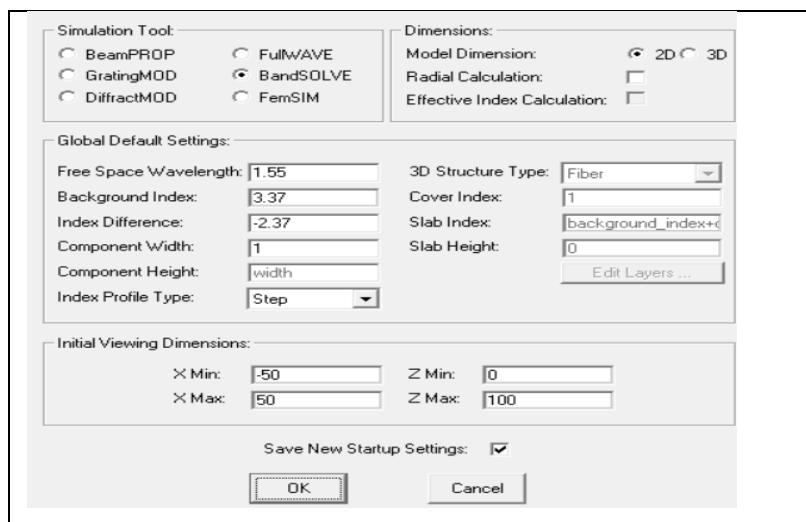


**Figure 1:** Fenêtre de programme de R Soft CAD montrant la barre de menu au-dessus, les barres des outils supérieurs à gauche, et la ligne d'état au fond.

### A.3.4 Étapes de Création d'une nouvelle structure :

#### A.3.4.1 Créé nouveau circuit :

Pour créer un nouveau circuit, cliquer sur l'icône **New circuit** dans la barre d'outils supérieure. Alternativement, choisir **File/New** du menu. Le dialogue de démarrage apparaît (figure III.2). Ce dialogue donne des informations de base sur le circuit [9].

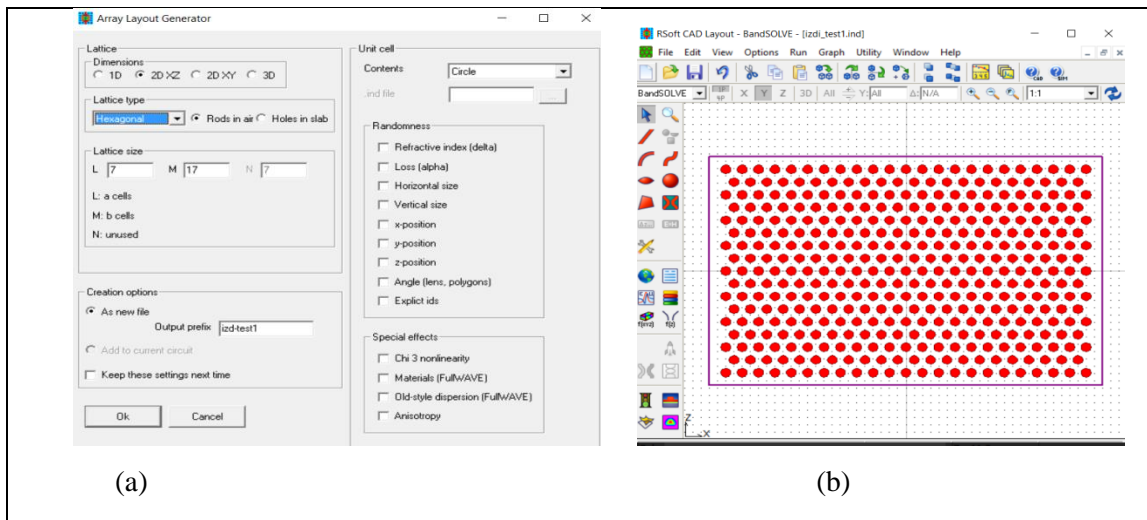


**Figure 2 :** Fenêtre de démarrage.

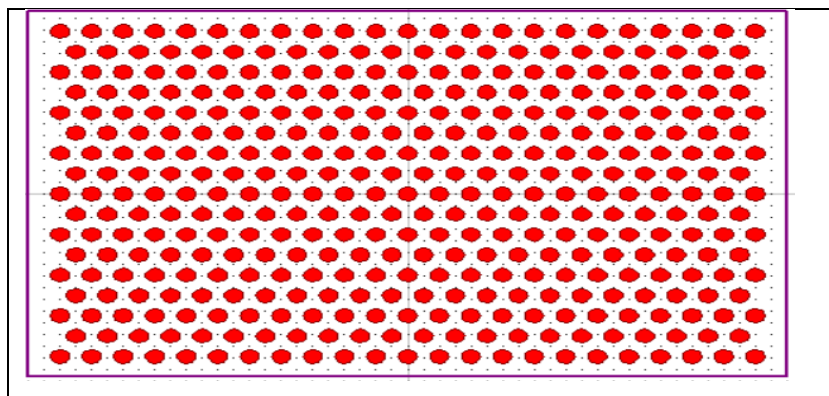
#### A.3.4.2 Génère structure de réseau :

Dans cette partie on va montrer comment créer un réseau en cristaux photoniques dans l'interface de Rsoft CAD. Généralement, il existe plusieurs manières pour créer une structure de réseau dans l'interface de Rsoft CAD. Cependant, la manière la plus facile est d'employer

un des multiples utilisés de disposition qui sont incluse avec FullWAVE an d'expédier la création de ce réseau en utilisant **Array Layout** (figure3(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 apparait sur la (figure 3(b)).



**Figure 3 :** a) Arrangements de disposition de la rangée XZ. b) Disposition de rangée dans la fenêtre de Rsoft CAD.



**Figure 4 :** Réseau en cristal photonique 2D sans défaut  $23 \times 17$ .

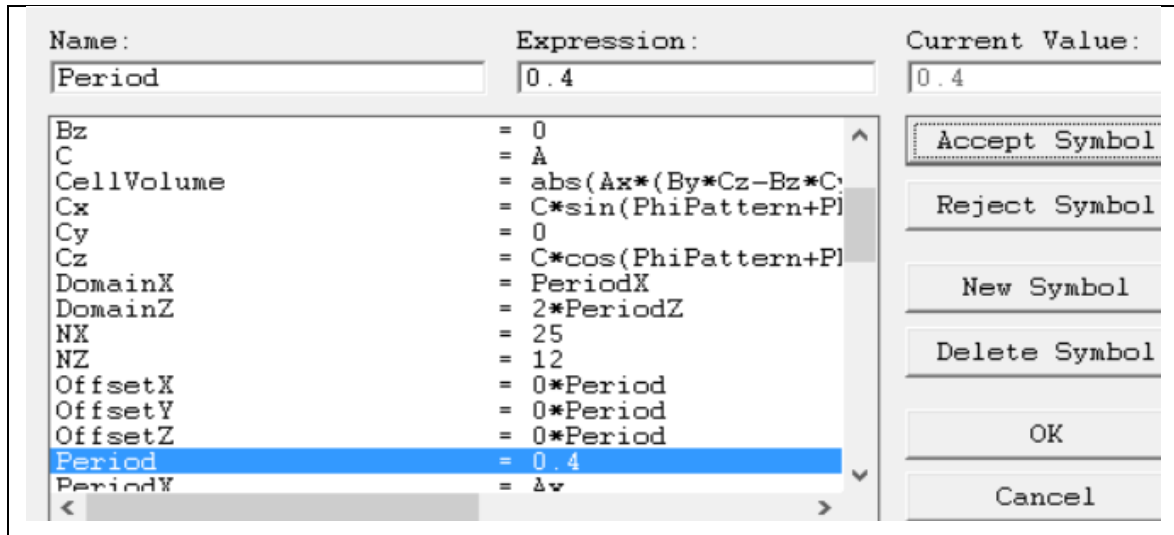
### A.3.5 Personnalisation de réseau :

Le bouton Global Settings Windows est utilisé pour définir le module de simulation BandSOLVE ou FullWAVE parmi les autres méthodes qui existent à RSoft CAD (BeamPROP/BPM BandSOLVE ou Grating MOD) [21].

### A.3.6 Créer des variables :

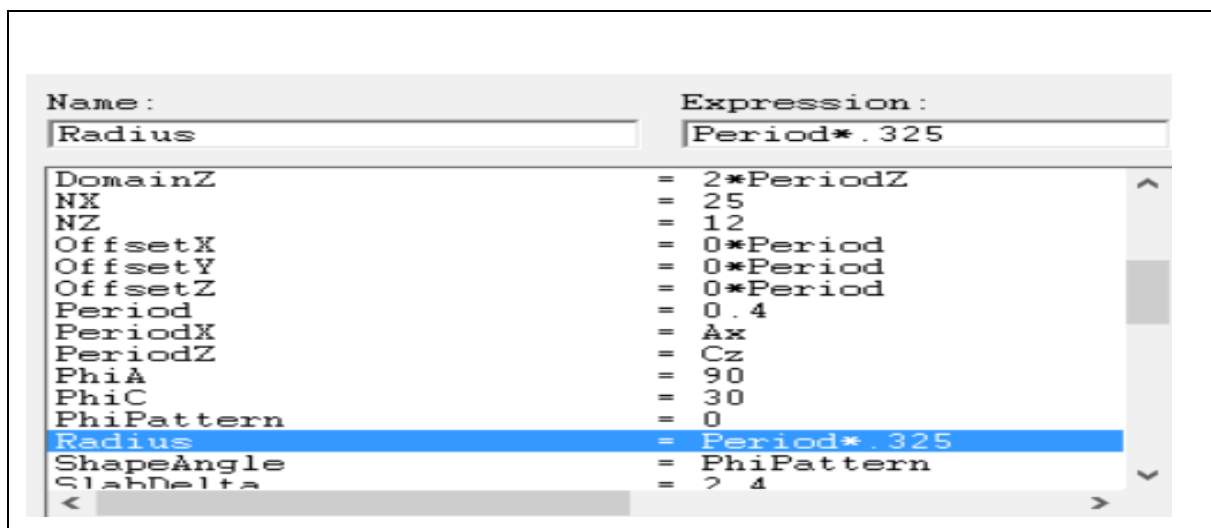
L'icône de symboles d'édition dans la fenêtre de Rsoft CAD. Ceci ouvrira (symbole Table Editor) comme montré dans les figures 5 et 6 Pour placer les divers paramètres de la structure, et définir plusieurs variables tels que la période, le rayon, l'indice de réfraction [19].

- ✓ période = constante de réseau (  $\text{period} = \text{lattice constant}$  )  $a = 0,4\mu\text{m}$  :

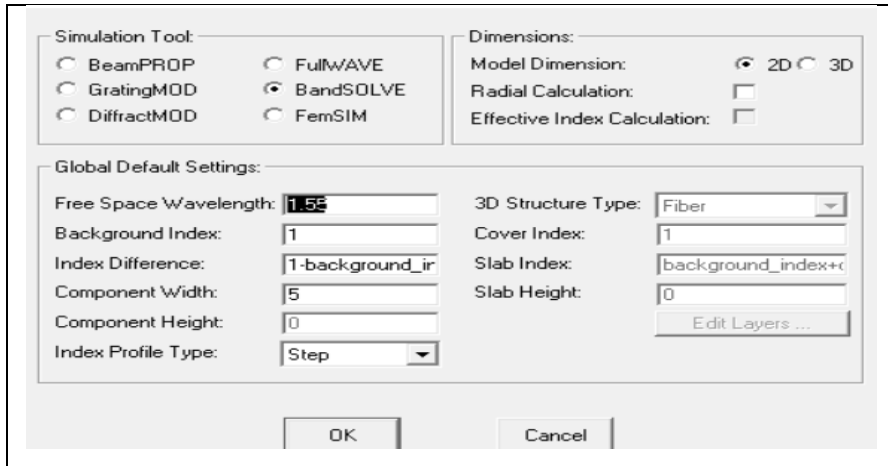


**Figure 5:** Fenêtre de déclaration des variables pour définir la constante de réseau (a)

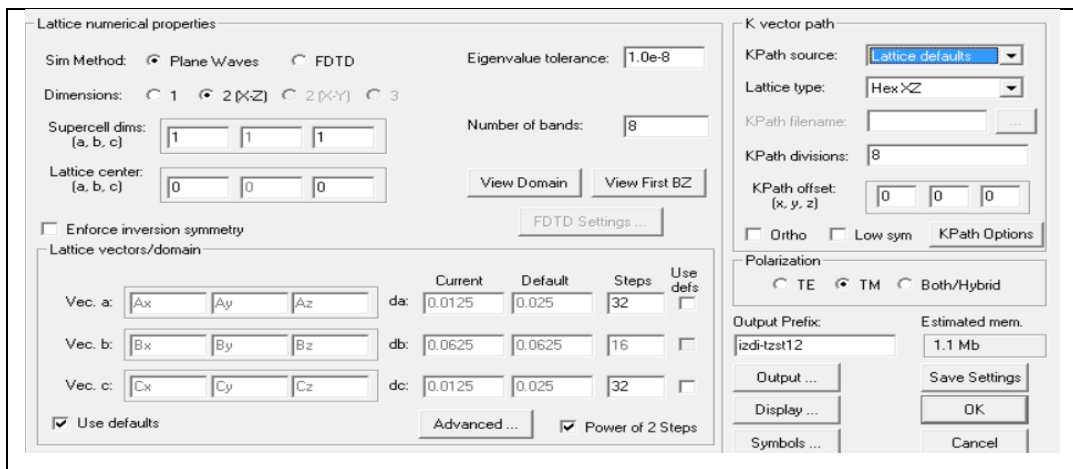
- ✓ Rayon (radius)  $r = 0,325a$



**Figure 6:** Fenêtre de déclaration des variables pour définir la rayon (r) .

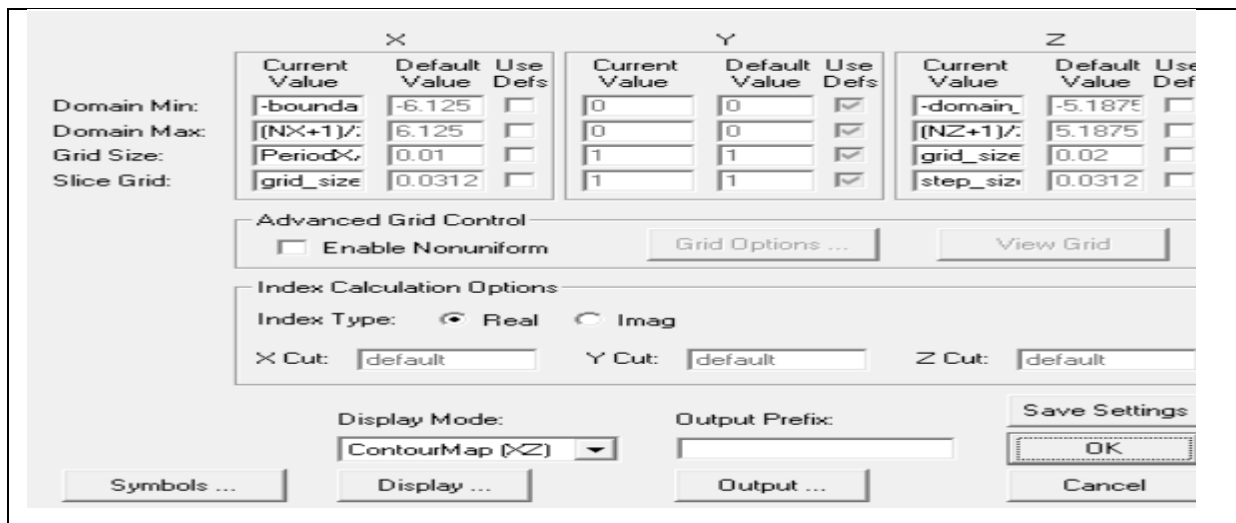


**Figure 7:** Paramètres de simulation PWE (BAND SOLVE).



**Figure 8:** Fenêtre Paramètres de simulation PWE où les paramètres numériques de base de la simulation sont entrés.

### A.3.7 Vérification de la structure :



**Figure 9:** Arrangements de disposition de la rangée.

Pour vérifier notre structure, nous avons simulé le profil de la constante diélectrique dans le plan de périodicité (plan XZ) (figure 8). Puis appuyez sur **OK** pour le profil d'indice comme le montre.

#### **A.3.8 Lancement de la simulation :**

Une fois que les paramètres numériques et d'autres options sont acceptables, on clique sur **OK** pour commencer la simulation.

#### **A.3.9 Voir les résultats :**

Regarder ou imprimer a sauvé des résultats de simulation, on clique sur l'icône



de Launch Data Browser dans la barre des outils supérieur de la fenêtre de Rsoft CAD, et on choisit le graphe désiré à partir du dialogue qui présenté.