

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

FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : ELCTRONIQUE
N° : 2017/ME04/97/482



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : MICRO ELECTRONIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : Brahimi Samir

Hammoudi Houcine

Intitulé

Conception de diviseur de faisceau à base des
cristaux photoniques bidimensionnels

Soutenu devant le jury composé de :

Pr. Khedrouche Djamel	Université de M'sila	Président
Pr. Hocini Abdesselam	Université de M'sila	Rapporteur
Dr. Khahlouche Ahmed	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

Dédicaces

A mes parents qui m'ont toujours soutenu et m'ont permis d'arriver là où je suis aujourd'hui. Aucun mot n'est assez fort pour vous témoigner toute ma reconnaissance, alors simplement MERCI POURTOUT, mais je suis sûr qu'au fond de vos cœurs vous savez combien je vous aime.

*A mes sœurs, Linda et Amel, Bouchra, A mon frère, Aziz,
A ma chère femme Amira
vous êtes la joie de nôtre famille,
merci pour l'ensemble des moments que nous passons ensemble.*

*A ma grande famille : mes grands-parents,
mes oncles, mes tantes, mes cousins, ma cousine
et leurs familles.*

*A mes amis, Salah, Oussama, Rafik, Raouf, Fateh, Samir, Walid,
Nasro, Omar, Adel et Abdelghani.*

Merci pour votre amitié précieuse.

Aux étudiants d'Electronique et toute la promotion 2017.

*Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches,
amis et collègues, qui m'ont*

*Toujours soutenue et encouragée au cours de
la réalisation de ce mémoire. A tous ceux que je ne
Peut citer ici mais qui savent combien d'avoir croisé
Leur route m'a apporté.*

Houcine.



Dédicaces

Pour commencer je prends le temps de remercier mon Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force et le courage pour terminer mon projet d'étude.

Je dédie ce modeste travail comme preuve de respect, de gratitude, et de reconnaissance à mes chers parents, pour leurs affections et leurs aides.

A ma famille, mes amis et mes camarades.

Sans oublier tous les professeurs qui ont contribué à mon réussite du primaire jusqu'au Master.

Brahimi Samir.

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans cette thèse a été effectué au sein du Département d'Electronique, la Faculté de Technologie de l'Université de M'sila.

*Ce travail reste impossible sans mon encadreur, Monsieur le Professeur **ABDESSALAM HOCINI** avec ses encouragements, son aide au cours de cette modeste étude.*

*Nous tenons également à remercier Dr. **HARHOUZ AHLEM** et Monsieur **MOUKHTARI RIAD**. Pour sa documentation et ses conseils d'or.*

Nous exprimons nos reconnaissances aux membres de jury pour bien vouloir accepter de présider et d'examiner ce travail.

Mes remerciements vont aussi à tous les membres du département d'électronique.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, pour Leurs soutiens moraux ou matériels, dans la réalisation de ce travail.

Table de matière

Dédicace	i
Remerciement.....	iii
Table de matière.....	iv
Liste de figures.....	vii
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Les cristaux photoniques	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Généralités sur les cristaux photoniques.....	3
I.2.1. Définition.....	3
I.2.2. Historique sur les cristaux photoniques.....	4
I.2.3. Les cristaux photoniques naturels.....	4
I.2.4. Analogie électron photon.....	5
I.3. Différents types des cristaux photoniques.....	6
I.3.1. La structure périodique unidimensionnelle.....	6
I.3.2. Les cristaux photoniques bidimensionnels.....	6
a. La structure connectée.....	7
b. La structure déconnectée.....	7
I.3.2.1. Différentes familles des cristaux photoniques bidimensionnelles.....	7
I.3.3. Cristaux photoniques tridimensionnels.....	8
I.4. Caractéristiques géométriques et physiques d'un cristal photonique.....	9
I.4.1. Le contraste d'indice Δn	9
I.4.2. Les périodes.....	9
I.4.3. Le facteur de remplissage f	10
I.5. La bande interdite photonique.....	10
I.6. Diagrammes de bandes.....	11
I.7. Les défauts.....	15
I.7.1. Les défauts ponctuels.....	15
I.7.2. Les défauts étendus.....	16
I.8. Analyse numérique des cristaux photonique.....	16
I.8.1. Méthode des ondes planes.....	17
I.8.2. Méthode des Différences Finies Temporelles FDTD-2D.....	18

Table de matière

I.8.2.1. Les avantages d'une méthode FDTD-2D.....	18
I.9. Conclusion.....	18

Chapitre II : Couplage guide et cavité

II.1. Introduction.....	19
II.2. Les cavités à cristaux photoniques.....	19
II.2.1. Cavité hexagonale.....	19
II.2.2. Cavité carrée.....	20
II.2.3. Cavité triangulaire.....	20
II.2.4. Cavité rectangulaire.....	20
II.3. Guides d'ondes dans les cristaux photoniques.....	21
II.3.1. Guide à cristal photonique.....	21
II.3.2. Différents types des guides d'ondes.....	23
II.3.2.1. Guide d'onde linéique.....	23
II.3.2.2. Guide d'onde courbée.....	24
II.4. Couplage cavité / guide dans un cristal photonique 2D.....	25
II.5. Les filtre.....	26
II.6. Un démultiplexeur pour les longueurs d'ondes 1,31 μm et 1,55 μm	27
II.7. Le diviseur a cristaux photoniques.....	27
II.7.1. Définition.....	27
II.7.2. Travaux réalisées sur les diviseurs à base de cristaux photoniques.....	28
II.7.3. Diffèrent types de diviseur à cristaux photoniques.....	30
- Les diviseurs a cristaux photoniques en Y (1x2)	30
- Les diviseurs à cristaux photoniques et en T (1x2).....	30
- Les diviseurs a cristaux photoniques en Y (1x4).....	30
- Les diviseurs à cristaux photoniques en T (1x4).....	31
- Les diviseurs a cristaux photoniques en Y (1x8).....	31
- Les diviseurs à cristaux photoniques en T (1x8).....	31
II.8. Conclusion.....	32

Chapitre III : Diviseur a Cristaux Photoniques : Simulation et Résultat

III .1. Introduction.....	33
III.2. Présentation de la structure étudiée.....	33
III.2.1. La création de la structure étudiée.....	34

Table de matière

III.2.2. Personnalisation du réseau.....	35
III.2.3. Créer Des Variables.....	36
III.2.4. Vérification du profil d'index.....	36
III.3. L'étude de la bande interdite photonique (BIP).....	37
III.4. Création d'un guide d'onde.....	37
III.5. Création une cavité.....	38
III.6. Conception un diviseur 1×2.....	40
III.7. Conception un diviseur de faisceau 1×4.....	41
III.7.1. La cavité en haut.....	42
III.7.2. La cavité en bas.....	43
III.7.3. Les guide d'onde.....	43
III.7.3.1. Les guide d'onde en haut.....	44
III.7.3.2. Les guides d'onde en bas.....	45
III.7.4. Structure finale de diviseur 1x4.....	46
III.8. Conclusion.....	47
Conclusion générale.....	49
Bibliographie.....	50
Résumé.	

Liste des figures

Chapitre I : Les cristaux photoniques

Figure I.1 : Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), Bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D)	4
Figure I.2 : Cristaux photoniques naturels : (a) Plume de paon. L'encadré de droite est une image prise au microscope électronique à balayage (MEB) de la coupe d'une barbule verte. La structure de cristal photonique 2D est composée de piliers de mélanine liés par de la kératine ainsi que de trous d'air, (b) Papillon Morpheus (c) Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodique de silice	5
Figure I.3 : Structure périodique unidimensionnel.....	3
Figure I.4 : Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnecté.....	7
Figure I.5 : Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels : (a) réseau carré (b) réseau triangulaire.....	8
Figure I.6 : La structure hexagonale (a) : graphite, La structure (b) : nitrure de Bore.....	8
Figure I.7 : Structures 3D : (a) La Yablonovite, (b) tas de bois	9
Figure I.8 : Les périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.....	10
Figure I.9 : Cristal photonique 2D (b) Une bande interdite est obtenue dans le plan lorsque toutes les bandes interdites unidirectionnelles se recouvrent	11
Figure I.10 : Réseau direct.....	12
Figure I.11 : Maille élémentaire de Wigner-Seitz du réseau direct.....	12
Figure I.12 : Construction de la zone de Brillouin irréductible.....	13
Figure I.13 : Diagramme de bande d'un cristal photonique bidimensionnel triangulaire. Les bandes en traits pleins correspondent aux modes propres ayant une polarisation Transverse Électrique, les bandes en pointillés aux modes propres ayant une polarisation Transverse Magnétique. Une large bande interdite photonique est visible pour la polarisation TE et une plus réduite pour la polarisation TM.....	14
Figure I.14 : Décomposition du champ électromagnétique dans ses deux polarisations Transverse Électrique (TE) et Transverse Magnétique (TM).....	15
Figure I.15 : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions	16
Figure I.16 : Exemple de guide W1 à cristal photonique detrous d'air	16

Chapitre II : Couplage guide et cavité

Figure II.1 : Les différents types de cavités.....	19
Figure II.2 : Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique a réseau carré.....	20
Figure II.3 : Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire	20
Figure II.4 : Exemple de cavité rectangulaire.....	21
Figure II.5 : Guide crée dans un cristal photonique bidimensionnel de réseau triangulaire en omettant quelques lignes de trous. (a) Propagation et schémas du profil de l'intensité dans le cas où le guidage se fait par BIP, (b) Propagation et schémas du profil de l'intensité dans le cas où le guidage est réfractif	22
Figure II.6 : Représentation réelle d'un guide d'onde de largeur W à base d'un CP2D	23
Figure II.7 : Exemple de guides d'ondes dans un cristal photonique hexagonal.....	24
Figure II.8 : Virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel.....	24
Figure II.9 : (a) Cavité adaptée au couplage au guide W3 et insérée dans ce guide ; (b) Son spectre de transmission ; (c) Exemple de guide à cavités couplées (dit « CROW » formée de neuf cavités H2) ; (d) Exemple de transmission en fonction de la fréquence réduite $u = a/\lambda$; (e) Défauts constitués formés d'un trou élargi et couplés à un guide W1 ; (f) Spectre recueilli à la verticale du défaut ; (g) Cavité rectangulaire couplées à un guide W1.....	26
Figure II.10 : la structure et le principe de fonctionnement d'un filtre Add- Drop ; une rangée a et 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	26
Figure II.11 : Résultats de la simulation FDTD d'un démultiplexeur en longueur d'onde : (a) longueur d'onde $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, (b) longueur d'onde $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$	27
Figure II.12 : structure d'un diviseur : (a) 1x2 avec une jonction Y, (b) 1x4 avec une jonction Y, (c) 1x2 avec une jonction T, (d) 1x4 avec une jonction T.....	28
Figure II.13 : résultats de simulation : (a) diviseur en Y (1x2), (b) diviseur en Y (1x4), (c) diviseur en T (1x2), (d) diviseur en T (1x4)	29
Figure II.14 : le diviseur a cristaux photoniques en Y (1x2).....	30
Figure II.15 : le diviseur a cristaux photoniques en T (1x2).....	30
Figure II.16 : le diviseur a cristaux photoniques en Y (1x4).....	30
Figure II.17 : le diviseur a cristaux photoniques en T (1x4).....	31
Figure II.18 : le diviseur a cristaux photoniques en Y (1x8).....	31
Figure II.19 : le diviseur a cristaux photoniques en T (1x8).....	31

Chapitre III : Diviseur a Cristaux Photoniques : Simulation et Résultat

<i>Figure III.1</i> : Paramètres de création de la rangée XZ.....	34
<i>Figure III.2</i> : présentation de la structure étudiée.....	35
<i>Figure III.3</i> : Arrangements Global.....	35
<i>Figure III.4</i> : Le tableau de l'éditeur des symboles.....	36
<i>Figure III.5</i> : la Vérification du profil d'index.....	36
<i>Figure III.6</i> : Diagramme de bandes d'un cristal photonique 2D triangulaire.....	37
<i>Figure III.7</i> : Guide d'onde $W1^K A$	37
<i>Figure.III.8</i> : Création une cavité et guide d'onde.....	38
<i>Figure III.9</i> : la fenêtre de paramètre de la simulation.....	39
<i>Figure III.10</i> : présentation de transmission.....	39
<i>Figure III.11</i> : Le spectre de transmission à la sortie du guide.....	39
<i>Figure III.12</i> : structure optimisée du diviseur 1x2 en Y.....	40
<i>FigureIII.13</i> : Le spectre de transmission du diviseur Y1×2 canal pour (a) $\lambda_1= 1.5586 \mu\text{m}$, (b) $\lambda_2= 1.5528\mu\text{m}$	41
<i>Figure III.14</i> : changement de rayon des trous dans la même cavité.....	42
<i>Figure III.15</i> : a) structure de la cavité en haut ($R_1=R_2=0.076\mu\text{m}$ $R_3=R_4=0.076\mu\text{m}$, et $R_5=0.083\mu\text{m}$). b) le déplacement des trous avec $0.6\mu\text{m}$ et $0.4\mu\text{m}$	42
<i>Figure III.16</i> :a) cavité L4. b) le déplacement des trous autour de la cavité avec $0.5\mu\text{m}$	43
<i>Figure III.17</i> : structure de la cavité en bas.....	43
<i>Figure III.18</i> : structure des guides ondes en haut	44
<i>Figure III.19</i> : Les spectres de transmission. a) port 1. b) port 2.....	44
<i>Figure III.20</i> : structure des guides ondes en bas.....	45
<i>Figure III.21</i> : Les spectres de transmission. a) port 3. b) port 4.....	45
<i>Figure III.22</i> : la structure finale de diviseur 1×4.....	46
<i>Figure III.23</i> : Répartition du champ à 5500 itération d'un diviseur en Y 1x4 excité en mode TM.....	46
<i>Figure III.24</i> : Les spectres de transmission de diviseur 1x4.....	47

Introduction générale :

Les cristaux photoniques (CP) sont des structures diélectriques ou métalliques artificielles dans lesquelles la modulation de l'indice de réfraction donne lieu à des bandes d'arrêt pour les ondes optiques dans une certaine fréquence [1]. Les CP sont désormais privilégiés en raison de leur capacité intrinsèque à contrôler la lumière pour la conception de nouveaux appareils [2]. De nombreux appareils optiques basés sur des structures CP ont été soumis, tels que des filtres optiques [3], des répartiteurs d'énergie [4], des commutateurs optiques [5, 6], des circulateurs optiques [7] des coupleurs légers [8] et des diviseurs des faisceaux. De plus, les structures CP peuvent être appliquées en tant que filtres optiques dans les multiplexeurs de longueur d'onde (WDM).

Les Cristaux photoniques ont trouvé une grande place dans l'optique intégré ce qui a conduit à la mise en œuvre de nouveau dispositif optique notamment les diviseurs de faisceau ou ils trouvent un succès inattendu [9]. En effet, ils présentent de nombreux avantages comme leurs capacité de diviser la même quantité de lumière des signaux reçu en deux, quatre ou huit canaux de sortie avec le minimum de perte, leurs bande passante large et leurs insensibilité à la variation de la température, aux perturbations électromagnétique et d'autres facteurs et par-dessus tout la simplicité de leurs mise en œuvre.

L'objet de ce mémoire est la réalisation d'un diviseur en Y 1x4 à base d'un cristal photonique bidimensionnel en utilisant les deux simulateurs de RSOF CAD, dont le premier module est basé sur la méthode des ondes planes (PWE), et le second basé sur la méthode des différences finies temporelles (FDTD).

En effet, dans un premier chapitre on va étudier le différent type de cristaux photoniques en commençant par les CPs naturels et les structures artificielles périodiques en se focalisant spécialement sur les CPs 2D. Nous nous intéressons à la notion de bande interdite photonique, au diagramme de bande et pour finir nous citons les différents domaines d'applications des CPs. à la fin de ce chapitre nous présenterons les méthodes numérique d'analyses les cristaux photoniques. Dans le deuxième chapitre, nous allons etudier les différentes structures et fonctions à base de CPs, et nous focaliserons sur les diviseurs à base de PC. Par la suite, nous présenterons quelques travaux réalisées sur les diviseurs à base CP et les différent types de diviseur.

Dans le dernier chapitre, nous allons commencer par la conception d'un diviseur à CP 1x2 à base jonction Y, en utilisant la méthode FDTD-2D. Pour arriver au but de ce travail, nous

INTRODUCTION GENERALE

allons se focaliser à la méthodologie suivie pour la conception deux diviseurs 1×2 et 1×2 , pour atteindre un diviseur en Y 1×4 .

Nous allons analyser les résultats de chaque conception avant et après optimisation et à la fin nous clôturons ce travail par une conclusion générale contenant toute les déductions faites et une référence bibliographique.

I.1. Introduction

Les cristaux photoniques (CP) ou matériaux à Bande Interdite Photonique sont des structures dont le constant diélectrique varie de manière périodique à l'échelle de la longueur d'onde, sur une ou plusieurs directions de l'espace (1D, 2D et 3D).

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 [10]. 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 [11].

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter des généralités sur les cristaux photoniques. Nous commençons en premier lieu par un historique des cristaux photoniques et une définition des cristaux photoniques. La partie suivante également présente les différents types des cristaux photoniques et leurs paramètres physiques et géométriques. Nous continuerons par une présentation des notions de bande interdite photoniques pour des cristaux photoniques bidimensionnels. Enfin, les différents types des défauts et l'analyse numérique des cristaux photoniques ont été présentées.

I.2. Généralités sur les cristaux photoniques

I.2.1. Définition

Les cristaux photoniques sont des matériaux dont l'indice de réfraction est modulé périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde, selon une ou plusieurs dimensions de l'espace (figure I-1). Ces structures peuvent être obtenues par arrangement périodique de matériaux différents. Leur forme la plus simple est une structure périodique à une dimension composée d'un empilement de couche également appelé « miroir de Bragg ». Les cristaux photoniques ont la capacité d'inhiber la propagation de la lumière dans certaines directions pour une gamme de fréquences, il en résulte une bande interdite photonique (BIP). Cette particularité optique intervient lorsque la longueur de la maille du cristal est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la lumière dans le milieu. Ce phénomène est dans une certaine mesure analogue à celui de l'ouverture de bandes interdites électroniques dans des cristaux atomiques de matériaux semi-conducteurs. On peut noter qu'il existe des cristaux photoniques naturels tels que les opales.

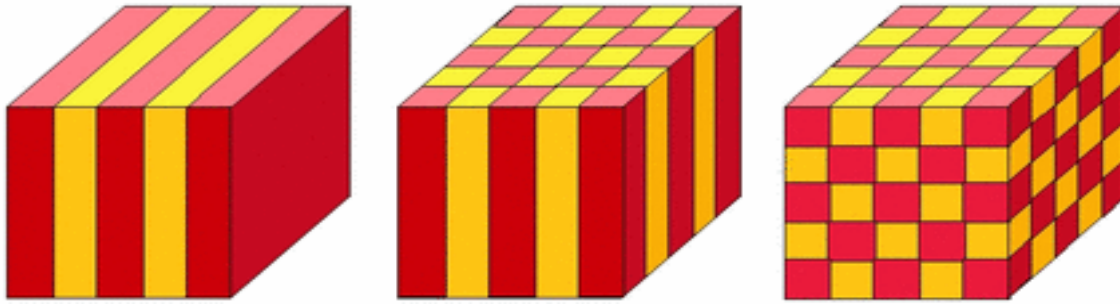


Figure I.1 : Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), Bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D) [12].

I.2.2. 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 XIXe 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 [13].

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° 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 [14]. C'est en cela que *Yablonovitch* est considéré comme le "père" des cristaux photoniques [15].

I.2.3. Les cristaux photoniques naturels

Les cristaux photoniques existent également à l'état naturel à l'intérieur de complexes minéraux tels que les opales, et à l'intérieur de systèmes biologiques tels que les yeux de certains céphalopodes sous forme de réseaux périodiques de bâtonnets, les plumes de paon faites de cristaux de kératines ou encore les ailes de certains papillons et insectes. En effet, la nature présente des structures périodiques auto-organisées qui ne possèdent pas un contraste d'indices suffisant : c'est le cas de l'opale minérale naturelle. L'opale est une roche constituée

de microbilles de silice réparties selon un arrangement plus ou moins régulier. De fait, c'est un cristal photonique naturel, même si celui-ci n'a pas de bande interdite complète [12].

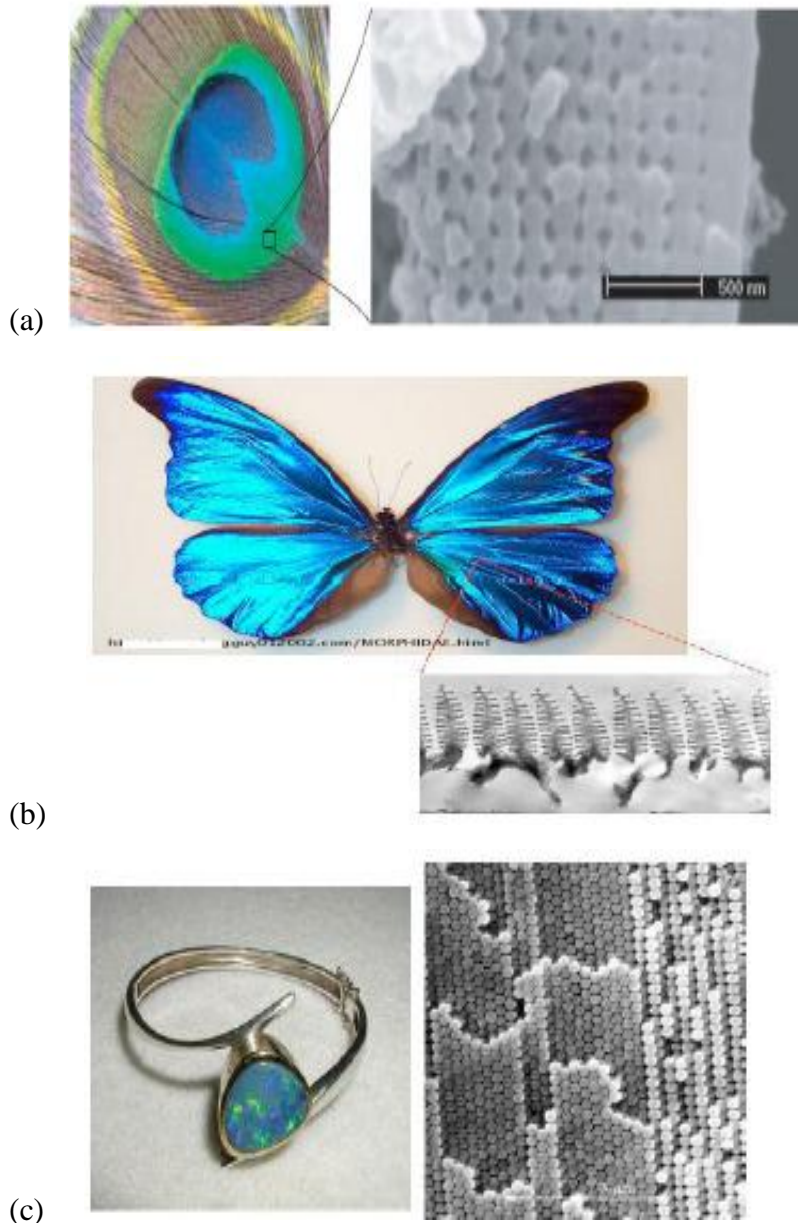


Figure I.2 : Cristaux photoniques naturels : (a) Plume de paon. L'encadré de droite est une image prise au microscope électronique à balayage (MEB) de la coupe d'une barbule verte. La structure de cristal photonique 2D est composée de piliers de mélanine liés par de la kératine ainsi que de trous d'air, (b) Papillon Morpheus (c) Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodique de silice [16].

I.2.4. Analogie électron photon

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

$$\nabla \cdot (\varepsilon(r)E(r,t)) = 0 \dots\dots\dots I-1$$

$$\nabla \cdot H(r,t) = 0 \dots\dots\dots I-2$$

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

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

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

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

L'équation (I-5) est l'analogie formelle de l'équation de Schrödinger décrivant le mouvement des électrons dans le potentiel périodique d'un cristal, $H(r)$ étant l'analogie électromagnétique de la fonction d'onde électronique $\psi(r)$ et $\varepsilon(r)$ l'analogie du potentiel atomique $V(r)$ [12].

I.3. Différents types des cristaux photoniques

I.3.1. La structure périodique unidimensionnelle

Cette structure est le dispositif périodique le plus simple. Il est connu sous le nom de « Miroir de Bragg ». Il consiste en une alternance de couches planes de diélectrique d'épaisseur $\lambda_g/4$ où λ_g représente la longueur d'onde guidée dans le matériau (figure I- 3) [17].

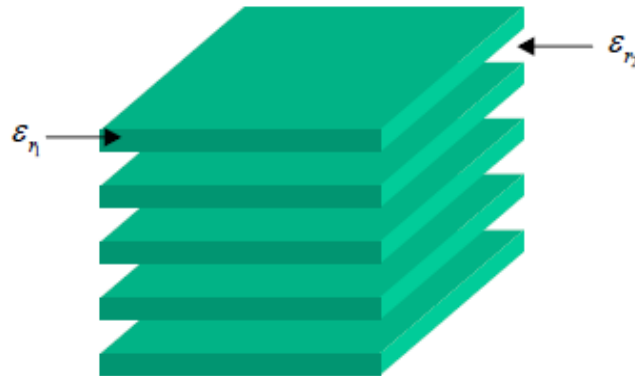


Figure I.3 : Structure périodique unidimensionnel.

I.3.2. Les cristaux photoniques bidimensionnels

Les cristaux photoniques à deux dimensions sont composés d'un réseau périodique de piliers diélectriques dans l'air (structure déconnectée) ou de trous d'air percés dans une matrice diélectrique (structure connectée) (Figure I. 4) [18].

a. La structure connectée

Les structures dites « connectées » est constituée par des trous d'air percés dans une membrane diélectrique comme il est montré sur (la figure I.4 (a)), dans ce cas les motifs élémentaires sont d'indice n_1 inférieur à l'indice n_2 de la matrice diélectrique.

b. La structure déconnectée

Les structures dites « déconnectées » sont des structures dont lesquelles l'indice du motif élémentaire n_1 est supérieur à l'indice n_2 de l'espace inter motifs comme il est représenté sur la figure I.4 (b). Elles sont constituées de tiges diélectriques ou métalliques alignées périodiquement dans l'air.

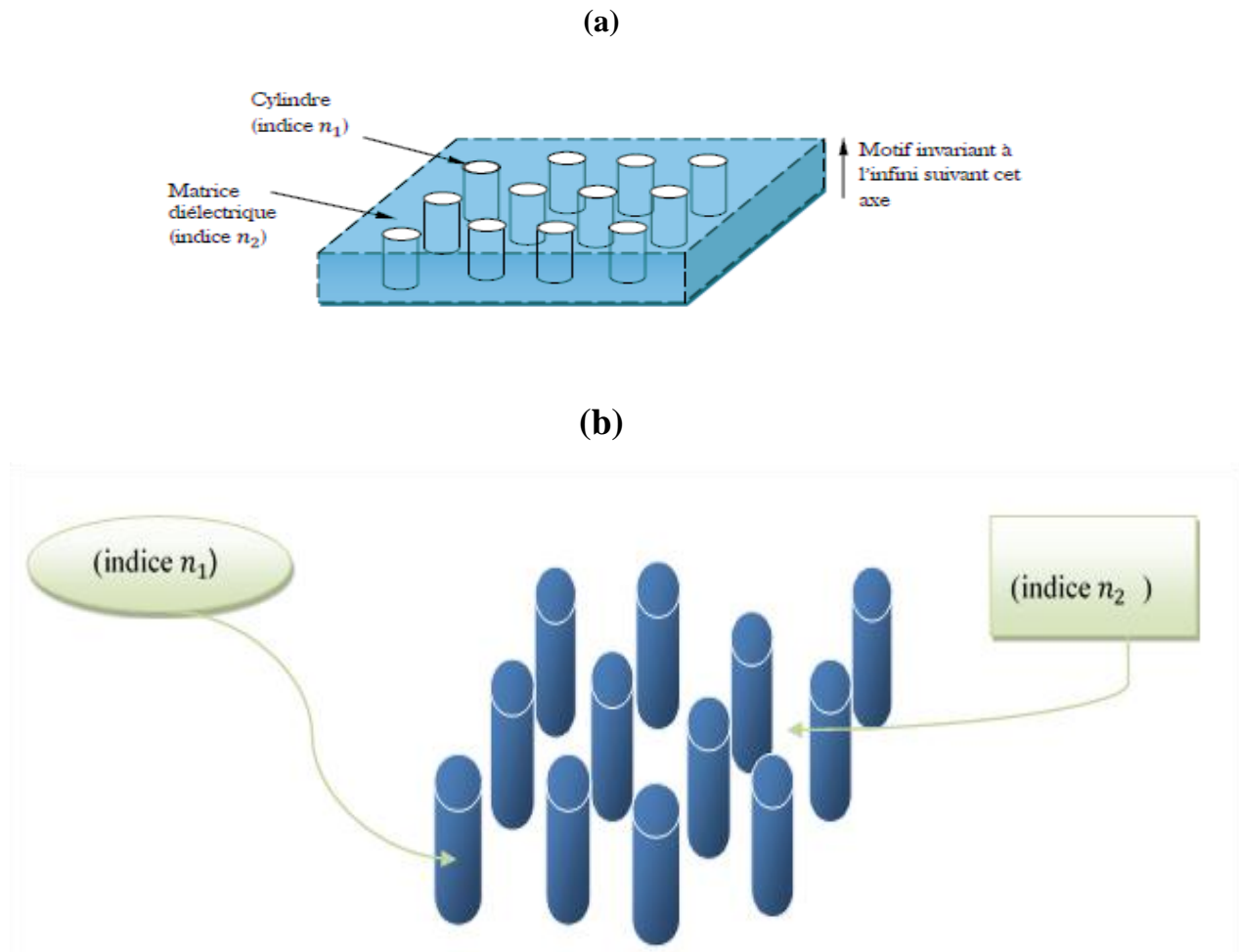


Figure I.4 : Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnecté.

I.3.2.1. Différentes familles des cristaux photoniques bidimensionnelles

Les réseaux périodiques à deux dimensions se regroupent principalement suivant trois familles :

- **Le réseau carré :** Les nœuds du réseau sont situés sur un carré de côté « a » (Figure I.5.a).

- **Le réseau triangulaire** : Chaque nœud du réseau est espacé de son proche voisin d'une même distance « a » (figure I.5.b).
- **Le réseau hexagonal** : si tous les nœuds sont identiques et espacés de « a » il y a deux structures :

La structure graphite (figure I.6.a) et la structure nitrure de Bore (figure I.6.b).



Figure I.5 : Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels : (a) réseau carré
(b) réseau triangulaire

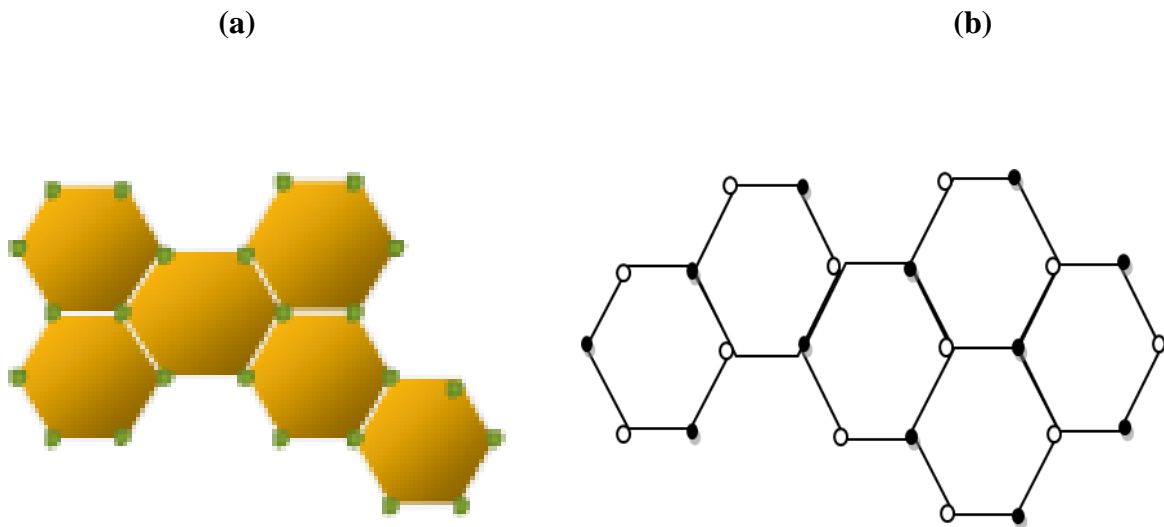


Figure I.6 La structure hexagonale (a) : graphite, La structure (b) : nitrure de Bore.

I.3.3. Cristaux photoniques tridimensionnels

Les cristaux photoniques 3D sont 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* [16]. Il était formé de sphères de silicium arrangées selon une structure diamant. Mais l'histoire retient généralement la célèbre *Yablonovite*, structure 3D pour les micro-ondes fabriquée en 1993 par *E.Yablonovitch* [13] en perçant des trous dans du plexiglas selon trois angles azimutaux séparés de 120° . De nombreuses méthodes de fabrication

des cristaux photoniques tridimensionnels ont été proposées. Les deux suivantes ont attiré le plus d'efforts de recherche (figure I-7).

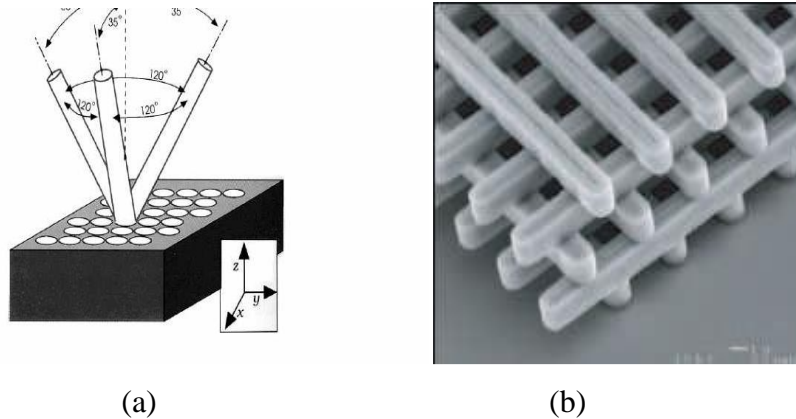


Figure I. 7 : Structures 3D : (a) La Yablonovite, (b) tas de bois [19].

I.4. 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. Les quantités représentatives de ces différentes caractéristiques sont :

I.4.1. Le contraste d'indice Δn

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

$$\Delta n = n_h - n_l$$

Avec n_h : l'indice de réfraction du matériau de haut indice.

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

I.4.2. Les 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 ϵ_1 et a_2 l'épaisseur de la couche de permittivité ϵ_2 .

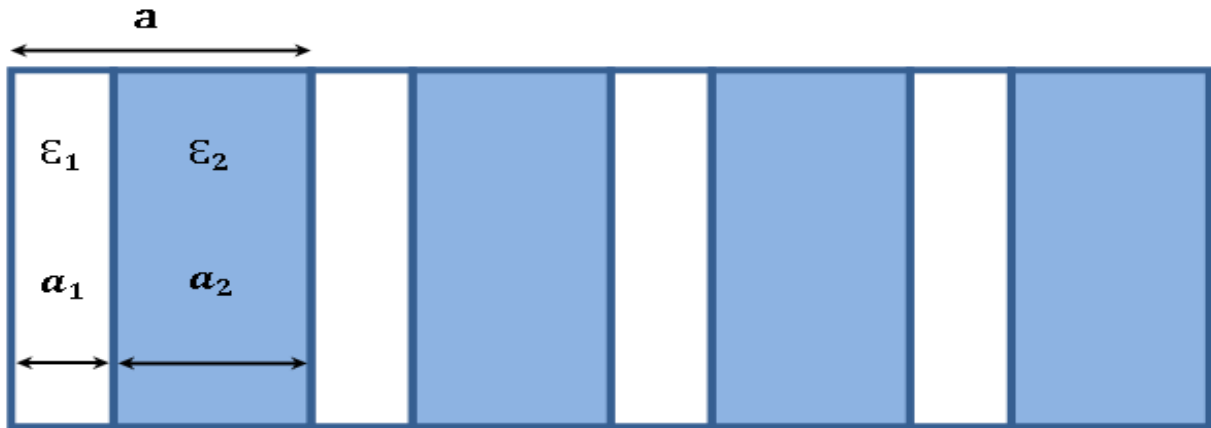


Figure I.8 : Les périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.

Peut être comparé au largeur du potentiel périodique. 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 de l'arrangement des atomes dans un semi-conducteur.

I.4.3. Le facteur de remplissage f

Peut être comparé au largeur du potentiel périodique. 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 de l'arrangement des atomes dans un semi-conducteur.

I.5. La bande interdite photonique

Pour obtenir une bande d'énergie interdite dans toutes les directions du plan ou de l'espace il faut que la périodicité de l'indice diélectrique étendue à deux ou trois dimensions. Considérons le cas d'un cristal photonique bidimensionnels représenté sur la (figure I.9). Quelle que soit la direction de propagation dans le plan d'une onde électromagnétique, celle-ci voit une structure diélectrique périodique. A chaque direction d'incidence k_i 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 Pour obtenir une bande interdite dans tout l'espace, un cristal photonique 3D est nécessaire. Pour ouvrir une bande

interdite dans le plan, 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.

Le second paramètre qui joue un rôle très important sur la largeur de la bande interdite est le contraste d'indice. Pour obtenir des bandes d'énergies interdites larges, il faut que le contraste soit suffisamment grand. Pour un réseau triangulaire de trous d'air et un contraste d'indice supérieur à 2.6 est nécessaire à l'ouverture d'une bande interdite dans tout le plan. Aux longueurs d'onde du proche infrarouge utilisées en optique intégrée, les semi-conducteurs possèdent à la fois un fort indice de réfraction et une faible absorption représente donc un choix idéal pour la réalisation de cristaux photoniques à ces longueurs d'onde.

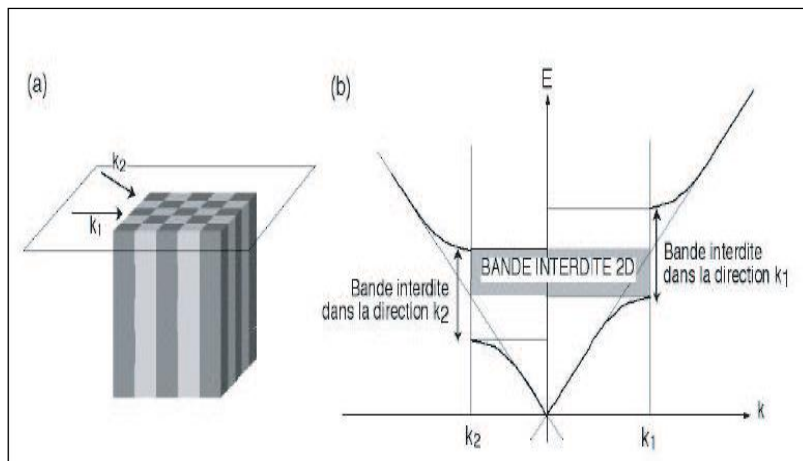


Figure I.9 : Cristal photonique 2D (b) Une bande interdite est obtenue dans le plan lorsque toutes les bandes interdites unidirectionnelles se recouvrent [18].

I.6 Diagrammes de bandes

Pour calculer les diagrammes de bandes il faut considérer pour chaque cristal, toutes les directions de propagation possibles. Comme en physique du solide [20], on montre que pour certaines symétries du cristal, on peut limiter l'étude aux vecteurs d'ondes k situés à l'intérieur d'une zone restreinte appelée zone de Brillouin irréductible. Le vecteur k varie le long des directions de hautes symétries de cette zone qui fait partie du réseau réciproque.

Nous allons définir dans la section suivante le réseau réciproque et la zone de Brillouin. Considérons une structure périodique à deux dimensions représentée sur la (figure I.10).

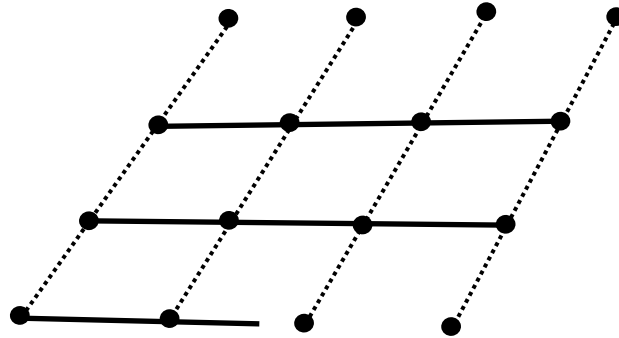


Figure I.10 : Réseau direct.

Sur cette figure apparaissent neuf mailles élémentaires, l'ensemble de ces mailles constitue un réseau direct. Nous pouvons obtenir une maille élémentaire de même surface de la manière suivante :

- on trace les lignes qui relient un nœud donné à tous ses voisins
- on trace les médiatrices de ces segments.

Le plus petit volume enclos de cette façon est la maille élémentaire de *Wigner-Seitz* [21] comme le montre la (figure I.11).

De cette façon nous pouvons obtenir le réseau réciproque de n'importe quelle structure. Tout l'espace peut aussi être rempli par ces mailles.

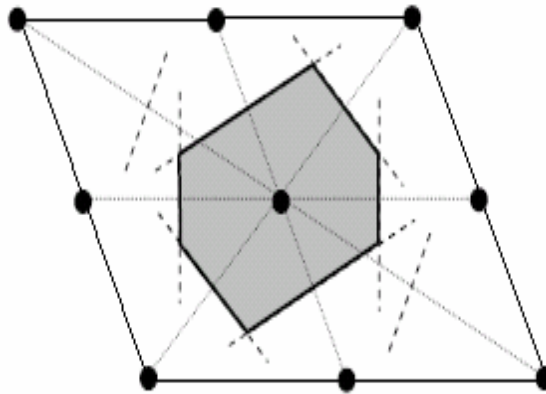


Figure I.11 : Maille élémentaire de Wigner-Seitz du réseau direct.

La fréquence des ondes planes se propageant dans un milieu bidimensionnel forme une fonction périodique du vecteur a^p , qui définit la direction de propagation, dans le réseau

réciroque. La plus petite aire issue de ces vecteurs a^p est une zone fondamentale qui s'appelle : *la première zone de Brillouin*.

Pour construire cette zone, nous plaçons au centre de la cellule d'origine G du réseau réciroque pour tracer des vecteurs joignant l'origine aux nœuds voisins de ce même réseau. Nous construisons ensuite les médiatrices de ces vecteurs [22]. La plus petite aire interceptée par ces médiatrices est la zone de Brillouin irréductible (figure I.12). La zone de Brillouin irréductible contient l'ensemble des vecteurs d'ondes du photon qui permettent de décrire de façon complète le diagramme de bandes.

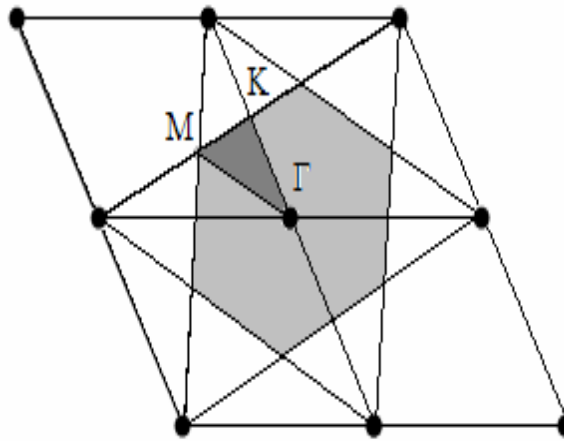


Figure I.12 : Construction de la zone de Brillouin irréductible.

La zone de Brillouin irréductible (gris foncé) correspond à un triangle dont les sommets sont les points de haute symétrie de l'espace réciroque Γ , M et K . Pour définir la structure de bande du cristal photonique correspondant à ce réseau, on représentera la variation de fréquence des différents modes propres en fonction du module du vecteur d'onde le long des directions de haute symétrie ΓM , ΓK et KM .

Dans le cas d'un réseau triangulaire de trous d'air dans une matrice de diélectrique ($\epsilon=12$) et pour un rapport $r/a=0.4$ avec r le rayon des trous et a la période du réseau, le diagramme de bande se représente de la manière suivante (Fig.I.13) :

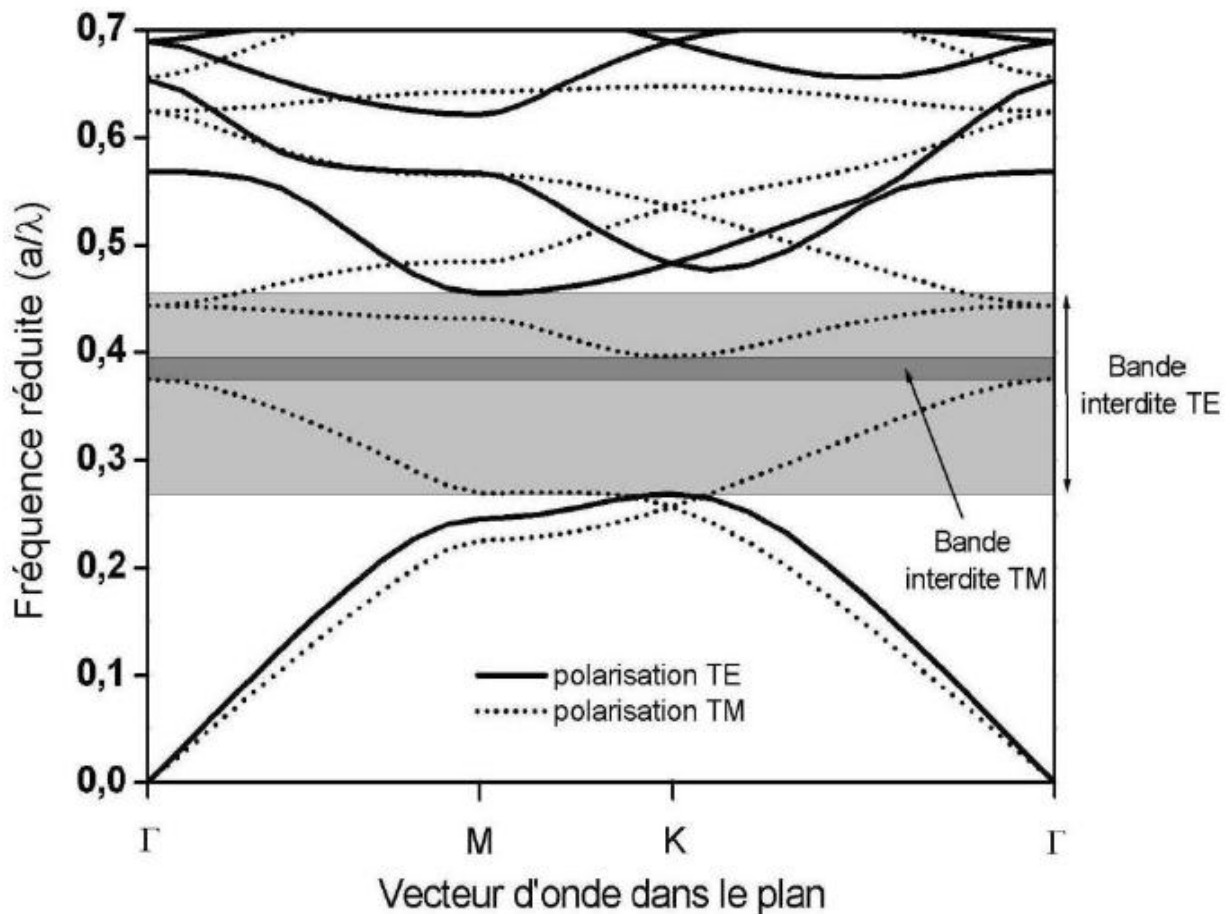


Figure I.13 : Diagramme de bande d'un cristal photonique bidimensionnel triangulaire. Les bandes en traits pleins correspondent aux modes propres ayant une polarisation Transverse Électrique, les bandes en pointillés aux modes propres ayant une polarisation Transverse Magnétique. Une large bande interdite photonique est visible pour la polarisation TE et une plus réduite pour la polarisation TM [23].

Le diagramme de bande représente les variations des fréquences permises dans le réseau en fonction de la projection du vecteur d'onde suivant les directions de haute symétrie de celui-ci. Le diagramme est représenté en unités réduites. En effet, la loi d'échelle permet de transposer les propriétés des cristaux photoniques à tous les domaines de fréquences pourvu que la période et la longueur d'onde soient modifiées dans les mêmes proportions.

Pour interpréter le diagramme de bande, il convient tout d'abord de prendre en compte l'influence de la polarisation de la lumière. En effet selon que l'on considère la polarisation Transverse Electrique (TE) ou Transverse Magnétique (TM) (voir Figure 1.14) les bandes énergétiques permises ou interdites seront différentes. On peut par exemple montrer qu'une structure constituée d'un réseau triangulaire de cylindres de permittivité élevée plongé dans une

matrice de permittivité plus faible conduit à l'apparition d'une large bande interdite photonique pour la polarisation 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 dans une des directions du réseau mais pas dans les autres.

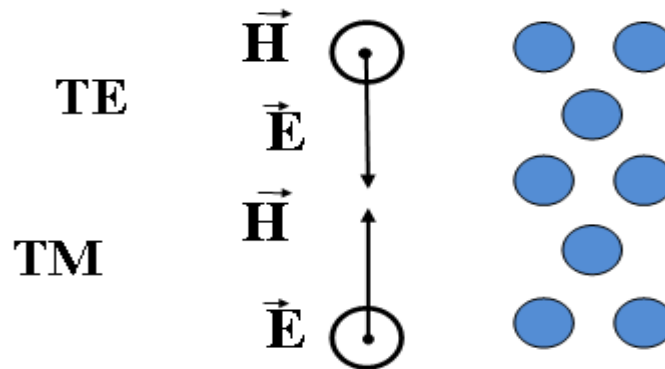


Figure I.14 : *Décomposition du champ électromagnétique dans ses deux polarisations Transverse Électrique (TE) et Transverse Magnétique (TM).*

Dans la plupart des cas l'intérêt d'un cristal photonique provient de sa capacité à interdire la propagation de la lumière. Il est donc hautement désirable de travailler avec un cristal qui présente la bande interdite la plus complète possible.

I.7. Les défauts

Comme pour les semi-conducteurs, l'existence d'un défaut dans la périodicité du cristal va entraîner l'apparition de niveaux permis, appelés modes de défauts dans la bande interdite. La création d'un défaut consiste à briser localement la périodicité spatiale du réseau en ajoutant ou en enlevant localement un peu de matière diélectrique. Dans le cas d'un réseau de trous, le défaut consiste en l'omission d'un ou de plusieurs trous. On peut aussi créer des défauts en modifiant le rayon des trous.

Selon le nombre de trous modifiés, on peut distinguer plusieurs types de défauts dont les principaux sont les suivants :

I.7.1. Les défauts ponctuels

Les défauts ponctuels sont créés en modifiant les caractéristiques d'une cellule du Réseau. Pour reprendre la terminologie de la physique du cristal, on peut réaliser alors des défauts lacunaires ou de substitution Figure I.15. Cela correspond à une microcavité à l'intérieur du

cristal photonique. Pour les cristaux photoniques constitués de trous dans un matériau diélectrique, nous pouvons agir sur la géométrie de ces trous [24].

Les modes électromagnétiques introduits par le défaut sont appelés modes de défaut. La transmission de ces modes a été étudiée par *Joanopoulos et al*, qui ont montré théoriquement que les propriétés des modes de défauts peuvent être contrôlées en modifiant la taille et le type de défauts [25].

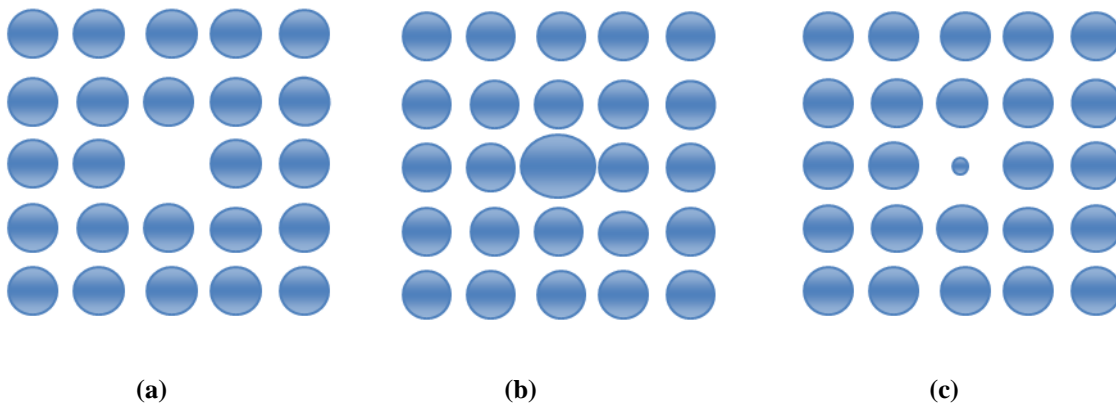


Figure I.15 : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions [25].

I.7.2. Les défauts étendus

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 omettre une ou plusieurs lignes de trous [25].

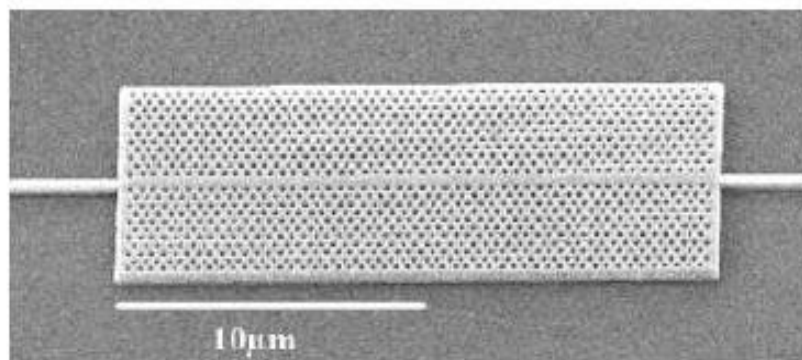


Figure I.16 : Exemple de guide W1 à cristal photonique de trous d'air [26].

I.8. Analyse numérique des cristaux photonique

Les matériaux à gaps photoniques semblent très prometteurs puisqu'ils permettent une amélioration des performances de nombreux systèmes existants (antennes, filtres, coupleurs).

Cependant, la complexité de la fabrication et de la caractérisation de structures à cristaux photoniques aux fréquences optiques rendent coûteuses en temps et en argent les études expérimentales systématiques sur des dispositifs à cristaux photoniques. Pour cela, le développement des méthodes de modélisation optiques précises et rapides reste donc primordial pour l'étude de ces structures. En effet, Les différentes méthodes utilisées pour décrire la propagation des ondes électromagnétiques dans les cristaux photoniques dérivent des méthodes standards utilisées en électromagnétique ou en physique de l'état solide. La modélisation des cristaux photoniques passe par le calcul des diagrammes de dispersion, de la réflexion et de la transmission. Selon la taille (finie ou infinie) et la dimensionnalité (1D, 2D, 3D) du cristal photonique, on peut trouver dans la littérature plusieurs méthodes pour l'étude de ces matériaux [27,28] : Méthode des ondes planes (PWM) ; Méthode des différences finies temporelles (FDTD) ; Méthode des matrices de transfert (MMT) ; Méthode des matrices de diffraction (MMD) ; Méthode des modes couplés (MMC). Parmi toutes ces méthodes, les plus répandues pour la modélisation des cristaux photoniques sont la méthode des ondes planes et la méthode FDTD [18].

I.8.1. Méthode des ondes planes

Dans les cristaux photoniques, la méthode des ondes planes est la méthode de référence pour le calcul des bandes interdites. Elle est bien adaptée pour des structures périodiques de dimensions infinies pour la détermination des modes propres et du diagramme de dispersion de la structure. La méthode des ondes planes permet de calculer la densité d'états et elle permet aussi de calculer, pour chacun des modes dans la structure, la distribution des champs magnétiques et électriques. En pratique, on définit la structure d'un réseau périodique par une cellule de base et l'on répète cette cellule suivant les directions voulues pour former un cristal photonique parfait exempts de défauts de périodicité qui couvre l'espace entier. Dans le cas du cristal infini avec défauts (ponctuel ou linéaire), le calcul par la méthode des ondes planes est possible en introduisant la périodicité brisée par le défaut lui-même. En effet, on place le défaut au centre d'une cellule de dimension plus grande que celle de base comprenant plusieurs rangées du cristal, cette cellule est appelée super cellule. Si on répète cette super cellule dans l'espace suivant les directions du cristal d'origine on se ramène donc à un arrangement périodique de défauts séparés par des régions de cristal photonique parfait (cas des cavités ou guides d'onde[30]).

I.8.2. Méthode des Différences Finies Temporelles FDTD-2D

La méthode numérique des différences temporelles ou FDTD (Finite Difference in the Time Domain) a été développée par Yee en 1966 [29]. Cette technique est utilisée généralement en électromagnétisme permettant une résolution numérique des équations de Maxwell sans aucune inversion au niveau de la matrice dans le domaine temporel dans l'espace cartésien suivant le repère (OX, OY, OZ). Dans notre cas (cristal photonique 2D) la résolution se fait suivant le repère (OX, OY), cette méthode peut simuler le comportement d'une onde magnétique des matériaux diélectriques ainsi que celui des différents types de matériaux tels que les métaux ou les plasmas.

I.8.2.1. Les avantages d'une méthode FDTD-2D

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

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 offrant 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 [9].

I.9. Conclusion

Ce chapitre étudié théoriquement les concepts généraux sur les cristaux photoniques. Ces matériaux, dont la constante diélectrique varie périodiquement sur une ou plusieurs directions de l'espace. Nous commençons par la définition et l'historique des cristaux photoniques. Ensuite on a présenté les différents types de cristaux photoniques et leurs paramètres physiques et géométriques, en seconde lieu, nous avons présenté les notions de bandes photoniques nécessaires. Par ailleurs, une présentation des défauts aux niveaux des cristaux photoniques pour l'application dans les domaines des optiques et télécommunications. Enfin, les méthodes pour la simulation des cristaux photoniques ont été présentées.

Dans la partie suivante nous allons étudier les propriétés théoriques des fonctions à base de cristaux photoniques tel que les filtres, les démultiplexeurs et les diviseurs à cristaux photoniques dans le but de comprendre leurs comportements fréquentiels et spatiaux.

II.1. Introduction

Un diviseur à cristaux photoniques est un élément optique utilisé pour diviser la lumière en plusieurs sorties, chacun avec les caractéristiques de l'onde optique originale (excepté la puissance et l'angle de la propagation). Un diviseur à cristaux photoniques peut produire de l'un ou l'autre une rangée à une dimension de faisceau ($1 \times N$) ou une matrice à deux dimensions de faisceau ($M \times N$), selon le modèle diffractif sur l'élément [31].

Dans ce chapitre, nous avons présenté les cavités et les guides à cristal photonique. Ensuite nous nous intéresserons au couplage entre eux (couplage guide-cavité). Puis nous avons présenté les applications de cristaux photoniques sur les filtres et les démultiplexeurs, enfin nous avons étudié les diviseurs à cristaux photoniques et leurs types.

II.2. Les cavités à cristaux photoniques

Durant ces dernières années et pour le cas de cristaux photoniques bidimensionnels réalisés dans un réseau triangulaire de trous d'air, il y a plusieurs types de cavités à cristaux photoniques attrayantes pour de nombreux chercheurs. En regard de leur structure morphologique, 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 :

II.2.1. Cavité hexagonale

La cavité de type H_n est une cavité hexagonale dont chaque côté présente une omission de n trous. Ainsi, un seul trou manquant correspondra à H_1 , sept trous manquants à H_2 , ...etc. (Figure II.1) [32].

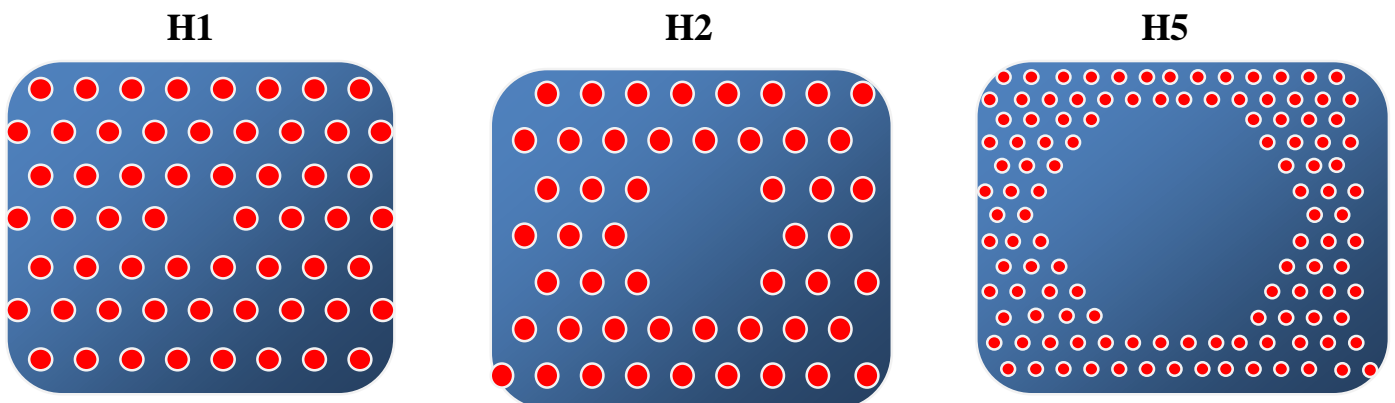


Figure II.1 : Les différents types de cavités.

II.2.2. 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 [33].

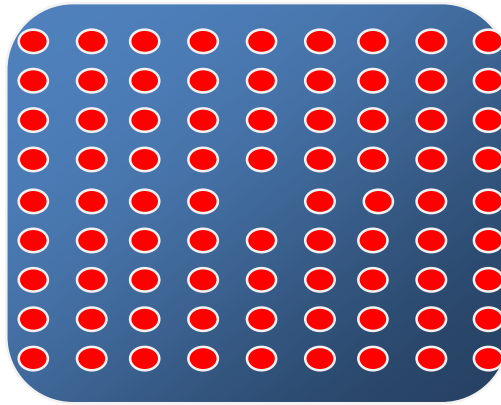


Figure II.2 : Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique a réseau carré.

II.2.3. Cavité triangulaire

La figure II.3 représente la cavité triangulaire, cette cavité est obtenue en omettant plusieurs trous dans un réseau triangulaire de trous d'air plongé dans une membrane diélectrique.

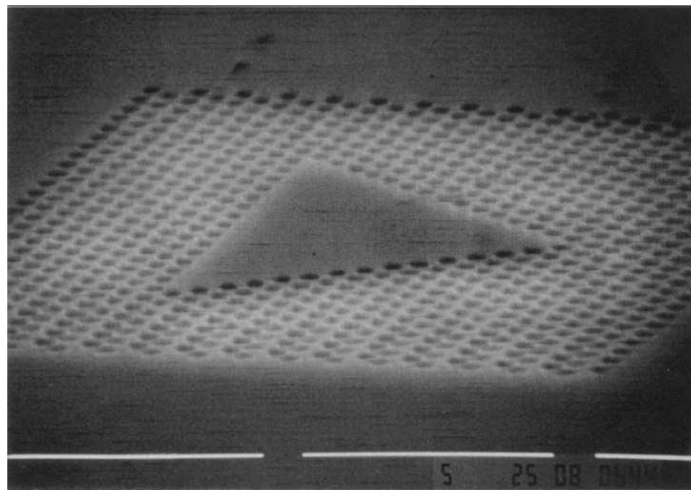


Figure II.3 : Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire [14].

II.2.4. Cavité rectangulaire

La figure II.4 représente une cavité rectangulaire correspondant à l'omission de 3 rangées finies de trous dans le CP.

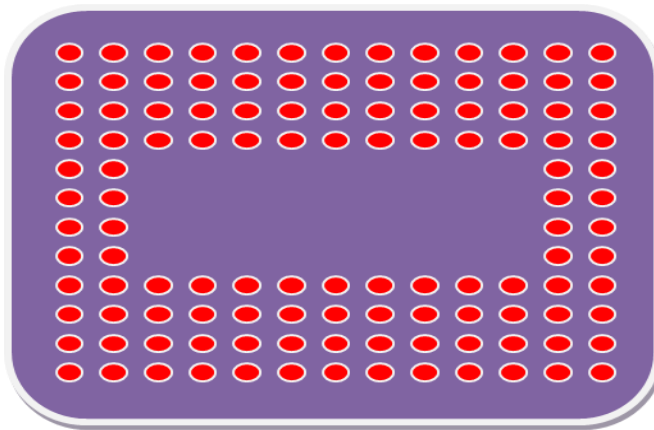


Figure II.4 : Exemple de cavité rectangulaire.

II.3. Guides d'ondes dans les cristaux photoniques

Le développement d'une optique intégrée à base de cristaux photoniques 2D passe par la conception et la réalisation de guides optiques performants. La première idée des guides d'ondes est apparue en 1994 sous l'impulsion de *Joannopoulos*, Meade et al, mais les premières réalisations sont été effectuées cinq à six ans plus tard [34].

Il est important de souligner que le mécanisme de guidage est complètement différent de celui existant dans les guides d'ondes classiques, puisque ce n'est pas la réflexion totale due à la différence d'indice de réfraction qui assure le guidage, mais l'existence d'une bande interdite photonique.

II.3.1. Guide à cristal photonique

En introduisant un défaut linéaire (omission d'une ou de plusieurs rangées de trous) dans un cristal photonique, il est possible de constituer des guides optiques au sein de ce cristal. Un photon restera confiné dans le guide si son énergie est située à l'intérieur de la bande interdite. On appelle W_n les guides d'ondes, où n est le nombre de rangées de trous manquantes : Un guide W_1 correspond à un cristal photonique ayant une rangée manquante. Dans ces guides à cristaux photoniques, le processus de guidage de la lumière est différent de celui des guides d'onde classiques, où le guidage est assuré par réflexion totale interne, il est déterminé par la propagation des modes de Bloch. Dans ce cas, les modes sont guidés par le phénomène de bande interdite. Les réflexions multiples sur les motifs du cristal localisent la lumière au niveau de la zone de défaut. Le mécanisme de guidage dans ce type de guide n'est pas toujours assuré par la présence de la BIP, il peut être affecté par la réflexion totale interne, et cela, selon la nature de la structure du matériau à bande interdite photonique utilisée. Dans la structure de

trous (où le guide est formé par une rangée de trous manquante), l'indice de réfraction du cœur du guide à cristal photonique est plus élevé que celui du matériau constituant la gaine photonique. Dans ce cas, le guidage met en jeu des réflexions multiples sur le cristal photonique, mais, les propriétés modales des modes de Bloch seront affectées par la réflexion totale interne. Le guidage s'effectuera donc par effet BIP et par réflexion totale interne (figure II.5), le guide est alors multimode aux longueurs d'onde correspondant aux bandes interdites de la gaine photonique, car il existe au moins deux modes dus à chacun des deux types de propagation. Il en résulte un bon couplage entre le guide diélectrique et le guide à CP, puisque les mécanismes de guidage des deux types de guides se ressemblent. D'autre part, le guide à cristal photonique dans la structure à tiges (où le guide est formé par une rangée de tiges manquante) a un cœur d'indice de réfraction plus faible que celui des gaines. Dans ce cas, le mécanisme de guidage ne peut pas être de nature réfractive. La lumière est guidée dans le cœur, car elle ne peut pas se propager dans les gaines qui présentent une bande interdite photonique. Le guidage s'effectuera donc par réflexions multiples sur le matériau à bande interdite photonique, le guidage par effet BIP est le seul type de guidage opérant dans cette structure, le guide peut être donc monomode. Le couplage sera pauvre puisque les mécanismes de guidage des deux types de guides sont très différents, même si les deux guides ont la même largeur.

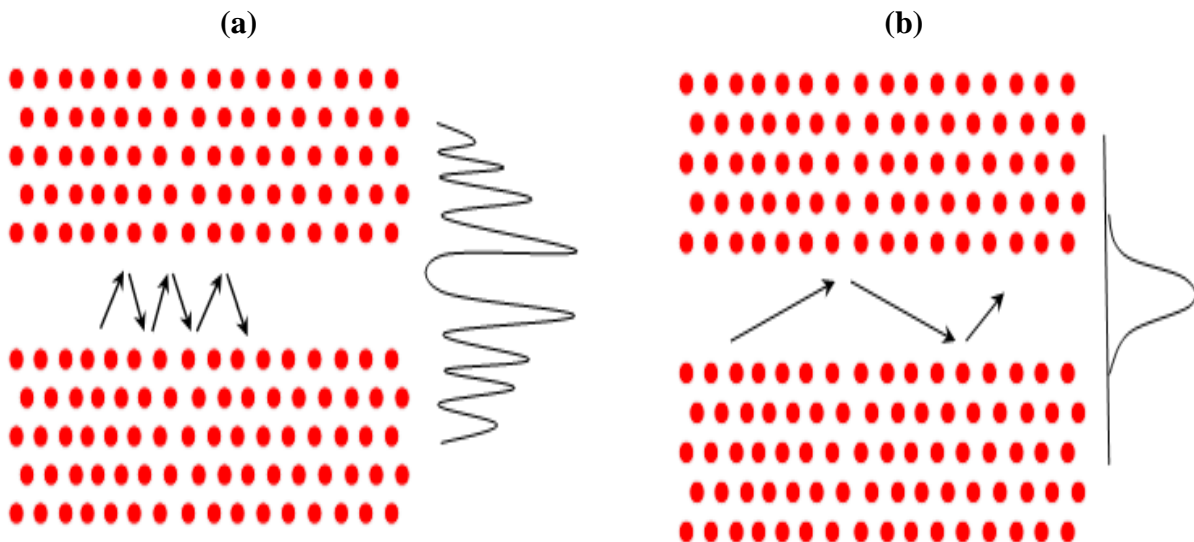


Figure II.5 : Guide créé dans un cristal photonique bidimensionnel de réseau triangulaire en omettant quelques lignes de trous. (a) Propagation et schémas du profil de l'intensité dans le cas où le guidage se fait par BIP, (b) Propagation et schémas du profil de l'intensité dans le cas où le guidage est réfractif.

II.3.2. Différents types des guides d'ondes

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 II.6). 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 des courbures.

En effet, il existe une grande variété de guides à cristal photonique. En regard de leur structure géométrique, on peut globalement classer ces guides en deux grandes classes :

II.3.2.1. Guide d'onde linéique

Les guides à cristaux photoniques sont obtenus en créant un défaut linéique dans le cristal. Au sein de ces défauts, des modes ayant une fréquence appartenant à la bande interdite photonique peuvent exister. Pour des cristaux photoniques bidimensionnels, un guide à cristal photonique peut être créé en retirant (ou modifiant) directement une ou plusieurs rangées de motifs du cristal photonique (Figure II.6) [19]. Les guides formés de l'omission d'une ligne de trous sont appelés W1, ceux de deux lignes de trous W2, etc. ...

Deux exemples sont rapportés sur la figure II.7 dans le cas d'un cristal 2D hexagonal.

-Le premier exemple (Figure II.7(a)) représente un défaut obtenu en retirant une rangée de motifs dans la direction ΓM .

-Le deuxième exemple (Figure II.7(b)) correspond à un défaut obtenu en retirant une rangée de motifs dans la direction ΓK .

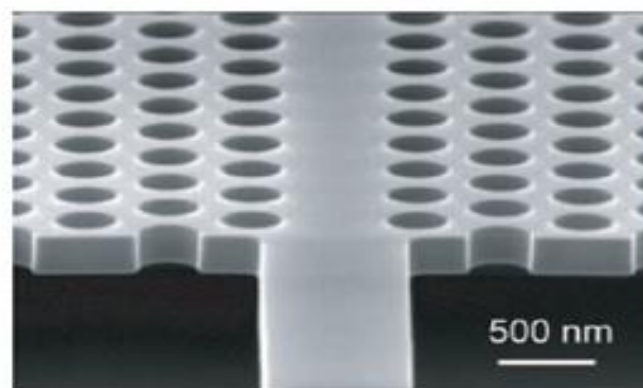


Figure II.6 : Représentation réelle d'un guide d'onde de largeur W à base d'un CP2D [33].

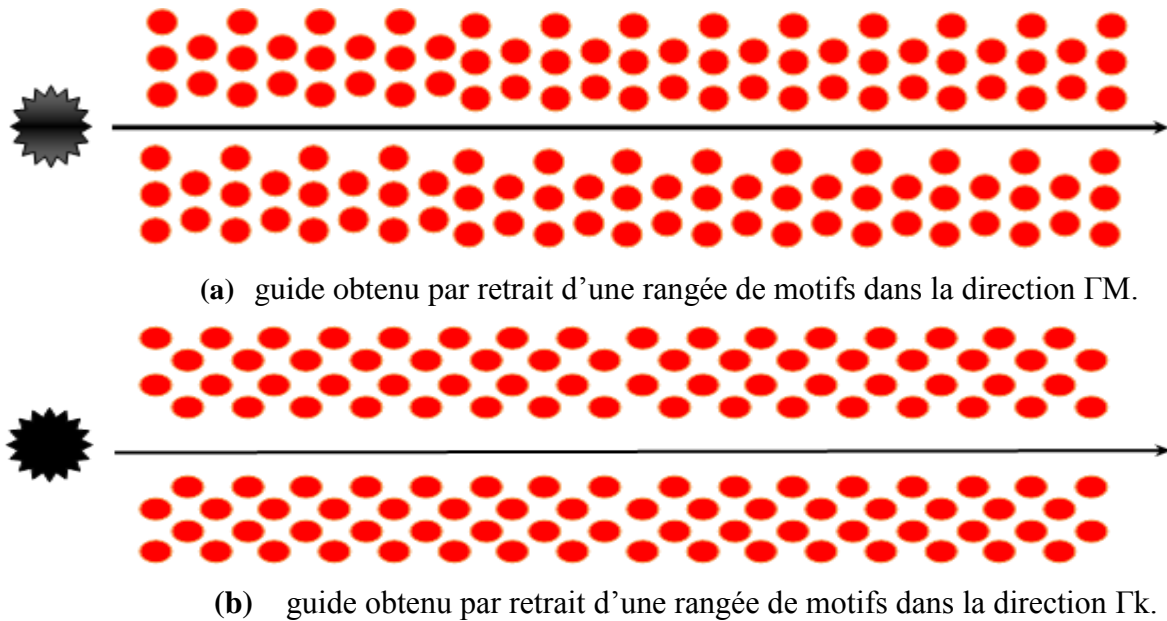


Figure II.7 : Exemple de guides d'ondes dans un cristal photonique hexagonal.

II.3.2.2. Guide d'onde courbée

Les guides courbés constituent également un domaine d'application privilégié des cristaux photoniques car ils permettent théoriquement de réaliser des virages avec des rayons de courbure de l'ordre de la longueur d'onde (figure II.8). Dans le guide virage il y a des problèmes de réflexion et les pertes subsistent, ces virages peuvent être réalisés simplement en omettant de graver des trous dans les directions de symétrie du cristal (virages à 60 et 120°). Dans le cas des virages simples à 60°, les meilleurs résultats mesurés ont été des transmissions d'environ 80 à 90 % pour un guide étroit (W1) [23].

Le virage peut être amélioré en ajoutant ou supprimant des trous ou encore en modifiant la topologie du coude.

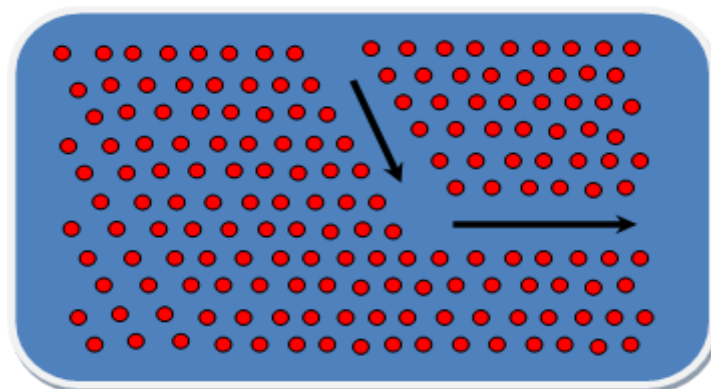


Figure II.8 : Virage réalisé dans un cristal photonique bidimensionnel.

La démonstration expérimentale du guidage dans des virages a été réalisée rapidement, mais des problèmes de réflexion et de pertes subsistent. Dans le cristal photonique hexagonal ou triangulaire, ces virages peuvent être réalisés simplement en omettant de graver des trous dans les directions de symétrie du cristal virage. Dans le cas des virages simples, les meilleurs résultats mesurés sont été des transmissions d'environ 80 à 90 % pour un guide étroit (une rangée de trous omise) et de 78 % pour un guide plus large [33].

II.4. Couplage cavité / guide dans un cristal photonique 2D

Trouver un système capable d'insérer et d'extraire sélectivement une longueur d'onde est le but de couplage d'une cavité au « monde extérieur », le couplage d'un guide à CP et d'une cavité à CP est notamment l'un des schémas privilégiés. Bien que certaines configurations proposées semblent des résultats d'intérêt pour diverses applications (figure II.9). Parmi les réalisations marquantes, on peut citer :

- Des cavités H_2 ou H_3 mises en cascades avec des guides, les cavités H_n se couplent aux guides W_k par les « pointes » de ce champ, ce qui, intuitivement, n'est pas favorable. La cavité donnée en exemple (figure II.9(a) et II.9(b)) remédie à cet inconvénient, au détriment d'une taille plus grande.
- Un guide à cavités couplées dit CROW pour (Coupled Resonator Optical Waveguide) (figure II.9(c)) et ses effets de mini bandes interdites (mini gaps) de transmission, bien visibles sur le spectre présenté (figure II.9 (d)). Il s'agit, en fait, d'un bon système de test pour la photonique avec, en particulier, la possibilité de contrôler la vitesse de groupe par le degré de couplage entre cavités.
- Une cavité comportant un seul trou modifié, en l'occurrence agrandi, et couplée à un guide type W_1 (Figure II.9(e)). Le retrait sélectif (drop) d'une longueur d'onde avec un facteur de qualité de près de 500 a été obtenu. La difficulté de cette réalisation est d'atteindre le couplage critique, c'est-à-dire, celui où les pertes par rayonnement de la cavité vers l'air sont égales aux pertes vers le guide. Cela semble nécessiter une précision de fabrication au-delà du commun. On peut noter qu'aucun résultat marquant n'a été obtenu avec H_1 couplé à un guide.
- Des cavités rectangulaires (tronçons de W_1), elles-mêmes couplées à un guide de type W_1 (Figure II.9(g)). Le but recherché est le même que précédemment : atteindre les conditions de couplage critique.

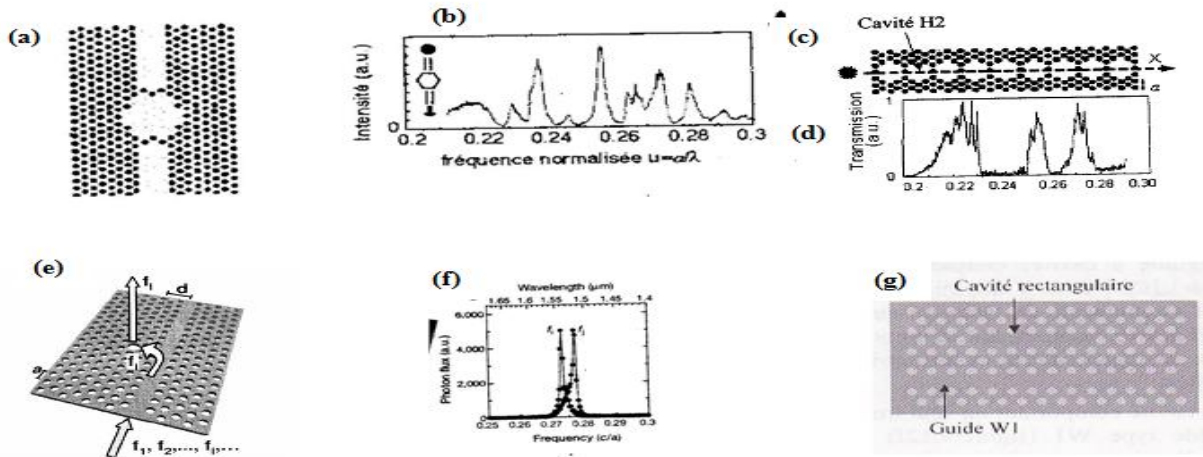


Figure II.9 : (a) Cavité adaptée au couplage au guide W3 et insérée dans ce guide ; (b) Son spectre de transmission ; (c) Exemple de guide à cavités couplées (dit « CROW » formée de neuf cavités H2) ; (d) Exemple de transmission en fonction de la fréquence réduite $u = a / \lambda$; (e) Défauts constitués formés d'un trou élargi et couplés à un guide W1 ; (f) Spectre recueilli à la verticale du défaut ; (g) Cavité rectangulaire couplées à un guide W1 [35].

II.5. Les Filtres

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 II.10), représente une cavité résonante couplée par recouvrement des ondes évanescentes à des guides d'onde, cette structure appelée un filtre 'Add-Drop'.

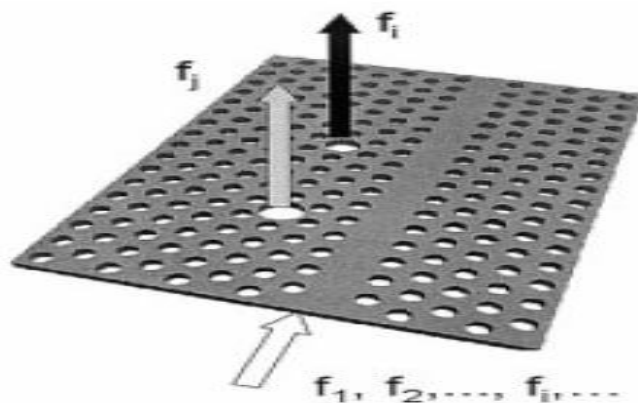


Figure II.10 : la structure et le principe de fonctionnement d'un filtre Add- Drop ; une rangée a et éliminée pour guider les ondes avec des fréquences $f_1, f_2, \dots, f_i, \dots$. Et les défauts ponctuels pour extraire les fréquences désirées f_i, f_j [18].

II.6. Un démultiplexeur pour les longueurs d'ondes 1,31 μm et 1,55 μm

Une méthode pour la conception d'un démultiplexeur en longueur d'onde à base des cristaux photoniques 2D pour la séparation des impulsions ultra-courtes du canal est proposée [34]. La méthode est basée sur l'analyse des cartes de bandes interdites photoniques complète qui permet de sélectionner les paramètres géométriques du démultiplexeur. Le dispositif sépare efficacement les canaux avec des longueurs d'onde 1,31 μm et 1,55 μm (Figure II. 11).

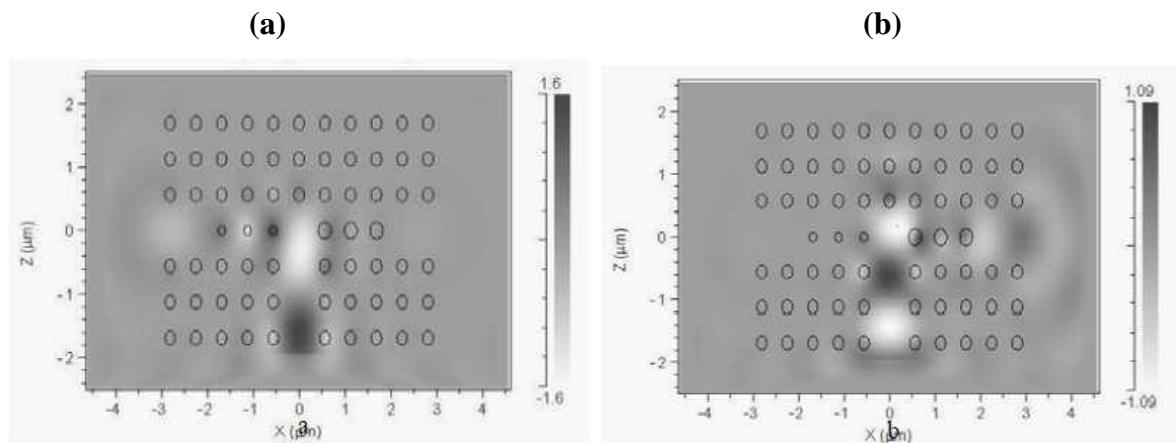


Figure II.11 : Résultats de la simulation FDTD d'un démultiplexeur en longueur d'onde :

(a) longueur d'onde $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, (b) longueur d'onde $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$. [34].

II.7. Le diviseur a cristaux photoniques

II.7.1. Définition

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 cascadiant [36]. 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* [37].

L'autre type de diviseur de faisceau est le MMI (MultiMode Interference). Le principe de fonctionnement est décrit par *Soldano* [38]. Il consiste en un guide d'entrée juxtaposé à une portion de guide plus large et multimode. Cette région supporte un grand nombre de modes qui se propagent avec différentes vitesses de phase, conduisant à des interférences lors de la propagation avec des zones de forte et de faible intensité. Les guides de sortie sont placés à la position des pics de haute intensité. Ce composant est donc capable de diviser un signal d'un seul guide d'onde vers plusieurs guides de sortie. Il peut également recombinaison les signaux en

provenance d'un grand nombre de guides d'entrées vers un seul ou plusieurs guides de sorties. Ce type de diviseur a cristaux photoniques montre l'avantage d'avoir de plus faibles pertes de l'ordre de 1 à 2 dB pour des diviseurs de 1 vers 2 jusqu'à 1 vers 8.

II.7.2 Travaux réalisés sur les diviseurs à base de cristaux photoniques

Après de nombreuses recherches sur les diviseurs à base de cristaux photoniques, nous avons aperçus quelques travaux effectués au par avant. Donc, nous nous sommes inspirés par ces travaux pour étudier notre sujet en terme de méthodes, résultats de simulation obtenus, et finalement tirer de quelques idées utiles pour la conception des diviseurs à base des cristaux photoniques bidimensionnels à maille élémentaire de type triangulaire.

Dans un premier temps, nous avons présenté les résultats de simulation pour la jonction T et la jonction Y en utilisant les diviseurs 1x2 et 1x4. La structure est présentée sur la Figure II.12 [39] :

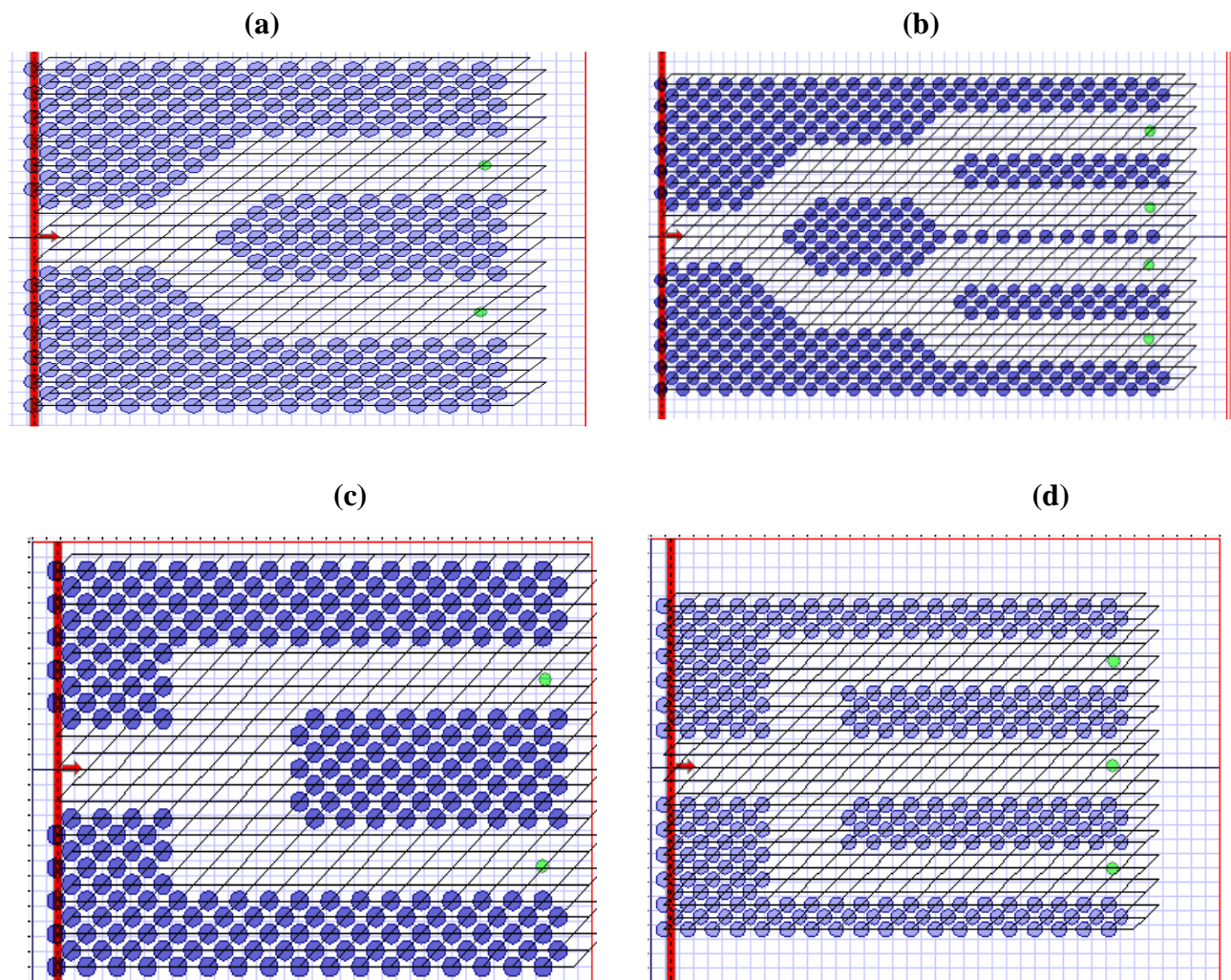


Figure II.12 : structure d'un diviseur : (a) 1x2 avec une jonction Y, (b) 1x4 avec une jonction Y, (c) 1x2 avec une jonction T, (d) 1x4 avec une jonction T.

Les paramètres géométriques des quatre structures sont les suivantes : la constante de réseau $a = 0.435 \mu\text{m}$, le rayon de trous du cristal photonique $R = 0,128 \mu\text{m}$, le diamètre du port d'entrée optimisé $D = 1,02 \mu\text{m}$.

Les résultats de simulation des diviseurs sont prélevés uniquement sur la longueur d'onde $\lambda_1 = 1,55 \mu\text{m}$ (mode TE). L'évolution du champ magnétique Hz est présentée sur la figure II. [9].

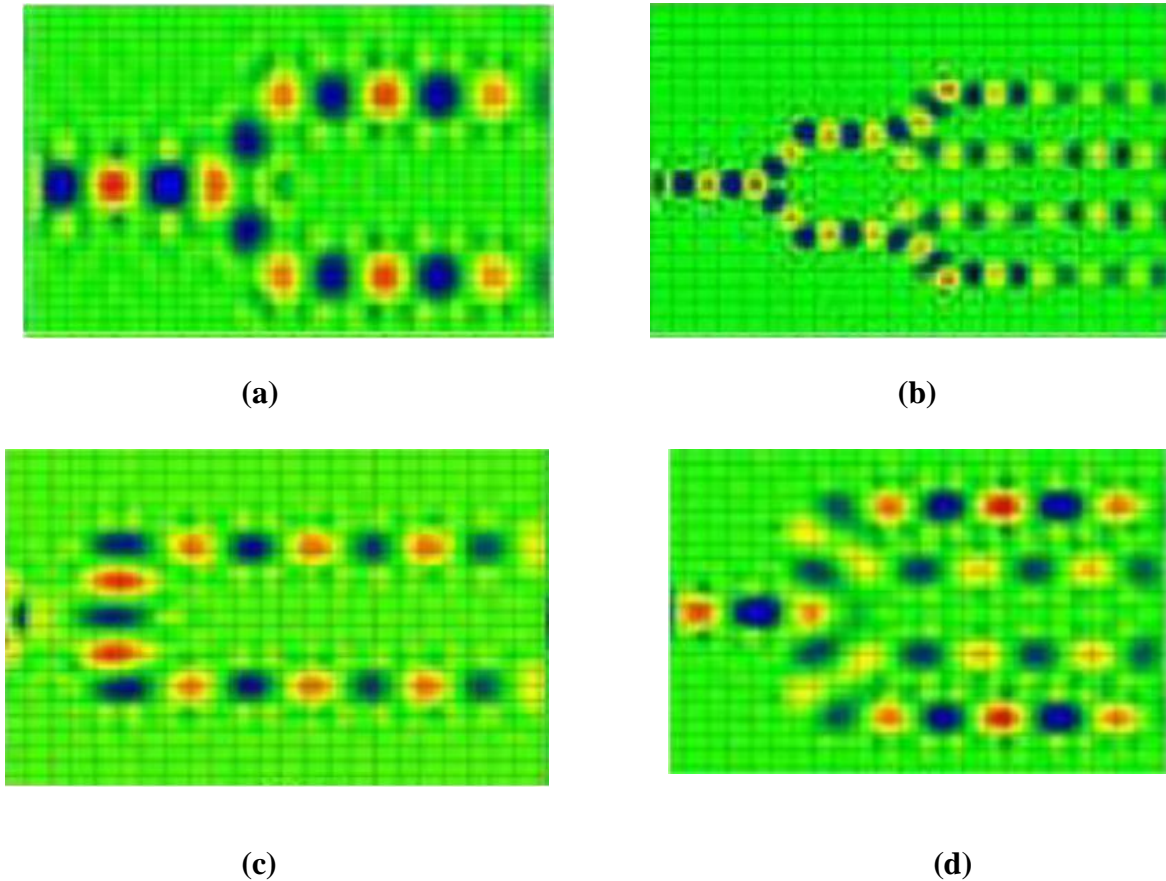


Figure II.13 : résultats de simulation : (a) diviseur en Y (1x2), (b) diviseur en Y (1x4), (c) diviseur en T (1x2), (d) diviseur en T (1x4) [9].

Les résultats de la simulation révèlent que pour le cas idéal (mailles triangulaires), à la sortie de chaque port dans le diviseur en T (1x2), l'intensité du champ magnétique a atteint les 46.4% ayant comme puissance totale de 92.8% de la puissance injectée à l'entrée alors que pour le diviseur en T (1x4) la somme des puissances prélevée s'est réduite et enregistrée à 83%. Pour la jonction en Y, les résultats sont nettement mieux par rapport à la jonction en T. En effet la somme des intensités à la sortie des ports a atteint les 100% pour le diviseur (1x2) et 86% pour le diviseur (1x4).

II.7.3. Différent types de diviseur à cristaux photoniques

Dans la suite, nous pouvons présenter les différents types de diviseur à cristaux photoniques, notamment :

-Les diviseurs a cristaux photoniques en Y (1x2)

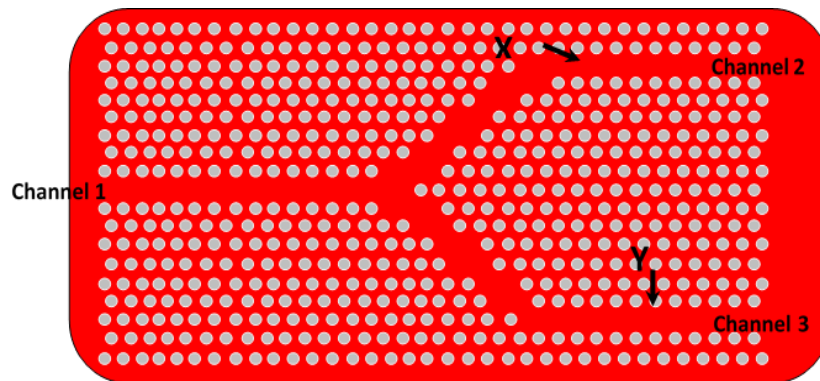


Figure II.14 : le diviseur a cristaux photoniques en Y (1x2).

-Les diviseurs à cristaux photoniques et en T (1x2)

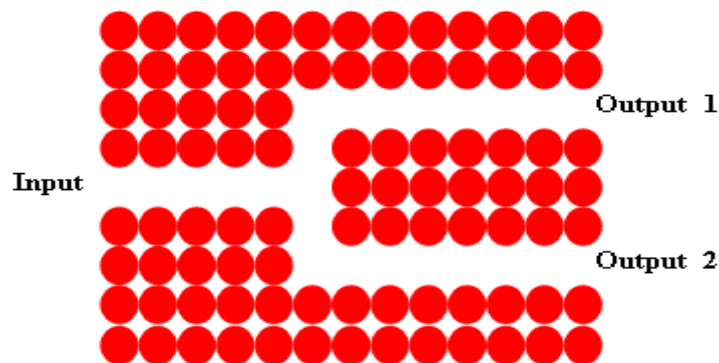


Figure II.15 : le diviseur a cristaux photoniques en T (1x2).

-Les diviseurs a cristaux photoniques en Y (1x4)

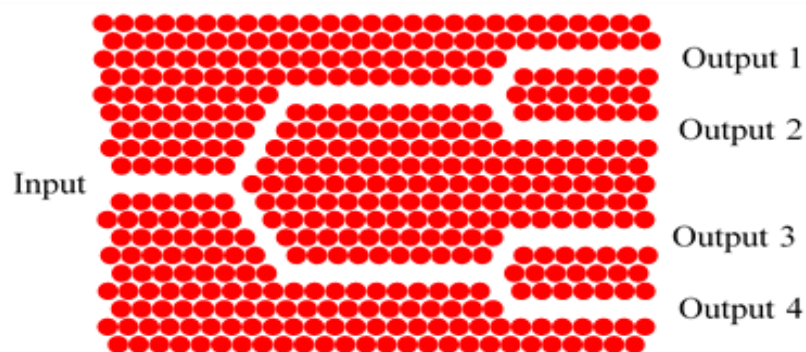


Figure II.16 : le diviseur a cristaux photoniques en Y (1x4).

-Les diviseurs à cristaux photoniques en T (1x4)

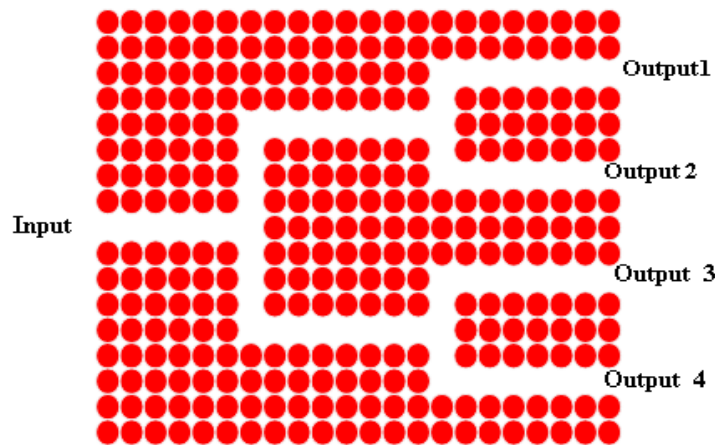


Figure II.17 : le diviseur a cristaux photoniques en T (1x4).

-Les diviseurs a cristaux photoniques en Y (1x8)

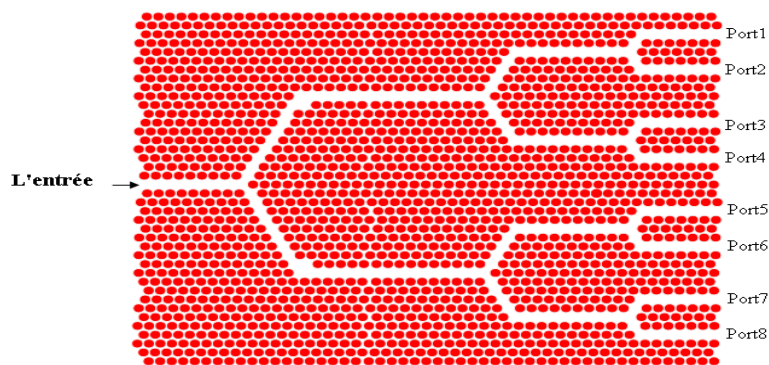


Figure II.18 : le diviseur a cristaux photoniques en Y (1x8).

-Les diviseurs à cristaux photoniques en T (1x8)

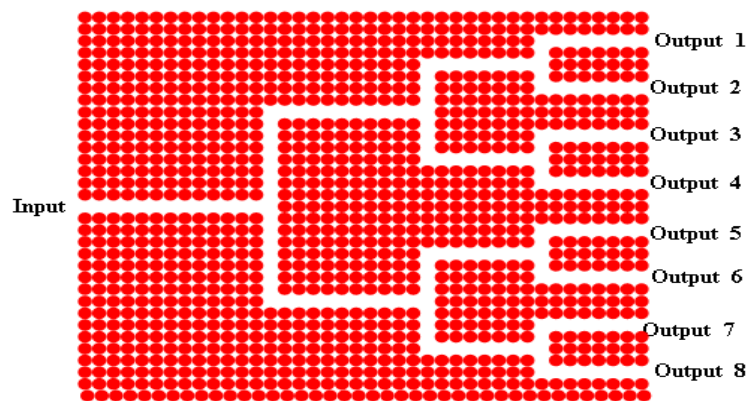


Figure II.19 : le diviseur a cristaux photoniques en T (1x8).

II.8. Conclusion

Les cristaux photoniques sont très prometteurs pour la réalisation des composants optiques planaires. Ces matériaux représentent une plate-forme extrêmement intéressante pour l'optique intégrée. En effet, la miniaturisation des composants optiques pour l'intégration exige le contrôle des modes de propagation des ondes électromagnétiques dans ces cristaux (mode de défauts).

Dans ce chapitre nous avons étudié les cavités à cristaux photoniques et les guides d'ondes à cristaux photoniques et le couplage guide – cavité. Nous avons également présenté des applications à cristaux photoniques comme les filtres et les démultiplexeurs. Nous terminons notre étude théorique par une étude de diviseur à cristaux photoniques et leurs types de jonction T et Y.

Chapitre III

Résultat et

interprétation

III .1. Introduction

Les cristaux photoniques bidimensionnels permettent de réaliser un grand nombre de fonctions optiques, telles que : les guides d'ondes, les diviseurs de faisceau, les filtres, les coupleurs, ... etc. Avec l'évolution de l'optique intégrée, les diviseurs ont eu une place indispensable dans les circuits utilisés dans les réseaux optiques. La structure de base d'un diviseur consiste à diviser une entrée ou on injectera le signal optique en un ensemble de sorties ou le champ sera diviser à part égale dans le cas idéal.

L'objectif principal de cette étude est réaliser un composant optique considéré comme une brique essentielle dans les applications WDM (Wavelength Division Multiplexing). Il s'agit d'un diviseur 1x4 en utilisant des jonctions en Y ou le canal du diviseur est obtenu par la suppression des rangées ou suppression des trous et changer le rayon des trous.

Nous nous intéresserons dans ce chapitre à la conception d'une jonction en (Y1x4) formé par la combinaison de deux diviseurs en Y 1x2 obtenus chacun par l'intersection de deux guides d'ondes à cristaux photoniques mono-rangée afin d'assurer un comportement monomode sur toute la gamme spectrale couverte par la bande interdite photonique. Nous commençons par la présentation des différents types de cavité et guide d'onde pour former ce diviseur de faisceau à CP, ensuite les propriétés de ces structures photoniques sont numériquement étudiées en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel à deux dimensions (FDTD-2D).

III.2. Présentation de la structure étudiée

En premier lieu, nous avons réalisé un couplage guide cavité puis une conception un diviseur en Y 1x2 formé d'une seule entrée et deux ports de sortie. Nous avons modélisé et analysé la structure du dispositif proposée pour optimiser la longueur d'onde d'espacement des canaux.

Le cristal photonique est un réseau à maille triangulaire de trous d'air (structure connecté) percés dans une membrane de silicium (Si) d'épaisseur 230 nm sur une couche de silice (SiO₂) d'épaisseur 1000nm (SOI). Les paramètres du réseau donné comme suit : $R= 115$ nm et $a =420$ nm de constante de réseau. Le dispositif photonique est composé de 29x37 trous d'air dans le plan (x-z) [11]. Dans la conception et la simulation, nous avons utilisé FDTD pour la simulation numérique bandsolve et full-wave. Pour les simulations 2D FDTD, nous avons attribué un indice effectif de $N_{eff} = 2.8$ au matériel diélectrique dans le CP.

La lumière se propage dans la direction z . La structure est excitée par la polarisation TM. Les étapes de l'espace dans les directions x et z sont Δx et Δz . Le maillage FDTD utilisé dans la simulation est un $a/20$, et dans ce travail, on prend $\Delta x = \Delta z = a/20 = 0.021 \mu\text{m}$, où a , est la constante du réseau. Le temps d'échantillonnage est sélectionné pour assurer la stabilité numérique de l'Algorithme [11]. Le pas de temps pour la structure 2D est déterminé par :

$$\Delta t \leq \frac{1}{c * \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}}$$

Où C la vitesse de la lumière dans l'espace libre.

III.2.1. La création de la structure étudiée

Dans l'interface de CAD, on choisit (**Utility/Array layout**) la disposition 2D XZ sur menu de CAD et on place les paramètres comme indiqué sur la figure III.1

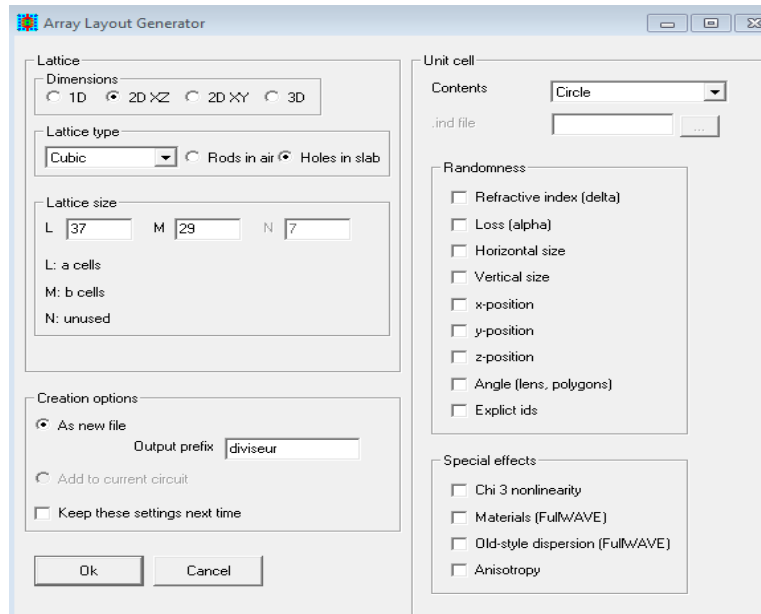


Figure III.1 : Paramètres de création de la rangée XZ

Après crée les paramètres on va cliquer sur OK.

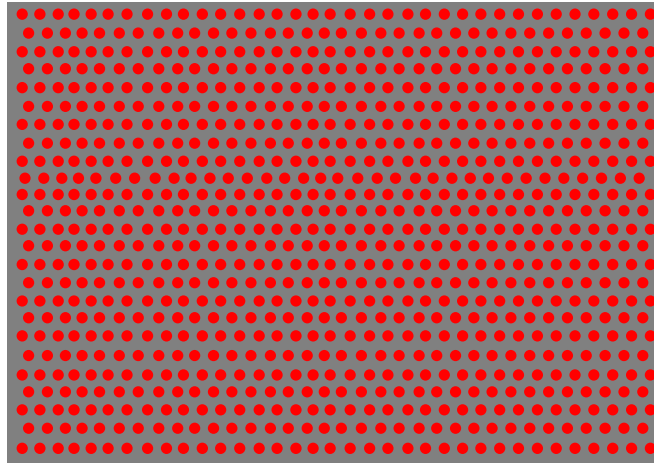


Figure III.2 : présentation de la structure étudiée.

III.2.2. Personnalisation du réseau

Le bouton global d'arrangements d'édition permet de définir les propriétés du réseau. Dans cet exemple, nous allons créer les trous dans l'air circulaires ($n=1$) plongés dans un diélectrique Si-SiO₂ ($N_{\text{eff}}=2.8$). En outre Largeur du composant 0.5, et la longueur d'onde de l'espace libre est de 1.55 μm (voir Figure III.3).

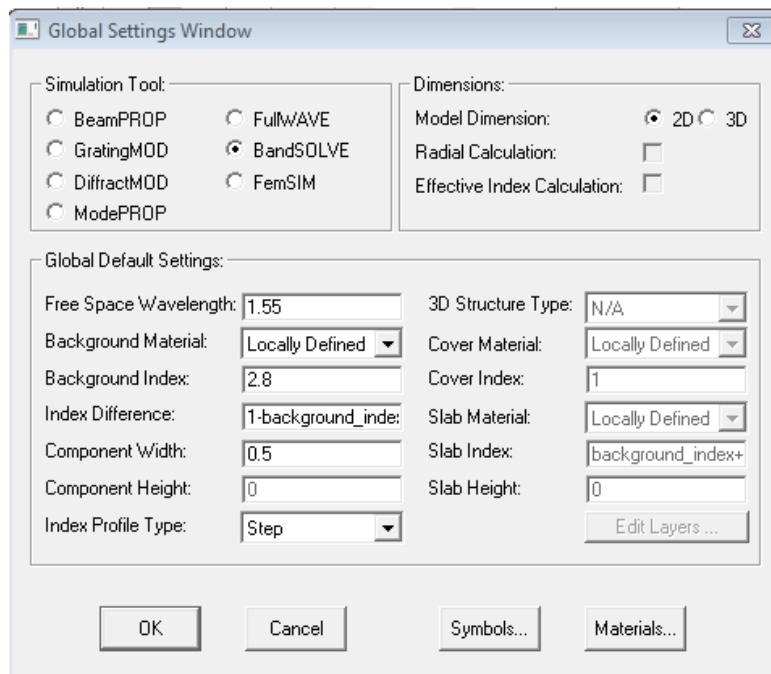


Figure III.3 : Arrangements Global.

III.2.3. Créer Des Variables

On clique sur l'icône **de symboles** d'édition dans la fenêtre de CAD. Ceci ouvrira (symbole Table Editor) comme montré dans la figure III.4. On fait varier la période a et le rayon r .

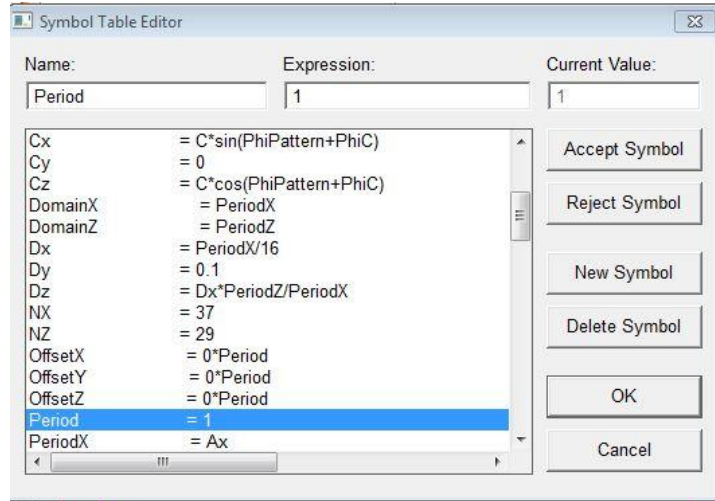


Figure III.4 : Le tableau de l'éditeur des symboles.

III.2.4. Vérification du profil d'index

Pour vérifier la distribution d'index de la structure qu'on a créé. On appuie sur le bouton de profil d'index. La structure obtenue est sur la figure III.5(b).

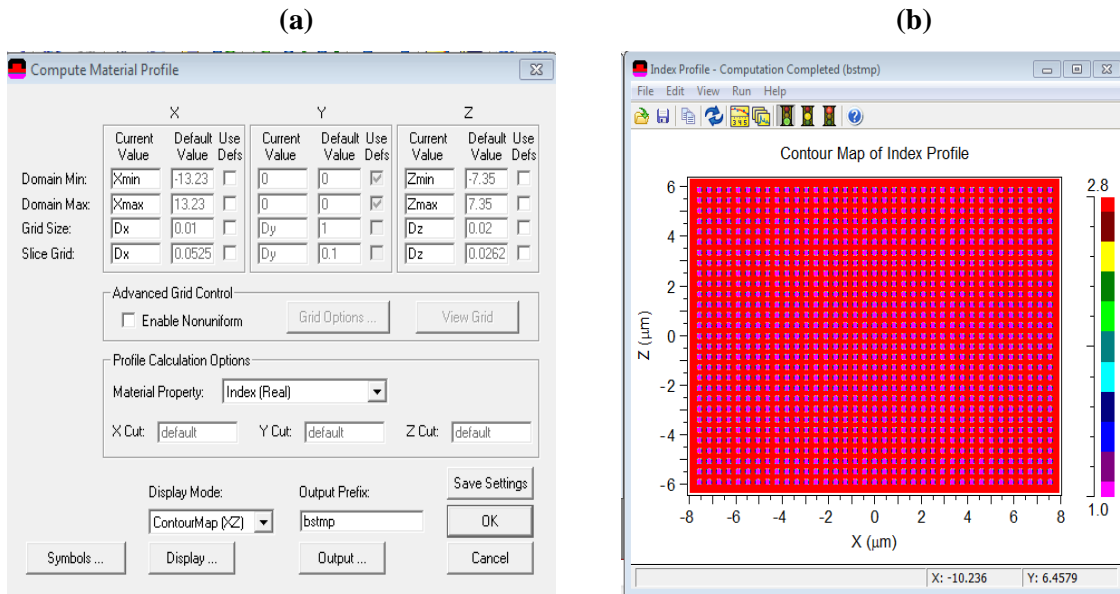


Figure III.5 : la Vérification du profil d'index.

III.3. L'étude de la bande interdite photonique (BIP)

La figure III.6 présente le diagramme de bande calculé par la méthode des ondes planes (méthode PWE) à l'aide de simulateur Bandsolve, pour un réseau 2D triangulaire (possède la plus large bande interdite par rapport au réseau carré) caractérisé par un facteur de remplissage $f=r/a$ au voisinage de 27.3%. Comme source de lumière, nous utilisons une onde plane de type gaussienne. Dans ces conditions, le cristal étudié présente une large bande interdite centrée autour d'une fréquence normalisée a/λ de 0.276. Cette bande est en mode TM comprises entre les deux fréquences normalisées 0.251 et 0.301 qui correspondent à une longueur d'onde de 1.395 μm à 1.673 μm .

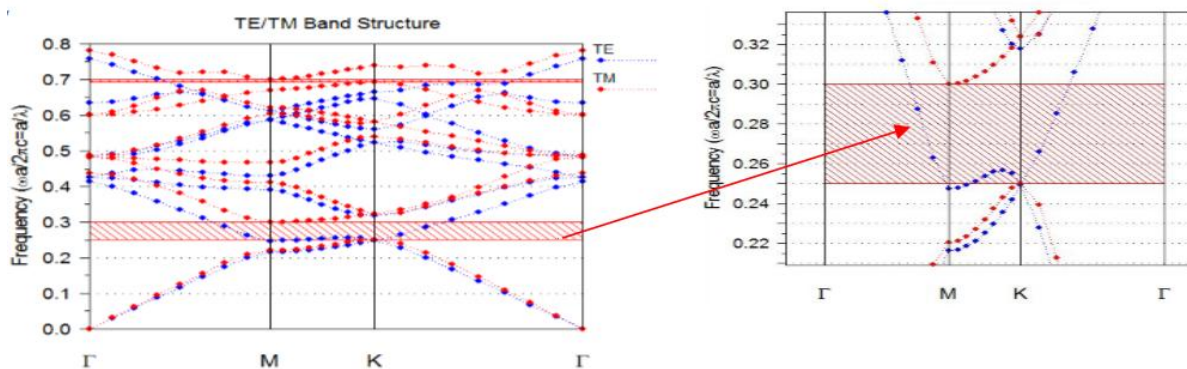


Figure III.6 : Diagramme de bandes d'un cristal photonique 2D triangulaire.

III.4. Création d'un guide d'onde

Nous considérons dans cette section un guide d'onde à cristaux photoniques $W1^K A$. Il est formé en enlevant une rangée de trous dans la direction ΓK du réseau triangulaire (voir figure II.7)

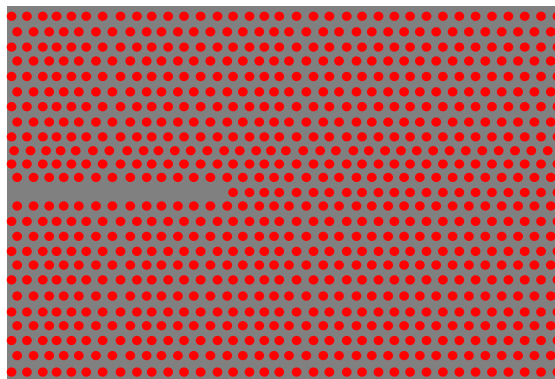


Figure III.7 : Guide d'onde $W1^K A$.

III.5 Création une cavité

Premièrement, nous avons créé une cavité par l'omission de quatre trous dans le centre de structure, et modifier le rayon de trou $R1=R2=0.09\mu\text{m}$. ensuite nous avons créé un autre guide par l'omission de dix trous dans la direction ΓK , et crée un autre défaut par le changement du rayon de trou $R3=0.152\mu\text{m}$. (figure III.8)

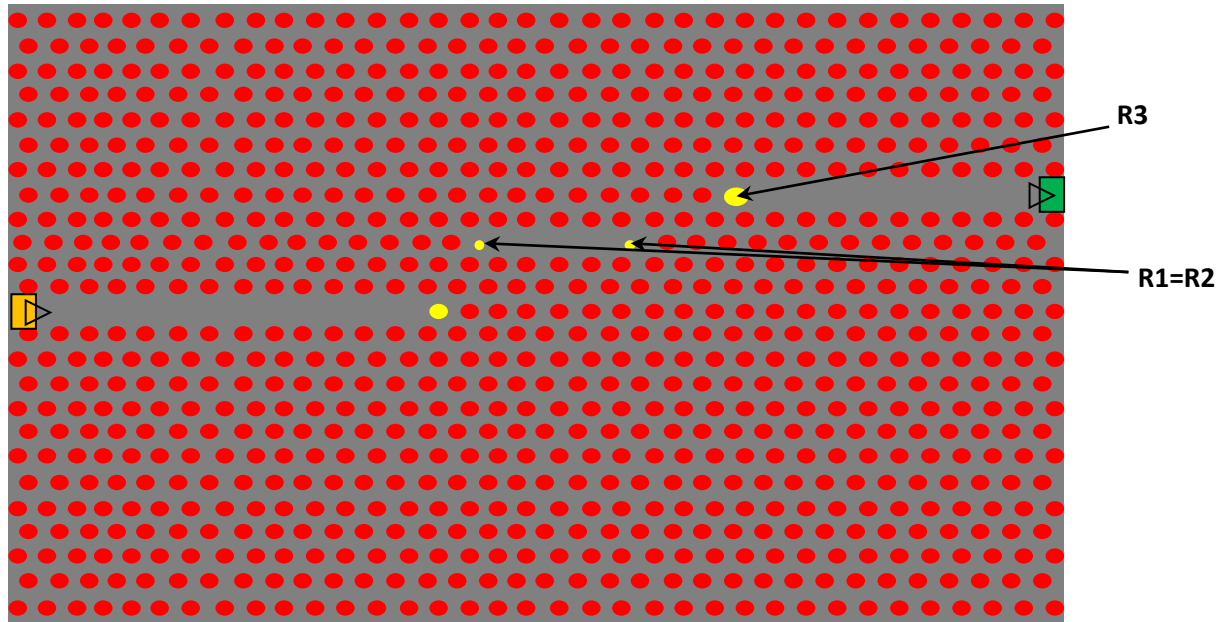




Figure.III.8 : Création une cavité et guide d'onde.

Lorsque la structure est bien définie on doit effectuer la simulation à l'aide de l'outil de simulation Full Wave pour calculer la transmission à la sortie du guide.

Avant de simuler, on doit définir le champ en choisissant l'icône **Edit Launch Field** (Éditer Le Champ De Lancement)  où l'utilisateur peut indiquer le champ initial pour une simulation, puis on clique sur option pour ajouter le monitor a la fin de guide d'onde et cliquer sur l'icône **Perform Simulation** (Effectuer La Simulation)  où l'utilisateur peut indiquer des paramètres de simulation avant de l'effectuer (voir figure III.9).

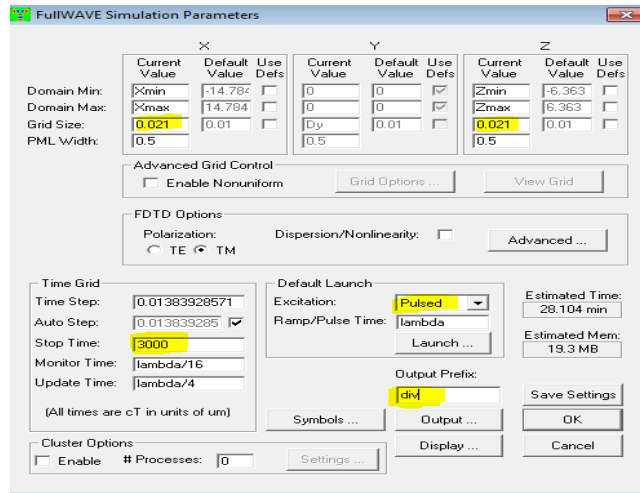


Figure III.9 : la fenêtre de paramètre de la simulation.

On va choisi **Pulsed** et $\Delta x = \Delta z = a / 20 = 0.021$ et nombre d'itérations (Stop time) = 3000.on va cliquer sur OK pour démarrer la transmission.

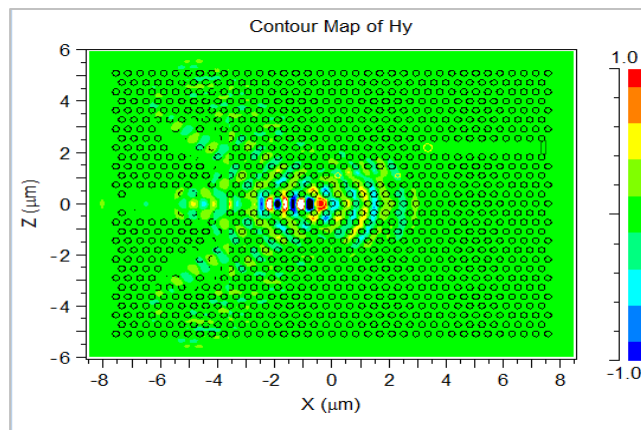


Figure III.10 : présentation de transmission.

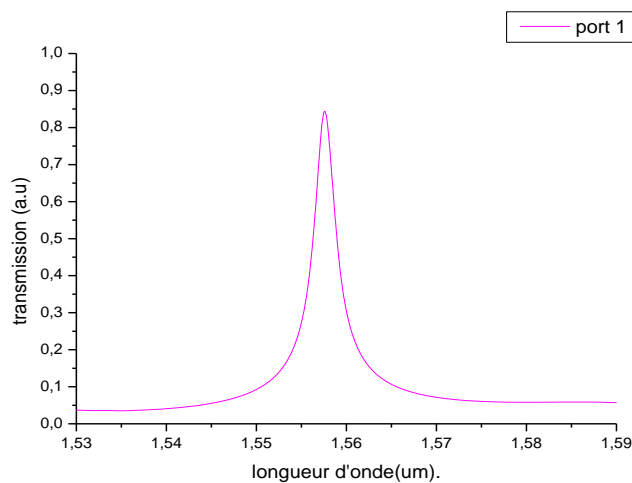


Figure III.11 : Le spectre de transmission à la sortie du guide.

La figure III.11 illustre les résultats de la simulation obtenus par FDTD-2D montrent clairement le maximum de transmission qui atteindrent 50% une longueur d'onde $\lambda=1.5575\mu\text{m}$

III.6. Conception un diviseur 1x2

En premier lieu, nous avons réalisé un diviseur en Y 1x2 formé d'une seule entrée et deux ports de sortie. Le cristal photonique est un réseau à maille triangulaire de trous d'air sur membrane SOI d'indice effectif de 2,8. Les paramètres du réseau à maille triangulaire de trous d'air constituant le CP 2D sont choisis pour permettre un fonctionnement aux alentours de la longueur d'onde $1,55\mu\text{m}$ très utilisées en télécommunication optique. On va créer deux cavités et deux guides d'onde symétriques dans la même structure. (Voir la figure III.12) On a : $R1=R2=R3=R6=R7=0.083\mu\text{m}$; $R4=R5=0.09\mu\text{m}$.

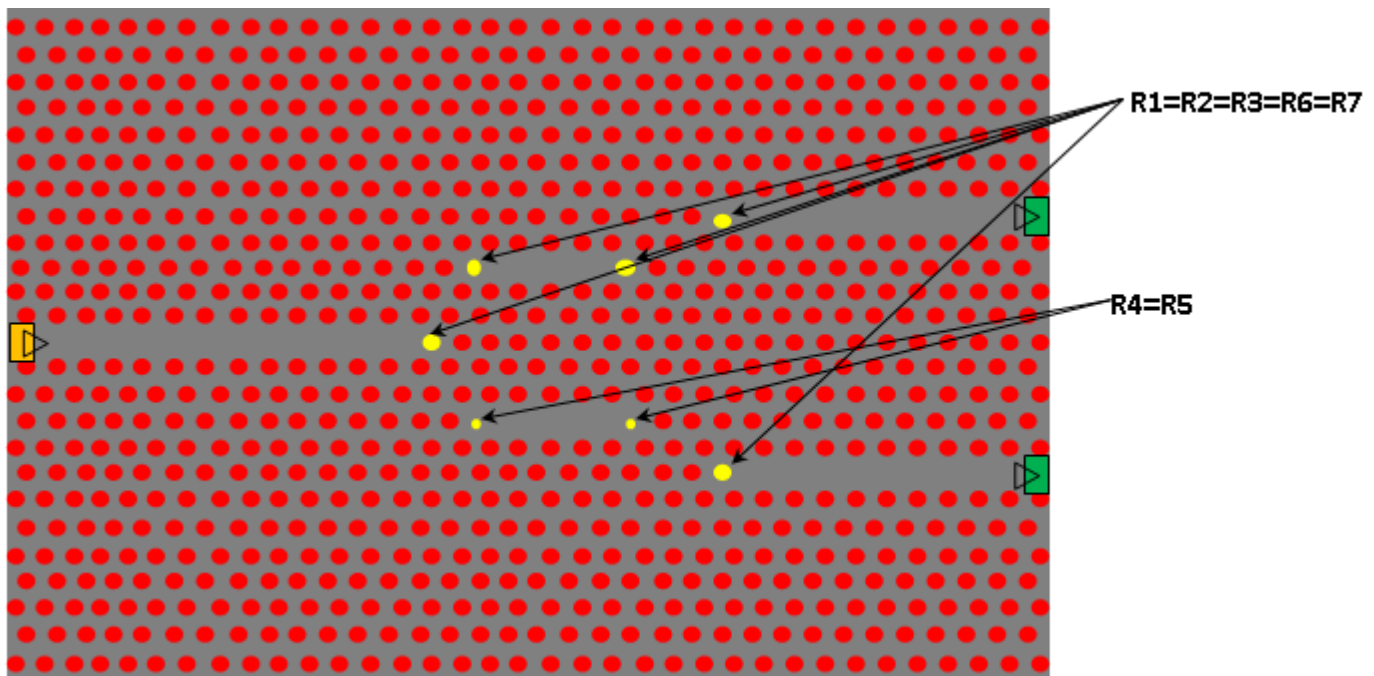


Figure III.12 : structure optimisée du diviseur 1x2 en Y.

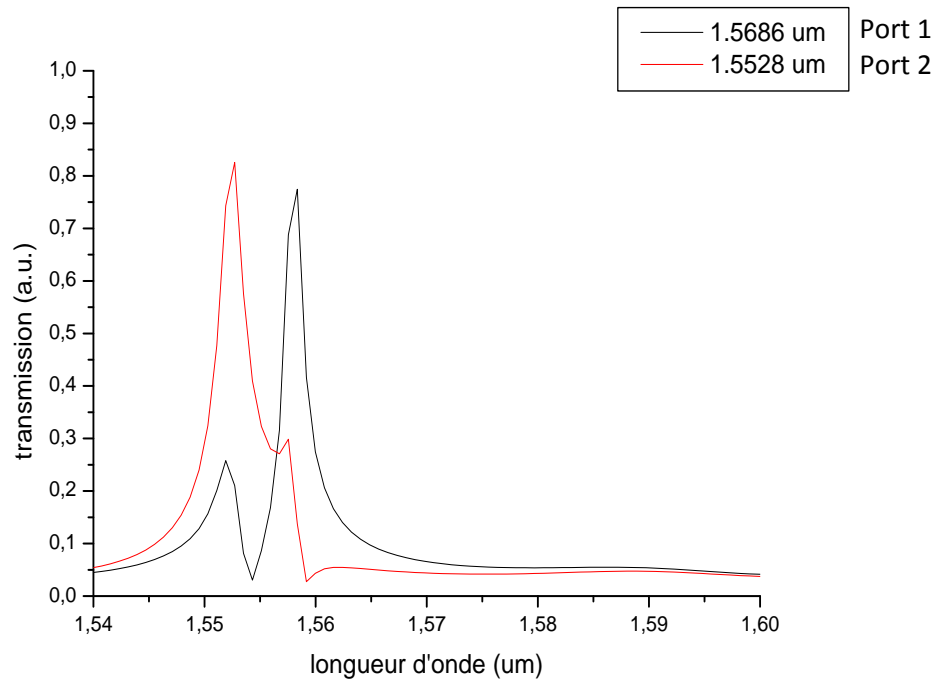


Figure III.13 : Le spectre de transmission du diviseur $Y1 \times 2$ canal pour
(a) $\lambda_1 = 1.5586 \mu\text{m}$, (b) $\lambda_2 = 1.5528 \mu\text{m}$.

Nous choisissons le rayon des trous de défauts dans les guides d'onde d'entrée et de sortie égaux à $R1=R6=R7=0.083 \mu\text{m}$ et dans les cavités supérieure et inférieure égales à $R2=R3=0.083 \mu\text{m}$ et $R4=R5=0.090 \mu\text{m}$, respectivement.

Ensuite, nous avons simulé notre structure avec un nombre d'itérations égal à 30 000. Les résultats de simulation montre un maximum de transmission à la sortie des ports 1 et 2 à la longueur d'onde $\lambda_1 = 1.5586 \mu\text{m}$ et $\lambda_2 = 1.5528 \mu\text{m}$. avec 88% et 76% d'efficacité, respectivement. Le résultat de la simulation est illustré à la (figure III.13).

III.7. Conception un diviseur de faisceau 1×4

Afin de réaliser la structure d'un diviseur 1×4 on garde la même structure du diviseur 1×2 vue précédemment et avec ces propriétés physiques mais nous allons changer les dimensions de la structure (47×33) en divisant encore chaque sortie en deux. On obtient donc 4 port à la sortie du diviseur en $Y 1 \times 4$. Dans nos simulations, on s'intéresse uniquement à la polarisation TM. Dans cette étape, on va créer deux cavités (**L3**) symétriques (supprimé 3 trous dans la structure) et changer le rayon de deux trous aux bornes de cavité $R1=R2=0.1 \mu\text{m}$ et $R3=R4=0.076 \mu\text{m}$ (voir la figure III.14).

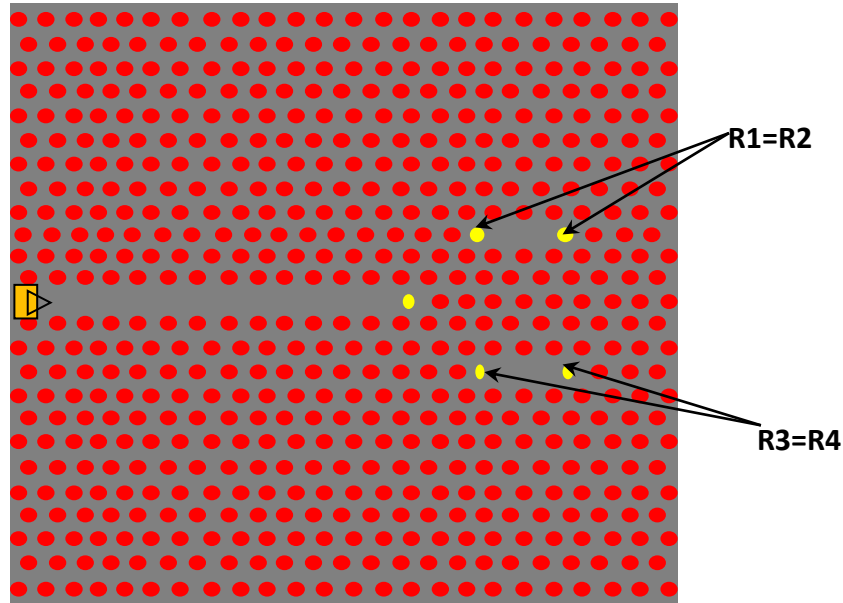


Figure III.14 : changement de rayon des trous dans la même cavité.

III.7.1. La cavité en haut

La création d'une cavité L3 est obtenue par l'omission de deux trous. Nous avons changé le rayon de trous aux bornes de cette cavité $R1=R2=0.076\mu\text{m}$, puis nous avons changé le rayon des autres trous dans la même cavité $R3=R4=0.076\mu\text{m}$, $R5=0.083\mu\text{m}$ (voir la figure III.15). Ensuite, une autre modification a été effectuée sur la structure, nous avons changé la distance entre les trous de cette cavité, par le déplacement des 3 trous supérieurs et inférieurs avec $0.4\mu\text{m}$ et $0.6\mu\text{m}$ respectivement, et cela pour augmenter le confinement de la lumière dans la cavité (voir la figure III.15).

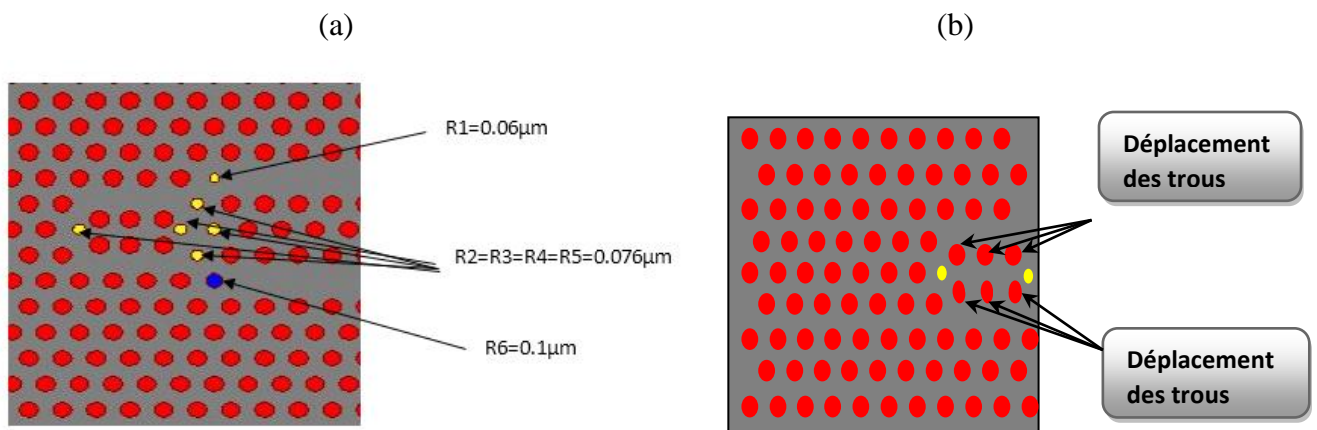


Figure III.15 : a) structure de la cavité en haut ($R1=R2=0.076\mu\text{m}$, $R3=R4=0.076\mu\text{m}$, et $R5=0.083\mu\text{m}$). b) le déplacement des trous avec $0.6\mu\text{m}$ et $0.4\mu\text{m}$

III.7.2. La cavité en bas

La création d'une cavité L4 est obtenue par l'omission de quatre trous (voir la figure III.16). Une autre modification a été effectuée sur la structure, nous avons changé la distance entre les trous de cette cavité, par le déplacement des 3 trous supérieurs et inférieurs avec $0.5\mu\text{m}$.

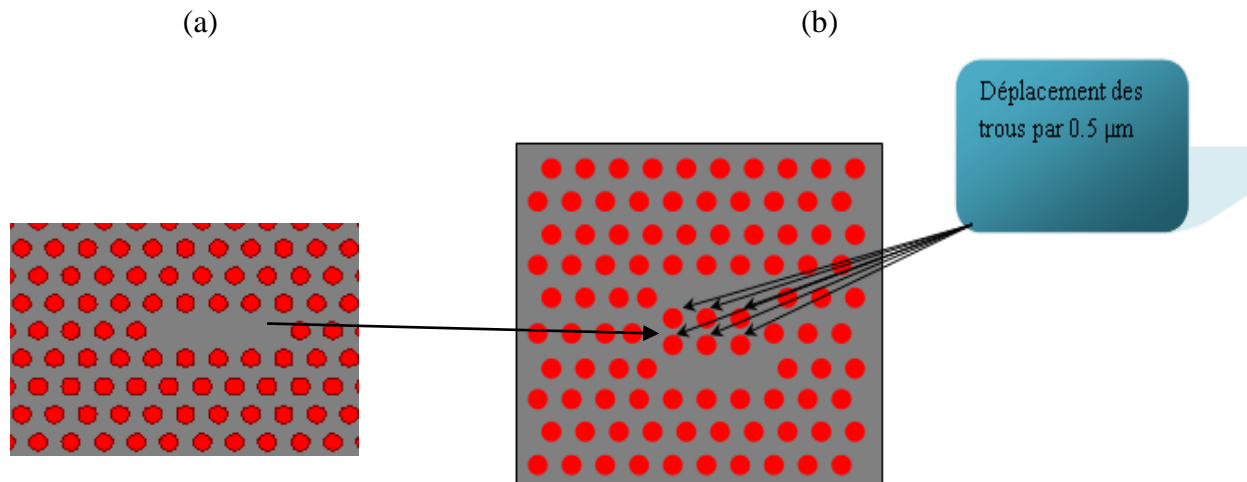


Figure III.16 : a) cavité L4. b) le déplacement des trous autour de la cavité avec $0.5\mu\text{m}$.

Ensuite, nous allons changer le rayon de seul trou $R7= 0.083\mu\text{m}$ et nous allons créer un virage de 60° par la suppression des trois trous (voir la figure III.17)

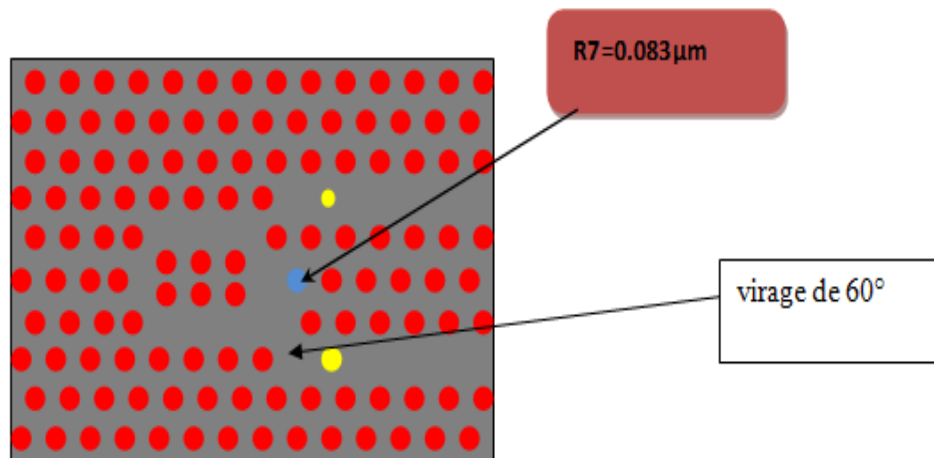


Figure III.17 : structure de la cavité en bas.

III.7.3. Les guide d'onde

Nous allons créer quatre guides d'onde afin d'assurer le guidage de la lumière à la sortie des quatre ports. Une nouvelle jonction en Y est obtenue avec 4 ports de sortie.

III.7.3.1. Les guide d'onde en haut

Deux défauts linéique sont obtenue par la suppression deux rangé de cette structure dans la direction ΓK (supprime 14 trous dans chaque rangé) et changé le rayon des trous au début de guide d'onde $R8=0.06\mu\text{m}$ et $R9=0.1\mu\text{m}$. (voir la figure III.18).

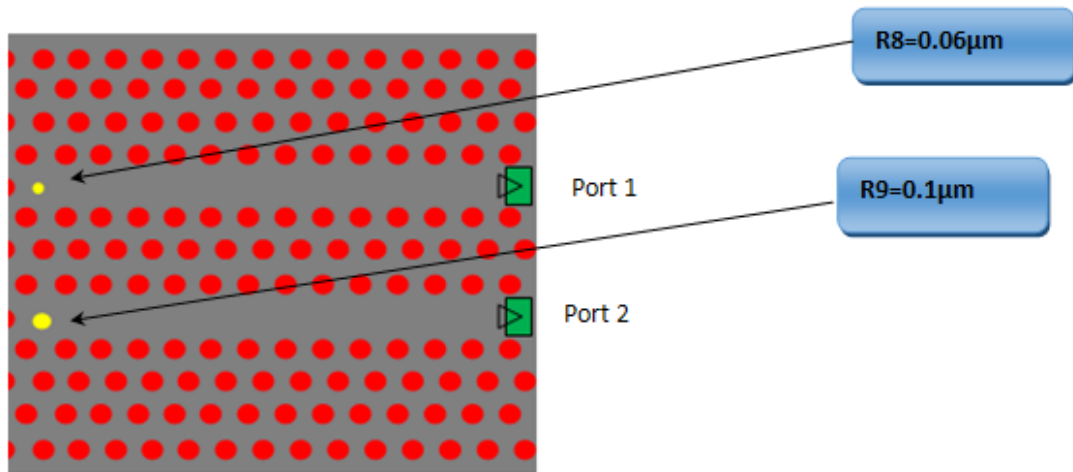


Figure III.18 : structure des guides ondes en haut

La figure III.19 montre le spectre de transmission calculé par la FDTD à la sortie des deux guides ondes (port 1 et port 2). Les deux spectres montrent un maximum de transmission à des longueurs d'ondes 1,584697 pour le port 1 et 1,424421 pour le port 2, avec 39% et 55% d'efficacité respectivement.

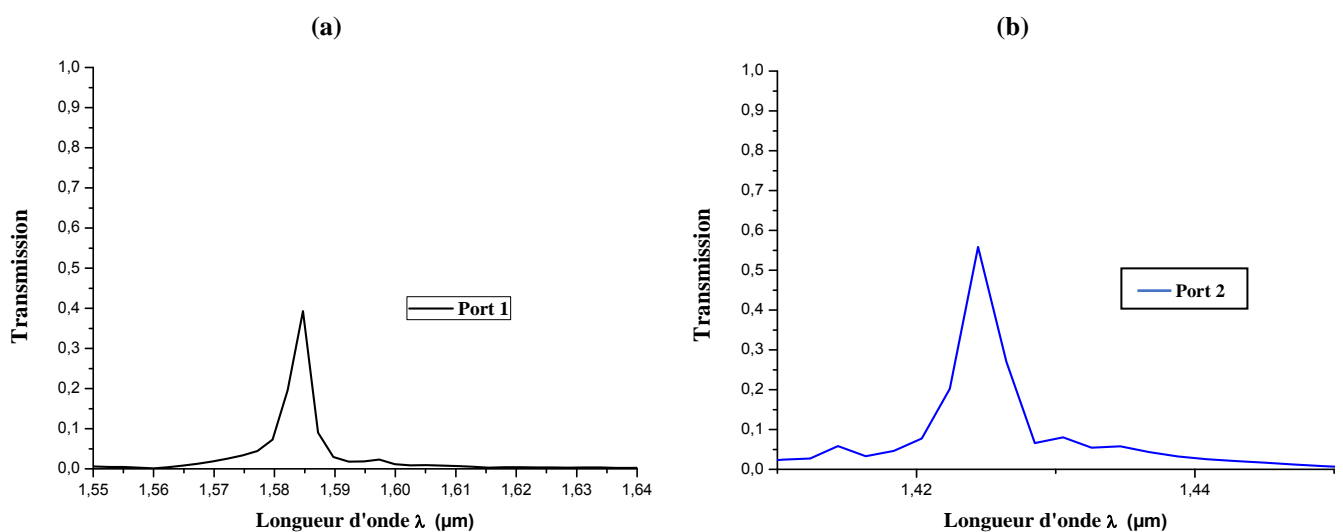


Figure III.19 : Les spectres de transmission. a) port 1. b) port 2.

III.7.3.2. Les guide d'onde en bas

Premièrement, nous avons créé une cavité par la suppression des premiers trous au début des guides d'ondes. Puis nous avons changé le rayon des deuxième trous au chaque guide $R_{10}=0.083\mu\text{m}$ et $R_{11}=0.115\mu\text{m}$. (figure III.20)

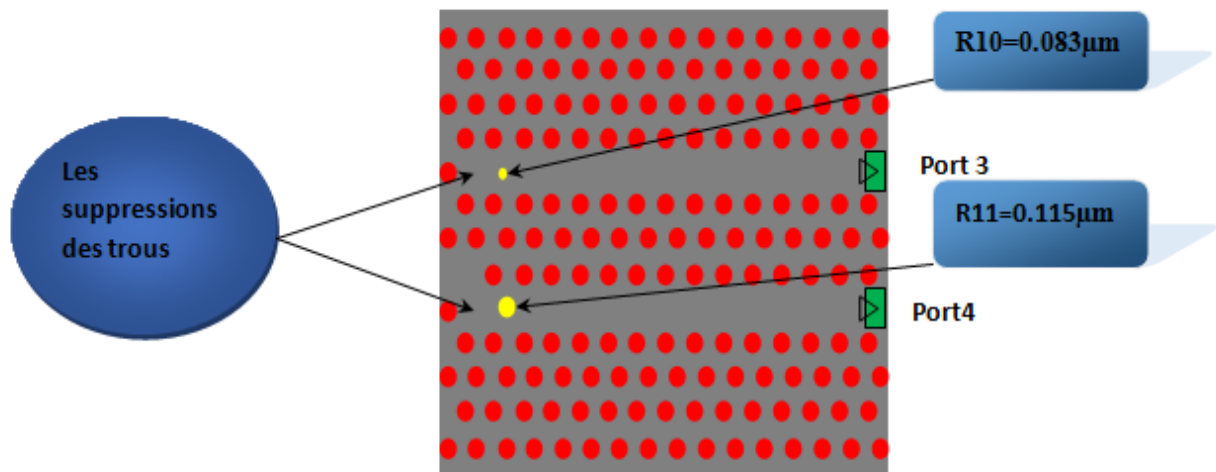


Figure III.20 : structure des guides ondes en bas.

La figure III.21 montre le spectre de transmission calculé par la FDTD à la sortie des deux guides ondes (port 3 et port 4). Les deux spectres montrent un maximum de transmission à des longueurs d'ondes 1,59991 pour le port 3 et 1,490229 pour le port 4, avec 50 % et 49 % d'efficacité respectivement

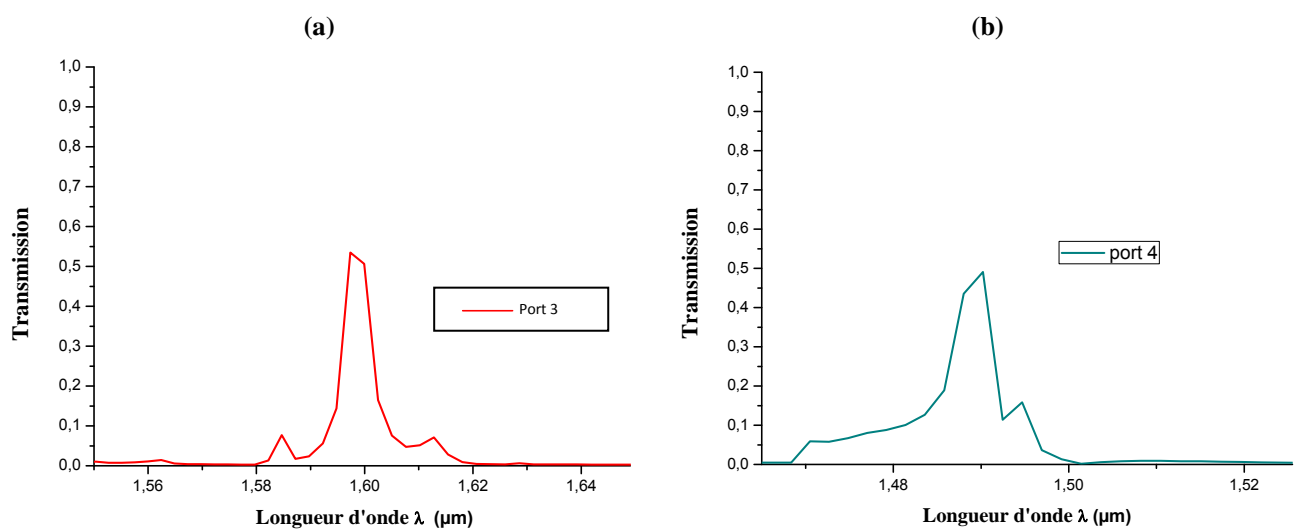


Figure III.21 : Les spectres de transmission. a) port 3. b) port 4.

III.7.4. Structure finale de diviseur 1x4

La structure est composée d'une entrée et de quatre ports de sortie, de même que pour les autres simulations on procède de la même technique utilisée pour la jonction et 1x2.

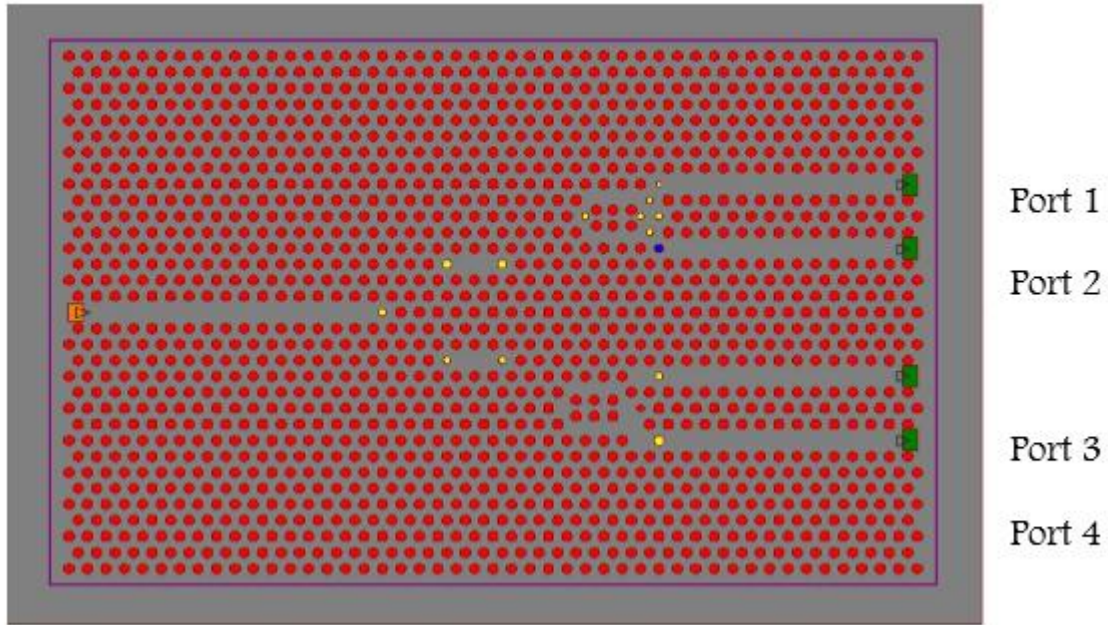


Figure III.22 : la structure finale de diviseur 1x4.

Après la simulation nous avons obtenus quatre pics différents de longueur d'onde λ_1 , λ_2 , λ_3 et λ_4 . (Voir la figure III.24)

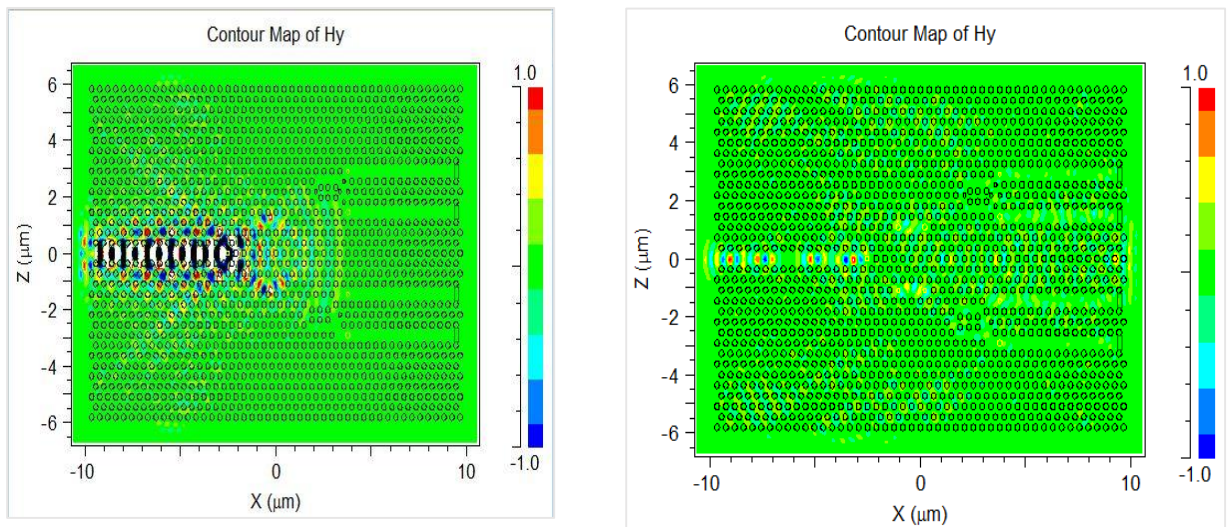


Figure III.23 : Répartition du champ à 5500 itération d'un diviseur en Y 1x4 excité en mode TM

D'après la figure III. 23, nous observons une bonne répartition du champ magnétique après l'optimisation. On signale que la modification ajoutée au niveau des deux jonctions Y fait en sorte que le champ du port d'entrée soit réparti équitablement dans les quatre voies de sortie et la dimension des trous additionnels a été aussi choisi de façon à remédié aux pertes de réflexion au niveau de virage.

La figure III.24 montre le spectre de transmission calculé par la FDTD à la sortie de diviseur 1x 4 (port 1 jusqu'à port 4). Les quatre spectres montrent un maximum de transmission à des longueurs d'ondes 1,584697 pour le port 1, 1,424421 pour le port 2, 1,5991 pour le port 3 et 1,490229 pour le port 4, avec 39% , 55 % , 50 % et 49 % d'efficacité respectivement

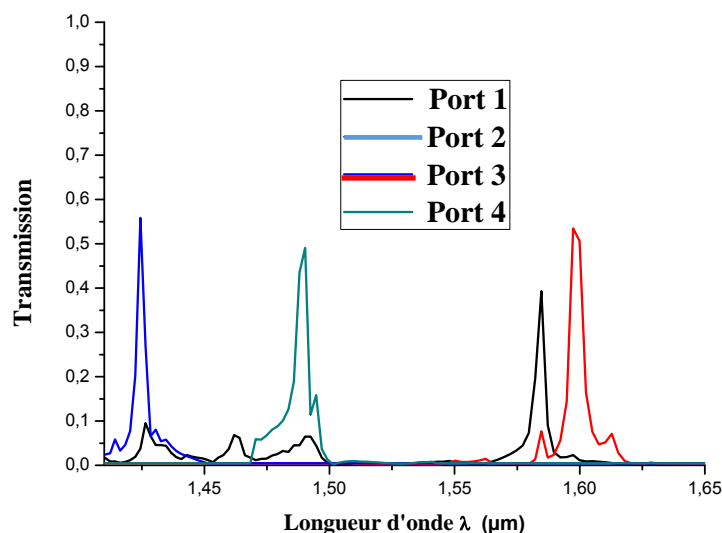


Figure III.24 : Les spectres de transmission de diviseur 1x4.

III.8. Conclusion

Ce chapitre consiste à étudier un diviseur en Y 1x4 à base de cristaux photoniques bidimensionnels en utilisant la méthode FDTD-2D. Le travail a été divisé en plusieurs parties, en premier lieu nous avons étudié bande interdite de la structure globale à cristaux photonique. Nous avons ensuite étudié le couplage guide cavité. L'optimisation a pour rôle d'améliorer la qualité de transmission et avoir une puissance équitable à la sortie de port de cette couplage, nous avons eu une longueur d'onde 1.5575 μm ce qui est satisfaisant en plus une répartition équitable sur la porte de sortie.

Par la suite nous avons étudié d'un diviseur 1x2 qu'on va prendre pour référence après l'optimisation. Nous avons obtenue à la sortie de ce diviseur un maximum de transmission des ports 1 et 2 à des longueurs d'onde $\lambda_1 = 1.5586\mu\text{m}$ et $\lambda_2 = 1.5528\mu\text{m}$. avec 88% et 76% d'efficacité, respectivement.

De même que la simulation précédente, nous avons étudié une structure de diviseur 1x4 en utilisant les mêmes techniques abordés lors de la simulation du diviseur 1x2, avec quelques modifications de la structure pour obtenir une structure optimale de notre diviseur 1x4. On obtient quatre longueur d'onde différente ($\lambda_1 = 1.5849\mu\text{m}$, $\lambda_2 = 1.4249\mu\text{m}$, $\lambda_3 = 1.5991\mu\text{m}$, $\lambda_4 = 1.4903\mu\text{m}$). Nous avons obtenue à la sortie de ce diviseur 1x4 un maximum de transmission des longueurs d'onde $\lambda_1 = 1.5586\mu\text{m}$ et $\lambda_2 = 1.5528\mu\text{m}$. avec 88% et 76% d'efficacité, respectivement.

Les quatre spectres montrent un maximum de transmission à des longueurs d'ondes $\lambda_1 = 1,584697$ pour le port 1, $\lambda_2 = 1,424421$ pour le port 2, $\lambda_3 = 1,59991$ pour le port 3 et $\lambda_4 = 1,490229$ pour le port 4, avec 39%, 55 %, 50 % et 49 % d'efficacité respectivement

Chaque simulation est complémentaire à la simulation précédente, c'est-à-dire le diviseur 1x4 est fait d'un ensemble de diviseur 1x2 ou chaque sortie est divisée en deux pour obtenir 4 ports à la sortie.

Conclusion générale :

Les cristaux photoniques (CPs) sont des structures artificielles réalisées dans le but d'ouvrir une bande interdite suivant les différentes directions, dans cette bande il apparaît une gamme de fréquence pour laquelle la lumière ne peut plus se propager. Ces propriétés rendent les cristaux photoniques intéressants pour de nombreuses applications en optique intégrée. Les applications potentielles des cristaux photoniques sont très vastes : réalisation des cavités résonantes de taille très réduite, des guides d'ondes, des virages, des filtres sélectifs, des diviseurs de faisceau,...ect.

L'objet de ce travail était l'étude et la conception d'un diviseur de faisceaux en Y 1x 4 à résonateur à base de cristal photonique bidimensionnel.

En premier chapitre, nous avons mentionné un peu historique sur les cristaux photonique puis nous avons étudiés les cristaux photoniques naturels et artificiels et, nous nous sommes intéressés à leurs bandes interdites suivant un, deux ou les trois axes pour les cristaux photoniques 1D, 2D ou 3D respectivement. Nous avons détaillé le cristal photonique 2D planaire utilisé comme choix préféré pour la conception de nos structures. A la fin de ce chapitre, nous avons présenté les méthodes numériques d'analyse des cristaux photoniques. Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié les différentes structures et fonctions à base de CPs, et nous avons focalisé sur les diviseurs à base de PC. Par la suite, nous avons présenté quelques travaux réalisés sur les diviseurs à base CP et les différents types de ce dernier.

Le dernier chapitre est consacré à la simulation des différentes topologies de diviseur. En premier lieu nous avons étudié la bande interdite de notre structure proposée. Nous avons ensuite étudié le couplage guide-cavité. Nous avons commencé par réaliser un diviseur 1x 2, puis 1x 4 en utilisant une jonction Y. Cette dernière utilise plusieurs méthodes comme l'ajout, la suppression et bien l'élargissement d'un trou à des positions bien particulières. Le but était d'avoir le moins de pertes possible en ayant un signal équitable sur les différents ports de sortie.

Nous avons étudié la structure d'un diviseur 1x2 en jonction Y. Nous avons obtenue à la sortie de ce diviseur un maximum de transmission des ports 1 et 2 à des longueurs d'onde $\lambda_1 = 1.5586\mu\text{m}$ et $\lambda_2 = 1.5528\mu\text{m}$. avec 88% et 76% d'efficacité, respectivement. De même que l'étude précédente, nous avons étudié une structure de diviseur 1x4 en utilisant les mêmes techniques abordés lors de la simulation du diviseur 1x2. nous avons effectué quelques modifications de la structure pour obtenir

une structure optimale de notre diviseur 1x4. On obtient quatre longueurs d'onde différentes ($\lambda_1 = 1.584697\mu\text{m}$, $\lambda_2 = 1.424421\mu\text{m}$, $\lambda_3 = 1.59991\mu\text{m}$, $\lambda_4 = 1.490229\mu\text{m}$). Nous avons obtenue à la sortie de ce diviseur 1x4 un maximum de transmission des longueurs d'onde $\lambda_1 = 1.5586\mu\text{m}$ et $\lambda_2 = 1.5528\mu\text{m}$. avec 88% et 76% d'efficacité, respectivement. Les spectres montrent un maximum de transmission à des longueurs d'ondes $\lambda_1 = 1,584697$ pour le port 1, $\lambda_2 = 1,424421$ pour le port 2, $\lambda_3 = 1,59991$ pour le port 3 et $\lambda_4 = 1,490229$ pour le port 4, avec 39%, 55 %, 50 % et 49 % d'efficacité respectivement. Chaque simulation est complémentaire à la simulation précédente, c'est-à-dire le diviseur 1x4 est fait d'un ensemble de diviseur 1x2 ou chaque sortie est divisée en deux pour obtenir 4 ports à la sortie.

Les cristaux photoniques sont les matériaux les plus adaptés à ce genre d'opération en offrant une large bande passante tout en réduisant les pertes. La gestion des défauts nous offre le choix de réaliser différents type de diviseur ou guide adapté au besoin qui satisfait le cahier de charge.

Bibliographies:

- [1] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, et J. N. Winn, « *Photonic Crystals : molding the Flow of Light* », Princeton university press, 1995.
- [2] C. M. Soukoulis, « *Photonic band gap materials* », Kluwer academic publisher, 1996.
- [3] M. Qiu et B. Jaskorzynsk, « *Design of channel drop filter in a two dimensional triangular photonic crystal* », Applied Physics Letters, Vol. 83, n° 6, pp. 1074-1076, 2003.
- [4] M. Bayindir, B. Temelkuran, et E. Ozbay, « *Photonic crystal based beam splitter* », Applied Physics Letters, Vol. 77, n° 24, pp. 3902-3904, 2000.
- [5] F. Cuesta-soto, A. Martines, et al., « *All-optical swiching structure based on a photonic crystal directional coupler* », Optics express, Vol. 12, n° 1, pp. 161-167, 2004.
- [6] A. Locatelli, D. Modotto, et al., « *All optical switching in ultrashort photonic crystal couplers* », Optics communications, Vol. 237, n° 1, pp. 97-102, 2004.
- [7] Z. Wang, S. Fan, « *Optical circulators in two-dimensional magneto-optical photonic crystals* », Optics letters, Vol. 30, n° 1, pp. 1989-1991, 2005.
- [8] A. Martinez, F. Cuesta, et J. Marti, « *Ultrashort 2-d photonic crystal directional couplers* », IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, n° 1, pp. 694-696, 2003.
- [9] I. Drissi, « *Simulation et optimisation d'un diviseur 1x8 à base de cristaux photoniques bidimensionnels. Modélisation par la méthode FDTD-2D* », Mémoire de master, Université de Tlemcen, 2014.
- [10] Y. Merle, « *Etude de la dispersion électromagnétique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels* », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2003.
- [11] H. Alipour-Banaei, A. Rostami, et al. « *Wavelength division demultiplexer for optical communication applications based on photonic crystals* », PNRL, Université de Tabriz, Iran, 2011.
- [12] H. Abri Badaoui, « *Etude et conception des micros composants à base des cristaux photoniques bidimensionnels* », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2012.
- [13] E. Yablonovitch, « *Photonic band-gap structures* », JOSA B, Vol. 10, n° 1, pp. 283–295, 1993.
- [14] P. Pottier, C. Seassal, et al., « *Triangular and hexagonal high Q-factor 2-D photonic bandgap cavities on III-V suspended membranes* », Journal of lightwave technology, Vol. 17, n° 11, pp. 2085-2062, 1999.

- [15] S. Noda, M. Imada, et al., « *Semiconductor three-dimensional and two-dimensional photonic crystals and devices* », IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 38, n° 7, pp. 726-735, 2002.
- [16] W. Barbara, « *Etude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photoniques bidimensionnels et de leur accordabilité* », Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2006.
- [17] Y. Merle, « *Etude de la dispersion électromagnétique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels* », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2003.
- [18] A. Kahlouche, « *Etude des potentialités de couches minces sol-gel dopées par des nanoparticules magnétiques pour la conception des cristaux magnéto-photoniques* », Thèse de doctorat, Université de M'sila, 2014.
- [19] A. Benmerkhi, « *Influence des paramètres géométriques sur la cavité à cristaux photoniques bidimensionnels* », Mémoire de magister, Université de Mentouri Constantine, 2008.
- [20] C. Kittel, « *Physique de L'état Solide* », 8^{ème} édition, Dunod, Paris, 2007.
- [21] K. Busch, « *Photonic band structure theory: assessment and perspectives* », Comptes Rendus Physique, Vol 3, n° 1, pp. 53-66, 2002.
- [22] A. Lebani, « *Matériaux bip à base de nanoparticules métalliques et semi-conductrices étude des propriétés optiques par FDTD* », Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2009.
- [23] M. Zelsmann, « *Nano-structures à base de cristaux photoniques en silicium sur isolant pour les circuits intégrés photoniques et l'émission de lumière* », Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble 1, 2003.
- [24] S. Massaoudi, « *Etude théorique et expérimentale des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels (bip 2d) en micro-ondes : application à l'ultra réfraction* », Thèse de doctorat, Université de paris xi, 2005.
- [25] Jean-michel Lourtioz, « *Cristaux photoniques et gaps de photons propriétés et applications* », Techniques de l'ingénieur. Sciences fondamentales, Vol. AFP2, n° AF3711, 2004.

- [26] Davy Gerard, « *Etude en champ proche et en champ lointain de composants périodiquement nano structurés : cristaux photoniques et tamis à photons* », Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2004.
- [27] C. Yu, H. Chang, « *Applications of the finite difference mode solution method to photonic crystal structures* ». *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 36, n° 1, pp. 145-163, 2004.
- [28] D. Hermann, M. Frank, et al. « *Photonic band structure computations* », *Optics Express*, Vol 8, n° 3, pp. 167-172, 2001.
- [29] F. Benaïssa, « *Etude et simulation de la propagation des ondes électromagnétiques dans les guides à cristaux photoniques-application aux fibres optiques* », Mémoire de magister, Université de Abou-Bakr Belkaïd Tlemcen, 2013.
- [30] Michaël Farha, « *Etude d'une structure à cristal photonique 'LOM' gravée dans un guide Ti:LinbO₃ dopé erbium pour l'émission de la lumière à 1,55µm* », Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2010.
- [31] HOLOOR, « *Diffraction axicon application notes* », [EN LIGNE] Disponible à: http://www.holoor.co.il/Diffractive_optics_Applications/Application-Notes-Axicon.htm. [Accédé au 14 Mai 2017], 2016.
- [32] H. Rigneault, et al., « *La nanophotonique* », Hermes Lavoisier, Paris, 2005.
- [33] O. Levy, B. Z. Steinberg, et al., « *Mechanical tuning of two-dimensional photonic crystal cavity by micro electro mechanical flexures* », *Sensors and Actuators A:Physical*, Vol. 193, n° 1, pp. 47–52, 2007.
- [34] I. Bouderdji, « *Conception d'un démultiplexeur à cristaux photoniques bidimensionnels* », Mémoire de master, Université de M'sila, 2016.
- [35] Tanguy Jaffre, « *Caractérisation des Matériaux à bande interdite électromagnétique Multi périodiques et leurs applications aux antennes* », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2005.
- [36] H. Bing, « *Etude des composants nanophotoniques pour les interconnexions optiques sur silicium* », Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2008.
- [37] T. Fukazawa, A. Sakai, et T. Baba, « *H-tree-type optical clock signal distribution circuit using a Si photonic wire waveguide* », *Japanese journal of applied physics*, Vol. 41, n° 12B, pp. L1461–L1463, 2002.

[38] L. B. Soldano et E. C. Pennings, « *Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications* », *Journal of lightwave technology*, Vol. 13, n° 4, pp. 615-627, 1995.

[39] M. M. Khan, « *Nano structure based power splitter design by using 2D photonic Crystals* », *Journal of Modern Science and Technology*, Vol. 1, n° 1, pp. 176-187, 2013.

Résumé

Le travail présenté dans cette mémoire porte essentiellement sur la conception des diviseurs (1x2) et (1x4) à base de cristaux photoniques bidimensionnels (CP-2D) en utilisant la jonction Y. En premier lieu, nous avons commencé par des généralités sur les cristaux photoniques. On peut noter, qu'il existe des CP naturel à l'état minéral et biologique. Par suite, nous avons essayé de définir les cristaux photoniques, et plus précisément les cristaux bidimensionnels. Ces nouveaux matériaux peuvent interdire la propagation de la lumière dans certaines directions et pour des énergies comprises dans ce qu'on appelle la bande interdite ou bien un gap photonique. Nous avons également étudié les caractéristiques géométriques des cristaux photoniques afin de pouvoir les intégrer dans des systèmes optoélectroniques en tant que composants de division. Pour se faire, nous utiliserons une des méthodes bien adaptée à ces genres de structures, Il s'agit de la méthode FDTD-2D.

Mot clé : diviseur (1x2) et (1x4), cristaux photoniques bidimensionnels (CP-2D), la méthode FDTD-2D.

Abstract:

The work presented in this paper focuses on the design of the divisors (1x2) and (1x4) based on two-dimensional photonic crystals (CP-2D) using the junction Y. First, we started with generalizations about The Photonic Crystals. It can be noted that there are natural CPs in the mineral and biological state. Consequently, we have tried to define the photonic crystals, and more precisely the two-dimensional crystals. These new materials can prohibit the propagation of light in certain directions and for energies included in the so-called band gap or a photon gap. We have also studied the geometric characteristics of photonic crystals in order to integrate them in optoelectronic systems as division components. To do so, we will use one of the methods well suited to these kinds of structures. This is the FDTD-2D method.

Keyword : divisors (1x2) and (1x4), two-dimensional photonic crystals (CP-2D), FDTD-2D method.

المخلص:

نركز في هذه الدراسة على تصميم مقسم للأشعة (2*1) او (4*1) يعتمد على البلورات الضوئية ثنائية الأبعاد باستخدام تقاطع Y. في البداية تطرقنا لدراسة البلورات الضوئية ولاحظنا وجود البلورات الضوئية في الطبيعة مثل الفراشات والطيور وبالتالي، حاولنا دراسة البلورات الضوئية، وعلى وجه التحديد البلورات ثنائية الأبعاد هذه المواد الجديدة يمكن أن تحظر انتشار الضوء في اتجاهات معينة والطاقات المدرجة فيما يسمى الفجوة الفرقة أو فجوة الفوتون ولقد درسنا أيضا الخصائص الهندسية للبلورات الضوئية من أجل دمجها في الأنظمة الضوئية كمكونات الانقسام للقيام بذلك، سوف نستخدم واحدة من الطرق المناسبة تماما لهذه الأنواع من

الهياكل وهي طريقة FDTD -2D

الكلمات المفتاحية: مقسم للأشعة (2*1) او (4*1)، البلورات الضوئية ثنائية الأبعاد، طريقة

.FDTD -2D