

N° d'ordre :



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



MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Seghiri Zakarya

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : MICRO-ELECTRONIQUE

Thème

**Étude et simulation d'un filtre à cristaux
photonique bidimensionnel réalisé sur un
substrat de l'Arséniure de Galium**

Soutenue le : 9 juin 2015 devant le jury composé de :

BOUCHAMA Idris	M.C.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
KAHLOUCHE Ahmed	M.C.B - Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Encadreur
ZOUACHE Tarek	M.A.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur
KHALFA Ali	M.A.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

Promotion : Juin 2015

Remerciements

*Au terme de ce travail, nous adressons nos remerciements les plus sincères à notre encadreur **Dr : KAHLOUCHE AHMED**, pour nous avoir permis de bénéficier de son grand savoir dans la matière, pour sa disponibilité, sa pédagogie, ses compétences, sa modestie et son aide précieuse tout au long de ce projet même pendant les moments les plus difficiles. **Vraiment merci pour une qualité d'encadrement si sérieuse et si consistante ...***

J'exprime mes profonds remerciements à monsieur le président de jury d'avoir accepté de présider le jury de ce travail. Je remercie également tous les membres de jury, qui m'ont fait l'honneur d'être membres à ce jury.

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

Je remercie toutes les personnes et surtout Oussama, Ali, ..., qui nous a soutenus, d'une façon ou d'une autre, nous éprouvons incessamment leur estime et amabilité.

Je tiens à remercier tout particulièrement ceux qui sont très chers : nos parents, nos amis, nos frères...

Que la paix d'Allah soit toujours avec vous

Seghiri zakarya

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE	2
CHAPITRE I : Généralité sur les cristaux photoniques	
I.1. Introduction	5
I.2. Les histoires des cristaux photoniques.....	5
I.3.définition des cristaux photoniques.....	6
I.4. Différents types des cristaux photoniques.....	8
I.4.1. Les cristaux photoniques unidimensionnel.....	8
I.4.2. Les cristaux photoniques bidimensionnels.....	8
I.4.3.les Cristaux photoniques tridimensionnels.....	9
I.5. Différents types des structures.....	10
a. La structure connectée.....	10
b. La structure déconnectée.....	10
I.6. Réseau directe et réseau réciproque.....	11
I.6.1. Réseau directe.....	11
I.6.2. Réseau réciproque.....	13
I.7. Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels.....	13
I.7.1. Le réseau carré.....	14
I.7.2. Le réseau triangulaire.....	14
I.7.3. Le réseau hexagonal.....	15
I.8.Les différents types de défauts.....	16
I.8.1. Les défauts ponctuels.....	16
I.8.2. Les défauts étendus.....	17
I.9.Ouverture d'une bande interdite omnidirectionnelle.....	19
I.10. Propriétés des cristaux photoniques bidimensionnels.....	20
I.11.Analogie électron- photon.....	20
I.12. Caractéristiques géométriques et physiques d'un cristal photonique.....	21
I.13. les Applications des cristaux photoniques.....	22
I.14. Conclusion.....	25
CHAPITRE II : Méthodes numériques et outils de simulation	
II.1. Introduction.....	27
II.2. Méthodes de modélisation.....	27
II.2.1. La méthode des ondes planes (PWE).....	27

II.2.2. La méthode FDTD.....	28
II.3.Présentation du logiciel Rsoft CAD.....	29
II.3.1.Environment de CAD.....	29
II.3.2 Le simulateur « Bandsolve».....	29
II.3.3 Le simulateur « Fullwave».....	29
II.3.3 Le simulateur «Beamprop ».....	30
II.4. Les étapes de simulation d'un CP2D.....	30
II.4.1. Créer un nouveau circuit.....	31
II.4.2. Générer la structure de réseau.....	32
II.4.3. Régler les paramètres globales.....	33
II.4.4. Définition des variables.....	34
II.4.5. Vérifier la structure.....	34
II.4.6. Réglage des paramètres de simulation.....	35
II.4.7. Scan des variables et Lecture des résultats	38
II.5. diagramme des bandes.....	39
II.6. Conclusion.....	40
CHAPITRE III : résultats et discussions	
III.1. Introduction.....	42
III.2. Le matériau utilisé et la structure étudiée.....	42
III.3. Le diagramme de bandes.....	43
III.4. la carte des bandes	44
III.5. Etude du guide d'onde droit.....	45
III.6. Etude de la cavité hexagonale H1.....	47
III.7. Etude d'un filtre Add-Drop.....	49
III.7.1. l'influence l'indice de réfraction sur le filtre.....	50
III.7.2. l'influence la position de cavité H1 sur Transmittance de longueur d'onde	52
III.7.3. L'influence la taille de la cavité sur transmittance.....	52
III .8. Etude de facteur de qualité	54
III.8.1. L'influence de l'indice de réfraction sur le facteur de qualité.....	54
III.8.2. L'influence du rayon de trous sur le facteur de qualité.....	56
III.8.3. l'influence le guide onde droite sur le facteur de qualité	59
III.9. conclusion	61
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	63
BIBLIOGRAPHIE.....	65

Liste des figures et les tableaux

CHAPITRE I : Généralité sur les cristaux photoniques

Figure I.01 : Représentation schématique de cristaux photoniques 1D, 2D, 3D.....	06
Figure I.02 : Cristaux photoniques naturels : (a) Plume de paon, (b) Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodique de silice accompagné par son image au MEB.....	07
Figure I.03 : Schéma d'un cristal photonique 1D : miroir de Bragg.....	08
Figure I.04 :Exemple Cristal photonique bidimensionnel : (a) réseau triangulaire de trous d'air, (b) réseau carré de tiges diélectriques. (a') et (b') montrent les vues de haut des deux réseaux.....	08
Figure I.05 :Structures 3D :(a) « La Yablonovite» [10], [12], (b) Structure «Tas de bois».....	09
Figure I.06 :Différentes structures 3D : la structure cubique (1) ; tas de bois (2) ; Structure multicouches (3) ; les opales (4) et la Yablonovite (5).....	09
Figure I.07 :Structures bidimensionnelles : (a) connectée,(b) déconnectée,(c) Polarisation TM, (d) polarisation TE.....	10
Figure I.08 :Structure périodique 2D, vecteurs de base des réseaux direct et réciproque.....	11
Figure I.09 :Maille élémentaire du réseau direct.....	11
Figure I.10 :Maille élémentaire d'un réseau réciproque.....	12
Figure I.11 : Principaux réseaux dans un cristal photonique bidimensionnel.....	13
Figure I.12 : Représentation : a) d'un réseau carré, b) son réseau réciproque, c) de sa zone de Brillouin.....	13
Figure I.13 : Représentation : a) d'un réseau triangulaire, b) de son réseau réciproque, c) et de sa zone de Brillouin.....	14
Figure I.14 : Représentation : a) d'un réseau hexagonal, b) de son réseau réciproque, c) et des a zone De Brillouin.....	14
Figure I.15 : Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire ; (b) et (c) Défauts de substitutions.....	15
Figure I.16 : Spectre de transmission d'un cristal hexagonal de tiges diélectriques avec ou sans défaut Lacunaire.....	15
Figure I.17 : Défaut de dimension du motif élémentaire.....	16
Figure I.18 : Défaut de distance entre motifs élémentaires.....	16
Figure I.19 : Défaut sur la permittivité relative.....	16
Figure I.20 : Défaut par vacuité (c'est le défaut le plus utilisé).Les motifs élémentaires de la rangée du milieu ont été enlevés.....	17
Figure I.21 :(a) Cristal photonique 2D ; (b) Une bande interdite omnidirectionnelle est obtenue dans le plan lorsque toutes les bandes interdites 1D se recouvrent.....	18
Figure I. 22 : Un cristal photonique unidimensionnel.....	19
Figure I.23 : Les différents types de cavités.....	21
Figure I.24 : Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique carré avec un paramètre de maille 600nm.....	21

Figure I.25 : Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm.....	21
Figure I.26 : Exemple de cavité rectangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 560nm.....	22
Figure I.27 : Exemple de Filtre Add-Drop.....	23
Figure I.28 : Image en microscopie électronique d'une fonction Fabry-Pérot intégrée à un guide.....	24
Figure I.29 : Exemple du guide d'onde mono-rangée réalisé dans un cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant.....	24
Figure I.30 : Schéma de principe d'un dispositif de multiplexage (insertion ou extraction d'une certaine longueur d'onde).....	25

CHAPITRE II : Méthodes numériques et outils de simulation

Figure II.01 : Fenêtre principale du programme CAD.....	30
Figure II.02 : La fenêtre de démarrage (startup Window).....	31
Figure II.03 : Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit.....	32
Figure II.04 : Arrangements de disposition de la rangée XZ.....	32
Figure II.05 : Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD.....	33
Figure II.06 : Fenêtre des paramètres globales du circuit.....	33
Figure II.07 : L'éditeur du Tableau de symboles	34
Figure II.08 : (a) et (b) est Profil d'indice de la structure à cristaux photoniques 2D.....	35
Figure II.09 : La fenêtre de paramètres de simulation de Bandsolve où des paramètres numériques de base de simulation sont entrés.....	36
Figure II.10 : La fenêtre de paramètres de simulation de Fullwave où des paramètres numériques de base de simulation sont entrés.....	36
Figure II.11 : présentation les paramètres de launch.....	37
Figure II.12 : Exemple de scan variable de rayon (r).....	39
Figure II.13 : Exemple de scan variable de Win plot.....	39
Figure II.14 : Diagramme des bandes pour les modes TE et TM Dans la structure FCP.....	40

CHAPITRE III : résultats et discussions

Figure III.01 : (a) Schéma d'un cristal photonique 2D formé par un réseau triangulaire de trous d'air percés dans le GaAs, (b) le profile de l'indice de réfraction.....	43
Figure III.02 : Diagramme de bande d'un cristal photonique 2D en polarisation TM pour $n=2.94$, $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$	43
Figure III.03 : Transmittance en fonction de la longueur d'onde normalisée pour $n=2.94$, $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$	44
Figure III.04 : la carte bande pour le rayon r en varia $r=0.1\mu\text{m}$ de $r=0.3\mu\text{m}$	44
Figure III.05 : la carte bande pour la période a en varia $a=0.4\mu\text{m}$ de $a=1\mu\text{m}$	45

Figure III.06 : (a) guide droit w1 de GaAs, (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$	45
Figure III.07 : (a) guide droit w1 de silice, (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$	46
Figure III.08 : (a) guide droit w1 de Inp, (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$	46
Figure III.09 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) par trois matériaux (GaAs, Si, Inp).....	47
Figure III.10: (a) la cavité H1 de GaAs, (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$ et $n_{H1}=2.94$	48
Figure III.11 : (a) la cavité H1 de Silicium, (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$ et $n_{H1}=3.4$	48
Figure III.12 : (a) La cavité H1 de Inp, (b) Spectre de transmission en fonction de la longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$ et $n_{H1}=3.17$	49
Figure III.13 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) par trois matériaux (GaAs, Si, Inp).....	49
Figure III.14: La structure de filtre Add-Drop (guide onde w1 et cavité h1).....	50
Figure III.15 : (a) le filtre de GaAs , (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$ et $n_{H1}=2.94$	50
Figure III.16 : (a) le filtre de Silicium, (b) Spectre de transmission en fonction de la longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$ et $n_{H1}=3.42$	51
Figure III.17: (a) le filtre de Inp, (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$ et $n_{H1}=3.17$	51
Figure III.18: La structure étudiée d'un cristal photonique 2D : pour $n=1$, $n=3$ et $n=5$	52
Figure III.19: La transmittance en fonction du nombre de miroirs : (a) : pour $n=1$, (b) pour $n=3$ et (c) pour $n=5$	52
Figure III.20: La structure étudiée pour trois types de microcavité : H1, H2 et H3.....	53
Figure III.21: La transmittance en fonction de la longueur d'ondes pour trois cavités : (a) : pour H1, (b) pour H2 et (c) pour H3.....	53
Figure III.22: (a) Filtre à base de GaAs ($n=2.94$) , (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde.....	54
Figure III.23 : (a) Filtre à base de Indium de Phosphore ($n_{\text{cav}}=\text{Inp}$), (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde	55
Figure III.24 : (a) Filtre à base de Silicium ($n_{\text{cav}}=\text{Si}$), (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde	55
Figure III.25 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) pour trois l'indice de réfraction (2.94, 3.17, 3.42)	56

Figure III.26 : (a) le filtre ($r_{cav}=0.16\mu m$), (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde.....	57
Figure III.27 : (a) le filtre ($r_{cav}=0.18\mu m$), (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde	57
Figure III.28 : (a) le filtre ($r_{cav}=0.2\mu m$), (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde	58
Figure III.29 : Spectre de transmission en fonction de la longueur d'onde (μm) pour trois rayons $r=0.16\mu m$; $r=0.18\mu m$ et $r=0.2\mu m$	58
Figure III.30 : (a) le filtre étudié ($n_{guide}=gaas$), (b) Spectre de transmission en fonction de la longueur d'onde (μm)	59
Figure III.31 : (a) le filtre ($n_{guide}=Inp$), (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde	59
Figure III.32 : (a) le filtre ($n_{guide}=si$), (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde	60
Figure III.33 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) de trois l'indice de réfraction de guide onde.....	60

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Les cristaux photoniques sont l'analogie des semi-conducteurs pour le contrôle des photons, les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice de réfraction varie de manière périodique à l'échelle de la longueur d'onde que l'on souhaite contrôler, sur une ou plusieurs directions de l'espace. Cette variation périodique de l'indice optique suivant les différentes directions entraîne l'apparition des gammes de fréquence pour laquelle la lumière ne peut alors plus se propager. Par analogie avec les semi-conducteurs ces bandes de fréquences sont appelées Bandes Interdites Photoniques (BIP).

Le domaine de l'optique intégrée, forme un vaste champ d'applications des cristaux photoniques. La conception de dispositifs optiques intégrés se base sur une ingénierie de défauts structuraux, simples ou étendus, induisant dans la bande interdite photonique d'un cristal photonique bidimensionnel des états autorisés (modes de défauts). Les cristaux photoniques bidimensionnels offrent le meilleur compromis entre des propriétés intéressantes, notamment pour le domaine des composants pour l'optique intégrée, et une technologie de fabrication.

Les applications potentielles des matériaux à bandes interdites photoniques BIP-2D sont multiples et variées : réalisation de cavités résonantes de taille très réduite, de guides d'ondes, de virages, de filtres sélectifs, de multiplexeurs - démultiplexeurs et de fibres optiques. Ces matériaux vont donner jour à de nouveaux composants optoélectroniques autrement plus performants et compacts que ceux classiques que nous connaissons actuellement. Les réalisations des filtres sélectifs en incluant des défauts ponctuels et linéiques dans un cristal photonique bidimensionnel peuvent être validées [1].

Un filtre est un élément ou une fonction dont l'objectif est de sélectionner une ou plusieurs bandes de fréquences parmi le spectre électromagnétique et d'en éliminer d'autres. Dans le cas présent, nous nous intéressons uniquement à des filtres sélectifs c'est-à-dire qui sélectionnent une seule fréquence. Ils permettent de sélectionner le signal désiré tout en rejetant ceux non-désirés.

Dans ce travail de mémoire nous nous sommes intéressés à l'étude des propriétés optiques d'un filtre add-drop à cristal photonique bidimensionnel fabriqués dans une matrice semi-conductrice à base de GaAs.

Ce manuscrit est constitué de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'énumération des différents cristaux photoniques. L'analogie entre l'équation de Schrödinger et les équations de Maxwell est exposée. Afin de mieux comprendre les cristaux photoniques bidimensionnels CPs 2D sur lesquels nous allons orienter notre étude, les différentes propriétés de ces structures sont brièvement exposées.

Dans le second chapitre, nous décrivons les méthodes numériques ainsi que les logiciels de simulation utilisés dans le chapitre trois de ce travail pour modéliser les propriétés des bandes interdites photoniques des cristaux photoniques bidimensionnels structuré en réseau triangulaire en particulier le Bandsolve et le Fullwave.

Le troisième chapitre est entièrement dédié à l'étude de l'influence des paramètres physiques et géométriques sur le coefficient de transmission et le facteur de qualité d'une cavité Hexagonal à cristaux photoniques. D'autres part, nous avons l'étude l'influence les paramètres physiques (n) et géométrique (r) sur le filtre de type Add- Drop pour calculer le facteur de qualité (Q). Nous avons utilisé au cours de ce chapitre deux moteurs de simulation : Le Bandsolve et Le Fullwave de Rsoft CAD.

En fin, nous terminons ce mémoire par une conclusion.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITES SUR LES CRISTAUX

PHOTONIQUES

I.1. Introduction

Pendant la dernière décennie, les cristaux photoniques (CPs), également connus sous le nom de structures à bandes interdites photoniques avec l'abréviation BIP (en anglais, Photonic Band Gap : PBG), ont été sujets à plusieurs travaux de recherches. Ces structures sont des systèmes très prometteurs pour des applications dans le domaine des ondes électromagnétiques, pour de réelles réalisations dans le domaine des micro-ondes, l'optoélectronique et les télécommunications optiques. Plusieurs travaux ont été réalisés sur les semi-conducteurs profitant des avancées technologiques en microélectronique [1].

L'objectif de ce chapitre est de présenter les concepts de base liés aux cristaux photoniques, les différents types de CPs, leurs grandeurs caractéristiques géométriques et physiques, techniques de modélisation et le domaine des applications optiques qui peuvent résulter de ces matériaux.

I.2. Histoires des cristaux photoniques

Les premières études portant sur un diélectrique à propriété périodique remontent à 1887 lorsque Lord Rayleigh décrit le comportement des ondes dans un film multicouches pour lequel l'indice de réfraction alterne d'une couche à l'autre (Rayleigh, 1887) [2]. Ce type de structure est appelé réseau de Bragg. On peut choisir l'épaisseur des couches pour obtenir une structure parfaitement réfléchissante sur une certaine bande de longueurs d'onde. Celle-ci est appelée bande interdite électromagnétique ou photonique.

L'idée d'une bande interdite dans les trois dimensions est explorée en premier par E. Yablonovitch qui étudie une façon d'empêcher l'émission spontanée dans les semi-conducteurs pour augmenter l'efficacité des lasers (Yablonovitch, 1987) [3]. Il imagine une structure avec une périodicité spatiale de période égale à la moitié de la longueur d'onde dans les trois dimensions. C'est en 1991 qu'une première structure avec une bande interdite photonique est fabriquée, en perçant des trous dans un diélectrique selon trois angles différents (Yablonovitch, T.J. Gmitter, Leung., 1991) [4].

Les cristaux photoniques à deux dimensions sont aussi étudiés car ils sont beaucoup plus simples à fabriquer. Ils ont rapidement permis de valider la théorie et les résultats de simulation (Robertson, Arjavalingam, Meade, Brommer, Rappe, Joannopoulos, 1992). De plus, si une ligne de trous est retirée d'un cristal photonique à deux dimensions, les modes qui sont dans la bande interdite sont guidés le long de cette ligne de défauts. Cette propriété est utilisée pour faire des circuits photoniques (Sharee J. McNab, 2003). À terme, ils pourraient remplacer

les circuits électroniques grâce à un transfert d'information plus rapide pour des photons que des électrons [5].

I.3.Définition des cristaux photoniques

Les cristaux photoniques sont des matériaux dont l'indice diélectrique varie de manière périodique à l'échelle de la longueur d'onde, sur une ou plusieurs directions de l'espace. La périodicité peut être unidimensionnelle 1D (miroir de Bragg), bidimensionnelle 2D ou encore tridimensionnelle 3D (Figure I.01). Cette variation périodique de l'indice optique suivant les différentes directions entraîne l'apparition de gammes de fréquence pour laquelle la lumière ne peut alors plus se propager. C'est l'analogie entre la propagation d'une onde électromagnétique dans ces milieux et la propagation des électrons dans un cristal photonique qui a mené à l'appellation de ces bandes de fréquences «Bandes interdites Photoniques». La réalisation d'une périodicité sur toutes les directions de l'espace permet de réfléchir une onde lumineuse quelque soit son angle d'incidence ou sa polarisation [6,7].

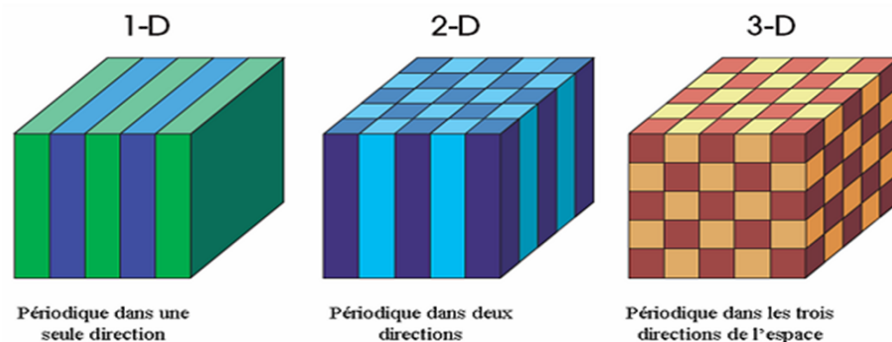


Figure I.01 : Représentation schématique de cristaux photoniques unidimensionnels (1D), bidimensionnel (2D) et tridimensionnel (3D) [8].

Ces structures peuvent être obtenues par un arrangement périodique de deux matériaux différents. Leur forme la plus simple est une structure périodique à une dimension composée d'un empilement de couches également appelé « miroir de Bragg ». La généralisation de ce concept peut être étendu en deux et à trois dimensions. Autrement dit, ces matériaux ont la capacité d'inhiber la propagation de la lumière dans certaines directions pour une gamme de fréquences bien déterminée appelée : la bande interdite photonique (BIP). Cette particularité optique intervient lorsque la longueur de 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 [1].

La propriété de « gap » ou « bande interdite » a été initialement montrée par Lord Rayleigh en 1887 dans les structures de type miroir de Bragg. La généralisation du concept à deux et trois dimensions a été initiée en 1987 par Zengerle, Yablonovitch [2] et John [3] dans le but de contrôler l'émission spontanée de la lumière.

On peut rencontrer ces structures périodiques dans la nature sous forme minérale comme les opales qui sont des minéraux composés d'arrangements de sphères de silice hydratée. Leurs feux sont dus à la diffraction de la lumière par leur structure de cristal photonique tridimensionnel. L'origine de la coloration de nombreuses espèces animales et végétales provient aussi de motifs périodiques. La coloration bleue des ailes de papillons morpho et des feuilles de certaines variétés de Sélaginelle en sont des exemples. Les couleurs bleu, vert, jaune et marron des plumes de paons proviennent de la diffraction par des cristaux photoniques 2D à nombre et longueur de maille variables (Figure I.02) [9].

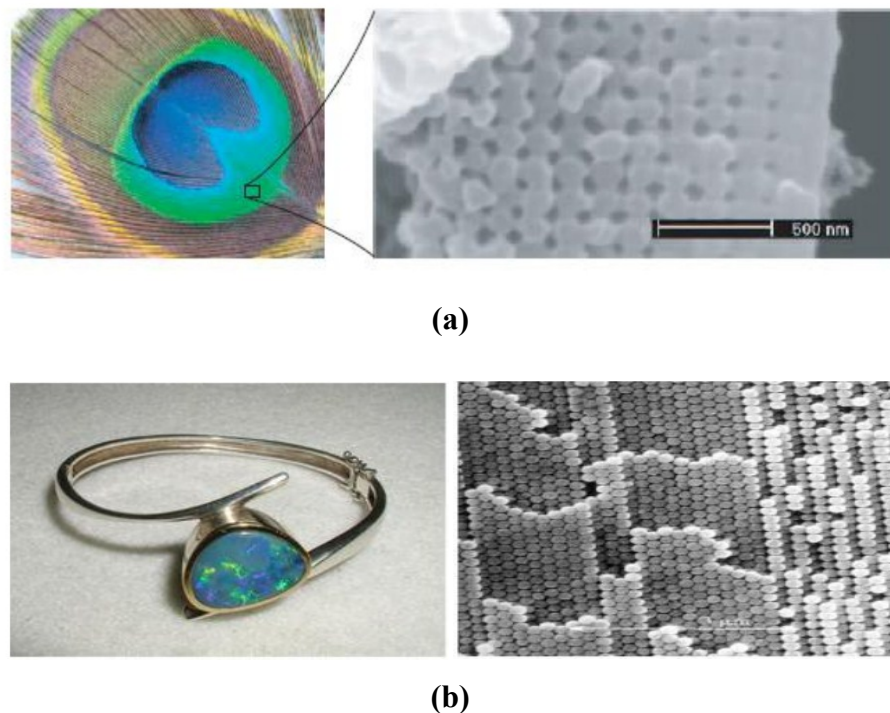


Figure I.02 : Cristaux photoniques naturels : (a) Plume de paon, (b) Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodique de silice accompagné par son image au MEB [1], [9].

I.4. Différents types des cristaux photoniques

I.4.1. Les cristaux photoniques unidimensionnel (1D)

Ces structures sont couramment utilisées sous le nom de réseau de Bragg. Elles sont généralement réalisées par un empilement de couches d'indice de réfraction différent et

d'épaisseur optique $\lambda_g/4$. λ_g : étant la longueur d'onde guidée autour de laquelle le matériau doit interdire la propagation des ondes électromagnétiques sous une incidence normale. Les réseaux de Bragg ont prouvé leur utilité dans de nombreuses applications : convertisseurs de modes pour fibres optiques, filtres sélectifs de longueur d'onde, multiplexeurs [6].

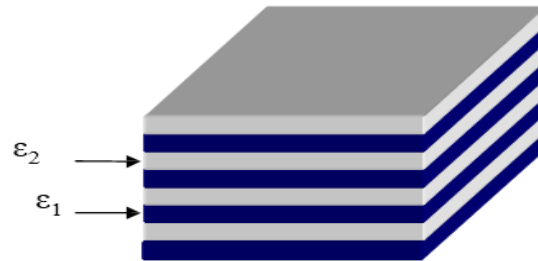


Figure I.03 : Schéma d'un cristal photonique 1D : miroir de Bragg [9].

Par rapport à un miroir de Bragg classique, celui à cristal photonique présente un avantage dans la mesure où il permet d'avoir une grande réflectance avec un nombre de couches réduit, ce qui permet de s'affranchir du même coup des problèmes de contraintes mécaniques. Ceci n'a été rendu possible que grâce à un contraste d'indice important [5].

I.4.2. Les cristaux photoniques bidimensionnels (2D)

Les cristaux photoniques bidimensionnels (CPs 2D) sont des matériaux ayant un constant diélectrique périodique dans 2 directions de l'espace. Les cristaux photoniques à deux dimensions les plus cités dans la littérature sont ceux composés de réseaux de trous d'air cylindriques percés dans un matériau diélectrique ou de réseaux de cylindres diélectriques entourés d'air. Ces trous ou ces cylindres peuvent être arrangés suivant différentes configurations comme, par exemple, les réseaux carré, triangulaire, hexagonal [8].

L'objectif de ce chapitre est de présenter les concepts de base liés aux cristaux photoniques bidimensionnels. Nous verrons ensuite les principales caractéristiques des cristaux à deux dimensions avant de nous focaliser sur les structures étudiées au cours de ce mémoire.

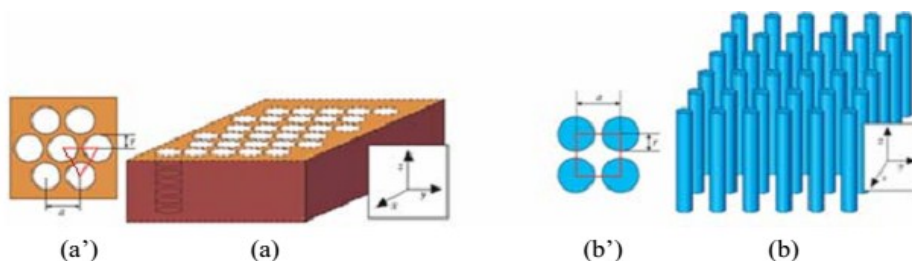


Figure I.04 : Exemple Cristal photonique bidimensionnel : (a) réseau triangulaire de trous d'air, (b) réseau carré de tiges diélectriques. (a') et (b') montrent les vues de haut des deux réseaux. a est le pas du réseau [10].

I.4.3. les Cristaux photoniques tridimensionnels

Les cristaux photoniques tridimensionnels (CPs3D) sont des structures dont la constante diélectrique varie suivant les trois dimensions de l'espace. Ils constituent la seule structure qui permet d'obtenir une bande d'énergie interdite dans toutes les directions de l'espace.

Le premier cristal photonique tridimensionnel a été fabriqué par K.M. Ho et al [6]. 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 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 [7].

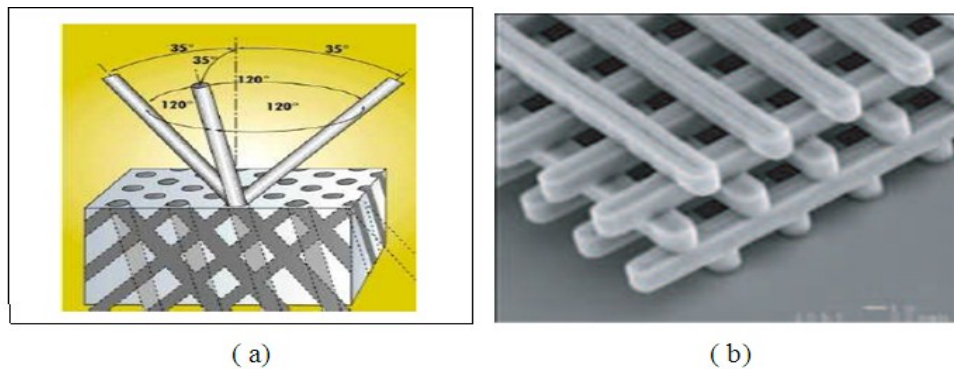


Figure I.05 : Structures 3D :(a) « La Yablonovite» [10], [11], (b) Structure «Tas de bois» [12].

La réalisation technologique des BIP 3D est particulièrement difficile s'ils sont destinés à fonctionner dans le visible. Les techniques généralement mises en œuvre sont particulièrement lourdes.

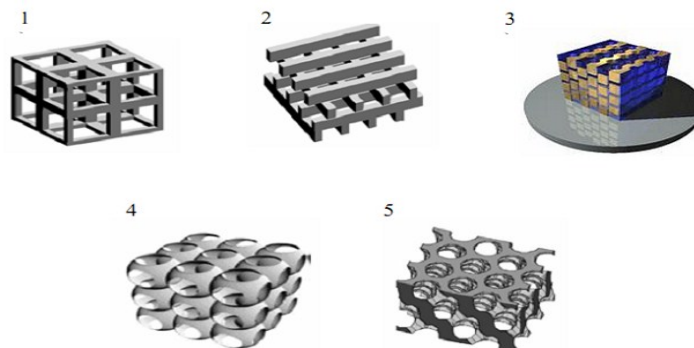


Figure I.06 : Différentes structures 3D : la structure cubique (1) ; tas de bois (2); Structure multicouches (3) ; les opales (4) et la Yablonovite (5),[13].

I.5. différents types de structures

Les cristaux photoniques bidimensionnels sont des structures dont l'indice de réfraction varie suivant deux directions de l'espace et invariant suivant la troisième direction. Il existe deux types de structures périodiques bidimensionnelles :

- a- Les structures dites «connectées» :** Dans ces structures l'indice de réfraction du motif élémentaire n_1 est inférieur à l'indice n_2 de la matrice diélectrique. Cette structure est constituée de trous d'air percés dans la matrice diélectrique comme il est montré sur la figure I.07 (a). [14], [15].
- b- Les structures dites «déconnectées» :** Dans ce cas, les motifs élémentaires sont d'indice n_1 supérieur à l'indice n_2 de l'espace inter-motifs comme il est représenté sur la figure I.07 (b). Elles sont constituées de tiges diélectriques ou métalliques alignées périodiquement dans l'air [14], [15].

Si on prend comme exemple un cristal photonique à deux dimensions avec des tiges, le calcul du diagramme de bande de ce cristal nous renseigne sur les propriétés (la position et la largeur) des bandes interdites photoniques pour chaque polarisation :

* **Polarisation électrique (TE) :** Le champ magnétique dans ce cas est parallèle aux barreaux de la structure considérée (le champ magnétique est parallèle à l'axe des tiges).

* **Polarisation magnétique(TM) :** Le champ électrique dans ce cas est parallèle aux barreaux de la structure considérée (le champ électrique est parallèle à l'axe des tiges), [16].

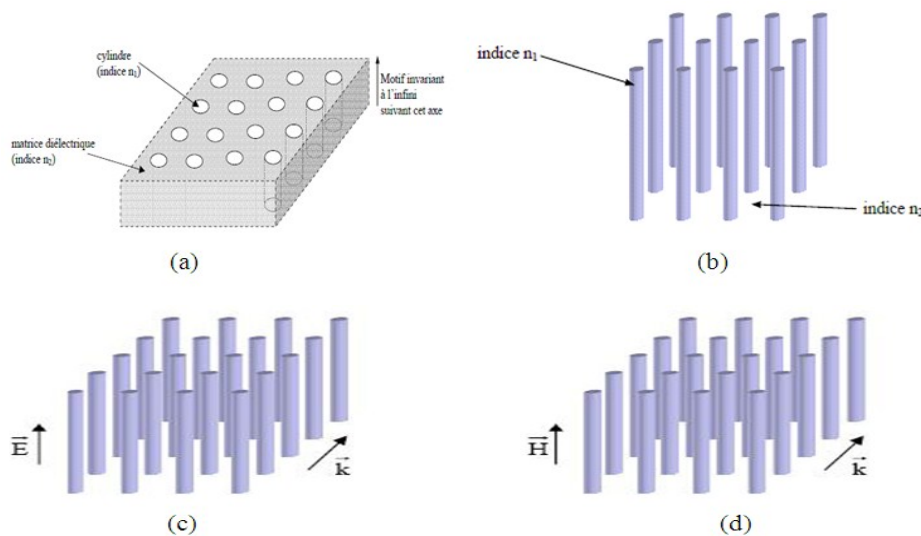


Figure I.07 : Structures bidimensionnelles : (a) connectée, (b) déconnectée, (c) Polarisation TM, (d) polarisation TE [7], [16].

I.6. Réseau direct et réseau réciproque

I.6.1. Réseau direct

Considérons la structure périodique à deux dimensions représentée sur la (figure I.08). Elle est formée de motifs identiques, disposés à égales distances les uns des autres sur les intersections formées par des parallèles aux droites Δ_1 et Δ_2 faisant entre elles un angle θ . Ces droites forment ainsi le réseau de la structure considérée qui est invariante par translation suivant la direction orthogonale au plan du réseau (Oxy). Ce réseau est caractérisé par ses vecteurs de base d_1 et d_2 formant le réseau direct.

Un nœud du réseau constituera l'origine O de notre repère. Les normes \vec{d}_1 et \vec{d}_2 de sont égales à la longueur d_1 entre deux nœuds consécutifs (appartenant à une même parallèle à la droite Δ_1), et à la longueur d_2 entre deux nœuds consécutifs (appartenant à une même parallèle à la droite Δ_2). Les longueurs d_1 et d_2 peuvent ne pas être identique [16].

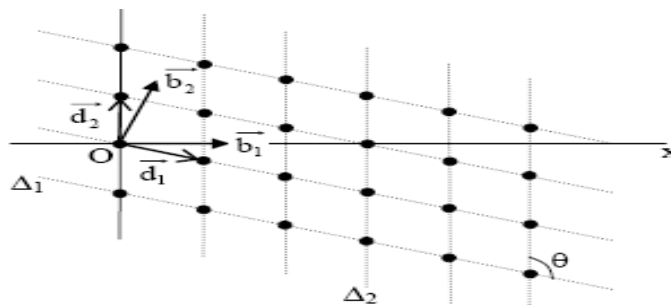


Figure I.08 : Structure périodique 2D, vecteurs de base des réseaux direct et réciproque, [16].

Tout nœud du réseau peut être défini et repéré par un vecteur \vec{r}_{112} ayant pour origine l'origine du réseau et pour extrémité le nœud considéré, ce vecteur a pour expression :

$$\vec{r}_{112} = d_1 l_1 \vec{d}_1 + d_2 l_2 \vec{d}_2 \dots \dots \dots (I-1)$$

Tout l'espace direct peut être segmenté en mailles élémentaires. La maille élémentaire est obtenue grâce à la surface représentée par les vecteurs de base et ayant leurs origines en un même nœud [16].

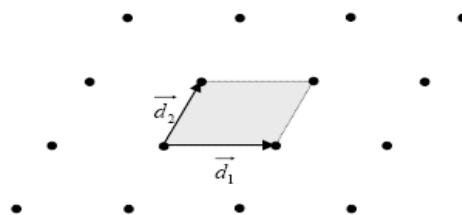


Figure I.09 : Maille élémentaire du réseau direct [16].

I.6.2. Réseau réciproque

A tout réseau direct, on peut faire correspondre un réseau réciproque ayant un système de base constitué par deux vecteurs \vec{b}_1 et \vec{b}_2 définis par le produit scalaire suivant :

$$(\vec{b}_t, \vec{b}_k) = \delta_{tk} \dots \dots \dots (I-2)$$

Avec δ_{tk} représentant le symbole de Kronecker.

$$\delta_{tk} = \begin{cases} 0 & \text{si } t \neq k \\ 1 & \text{si } t = k \end{cases} \dots \dots \dots (I-3)$$

Il est possible d'expliquer l'emploi du terme « réseau réciproque », par un calcul simple, en prenant deux axes de coordonnées rectangulaires Ox et Oy ayant comme origine l'origine O du réseau, alors les vecteurs \vec{d}_1, \vec{d}_2 , peuvent être définis sous forme matricielle par :

$$D = \begin{bmatrix} \vec{d}_{1x} & \vec{d}_{1y} \\ \vec{d}_{2x} & \vec{d}_{2y} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (I-4)$$

De même, le système de base du réseau réciproque peut être défini par la matrice [16].

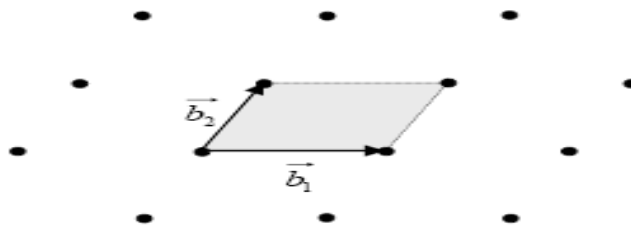


Figure I.10 : Maille élémentaire d'un réseau réciproque [16].

I.7. Différentes familles de cristaux photoniques 2D

Les cristaux photoniques bidimensionnels planaires sont fabriqués à l'aide de technologies standard issues de la microélectronique qui laisse une grande liberté quant aux modifications locales des propriétés du réseau. Ces avantages font de ces structures des candidats prometteurs pour la réalisation de composants pour l'optique intégrée.

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

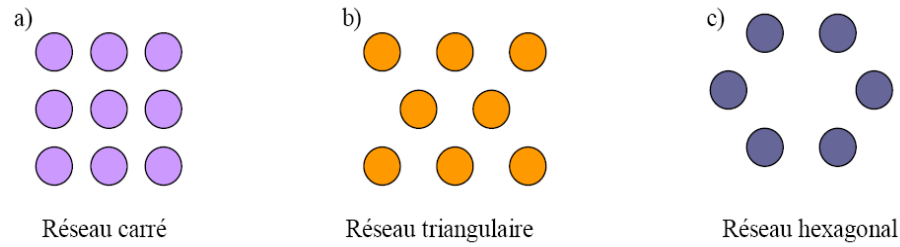


Figure I.11 : Principaux réseaux dans un cristal photonique bidimensionnel [17].

I.7.1. Le réseau carré

Dans ce réseau la maille primitive est un carré de côté « a » comme il est montré sur la figure I.12 (a). Ce type de réseau est très sensible à l'angle d'incidence et à la polarisation de l'onde électromagnétique. Il est ainsi difficile d'obtenir une bande interdite totale, c'est-à-dire une bande interdite qui empêche la propagation quelle que soit la polarisation. La figure I.12 (b) et (c) représentent le réseau réciproque et la zone de Brillouin respectivement [13,16].

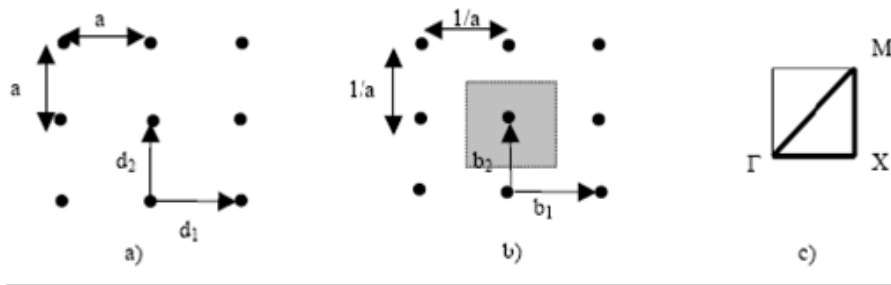


Figure I.12 : Représentation : a) d'un réseau carré, b) son réseau réciproque, c) de sa zone de Brillouin [14], [16].

I.7.2. Le réseau triangulaire

Le réseau triangulaire, est le réseau 2D de plus haute symétrie dès lors que l'on se limite à un seul « atome » par maille. Chaque nœud du réseau est espacé de son proche voisin d'une même distance « a » (Figure I.13). Cette structure est moins sensible l'angle d'incidence que le réseau carré mais la bande interdite complète reste difficile à obtenir.

La zone de Brillouin pour ce type de réseaux est un hexagone comme il est montré sur la figure I.13 (c).

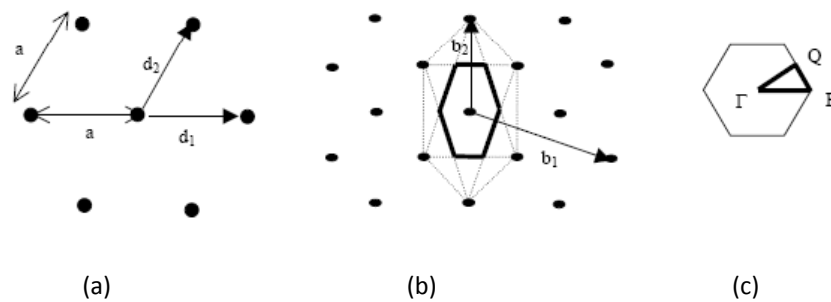


Figure I.13 : Représentation : a) d'un réseau triangulaire, b) de son réseau réciproque, c) et de sa zone de Brillouin [15,16].

I.7.3. Le réseau hexagonal

Dans cette structure tous les nœuds sont identiques et espacés de “a”, elle est similaire à la structure cristalline du graphite [16,17] (figure I.14).

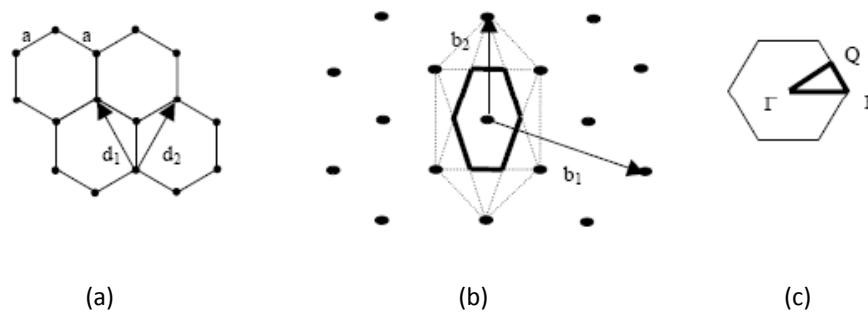


Figure I.14 : Représentation : a) d'un réseau hexagonal, b) de son réseau réciproque, c) et de sa zone de Brillouin [15,16].

Les propriétés géométriques élémentaires des réseaux bidimensionnels carré et triangulaires de trous circulaires sont résumées dans le tableau I-01. Le facteur de remplissage f désigne le rapport entre l'aire occupée par le motif et l'aire de la maille élémentaire du réseau.

	Réseau carré	Réseau triangulaire
Vecteurs directs (a_1, a_2)	$a_1 = (1, 0)$ $a_2 = (0, 1)$	$a_1 = (1, 0)$ $a_2 = (\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2})$
Vecteurs réciproques (b_1, b_2)	$b_1 = \frac{2\pi}{a} (1, 0)$ $b_2 = \frac{2\pi}{a} (0, 1)$	$b_1 = \frac{2\pi}{a} (1, -\frac{\sqrt{3}}{2})$ $b_2 = \frac{2\pi}{a} (0, \frac{2}{\sqrt{3}})$
Facteur de remplissage	$f = \pi \frac{r^2}{a^2}$	$f = \pi \frac{r^2}{a^2} \frac{2}{\sqrt{3}}$

Tableau I.01 : Caractéristiques géométriques principales des réseaux bidimensionnels carré et triangulaire [10].

I.8. Les différents des types de défauts

Les cristaux photoniques ne permettront de réaliser de véritables fonctions optiques et de contrôler les flux de lumière que si l'on y introduit des défauts. Comme pour les cristaux solides, il existe deux principaux types de défauts : les défauts ponctuels et les défauts étendus. Les premiers, associés à une rupture locale de périodicité, se traduisent par la présence de modes électromagnétiques à des fréquences discrètes, analogues aux défauts électroniques. Les seconds, que l'on peut considérer comme analogues aux dislocations, peuvent donner lieu à des bandes permises de propagation, là où se trouve une bande interdite dans le cristal idéal [6], [15].

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

I.8.1. Les défauts ponctuels

Il existe de multiples manières de créer des défauts ponctuels dans les cristaux photoniques. On peut aussi procéder au retrait, à l'ajout ou à la modification d'un ou plusieurs motifs du cristal. Pour reprendre la terminologie de la physique du solide, on réalise alors des défauts lacunaires ou de substitution (Figure I. 15). Dans tous les cas de cette figure, on crée des cavités optiques dont les modes de résonances vont venir se positionner en énergie au sein des bandes interdites du cristal [6], [15].

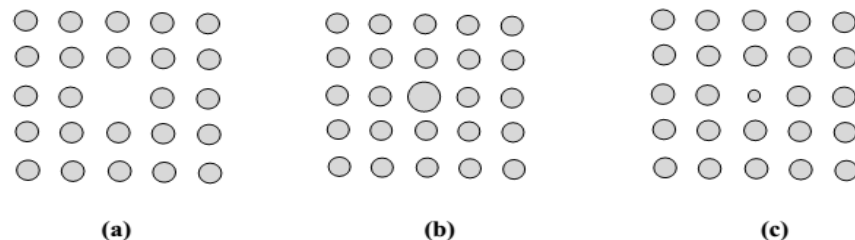


Figure I.15 : Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire ; (b) et (c) Défauts de substitutions [6], [15].

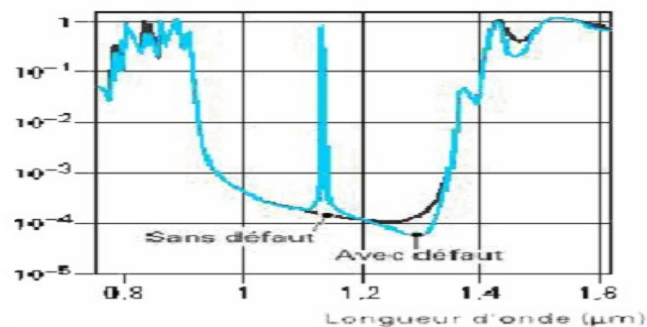


Figure I.16 : Spectre de transmission d'un cristal hexagonal de tiges diélectriques avec ou sans défaut lacunaire [15], [18].

I.8.2. Les défauts étendus

a) Dimensions des motifs élémentaires

Pour rompre la périodicité d'une structure BIP, on peut modifier la taille du motif élémentaire qui compose le cristal photonique (Figure I. 17).

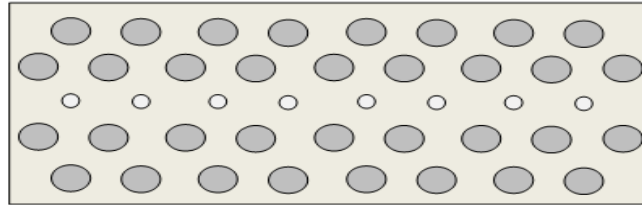


Figure I.17 : Défaut de dimension du motif élémentaire [6].

Sur cette figure les dimensions des motifs élémentaires de la troisième rangée ont été réduites.

b) Distance entre motifs élémentaires

On peut aussi modifier l'espace qui existe entre les motifs élémentaires des réseaux cristallins (Figure I. 18).

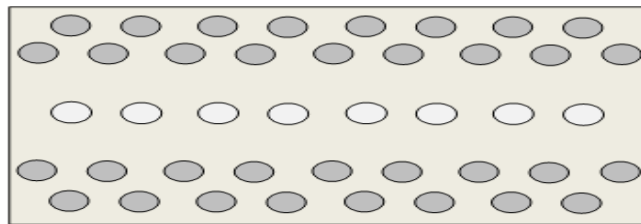


Figure I. 18 : Défaut de distance entre motifs élémentaires [6].

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

c) Valeur de la permittivité relative des motifs élémentaires

Il est possible de modifier localement la nature du matériau et plus concrètement en agissant sur la valeur de la permittivité relative (Figure I. 19).

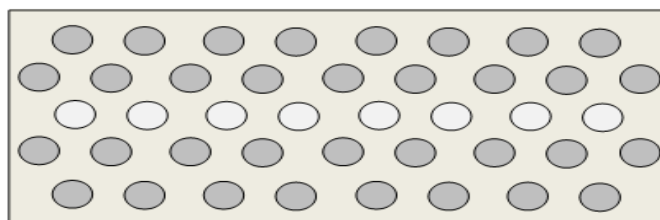


Figure I. 19 : Défaut sur la permittivité relative [6].

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

d) Défaut par vacuité

Le défaut par vacuité correspond à l'élimination de motifs élémentaires qui se trouvent remplacés par la permittivité du substrat (Figure I. 20).

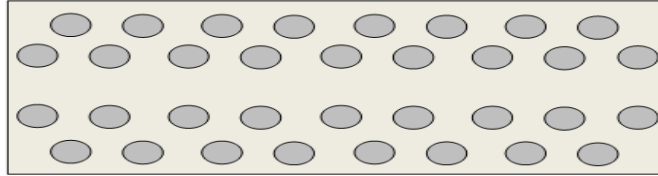


Figure I. 20 : Défaut par vacuité (c'est le défaut le plus utilisé). Les motifs élémentaires de la rangée du milieu ont été enlevés [6].

I.9. Ouverture d'une bande interdite omnidirectionnelle

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

Considérons l'exemple du cristal photonique 2D représenté dans la figure (I.21 (a)). Quelle que soit la direction de propagation dans le plan d'une onde lumineuse, celle-ci voit une structure diélectrique périodique. À chaque direction d'incidence i , k est donc associée une bande interdite unidimensionnelle. La plage spectrale commune à toutes ces directions, quand elle existe, constitue une bande interdite omnidirectionnelle dans le plan (Figure I.21 (b)). Pour obtenir une bande interdite dans tout l'espace, un cristal photonique 3D est nécessaire.

Pour ouvrir une bande interdite dans le plan ou l'espace, toutes les bandes interdites unidirectionnelles doivent se recouvrir au moins partiellement sur la première zone de Brillouin. Le recouvrement sera maximal si les bandes interdites sont centrées à des énergies proches. La situation la plus favorable est celle où la zone de Brillouin est la plus isotrope possible. Les réseaux qui s'en rapprochent le plus sont le réseau triangulaire à deux dimensions et le réseau cubique à faces centrées à trois dimensions [15].

Pour obtenir des bandes d'énergies interdites larges, le contraste d'indice doit être suffisamment grand. Pour un réseau triangulaire, un contraste d'indice supérieur à 2.6 est nécessaire à l'ouverture d'une bande interdite dans tout le plan. Aux longueurs d'onde du proche infrarouge utilisées en optique intégrée, les semi-conducteurs possèdent à la fois un fort indice de réfraction (entre 2.5 et 4) et une faible absorption. Combinés à l'air, ils constituent donc un choix idéal pour la réalisation de cristaux photoniques à ces longueurs d'onde [18,19].

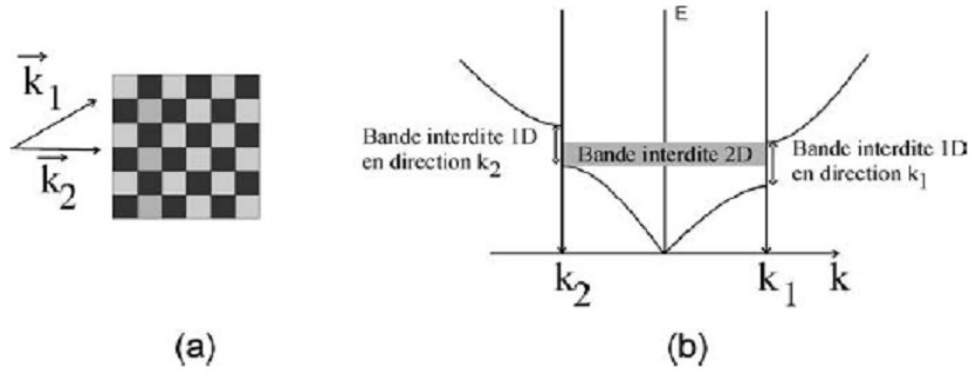


Figure I.21 : (a) Cristal photonique 2D ; (b) Une bande interdite omnidirectionnelle est obtenue dans le plan lorsque toutes les bandes interdites 1D se recouvrent [15], [19].

I.10. Propriétés des cristaux photoniques bidimensionnels

Un grand nombre d'applications des cristaux photoniques se situe dans le domaine de l'optique, donc pour des longueurs d'onde voisines du micron. Pour un contrôle omnidirectionnel de la lumière, les cristaux photoniques tridimensionnels sont les mieux adaptés malheureusement, ce genre de structures sont plus difficile à la réalisation technologique.

Les matériaux à Bande Interdite Photonique unidimensionnelle (BIP 1D) ou encore appelés réseau de Bragg, ne contrôlent les radiations lumineuses que dans une certaine ouverture angulaire autour de la normale.

Les cristaux photoniques bidimensionnels sont plus faciles à réaliser dans le domaine des longueurs d'onde du proche infrarouge et même du visible. Ils permettent le contrôle de la propagation des ondes électromagnétiques dans le plan de périodicité c'est à dire avec des angles d'incidences variables. Pour cela, on s'oriente vers des matériaux à Bande Interdite Photonique bidimensionnelles qui ne sont pas aussi performants que leurs analogues tridimensionnels [7].

I.11. Analogie électron- photon

Les notions de « gap de photon » ou de « bandes interdites photoniques » sont issues de l'analogie entre électrons et photons ou, plus exactement, de celle entre fonction d'onde électronique et champ électromagnétique [18], [20].

Les équations gouvernant la propagation de la lumière dans un cristal photonique sont les quatre équations de Maxwell ($E(r, t)$: champ électrique, $H(r, t)$: champ magnétique) .

$$\nabla \cdot (\varepsilon(r)E(r, t)) = 0 \quad (\text{I-5})$$

$$\nabla \cdot H(r, t) = 0 \quad (\text{I-6})$$

$$\nabla \times E(r, t) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} H(r, t) \quad (\text{I-7})$$

$$\nabla \times H(r, t) = \varepsilon_0 \varepsilon(r) \frac{\partial}{\partial t} E(r, t) \quad (\text{I-8})$$

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

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla \times H(r) \right) = \frac{\omega^2}{c^2} H(r) \quad (\text{I-9})$$

L'équation (I-9) 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.

I.12. 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. 12 .1. Le contraste d'indice $\Delta\varepsilon$

Le contraste d'indice $\Delta\varepsilon$ est la différence entre les permittivités des deux matériaux, qui peut être comparé à la hauteur de la barrière de potentiel de la physique du solide. Il est donné par l'équation (I. 10) [6] :

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_{\text{substrat}} - \varepsilon_{\text{trou}} \quad (\text{I.10})$$

Avec :

$\varepsilon_{\text{substrat}}$: permittivité du matériau de haut indice.

$\varepsilon_{\text{trou}}$: permittivité du matériau de base indice.

I. 12. 2. La période

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 est : $a = (a_1 + a_2)$ 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. 22) [6], [16].

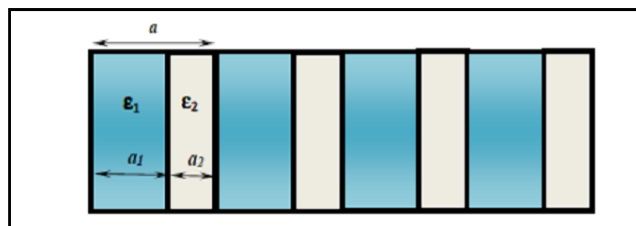


Figure I. 22 : Un cristal photonique unidimensionnel [6].

I. 12 .3. Le facteur de remplissage

Le facteur de remplissage f peut être comparé au largeur du potentiel périodique de la physique du solide. S'il est pris pour le matériau de haut indice par exemple, il est défini comme le rapport entre le volume occupé par ce matériau dans la cellule élémentaire du cristal et le volume de cellule de cette dernière. L'influence de ces différents paramètres sur le comportement d'une structure photonique peut être comprise par analogie avec un potentiel périodique induit par l'arrangement des atomes dans un semi-conducteur [6], [16].

I.13. Les applications des cristaux photoniques

I.13.1 La cavité en cristaux photoniques

I.13.1.1 Définition

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

Dans un premier cas la lumière est confinée par la réflexion totale interne qui découle des lois de Snell-Descartes. A l'interface entre deux matériaux et pour un angle d'incidence inférieur à un angle critique fonction de la différence d'indice entre les deux matériaux la lumière est totalement réfléchi. Cette même approche dérivée de l'optique géométrique permet aussi de décrire la propagation de la lumière dans un guide d'onde. Des exemples de confinement par réflexion totale interne sont donnés par les résonateurs à mode de galeries comme les micro-disques, microsphères, micro-tores et micro-anneaux [15].

I.13. 1.2. Les différents des types de cavités

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

a)- Cavité hexagonale

Dans un cristal triangulaire, les cavités hexagonales, dont les côtés sont les rangées denses, constituent une série de cavités canoniques. Il est commode de les nommer par le nombre de périodes le long de chaque côté. Ainsi, un seul trou manquant correspondra à H_1 , sept trous manquants à H_2 , etc. (figure I-23). Les cavités de type H_n , de forme hexagonale, n'étant le nombre de rangées manquantes par côté de l'hexagone sont les plus étudiées [15].



Figure I.23 : Les différents types de cavités [15].

b)- Cavité carrée

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

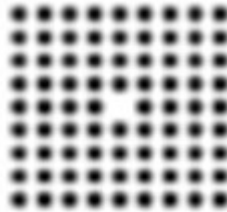


Figure I.24 : Exemple de cavité carrée dans un cristal photonique carré avec un paramètre de maille 600nm [15].

c)- Cavité triangulaire

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

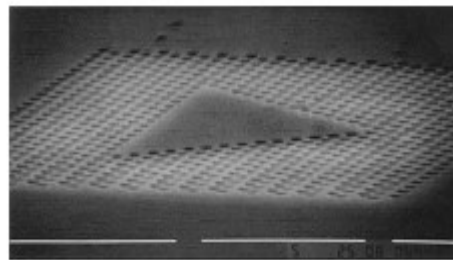


Figure I.25 : Exemple de cavité triangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 600nm [15].

d)- Cavité rectangulaire

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

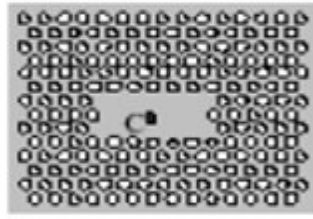


Figure I.26 : Exemple de cavité rectangulaire dans un cristal photonique triangulaire avec un paramètre de maille 560nm [15].

I.13.2. Filtres sélectifs à base de cavités à cristaux photoniques

Les télécommunications et systèmes optiques actuels sont basés sur le codage de l'information sur différents canaux, ou longueurs d'onde. Dans ces systèmes, il est nécessaire d'une part de coder le signal sur différents canaux proches les uns des autres pour que l'ensemble de l'information se propage à la même vitesse et d'autre part de séparer en bout de ligne l'information codée dans chaque canal. On parle de multiplexage/démultiplexage en longueurs d'onde et ces fonctions sont réalisées par des filtres sélectifs. Les cavités à cristaux photoniques planaires sont de bons candidats pour réaliser de telles opérations sur puce. On trouve dans la littérature deux classes de filtres sélectifs à cristaux photoniques : les cavités de type Add/Drop couplées de manière évanescente au guide d'onde porteur du signal ou les cavités de type Fabry Péroth insérées directement dans le guide. Dans l'ensemble de ces travaux, l'objectif est de réaliser des cavités de faible volume et possédant un minimum de pertes [9].

I.13.2.1. Filtres de type Add-Drop

Le filtrage « spatio-fréquentiel » est une des spécificités des filtres à cristal photonique. À ce titre, la figure (I.27) présente le schéma d'un filtre Add-Drop dont l'enjeu est stratégique pour les télécommunications optiques. À la différence des communications téléphoniques où les signaux électriques sont véhiculés par des fils de cuivre, la transmission des signaux optiques s'effectue par des fibres optiques le long desquelles peuvent coexister plusieurs canaux de longueurs d'onde indépendants (plus de 1000 dans la prochaine génération de fibres). Chaque canal de longueur d'onde est censé occuper un domaine spectral $\Delta\lambda$ d'environ 0.3nm au voisinage de $\lambda=1500\text{nm}$ (soit environ 40 GHz en fréquence), ce qui confère aux fibres optiques des capacités de débit global sans précédent, de plusieurs téraoctets par seconde. Cela étant, pour exploiter le signal correspondant à une information précise véhiculée le long de la fibre, il est nécessaire de soustraire (en anglais, to drop) à l'endroit de la réception le canal de longueur d'onde où se trouve cette information. De la même façon, si l'on

veut pouvoir ajouter (en anglais, to add) une information sur un canal de longueur d'onde donnée, il faut alors insérer le signal parmi l'ensemble des canaux d'information.

Cette double fonction de filtrage (Add-Drop) est donc essentielle dans les réseaux de télécommunications optiques. Dans le cas de la figure (I.27), le filtre représenté est conçu à partir d'un cristal photonique 2D de symétrie hexagonale où l'on a introduit deux guides d'ondes couplés entre eux par une cavité centrale, également de forme hexagonale. Des fibres optiques (non représentées) sont placées aux entrées-sorties des guides d'ondes. L'un des guides d'onde (celui du bas) sert à propager un ensemble de signaux à des longueurs d'ondes différentes λ_i , parmi lesquels se trouve le signal à la longueur d'onde λ_1 que l'on veut sélectionner. La cavité centrale est choisie de façon à présenter une résonance à cette longueur d'onde, le cercle représenté sur la figure indiquant la localisation du champ électromagnétique associé au mode résonnant. Si les guides sont parfaitement couplés à la cavité, le faisceau optique à la longueur d'onde λ_1 pourra ainsi passer intégralement d'un guide à l'autre, car la cavité optique présente une transmission unité pour le mode de champ qui lui est adapté. On aura donc réalisé la fonction de soustraction. On peut, à l'opposé, réaliser la fonction d'addition en injectant un signal de longueur d'onde λ_1 par l'entrée gauche du guide supérieur.

Diverses versions du filtre Add-Drop à base de cristal photonique ont déjà été réalisées. Cependant, la sélectivité est exigée pour prélever un canal de longueur d'onde parmi d'autres. Une telle sélectivité requière des facteurs de qualité de l'ordre de 10 000 pour la cavité servant au couplage (Fig. I.27) ainsi qu'un excellent couplage entre les guides et la cavité. Les meilleurs facteurs de qualité obtenus se situent autour de 3 000 pour les cavités les plus petites avec un seul trou manquant dans un cristal 2D [9]. Cette valeur croît à plus de 40 000 pour trois ou quatre trous manquants. Les travaux sont par ailleurs en cours pour optimiser le couplage entre guide et microcavité.

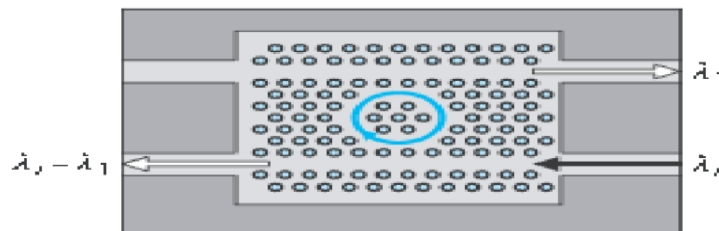


Figure I.27 : Exemple de Filtre de type Add-Drop [9].

I.13.2.2 Filtres de type Fabry-Pérot

Une fonction de filtre Fabry-Pérot a été intégrée à un guide W1 en insérant des motifs dans le guide. La plupart des longueurs d'ondes guidées seront réfléchies à l'extrémité du guide, sauf quelques-unes, qui seront couplées à la cavité. Cette approche permet plutôt de

réaliser des dispositifs de type Fabry-Pérot (si un second guide est placé face à la cavité). Une cavité mono défaut a été dans un premier temps utilisée et a permis d'obtenir une transmission résonnante. Les expériences de transmission ont pu être réalisées par C. Grilletau LEOM pour les dispositifs similaires de la figure (I.28) sur la membrane d'Inp avec un facteur de remplissage en air de l'ordre de 30%. Pour ce filtre, un taux de transmission de l'ordre de 5% est trouvé expérimentalement avec un facteur de qualité de 287. Ce taux de transmission est évidemment faible et provient des pertes des miroirs de la cavité et du couplage seulement partiel au mode de la cavité résonnante. Une manière naturelle d'obtenir un bon couplage entre le mode de cavité et le mode guidé est d'utiliser une géométrie de cavité proche de celle du guide, comme par exemple une portion de guide fermé.

Ce type de cavité linéaire est donc très bien adapté à un couplage avec des guides de largeurs similaires. [9]

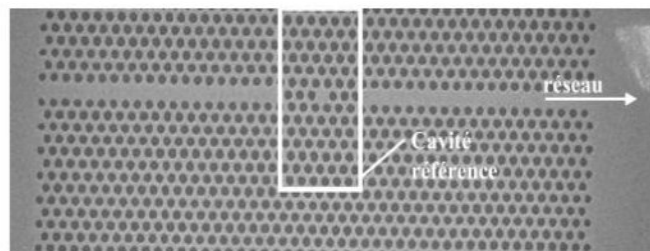


Figure I.28 : Image en microscopie électronique d'une fonction Fabry-Pérot intégrée à un guide [9].

I.13.3.Guides d'ondes

On peut également utiliser des défauts pour guider la lumière. Le processus de guidage dans ces guides à cristaux photoniques est différent de celui de guides d'onde classiques à réfraction puisqu'il repose entièrement sur l'existence d'une bande interdite omnidirectionnelle dans le plan et que le guide est modulé dans le sens de la propagation (figure I.29), par contre dans les guides d'onde classiques intervient le phénomène de réflexion totale interne avec un dioptre entre un milieu de haut indice et un milieu de plus faible indice[7].

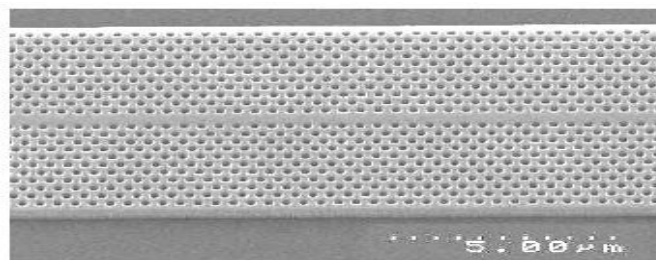


Figure I.29 : Exemple du guide d'onde mono-rangée réalisé dans un cristal photonique hexagonal de trous d'air sur un substrat de silicium sur isolant [7].

I.13.4.les multiplexeurs

Le multiplexage en longueur d'onde est une fonction particulièrement importante en optique intégrée, cette fonction est réalisée à l'aide de cristaux (figure I.30). Le but de cette technique est donc d'envoyer plusieurs longueurs d'ondes différentes dans une même fibre c.à.d. plusieurs informations en même temps. Ce dispositif peut être réalisé en utilisant la sélectivité d'une cavité résonante couplée par recouvrement des ondes évanescentes à des guides d'onde.

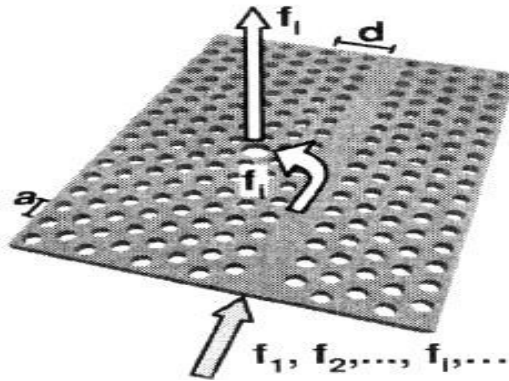


Figure I.30 : Schéma de principe d'un dispositif de multiplexage (insertion ou extraction d'une certaine longueur d'onde) [7], [18].

I.14. Conclusion

Les cristaux photoniques sont des matériaux dont l'indice de réfraction varie de façon périodique, à l'échelle de la longueur d'onde, dans une ou plusieurs directions. Cette périodicité est à l'origine de plusieurs propriétés intéressantes comme par exemple l'ouverture d'une bande photonique interdite interdisant la propagation de la lumière. Ces cristaux sont très prometteurs pour la réalisation de composants optiques planaires. Ces matériaux représentent une plate-forme extrêmement intéressante pour l'optique intégrée.

En effet, les conditions d'ouverture ainsi que les propriétés de la bande interdite photonique sont fortement liées à quelques paramètres géométriques et physiques.

Dans ce travail, l'intérêt est porté sur le réseau triangulaire car c'est le réseau le mieux adapté pour l'ouverture d'une large bande interdite, c'est pourquoi celle-ci est de loin la plus utilisée dans la littérature.

CHAPITRE II

MÉTHODES NUMÉRIQUES ET OUTILS DE SIMULATION

II.1. Introduction

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

Le développement des méthodes de modélisation optiques précises et rapides reste donc primordial pour l'étude de ces structures. Plusieurs méthodes ont été envisagées, comme la méthode des ondes planes (PWE), la matrice de transfert et la méthode différences finies dans le domaine temporel (FDTD) qui est la plus utilisée pour la modélisation des cristaux photoniques. De plus certains simulateurs ont été conçus pour faciliter cette tâche. Parmi ces simulateurs on peut citer trois moteurs de simulations le Fullwave et le Bandsolve et Beamprop de Rsoft CAD [14].

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les paramètres de la logiciel Rsoft CAD et les méthodes de modélisation utilisées dans la logiciel Rsoft CAD.

II.2. Méthodes de modélisation

La modélisation électromagnétique des propriétés des cristaux photoniques nécessite en général un fort investissement en programmation et en analyse numérique. Parmi les modèles théoriques traitant des cristaux photoniques, on peut d'abord distinguer deux catégories : les cristaux de taille finie et infinie. On peut ensuite considérer la dimensionnalité des cristaux étudiés (1D, 2D ou 3D). Les principales techniques de calcul utilisées pour les cristaux finis sont les méthodes des matrices de transfert, les théories de la diffraction par les réseaux et les différences finies dans le domaine temporel FDTD (Finité Différence Time Domain) [13]. Le calcul de structures infinies est généralement basé sur une méthode de décomposition du champ en ondes planes PWE (Plane Wave Expansion) [18]. Dans le cadre de ce mémoire, nous présenterons les méthodes PWE et FDTD [14, 15, 21].

II.2.1. La méthode des ondes planes (PWE)

La technique de décomposition en ondes planes consiste à résoudre, dans l'espace fréquentiel, l'équation d'onde en développant le champ magnétique sur une base d'ondes planes. Cette méthode est très efficace pour calculer les diagrammes de bandes de cristaux infinis parfaitement périodiques. Elle permet d'obtenir les cartes de champ dans la structure, et donc la polarisation et les symétries des modes d'une structure photonique [10]. Des logiciels libres utilisant partiellement ou entièrement une décomposition en ondes planes ont été développés.

Cette méthode permet aussi de calculer certaines structures non périodiques comme des guides à cristaux photoniques ou les cristaux photoniques planaires via une technique de « super cellule ». Cependant, lorsque la structure ne présente aucune périodicité (suite a une variation du paramètre de maille par exemple), la méthode n'est plus valable. On peut recourir alors à une méthode de type FDTD qui ne suppose aucune périodicité [14].

II.2.2. La méthode FDTD

La méthode FDTD (différences finies dans le domaine temporel) est une méthode générale de simulation qui permet d'étudier une grande variété de systèmes. Elle a été proposée initialement par Yee en 1966 [21]. Cette technique très utilisée en électromagnétisme consiste à la discrétisation des équations de Maxwell dans l'espace et dans le temps en utilisant une grille de cellules élémentaires. Les équations de Maxwell temporelles deviennent des équations reliant le champ d'une cellule à celui des cellules voisines entre deux instants t et $t+\delta t$. La période de l'échantillonnage temporel δt utilisé pour résoudre le problème est très inférieure aux périodes optiques. Contrairement à la méthode des ondes planes, cette méthode ne recherche pas de solution harmonique, mais propage le champ dans un espace et une durée définis. Les équations sont résolues à partir des conditions initiales et des conditions aux limites de la grille de discrétisation. Généralement, une source de champ EM est placée dans l'espace puis éteinte, le champ évolue alors dans la structure d'après les équations de Maxwell discrétisées. Les valeurs du champ EM peuvent être enregistrées à différents temps de son évolution. Le comportement spectral d'une structure s'obtient alors par transformée de Fourier de son comportement temporel.

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

Le principal inconvénient de la FDTD, qui tend cependant à s'estomper avec les évolutions des capacités informatiques, est qu'elle est très lente et demande des ressources informatiques importantes [14]. Au cours de ce mémoire, le simulateur utilisé est appelé Fullwave de Rsoft CAD.

II.3.Présentation du logiciel Rsoft CAD

II.3.1. Environnement de CAD

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

II.3.2. Le simulateur Bandsolve

L'objectif de Bandsolve est de générer et analyser les structures à bandes interdites photoniques. La simulation est basée sur la technique de décomposition en ondes planes (PWE) pour les structures périodiques. Bandsolve est idéal pour produire les structures de bandes pour les cristaux photoniques 2D et 3D.

A deux dimensions, il est nécessaire de considérer deux directions de propagation différente : TE (avec le champ E perpendiculaire à l'axe des trous) et TM (où E est parallèle à l'axe des trous). Ces deux polarisations sont découplées et donnent lieu à deux diagrammes de bandes indépendants. Il n'existe pas forcément une bande interdite dans les deux cas. En outre, il peut être appliqué à des structures comme les fibres à cristaux photoniques, qui sont complexes pour les autres techniques de simulation. Bandsolve est particulièrement utile pour optimiser les propriétés des structures à cristaux photoniques, qui sont simulés par la méthode FDTD implémentée dans le logiciel Fullwave, pour examiner les propriétés dépendant du temps comme les pertes, et pour calculer les distributions de champ dans des structures de dimensions finies [9].

Bandsolve est destiné pour fonctionner avec les autres modules de simulation de Rsoft tels que BeamPROP et Fullwave, il partage le même outil de CAD avec ces modules. En particulier, le Bandsolve est spécialement utile pour optimiser les propriétés des cristaux photoniques [18].

II.3.3. Le simulateur Fullwave

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

Fullwave est conçu pour fonctionner avec les autres modules de simulation de Rsoft tels que : BeamPROP, Bandsolve, et GratingMOD puisqu'il partage le même outil de CAD avec ces modules.

La simulation est basée sur la technique bien connue de différence finie dans le domaine du temps (FDTD). Cette méthode permet de calculer à chaque instant discret de l'espace, les composantes du champ électromagnétique dans chaque cellule (maille) parallélépipédique du volume tridimensionnel, à l'intérieur desquelles sont calculées les six composantes orthogonales des champs électromagnétiques (E_x , E_y , E_z et H_x , H_y , H_z).

Les équations de Maxwell sont remplacées par un système d'équations qui relie le champ électromagnétique de chaque cellule aux champs des cellules voisines. En suite, ces équations sont résolues en fonction des conditions initiales et des conditions aux limites [14], [18].

II.3.4. Le simulateur Beamprop

Le simulateur Beamprop est le module de propagation intégré avec Rsoft Photoniques CAD Suite, c'est un nouvel outil pour simuler la propagation optique dans les guides d'ondes à 2D et 3D. Au cœur du Beamprop -3D il y a un programme de calcul extrêmement robuste capable de trouver les solutions rigoureuses des équations d'ondes de Maxwell, des solutions qui sont complètement vectorielles et entièrement bidirectionnelles, tenant compte de toutes les réflexions aux joints à l'interfaces des différents composants du dispositif, car l'algorithme bidirectionnel modélise toutes les réflexions internes [21].

II.4. Les étapes de simulation d'un guide d'onde

La fenêtre de programme de Rsoft CAD comporte une barre de menus en haut de la fenêtre, une barre des outils qui porte plusieurs icônes et la ligne d'état (voir figure. II.01).

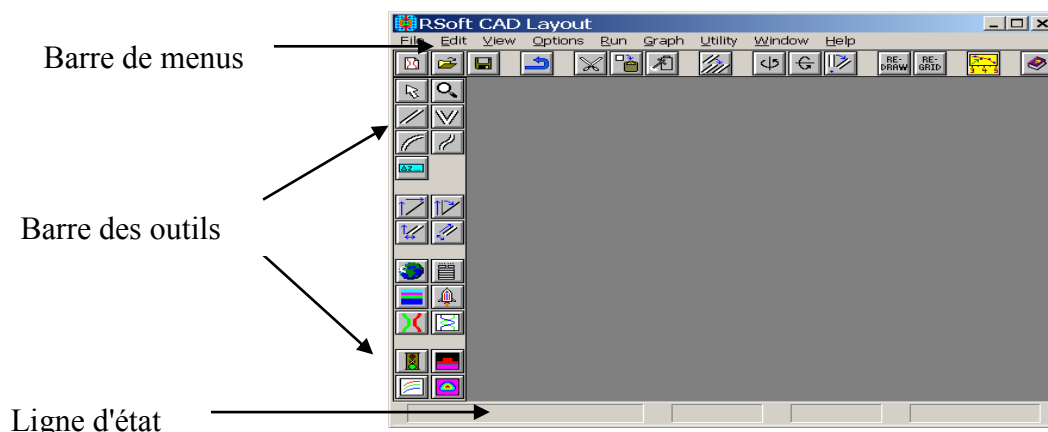



Figure II.01 : Fenêtre principale du programme CAD [22].

Les menus permettent l'accès au divers dossier standard et les opérations d'édition. La ligne d'état fournit des informations sur le mode courant de disposition, avec l'affichage du même rang pendant le dessin.

II.4.1. Créer un nouveau circuit

Pour créer un nouveau circuit on va cliquer sur l'icône New circuit  dans la barre d'outils supérieur. Alternativement, nous allons choisir File /New du menu. Le dialogue de démarrage de la figure II. 02 va apparaître.

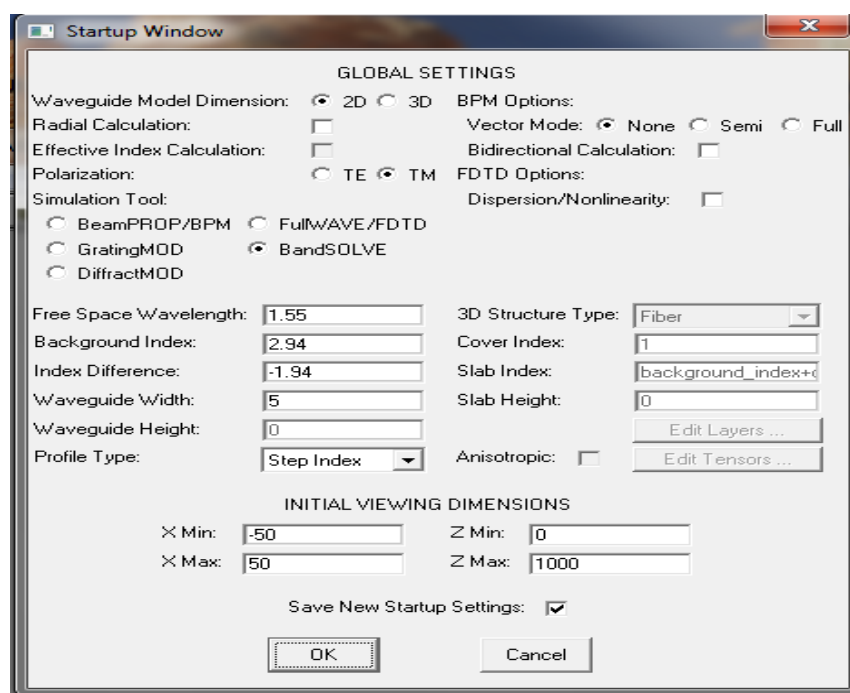


Figure II.02 : La fenêtre de démarrage (startup Window) [22]

Il faut remplir la différence d'indice (Index différence), qui est la différence d'indice par défaut entre la couche guidant et l'indice de substrat (Background index), d'autre part, il faut choisir le type de la polarisation (Mode TE ou Mode TM). On peut aussi par cette option choisir le module de simulation parmi les six modules existants dans le logiciel Rsoft Bandsolve, Fullwave, BeamPROP/BPM ou GratingMOD. Après l'introduction des informations dans la fenêtre de démarrage on va cliquer sur OK pour obtenir la fenêtre de la figure II.03.

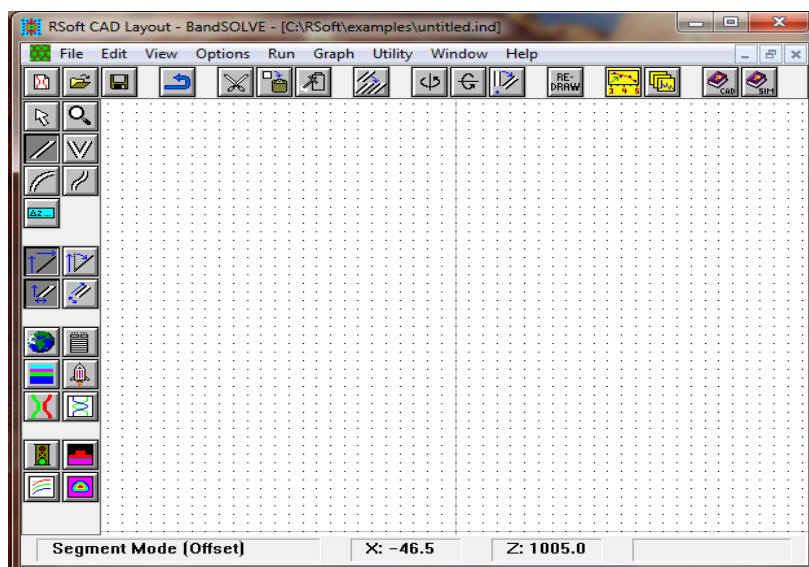


Figure II.03 : Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit.

II.4.2. Générer la structure de réseau

Dans cette partie on va montrer comment créer un réseau en cristaux photoniques dans l'interface de CAD. Généralement, il existe plusieurs manières pour créer une structure de réseau dans l'interface de CAD. Cependant, la manière la plus facile est d'employer un des multiples utilités de disposition qui sont incluse avec Fullwave afin d'expédier la création de ce réseau en utilisant Array Lay-out XZ (figure II.04).

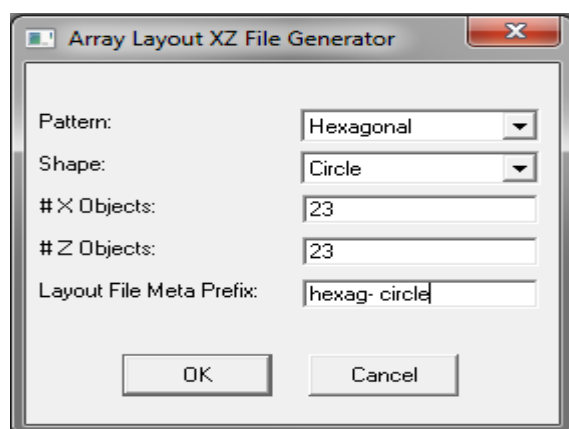


Figure II.04 : Arrangements de disposition de la rangée XZ [22].

Après l'introduction des différentes données (type de réseau, forme de motif, le nombre de rangées et le nom du circuit) on clique sur le bouton **OK** pour obtenir la structure du cristal photonique qui apparaît sur la figure II.05.

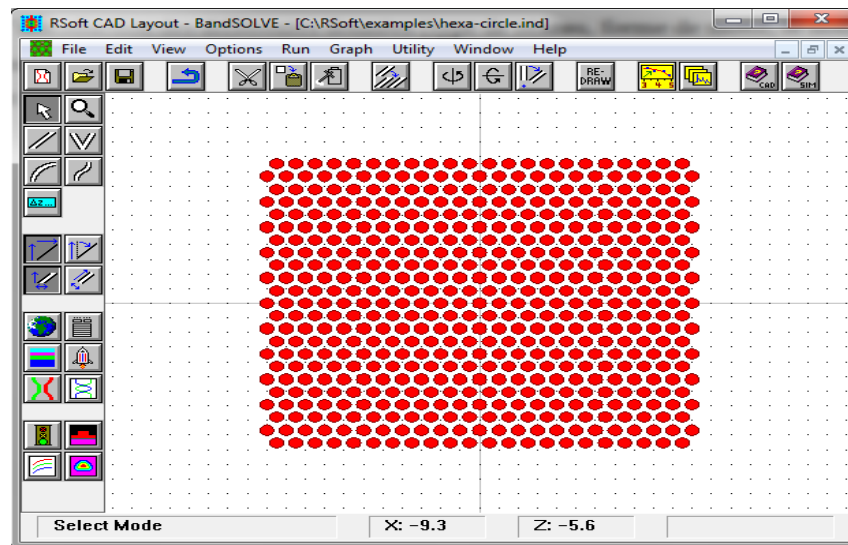



Figure II.05 : Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD.

II.4.3. Réglage des paramètres globales

Pour définir les propriétés du réseau tels que l'indice de réfraction, la polarisation et pour choisir le module de simulation Fullwave/ Bandsolve parmi les autres modules existants à Rsoft on clique sur l'icône  (global setting). La fenêtre de dialogue ci-des sous apparaît (Figure II.06).

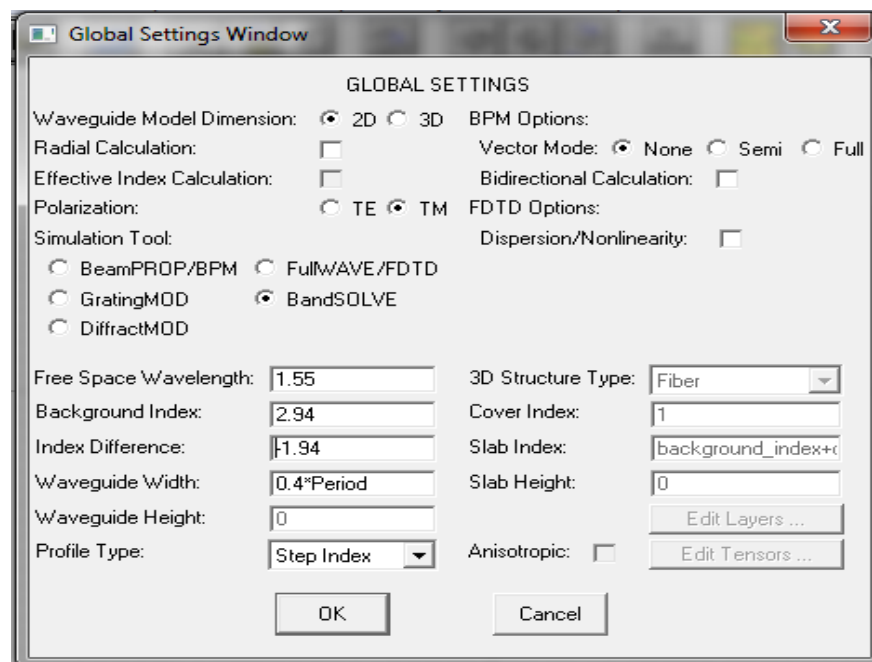



Figure II.06 : Fenêtre des paramètres globales du circuit [22].

II.4.4. Définition des variables

Cliquer sur l'icône  (Edit symboles) dans la fenêtre de CAD, le tableau de symbole (Table editor) s'ouvre (Figure II.07). Ce tableau de symboles permet à l'utilisateur de créer ou modifier à la fois et intégrer les variables définies par l'utilisateur, ces variables peuvent être utilisées pour définir pratiquement n'importe quel paramètre de la structure (le rayon, la période, l'indice de réfraction, nombre de rangés).

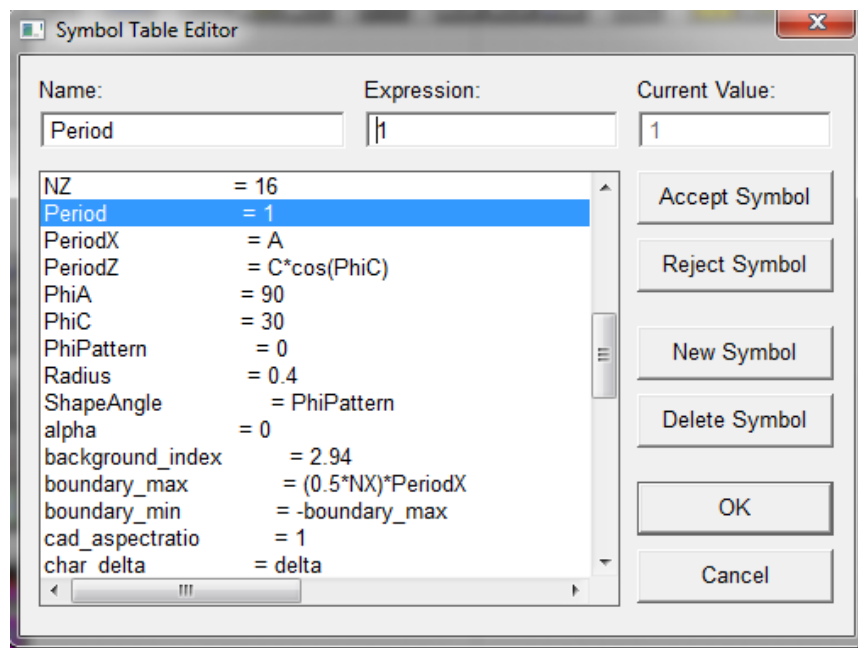
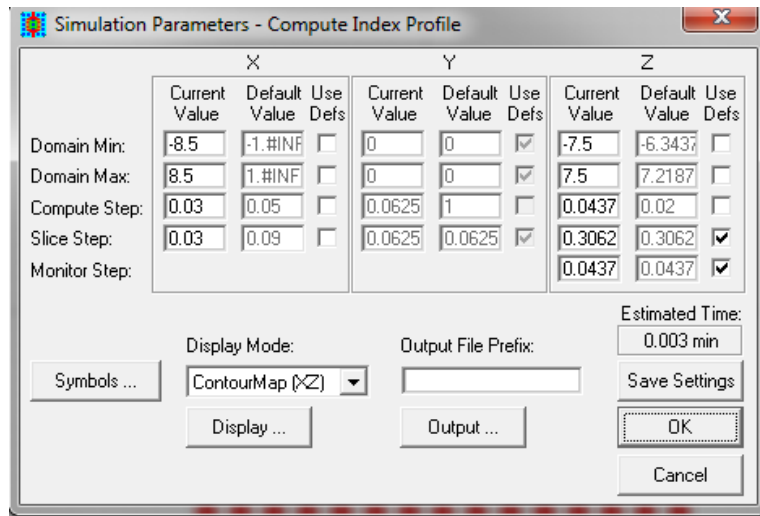


Figure II.07 : L'éditeur du Tableau de symboles [22]

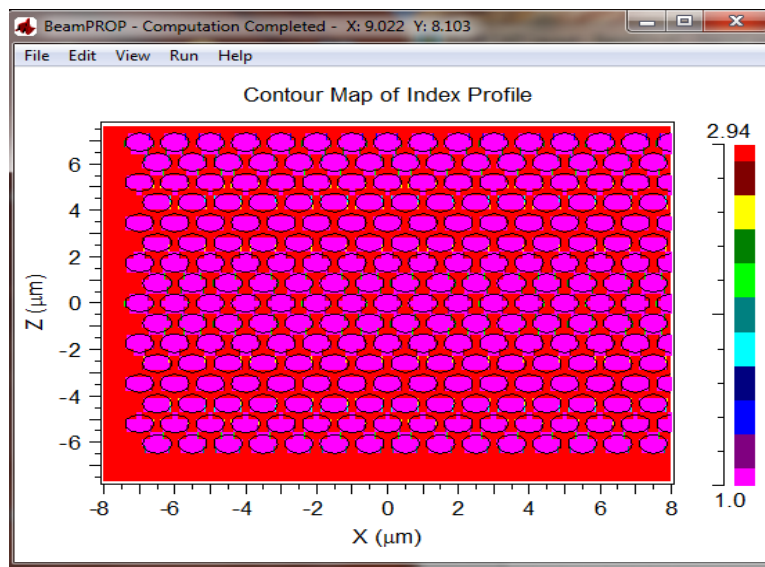
Ces symboles correspondent aux arrangements faits dans le nouveau circuit (New Circuit) de la boîte de dialogue ci-dessus. Pour définir un nouveau symbole (par exemple $\text{period}=1$), on clique sur new symbole puis on va entrer le nom et la valeur du symbole.

II.4.5. Vérifier la structure

Pour vérifier notre structure, nous avons simulé le profil de l'indice de réfraction dans le plan XZ.




(a)



(b)

Figure II.08 :(a) et (b) est Profil d'indice de la structure à cristaux photoniques 2D [22].

II.4.6. Réglage des paramètres de simulation

Pour le choix et le réglage des paramètres de simulation on clique sur le Bouton . Par conséquent, il apparaît la fenêtre correspondante au module de simulation utilisé (Bandsolve/Fullwave) comme il est représenté sur la figure II.09 ou sur la figure II.10 respectivement. Une fois que les paramètres numériques et d'autres options sont acceptables, on clique sur OK pour commencer la simulation.

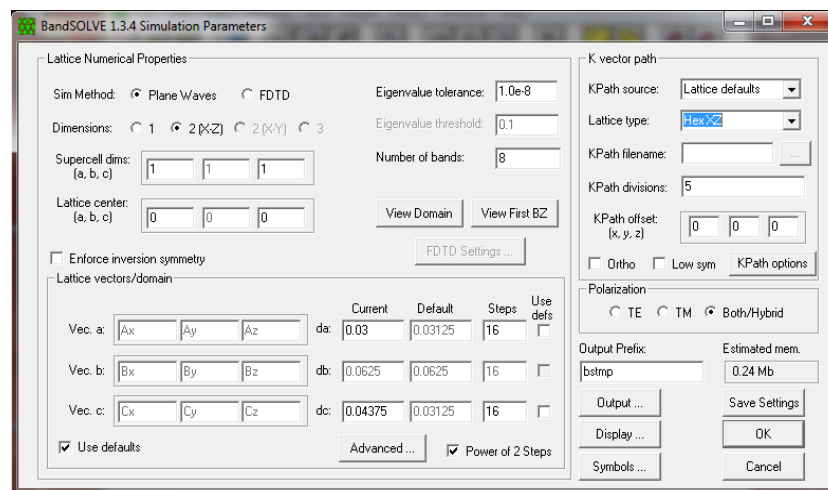


Figure II.09 : La fenêtre de paramètres de simulation de Bandsolve où des paramètres numériques de base de simulation sont entrés [22].

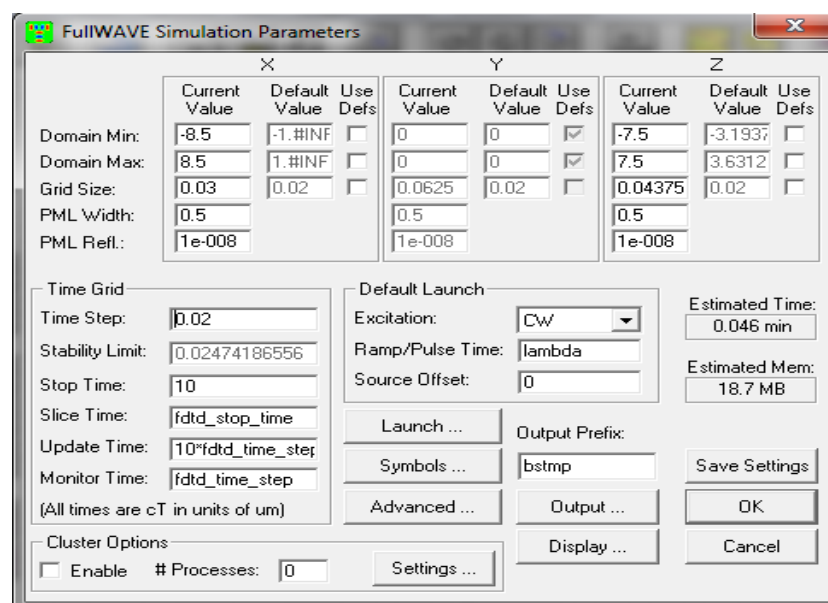


Figure II.10 : La fenêtre de paramètres de simulation de Fullwave où des paramètres numériques de base de simulation sont entrés [23].

Un élément clé d'une simulation Fullwave est le champ excitateur (launch field) de la structure. L'excitation doit être choisie pour correspondre au type de résultats de simulation requis. Par exemple, une excitation CW (Continuous Wave) doit être utilisée lorsque le fonctionnement en régime permanent d'une structure est souhaité, et un signal pulsé peut être envisagée lorsque les caractéristiques spectrales d'une structure sont nécessaires [18].

Le champ excitateur est défini via une boîte de dialogue des paramètres de lancement (Figure.II.11) auxquels on peut accéder par l'intermédiaire du bouton « **Edit Launch Field** » dans l'interface CAD.

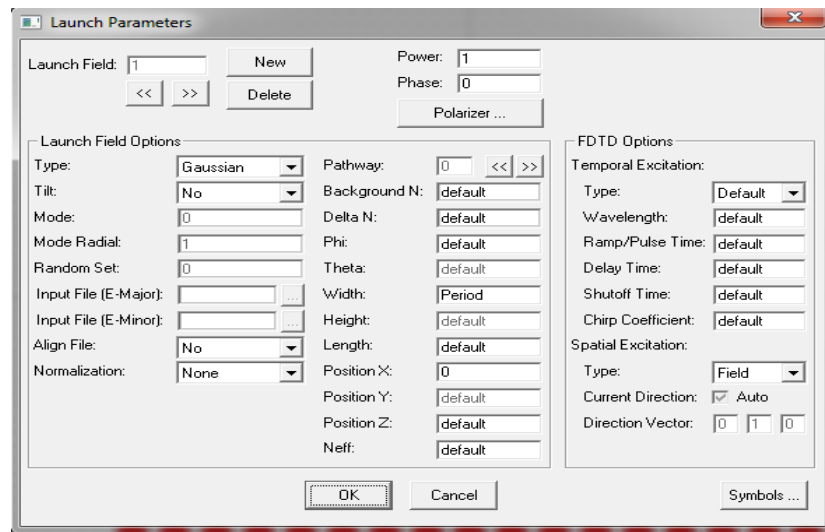


Figure II.11 : présentation les paramètres de launch [22].

Les paramètres numériques

En outre, l'algorithme de résolution nécessite une entrée supplémentaire sous la forme de paramètres de simulation numériques telles que :

- Le domaine de calcul fini.
- Les conditions aux limites.
- Le pas spatial.
- Le pas temporel.

Le logiciel tente d'estimer les valeurs appropriées pour ces paramètres, mais permet à l'utilisateur de les remplacer.

Ces paramètres sont :

- **Le domaine de calcul :**

Le choix du domaine de calcul doit inclure la portion de la structure à simuler.

- **Les conditions aux limites :**

Dans le but d'implémenter l'algorithme sur machine, il est nécessaire de restreindre le domaine « ouvert » de la résolution des équations de Maxwell à un domaine borné pour limiter la capacité mémoire utilisée (et par conséquent le temps de calcul). Ce domaine spatial borné que nous nommerons espace de travail devra être suffisamment grand pour contenir toute la structure d'étude et des conditions aux limites simuleront son extension à l'infini.

Les conditions aux limites sur les bords spatiaux du domaine de calcul doivent être soigneusement examinées. Plusieurs simulateurs utilisent les conditions aux limites d'absorption qui élimine toute énergie se propageant vers l'extérieur et qui empiète sur les limites de domaine. L'une des conditions les plus efficaces est la PML (perfectly matche layer) [18].

- **La grille spatiale et temporelle :**


Fullwave supporte à la fois une grille spatiale uniforme et non uniforme. Afin de produire une simulation précise, la grille spatiale doit être assez petite pour simuler le plus petit élément du champ. Généralement, cela est dicté par la longueur d'onde dans le matériau, mais, dans certains cas, il peut être imposé par la géométrie du dispositif photonique. La taille de la grille doit être inférieure à $\lambda/10$ où λ n'est pas la longueur d'onde dans l'espace libre, mais plutôt la longueur d'onde du matériau. Fullwave fournira un choix intelligent pour ces paramètres, mais l'utilisateur est vivement encouragé à affiner les tailles de la grille afin de produire une simulation efficace et précise. Puisque l'algorithme FDTD est basé sur le domaine temporel, Fullwave a plusieurs paramètres dans ce domaine [18].

Pour obtenir une simulation stable, il faut respecter la condition courante qui concerne la taille du pas spatial et temporel :

$$C\Delta t < \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}\right)}} \dots\dots\dots (II.1)$$

Cette condition change légèrement pour les simulations dispersives, et ainsi il peut être nécessaire de définir dans ce cas un intervalle de temps plus faible.

II.4.7. Scan des variables et Lecture des résultats

Pour afficher la carte des bande, on clique sur l'icône  est performe paramètre scan (scan de variable) par exemple les paramètres géométriques (période, rayon).

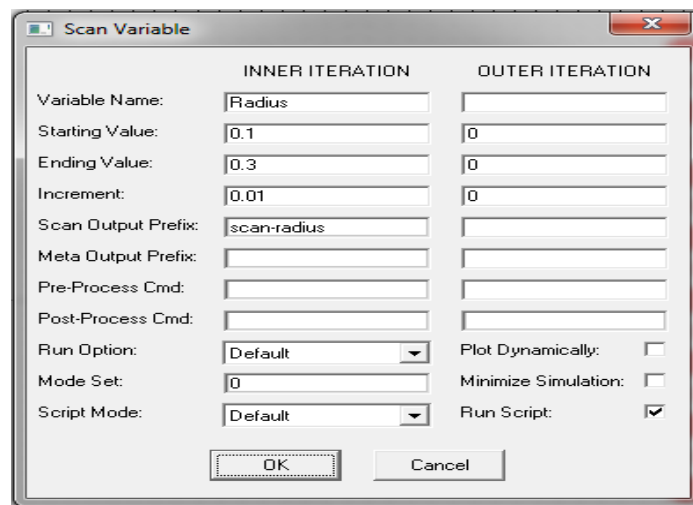



Figure II.12 : Exemple de scan variable de rayon (r).

Afin de regarder ou imprimer les résultats de simulation, on clique sur l'icône  de Win PLOT dans la barre des outils supérieur de la fenêtre de CAD, et on choisit le graphe désiré à partir du dialogue qui est présenté.

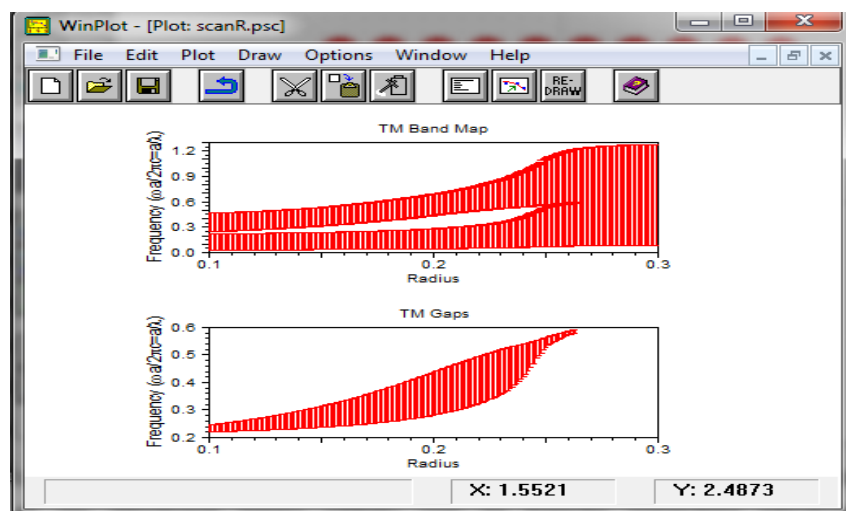


Figure II.13 : Exemple de scan variable de Win plot [22].

II.5. Diagramme des bandes

Comme indiqué dans le premier chapitre, les zones de Brillouin aide à la localisation et l'optimisation des bandes interdites, puis le calcul de la dispersion des modes de défaut. Seulement il est nécessaire d'analyser un petit nombre de points dans la première zone de Brillouin, la figure II.14 montre le diagramme des bandes correspondant à la structure de la fibre en cristaux photoniques (FCP) pour les modes TE/TM.

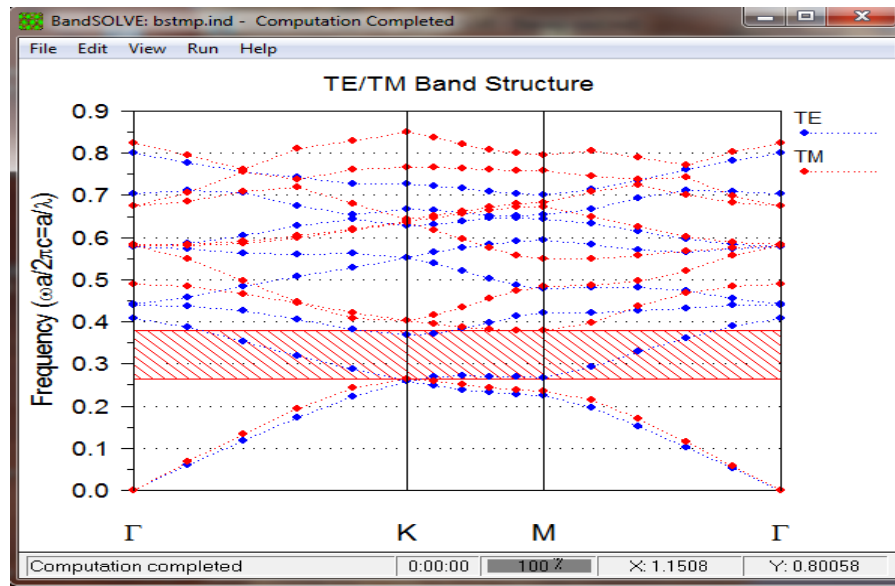


Figure II.14 : Diagramme des bandes pour les modes TE et TM
Dans la structure FCP [22].

On constate que les bandes des modes TE et TM dans le diagramme sont toutes reliées, cela signifie qu'il n'y a aucune bande interdite photoniques qui empêche la propagation des ondes. Cette propriété est due à la faible valeur de l'indice des trous par rapport à l'indice de la couche guidant, donc l'onde se propage dans la zone d'indice le plus élevé de la bande interdite [14].

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les deux méthodes de simulation (PWE et FDTD). Ensuite, nous avons décrit les deux modules de simulation le Bandsolve et le Fullwave de Rsoft CAD que nous avons utilisé dans le troisième chapitre. Tout d'abord, nous avons décrit les étapes de simulation pour l'étude et la modélisation de bande interdite photonique des cristaux photoniques bidimensionnels d'une structure connectée. Nous avons étudié les résultats obtenus à l'aide de notre simulateur en faisant varier les paramètres physiques et les paramètres géométriques et en étudiant leurs effets sur la filtre appelé Add-Drop de cristaux photoniques bidimensionnels à réseau triangulaire pour améliorer les effets sur la bande interdite photonique.

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Introduction

Dans Ce chapitre sera consacrée à l'étude des variations de la bande interdite photonique ouverte dans le cas d'un cristal photonique bidimensionnels composé d'une structure dite connectée (trous d'air plongés dans le matériau) à réseau triangulaire, et étude l'influence des paramètres géométrique (le rayon « r » et la période « a ») sur la bande interdite photonique. Puis l'influence de paramètre physique (l'indice de réfraction) sur la guide onde droite $w1$ et la cavité de type hexagonale $H1$. Après le dernière partie en crie un filtre de type Add-Drop on compose un guide onde droite $w1$ et cavité hexagonale $h1$, Pius l'étude l'influence les paramètres physiques sur le cette filtre Add-Drop.

Le but de ce travail est l'étude et simulation de l'influence des paramètres physiques et géométriques sur le comportement d'un filtre appelé Add-Drop à base de structures connectées à cristaux photoniques bidimensionnels (CPhs-2D).

III.2. Le matériau utilisé et la structure étudiée

III.2.1. Le matériau utilisé

Dans ce travail, le matériau de base est un GaAs (l'Arséniure de Galium) caractérisé par un indice de réfraction $n=2.94$. Pour la comparaison, on utilise deux matériaux : le silicium ($n=3.42$) et l'Indium de Phosphore Inp ($n=3.17$). Le paramètre de maille et le rayon des cylindres d'air sont respectivement $a=0.5\mu m$ et $r=0.18\mu m$.

Les simulations numériques sont réalisées pour le mode de propagation TM (Transverse électrique) en utilisant des ondes planes dont la longueur d'onde d'excitation est $\lambda=1.55\mu m$, longueur d'onde utilisée dans les télécommunications.

III.2.2. La structure étudiée

Pour étudier les conditions d'ouverture ainsi que les variations des bandes interdites photoniques d'un cristal photonique bidimensionnels CP2D à réseau triangulaire on va modéliser la structure dite connectée, dont laquelle le motif élémentaire est un trou d'air (indice de réfraction $n=1$) se forme de cylindre de rayon r , le paramètre de maille est $a=0.5\mu m$. L'indice de réfraction du matériau de base (GaAs) est $n=2.94$. La structure étudiée est composée de 23 rangées de longueur et 23 rangées de largeur (23×23) comme il est représenté sur la figure III.01.

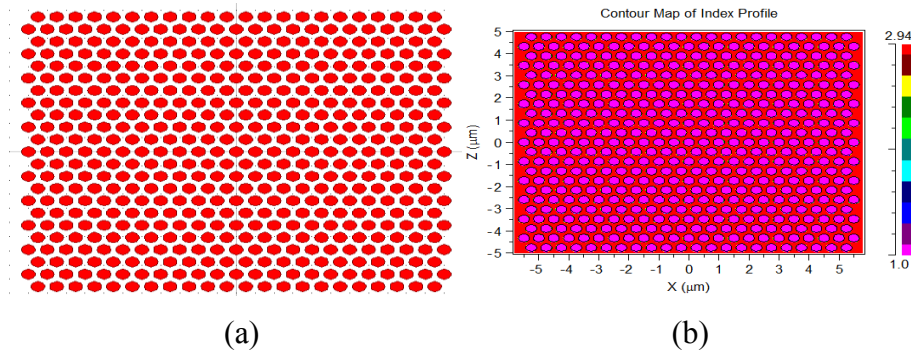


Figure III.01 : (a) Schéma d'un cristal photonique 2D formé par un réseau triangulaire de trous d'air percés dans le GaAs, (b) le profil de l'indice de réfraction.

III.3. Le diagramme de bandes

La figure III.02, est un exemple de diagramme de bandes obtenu en utilisant le simulateur Bandsolve en polarisation TM pour un matériau de base GaAs dont l'indice de réfraction est $n = 2.94$, les paramètres géométriques vérifient le rapport $r/a = 0.36$. Sur la figure III.02, l'axe des abscisses représente le parcours fait par le vecteur d'onde lorsqu'il décrit le contour formé par les points de haute symétrie Γ, M, K de la première zone de Brillouin. Alors que, l'axe des ordonnées représente les fréquences normalisées des modes calculés.

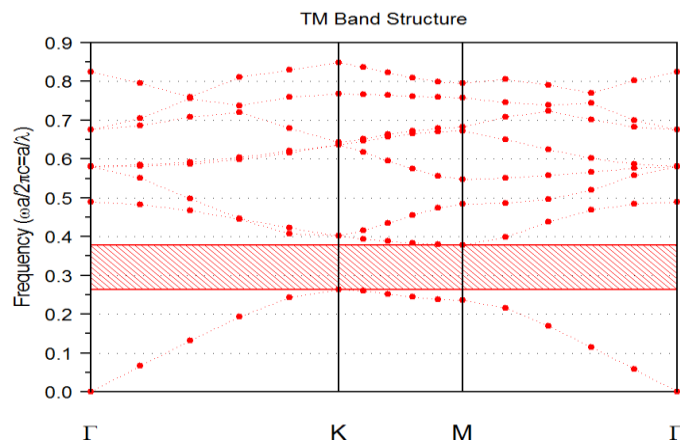


Figure III.02 : Diagramme de bande d'un cristal photonique 2D en polarisation TM Pour $n = 2.94$, $r = 0.18 \mu\text{m}$ et $a = 0.5 \mu\text{m}$.

Par contre, sur la figure III.03, nous avons représenté la Transmittance normalisée en fonction de la longueur d'onde normalisée obtenue en utilisant le logiciel Fullwave basé sur la méthode des différences finies. Il est clair qu'une bande interdite photonique est apparait entre $1.37 \mu\text{m}$ et $1.9 \mu\text{m}$ en mode TM.

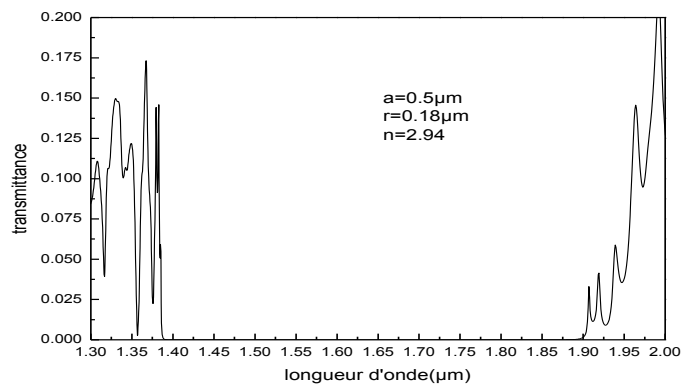


Figure III.03 : Transmittance en fonction de la longueur d'onde normalisée pour $n=2.94$, $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$.

III.4. La carte des bandes

En utilisant le simulateur Bandsolve, on peut obtenir la carte des bandes en fonction de rayon r des trous d'air pour un matériau de GaAs, et la période de la structure $a=0.5\mu\text{m}$ (figure III.04). Cette carte des bandes est obtenue lorsqu'on fait un balayage du paramètre rayon, on constate l'apparition de bandes en polarisation TM pour un rayon compris entre $r=0.1\mu\text{m}$ de $r=0.3\mu\text{m}$. par ailleurs, une bande interdite photonique plus large apparait pour $r=0.18\mu\text{m}$ autour de $1.55\mu\text{m}$.

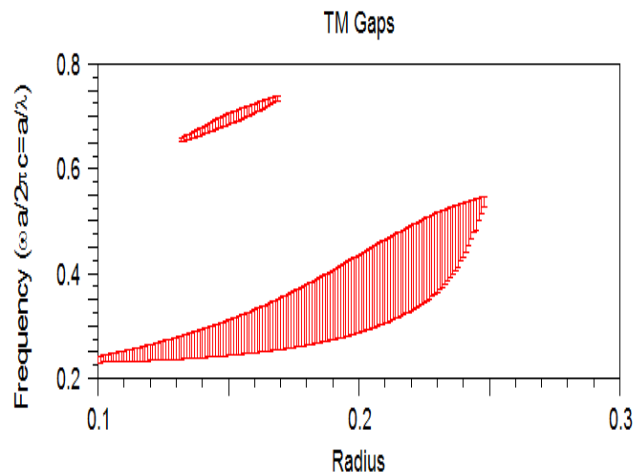


Figure III.04 : La carte bande en fonction du rayon r des trous d'air pour une période $a=0.5\mu\text{m}$

La figure III.05 représente la carte des bandes en fonction de la période lorsqu'on fait varier la période du réseau entre $a=0.4\mu\text{m}$ et $a=1\mu\text{m}$, et en fixant le rayon $r=0.18\mu\text{m}$. On constate l'apparition d'une bande interdite autour de $1.55\mu\text{m}$ pour $a=0.5\mu\text{m}$.

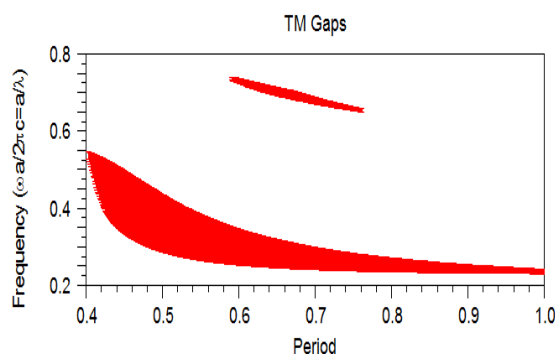


Figure III.05 : La carte bande en fonction de la période pour $r=0.18\mu\text{m}$.

III.5. Etude du guide d'onde droit

Les cristaux photoniques possèdent un grand intérêt au cours de ces dernières années, en effet, de nombreux travaux ont été effectués par des groupes de recherche pour examiner la transmission, la localisation et le guidage de la lumière dans ces structures. Le guide d'onde droit W1 lequel est obtenu en omettant un seul rangé de trous d'air ou de tiges de matériau suivant la direction ΓK est l'une des structures largement explorée, la plupart des guides à cristaux photoniques sont conçus dans des réseaux triangulaires à trous d'air circulaires [7].

La fonction de guidage repose naturellement sur l'idée de la bande interdite photonique, pour laquelle la lumière est réfléchie, et de bande permise pour laquelle la lumière est transmise.

III.5.1. La Transmittance dans un guide ondes à base de GaAs ($n=2.94$)

La structure d'un guide onde droite étudiée dans cette section est schématisée sur la figure III.06 (a). Elle est réalisée à base de GaAs dont l'indice de réfraction est $n=2.94$.

La figure III.06(b) représente la transmittance en fonction de la longueur d'onde (μm). Après la création d'un défaut linéique, la structure présente une transmittance entre les longueurs d'ondes λ_0 variées de $1.37\mu\text{m}$ jusqu'à $1.9\mu\text{m}$.

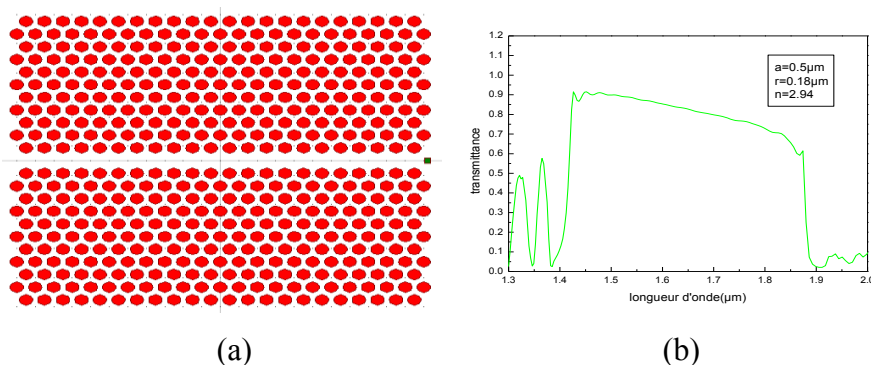


Figure III.06 : (a) guide droit w1 de GaAs, (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$.

III.5.2. guide d'onde droit par substitution

La figure III.07 (a) est un guide onde droite W1 obtenue en substituant les trous d'air par des cylindres de même rayon remplis de silicium dont l'indice de réfraction du Silicium est $n=3.42$. Les paramètres géométriques de la structure sont les mêmes que la structure à base de GaAs.

La figure III.07(b) représente la Transmittance on fonction de longueur d'onde, on voit bien que pour les longueurs d'ondes comprises entre $\lambda_0= 1.49 \mu\text{m}$ et $\lambda_0=1.94\mu\text{m}$, la lumière se propage suivant la direction GK.

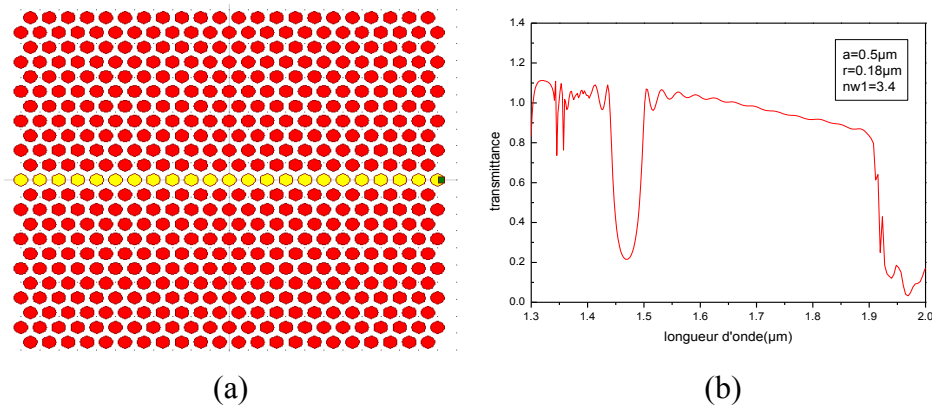


Figure III.07 : (a) Guide d'onde droit w1 de Silicium, (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$ et $n=3.4$.

Alors que, sur la figure III.08(a), on a représenté la structure d'un guide onde droite W1 obtenu par substitution des cylindres d'air par des cylindres de même diamètre de l'indium de phosphore Inp ($n=3.17$).

La figure III.07(b) est la Transmittance on fonction de longueur d'onde entre $\lambda_0=1.45 \mu\text{m}$ et $\lambda_0= 1.92\mu\text{m}$.

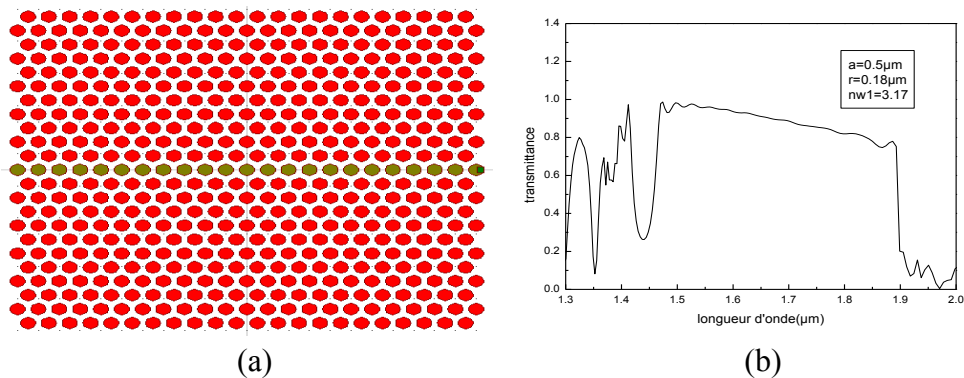


Figure III.08 : (a) guide droit w1 de Inp, (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$ et $n=3.17$.

La figure III.09, montre les résultats des Transmittance obtenues en fonction de la longueur d'onde pour trois valeurs de l'indice de réfraction d'un guide onde droit $n_{\text{GaAs}}=2.94$, $n_{\text{Si}}=3.42$, $n_{\text{Inp}}=3.17$. D'après cette figure on peut conclure l'existence d'un décalage de la bande interdite photonique vers les longueurs d'onde élevées. Ainsi que la transmittance est plus importante lorsque l'indice de réfraction augmente.

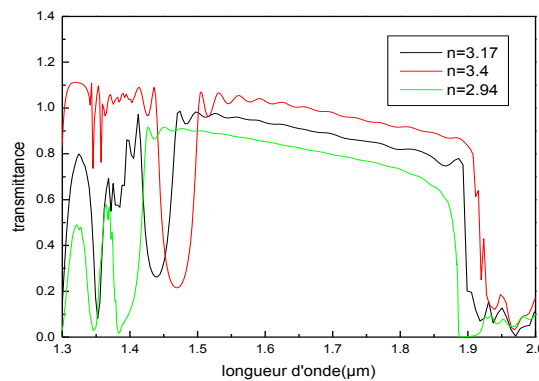


Figure III.09 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde par trois matériaux (GaAs, Si, Inp).

III.6. Etude de la cavité hexagonale H1

Dans un réseau triangulaire d'un cristal photonique bidimensionnels, une cavité hexagonale H1 est obtenue par création d'un défaut lacunaire, pour étudier l'influence de l'indice de réfraction sur la cavité, on utilise trois matériaux différents le GaAs ($n=2.94$), le Si ($n=3.42$) et InP ($n=3.17$). en fixant la période du réseau $a=0.5\mu\text{m}$ et le rayon $r=0.18\mu\text{m}$, la longueur d'onde utilisée pour l'excitation et $\lambda=1.55\mu\text{m}$.

III.6.1. Cavité H1 à base de GaAs ($n=2.94$)

La cavité H1 est obtenue en omettant un cylindre d'air dans le réseau triangulaire à cristaux photonique 2D. Puis en utilisant le simulateur fullwave, on a injecté une onde lumineuse dont la longueur d'onde à l'espace libre est $1.55\mu\text{m}$.

D'après les résultats, on peut constater d'une longueur de résonance de la cavité au voisinage de $1.70\mu\text{m}$. cette dernière (longueur d'onde $1.70\mu\text{m}$) se trouve précédemment à l'intérieure de la bande interdite photonique.

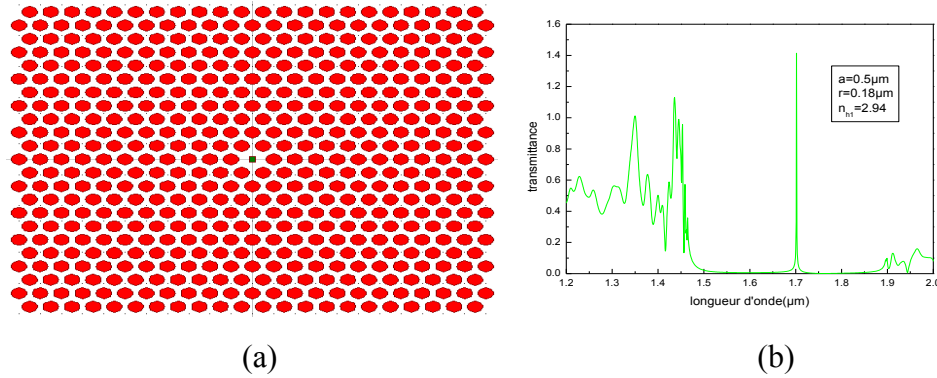


Figure III.10 : (a) la cavité H1 de GaAs, (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$ et $n_{\text{H1}}=2.94$.

III.5.2.Cavité H1 par substitution ($n=3.4$)

Dans ce cas, le cylindre situé au centre de la structure est remplie par un matériau d'indice de réfraction élevé par rapport au GaAs ; par le silicium d'indice de réfraction $n=3.4$. On voit bien que la fréquence de résonance se déplace vers les longueurs d'ondes élevées. La longueur de résonance se trouve au voisinage de $1.76\mu\text{m}$.

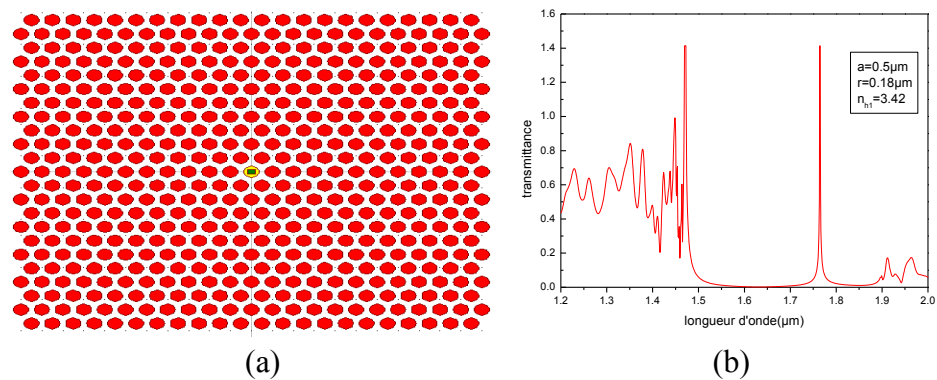


Figure III.11 : (a) la cavité H1 de Silicium, (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$ et $n_{\text{H1}}=3.4$.

III.6.3.Cavité H1 par substitution ($n=3.17$)

Dans ce cas, d'une cavité obtenue par substitution d'un trou d'air par un cylindre de L'indium de phosphore caractérisé par un indice de réfraction $n=3.17$ (Inp). On voit bien que la fréquence de résonance se déplace vers les longueurs d'ondes élevées. La longueur de résonance se trouve au voisinage de $1.730\mu\text{m}$.

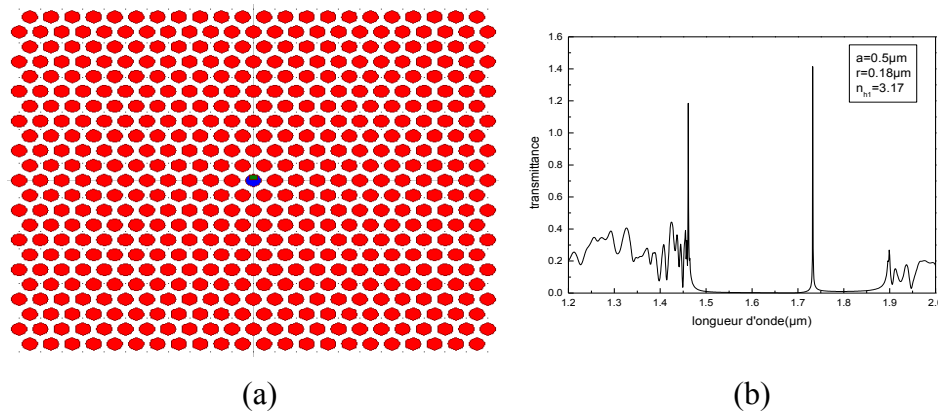


Figure III.12 : (a) La cavité H1 de Inp, (b) Spectre de transmission en fonction de la longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$ et $n_{\text{H1}}=3.17$

On a après l'étude la cavité hexagonale H1 réalisée par trois matériaux différents par son indice de réfraction (GaAs, Si, Inp), on constate que la longueur d'onde de résonance se décale vers les longueurs d'ondes élevée, comme il est schématisé sur la figure III.13.

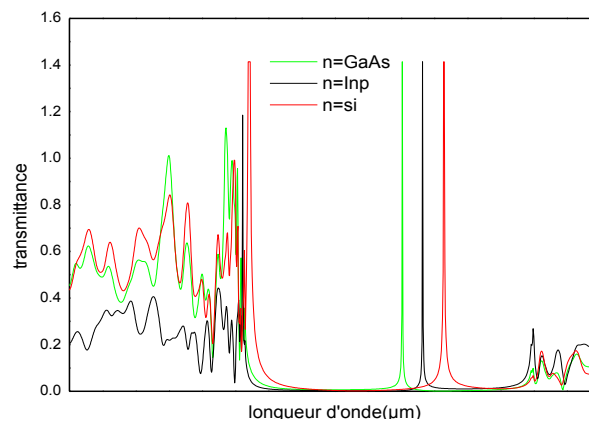


Figure III.13 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) par trois matériaux (GaAs, Si, Inp).

III.7. Etude d'un filtre Add-Drop

Pour étudier l'influence des paramètres physiques et géométriques sur le filtre Add-Drop. Nous avons étudié la structure d'un filtre dit Add-Drop représenté sur la figure III.14. Elle est composée d'un guide onde droit et d'une cavité hexagonale H1, le matériau utilisé est le GaAs ($n=2.94$).

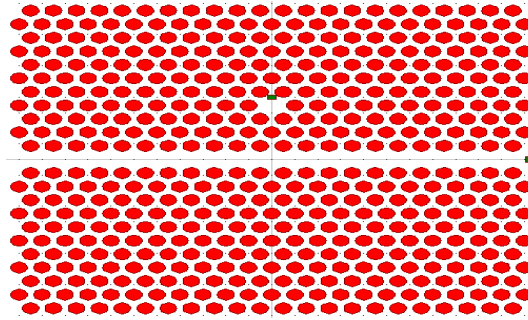


Figure III.14 : La structure de filtre Add-Drop (guide onde w1 et cavité h1).

III.7.1. l'influence l'indice de réfraction sur le filtre

III.7.1.1. Un filtre Add-Drop à base de GaAs

La structure étudiée dans ce cas est un filtre composée d'un guide onde droit W1 et d'une microcavité H1. La structure est réalisée dans un réseau triangulaire à base de GaAs dont l'indice de réfraction est $n=2.94$ comme il est schématisé sur la figure III.15(a).

La figure III.15(b) représente la transmittance en fonction de la longueur d'onde (μm). La structure présente une transmittance pour trois longueurs d'ondes λ_0 ($1.60 \mu\text{m}$, $1.75 \mu\text{m}$ et $1.89 \mu\text{m}$) situées précédemment à l'intérieur de la BIP.

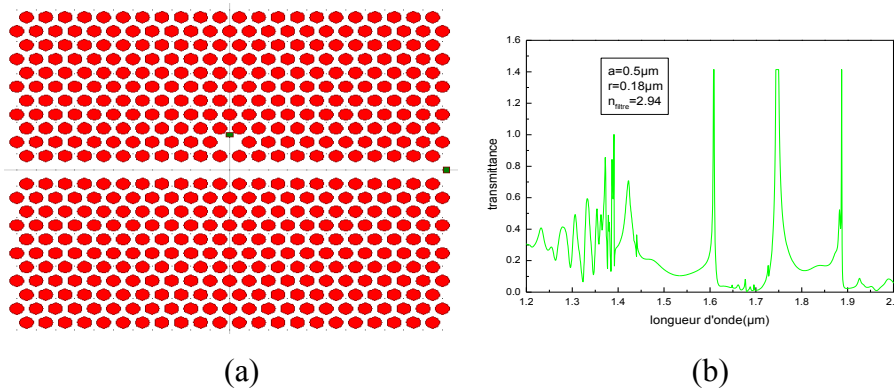


Figure III.15 : (a) le filtre de GaAs, (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$ et $n_{\text{H1}}=2.94$.

III.7.1.2. Un filtre Add-drop à base de silicium ($n_{\text{Si}}=3.42$)

La structure étudiée dans ce cas est un filtre composée d'un guide onde droit W1 et d'une microcavité H1. La cavité est obtenue par substitution d'un trou d'air par un cylindre de même diamètre remplie de silicium ($n=3.4$) comme il est schématisé sur la figure III.16(a).

La figure III.16(b) représente la transmittance en fonction de la longueur d'onde (μm). La structure présente une transmittance pour la longueur d'onde $\lambda_0=1.630 \mu\text{m}$.

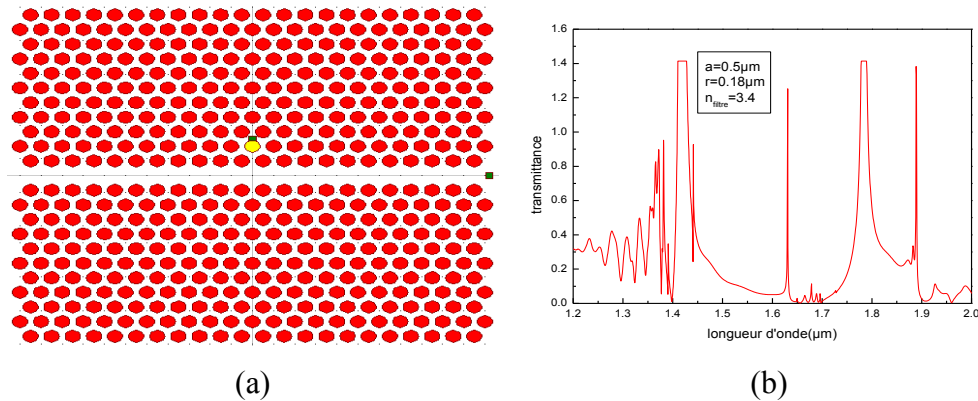


Figure III.16 : (a) le filtre de Silicium, (b) Spectre de transmission en fonction de la longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$ et $n_{\text{HI}}=3.42$.

III.7.1.3. Un filtre Add-drop à base de Indium de Phosphore ($n_{\text{InP}}=3.17$)

La structure étudiée dans ce cas est un filtre composée d'un guide onde droit W1 et d'une microcavité H1. La cavité est obtenue par substitution d'un trou d'air par un cylindre de même diamètre remplie de l'indium de Phosphore ($n=3.17$) comme il est schématisé sur la figure III.17(a).

La figure III.17(b) représente la transmittance en fonction de la longueur d'onde (μm). La structure présente une transmittance pour deux longueurs d'onde $\lambda_0=1.630\mu\text{m}$ et $\lambda_0=1.79\mu\text{m}$.

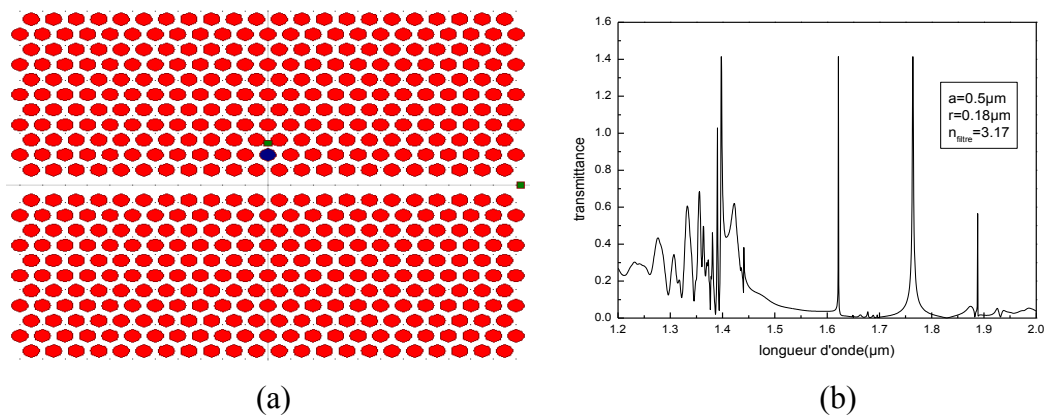


Figure III.17 : (a) le filtre de Inp, (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) pour $r=0.18\mu\text{m}$ et $a=0.5\mu\text{m}$ et $n_{\text{HI}}=3.17$.

III.7.2 : l'influence la position de cavité H1 sur Transmittance de longueur d'onde

Pour étudier l'influence de la position de cavité H1 sur la Transmittance en fonction de la longueur d'onde, nous avons simulé trois structures ou la position de la cavité se déplace vers le haut ; c'est-à-dire le nombre de miroirs entre le guide et la cavité sont $n=1$, $n=3$, et $n=5$.

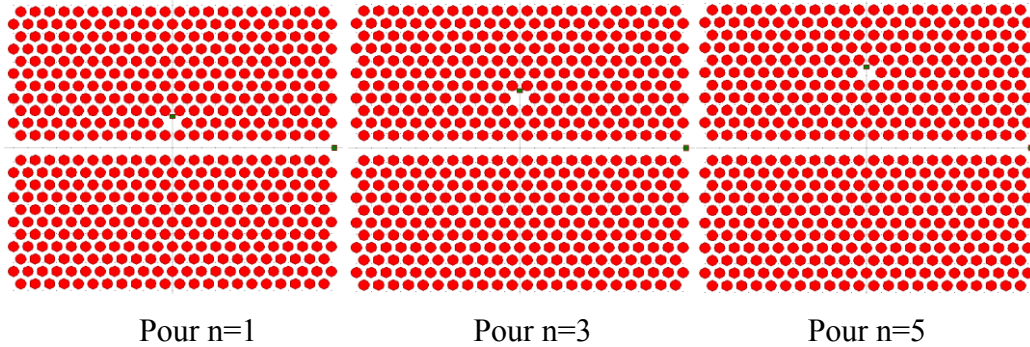


Figure III.18 : La structure étudiée d'un cristal photonique 2D : pour $n=1$, $n=3$ et $n=5$.

Sur la figure III.19, nous avons reporté la transmittance en fonction de la longueur d'ondes, on voit bien que plus le nombre de miroirs augmente, plus la transmittance diminue.

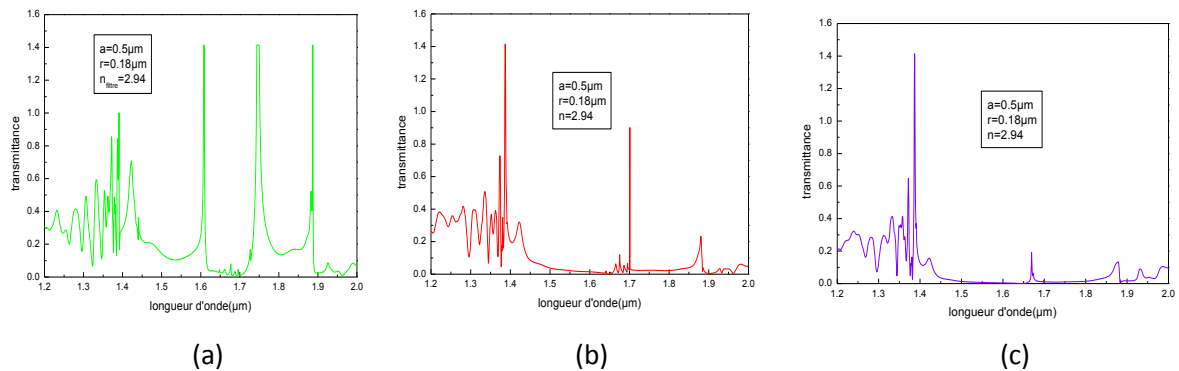


Figure III.19 : La transmittance en fonction du nombre de miroirs : (a) : pour $n=1$, (b) pour $n=3$ et (c) pour $n=5$.

III.7.3 :L'influence la taille de la cavité sur transmittance

Pour étudier l'influence de la taille de la cavité sur la Transmittance en fonction de la longueur d'onde, nous avons simulé trois structures composées d'un guide droit et trois cavités de taille différentes H1, H2 et H3. Comme il est schématisé sur la figure III.20.

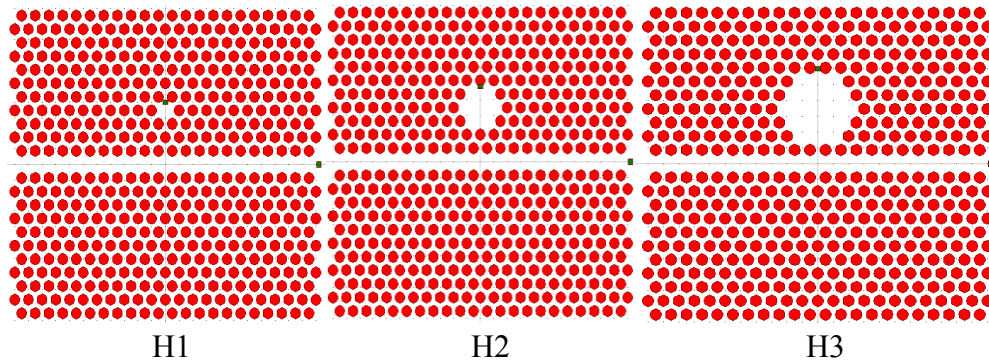


Figure III.20 : La structure étudiée pour trois types de microcavité : H1, H2 et H3.

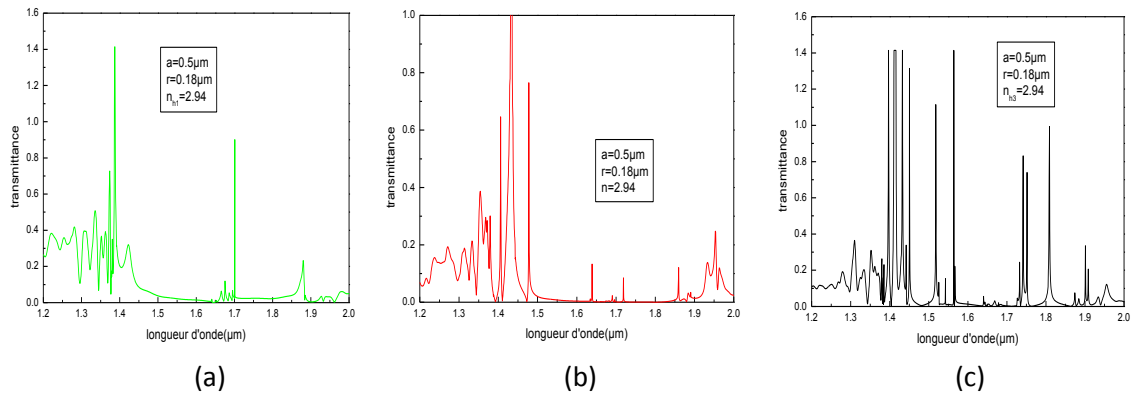


Figure III.21 : La transmittance en fonction de la longueur d'ondes pour trois cavités : (a) : pour H1, (b) pour H2 et (c) pour H3.

D'après les résultats, on peut constater que la taille de la cavité a une influence importante sur le nombre de longueur d'onde de résonance. Plus la taille de la cavité augmente, plus le nombre de fréquence de résonance augmente.

III.8. Etude de facteur de qualité

III.8.1. L'influence de l'indice de réfraction sur le facteur de qualité

Pour avoir l'influence de l'indice de réfraction (paramètre physique) sur les propriétés de la cavité photonique bidimensionnelles (CP2D). Nous avons considéré la cavité de type H1 obtenue en omettant une seule tige d'un réseau triangulaire composé de (23X23) rangés. Puis en utilisant le logiciel Fullwave de Rsoft, on a simulé le spectre de transmission pour trois matériaux différents en fixant tout d'abord les paramètres géométriques aux valeurs suivantes : le rayon des tiges « r » à $0.18\mu\text{m}$ et la période du réseau « a » à la valeur $0.5\mu\text{m}$. En effet, ces valeurs permettent l'ouverture d'une large bande interdite photonique autour de $\lambda=1.55\mu\text{m}$.

III.8.1.1. Filtre à base de GaAs

Sur la figure III.22(b), nous avons reporté le spectre de transmission de la cavité H1 obtenue après simulation dans le cas où $\lambda=1.55\mu\text{m}$ où l'on observe l'apparition d'un mode résonant à la longueur d'onde de résonance $\lambda_0=1.7029\mu\text{m}$ qui était interdite avant d'enlever la tige centrale. On trouve le facteur de qualité $Q=740.39$.

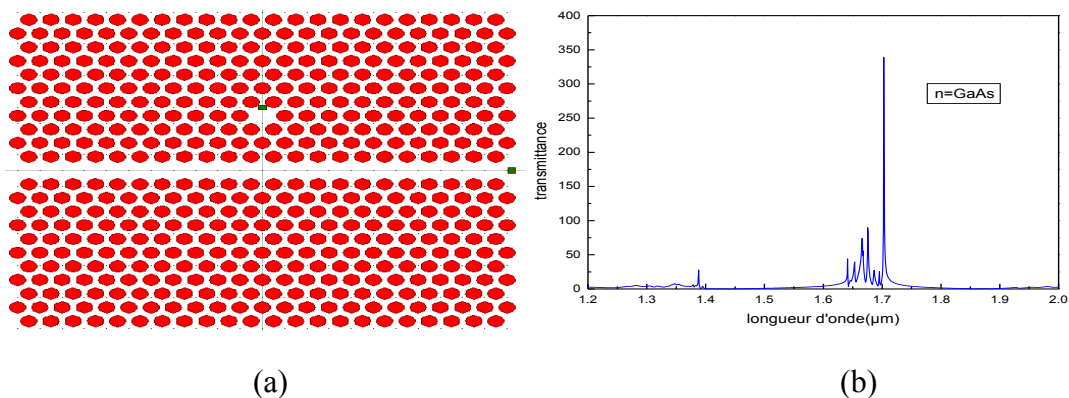


Figure III.22 : (a) Filtre à base de GaAs ($n_{\text{cav}}=2.94$), (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm).

III.8.1.2. Filtre à base de l'Indium de Phosphore (Inp)

Sur la figure III.23(b), nous avons reporté le spectre de transmission de la cavité H1 obtenue après simulation dans le cas où $\lambda=1.55\mu\text{m}$ où l'on observe l'apparition d'un mode résonant à la longueur d'onde de résonance $\lambda_0=1.7156\mu\text{m}$ qui était interdite avant d'enlever la tige centrale et un facteur de qualité $Q=248.63$.

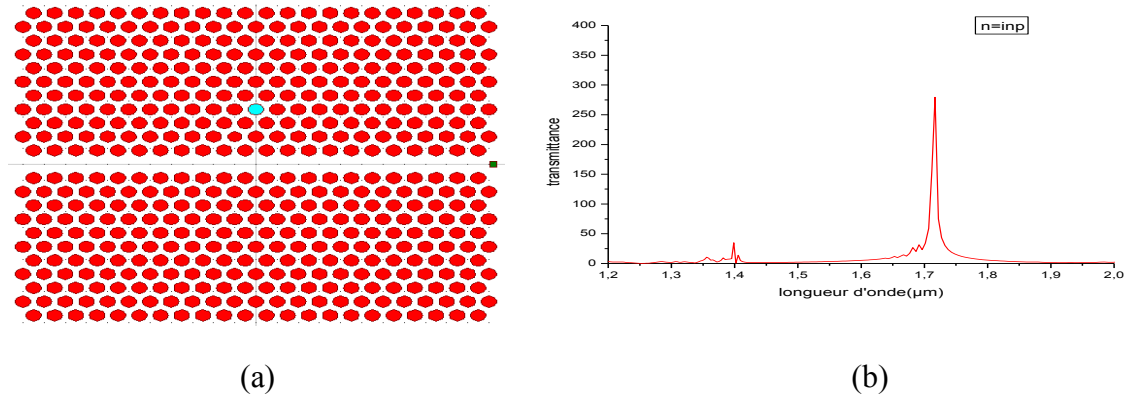


Figure III.23 :(a) Filtre à base de Indium de Phosphore ($n_{cav}=Inp$), (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm).

III.8.1.3.Filtre à base de Silicium

Sur la figure III.24(b), nous avons reporté le spectre de transmission de la cavité H1 obtenue après simulation dans le cas où $\lambda=1.55\mu m$ où l'on observe l'apparition d'un mode résonant à la longueur d'onde de résonance $\lambda_0=1.7429\mu m$ qui était interdite avant d'enlever la tige centrale et un facteur de qualité $Q=305.77$.

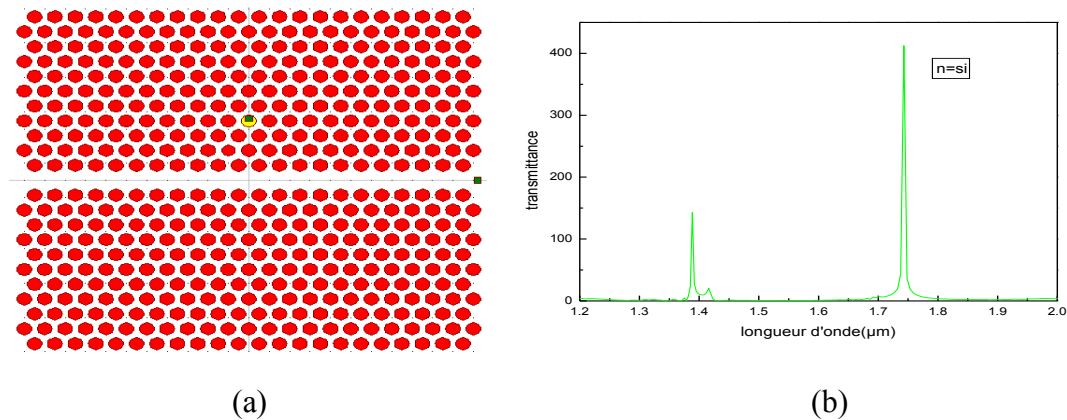


Figure III.24 :(a) Filtre à base de Silicium ($n_{cav}=Si$), (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm).

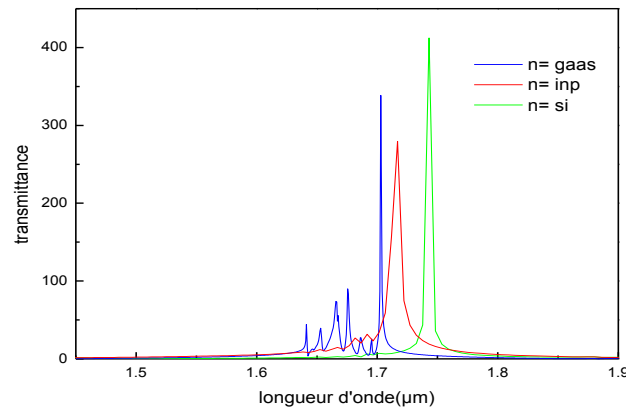


Figure III.25 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) pour trois l'indice de réfraction (2.94, 3.17, 3.42).

III.8.2. L'influence du rayon de trous sur le facteur de qualité

Pour voir l'influence du paramètre r sur les caractéristiques de la cavité H1, on va fixer tous les autres paramètres de la même structure, c'est-à-dire on reprend la même structure précédente avec une période $a=0.5\mu\text{m}$. Ensuite, on va effectuer une série de simulations en changeant le rayon « r » des tiges entre deux valeurs limites : rayon minimale et rayon maximale nécessaires pour l'ouverture des bandes. Puis, en utilisant le logiciel Fullwave on va calculer les spectres de transmission pour chaque valeur du rayon r . Cette opération est calcul le facteur de qualité pour l'indice de réfraction $n=2.94$.

III.8.2.1.L'influence du rayon sur le facteur de qualité ($r=0.16\mu\text{m}$)

La figure III.26, représente les spectres de transmission pour la cavité H1 dont la période du réseau $a=0.5\mu\text{m}$ et l'indice de réfraction des tiges des matériaux est $n=2.94$. Ce spectre est obtenu pour la valeur de rayon r des tiges de la cavité h1 est $r=0.16\mu\text{m}$ tout en gardant les autres paramètres fixes. La longueur d'onde de résonance est $\lambda_0=1.7481\mu\text{m}$. après la simulation par de fullwave on trouve le facteur de qualité $Q=273.14$

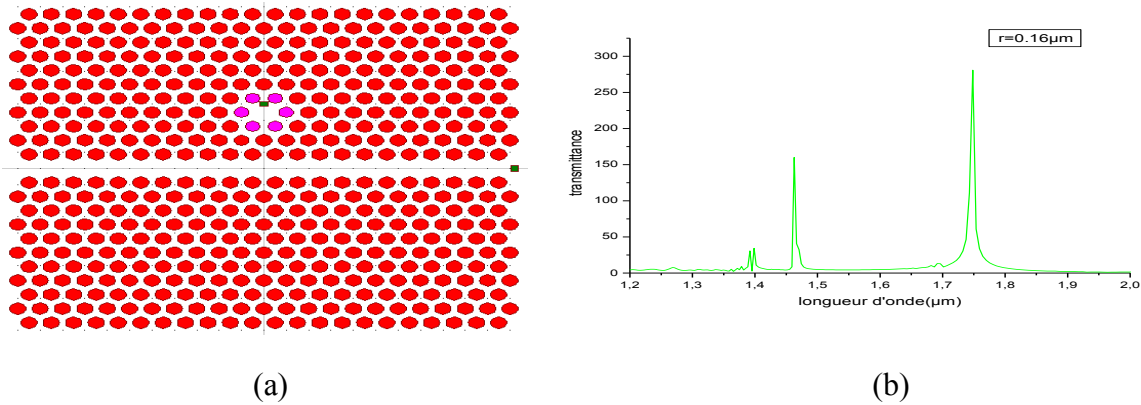


Figure III.26 : (a) le filtre ($r_{cav}=0.16\mu m$), (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm).

III.8.2.2. L'influence le rayon de cavité sur le facteur de qualité ($r=0.18\mu m$)

La figure III.27, représente les spectres de transmission pour la cavité H1 dont la période du réseau $a=0.5\mu m$ et l'indice de réfraction des tiges des matériaux est $n=2.94$. Ce spectre est obtenu pour la valeur de rayon r des tiges de la cavité h1 est $r=0.18\mu m$ tout en gardant les autres paramètres fixes. La longueur d'onde de résonance est $\lambda_0=1.7029\mu m$. après la simulation par de fullwave on trouve le facteur de qualité $Q=740.39$.

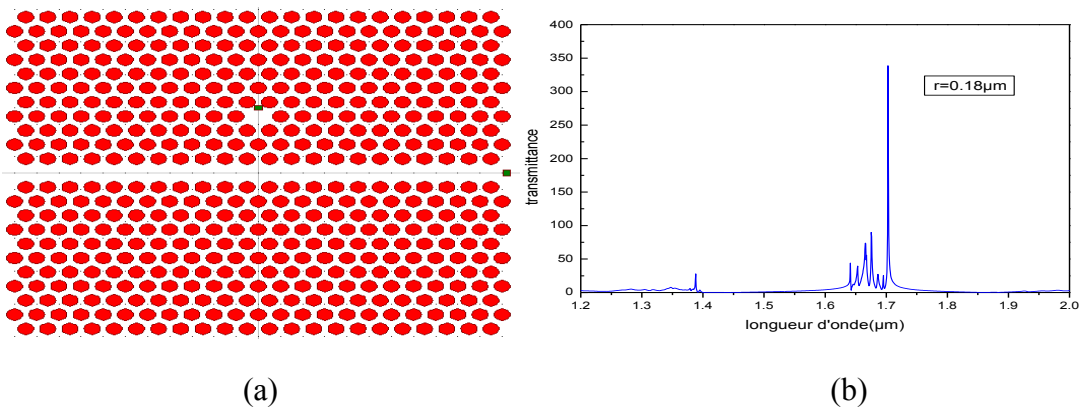


Figure III.27 : (a) le filtre ($r_{cav}=0.18\mu m$), (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm).

III.8.2.3. L'influence le rayon de cavité sur le facteur de qualité ($r=0.2\mu m$)

La figure III.28, représente les spectres de transmission pour la cavité H1 dont la période du réseau $a=0.5\mu m$ et l'indice de réfraction des tiges de matériaux est $n=2.94$. Ce spectre est obtenu pour la valeur de rayon r des tiges de la cavité h1 est $r=0.20\mu m$ tout en gardant les autres paramètres fixes. La longueur d'onde de résonance est $\lambda_0=1.5946\mu m$. après la simulation par de fullwave on trouve le facteur de qualité $Q=318.92$

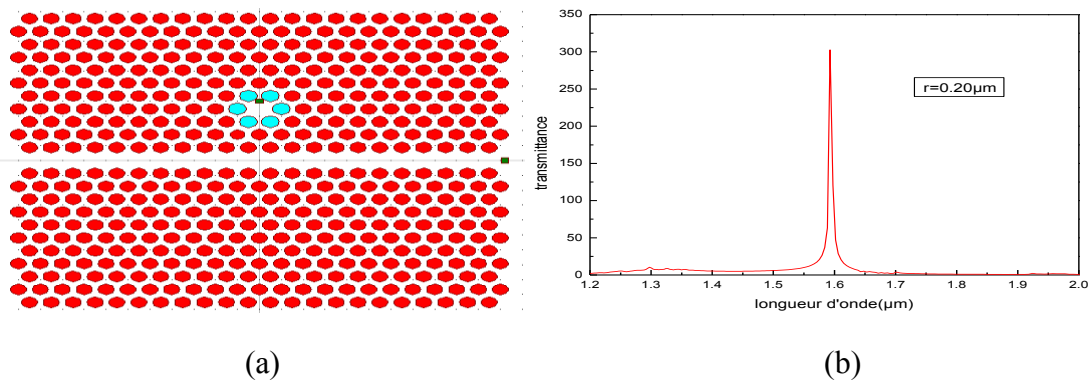


Figure III.28 : (a) le filtre ($r_{cav}=0.2\mu m$), (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm).

La figure III.29 est la comparaison l'influence le rayon de cavité sur le facteur de qualité par de trois valeur différente de rayon ($r=0.16\mu m$, $r=0.18\mu m$, $r=0.2\mu m$),

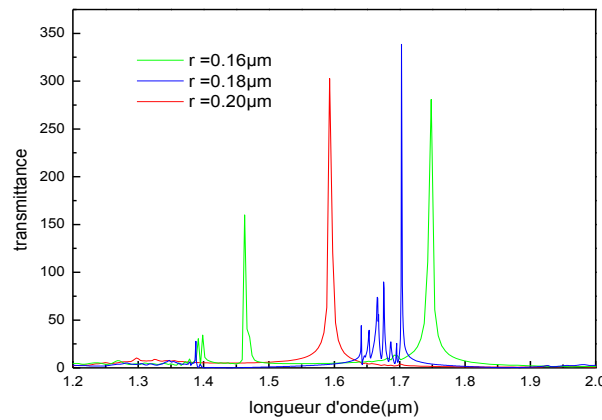


Figure III.29 : Spectre de transmission en fonction de la longueur d'onde (μm) pour trois rayons $r=0.16\mu m$; $r=0.18\mu m$ et $r=0.2\mu m$.

III.8.3.L'influence du guide d'onde sur le facteur de qualité

III.8.3.1.Les bords du guide à base de GaAs

La figure III.30(a) est représenté un filtre, l'indice de guide onde est $n=2.94$, L'intensité du champ en polarisation Tm pour la longueur d'onde de résonance $\lambda_0=1.7029 \mu m$ dans cette cavité est représentée sur la figure III.30 (b). après la simulation on trouve le facteur de qualité est $Q=740.39$.

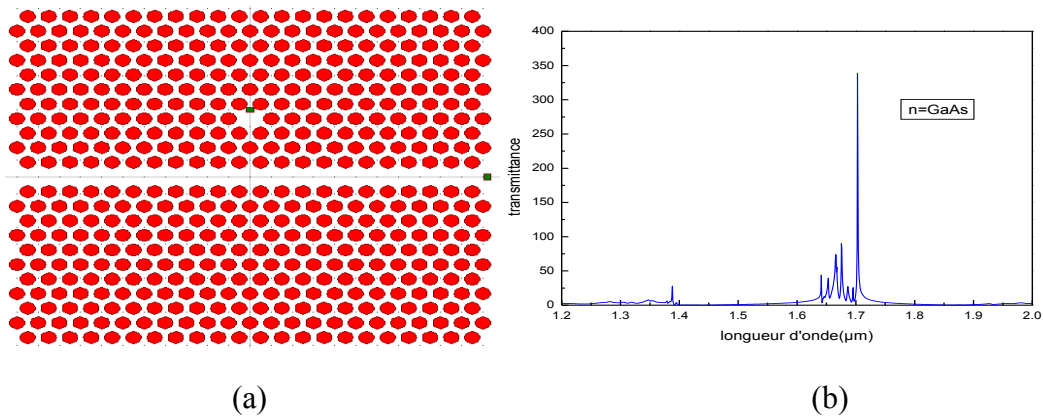


Figure III.30 : (a) le filtre étudié ($n_{\text{guide}} = \text{GaAs}$), (b) Spectre de transmission en fonction de la longueur d'onde (μm).

III.8.3.2. Les bords du guide à base d'Inp

La figure III.31(a) représente un filtre add-drop, composé d'un guide onde les trous remplacés par des tiges de Inp, l'indice de guide onde est $n = 3.17$, L'intensité du champ en polarisation Tm pour la longueur d'onde de résonance $\lambda_0 = 1.6675 \mu\text{m}$ dans cette cavité est représentée sur la figure III.31 (b). après la simulation on trouve le facteur de qualité est $Q = 277.91$.

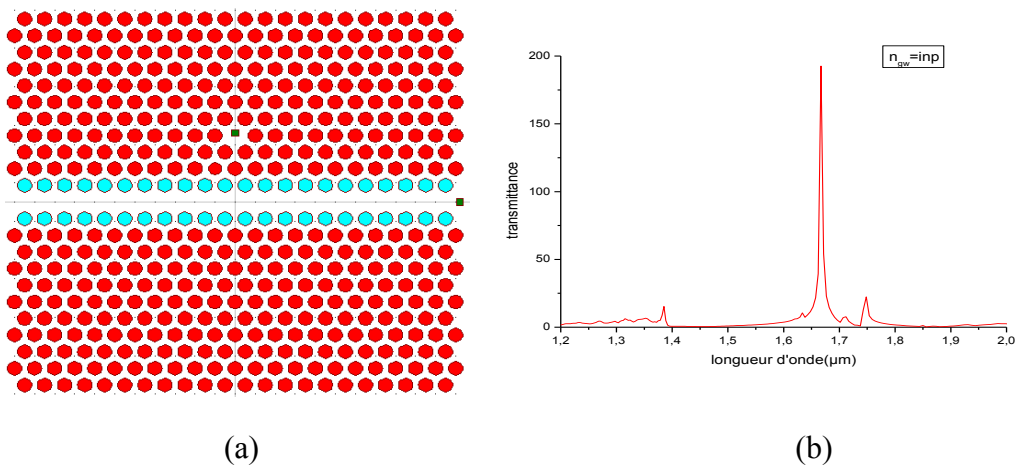


Figure III.31 : (a) le filtre étudié ($n_{\text{guide}} = \text{Inp}$), (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm).

III.8.3.3. Les bords du guide à base de Silicium

La figure III.32(a) est représenté un filtre, composé d'un guide onde les trous remplacés par des tiges de Si, l'indice de guide onde est $n=3.42$, L'intensité du champ en polarisation Tm pour la longueur d'onde de résonance $\lambda_0=1.6779 \mu\text{m}$ dans cette cavité est représentée sur la figure III.32 (b). après la simulation on trouve le facteur de qualité est $Q=322.673$.

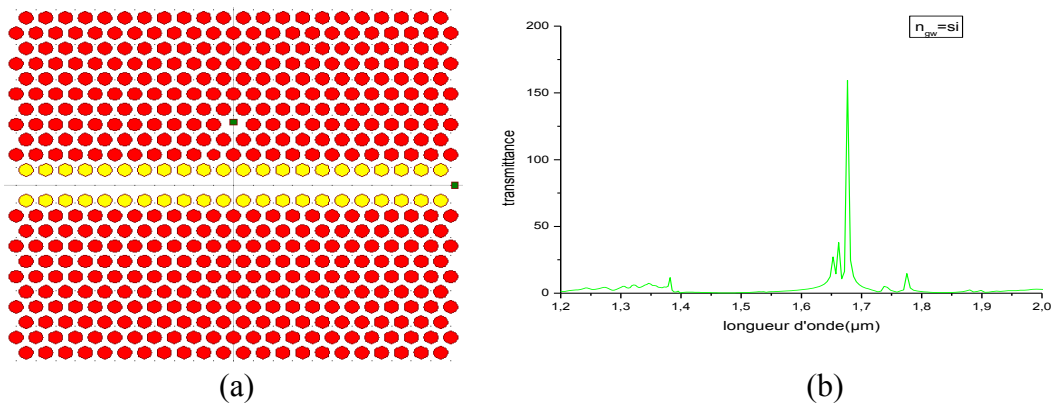


Figure III.32 :(a) le filtre étudié ($n_{\text{guide}}=\text{Si}$), (b) Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm).

La figure III.33 est représenté la Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) de trois l'indice de réfraction de guide onde. On trouve les trois facteurs de qualité est $Q_{\text{GaAs}}=281.084$, $Q_{\text{Inp}}=277.91$, $Q_{\text{Si}}=322.673$.

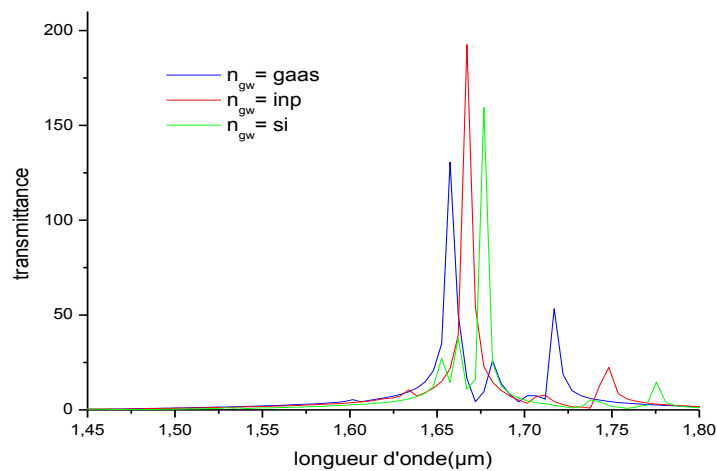


Figure III.33 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde (μm) de trois l'indice de réfraction de guide onde.

III.9. CONCLUSION

Dans ce travail, après étude de l'influence des paramètres géométriques d'un réseau triangulaire à cristal photonique bidimensionnels. La structure étudiée est dite connectée, elle est fabriquée à base GaAs d'indice de réfraction $n=2.94$. En utilisant le simulateur Bandsolve, on trouve une bande interdite photonique $\lambda_0 \in [1.37\mu\text{m}, 1.9\mu\text{m}]$, pour les paramètres $a=0.5\mu\text{m}$ et $r=0.18\mu\text{m}$. Puis, on a créé un guide onde droit. En utilisant le simulateur Fullwave pour trois matériaux d'indice différents on trouve qu'il y a un décalage des bandes vers les longueurs d'onde élevées. Ensuite, une cavité hexagonale H1 est étudiée en fonction de l'indice de réfraction. Les résultats montrent l'existence d'un décalage des bandes vers les longueurs d'onde élevées.

Dans la dernière partie, on crée un filtre de type Add-Drop et on l'étudie en fonction des paramètres géométriques (r , a) et physiques (n) sur le facteur de qualité.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire de master met en relief l'intérêt de l'utilisation des cristaux photoniques pour l'optique guidée. Les cristaux photoniques sont de nouveaux matériaux dont les propriétés optiques permettent de manipuler la lumière à l'échelle de la longueur d'onde. Ces cristaux sont des structures dont l'indice diélectrique varie fortement à l'échelle de la longueur d'onde sur une, deux ou trois directions de l'espace. Cela en fait des réflecteurs efficaces, multidirectionnels, et compacts dont l'utilisation permet d'envisager une réduction en taille des composants d'optique guidée.

Ces nouveaux matériaux pour l'optique intégrée peuvent être par exemple interdire la propagation de la lumière dans certaines directions et pour des énergies comprises dans ce que l'on appelle une bande interdite photonique BIP (ou un gap photonique). Aussi, ils permettent d'envisager la réalisation de dispositifs nanométriques pour la manipulation de la lumière. Des nouveaux comportements apparaissent, se différenciant nettement de ceux de l'optique traditionnelle.

Une des premières applications des cristaux photoniques qui a été proposée est le contrôle de l'émission spontanée d'un émetteur placé dans un cristal photonique. Brièvement, si la fréquence d'un émetteur placé dans un cristal photonique se situe dans la bande interdite photonique, l'émission spontanée est supprimée. Par contre l'émission de l'émetteur peut être exaltée, si sa fréquence coïncide avec des bandes permises dont la densité d'état est grande ou bien en utilisant des microcavités optiques de grand facteur de qualité [1].

Dans ce chapitre, nous avons constaté que la changee dans l'indice de réfraction affecte la longueur d'onde. Ce changement augmente également et nous avons trouvé un changement dans le facteur de qualité. Aussi nous avons changé le rayon de Cavite et aussi nous remplissons facteur pour divers trous aussi un changement dans le site et avons trouvé la longueur d'onde et le facteur de qualité.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1]. Bouanati Mohammed et Bellaredj Nabil, «conception des filtres à base des cristaux photoniques bidimensionnels par l'analyse de la BIP : modélisation par la FDTD- 2D», mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2013.
- [2]. Yablonovitch E, Phys. Rev. Lett, 58 (1987) 2059.
- [3]. S. John, « Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices», Phy. Rev. Lett. 58, 2486(1987).
- [4]. E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, K. M. Leung, « Photonic Band Structure: The Face-centred-Cubic Case Employing Nonspherical», Atoms, Phys. Rev. Lett., 67, p2295-2298 (1991).
- [5]. Gascon Annabelle, «fabrication et caractérisation de cristaux photonique pour exaltation de fluorescence», Thèse de doctorat, école polytechnique de Montréal, 2010.
- [6]. Abri badaoui Hadjira, «étude et conception des micro- composants a base des cristaux photoniques bidimensionnels», Thèse de doctorat, université de Tlemcen, 2012.
- [7]. Bougriou Feida, «Etude des guides d'ondes à cristaux photoniques bidimensionnels», mémoire de Magister, université mentouri Constantine, 2008.
- [8]. Lydie Ferrier «Micro-nanostructures à base de cristaux photoniques pour le contrôle 3D de la lumière », Ecole Centrale de Lyon, 2008.
- [9]. Benmerkhi Ahlem, « optimisation du confinement de la lumière dans des cavités a cristaux photoniques », Thèse de doctorat, Université de Constantine, 20/05/2012.
- [10]. Bendjelloul Rahima, «Etude du couplage dans les guides d'onde à cristaux photoniques », mémoire de Magister, université mentouri Constantine, 2009.
- [11]. E Yablonovitch, T.J. Gmitter, and K.M. Leung, « Photonic band structure: The face-centered -cubic case employing Nonspherical atoms», Physical Review Letters, vol. 67, no. 17, pp. 2295-2298, 1991.
- [12]. Marc zelsmann, «Cristaux photoniques en silicium sur isolant pour le guidage, le filtrage, l'émission et l'extraction de la lumière», Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble 1, novembre 2003.
- [13]. Benaissa Fatima «Etude et Simulation de la Propagation des Ondes Electromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques», mémoire de Magister, université de Tlemcen, 2012.
- [14]. Aidi Abderrahmane, « Etude et modélisation de la bande interdite photonique dans les cristaux Photoniques bidimensionnels : cas d'une structure connectée », mémoire de master, Université de M'sila, 2012.

-
- [15]. Benmerkhi Ahlem, «Influence des paramètres géométriques sur la cavité à cristaux photoniques bidimensionnels », mémoire de Magister, Université de Constantine, 2008.
- [16]. Boukarzaza Loubna «Influence des paramètres physiques sur la bande interdite photonique d'un cristal photonique bidimensionnel à réseau hexagonal», mémoire de magistère, Université de Constantine, 2008.
- [17]. Amel labani, « matériaux à bip à base de nanoparticules métalliques et semi-conductrices étude des propriétés optiques par FDTD», thèse de mdoctorat, université de Constantine, 2009.
- [18]. Bougriou faida : « étude théorique des matériaux a bandes interdites photoniques bidimensionnels : applications dans le domaine du guidage optique et la détection», Thèse de doctorat, Université de Constantine 1, 2013.
- [19]. Benoît Lombardet, «Étude et réalisation des cristaux photoniques pour l'optique intégrées», Thèse de doctorat n°3254, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (2005).
- [20]. Sandrine Massy, «Contribution à la réalisation de fonctions optiques à base de cristaux photoniques sur LiNbO_3 », Thèse de doctorat, Université de LIMOGES, 2004.
- [21]. Boubekri Fayçal et Chikha Amara Saliha, « Etude et dimensionnement d'un guide d'onde en arête à base du matériau (SiO_xN_y)», mémoire Master académique, université de kasdi merbah ouargla, 2014.
- [22]. Rsoft Design Group, Bandsolve v3.1, Inc. 200 Executive Blvd. Ossining, NY 10562. Fab: 2004.
- [23]. Rsoft Design Group, Fullwave v 3.0.9, Inc. 200 Executive Blvd. Ossining, NY 10562. Fab: 2004.

Résumé :

Les cristaux photoniques ou les matériaux à Bande Interdite Photonique, sont des nouvelles structures dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans l'espace. Pour cela, ces matériaux présentent des bandes de fréquence pour lesquelles la propagation de la lumière est interdite. Dans ces matériaux, la périodicité de l'indice diélectrique joue le même rôle pour les photons que la périodicité du potentiel ionique dans un cristal atomique pour les électrons. Cette analogie permet d'envisager l'utilisation des cristaux photoniques comme matériaux de base pour la réalisation de composants pour l'optique intégrée.

Avant de réaliser de véritables fonctions optiques et de contrôler la propagation de la lumière, il faut introduire des défauts ponctuels ou étendus dans ces matériaux. L'objectif de ce travail est l'étude et la simulation de l'influence de certains paramètres physiques et géométriques sur les propriétés optiques (la transmittance, la position et le facteur de qualité) d'un filtre à cristaux photoniques bidimensionnels en particulier un filtre appelé Add-Drop. Le filtre étudié est réalisé sur un substrat de l'arséniure de galium (GaAs).

Les résultats de simulations des paramètres physiques et géométriques (r et a) en utilisant Fullwave ont montré clairement qu'il y a une amélioration dans les propriétés optiques du filtre étudié.

Mots clés : Cristaux photoniques 2D, bande interdite, filtre à cristaux photoniques, optique intégrée, Fullwave, Bandsolve.