

N° d'ordre : .....



جامعة محمد بوضياف - المسيلة  
Université Mohamed Boudiaf - M'sila  
كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie  
قسم الإلكترونيك  
Département d'Electronique



# MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Hadjer NACERI

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : MICRO-ELECTRONIQUE

## Thème

**Optimisation du facteur de qualité dans les  
cavités à cristaux photoniques  
bidimensionnels**

Soutenue le : 09/06/2015 devant le jury composé de :

Dr. D. Khadrouch

Dr. A. Hocini

Mr. M. Bouras

Mr. A. Boudjlel

M.C.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila

M.C.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila

M.C.B - Université Mohamed Boudiaf - M'sila

M.A.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Président

Encadreur

Examineur

Examineur

Promotion : Juin 2015

## *Remerciements*

*Je remercie Allah, pour m'avoir donné la force, le courage, et la volonté  
qui m'a permis de faire aboutir ce modeste travail.*

*Je remercie mon encadreur Mr. Abdessalam HOCINI pour ses  
encouragements, son aide au cours de cette modeste étude.*

*J'adresse mes chaleureux remerciements à Monsieur MOUKHTARI Riad  
Pour la documentation et les conseils prodigués.*

*J'exprime ma reconnaissance aux membres de jury pour bien vouloir  
accepter de présider et examiner ce travail.*

*Nos remerciements s'étendent également à tous, nos enseignants durant  
les années des études.*

*Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, pour  
Leurs soutiens moraux ou matériels, dans la réalisation de ce projet.*

## *Dédicaces*

*La joie de réussir n'est jamais complète que si elle est partagée avec  
ceux qu'on aime*

*À ma **mère** et mon père*

*À mes sœurs et mes frères*

*À Ma tante Aïcha BOURICHA*

*À tous ma famille et mes amis*

*Je dédie ce travail.*

*Hadjer*

## Table des matières

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

### CHAPITRE I : Généralité sur les cristaux photoniques et les cavités

<b>I-1-Introduction.....</b>	<b>5</b>
<b>I-2- Généralités sur les cristaux photoniques.....</b>	<b>5</b>
<b>I-2-1-Historique sur les cristaux photoniques.....</b>	<b>5</b>
<b>I-2-2-Les cristaux photoniques.....</b>	<b>6</b>
<b>I-2-3- Analogie électron photon.....</b>	<b>7</b>
<b>I-2-4- Les cristaux photoniques unidimensionnels.....</b>	<b>7</b>
<b>I-2-5- Les cristaux photoniques tridimensionnels.....</b>	<b>8</b>
<b>I-2-6- Cristaux photoniques bidimensionnels.....</b>	<b>10</b>
<b>I-2-7- Propriétés des Cristaux photoniques bidimensionnels.....</b>	<b>11</b>
<b>I-2-8- Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels.....</b>	<b>12</b>
<b>I-2-9- Caractéristiques géométriques et physiques d'un cristal photonique.....</b>	<b>13</b>
<b>I-2-10- Ouverture d'une bande interdite omnidirectionnelle.....</b>	<b>14</b>
<b>I-2-11- Application des cristaux photonique.....</b>	<b>15</b>
<b>I-3- Cavité à cristaux photoniques.....</b>	<b>18</b>
<b>I-3-1- Définition.....</b>	<b>18</b>
<b>I-3-2- La création de défauts dans les CP2D.....</b>	<b>19</b>
<b>I-3-3- Les différents types des défauts.....</b>	<b>19</b>
<b>I-3-4- Les différents types des cavités.....</b>	<b>21</b>
<b>I-3-5- Influence des paramètres géométriques sur les microcavités.....</b>	<b>21</b>
<b>I-4- Conclusion.....</b>	<b>24</b>

### CHAPITRE II : Outils de simulation

<b>II-1- Introduction.....</b>	<b>26</b>
<b>II-2- Méthodes de modélisation.....</b>	<b>26</b>
<b>II-2-1-La méthode des ondes planes (PWE).....</b>	<b>27</b>
<b>II-2-2- La méthode FDTD.....</b>	<b>27</b>
<b>II-3- Présentation du logiciel Rsoft CAD.....</b>	<b>28</b>

II-3-1-Environnement de CAD.....	28
II-3-2- Le simulateur «BandSOLVE».....	28
II-3-3- Présentation de Full wave.....	30
II-4- Les étapes de simulation d'un CP2D.....	30
II-4-1- Créer un nouveau circuit.....	31
II-4-2- Personnalisation de réseau.....	32
II-4-3- Définition des variables.....	32
II-4-4- Vérifier la structure.....	33
II-4-5- Réglage des paramètres de simulation.....	33
II-4-6- lecture des résultats.....	34
II-5- Diagramme des bandes.....	35
II-6- Conclusion.....	36

## CHAPITRE III: Résultats et interprétations

III-1- Introduction.....	38
III-2- Cavités en Cristaux Photoniques 2D.....	38
III-3- Cavités Hexagonales.....	38
III-3-1- Etude de la cavité $H_1$ pour un défaut lacunaire.....	38
III-3-2- Influence du nombre de périodes sur la cavité $H_1$ .....	40
III-3-3- Influence du facteur de remplissage sur la cavité $H_1$ .....	42
III-3-4- Influence de la modification des dimensions des trous bordant la cavité $H_1$ .....	44
III-4- Cavité linéique.....	45
III-4-1- Cavité $L_3$ .....	45
III-4-2- Influence du décalage des trous sur la longueur d'onde et le facteur de qualité de la cavité $L_3$ .....	46
III-4-3- Influence de la modification de rayon des trous bordant la cavité $L_3$ .....	48
III-5- Conclusion.....	50
Conclusion générale.....	51
Bibliographie.....	52

## Liste des figures

### Chapitre I : Généralité sur les cristaux photoniques et les cavités

<b>Figure I-1</b> : Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnel (2D) et tridimensionnel (3D).....	<b>6</b>
<b>Figure I-2</b> : BIP unidimensionnel, empilement de couches de permittivités différentes	<b>7</b>
<b>Figure I- 3</b> : Structures 3D : (a) La Yablonivite: les trous de ce cristal ont été percés dans un bloc de plexiglas et forment un réseau FCC (b) Image MEB (Microscopie Electronique à Balayage) d'un cristal photonique du type tas de bois fabriquée par lithographie UV dans du silicium.....	<b>9</b>
<b>Figure I- 4</b> : Structures 3D : (a) Les opales directes ; (b) Les opales inverses.....	<b>9</b>
<b>Figure I-5</b> : Structure périodique 2D connectée.....	<b>10</b>
<b>Figure I-6</b> : Structure périodique 2D déconnectée.....	<b>10</b>
<b>Figure I-7</b> : Décomposition du champ électromagnétique suivant ses deux polarisations TE et TM.....	<b>11</b>
<b>Figure I-8</b> : Cristal photonique bidimensionnel dans du silicium macroporeux avec un défaut unidimensionnel.....	<b>11</b>
<b>Figure I-9</b> : Représentation (a) d'un réseau carré (b) de son réseau réciproque et (c) de sa zone de Brillouin.....	<b>12</b>
<b>Figure I-10</b> : Réseau triangulaire.....	<b>12</b>
<b>Figure I-11</b> : Structure Nitrure de Bore.....	<b>13</b>
<b>Figure I-12</b> : Structure graphite.....	<b>13</b>
<b>Figure I-13</b> : Période d'un cristal photonique unidimensionnel.....	<b>14</b>
<b>Figure I-14</b> : (a) Cristal photonique 2D ; (b) Une bande interdite omnidirectionnelle est obtenue dans le plan lorsque toutes les bandes interdites unidirectionnelles se recouvrent.....	<b>15</b>
<b>Figure I-15</b> : guides d'onde à cristaux photoniques : (a) droit, (b) coudé.....	<b>16</b>
<b>Figure I-16</b> : cavités sur membrane suspendue : (a) cavité triangulaire, (b) cavité hexagonale, entourées par un cristal photonique triangulaire.....	<b>16</b>
<b>Figure I-17</b> : la structure et le principe de fonctionnement d'un filtre Add- Drop ; une rangée a été éliminée pour guider les ondes avec des fréquences $f_1, f_2, \dots, f_i, \dots$ . Et les défauts ponctuels pour extraire les fréquences désirées $f_i, f_j$ .....	<b>17</b>
<b>Figure I-18</b> : fibre optique à cristal photonique.....	<b>17</b>

<b>Figure I-19 :</b> Exemple de cavité $H_1$ .....	<b>19</b>
<b>Figure I- 20 :</b> ( a) Défaut lacunaire ; (b) et (c) Défauts de substitutions.....	<b>20</b>
<b>Figure I-21 :</b> Spectre de transmission d'un cristal hexagonal de tiges diélectriques avec ou sans défaut lacunaire.....	<b>20</b>
<b>Figure I-22:</b> Exemple de guide W1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant.....	<b>21</b>
<b>Figure I-23 :</b> Les différents types de cavités.....	<b>22</b>
<b>Figure I-24 :</b> Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique carré avec un paramètre de maille 600nm.....	<b>22</b>
<b>Figure I-26:</b> Exemple de cavité rectangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 560nm.....	<b>22</b>

## CHAPITRE II: Outils de simulation

<b>FigureII-1 :</b> Fenêtre principale du programme CAD.....	<b>30</b>
<b>Figure II-2:</b> Arrangements de disposition de la rangée XZ.....	<b>31</b>
<b>Figure II-3:</b> Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD.....	<b>31</b>
<b>Figure II-4:</b> Arrangements Globaux.....	<b>32</b>
<b>Figure II-5:</b> Le tableau de l'éditeur des symboles.....	<b>32</b>
<b>Figure II-6 :(a)</b> Arrangements de calcul de profil d'index et (b) Distribution d'index pour la disposition de réseau.....	<b>33</b>
<b>Figure II-7:</b> La fenêtre de paramètres de simulation de BandSolve où des paramètres numériques de base de simulation sont entrés.....	<b>34</b>
<b>Figure II-8:</b> La fenêtre de paramètres de simulation de Full WAVE où des paramètres numériques de base de simulation sont entrés.....	<b>34</b>
<b>Figure II-9 :</b> Diagramme de dispersion d'un réseau triangulaire de trous d'air dans du silicium avec $\epsilon=11.6$ et $r/a=0.43$ pour la polarisation TE (en rouge) et TM (en bleu). Les zones hachurées marquent les BIP de chacune des polarisations. Seules les fréquences comprises entre 0,385 et 0,406 permettent l'ouverture d'une bande interdite complète. (a) Résultats obtenus par et (b) Résultats obtenus par le simulateur Bandsolve.....	<b>35</b>

### CHAPITRE III: Résultats et interprétations

<b>Figure III-1 :</b> Coefficient de transmission d'un CP2D à réseau triangulaire de paramètre de maille $a=420\text{nm}$ constitué de trous d'air de rayon $r=0.32a$ gravés dans une membrane de silicium en polarisation TE et TM.....	39
<b>Figure III-2 :</b> (a) Coefficient de transmission d'une cavité H1 dans un réseau triangulaire de paramètre de maille $a=420\text{nm}$ constitué de trous d'air de rayon $r=0.32a$ gravés dans une matrice diélectrique de silicium en polarisation TE et TM ; (b) Intensité du champ dans la cavité H1 pour $\lambda_0=\mu\text{m}$ .....	40
<b>Figure III-3 :</b> Spectre de l'intensité de champ d'une cavité H1 dans un réseau triangulaire de $9 \times 9$ et $11 \times 11$ respectivement ( $a=420\text{nm}$ , $r=0.1344$ , $n=3.42$ ).....	41
<b>Figure III-4:</b> Variation du facteur de qualité en fonction du nombre de période.....	42
<b>Figure III-5 :</b> Variation du facteur de qualité en fonction du facteur de remplissage.....	43
<b>Figure III-6 :</b> Vue de dessus de la cavité optimisée H1 formé par l'omission d'un seul trou.....	44
<b>Figure III-7 :</b> Influence de la modification des dimensions des trous bordant la cavité H1 le facteur de qualité.....	44
<b>Figure III-8:</b> (a) Vue de dessus de la cavité L3 formé par l'omission de trois trous dans la direction $\Gamma K$ du cristal photonique, (b) Transmission de la cavité simple L3 constituée de trois motifs adjacents dans un réseau triangulaire.....	46
<b>Figure III-9:</b> Représentation de la cavité L3. Les pointillés indiquent l'emplacement initial des trous des deux extrémités et la flèche noire le sens du décalage des trous concernés.....	46
<b>Figure III-10:</b> Décalage des trous des extrémités de la cavité L3 et le spectre de transmission.....	47
<b>Figure III-11:</b> (a) Influence du décalage des trous sur la longueur d'onde du mode M2 de la cavité L3, (b) Influence du décalage des trous sur le facteur de qualité de la cavité L3.....	47
<b>Figure III-12:</b> Vue de dessus le changement de rayon des trous bordant la cavité L3.....	48
<b>Figure III-13:</b> Influence du réduire de rayon des trous bordant la cavité L1 sur la longueur d'onde et le facteur de qualité.....	49



## **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Depuis des années, la recherche scientifique s'est intéressée à contrôler la propagation de la lumière afin de remplacer la communication classique à courant électrique. La recherche des scientifiques comme, Yablonovitch [1] et John [2] (1987) a abouti à la réalisation et caractérisation d'une nouvelle génération des matériaux : les cristaux photoniques.

L'approche des cristaux photoniques ou la band interdit photonique (BIP) est intéressante car elle offre une ouverture vers l'intégration compacte de l'optique, et surtout vers un meilleur contrôle de la lumière produite par des sources intégrées dans les dispositifs optiques [3]. Les BIP sont des structures dont l'indice diélectrique est modulé de façon périodique. Grâce à l'analogie formelle qui existe entre les équations de Maxwell régissant la propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu diélectrique et l'équation de Schrödinger pour les électrons, on peut appréhender les cristaux photoniques avec les outils et les concepts développés en physique du solide. Ces structures permettent la réalisation ou la perspective de réalisation de nombreux composants tels que la réalisation des cavités résonantes de taille très réduite, des guides d'ondes, des fibres optiques des filtres sélectifs...

Les réalisations de cavités obtenues en incluant des défauts ponctuels dans un cristal ne sont apparues qu'en 1998. La luminescence du matériau est utilisée particulièrement pour sonder la cavité. Les excellentes propriétés de réflexion du cristal photonique environnant permettent d'avoir des facteurs de qualités élevés pour les modes résonnants dans le plan [4].

L'objectif principal de ce travail est l'optimisation du confinement de la lumière dans ces cavités. Pour cela, on étudie des cavités de faible dimension et possédant un minimum de pertes, ceci dans le but d'augmenter ces facteurs de qualité tout en conservant le caractère modal de faible volume. Le design de ces cavités est basé sur un travail d'ingénierie de modes qui consiste à utiliser des défauts : en supprimant des trous, en les déplaçant, ou en changeant localement leur rayon. En faisant varier localement le rayon des trous (c'est-à-dire le facteur de remplissage) ou leur position. Cela permet de limiter les pertes et donc d'augmenter le facteur de qualité.

Ce travail s'organise selon trois chapitres

Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur les cristaux photoniques les cavités à cristaux photoniques bidimensionnels. Nous débuterons par un historique retraçant l'origine des cristaux photoniques, définitions sur les cristaux photoniques, l'analogie qui existe

entre l'électron et le photon, bande interdite photonique, les différentes structures, les différents types de réseaux et les applications des cristaux photoniques.

Nous terminerons par une présentation sur les cavités à cristaux photoniques, les différents types des défauts et les différents types de cavités et leur application.

Dans Le deuxième chapitre nous décrirons les logiciels de simulation utilisés dans le chapitre trois de ce travail pour modéliser les propriétés des cavités à cristaux photoniques bidimensionnels structuré en réseau triangulaire en particulier: Le BandSolve basé sur la méthode des ondes planes et Le logiciel FullWave qui est basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD).

Le troisième chapitre Nous avons étudié la cavité hexagonale  $H_1$  pour un défaut lacunaire et la cavité linéique  $L_3$ . Pour améliorer les facteurs de qualité de ces structures il consiste à agir sur la position des trous situés aux extrémités de la cavité. En effet, le déplacement de ces trous permet un changement plus graduel de la fonction enveloppe aux bords de la cavité et un meilleur confinement du mode.

Dans l'ensemble de ce travail, l'objectif reste toujours de considérer des cavités de faible volume et possédant un minimum de pertes (facteur de qualité optimum).

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale.

# **CHAPITRE I**

## **Généralité sur les cristaux photoniques et les cavités**

## **I-1- Introduction**

L'intérêt des chercheurs pour le thème des cristaux photoniques est important, surtout depuis la fin des années 90, car ces matériaux périodiques artificiels ont été promis à révolutionner le domaine des télécommunications [5]. En effet, depuis des années, la recherche scientifique pense pouvoir contrôler la propagation de la lumière grâce à ces matériaux afin de remplacer la communication classique à courant électrique. Ceci entraînerait un gain énorme en termes de rapidité de la communication [6].

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter les concepts de base et la théorie fondamentale des cristaux photoniques, les cavités à cristaux photoniques bidimensionnels qui nous intéressent dans notre travail. Nous débiterons par un historique retraçant l'origine des cristaux photoniques, définitions sur les cristaux photoniques, les différentes structures, les différents types de réseaux, la forme du motif élémentaire et les différents types de défauts.

Nous terminerons par une présentation sur les cavités à cristaux photoniques, les différents types des défauts et les différents types des cavités.

## **I-2- Généralités sur les cristaux photoniques**

### **I-2-1- Historique sur les cristaux photoniques**

C'est en 1987 qu'Eli Yablonovitch et Sajeev John, en cherchant à réduire l'émission spontanée de lumière dans les lasers et les semi-conducteurs, proposent un nouveau moyen de construire un miroir de Bragg, proposé par W. L. Bragg depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, à plusieurs dimensions. L'idée consiste à réaliser une structure périodique à trois dimensions par un assemblage régulier de sphères, de cylindres et/ou de poutres [2].

Une première réalisation fonctionnant aux longueurs d'onde centimétriques a été présentée par Yablonovitch en 1991. La structure proposée, la Yablonovite, Il s'agit d'un bloc de plexiglas usiné dans trois directions différentes séparées de  $120^0$  permettant de reproduire la structure cristalline du diamant. En réalité, le matériau BIP ainsi réalisé est une extension tridimensionnelle aux fréquences micro-ondes des miroirs de Bragg. Etant construit à partir d'un empilement périodique de couches diélectriques d'indices de réfraction différents dans une seule direction de l'espace, ces derniers ne permettent de contrôler la lumière que dans cette même direction. Au contraire, les matériaux BIP tridimensionnels peuvent réaliser une bande interdite

complète dans toutes les directions de propagation et pour toutes les polarisations possibles de l'onde [7].

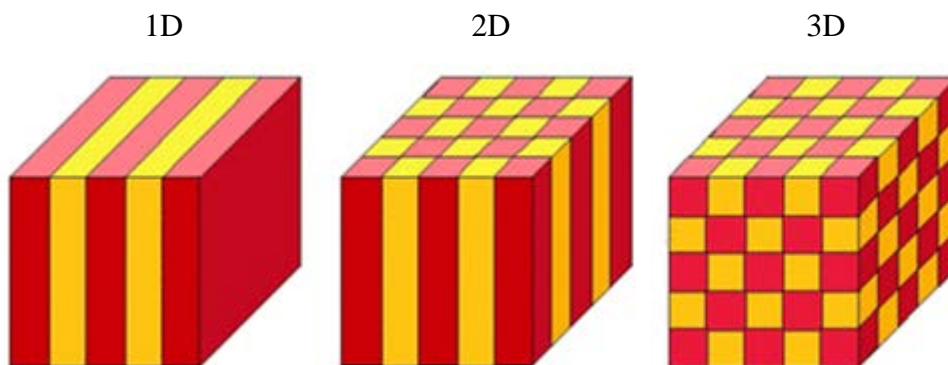
C'est en cela que Yablonovitch est considéré comme le "père" des cristaux photoniques [8].

### I-2-2- Les cristaux photoniques

Ce sont des structures diélectriques périodiques à l'échelle de la longueur d'onde des photons (quelques centaines de nanomètres). A l'instar des électrons, ou des phonons, dans un matériau cristallin, la relation de dispersion des photons dans un cristal photonique prend une allure particulière, que l'on représente sous la forme d'un diagramme de bandes. Des propriétés remarquables en découlent. La plus connue concerne la présence d'une bande d'énergie où la propagation des photons est prohibée : la bande interdite photonique (BIP) ou « gap » photonique. Une bande interdite efficace dans les trois dimensions nécessite un cristal tridimensionnel. Cependant, de tels cristaux sont technologiquement difficiles à fabriquer.

En revanche, les cristaux bidimensionnels, réalisés dans des membranes de diélectriques de haut indice sont des objets dont la fabrication est à présent bien maîtrisée.

En outre, ils présentent l'avantage d'être bien adaptés au développement de composants pour les circuits intégrés planaires. La propagation des photons est contrôlée horizontalement par le cristal et verticalement par réflexion totale interne dans la membrane. Classiquement, le cristal est constitué d'un réseau de trous d'air dans la membrane diélectrique. En insérant des défauts dans le cristal, en général des lacunes de trous, il est possible de créer des composants variés comme la cavité ou le guide [9].



**Figure I-1 : Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnel (2D) et tridimensionnel (3D) [9].**

### I-2-3- Analogie électron photon

Les équations gouvernant la propagation de la lumière dans un cristal photonique sont les quatre équations de Maxwell.

$$\nabla \cdot (\varepsilon(r)E(r,t)) = 0 \quad \text{I-1}$$

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

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

$$\nabla \times H(r,t) = \varepsilon_0 \varepsilon(r) \frac{\partial}{\partial t} E(r,t) \quad \text{I-4}$$

Après simplification des équations et en appliquant un ensemble d'opérations, on obtient

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

L'équation (I-5) est l'analogue formel de l'équation de Schrödinger décrivant le mouvement des électrons dans le potentiel périodique d'un cristal,  $H(r)$  étant l'analogue électromagnétique de la fonction d'onde électronique  $\psi(r)$  et  $\varepsilon(r)$  l'analogue du potentiel atomique  $V(r)$  [10].

### I-2-4- Les cristaux photoniques unidimensionnels

La formule la plus simple d'un cristal photonique que l'on peut étudier est le miroir de Bragg étudié en 1887 par Rayleigh. Ce cristal 1D très utile pour comprendre les principaux phénomènes physiques présents également dans les cristaux 2D et 3D comme l'ouverture de bandes interdites photoniques [11].

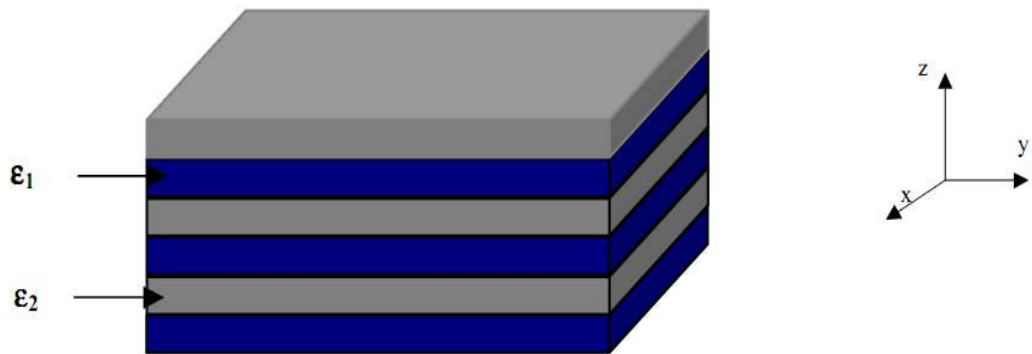


Figure I-2: BIP unidimensionnel, empilement de couches de permittivités différentes [6].

Elles sont généralement réalisées par un empilement de couches d'indice de réfraction différent et d'épaisseur optique  $\lambda/4$ ,  $\lambda$  étant la longueur d'onde guidée autour de laquelle le matériau doit interdire la propagation des ondes électromagnétiques sous incidence normale [12].

Les réseaux de Bragg ont prouvé leur utilité dans de nombreuses applications : convertisseurs de modes pour fibres optiques, filtres sélectifs de longueur d'onde, multiplexeurs, lasers spéciaux à bande étroite [13].

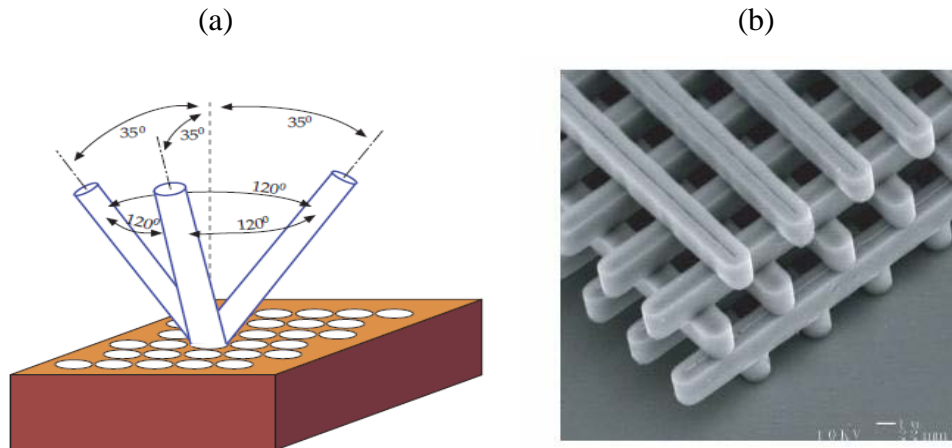
### **I-2-5- Les cristaux photoniques tridimensionnels**

Les cristaux photoniques tridimensionnels suscitent encore beaucoup d'intérêts. Le premier cristal photonique tridimensionnel a été fabriqué par K.M. Ho et al [14]. Il était formé de sphères de silicium arrangées selon une structure diamant. En 1993 E. Yablonovitch fabriquait un cristal photonique en perçant des trous dans un bloc de plexiglas selon trois directions qui simulent les directions cristallines  $\langle 110 \rangle$  d'un cristal diamant. Ce cristal photonique s'appelle d'après son inventeur "la Yablonovite" (Figure I -3(a)) [15]. Avec ce cristal photonique, le concept de la bande interdite photonique a été démontré expérimentalement pour la première fois. De nombreuses méthodes de fabrication des cristaux photoniques tridimensionnels ont été proposées. Les plus prospectées sont les suivantes:

#### **a- Structures tas de bois**

La structure périodique de ces cristaux photoniques tridimensionnels est bâtie en déposant par couches successives des rubans de silicium polycristallin dans des tranchées de silice. Cette fabrication, de très longue durée, se fait plan sur plan. Après avoir construit la structure, la silice est retirée pour obtenir un cristal photonique tridimensionnel Si/air dont le contraste d'indice est suffisant pour ouvrir une bande d'énergie interdite omnidirectionnelle (Figure I-3(b)).

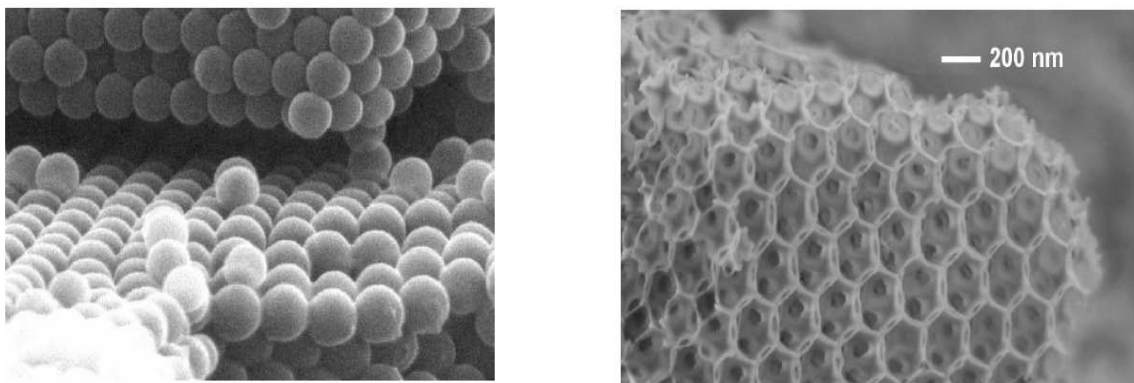




**Figure I-3 : (a) La Yablonyte: les trous de ce cristal ont été percés dans un bloc de plexiglas et forment un réseau FCC (b) Image MEB (Microscopie Electronique à Balayage) d'un cristal photonique du type tas de bois fabriquée par lithographie UV dans du silicium [14].**

### b- Opales

Des opales sont obtenues chimiquement par auto-organisation. La première opale a été obtenue par sédimentation de sphères de silice en solution: par sédimentation, ces sphères s'arrangent selon un réseau cubique à faces centrées (FCC). Le nombre important de défauts dans les premières opales a été fortement réduit grâce à des techniques de croissance auto-organisées proposées par Y.A. Vlasov (Figure I-4) [16]. La plupart de ces cristaux ne présentent pas de bandes d'énergie interdites, à cause du faible contraste d'indice. Cependant, ces structures servent d'empreinte pour la réalisation d'opales inversées à partir de l'infiltration d'un matériau de haut indice dans les interstices qui séparent les sphères. Ces dernières sont ensuite dissoutes chimiquement pour aboutir à la structure finale de sphères d'air dans une matrice de haut indice.



**Figure I-4 : (a) Les opales directes ; (b) Les opales inverses [17].**

### I-2-6- Cristaux photoniques bidimensionnels

Les difficultés de fabrication des structures 3D ont conduit à envisager la réalisation et l'étude de structures 2D. Un cristal photonique 2D parfait est périodique dans le plan (Oxy) et infiniment long dans la direction (Oz). Il possède une bande interdite dans le plan (Oxy) [18].

Nous distinguons deux types de structures CP 2D :

- la première appelée structure déconnectée formée d'un réseau de piliers de diélectriques dans l'air (figure I-5) tandis que l'autre structure est appelée connectée, composée de trous d'air percés dans une matrice diélectrique (figure I-6).

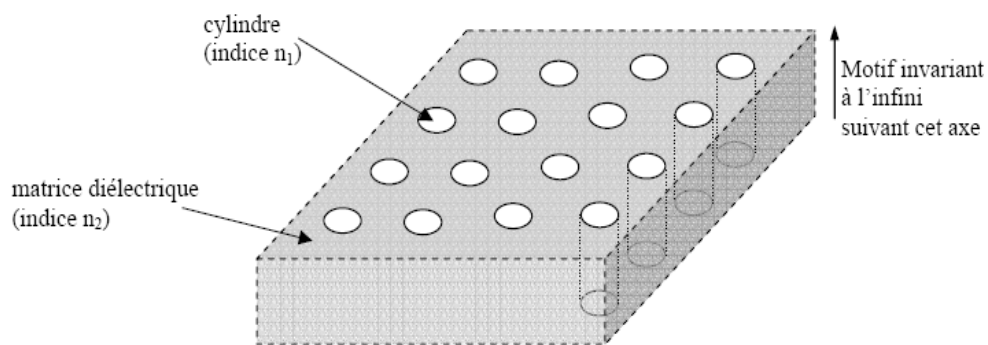


Figure I-5 : Structure périodique 2D connectée [19].

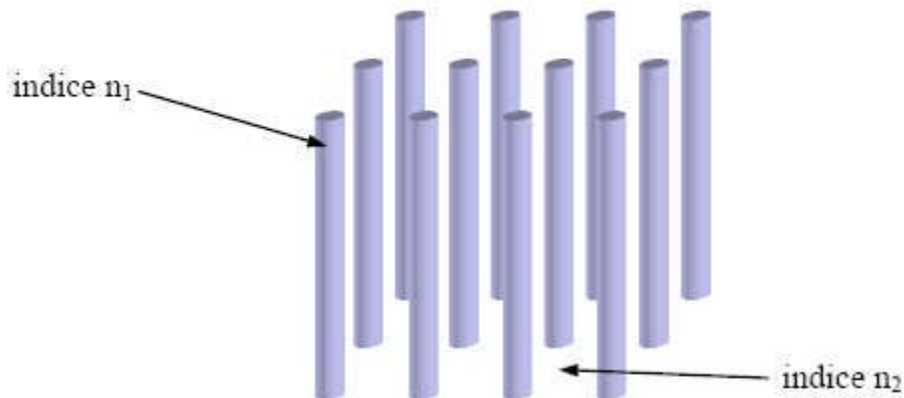


Figure I-6 : Structure périodique 2D déconnectée [19].

Dans le cas de réseaux bidimensionnels, il faut considérer deux directions de propagation au lieu d'une seule pour les unidimensionnels. En effet, selon que l'on considère la polarisation Transverse Electrique (TE) lorsque le champ magnétique est parallèle à l'axe des trous (des tiges), ou Transverse Magnétique (TM) lorsque le champ électrique est parallèle à l'axe des trous (des tiges), les bandes énergétiques permises ou interdites seront différentes. Il existe donc une bande interdite TE et une bande interdite TM [20].

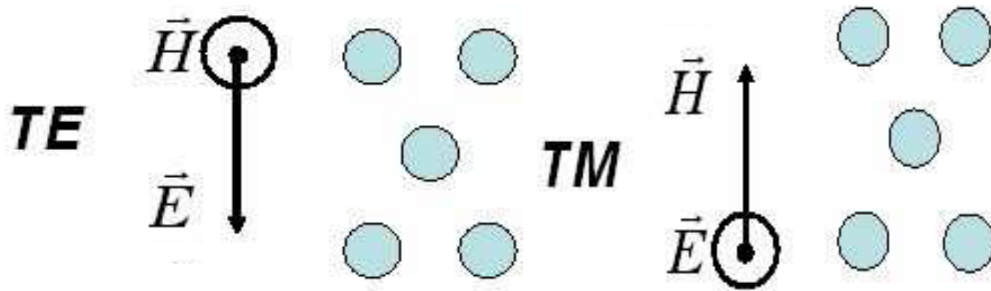


Figure I-7: Décomposition du champ électromagnétique suivant ses deux polarisations TE et TM[19].

### I-2-7- Propriétés des cristaux photoniques bidimensionnels

Les matériaux à Bande Interdite Photonique unidimensionnelle (BIP 1D) ou encore réseau de Bragg, ne contrôlent les radiations lumineuses que dans une certaine ouverture angulaire autour de la normale. Pour permettre le contrôle de la propagation des ondes électromagnétiques avec des angles d'incidences variables, on utilise des matériaux à BIP 2D (Figure I-8) [20], voire à BIP 3D. Notre choix s'oriente vers des BIP bidimensionnelles qui ne sont pas aussi performantes que leurs analogues tridimensionnels.

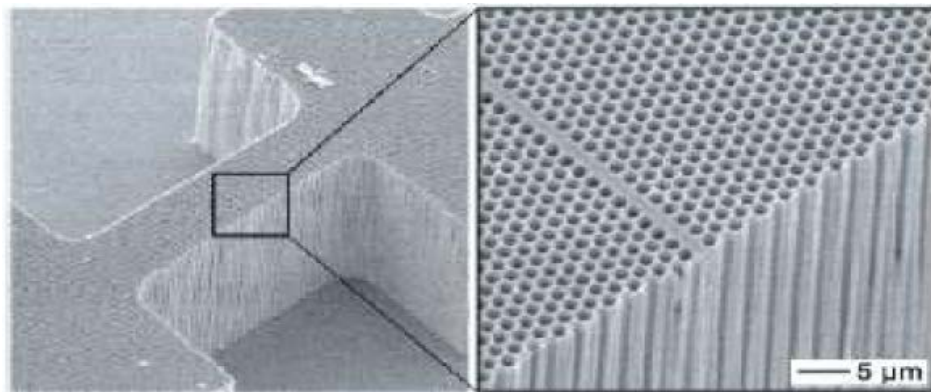


Figure I-8: Cristal photonique bidimensionnel dans du silicium macroporeux avec un défaut Unidimensionnel [20].

### I-2-8- Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels

Il existe plusieurs façons de réaliser des structures bidimensionnelles selon la répartition des trous qui les forment, divisée en trois familles, celle en réseau carré, triangulaire et hexagonale

#### a- Le réseau carré

La maille primitive est un carré de côté  $a$ . Ce réseau est très sensible à l'angle d'incidence des ondes électromagnétiques [21].

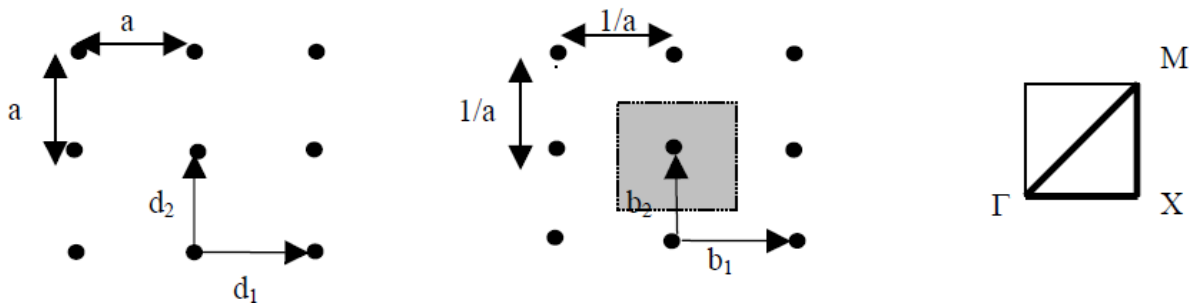


Figure I-9 : Représentation (a) d'un réseau carré (b) de son réseau réciproque et (c) de sa zone de Brillouin [21].

#### b- Le réseau triangulaire

Chaque nœud du réseau est espacé de son proche voisin d'une même distance " $a$ " (figure I-10).

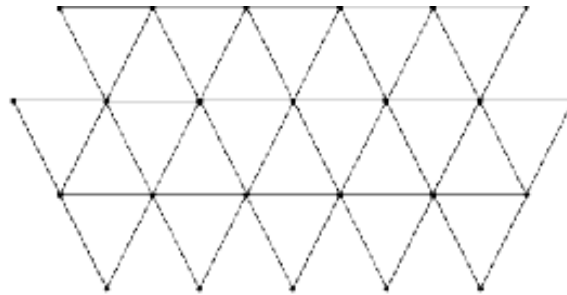


Figure I-10 : Réseau triangulaire[19].

#### c- Le réseau hexagonal

- **La 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 I-11) [19].

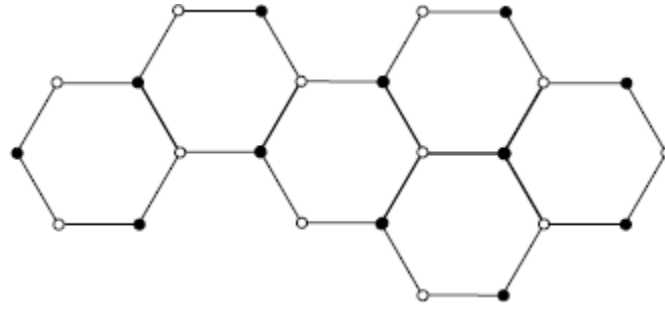


Figure I-11: Structure Nitrure de Bore [19].

- **La structure graphite:** Dans cette structure tous les nœuds sont identiques et espacés de “a”, elle est similaire à la structure cristalline du graphite (figure I.12) [19].

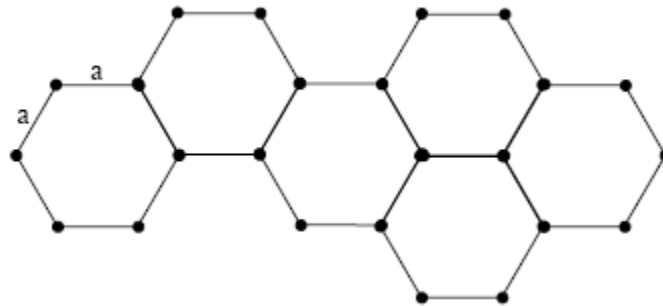


Figure I-12 : Structure graphite [19].

### I-2-9- Caractéristiques géométriques et physiques d'un cristal photonique

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 [12]. Les quantités représentatives de ces différentes caractéristiques sont :

#### a- Le contraste d'indice $\delta$

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

$$\delta = \frac{n_h}{n_l}$$

I-6

Avec :

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

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

### b- Les périodes

Ces paramètres géométriques, choisis selon le domaine de fréquence étudié, influent sur les caractéristiques de la bande interdite photonique. La période  $a$  est :  $a = (a_1 + a_2)$  avec  $a_1$  l'épaisseur de la couche de permittivité  $\varepsilon_1$  et  $a_2$  l'épaisseur de la couche de permittivité  $\varepsilon_2$

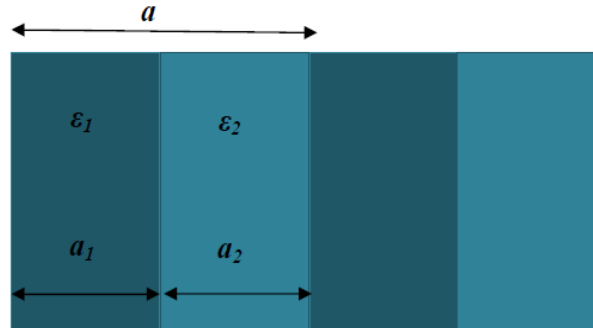


Figure I-13 : Période d'un cristal photonique unidimensionnel [12].

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

Le facteur de remplissage  $f$  peut être comparé au largeur du potentiel périodique de la physique du solide. S'il est pris pour le matériau de haut indice par exemple, il est défini comme le rapport entre le volume occupé par ce matériau dans la cellule élémentaire du cristal et le volume de cellule de cette dernière.

$$f = \frac{v_i}{\Lambda}$$

I-7

Avec :

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

$\Lambda$ : Volume de la cellule.

### I-2-10- Ouverture d'une bande interdite omnidirectionnelle

La périodicité de l'indice diélectrique doit être étendue à deux ou trois dimensions pour obtenir une bande d'énergie interdite dans toutes les directions du plan ou de l'espace.

Considérons l'exemple du cristal photonique 2D représenté dans la figure I-14 (a). Quelle que soit la direction de propagation dans le plan d'une onde lumineuse, celle-ci voit une structure diélectrique périodique. À chaque direction d'incidence  $i$   $k$  est donc associée une bande interdite unidimensionnelle. La plage spectrale commune à toutes ces directions, quand elle existe, constitue une bande interdite omnidirectionnelle dans le plan (Figure I-14 (b)). Pour obtenir une bande interdite dans tout l'espace, un cristal photonique 3D est nécessaire.

Pour ouvrir une bande interdite dans le plan ou l'espace, toutes les bandes interdites unidirectionnelles doivent se recouvrir au moins partiellement sur la première zone de Brillouin. Le recouvrement sera maximal si les bandes interdites sont centrées à des énergies proches. La

situation la plus favorable est celle où la zone de Brillouin est la plus isotrope possible. Les réseaux qui s'en rapprochent le plus sont le réseau triangulaire à deux dimensions et le réseau cubique à faces centrées à trois dimensions.

Pour obtenir des bandes d'énergies interdites larges, le contraste d'indice doit être suffisamment grand. Pour un réseau triangulaire, un contraste d'indice supérieur à 2.6 est nécessaire à l'ouverture d'une bande interdite dans tout le plan [20]. Aux longueurs d'onde du proche infrarouge utilisées en optique intégrée, les semi-conducteurs possèdent à la fois un fort indice de réfraction (entre 2.5 et 4) et une faible absorption. Combinés à l'air, ils constituent donc un choix idéal pour la réalisation de cristaux photoniques à ces longueurs d'onde.

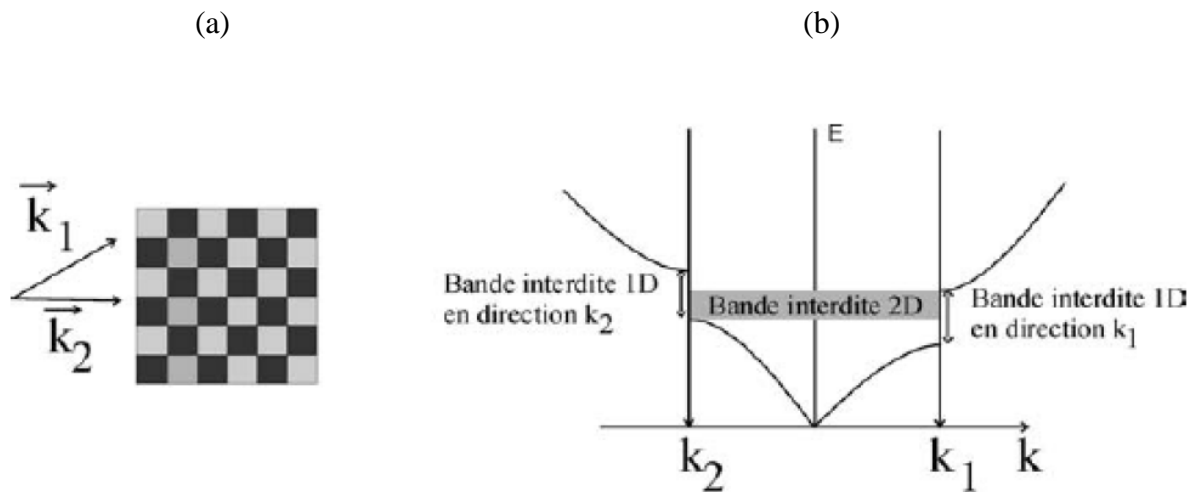


Figure I-14: (a) Cristal photonique 2D ; (b) Une bande interdite omnidirectionnelle est obtenue dans le plan lorsque toutes les bandes interdites unidirectionnelles se recouvrent [20].

## I-2-11- Application des cristaux photoniques

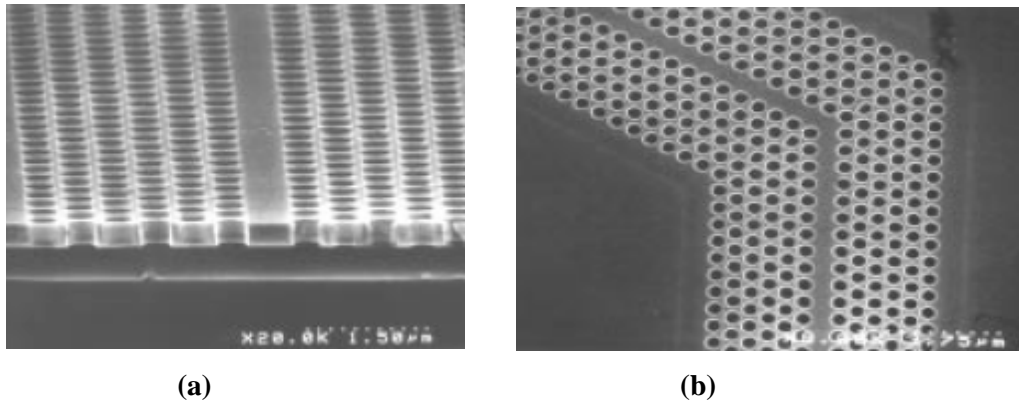
### a- Guides d'ondes

Les guides d'onde sont réalisés en créant un multi défaut (défaut linéaire) qui consiste à enlever une rangée ou plus dans le cristal photonique.

Le processus de guidage dans les guides à cristal photonique est différent de celui des guides classiques à réfraction (guidage par indice) puisqu'ils reposent majoritairement sur l'existence d'une bande interdite omnidirectionnelle dans le plan (guidage par bande).

Les guides coudés (courbés) permettent théoriquement de réaliser des virages avec des rayons de courbure de l'ordre de longueur d'onde sans pertes, mais expérimentalement des problèmes de réflexion et de pertes subsistent à cause du couplage dans le virage vers les modes de fuite dans le cône de lumière [21].





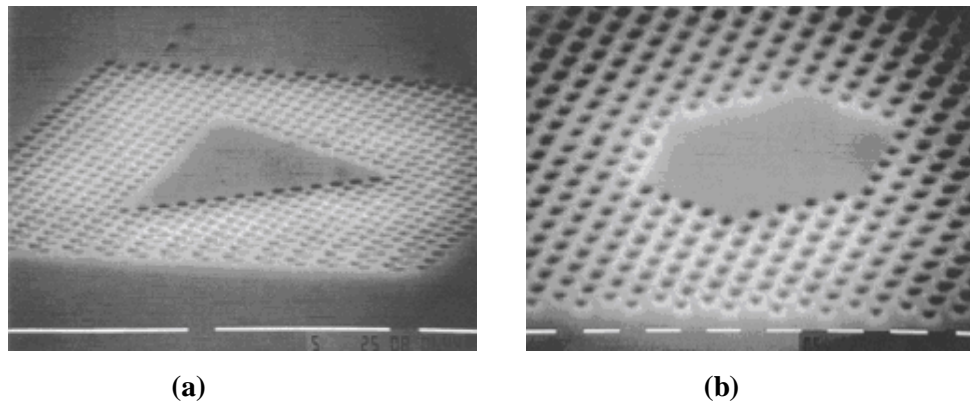
**Figure I-15 : guides d'onde à cristaux photoniques [22]: (a) droit, (b) coudé.**

### **b- Cavités et lasers**

Les premières cavités avec des cristaux photoniques bidimensionnels sont réalisées en 1996, ces cavités sont élaborées en incluant des mono défauts sur le réseau cristallin photonique.

Il est montré que ce dispositifs présentent un facteur de qualité élevé pour les modes résonants grâce à l'excellente propriété de réflexion du cristal, tout cela sur des cavités à grande dimension possédants plusieurs modes.

Les cavités sur membrane suspendue (entourée d'air semblent donner les meilleurs résultats) avec des dimensions très petites, sont illustrées dans la figure I-16, une cavité triangulaire et une autre hexagonale plongées dans un cristal photonique triangulaire [23].



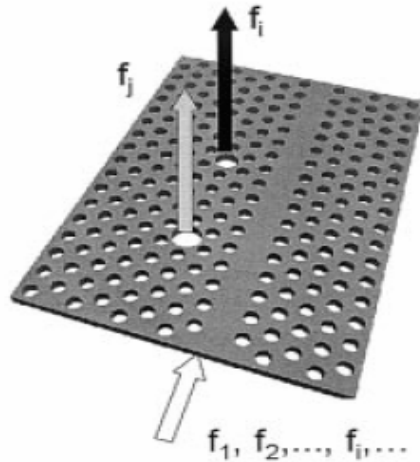
**Figure I-16 : cavités sur membrane suspendue : (a) cavité triangulaire, (b) cavité hexagonale, entourées par un cristal photonique triangulaire [23].**



### c- Filtres et multiplexeurs

L'idée est de créer un défaut linéaire et un autre ponctuel sur le même cristal photonique qui va permettre d'insérer ou d'extraire des longueurs d'onde bien précises dans un flux de données.

La figure I-17, représente une cavité résonante couplée par recouvrement des ondes évanescentes à des guides d'onde, cette structure appelée un filtre 'Add-Drop' [24].



**Figure I-17 : la structure et le principe de fonctionnement d'un filtre Add- Drop ; une rangée a été éliminée pour guider les ondes avec des fréquences  $f_1, f_2, \dots, f_i, \dots$ . Et les défauts ponctuels pour extraire les fréquences désirées  $f_i, f_j$  [24].**

### d- Fibres optiques

Les fibres optiques à cristal photonique sont apparues en 1996, elles sont constituées d'un cœur de silices pur entouré d'un arrangement régulier d'air de dimension microscopique disposée parallèlement à l'axe.



**Figure I-18: fibre optique à cristal photonique.**

### **e- Réflecteurs et antennes**

En exploitant les propriétés de réflexions des cristaux photonique dans la BIP, nombreuses études ont été menées et montrent l'utilisation de matériau BIP comme substrat d'antenne ou comme réflecteur dans le but d'augmenter la directivité des antennes.

Sur le travail publié en 1999 [25], Il a été montré que ce réflecteur a permis d'éliminer les lobes secondaires apparais dans le cas d'une antenne sans réflecteur a cristal photonique.

## **I-3- Cavité à cristaux photoniques**

### **I-3-1- Définition**

Une cavité optique se définit comme un résonateur électromagnétique où la lumière est confinée spatialement et spectralement. Ces résonateurs fonctionnent comme des « pièges à photons ». En effet, lorsque la cavité résonne, la lumière effectue un grand nombre d'allers retours et se retrouve ainsi temporairement bloquée. De nombreux types de cavités électromagnétiques ont ainsi été imaginés et utilisés dans diverses applications, allant du laser au four micro-onde [26].

Dans ce cas, l'objectif visé est le confinement de la lumière dans une cavité. Le défaut (en général un ou plusieurs trous non gravés) est un défaut ponctuel entièrement entouré par un cristal photonique. Pour des fréquences comprises dans la bande interdite, un cristal photonique se comportant comme un miroir quasi-parfait, il apparaît que ce type de structure devrait permettre la réalisation de cavités possédant un grand facteur de qualité (c'est-à-dire un temps de séjour des photons dans la cavité long).

Un cliché de microscopie électronique d'une microcavité réalisée dans un cristal photonique 2D est présenté sur la figure I-17. Un seul trou a été omis au centre du cristal photonique. Cette absence de trou forme une cavité où le confinement est réalisé par le cristal photonique dans le plan de la membrane et par guidage réfractif dans la direction perpendiculaire à la membrane. On parle alors de cavité " $H_1$ " (H car la cavité est hexagonale, et 1 parce qu'un seul trou est manquant) [10].

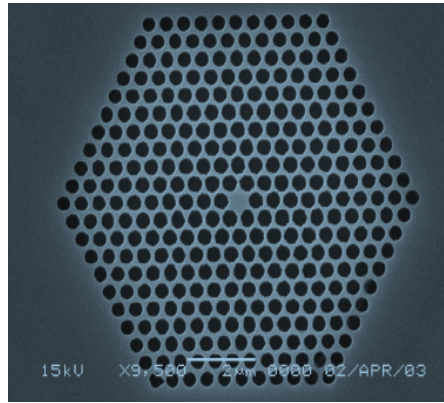


Figure I-19 : Exemple de cavité  $H_1$  [26].

### I-3-2- La création de défauts dans les CP2D

La création des défauts dans le cas des cristaux 2D s'effectue par plusieurs manières: soit, par une modification locale d'indice ou un changement de taille d'un motif du cristal (défauts de substitution), soit par le déplacement d'un de ces motifs (défaut interstitiels) ou encore par le retrait d'un motif, ce qui crée une lacune dans le cristal (défaut lacunaire). Cela correspond à une microcavité à l'intérieur du cristal photonique. La présence d'un défaut ponctuel peut conduire à l'existence de niveaux discrets d'énergie dans une ou plusieurs bandes interdites à la fois. Par conséquent, des modes électromagnétiques sont introduits par le défaut. C'est un mode dont la fréquence peut se situer dans la bande interdite et qui est localisé autour du site du défaut (ils sont appelés modes de défaut).

### I-3-3- Les différents types des défauts

Les défauts dans les cristaux photoniques peuvent localiser des modes. Dans des cristaux 1D, on peut confiner la lumière dans un plan défaut. Dans des cristaux 2D on peut localiser la lumière dans un défaut linéaire. Finalement en 3D, on peut confiner la lumière à un défaut localisé, donc en un point du réseau.

Dans le cas d'un réseau de trous, le défaut peut consister en l'absence d'un ou plusieurs trous. Il existe principalement deux types de défauts, les défauts ponctuels (cavités) et les défauts linéaires (guide d'ondes). Il reste néanmoins possible de jouer sur plusieurs paramètres pour obtenir une grande variété de défauts (variation de la taille des trous et de leurs formes par exemple) [6].

### a- Les défauts ponctuels

Il existe de multiples manières de créer des défauts ponctuels dans les cristaux photoniques. On peut aussi procéder au retrait, à l'ajout ou à la modification d'un ou plusieurs motifs du cristal.

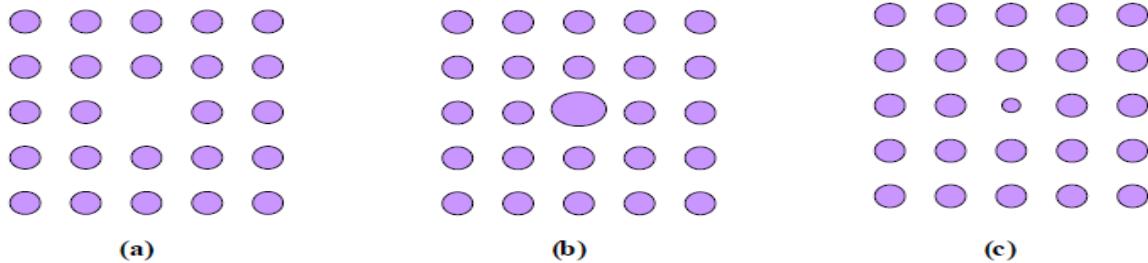


Figure I- 20 :( a) Défaut lacunaire ; (b) et (c) Défauts de substitutions [6].

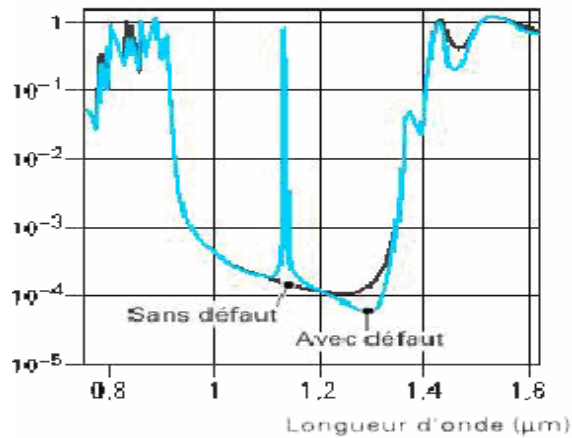


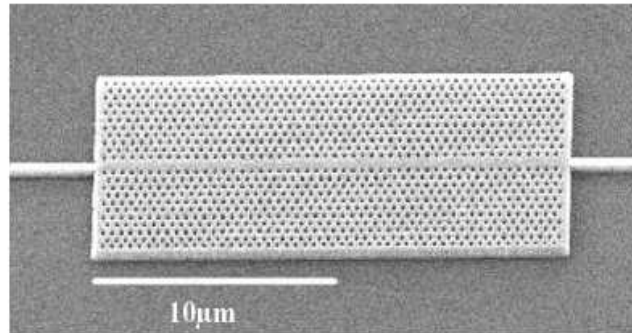
Figure I-21 : Spectre de transmission d'un cristal hexagonal de tiges diélectriques avec ou sans défaut lacunaire [6].

### b- les défauts étendus

Les défauts étendus, de dimension 1, 2 ou 3, ne peuvent évidemment être obtenus que dans les cristaux de dimension au moins équivalente. Parmi ces défauts, les défauts 1D (W1) (Figure I-22), sont certainement ceux qui ont suscité le plus grand nombre d'études car ils ont vocation à être utilisés comme guides de lumière au sein d'un cristal donné. On peut d'ailleurs imaginer des défauts 2D (W2) ou 3D (W3) constitués d'une suite de guides W1, mis bout à bout et orientés dans les directions différentes, de façon à véhiculer la lumière sur tous les chemins possibles à l'intérieur du cristal.

L'exemple de base est celui du guide d'onde linéaire W1 dans un cristal photonique 2D. Une façon de réaliser un tel guide consiste à placer des défauts ponctuels, couplés et régulièrement espacés, dans une direction du cristal 2D. Le couplage entre une infinité de résonateurs conduit à

une bande de propagation permise dans la direction de l'alignement. Ce type de guide à résonateurs couplés a été proposé en 1999.



**Figure I-22: Exemple de guide W1 à cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant [10].**

### c- Les défauts couplés

Les défauts couplés sont des défauts assez proches dans le cristal pour échanger de l'énergie. Le couplage entre ces défauts permet une apparition des pics de transmission dans la bande interdite. L'amplitude et le nombre de pics de transmission sont liés à la position des cavités par rapport à la direction de propagation de l'onde et leur répartition à l'intérieur de la structure [27].

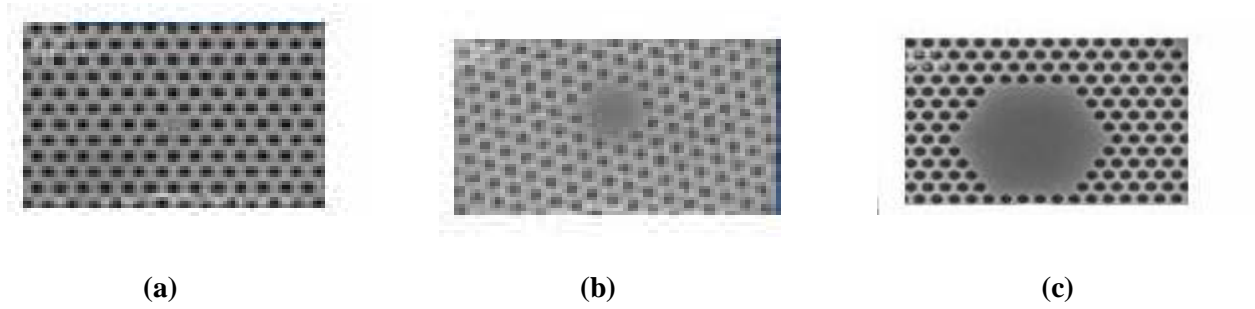
L'emploi de ce type de défauts dans le domaine micro-onde permet aussi d'améliorer le rendement de la réfraction anormale et l'apparition de nouvelles propriétés.

### I-3-4- Les différents types des cavités

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

#### a- cavité hexagonale

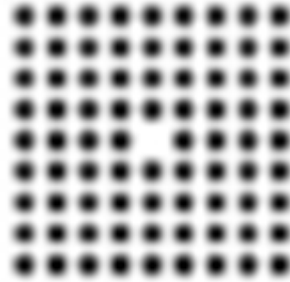
Dans un cristal triangulaire, les cavités hexagonales, dont les côtés sont les rangées denses, constituent une série de cavités canoniques. Il est commode de les nommer par le nombre de périodes le long de chaque côté. Ainsi, un seul trou manquant correspondra à  $H_1$ , sept trous manquants à  $H_2$ , etc. (figure I-23). Les cavités de type  $H_n$ , de forme hexagonale,  $n$  étant le nombre de rangées manquantes par côté de l'hexagone sont les plus étudiées [28].



**Figure I-23 : Les différents types de cavités hexagonales, (a) cavité  $H_1$ , (b) cavité ( $H_2$ ) et (c) cavité  $H_5$ .**

### **b-cavité carrée**

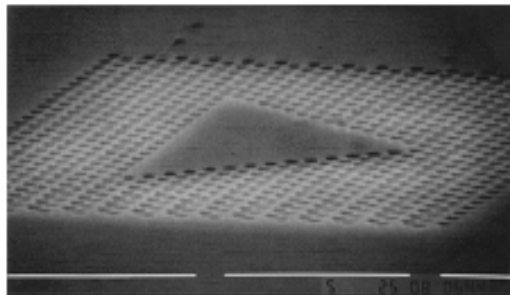
Dans un réseau bidimensionnel carré, les cavités sont de type  $S_n$ , de forme carrée,  $n$  étant le nombre de lignes et de rangées manquantes du carré. Par exemple la cavité  $S_1$  est constituée en omettant une ligne et une rangée.



**Figure I-24 : Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique carré avec un paramètre de maille 600nm.**

### **b- cavité triangulaire**

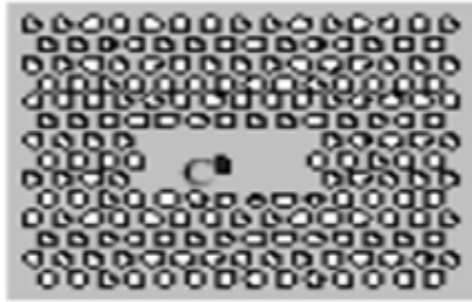
La figure I-25 représente la cavité triangulaire, cette cavité est obtenue en omettant plusieurs trous dans un réseau triangulaire de trous d'air de section circulaire ( $r = 200\text{nm}$ ) plongé dans une matrice diélectrique ( $\epsilon=8.12$ ).



**Figure I-25: Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm.**

### c- Cavité rectangulaire

Le réseau CP2D triangulaire est défini par les paramètres suivant : paramètre de maille  $a=560\text{nm}$ , La figure I-26 représente une cavité rectangulaire correspondant à l'omission de 3 rangées finies de trous dans le CP.



**Figure I-26: Exemple de cavité rectangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 560nm [11].**

#### I-3-5- Influence des paramètres géométriques sur les microcavités

Une solution pour réaliser simplement des microcavités à CP 2D consiste à exploiter les propriétés de bande interdite photonique (BIP). L'omission de trous au sein d'un réseau CP 2D ménage une région spatiale cernée de rangées de trous se comportant comme des miroirs pour la gamme spectrale d'intérêt. Des effets de résonances induisent l'apparition de modes dans la microcavité ainsi créée [4]. Plusieurs paramètres permettent de contrôler les propriétés d'une microcavité :

- La période et le facteur de remplissage du CP 2D, responsables de la position spectrale des modes et de la BIP.
- La géométrie de la cavité, essentiellement sa forme et sa taille.
- L'infiltration des liquides (polymère ou eau) dans les trous des cristaux photoniques modifie les propriétés optiques de ces derniers.

## **I-4- Conclusion**

Les cristaux photoniques sont des structures périodiques de matériaux diélectriques représentent l'une des principales voies vers la nano photonique intégrée. En particulier, les cristaux photoniques bidimensionnels en semi-conducteur ont donné naissance à des réalisations impressionnantes, telles que les micros guides, les microcavités et les micros lasers avec des performances à l'état de l'art.

Étudier une micro cavité à cristaux photoniques est l'objectif de ce travail. Pour cela nous avons étudié les différents types de cette dernière.



## **CHAPITRE II**

### **Outils de simulation**

## II-1- Introduction

Les matériaux à gaps photoniques semblent très prometteurs puisqu'ils permettent une amélioration des performances de nombreux systèmes existants (antennes, filtres, coupleurs), toutefois il ne faut pas oublier que les pertes dans ces structures sont non négligeables et peuvent présenter de nombreux inconvénients.

La complexité de la fabrication et de la caractérisation de structures à cristaux photoniques aux fréquences optiques rendent coûteuses en temps et argent les études expérimentales systématiques sur des dispositifs des cristaux photoniques. Le développement des méthodes de modélisation optiques précises et rapides reste donc primordial pour l'étude de ces structures.

Plusieurs méthodes ont été envisagées, comme la méthode des ondes planes « PWM », la matrice de transfert « MMT » et la méthode FDTD qui est la plus utilisée pour la modélisation des cristaux photoniques. De plus certains simulateurs ont été conçus pour faciliter cette tâche. Parmi ces simulateurs on peut citer deux moteurs de simulations le FULL WAVE et le BandSolve de Rsoft CAD.

## II-2- Méthodes de modélisation

La modélisation électromagnétique des propriétés des cristaux photoniques nécessite en général un fort investissement en programmation et en analyse numérique. Parmi les modèles théoriques traitant des cristaux photoniques, on peut d'abord distinguer deux catégories: les cristaux de taille finie et infinie. On peut ensuite considérer la dimensionnalité des cristaux étudiés (1D, 2D ou 3D). Les principales techniques de calcul utilisées pour les cristaux finis sont les méthodes des matrices de transfert, les théories de la diffraction par les réseaux et les différences finies dans le domaine temporel (Finite Difference Time Domain, FDTD) [29].

Le calcul de structures infinies est généralement basé sur une méthode de décomposition du champ en ondes planes (Plane Wave Expansion, PWE) .Dans le cadre de ce mémoire, nous présenterons les méthodes PWE et FDTD.

### II-2-1-La méthode des ondes planes (PWE)

La technique de décomposition en ondes planes consiste à résoudre, dans l'espace fréquentiel, l'équation d'onde en développant le champ électromagnétique sur une base d'ondes planes. Cette méthode est très efficace pour calculer les diagrammes de bandes de cristaux infinis parfaitement périodiques. Elle permet de déterminer la fréquence, la polarisation, et la distribution du champ pour les modes d'une structure photonique.

En pratique, la structure est définie par une cellule et par un réseau périodique selon lequel cette cellule est reproduite pour couvrir entièrement l'espace. La cellule peut être uniquement le motif du cristal photonique pour un cristal sans défaut, mais peut aussi être de dimension plus grande (on parle alors de super cellule) dans le cas de structures non périodiques comme les guides d'onde ou les cavités.

### II-2-2- La méthode FDTD

La méthode FDTD (pour finite-difference time-domain) est une méthode générale de l'électromagnétisme utilisée pour résoudre les équations de Maxwell sur une structure de profil d'indice quelconque. Son originalité réside dans la résolution directe du système d'équation dans le domaine temporel et non dans le domaine fréquentiel, ce qui permet de visualiser la propagation d'une onde électromagnétique au sein des cristaux photoniques. Elle a été proposée initialement par Yee en 1966[30]. Cette technique consiste à la discrétisation des équations de Maxwell dans l'espace et dans le temps avec des pas égaux  $\Delta=\Delta x=\Delta z$ . L'espace temporel est aussi discrétisé avec un pas noté  $\Delta t$ . Dans le cas où le matériau est isotrope, non dispersif, sans sources et transparent (constante diélectrique purement réelle), les équations de Maxwell s'écrivent comme suit dans un repère cartésien (x,y,z).

$$\frac{\partial H_Z}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_X}{\partial y} - \frac{\partial E_Y}{\partial x} \right) \quad \text{II-1}$$

$$\frac{\partial H_X}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_Y}{\partial z} - \frac{\partial E_Z}{\partial y} \right) \quad \text{II-2}$$

$$\frac{\partial H_Y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_Z}{\partial x} - \frac{\partial E_X}{\partial z} \right) \quad \text{II-3}$$

$$\frac{\partial E_X}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_Z}{\partial y} - \frac{\partial H_Y}{\partial z} \right) \quad \text{II-4}$$

$$\frac{\partial E_Y}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_X}{\partial z} - \frac{\partial H_Z}{\partial x} \right) \quad \text{II-5}$$

$$\frac{\partial E_Z}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_Y}{\partial x} - \frac{\partial H_X}{\partial y} \right) \quad \text{II-6}$$

Dans le cas d'un modèle du cristal bidimensionnel dans un plan (xz) on peut distinguer deux systèmes indépendants. La première appelée TE (transverse électrique) fait intervenir les composantes (H<sub>x</sub>, H<sub>z</sub>, E<sub>y</sub>) et la seconde appelée TM (pour transverse magnétique) fait intervenir les composantes (E<sub>x</sub>, E<sub>z</sub>, H<sub>y</sub>).

Les équations de Maxwell temporelles deviennent des équations reliant le champ d'une cellule à celui des cellules voisines entre deux instants  $t$  et  $t+\delta t$ . La période de l'échantillonnage temporel  $\delta t$  utilisé pour résoudre le problème est très inférieure aux périodes optiques. Contrairement à la méthode des ondes planes, cette méthode ne recherche pas de solution harmonique, mais propage le champ dans un espace et une durée définis. Les équations sont résolues à partir des conditions initiales et des conditions aux limites de la grille de discrétisation. Généralement, une source de champ EM est placée dans l'espace puis éteinte, le champ évolue alors dans la structure d'après les équations de Maxwell discrétisées. Les valeurs du champ EM peuvent être enregistrées à différents temps de son évolution. Le comportement spectral d'une structure s'obtient alors par transformée de Fourier de son comportement temporel.

Cette méthode permet d'obtenir des diagrammes de bandes, mais elle est plus utilisée pour simuler la propagation de la lumière dans les structures finies à base de cristaux photoniques. Elle permet notamment d'obtenir les coefficients de réflexion et de transmission de structures à géométrie complexe, ce qui ne s'obtient pas aisément avec d'autres méthodes. Cette méthode est toutefois très coûteuse en temps de calcul et en espace de mémoire car la précision dépend directement du maillage spatio-temporel de la structure. Cette limitation nécessite souvent de simuler les structures étudiées sur des portions restreintes et des durées courtes.

Le principal inconvénient de la FDTD, qui tend cependant à s'estomper avec les évolutions des capacités informatiques, est qu'elle est très lente et demande des ressources informatiques importantes.

Au cours de ce mémoire, le logiciel de simulation utilisé est appelé FullWave de Rsoft CAD. Ce simulateur est basé sur la méthode FDTD.

## II-3- Présentation du logiciel Rsoft CAD

### II-3-1 Environnement de CAD

Le Rsoft CAD est un programme de base de Rsoft photonique, il permet aux chercheurs et ingénieurs de créer des systèmes pour la conception des différents dispositifs tels que : les guides d'onde, des cavités résonantes, des circuits optiques et d'autres dispositifs photoniques. Il agit en tant que programme de gestion pour les modules passifs de simulation du dispositif de Rsoft : BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD et DiffractMOD.

### II-3-2- Le simulateur « BandSOLVE »

Le logiciel que nous avons exploité pour modéliser les structures par la méthode des ondes planes s'appelle «BandSOLVE» développé par Rsoft.

BandSOLVE est un logiciel de simulation des structures de bande photoniques. Il est basé sur la méthode des ondes planes optimisée pour les structures périodiques, idéal pour produire des diagrammes de bande des structures à bandes interdites photoniques classiques tels que 2D et 3D et les guides à cristaux photoniques en utilisant une méthode supercellule type onde plane. A deux dimensions, il est nécessaire de considérer deux directions de propagation différentes : TE (avec le champ E perpendiculaire à l'axe des trous) et TM (où E est parallèle à l'axe des trous). Ces deux polarisations sont découplées et donnent lieu à deux diagrammes de bandes indépendants. Il n'existe pas forcément une bande interdite dans les deux cas. En outre, il peut être appliqué à des structures comme les fibres à cristaux photoniques, qui sont complexes pour les autres techniques de simulation. BandSOLVE est particulièrement utile pour optimiser les propriétés des structures à cristaux photoniques, qui sont simulés par la méthode FDTD implémentée dans le logiciel FullWave, pour examiner les propriétés dépendant du temps comme les pertes, et pour calculer les distributions de champ dans des structures de dimensions finies.

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

### II-3-3- Présentation de Full wave

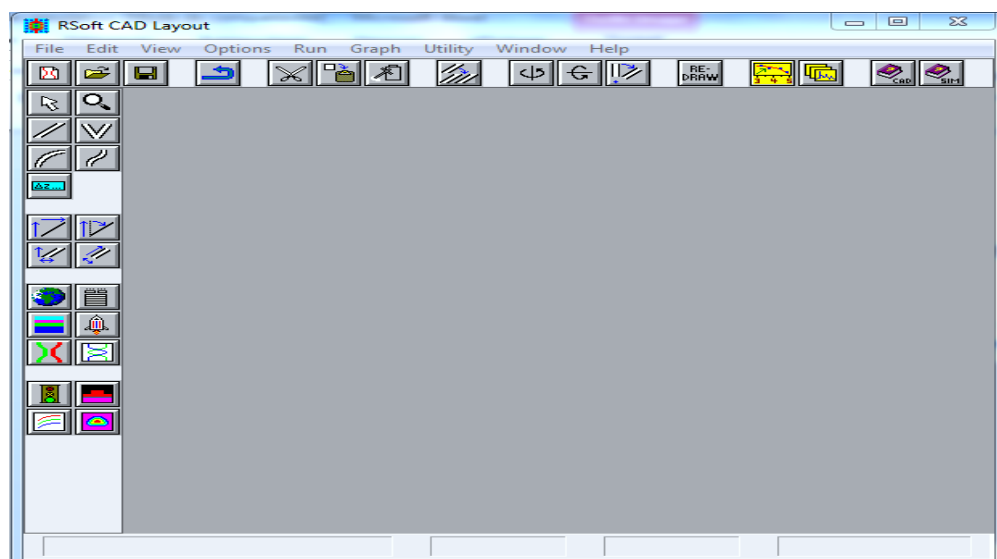
Le Full WAVE est un moteur de simulation complètement intégré qui calcule le champ électromagnétique en fonction du temps et l'espace dans une structure d'indice de réfraction donnée en réponse à une excitation électromagnétique donnée.

Full WAVE est conçu pour fonctionner avec les autres modules de simulation de RSoft tels que : BeamPROP, BandSOLVE, et Grating MOD puisqu'il partage le même outil de CAD avec ces module.

La simulation est basée sur la technique bien connue de différence finie dans le domaine du temps (FDTD). Cette méthode permet de calculer à chaque instant discret de l'espace, les composantes du champ électromagnétique dans chaque cellule (maille) parallélépipédique du volume tridimensionnel, à l'intérieur desquelles sont calculées les six composantes orthogonales des champs électromagnétiques ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$  et  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ). Les équations de maxwell sont remplacées par un système d'équations qui relie le champ électromagnétique de chaque cellule aux champs des cellules voisines. Ces équations sont résolues en fonction des conditions initiales et des conditions aux limites [31].

### II-4- Les étapes de simulation d'un CP2D

La fenêtre principale de CAD apparaît sur la figure (II.1). Cette fenêtre présente la barre de menu et la barre d'outils supérieure avec des icônes. Ces menus et icônes de CAD tiennent compte des fonctionnements d'édition standard aussi bien que d'autres fonctions communes



FigureII-1 : Fenêtre principale du programme CAD.

### II-4-1- Créer un nouveau circuit

Il y a plusieurs manières de créer une structure de réseau dans l'interface de CAD. La manière la plus facile est d'employer un des multiples utilités de disposition qui sont incluse avec *Full WAVE* afin d'expédier la création de ce réseau. Pour créer ce réseau en utilisant Array Layout XZ.

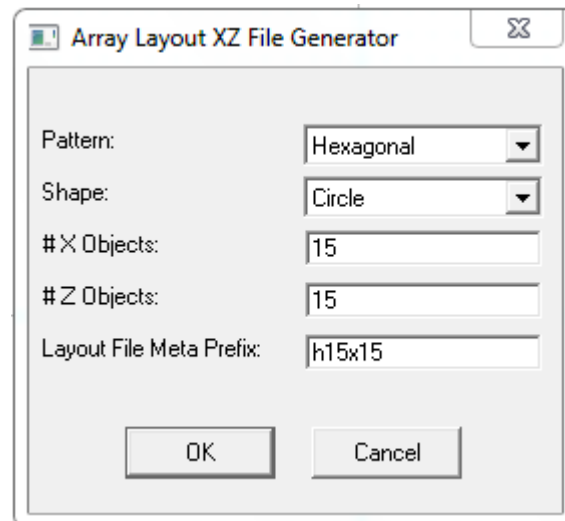


Figure II-2: Arrangements de disposition de la rangée XZ.

On clique sur le bouton OK et on obtiendra la structure de cristal photonique qui apparaît sur la figure II-3.

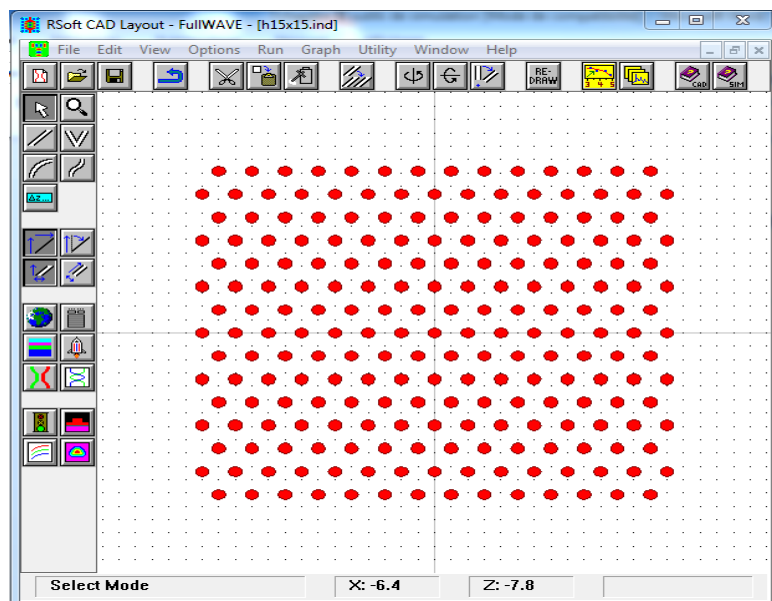



Figure II-3: Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD.

### II-4-2- Personnalisation de réseau

On clique sur l'icône  (**global setting**). Pour définir les propriétés du réseau, la fenêtre de dialogue ci-dessous apparaît

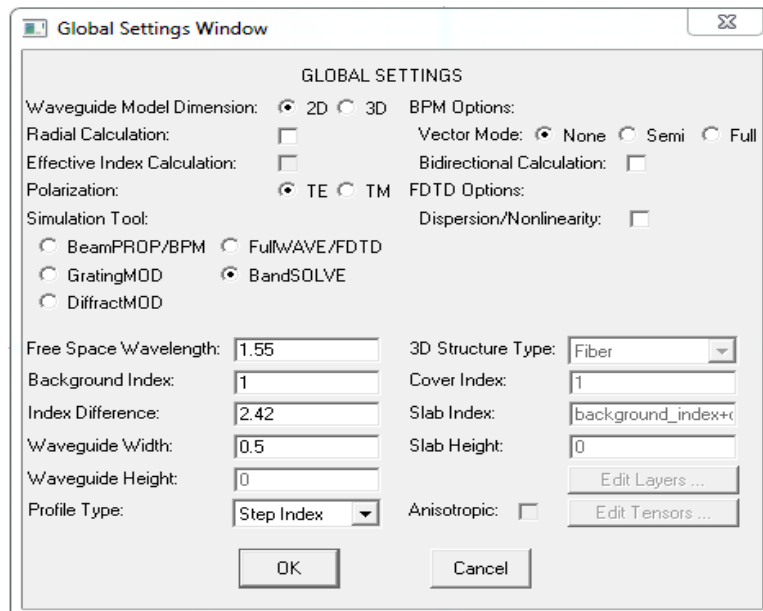



Figure II-4: Arrangements Globaux.

### II-4-3- Définition des variables

Cliquer sur l'icône  (**Editeur symbole**) dans la fenêtre de CAD, ce tableau de symbole Figure II- permet à l'utilisateur de créer ou modifier à la fois et intégrer les variables définies par l'utilisateur

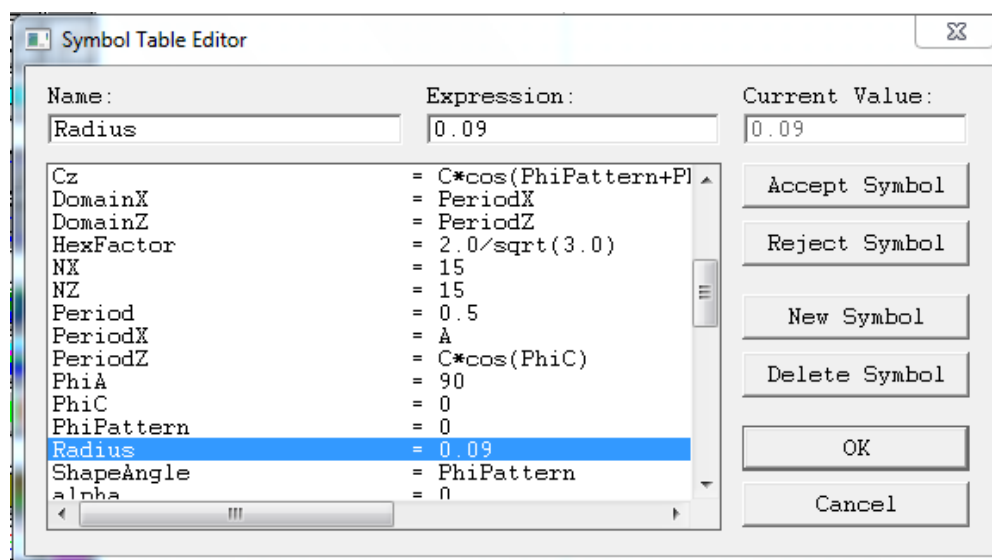

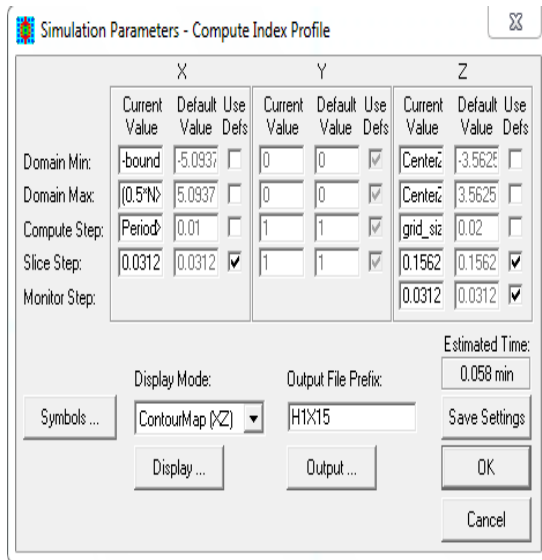


Figure II-5: Le tableau de l'éditeur des symboles.

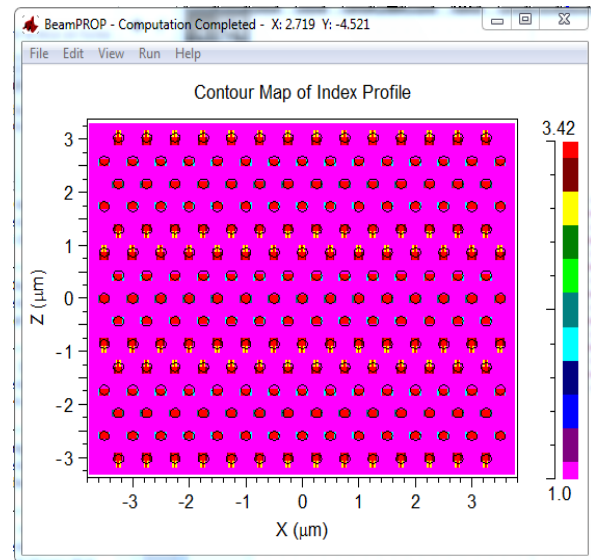


#### II-4-4- Vérifier la structure

Pour vérifier la distribution d'index de la structure qu'on a créée. On appuie sur le bouton de **profil d'index**  et on change le pas de calcul, on met les valeurs max et min pour X et Z (voir figure II-6(a)). La structure obtenue est sur la figure II-6(b)




(a)

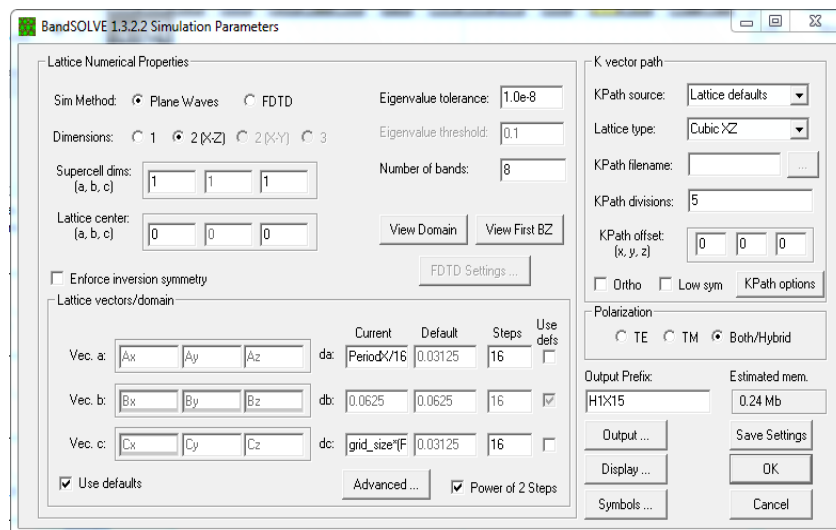


(b)

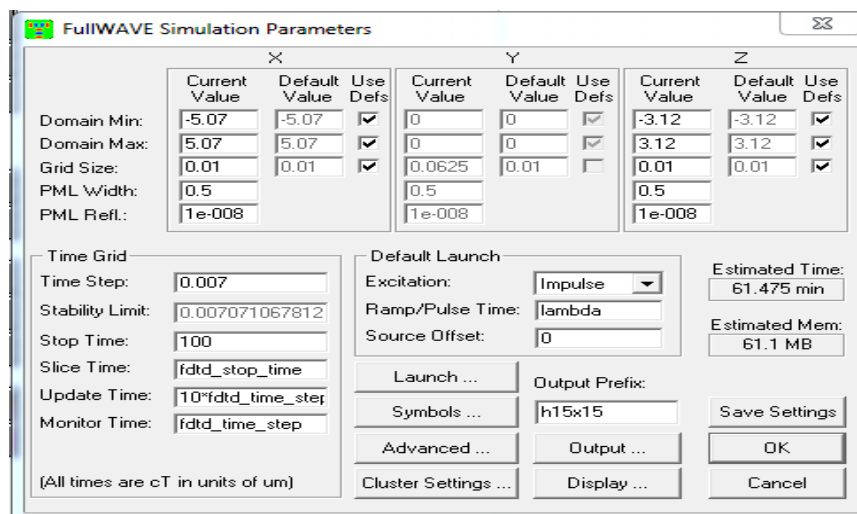
**Figure II-6 : (a) Arrangements de calcul de profil d'index et (b) Distribution d'index pour la disposition de réseau.**

#### II-4-5- Réglage des paramètres de simulation

Pour le choix et le réglage des paramètres de simulation on clique sur le Bouton **(Effectuer La Simulation)** . Par conséquent, il apparaît la fenêtre correspondante au module de simulation utilisée (BandSolve / FullWave) comme il est représenté sur la figure II.07 ou sur la figure II.8 respectivement. Une fois que les paramètres numériques et d'autres options sont acceptables, on clique sur **OK** pour commencer la simulation.




**Figure II-7: La fenêtre de paramètres de simulation de BandSolve où des paramètres numériques de base de simulation sont entrés.**



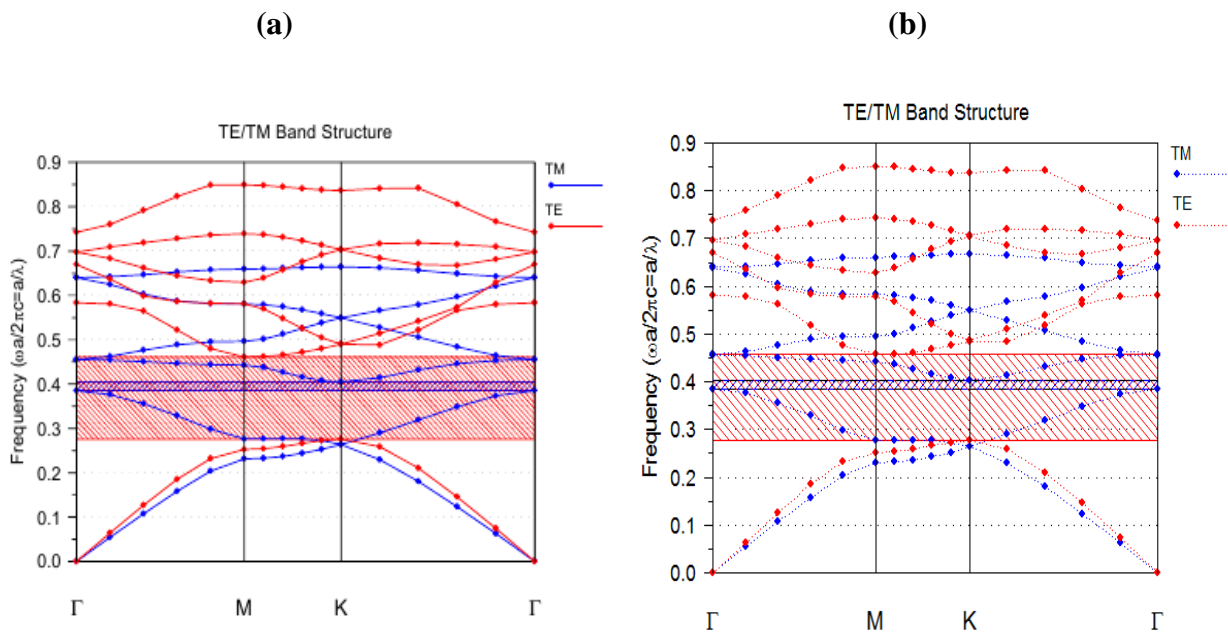
**Figure II-8.: La fenêtre de paramètres de simulation de Full WAVE où des paramètres numériques de base de simulation sont entrés.**

#### II-4-6- lecture des résultats

On clique sur l'icône  de **WinPLOT** dans la barre des outils supérieure de la fenêtre CAD, et on choisit le graphe désiré à partir du dialogue qui est présenté.

### II-5- Diagramme des bandes

Comme indiqué dans le premier chapitre, les zones de Brillouin aide à la localisation et l'optimisation des bandes interdites, puis le calcul de la dispersion des modes de défaut. Seulement il est nécessaire d'analyser un petit nombre de points dans la première zone de Brillouin dans la figure II-9 nous avons validé nos calculs dans le cas d'un réseau triangulaire. Pour ce faire, nous avons repris l'exemple traité par [32]. La structure est une maille triangulaire composée de trous d'air ( $n=1$ ) de formes cylindriques périodiques plongés dans un milieu diélectrique (Si) d'indice de réfraction ( $n=3.42$ ). Le rayon des cylindres est  $r=0.43a$ . Dans les figures II-9(a) et II-9 (b), nous présentons respectivement la structure de bande calculée par [32] et celle que nous avons simulé. On constate une concordance entre nos résultats PWE et ceux présentés dans la littérature [32].



**Figure II-9 : Diagramme de dispersion d'un réseau triangulaire de trous d'air dans du silicium avec  $\epsilon=11.6$  et  $r/a=0.43$  pour la polarisation TE (en rouge) et TM (en bleu). Les zones hachurées marquent les BIP de chacune des polarisations. Seules les fréquences comprises entre 0,385 et 0,406 permettent l'ouverture d'une bande interdite complète. (a) Résultats obtenus par [32] et (b) Résultats obtenus par le simulateur Bandsolve.**

## II-6- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les deux méthodes de simulation : la méthode des ondes planes (PWE) et la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Ensuite, nous avons décrit les deux modules de simulation le Bandsolve et le Fullwave de Rsoft CAD que nous avons utilisé au cours du troisième chapitre de ce manuscrit. Par ailleurs, nous avons décrit les étapes de simulation pour l'étude et la modélisation de bande interdite photonique des cristaux photoniques bidimensionnels d'une structure non connectée. Nous avons étudié les résultats obtenus à l'aide de notre simulateur en faisant varier les paramètres physiques et les paramètres géométriques et en étudiant leurs effets sur la bande interdite photonique de cristaux photoniques bidimensionnels à réseau triangulaire pour améliorer les effets sur la bande interdite photonique.

## **CHAPITRE III**

### **Résultats et interprétations**

### III-1 Introduction

Les propriétés des cavités peuvent être accordées en changeant légèrement leur forme, par exemple en ajustant la taille et la position de certains des trous environnants, pour augmenter le facteur de qualité  $Q$ .

Dans ce chapitre, nous allons utiliser le FullWAVE et le BandSOLV comme un moyen de modélisation des cavités à cristaux photoniques, la structure considérée est un cristal photonique à maille triangulaire de trous d'air, nous étudierons les cavités hexagonales  $H_1$  et les cavités linéiques  $L_3$ . Nous expliquerons l'influence des paramètres géométriques sur les deux cavités  $H_1$  et  $L_3$ .

L'objectif principal de nos travaux demeure l'optimisation du confinement de la lumière dans ces cavités. Pour cela, on étudie des cavités de faible dimension et possédant un minimum de pertes, ceci dans le but d'augmenter ces facteurs de qualité tout en conservant le caractère modal de faible volume.

### III-2- Cavités en Cristaux Photoniques 2D

La création des défauts dans le cas des cristaux 2D s'effectue, soit, par une modification locale d'indice ou un changement de taille d'un motif du cristal (défaut de substitution), soit par le déplacement d'un de ces motifs (défaut interstitiel) ou l'absence de l'un des motifs (défaut lacunaire) ou encore par l'insertion d'un motif différent (dopant). La présence d'un défaut ponctuel peut conduire à l'existence de niveaux discrets d'énergies dans une bande interdite.

Dans notre cas nous utiliserons le type de défauts lacunaires [33].

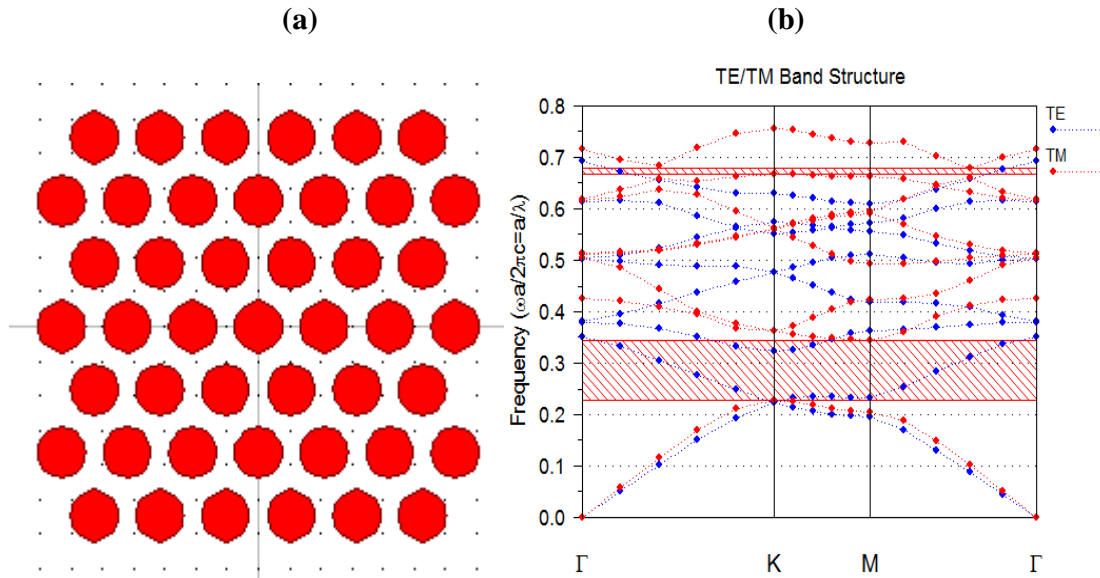
### III-3- Cavités Hexagonales

Des cavités hexagonales sont réalisées en omettant la gravure de trous du cristal photonique dans un hexagone. Ces cavités sont communément appelées « cavité  $H_X$  » avec  $X$  le nombre de trous omis par côté de l'hexagone.

#### III-3-1- Etude de la cavité $H_1$ pour un défaut lacunaire

Le cristal photonique bidimensionnel étudié est un réseau triangulaire de trou d'air de paramètre de maille  $a=420\text{nm}$  ( $r=0.36a$ ) sur une membrane de silicium ( $n=3.42$ ).

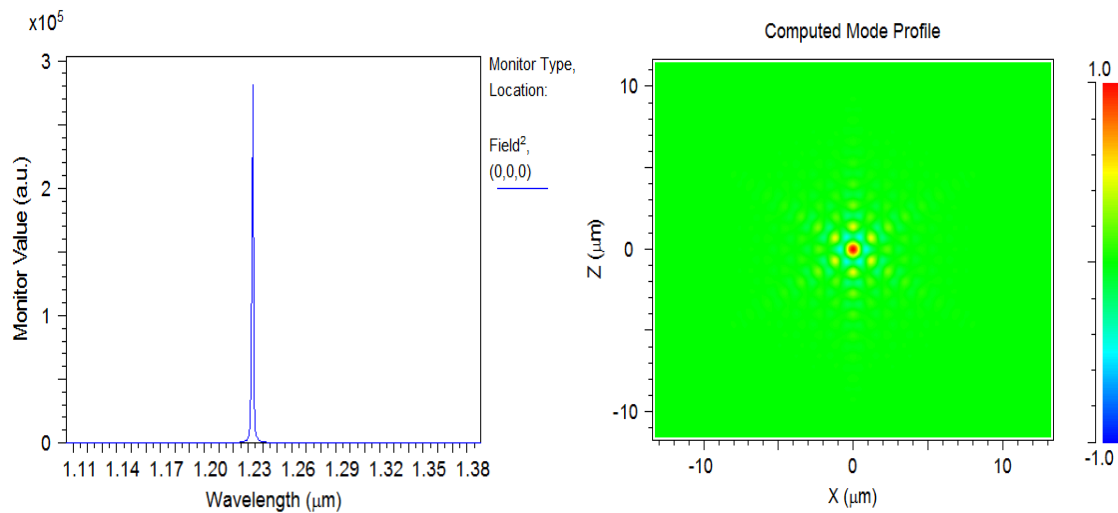
Ce cristal est éclairé par une onde plane monochromatique sous incidence normale avec une polarisation TE et TM. Le coefficient de transmission de ce réseau en fonction de la longueur d'onde. La bande interdite photonique s'étend entre 1.21 et 1.84  $\mu\text{m}$ .



**Figure III-1 : structures 7 x 7,(b) la band interdit photonique d'un CP2D à réseau triangulaire de paramètre de maille  $a=420\text{nm}$  constitué des trous d'air de rayon  $r=0.36a$  dans une membrane de silicium en polarisation TE et TM.**

Les cavités  $H_1$ , formées par l'omission d'un trou unique, sont celles qui possèdent à priori le plus faible volume modal. La transmission mesurée est rapportée sur la figure III-2 pour la gamme de fréquence associée à la BIP. On note l'apparition d'une raie qui présente la position d'un mode résonant (en réalité doublement dégénéré) pour une longueur d'onde  $\lambda_0 = 1.23 \mu\text{m}$  qui était interdite avant d'enlever le trou (Figure III - 2 (a)). L'intensité du champ de lancement de ce réseau est représentée sur la figure III-2(b).

Le facteur de qualité calculé est  $Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 3363$ .



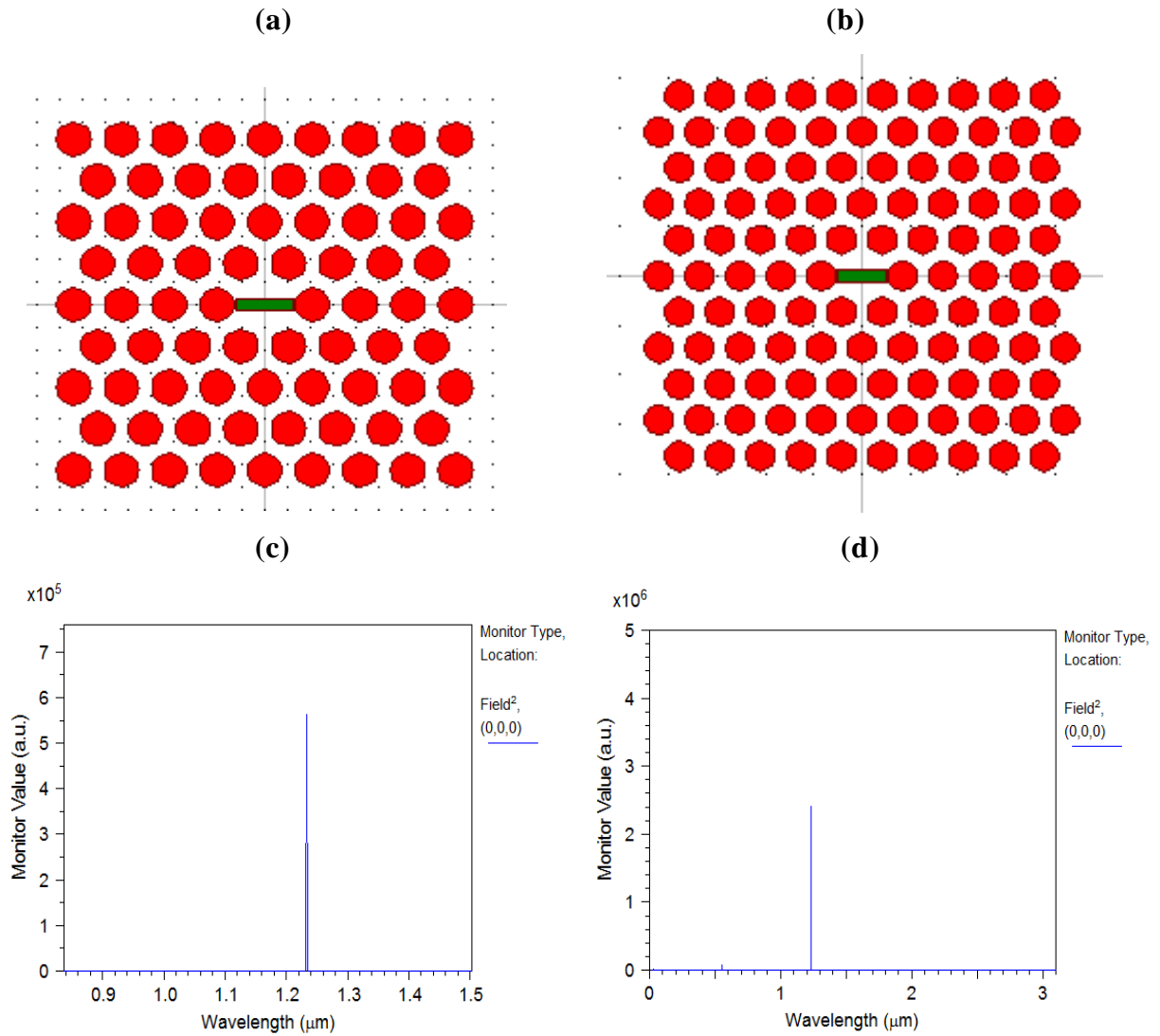
**Figure III-2 : (a) Coefficient de transmission d'une cavité  $H_1$  dans un réseau triangulaire de paramètre de maille  $a=420\text{nm}$  constitué de trous d'air de rayon  $r=0.36a$  gravés dans une matrice diélectrique de silicium en polarisation TE et TM ; (b) Intensité du champ dans la cavité  $H_1$  pour  $\lambda_c=1.23\mu\text{m}$ .**

### III-3-2- Influence du nombre de périodes sur la cavité $H_1$

Pour voir l'effet du changement des périodes verticales et horizontales sur la cavité  $H_1$ , on va fixer tous les paramètres de la structure précédente et changer uniquement le nombre de colonnes et de lignes respectivement, puis on calcule le facteur de qualité pour deux structures qui ont respectivement  $(9 \times 9)$  et  $(11 \times 11)$ .

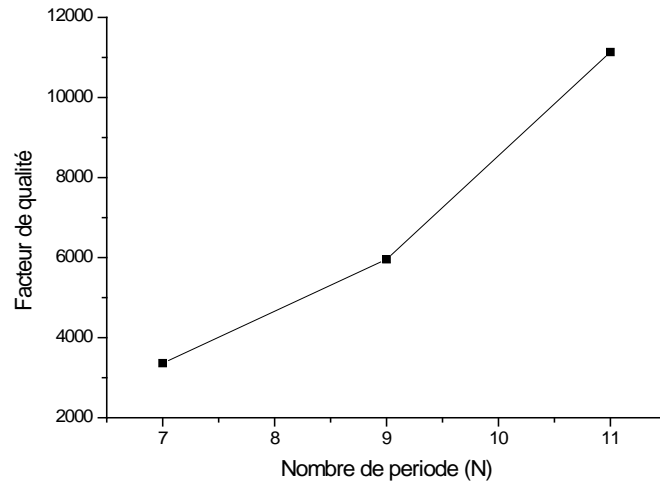
Sur la figure III-3, nous avons reporté les spectres de simulation obtenus en polarisation TE et TM à l'aide du logiciel Fullwave de Rsoft pour deux structures triangulaires composées de  $9 \times 9$  rangés et  $11 \times 11$  rangés.





**Figure III-3 : (a) et (b) deux structures 9 x 9 et 11 x 11 (c) et d): Coefficient de transmission d'une cavité H1 dans un réseau triangulaire ( $a=420\text{nm}$ ,  $r=0.36a$ ,  $n=3.42$ ).**

On voit que pour les deux structures de 7x7 et 9x9 le facteur de qualité calculé est de 3363 et 5956 respectivement alors que pour la structure de 11x11 on constate que le facteur de qualité augmente à 11133 (Figure III-4).



**Figure III-4: Variation du facteur de qualité en fonction du nombre de période.**

On résume les résultats précédents dans le tableau III-1 :

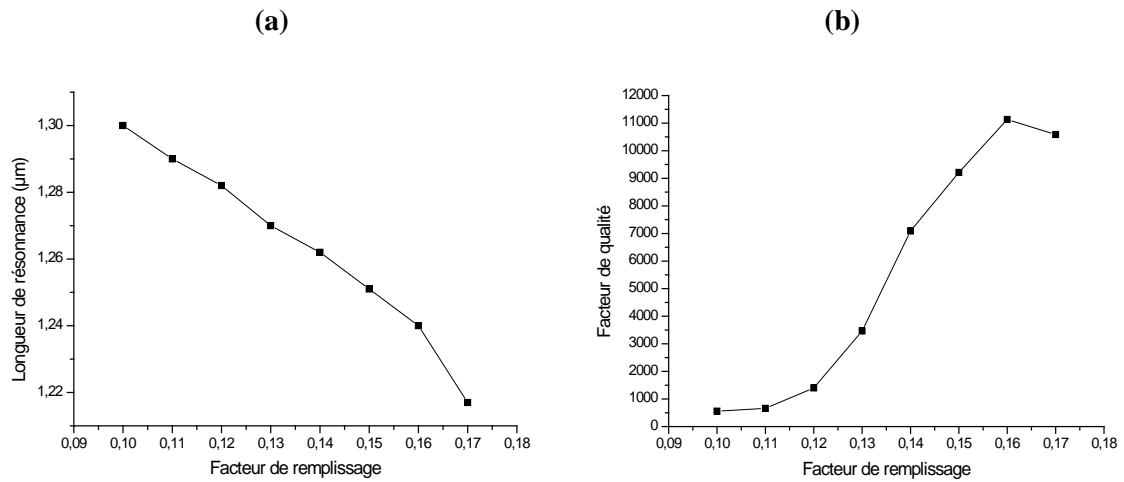
Nombre de période	Facteur de qualité (Q)
7x7	3363
9x9	5956
11x11	11133

**Tableau III-1 : Variation du facteur de qualité en fonction du nombre de période.**

Grâce aux précédents résultats, On remarque que lorsque le nombre de période augmente le facteur de qualité augmente également. Dans les trois cas, on note que le nombre de période de CP 2D bordant la cavité détermine la réflectivité des miroirs. Donc nous prenons la structure 11×11 pour la suite d'étude.

### III-3-3- Influence du facteur de remplissage sur la cavité $H_1$

Pour voir l'influence de ce facteur sur la cavité  $H_1$ , on considère la structure de base où le rayon des trous est  $r = 0.36a$  puis on le fait varier. (Tout en gardant le paramètre de maille « a » fixe). (Voir la figure III-5).



**Figure III-5 : Variation de la longueur d'onde de résonance (a) et le facteur de qualité (b) en fonction du facteur de remplissage.**

Les résultats montrent que les facteurs de qualité sont d'autant plus améliorés avec l'augmentation du facteur de remplissage (c'est-à-dire que les diamètres des trous sont importants) (voir tableau III-2). Ainsi la longueur d'onde de résonance des cavités est décalée progressivement vers les basses longueurs d'onde d'une cavité à l'autre ; ceci est dû à la diminution de la longueur de cavité avec l'augmentation du facteur de remplissage.

Les résultats de la simulation sont regroupés dans le tableau III :

Rayon	La longueur d'onde de résonance (en $\mu\text{m}$ )	Le facteur de qualité Q
0.10	1.300	557
0.11	1.290	661
0.12	1.282	1402
0.13	1.270	3463
0.14	1.267	7091
0.15	1.261	9213
0.16	1.240	11133
0.17	1.217	10587

**Tableau III-2 : Variation de la longueur d'onde de résonance et le facteur de qualité en fonction du facteur de remplissage.**

### III-3-4- Influence de la modification des dimensions des trous bordant la cavité $H_1$

Dans cette étude on considère des cavités hexagonales améliorées par des modifications de la forme des trous bordant la cavité. La figure III-6 représente une coupe horizontale de la structure  $H_1$  optimisée, où le rayon des six trous de l'hexagone de la cavité  $H_1$  sont réduits alors que la distance entre les bords des trous voisins est conservée afin de ne pas générer d'autres défauts.

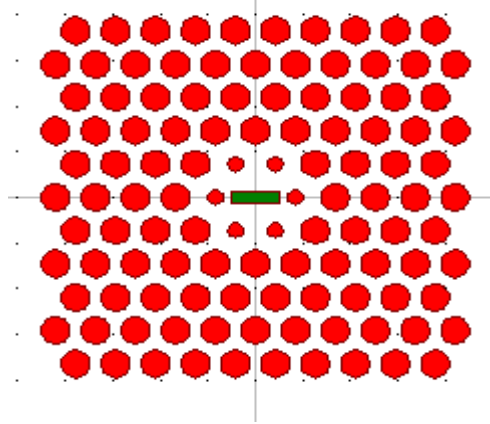


Figure III-6 : Vue de dessus de la cavité optimisée  $H_1$  formé par l'omission d'un seul trou.

La figure III-7 présente l'influence de la variation du rayon des six trous bordant la cavité sur la longueur d'onde et le facteur de qualité de la structure. Quand le rayon de ces six trous diminue, la longueur d'onde diminue. En effet, plus la réduction des trous est importante, plus la cavité s'agrandit. La courbe de la figure III-7 (b) montre un facteur de qualité élevé jusqu'à 14869 pour la longueur d'onde de résonance  $1.65 \mu\text{m}$  avec le rayon des six trous bordant la cavité  $r=0.08 \mu\text{m}$

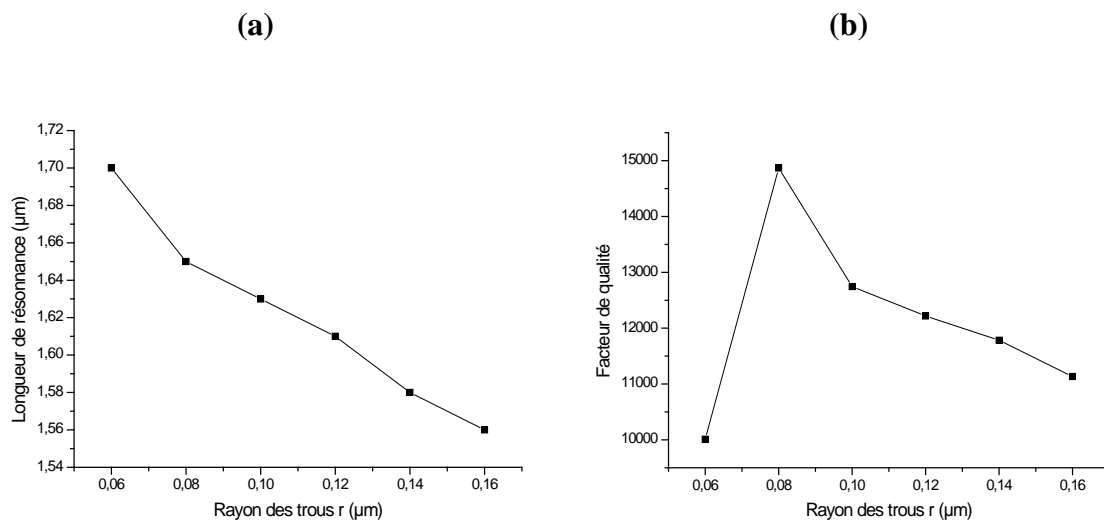


Figure III-7 : Influence de la modification des dimensions des trous bordant la cavité  $H_1$  sur la longueur d'onde (a) et le facteur de qualité (b).

On résume les résultats précédents dans le tableau ci-dessous :

Rayon de trou ( $\mu\text{m}$ )	La longueur d'onde de résonance (en $\mu\text{m}$ )	Le facteur de qualité Q
0.16	1.56	11133
0.14	1.58	11784
0.12	1.61	12219
0.10	1.63	12745
0.08	1.65	14869
0.06	1.70	10011

**Tableau III-3 : Influence de la modification des dimensions des trous bordant la cavité sur la longueur d'onde et le facteur de qualité de la cavité  $H_1$ .**

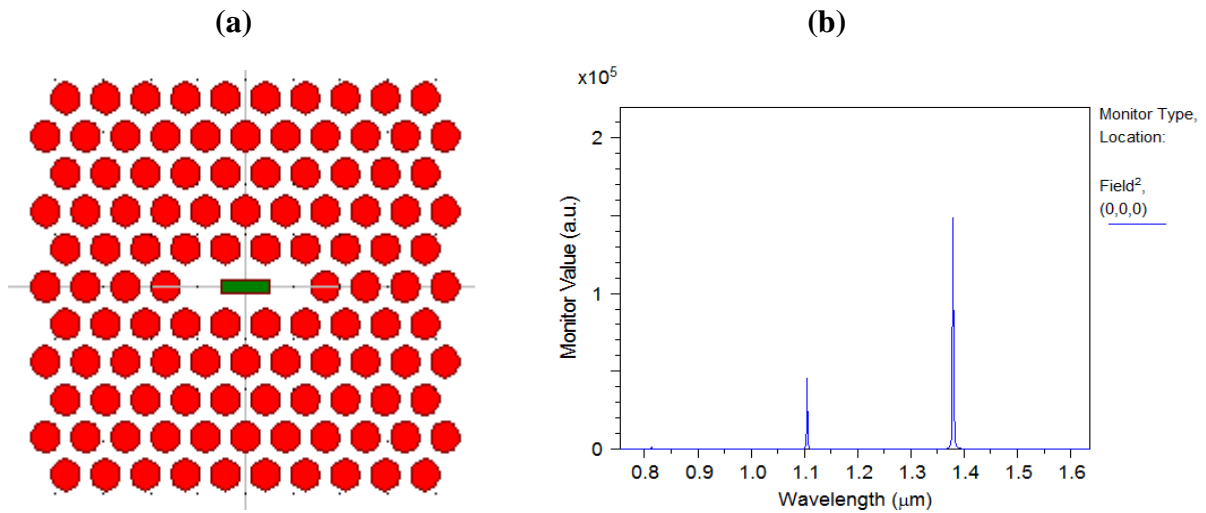
### III-4- Cavité linéique

La cavité linéique considérée est en fait un guide d'onde à cristaux photoniques à une rangée manquante fermé aux deux extrémités par deux miroirs à cristaux photoniques. Le mode de la cavité est donc principalement formé par les allers retours du mode de Bloch fondamental du guide entre les deux miroirs, exactement comme dans une cavité Fabry-Pérot classique. Pour étudier ces cavités [4], l'outil de simulation décrit dans le chapitre II a été utilisé. La méthode FDTD-2D permet de calculer la réponse spectrale de la structure, les coefficients de qualité des modes ainsi que les différentes composantes du champ en tout point de l'espace de calcul.

#### III-4-1- Cavité $L_3$

La figure III-8 (a) présente une coupe horizontale dans l'espace de calcul de la structure  $L_3$  c'est-à-dire la distribution horizontale de l'indice. La cavité linéique  $L_3$  est formée par l'omission de trois trous adjacents dans la direction  $\Gamma K$  du cristal photonique.

La figure III-8 (b) présente les résultats obtenus sur une cavité linéique. Le spectre calculé en polarisation TE et TM permet d'observer 2 modes de cavité (1.107  $\mu\text{m}$  et 1.38  $\mu\text{m}$ ). On appellera le mode M2 le mode de la longueur d'onde de résonance 1.3797. Ce mode a un facteur de qualité de 12661.

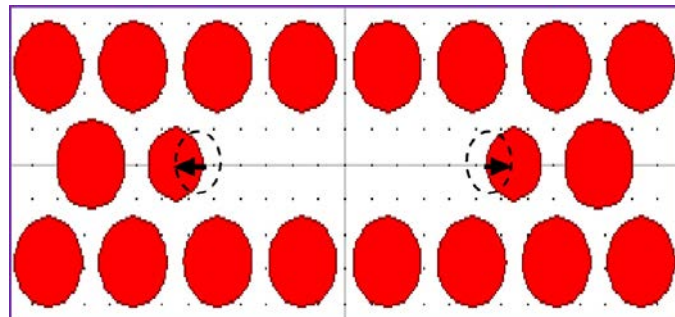


**Figure III-8: (a) Vue de dessus de la cavité L3 formé par l'omission de trois trous dans la direction  $\Gamma K$  du cristal photonique, (b) Transmission de la cavité simple L3 constituée de trois motifs adjacents dans un réseau triangulaire.**

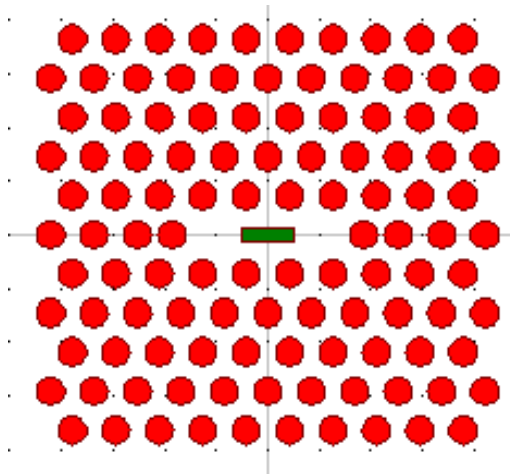
#### III-4-2- Influence du décalage des trous sur la longueur d'onde et le facteur de qualité de la cavité $L_3$

Pour améliorer les facteurs de qualité de ces structures, le concept présenté par Noda [34] est appliqué: on fait varier la position des trous des extrémités de la cavité. En effet, le déplacement de ces trous permet un changement plus graduel de la fonction enveloppe aux bords de la cavité et un meilleur confinement du mode.

Les trous qui vont être décalés pour optimiser la cavité sont ceux situés aux 2 extrémités de la cavité comme le montre la figure III-9. Ils ont été déplacés vers l'extérieur de la cavité d'une distance comprise entre 0.3 et 0.12  $\mu\text{m}$ .



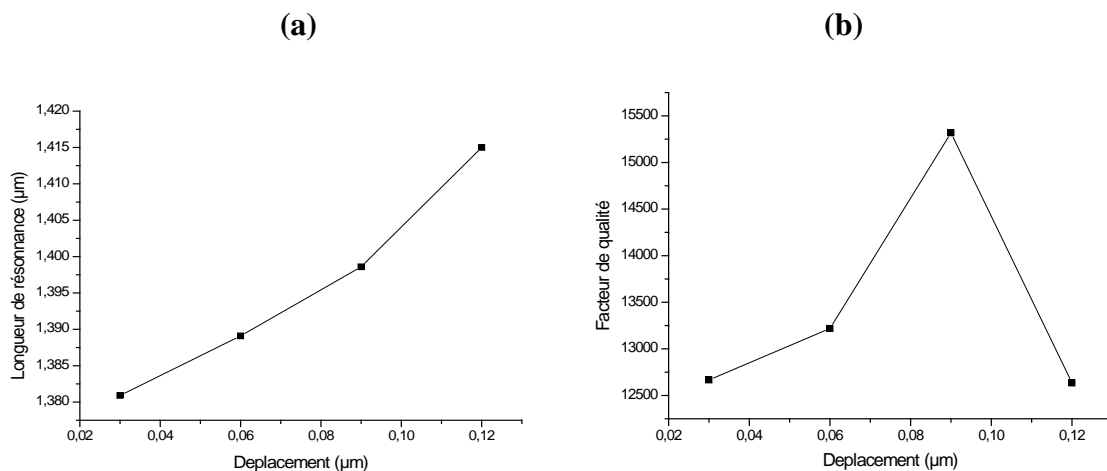
**Figure III-9: Représentation de la cavité L3. Les pointillés indiquent l'emplacement initial des trous des deux extrémités et la flèche noire le sens du décalage des trous concernés [35].**



**Figure III-10 : Décalage des trous des extrémités de la cavité L<sub>3</sub>.**

La figure III-11 présente l'influence du décalage des trous des extrémités sur la longueur d'onde et le facteur de qualité du mode principal M2 de la structure. Quand le décalage augmente, la longueur d'onde augmente également. En effet, plus le décalage est important, plus la cavité n'est grande.

Le facteur de qualité augmente, passe par un maximum et diminue quand on augmente le décalage des deux trous latéraux. Le maximum pour le facteur de qualité est atteint avec un décalage optimum de 0.09  $\mu\text{m}$  ( $\lambda = 1.3986 \mu\text{m}$ ,  $Q=15318$ ). Ce décalage permet l'optimisation maximum du mode à plus fort facteur de qualité.



**Figure III-11: (a) Influence du décalage des trous sur la longueur d'onde du mode M2 de la cavité L<sub>3</sub>, (b) Influence du décalage des trous sur le facteur de qualité de la cavité L<sub>3</sub>.**

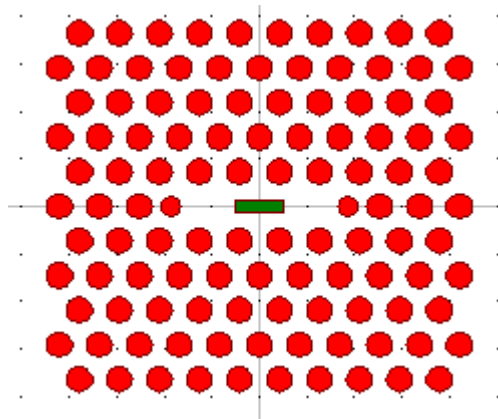
On résume les résultats précédents dans le tableau III-4 :

La longueur de décalage des trous (en $\mu\text{m}$ )	Longueur d'onde de résonance $\lambda_0$ (en $\mu\text{m}$ )	Facteur de qualité
0.03	1.3819	12677
0.06	1.3861	13218
0.09	1.3986	15318
0.12	1.4150	12634

**Tableau III-4 : Influence du décalage des trous sur la longueur d'onde et le facteur de qualité de la cavité  $L_3$ .**

#### III-4-3- Influence de la modification de rayon des trous bordant la cavité $L_3$

Dans cette étude on fixe le décalage des trous à  $0.09\mu\text{m}$  en raison de posséder une valeur optimale pour le facteur de qualité, puis commencer à minimiser le diamètre des trous des extrémités.

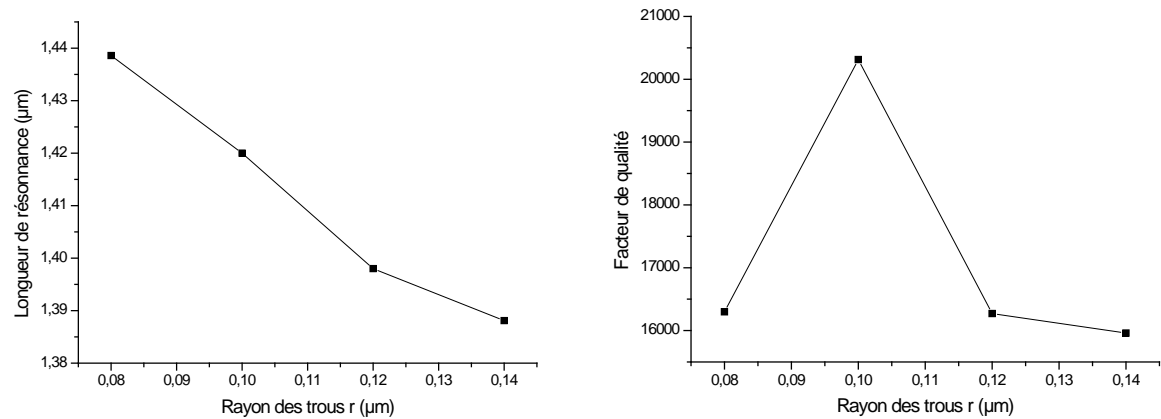


**Figure III-12 : Vue de dessus le changement de rayon des trous bordant la cavité  $L_3$ .**

La figure III-13 présente l'influence du changement de rayon des trous latéraux sur le facteur de qualité et la longueur d'onde de résonance. On remarque que le changement de rayon augmente, la longueur d'onde et le facteur de qualité augmente, passe par un maximum et diminue quand on augmente la réduction du trou extrémités. Le maximum pour le facteur de qualité est atteint avec une réduction optimum de  $0.10\mu\text{m}$  ( $\lambda = 1.398\mu\text{m}$ ,  $Q=20313$ ).



Cet résultat clairement indique que le facteur Q de la cavité photonique peut être augmentée de façon significative par l'adaptation de la position des trous d'air de pointe.



**Figure III-13: Influence du réduire de rayon des trous bordant la cavité  $L_3$  sur la longueur d'onde et le facteur de qualité**

Le tableau suivant résume les résultats obtenus :

Rayon $r$ (en $\mu\text{m}$ )	Longueur d'onde de résonance $\lambda_0$ (en $\mu\text{m}$ )	Facteur de qualité
0.14	1.3881	15960
0.12	1.3980	16270
0.10	1.4200	20313
0.08	1.4386	16298

**Tableau III-5 : Influence de la modification de rayon des trous bordant la cavité  $H_1$  sur la longueur d'onde et le facteur de qualité.**

### III-5- Conclusion

Ce chapitre concerne l'étude numérique des cavités à cristaux photoniques, formés de trous d'air, le but d'augmenter les facteurs de qualité tout en conservant un volume modal le plus faible possible, Ces cavités sont basées sur un travail d'ingénierie de modes qui consiste à utiliser des défauts: en supprimant des trous, en les déplaçant, ou en changeant localement leur rayon.

Nous avons étudié la cavité hexagonale H1 et la cavité linéique L3 à réseau triangulaire pour un défaut lacunaire. Ensuite nous avons expliqué l'influence des paramètres géométriques sur ces deux types de cavités. L'objectif de cette étude est reste toujours de considérer des cavités de faible volume et possédant un minimum de pertes (facteur de qualité optimum).

## **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion Générale

Une cavité optique se définit comme un résonateur électromagnétique où la lumière est confinée spatialement et spectralement. Ces résonateurs fonctionnent comme des « pièges à photons ». En effet, lorsque la cavité résonne, la lumière effectue un grand nombre d'allers retours et se retrouve ainsi temporairement bloquée.

Le but de notre travail est donc de caractériser des cavités de faible dimension possédant un minimum de pertes, l'objectif étant l'optimisation des facteurs de qualité à l'aide du logiciel FullWAVE et bandSOLV.

Dans un premier temps, Nous avons étudié la cavité hexagonale  $H_1$  pour un défaut lacunaire nous avons pu montrer que les modes résonants de la cavité à cristaux photoniques bidimensionnels sont très sensibles aux variations des paramètres géométriques du cristal photonique tels que :

- L'augmentation des nombres des périodes améliore le facteur de qualité.
- l'augmentation du facteur de remplissage améliore le facteur de qualité, cependant la longueur d'onde de résonance des cavités est décalée progressivement vers les basses longueurs d'onde
- La réduction du rayon des trous bordant la cavité  $H_1$  qui engendre un déplacement de la longueur d'onde de résonance vers les basses longueurs d'onde et améliore le facteur de qualité.

Par la suite, Nous avons étendu cette étude à la cavité planaire linéique  $L_3$  en cristaux photoniques En faisant varier localement le rayon des trous (le déplacement des trous et le réduire de rayon), on réalise un gradient d'indice permettant d'obtenir une transition moins abrupte entre le cristal photonique et le bord de la cavité. Cela permet de limiter les pertes et donc d'augmenter le facteur de qualité.

## **Bibliographie**

## Bibliographie

- [1] E. Yablonvitch, «Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics », Physical Review Letters, 58(20), 2059-2062 (1987).
- [2] S. John, « Strong localization of photons in certain disordered dielectric super Lattices », Physical Review Letters 58, 2059 (1987).
- [3] Z. HAN, «Vers le laser Raman à cristal photonique en filière silicium», Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, 2010.
- [4] A. BENMARKHI, «Optimisation du confinement de la lumière dans des cavité a cristaux photoniques », Thèse de doctorat, Université de Mentouri Constantine, 2012.
- [5] Y. MERLE, «Etude de la dispersion électromagnétique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels», Thèse de doctorat, Université de limoges, 2003.
- [6] F. BENAÏSSA, «Etude et Simulation de la Propagation des Ondes Electromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques », Thèse de doctorat, Université Abou-Bakrblkaïd Tlemcen, 2013.
- [7] E. Yablonovitch, «Photonic band-gap structures», J. Phys. Condens. Matter, vol.5, p.2443–2460, 1993.
- [8] K. BOULALI, «Simulation des effets géométrique des cristaux photoniques bidimensionnels» Mémoire de magister, Université de Mentouri Constantine, 2007.
- [9] G. LE GAC, «Etude de l'impact d'une pointe SNOM sur les propriétés des modes optiques d'une cavité à base de cristaux photoniques», Thèse de doctorat, Institut des Nanotechnologies de Lyon, 2009.
- [10] D. GERARD, «Etude en champ proche et en champ lointain de composants périodiquement nanostructures : cristaux photoniques et tamis à photons», Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2004.
- [11] M. HOFMAN, «Composants optiques à base de cristaux photoniques pour applications à l'imagerie infrarouge », Thèse de doctorat, Université de sciences et technologie de lille, 2011.
- [12] A. SAIDANI, « Application des méthodes stochastiques pour l'optimisation des filtres passe-bande à base des cristaux photoniques unidimensionnels », Mémoire de master, Université de Tlemcen, 2014.
- [13] F. BOUGRIOU, «Etude des guide d'onde à cristaux photoniques bidimensionnels », Mémoire de magister, 2008.

- 
- [14] K.M.Ho,C.T.Chan,etM.Soukoulis, «Existence of a photonic gap in periodic structures », Phys. Rev. Lett., vol. 65, p. 3152, 1990.
- [15] 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.
- [16] Y.A. Vlasov, et al., « On-chip natural assembly of silicon photonic bandgap crystals», Nature, vol. 414, p. 289-293, 2001.
- [17] K. VYNCK « Simulation des cristaux photoniques 3D à base d'opales », Journée Jeunes Chercheurs Calculant au CINES 2007, CINES, Montpellier.
- [18] B. LOMBARDET, « Étude et réalisation des cristaux photoniques pour l'optique intégrées », Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- [19] V.VIGNERAS, H. ROUSSEL, J.P PARNEIX, W. TABBARA « Modélisation et mesure de la réponse électromagnétique de structures BIP bidimensionnelles » JNM 2001, Poitiers, 16-18 mai 2001.
- [20] B.WILD, «Etude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photoniques bidimensionnels et de leur accordabilité», Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2006.
- [21] R. BENDJELLOUL, « Influence des paramètres physiques sur la bande interdite Photonique d'un cristal photonique bidimensionnel à réseau hexagonal », mémoire de magistère, Université de Constantine, 2008.
- [22]S. MASSY, « Contribution à la réalisation de fonctions optiques à base de cristaux photoniques sur LiNbO3 », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2004.
- [23] K. KUSIAKU, « Micro-dispositifs accordables pour la conversion de fréquence optique », Thèse de doctorat, Ecole de liyon, 2012.
- [24] Ph.VELHA, « Ingénierie de mode en optique intégrée sur silicium sur isolant », Thèse de doctorat, Université PARIS-SUD XI l'Université PARIS-SUD XI, 2008.
- [25] M. Thèvenot, C. Cheype, A. Reineix, B. Jecko, «Directive Photonic-Bandgap Antennas IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques », Vol.47, No.11, November 1999.
- [26] P. NEDEL, « Nanostructures Photoniques Ultimes pour L'Information Quantique », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2010.
- [27] J.M.Lourtioz, « Cristaux photonique et «gaps» de photons –Propriétés et applications », Techniques de l'ingénieur,AF 3 711,07/2004.
- [28] A. GASCON, «Fabrication et caractérisation de cristaux photoniques pour exaltation de fluorescence », Maîtrise ès sciences appliquées, Université de Montréal, 2010.

- [29] Taflove, A., *Advances in Computational Electrodynamics : The Finite-Difference Time-Domain Method*, 1998 : Artech House ,Inc.
- [30] K.S.YEE, «Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media », *IEEE Transaction Antennas and Propagation*, vol.14, 1966, pp.302-307
- [31] D. Cassagne, C. Jouanin, D. Bertho, «Hexagonal photonic band gap structures » ,*Physical Review B*, Vol. 53, March 1996, pp.7134-7141.
- [32] D. NEEL, « Etude en champ proche optique de guides à cristaux photoniques sur SOI », Thèse de doctorat, université de Lyon, 2006.
- [33] A. BENMERKHI, «Influence des paramètres géométriques sur la cavité à cristaux photoniques bidimensionnels », mémoire de magistère, Université de Constantine, 2008.
- [34] Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, et S. Noda, " High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal," *Nature*, vol.425, N°6961, p.944–947, 2003.
- [35] A.Benmarkhi, M.Bouchamat, T.Bouchamat, «Ultrahigh-Q of the L3 photonic crystal microcavity», *Optik*, 2013.



# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN ELECTRONIQUE

**Option:** Micro-électronique

**Proposé et dirigé par :** Dr. Abdesselam HOCINI

**Etudié par :** Hadjer NACERI

**Thème :** Optimisation du facteur de qualité dans les cavités à cristaux photoniques bidimensionnels

## Résumé

Les cristaux photoniques sont des structures dont le constant diélectrique est modulé de façon périodique. À l'image des électrons dans les semi-conducteurs, les photons y sont répartis en bandes de transmission séparées par des bandes d'énergies interdites. Cette analogie permet d'envisager l'utilisation des cristaux photoniques comme matériaux de base pour la réalisation de composants pour l'optique intégrée.

Ce travail de mémoire est essentiellement dédié à l'étude théorique des cavités et l'amélioration de leur facteur de qualité en fonction des paramètres physiques et géométriques.

**Mots clés :** cristaux photoniques, cavité, facteur de qualité, FDTD.

## Abstract

Photonic crystals are periodic dielectric structures, where the periodicity varies on the wavelength scale. Analogous to electrons in semiconductors, the photon propagation can be described using a band structure in which transmission bands are separated by band gaps, energy ranges at which light can not exist inside the photonic crystals. This analogy suggests that photonic crystals may be suitable to fabricate the components needed for integrated optics.

The work of this memory has been primarily devoted to theoretical study of the cavities and improving their quality factor depending on the physical and geometrical parameters

**Keywords:** photonic crystals, Cavity, Quality Factor, FDTD.

## ملخص:

البلورات الضوئية هي هياكل منظم بشكل دوري ثابت العزل الكهربائي. مثل الإلكترونات في أشباه الموصلات، وتنقسم الفوتونات في نطاقات انتقال، مفصولة العصابات الطاقة الممنوعة. هذا التشبيه يسمح للنظر في استخدام البلورات الضوئية كمصدر لمواد إنتاج مكونات البصريات المتكاملة.

نتطرق من خلال هذا العمل الى دراسة تجايف و تحسين عامل جودتها اعتمادا على المعلمات الفيزيائية والهندسية  
**الكلمات المفتاحية:** البلورات الفوتونية ، الفجوة، عامل الجودة.